



Библиотека бакалавра

*100-летию ДонНТУ
посвящается*

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. Ф. Волков, Т. П. Лумпиева

КУРС ФИЗИКИ

В двух томах

Учебное пособие
для обучающихся образовательных учреждений
высшего профессионального образования

Том 2

- **КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**
- **ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА**
- **ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ**
- **ОСНОВЫ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА**
- **ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА**

Донецк
2019

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я7
В 67

Рекомендовано Учёным советом
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»
в качестве учебного пособия для обучающихся образовательных учреждений
высшего профессионального образования
(Протокол № 7 от 25.10.2019 года)

Рецензенты:

Мирошников Вадим Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы» Луганского национального университета им. Владимира Даля

Петренко Александр Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и нанотехнологий Донецкого национального университета, академик Академии технологических наук

Авторы:

Волков Александр Фёдорович – кандидат технических наук, профессор кафедры физики ГОУВПО «ДОННТУ»

Лумпиева Таисия Петровна – доцент кафедры физики ГОУВПО «ДОННТУ»

Волков, А. Ф.

В 67 Курс физики : учеб. пособие для обучающихся образоват. учреждений высш. проф. образования : в 2 т. Т. 2: Колебания и волны. Волновая и квантовая оптика. Элементы квантовой механики. Основы физики твёрдого тела. Элементы физики атомного ядра / А. Ф. Волков, Т. П. Лумпиева ; ГОУВПО «ДонНТУ». – Изд. 2-е, испр. и доп. – Донецк : ДОННТУ, 2019. – 279 с.

Учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Физика» для обучающихся образовательных учреждений высшего профессионального образования. Содержание второго тома составляют разделы: колебания и волны, волновая и квантовая оптика, элементы квантовой механики, основы физики твёрдого тела, элементы физики атомного ядра. Изложение материала ведётся без громоздких математических выкладок, основной акцент делается на физическую суть явлений и описывающих их законов.

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я7

© Волков А. Ф., Лумпиева Т. П., 2019

© Донецкий национальный технический университет, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения	8
ПРЕДИСЛОВИЕ	13
ЧАСТЬ 1. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	14
Глава 1. Колебания	14
§1 Общие сведения о колебаниях	14
1.1 Классификация колебаний	14
1.2 Характеристики колебаний	15
§2 Гармонические колебания	16
2.1 Скорость и ускорение при гармонических колебаниях	16
2.2 Дифференциальное уравнение гармонических колебаний	17
§3 Примеры систем, совершающих гармонические колебания	18
3.1 Пружинный маятник	18
3.2 Физический маятник	19
3.3 Математический маятник	20
3.4 Колебательный контур	21
§4 Энергия колебаний	24
§5 Сложение гармонических колебаний	25
5.1 Графическое изображение гармонических колебаний. Векторная диаграмма	25
5.2 Сложение одинаково направленных гармонических колебаний	26
5.3 Сложение взаимно перпендикулярных колебаний	28
§6 Затухающие колебания	31
6.1 Затухающие механические колебания	31
6.2 Затухающие электромагнитные колебания	33
6.3 Основные характеристики затухающих колебаний	34
6.4 Аперiodический процесс	36
§7 Вынужденные колебания	37
7.1 Вынужденные механические колебания	37
7.2 Вынужденные электромагнитные колебания	40
<i>Обратите внимание!</i>	46
<i>Тест для самоконтроля знаний по теме «Колебания»</i>	47
<i>Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем».</i>	54
<i>Коды ответов к тестам</i>	55
Глава 2. Упругие волны	56
§8 Общие сведения о волнах	56
8.1 Классификация волн	56
8.2 Характеристики волн	57
§9 Плоская монохроматическая волна	59
9.1 Уравнение плоской монохроматической волны	59

9.2 Волновое уравнение	61
9.3 Перенос энергии волной. Вектор Умова	62
§10 Звуковые волны	64
10.1 Характеристики звука	64
10.2 Ультразвук	66
10.3 Инфразвук	68
§11 Интерференция волн. Стоячие волны	69
11.1 Принцип суперпозиции волн. Интерференция волн	69
11.2 Стоячие волны	69
11.3 Сложные волны. Групповая скорость	72
§12 Эффект Доплера в акустике	75
Глава 3. Электромагнитные волны	77
§13 Уравнения Максвелла	77
§14 Электромагнитные волны	82
14.1 Плоская электромагнитная волна	82
14.2 Экспериментальное исследование электромагнитных волн	83
14.3 Основные свойства электромагнитных волн	84
14.4 Шкала электромагнитных волн	86
§15 Способы получения электромагнитных волн	88
15.1 Радиоволны	88
15.2 Электромагнитные волны оптического диапазона	89
15.3 Рентгеновское излучение	89
15.4 Гамма излучение	89
<i>Обратите внимание!</i>	92
<i>Тест для самоконтроля знаний по теме «Волны»</i>	93
<i>Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем».</i>	99
<i>Коды ответов к тестам.</i>	100
ЧАСТЬ 2. ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА	101
§16 Предварительные сведения	101
16.1 Некоторые сведения из геометрической оптики	101
16.2 Фотометрические величины	103
Глава 4. Волновая оптика	107
§17 Интерференция света	107
17.1 Интерференция. Когерентность	107
17.2 Условия максимумов и минимумов интерференции	108
17.3 Опыт Юнга	111
§18 Интерференция в тонких пленках	112
§19 Применение интерференции	116
§20 Дифракция света	118
20.1 Дифракционная решетка	119
20.2 Дифракция рентгеновских лучей	121
§21 Взаимодействие световых волн с веществом	123

21.1	Рассеяние световых волн	123
21.2	Поглощение световых волн	124
21.3	Преломление световых волн	124
21.4	Дисперсия световых волн	125
21.5	Давление световых волн	126
§22	Поляризация света	127
22.1	Общие сведения о поляризации	127
22.2	Закон Малюса	128
§23	Способы получения поляризованного света	129
23.1	Отражение от границы раздела двух диэлектриков. Закон Брюстера	129
23.2	Преломление света в тонкой пластинке	130
23.3	Двойное лучепреломление	131
23.4	Поглощение света в дихроических кристаллах	132
§24	Искусственное двойное лучепреломление. Эффект Керра	133
§25	Вращение плоскости поляризации	135
	<i>Обратите внимание!</i>	137
	<i>Тест для самоконтроля знаний по теме «Волновая оптика»</i>	138
	<i>Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем».</i>	145
	<i>Коды ответов к тестам.</i>	148
Глава 5. Квантовая оптика		149
§26	Тепловое излучение. Закон Кирхгофа	149
26.1	Характеристики теплового излучения	149
26.2	Классификация тел	151
26.3	Закон Кирхгофа	152
§27	Законы Стефана – Больцмана и Вина	154
§28	Гипотеза Планка. Формула Планка	155
§29	Оптическая пирометрия	156
§30	Внешний фотоэлектрический эффект. Законы фотоэффекта	158
§31	Фотон. Свойства фотона	161
§32	Эффект Комптона	163
	<i>Обратите внимание!</i>	165
	<i>Тест для самоконтроля знаний по теме «Квантовая оптика»</i>	166
	<i>Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем».</i>	173
	<i>Коды ответов к тестам.</i>	173
ЧАСТЬ 3. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ		174
Глава 6. Элементы квантовой механики		174
§33	Гипотеза де Бройля	174
§34	Вероятностный смысл волн де Бройля. Волновая функция	177
§35	Соотношения неопределенности Гейзенберга	178
§36	Волновое уравнение Шрёдингера	181
§37	Частица в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме	183

Глава 7. Физика атомов и молекул	185
§38 Атом водорода и водородоподобные ионы	185
38.1 Квантовые числа	186
38.2 Квантование энергии	186
38.3 Квантование орбитального момента импульса и магнитного момента	189
38.4 Пространственное квантование	190
38.5 Спин электрона	192
§39 Принцип Паули. Современные атомные системы	193
39.1 Принцип Паули. Периодическая система элементов Менделеева	193
39.2 Современные атомные системы	195
§40 Лазеры	199
40.1 Вынужденное излучение.	199
40.2 Принцип работы лазера	201
40.3 Способы накачки лазеров	202
40.4 Применение лазеров	203
<i>Обратите внимание!</i>	205
<i>Тест для самоконтроля знаний по теме «Элементы квантовой механики»</i>	206
<i>Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем».</i>	210
<i>Коды ответов к тестам.</i>	211
ЧАСТЬ 4. ОСНОВЫ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА	212
Глава 8. Электропроводность металлов и полупроводников	212
§41 Строение твёрдых тел	212
41.1 Дефекты в кристаллах	213
41.2 Энергетические зоны в кристаллах	214
§42 Электрические свойства твёрдых тел	217
42.1 Общие сведения	217
42.1 Электропроводность металлов	218
42.2 Электропроводность полупроводников	220
42.2.1 Собственная проводимость полупроводников	220
42.2.2 Примесная проводимость полупроводников	222
Глава 9. Контактные и термоэлектрические явления	227
§43 Электронно-дырочный переход. Полупроводниковый диод	227
§44 Внутренний фотоэффект	230
§45 Термоэлектрические явления	232
45.1 Явление Зеебека	232
45.2 Явление Пельтье	234
45.3 Явление Томсона	235
<i>Обратите внимание!</i>	236
<i>Тест для самоконтроля знаний по теме «Основы физики твёрдого тела»</i>	237

<i>Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем»</i>	239
<i>Коды ответов</i>	241
ЧАСТЬ 5. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА	242
Глава 10. Атомное ядро	242
§46 Состав и размеры ядер. Энергия связи ядер	242
46.1 Состав ядра	242
46.2 Характеристики атомного ядра	243
46.3 Размеры ядер	244
46.4 Свойства ядерных сил	244
46.5 Дефект массы ядра. Энергия связи	245
§47 Ядерные превращения	247
47.1 Ядерные реакции	247
47.2 Радиоактивность	248
47.2.1 Общие сведения	248
47.2.2 Закон радиоактивного распада	249
47.3 Использование явления радиоактивности для измерения времени	251
47.4 Гамма-излучение	252
§48 Элементарные частицы	253
Глава 11. Элементы дозиметрии	256
§49 Элементы дозиметрии ионизирующих излучений	256
49.1 Характеристики ионизирующих излучений	257
49.2 Основные нормативные данные по радиационному фактору	259
§50 Основные этапы развития физической картины мира.	261
<i>Обратите внимание!</i>	264
<i>Тест для самоконтроля знаний по теме «Элементы физики атомного ядра»</i>	264
<i>Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем»</i>	267
<i>Коды ответов</i>	268
Терминологический словарь.	269
Предметный указатель	273
Использованная литература	277

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A – работа, амплитуда колебаний

A_r – относительная атомная масса химического элемента

a – активность радиоактивного препарата

\vec{a} – ускорение

\vec{a}_n – нормальное ускорение

\vec{a}_τ – тангенциальное ускорение

\vec{B} – магнитная индукция

C – электрическая ёмкость (электроёмкость)

C_V – молярная теплоёмкость при постоянном объёме

C_P – молярная теплоёмкость при постоянном давлении

c_V – удельная теплоёмкость при постоянном объёме

c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении

c – скорость света в вакууме

D – коэффициент диффузии

\vec{D} – электростатическая индукция (электрическое смещение)

$d_{\text{эф}}$ – эффективный диаметр молекулы

E – освещённость

\vec{E} – напряжённость электрического поля

\vec{F} – сила

G – постоянная всемирного тяготения

g – ускорение свободного падения

\vec{H} – напряжённость магнитного поля

h – постоянная Планка

I – сила постоянного тока, интенсивность

i – индекс суммирования, число степеней свободы, сила тока

J – момент инерции

\vec{J} – намагничённость

\vec{j} – плотность тока, плотность потока энергии

K – коэффициент теплопроводности

k – коэффициент жёсткости, постоянная Больцмана, волновое число

L – индуктивность, уровень громкости

\vec{L} – момент импульса

l – орбитальное квантовое число

M – молярная масса

M_r – относительная молекулярная масса вещества

\vec{M} – момент силы

m – масса тела, магнитное квантовое число

m_0 – масса покоя, масса одной молекулы

N – сила нормальной реакции опоры, число молекул, механическая мощность

N_A – число Авогадро

n – концентрация, показатель преломления, главное квантовое число

P – мощность электрического тока, степень поляризации

\vec{P}_V – поляризованность

p – давление

\vec{p} – импульс тела, дипольный момент диполя

\vec{p}_m – магнитный момент контура с током

Q – количество тепла, тепло, добротность системы

q – электрический заряд

R – радиус окружности, молярная (универсальная) газовая постоянная, электрическое сопротивление

R_s – энергетическая светимость (излучательность)

r – коэффициент сопротивления среды

$r_{\lambda,T}$ – спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность)

\vec{r} – радиус-вектор

S – путь, энтропия, площадь

T – период вращения, период колебаний, термодинамическая (абсолютная) температура

$T_{1/2}$ – период полураспада

t – время

U – внутренняя энергия, напряжение

V – объём

$\langle v \rangle$ – среднеарифметическая скорость молекул газа

v_B – наиболее вероятная скорость молекул газа

$\langle v_{\text{кв}} \rangle$ – среднеквадратичная скорость молекул газа

\vec{v} – скорость

W – энергия, термодинамическая вероятность

W_k – кинетическая энергия

W_n – потенциальная энергия

w – объёмная плотность энергии

Z – порядковый номер элемента (зарядовое число)

$\langle z \rangle$ – среднее число столкновений за единицу времени

α – температурный коэффициент сопротивления

$\alpha_{\lambda,T}$ – поглощательная способность (монохроматический коэффициент поглощения)

β – коэффициент затухания

γ – показатель адиабаты

Δ – разность хода

$\Delta \vec{r}$ – перемещение

ε – относительное удлинение, диэлектрическая проницаемость среды, электродвижущая сила

$\vec{\varepsilon}$ – угловое ускорение

$\langle \varepsilon \rangle$ – средняя кинетическая энергия молекулы

η – коэффициент полезного действия, коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость)

λ – логарифмический декремент затухания, длина волны, постоянная распада

$\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега

μ – коэффициент трения, магнитная проницаемость среды

ν – частота вращения, частота колебаний, количество вещества (число молей)

ρ – плотность вещества, удельное сопротивление материала

$\rho_{\lambda, T}$ – отражательная способность

σ – механическое напряжение, поверхностная плотность заряда, удельная электропроводность, постоянная Стефана – Больцмана

τ – линейная плотность заряда, время релаксации

Φ – поток вектора напряжённости электрического поля, магнитный поток, световой поток

$\Phi_э$ – энергетический поток

φ – угол поворота, потенциал электростатического поля, фаза колебаний

φ_0 – начальная фаза колебаний

Ψ – полный магнитный поток (потокосцепление),

ψ – волновая функция

Ω – частота вынуждающей силы, телесный угол

$\vec{\omega}$ – угловая скорость

ω – циклическая частота

Греческий и латинский алфавиты

Для обозначения физических величин в физике используют греческие и латинские буквы, поэтому знание греческого и латинского алфавита облегчит понимание физического текста.

Алфавит греческий

Греческая буква	Название по-английски	Название по-русски
Α α	alpha	альфа
Β β	beta	бета
Γ γ	gamma	гамма
Δ δ	delta	дельта
Ε ε	epsilon	эпсилон
Ζ ζ	zeta	дзета
Η η	eta	эта
Θ θ	theta	тета
Ι ι	iota	йота
Κ κ	kappa	каппа
Λ λ	lambda	ламбда
Μ μ	mu	мю
Ν ν	nu	ню
Ξ ξ	xi	кси
Ο ο	omicron	омикрон
Π π	pi	пи
Ρ ρ	rho	ро
Σ σ	sigma	сигма
Τ τ	tau	тау
Υ υ	upsilon	ипсилон
Φ φ φ	phi	фи
Χ χ	chi	хи
Ψ ψ	psi	пси
Ω ω	omega	омега

Алфавит латинский

Латинская буква		Название буквы	Латинская буква		Название буквы
	Курсив			Курсив	
A, a	<i>A, a</i>	а	N, n	<i>N, n</i>	эн
B, b	<i>B, b</i>	бэ	O, o	<i>O, o</i>	о
C, c	<i>C, c</i>	це	P, p	<i>P, p</i>	пэ
D, d	<i>D, d</i>	дэ	Q, q	<i>Q, q</i>	ку, кю
E, e	<i>E, e</i>	е	R, r	<i>R, r</i>	эр
F, f	<i>F, f</i>	эф	S, s	<i>S, s</i>	эс
G, g	<i>G, g</i>	же, гэ	T, t	<i>T, t</i>	тэ
H, h	<i>H, h</i>	аш, ха	U, u	<i>U, u</i>	у
I, i	<i>I, i</i>	и	V, v	<i>V, v, v</i>	вэ
J, j	<i>J, j</i>	йот, жи	W, w	<i>W, w, w</i>	дубль-вэ
K, k	<i>K, k</i>	ка	X, x	<i>X, x</i>	икс
L, l	<i>L, l</i>	эль	Y, y	<i>Y, y</i>	игрек
M, m	<i>M, m</i>	эм	Z, z	<i>Z, z</i>	зет, зета

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Физика» для студентов, обучающихся по техническим и технологическим направлениям подготовки высших учебных заведений. Содержание первого тома составляют разделы: физические основы механики, молекулярная физика и термодинамика, электростатика и постоянный электрический ток, электромагнетизм. Содержание второго тома: колебания и волны, волновая и квантовая оптика, элементы квантовой механики, основы физики твёрдого тела, элементы физики атомного ядра.

Основная цель пособия – помочь студентам изучить курс физики. Авторы пытались, с одной стороны, максимально полно охватить все разделы курса, предусмотренные программой, а с другой – изложить весь материал компактно, не используя громоздких математических выкладок, пространных рассуждений и т. д. Основное внимание уделено сути рассматриваемых явлений, законам, описывающим эти явления, границам применимости законов; а также определениям физических величин, единицам измерения. Определения, формулировки законов, а также все новые термины и выводы выделены в тексте курсивом. Мелким шрифтом выделен дополнительный материал и материал, предназначенный для углублённого изучения тем. Математические знания, необходимые для пользования пособием, соответствуют обычному курсу математики во вузах.

Сводные таблицы, приведённые в тексте, а также большое количество ссылок и иллюстраций помогут вам лучше понять и усвоить учебный материал, а тесты – проверить уровень усвоения материала. В конце книги находится предметный указатель, который поможет отыскать нужные сведения, а также терминологический словарь.

Изучение материала рекомендуем проводить в два этапа:

- 1) беглое чтение материала всей темы с целью ознакомления с его структурой, выделением основных вопросов;
- 2) чтение с проработкой: на этом этапе надо понять весь материал.

Изучая курс физики, помните, что часть учебного материала подлежит **обязательному запоминанию**. Это определения, формулировки законов, единицы измерения физических величин. Чтобы **глубже понять** суть явлений, научиться видеть их как в природе, так и в технике, рекомендуем Вам ответить на вопросы рубрики «Давайте подумаем!», а также просмотреть лекционные демонстрации, ссылки на которые даны в соответствующих параграфах.

Методика решения задач, примеры их решения, методы обработки результатов эксперимента и их представления, а также правила обращения с простейшими приборами, рассматриваются в практикумах [1, 5].

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам: **В. В. Мирошникову**, профессору, заведующему кафедрой «Приборы» Луганского национального университета им. Владимира Даля и **А. Г. Петренко**, профессору кафедры теоретической физики и нанотехнологий Донецкого национального университета за полезные замечания и советы, которые были учтены при подготовке рукописи к печати. Также выражаем свою искреннюю благодарность и признательность **И. В. Лумпиеву** за оформление графического материала книги.

С замечаниями и предложениями по книге к авторам можно обратиться по электронной почте: af.volkov51@gmail.com , tplumpieva@gmail.com

ЧАСТЬ 1. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Глава 1. Колебания

Колебаниями называются процессы в той или иной мере повторяющиеся во времени. Колебания называются **периодическими**, если значения физических величин, изменяющихся в процессе колебания, повторяются через равные промежутки времени.

Колебания широко распространены в природе и технике. Радиотехника, электротехника переменных токов и некоторые другие отрасли техники целиком основаны на исследовании колебательных процессов. В физике колебания встречаются всюду: в оптике, акустике, механике, электричестве, теории атома.

Физическая сущность процессов, в которых имеют место колебания, различна: колебания частей машин и механизмов и колебания тока в контуре – совершенно разные явления. Но анализ колебательных процессов, встречающихся в физике и технике, показывает, что основные законы колебаний во всех случаях одинаковы.

Разнообразные применения теории колебаний очень тесно связаны друг с другом, поэтому их необходимо изучать с единой точки зрения: как математической, так и физической. Изучение колебаний с единой физической точки зрения значительно облегчает исследование тех колебательных процессов, в которых имеется связь колебаний различных величин, например, электрических и механических. В физике и технике такие устройства встречаются достаточно часто.

§1 Общие сведения о колебаниях

1.1 Классификация колебаний

В зависимости от физической природы повторяющегося процесса различают колебания:

- **механические** (колебания маятников, струн, частей машин и механизмов, сооружений, давления воздуха при распространении в нём звука и т. п.);
- **электромагнитные** (колебания переменного электрического тока в цепи; колебания векторов электрической напряжённости \vec{E} и магнитной индукции \vec{B} переменного электромагнитного поля и т. п.);
- **электромеханические** (колебания мембраны телефона, диффузора электродинамического громкоговорителя и т. п.).

Система, совершающая колебания, называется **колебательной системой** или **осциллятором**. В зависимости от характера воздействия, оказываемого на колебательную систему, различают колебания:

- собственные;
- затухающие;
- вынужденные;
- автоколебания.

Свободными называются колебания, которые происходят в системе, предоставленной самой себе после того, как ей был сообщён толчок, либо она была выведена из положения равновесия. Например, чтобы шарик, подвешенный на нити, начал колебаться, нужно толкнуть его, или, отведя в сторону, отпустить его. Свободные колебания называются **собственными**, если в колебательной системе можно пренебречь силами трения или тепловыми потерями.

Затухающими называются свободные колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени. Затухание механических колебаний связано с наличием сил трения и сопротивления. Затухание колебаний в электрических колебательных системах обусловлено тепловыми потерями в проводниках.

Вынужденными называются колебания, в процессе которых колеблющаяся система подвергается внешнему периодически изменяющемуся воздействию. Пример: колебания силы тока в электрической цепи, вызванные переменной эдс.

Автоколебаниями называются колебания, сопровождающиеся воздействием на колеблющуюся систему внешних сил, при этом система сама управляет этим воздействием. Например, в часах маятник получает толчок за счёт энергии поднятой гири или закрученной пружины, причём толчки происходят в тот момент, когда маятник проходит через положение равновесия.

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Автоколебания в часовом механизме.

<http://www.youtube.com/watch?v=CX3hVy98h38&list=PL0EF568B1B4D11D88>

1.2 Характеристики колебаний

Величинами, характеризующими колебания, являются:

1. Мгновенное значение колеблющейся величины $\xi(t)$

$$\xi(t) = f(t) = f(t + T), \quad (1.1)$$

где $f(t)$ – заданная периодическая функция времени.

Колеблющаяся величина определяет положение (координату, угол отклонения) или состояние (скорость, заряд, силу тока, напряжение,) колебательной системы (тела, электрического контура).

2. Амплитуда колебаний (A) – максимальное значение колеблющейся величины. Амплитуда – положительная величина.

3. Период колебаний (T) – время одного полного колебания: $T = \frac{t}{N}$.

$$[T] = \text{с}$$

4. Частота колебаний (ν) – число колебаний за единицу времени: $\nu = \frac{N}{t}$.

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (1.2)$$

$$[\nu] = 1/\text{с} = \text{Гц (герц)}$$

5. **Угловая или циклическая частота** (ω) – число колебаний за 2π секунд.

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \quad (1.3)$$

$[\omega] = \text{рад/с}$

6. **Фаза колебаний** (φ) – величина, определяющая мгновенное состояние колебательной системы.

$$\varphi = (\omega t + \varphi_0), \quad (1.4)$$

где φ_0 – начальная фаза (значение фазы при $t = 0$).

$[\varphi] = \text{рад}$.

§ 2 Гармонические колебания

Гармонические колебания – колебания, при которых изменение физических величин с течением времени происходит по закону косинуса или синуса:

$$\xi(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2.1)$$

или

$$\xi(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.1a)$$

Оба представления равноправны. В дальнейшем мы будем считать, что колеблющаяся величина изменяется по закону косинуса.

Этот вид колебаний особенно важен по следующим причинам.

Во-первых, большинство колебаний в природе и технике имеют характер, близкий к гармоническим.

Во-вторых, периодические процессы иной формы (с другой зависимостью от времени t) могут быть представлены как наложение нескольких гармонических колебаний.

Гармонические колебания скалярной величины определяются в целом тремя независимыми постоянными параметрами: частотой, амплитудой и начальной фазой. Амплитуда колебаний и начальная фаза определяются начальными условиями, а частота и период – свойствами колебательной системы. Если хотя бы один из этих параметров изменяется во времени, то колебания не будут гармоническими.

Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Маятник – запись колебаний песком.

http://www.youtube.com/watch?v=ta3u4S62_zM&list=PL05B9E2A8DC2A710F

2. Синусоида на осциллографе.

<http://www.youtube.com/watch?v=E8HwyQMKycc&list=PL05B9E2A8DC2A710F>

2.1 Скорость и ускорение при гармонических колебаниях

Из курса механики известно, что скорость изменения величины определяется как первая производная этой величины по времени:

$$v = \frac{d\xi}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -v_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = v_{\max} \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.2)$$

где $v_{\max} = A\omega_0$ – максимальное (амплитудное) значение скорости.

Ускорение определяется как вторая производная колеблющейся величины по времени:

$$a = \frac{d^2\xi}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -a_{\max} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = a_{\max} \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi), \quad (2.3)$$

где $a_{\max} = A\omega_0^2$ – максимальное (амплитудное) значение ускорения.

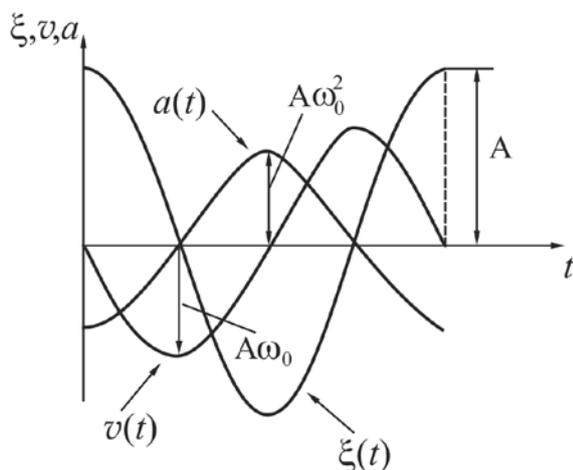


Рисунок 2.1

Гармонические колебания можно представить графически. Для случая $\varphi_0 = 0$ они имеют вид, показанный на рис. 2.1. Из формул (2.2) и (2.3) и сравнения графиков можно сделать следующие выводы:

- $\xi(t)$ и $a(t)$ колеблются в противофазе, то есть $a(t)$ опережает $\xi(t)$ по фазе на π ;
- $v(t)$ опережает $\xi(t)$ по фазе на $\pi/2$.

2.2 Дифференциальное уравнение гармонических колебаний

Согласно уравнению (2.3)

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Сравнив данное выражение с формулой (2.1), можно сделать вывод, что

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} = -\omega_0^2 \xi, \quad \text{или:}$$

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + \omega_0^2 \xi = 0 \quad (2.4)$$

Уравнение (2.4) называется **дифференциальным уравнением гармонических колебаний**. Оно представляет собой линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка. Дифференцирование ведётся по времени t .

Согласно обозначениям, принятым Ньютоном, производные по времени обозначаются следующим образом:

$$\frac{d\xi}{dt} = \dot{\xi}, \quad \frac{d^2\xi}{dt^2} = \ddot{\xi}. \quad (2.5)$$

Тогда дифференциальное уравнение гармонических колебаний можно записать в виде:

$$\ddot{\xi} + \omega_0^2 \xi = 0. \quad (2.6)$$

Если при анализе физических процессов той или иной природы, сделанных на основе законов и приближений, возникает уравнение подобного вида, то это означает, что рассмотренная система может совершать гармонические колебания. Частота колебаний будет определяться свойствами самой системы.

§3 Примеры систем, совершающих гармонические колебания

3.1 Пружинный маятник

Пружинный маятник – тело массой m , подвешенное на абсолютно упругой пружине и совершающее гармонические колебания под действием силы упругости.

Рассмотрим шарик массой m , прикрепленный к пружине жесткостью k (рис. 3.1). Сместим шарик от положения равновесия на расстояние, равное x , после чего предоставим систему самой себе. Возникшая сила упругости стремится вернуть шарик в положение равновесия. По закону Гука

$$F_{\text{упр}} = -kx. \quad (3.1)$$

По второму закону Ньютона

$$F_{\text{упр}} = ma, \quad (3.2)$$

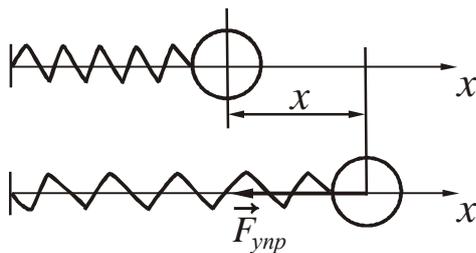


Рисунок 3.1

где a – ускорение, полученное шариком. Так как

$$a = \frac{d^2x}{dt^2},$$

то

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx. \quad (3.3)$$

Уравнение (3.3) приведём к каноническому виду. Для этого разделим обе части уравнения на массу m . Получим:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0. \quad (3.4)$$

Введём обозначение:

$$\frac{k}{m} = \omega_0^2. \quad (3.5)$$

Тогда с учётом (3.5) уравнение (3.4) можно переписать в виде:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (3.6)$$

где ω_0 – это физический параметр, характеризующий колебательные свойства системы и называемый **собственной циклической частотой** колебаний.

Таким образом, **движение шарика под действием упругой силы $F = -kx$ описывается дифференциальным уравнением гармонических колебаний.**

Общее решение уравнения (3.6) имеет вид:

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (3.7)$$

Период колебаний пружинного маятника:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (3.8)$$

В рассмотренном примере внутренней силой, вызывающей колебательное движение, является сила упругости пружины. Может случиться, что сила иного происхождения обнаруживает ту же закономерность, что и сила упругости, то есть оказывается равной $-kx$, где k – постоянная положительная величина. Силы такого вида, независимо от их природы, называются **квазиупругими**.

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Грузы на пружинах.

<http://www.youtube.com/watch?v=VR3HXUWvF0U&list=PL05B9E2A8DC2A710F>

3.2 Физический маятник

Физический маятник – твёрдое тело, совершающее колебания под действием силы тяжести относительно неподвижной горизонтальной оси, не проходящей через центр масс.

Отклоним маятник на угол α от положения равновесия (рис. 3.2). При этом возникает вращающий момент M , который стремится вернуть маятник в положение равновесия:

$$M = -mgl \sin \alpha, \quad (3.9)$$

где m – масса маятника, l – расстояние между точкой подвеса O и центром масс C . Знак « $-$ » поставили потому, что момент силы тяжести стремится уменьшить угол отклонения маятника.

Согласно основному закону динамики вращательного движения

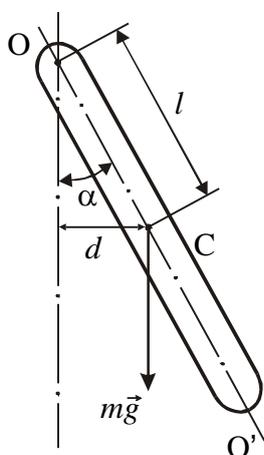


Рисунок 3.2

$$M = J\varepsilon, \quad (3.10)$$

где $\varepsilon = \frac{d^2\alpha}{dt^2}$ – угловое ускорение маятника,

J – момент инерции маятника относительно оси колебаний.

На основании (3.9) и (3.10) можно записать

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -mgl \sin \alpha. \quad (3.11)$$

Уравнение (3.11) является нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка. Колебания, описываемые этим уравнением, не будут гармоническими.

Если угол отклонения α мал (до $3^\circ \div 5^\circ$), то $\sin \alpha \approx \alpha$ (α должен быть выражен в радианах). Уравнение (3.11) в этом случае можно привести к виду:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{mgl}{J} \alpha = 0. \quad (3.12)$$

Введём обозначение:

$$\omega_0^2 = \frac{mgl}{J}. \quad (3.13)$$

Тогда:

$$\ddot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = 0 \quad (3.14)$$

Решение уравнений (3.12) и (3.14) имеет вид:

$$\alpha(t) = \alpha_{\max} \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3.15)$$

где $A = \alpha_{\max}$ – амплитуда колебаний, то есть наибольший угол, на который отклоняется маятник.

Следовательно, **малые колебания физического маятника являются гармоническими.**

Период гармонических колебаний физического маятника

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}. \quad (3.16)$$

3.3 Математический маятник

Математический маятник – материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити и совершающая колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести.

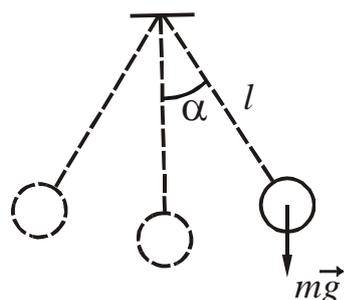


Рисунок 3.3

Хорошим приближением к математическому маятнику служит небольшой шарик массой m , подвешенный на длинной нити длиной l (рис. 3.3). Математический маятник можно рассматривать как предельный случай физического маятника, масса которого сосредоточена в одной точке.

Движение физического маятника описывается уравнением (3.12):

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{mgl}{J}\alpha = 0.$$

Если нить длинная, то шарик можно считать материальной точкой. Момент инерции J шарика относительно оси колебаний в этом случае равен:

$$J = ml^2.$$

Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{ml^2}{mgl}} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (3.17)$$

Из сопоставления формул (3.16) и (3.17) получается, что математический маятник с длиной

$$l_{\text{пр}} = \frac{J}{ml} \quad (3.18)$$

будет иметь такой же период колебаний, как и данный физический маятник.

Величину (3.18) называют приведённой длиной физического маятника. Таким образом, **приведённая длина физического маятника** – это длина такого математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника.

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Физический маятник.

<http://www.youtube.com/watch?v=DooyKODtvzo&list=PL05B9E2A8DC2A710F>

3.4 Колебательный контур

Колебательный контур – цепь, содержащая катушку индуктивностью L и конденсатор ёмкостью C (рис. 3.4).

Колебания в контуре можно вызвать, сообщив обкладкам конденсатора некоторый начальный заряд. Замкнём ключ K в положение 1 (рис. 3.5). На обкладках возникнут два разноимённых заряда $+q$ и $-q$. Между ними возникнет электрическое поле, энергия которого

$$W_{\text{эл}} = \frac{q^2}{2C}. \quad (3.19)$$

Если затем отключить источник напряжения и замкнуть конденсатор на индуктивность (ключ К – в положении 2), то конденсатор начнёт разряжаться, в контуре потечёт ток. В результате этого энергия электрического поля будет уменьшаться, зато возникнет магнитное поле с энергией

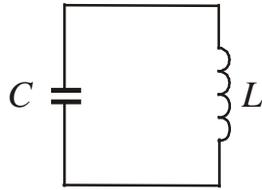


Рисунок 3.4

$$W_M = \frac{LI^2}{2}, \quad (3.20)$$

которая возрастает. Активное сопротивление $R = 0$, поэтому полная энергия не расходуется на нагревание проводов и остается величиной постоянной

$$W_{эл} + W_M = \text{const}$$

или

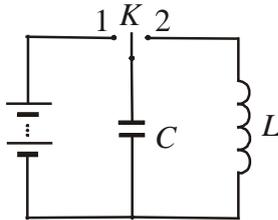


Рисунок 3.5

$$\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}. \quad (3.21)$$

Продифференцируем функцию (3.21) по времени, произведём сокращения и, разделив каждый член уравнения на L , получим:

$$I \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} q \frac{dq}{dt} = 0. \quad (3.22)$$

Так как по определению $\frac{dq}{dt} = I$, то, соответственно:

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{d^2 q}{dt^2}. \quad (3.23)$$

На основании этого можно записать:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (3.24)$$

Введём обозначение

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2 \quad (3.25)$$

и приведём уравнение (3.24) к виду:

$$\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0. \quad (3.26)$$

Решением этого уравнения является функция

$$q = q_{\max} \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3.27)$$

где q_{\max} – максимальное (амплитудное) значение заряда.

Таким образом, *заряд на обкладках конденсатора изменяется по гармоническому закону*. Для периода колебаний колебательного контура получается формула, которая называется *формулой Томсона**:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (3.28)$$

Напряжение на конденсаторе отличается от заряда множителем $1/C$ (напомним, что по определению $C = q/U$):

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_{\max}}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_{\max} \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3.29)$$

где $U_{\max} = q_{\max}/C$ – амплитудное значение напряжения.

Продифференцировав функцию (3.27) по времени, получим выражение для силы тока:

$$I = -\omega_0 q_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = I_{\max} \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.30)$$

где $I_{\max} = \omega_0 q_{\max}$ – амплитудное значение силы тока.

Таким образом, сила тока опережает по фазе напряжение на конденсаторе на $\pi/2$.

• **Давайте подумаем!**

3.1. Математический маятник перенесли из воздуха в воду. Маятнику придана идеально обтекаемая форма, и можно принять, что трение о воду равно нулю. Изменится ли период колебаний?

3.2. Под математическим маятником в виде железного шарика поместили магнит. Как изменится период колебаний?

3.3. Стержень колеблется относительно горизонтальной оси, которая проходит через его верхний конец. Небольшой груз можно закреплять в разных местах стержня. Как изменится период колебаний, если груз из середины стержня переместить на нижний конец?

3.4. Воронка с песком подвешена на нити. Будет ли меняться период колебаний такого маятника по мере того, как песок будет высыпаться из воронки?

3.5. Пружина обладает массой m' . Поясните качественно, как изменится период колебаний пружинного маятника, если эту массу принять во внимание?

3.6. Как можно возбудить свободные колебания в электрическом колебательном контуре?

3.7. Какие физические величины изменяются при колебаниях в колебательном контуре?

*Томсон Уильям (лорд Кельвин) (1824–1907), английский физик.

3.8. Как изменится собственная частота колебаний колебательного контура, если: 1) между обкладками воздушного конденсатора контура ввести диэлектрик; 2) в катушку ввести сердечник: а) из ферромагнетика; б) из диамагнетика?

3.9. Почему в колебательном контуре колебания не прекращаются в тот момент, когда конденсатор разряжается полностью?

3.10. Дан колебательный контур, активное (омическое) сопротивление которого пренебрежимо мало. От чего зависят частота и амплитуда колебаний тока и напряжения?

3.11. В колебательном контуре изменили начальную величину заряда на конденсаторе. Какие характеристики возникающих в контуре электрических колебаний могут от этого измениться, какие останутся неизменными?

3.12. Совпадают ли фазы колебаний напряжения на обкладках конденсатора и тока в колебательном контуре? Если не совпадают, то каков сдвиг фаз?

3.13. С помощью электронного осциллографа исследуют напряжение, изменяющееся по гармоническому закону $U = U_0 \cos \omega t$, где ω и U_0 – постоянные величины. Какие изменения произойдут в форме получающейся на экране синусоиды, если: а) увеличить период разворачивающего напряжения? б) уменьшить максимальное значение исследуемого напряжения?

§4 Энергия колебаний

Установим характер изменения энергии на примере колебаний пружинного маятника. Они совершаются под действием упругой силы. Потенциальная энергия гармонического колебания

$$W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{k}{2} A^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (4.1)$$

Кинетическая энергия гармонического колебания

$$W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} A^2 \omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (4.2)$$

Полная механическая энергия гармонического колебания:

$$\begin{aligned} W &= W_{\text{к}} + W_{\text{п}}, \\ W &= \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{kA^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= \frac{kA^2}{2} \left[\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) \right] = \frac{kA^2}{2}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

так как согласно (3.5) $k = m\omega_0^2$ (см. §3, п.3.1).

Таким образом, полная энергия гармонического колебания равна:

$$W = \frac{kA^2}{2}. \quad (4.4)$$

Это означает, что **полная энергия гармонического колебания остается величиной постоянной**. Отметим, что полная энергия пропорциональна квадрату амплитуды.

Таким образом, с энергетической точки зрения колебательный процесс

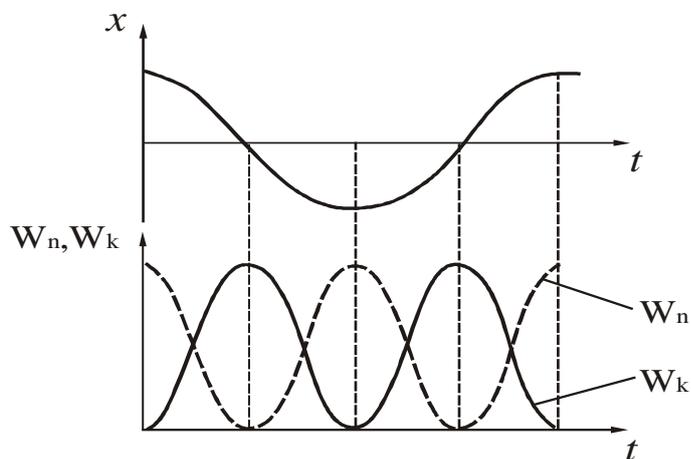


Рисунок 4.1

представляет собой превращение энергии одного вида в энергию другого вида. Процесс перехода энергии из одного вида в другой является периодическим (рис. 4.1). При механических колебаниях происходят превращения кинетической энергии в потенциальную, и наоборот. Частота изменения энергии в 2 раза превышает частоту колебаний. В моменты наибольшего смещения x потенциальная энергия W_n достигает максимума. При прохождении системой положения равновесия ($x = 0$) потенциальная энергия равна нулю, а кинетическая энергия максимальна. Наибольшие значения кинетической и потенциальной энергии равны между собой.

Аналогичные периодические превращения энергии происходят в колебательном контуре. Энергия электрического поля превращается в энергию магнитного поля и наоборот.

§5 Сложение гармонических колебаний

Любая колебательная система в общем случае может совершать одновременно несколько колебаний, которые отличаются друг от друга частотой, фазой, направлением. Сложение нескольких колебаний значительно облегчается и становится наглядным, если изображать колебания графически в виде векторов на плоскости.

5.1 Графическое изображение гармонических колебаний. Векторная диаграмма

Возьмём ось, которую обозначим буквой x . Из точки O , взятой на оси, под углом, равным начальной фазе колебаний φ_0 , отложим вектор длиной, равной амплитуде A (рис. 5.1).

Если привести вектор во вращение с постоянной угловой скоростью ω_0 , то проекция конца вектора будет меняться в пределах от $-A$ до $+A$. С течением времени угол, который образует \vec{A} с осью, будет изменяться по закону

$$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0.$$

Соответственно, проекция вектора \vec{A} на ось x будет изменяться по закону

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

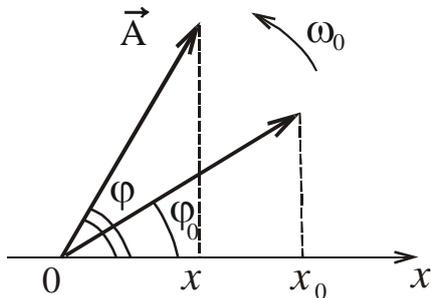


Рисунок 5.1

то есть совершать гармонические колебания.

Из сказанного следует, что гармоническое колебание можно представить в виде вектора, длина которого равна амплитуде колебания, а направление вектора образует с осью x угол, равный фазе колебания. Полученная схема называется **векторной диаграммой**.

5.2 Сложение одинаково направленных гармонических колебаний

Сложение двух одинаково направленных гармонических колебаний можно пронаблюдать на примере колебаний шарика, подвешенного на пружине в вагоне. Шарик колеблется на пружине относительно точки подвеса и вместе с вагоном колеблется на рессорах относительно земли (рис. 5.2). Оба колебания имеют одинаковое направление.

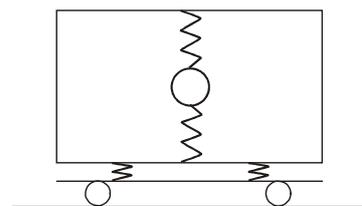


Рисунок 5.2

а). Рассмотрим сложение колебаний одинаковой частоты, т. е. $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$. Смещение x колеблющейся точки будет равно сумме смещений x_1 и x_2 , которые описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_{01}) \\ x_2 &= A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_{02}) \end{aligned} \quad (5.1)$$

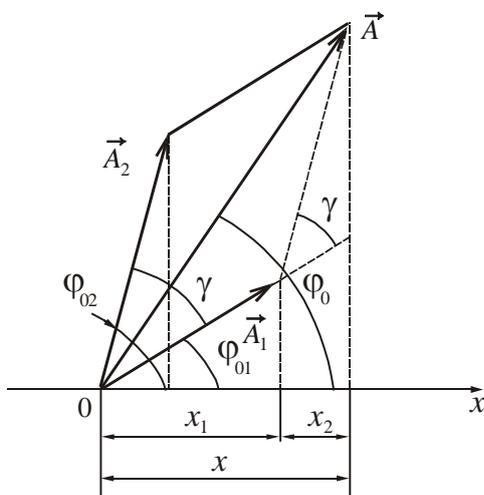


Рисунок 5.3

Оба колебания представим в виде векторов \vec{A}_1 и \vec{A}_2 и сложим их по правилу параллелограмма (рис. 5.3). Проекция вектора \vec{A} на ось x равна сумме проекций слагаемых векторов:

$$x = x_1 + x_2.$$

Следовательно, вектор \vec{A} представляет собой результирующее колебание. Этот вектор вращается с той же угловой скоростью ω_0 , что и векторы \vec{A}_1 и \vec{A}_2 . Следовательно, **результатирующее движение будет гармоническим колебанием**,

которое происходит в том же направлении с той же частотой ω_0 .

A – амплитуда результирующего колебания, φ_0 – его начальная фаза.

$$x = x_1 + x_2 = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (5.2)$$

Из рис. 5.3 по теореме косинусов следует:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \gamma. \quad (5.3)$$

Найдём амплитуду A , сделав замену $\gamma = \varphi_{02} - \varphi_{01}$ в (5.3):

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01})}. \quad (5.4)$$

Из рис. 5.3 определяем начальную фазу φ_0 результирующего колебания:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{A_1 \sin \varphi_{01} + A_2 \sin \varphi_{02}}{A_1 \cos \varphi_{01} + A_2 \cos \varphi_{02}}. \quad (5.5)$$

Рассмотрим частные случаи.

1) Если разность фаз равна чётному числу π : $\varphi_{02} - \varphi_{01} = 2m\pi$, где $m = 0, 1, 2, \dots$, то $\cos(\varphi_{02} - \varphi_{01}) = 1$. В этом случае результирующая амплитуда равна сумме амплитуд: $A = A_1 + A_2$. Это означает, что колебания усиливают друг друга.

2) Если разность фаз равна нечётному числу π : $\varphi_{02} - \varphi_{01} = (2m + 1)\pi$, где $m = 0, 1, 2, \dots$, то $\cos(\varphi_{02} - \varphi_{01}) = -1$. В этом случае результирующая амплитуда равна разности амплитуд: $A = A_1 - A_2$. Это означает, что колебания ослабляют друг друга.

Итак, представление гармонических колебаний в виде векторов позволяет свести сложение нескольких колебаний к операции сложения векторов.

б). Рассмотрим сложение колебаний одного направления с различными, но близкими частотами. В результате получаются негармонические колебания называемые *биениями*.

Обозначим частоту одного колебания ω , а частоту второго – $(\omega + \Delta\omega)$. По условию $\Delta\omega \ll \omega$. Будем считать, что амплитуды обоих колебаний одинаковы и равны A . За начало отсчёта времени примем момент, когда начальные фазы равны нулю. Тогда уравнения колебаний будут иметь вид:

$$x_1 = A \cos \omega t, \quad (5.6)$$

$$x_2 = A \cos(\omega + \Delta\omega)t. \quad (5.7)$$

Результирующее колебание опишется уравнением

$$x = x_1 + x_2 = A(\cos \omega t + \cos(\omega + \Delta\omega)t) = 2A \cos \frac{\Delta\omega t}{2} \cos \omega t$$

(во втором сомножителе пренебрегаем слагаемым $\Delta\omega/2$ по сравнению с ω).

Таким образом, уравнение, описывающее биения, имеет вид:

$$x = \left| 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right| \cos \omega t. \quad (5.8)$$

Изменение x будет определяться частотой ω , а выражение под знаком модуля меняется медленно и определяет амплитуду биений. Знак модуля поставили потому, что амплитуда по определению величина положительная.

Таким образом, биения можно рассматривать как почти гармоническое колебание с медленно меняющейся амплитудой. График функции (5.8) дан на рис. 5.4. Амплитуда $A(t) = \left| 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right|$ характеризует размах колебаний при биениях. Частота $\Delta\omega$ изменения амплитуды называется частотой биений, она равна разности частот складываемых колебаний.

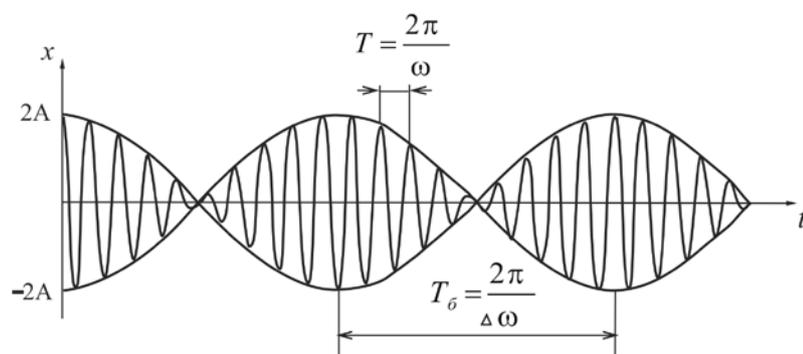


Рисунок 5.4

Период биений

$$T_{\text{биен}} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}. \quad (5.9)$$

Биения используют для измерения частоты колебаний путем их сравнения с частотой эталонных колебаний, например, при настройке музыкальных инструментов.

Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Запись биений песком.

<http://www.youtube.com/watch?v=sA8YxTrS5dU&list=PLC16C189B21D0F649>

2. Биение на камертонах.

<http://www.youtube.com/watch?v=gfC3HXepxgE&list=PLC16C189B21D0F649>

3. Биения на осциллографе – 1.

<http://www.youtube.com/watch?v=-sjLkrjJkxU&list=PLC16C189B21D0F649>

4. Биения на осциллографе – 2.

<http://www.youtube.com/watch?v=EnFerU0eiWo&list=PLC16C189B21D0F649>

5.3 Сложение взаимно перпендикулярных колебаний

Сложение взаимно перпендикулярных колебаний можно пронаблюдать на примере шарика, закреплённого на пружинах в вагоне (рис. 5.5). Шарик колеблется на пружинах вдоль направления движения вагона и вместе с вагоном колеблется на рессорах перпендикулярно направлению движения.

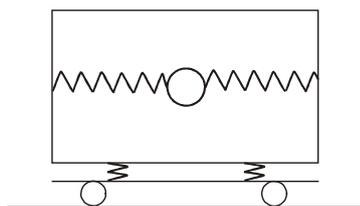


Рисунок 5.5

Пусть точка совершает гармонические колебания одной и той же частоты, происходящие вдоль координатных осей x и y . Начало отсчёта вы-

берем так, чтобы начальная фаза первого колебания была равна нулю. Тогда уравнения колебаний запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= A_1 \cos \omega t \\ y &= A_2 \cos(\omega t + \alpha) \end{aligned} \quad (5.10)$$

где $\alpha = \varphi_{02} - \varphi_{01}$ – разность фаз складываемых колебаний. Эти два уравнения составляют систему, которая задаёт траекторию движения в параметрической форме. Чтобы получить уравнение траектории в обычной форме, исключим из (5.10) параметр t . Из первого уравнения

$$\cos \omega t = \frac{x}{A_1}, \quad (5.11)$$

следовательно

$$\sin \omega t = \sqrt{1 - \cos^2 \omega t} = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{A_1}\right)^2}. \quad (5.12)$$

Из второго уравнения системы (5.10) по формуле косинуса суммы имеем:

$$\frac{y}{A_2} = \cos(\omega t + \alpha) = \cos \omega t \cdot \cos \alpha - \sin \omega t \cdot \sin \alpha. \quad (5.13)$$

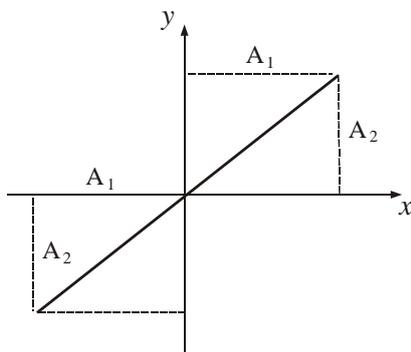


Рисунок 5.6

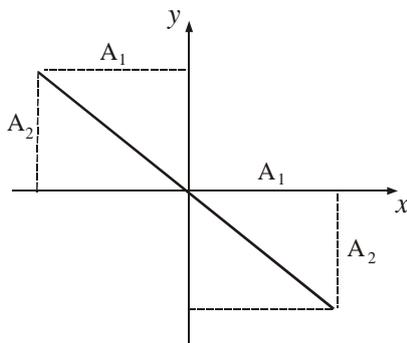


Рисунок 5.7

В выражение (5.13) подставим вместо $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$ их значения по формулам (5.11) и (5.12). В результате получим:

$$\frac{y}{A_2} = \frac{x}{A_1} \cdot \cos \alpha - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{A_1}\right)^2} \cdot \sin \alpha. \quad (5.14)$$

После математических преобразований это уравнение можно привести к виду (попробуйте выполнить это самостоятельно):

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos \alpha = \sin^2 \alpha. \quad (5.15)$$

Из аналитической геометрии известно, что уравнение (5.15) представляет собой уравнение эллипса, оси которого ориентированы относительно координатных осей x и y произвольно.

Рассмотрим некоторые частные случаи.

1. Разность фаз складываемых колебаний $\alpha = \Delta\varphi = 0$.

В этом случае уравнение (5.15) примет вид

$$\left(\frac{x}{A_1} - \frac{y}{A_2} \right)^2 = 0.$$

Из него получается уравнение прямой, проходящей через начало координат и лежащей в I и III четвертях (рис. 5.6)

$$y = \frac{A_2}{A_1} x. \quad (5.16)$$

2. Разность фаз складываемых колебаний $\alpha = \Delta\varphi = \pm\pi$.
Уравнение (5.15) примет вид:

$$\left(\frac{x}{A_1} + \frac{y}{A_2} \right)^2 = 0.$$

Из него получается уравнение прямой, проходящей через начало координат и лежащей в II и IV четвертях (рис. 5.7):

$$y = -\frac{A_2}{A_1} x. \quad (5.17)$$

3. Разность фаз складываемых колебаний $\alpha = \Delta\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$.

Уравнение (5.15) переходит в следующее:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1, \quad (5.18)$$

то есть в каноническое уравнение эллипса. Полуоси эллипса равны соответствующим амплитудам. Если $A_1 = A_2 = R$, то эллипс вырождается в окружность

$$x^2 + y^2 = R^2. \quad (5.19)$$

Случаи $\alpha = \pi/2$ и $\alpha = \Delta\varphi = -\pi/2$ отличаются направлением движения по эллипсу или окружности (рис. 5.8).

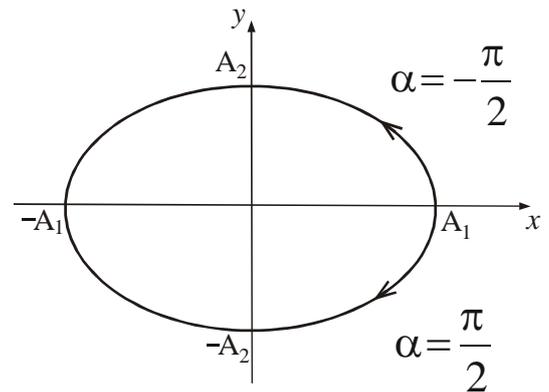


Рисунок 5.8

Если точка одновременно колеблется в двух взаимно-перпендикулярных направлениях так, что частоты относятся как целые числа (т. е. частоты кратные), то она будет двигаться вдоль замкнутой кривой, форма которой зависит от отношения амплитуд A_2/A_1 , кратности частот ω_2/ω_1 и разности начальных фаз $\Delta\varphi$.

Такие замкнутые траектории точки, одновременно совершающей гармонические колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях, называются **фигурами Лиссажу***. Фигуры Лиссажу вписываются в прямоугольник, стороны которого параллельны осям координат Ox и Oy и равны соответственно $2A_1$ и $2A_2$. Отношение частот ω_y/ω_x равно отношению числа касаний фигуры Лиссажу с горизонтальными и вертикальными сторонами прямоугольника, в который она вписана.

$$\frac{\omega_y}{\omega_x} = \frac{n_x}{n_y}. \quad (5.20)$$

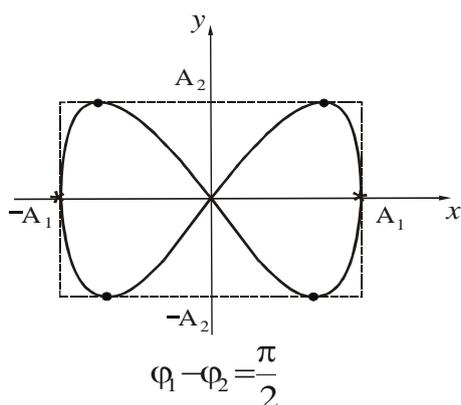


Рисунок 5.9

Пример:

Число касаний фигуры с горизонтальными сторонами: $n_x = 4$, число касаний с вертикальными сторонами: $n_y = 2$ (рис. 5.9). Отношение частот

$$\frac{\omega_y}{\omega_x} = \frac{4}{2} = 2.$$

С помощью фигур Лиссажу можно найти неизвестную частоту по известной.

Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Фигуры Лиссажу: запись песком.

<http://www.youtube.com/watch?v=rdWWvjH8cPM&list=PLC16C189B21D0F649>

2. Фигуры Лиссажу: осциллограф.

<http://www.youtube.com/watch?v=hUu653khUIE&list=PLC16C189B21D0F649>

§6 Затухающие колебания

В реальных физических системах, участвующих в колебательном движении, всегда присутствуют силы сопротивления (внутреннее трение, сопротивление среды, потери энергии за счёт нагревания проводников и т. д.), действие которых уменьшает энергию системы. Уменьшение энергии приводит к затуханию колебаний.

6.1 Затухающие механические колебания

В качестве примера рассмотрим колебания пружинного маятника. В реальных условиях на шарик массы m , совершающий колебания вдоль оси Ox под действием силы упругости (см. п. 3.1), действует также сила сопротивления. Предположим, что это сила вязкого трения. При малых скоростях она пропорциональна скорости

*Лиссажу Жан Энтуан (1822–1880), французский физик.

$$F_c = -r v = -r \frac{dx}{dt}, \quad (6.1)$$

где r – коэффициент сопротивления среды. Знак « $-$ » обусловлен тем, что сила и скорость имеют противоположные направления. В этом случае второй закон Ньютона запишется в виде

$$-kx - r \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2 x}{dt^2}. \quad (6.2)$$

Разделив обе части полученного уравнения на m , перепишем его следующим образом:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{r}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0 \quad (6.2a)$$

или

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (6.3)$$

где обозначено:

$$\beta = \frac{r}{2m}, \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m}.$$

Величину β называют **коэффициентом затухания**. Напомним, что ω_0 – собственная частота колебаний, то есть частота, с которой совершались бы свободные колебания при отсутствии трения.

Уравнение (6.3) называют **дифференциальным уравнением затухающих колебаний**. Решение уравнения (6.3) зависит от соотношения между коэффициентом затухания β и собственной частотой ω_0 . Если затухание невелико ($\beta < \omega_0$), то его решение имеет вид:

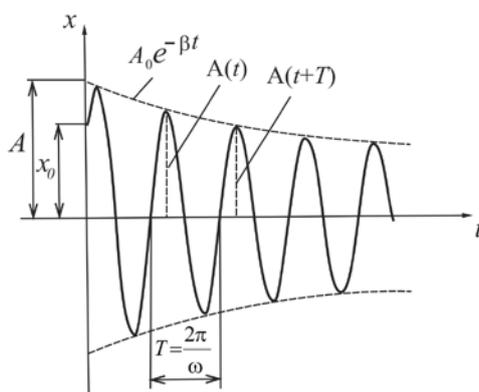


Рисунок 6.1

$$x(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (6.4)$$

$$\text{где } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}, \quad (6.5)$$

ω – циклическая частота затухающих колебаний.

Согласно (6.4) движение маятника можно рассматривать как колебание с частотой ω и амплитудой A , изменяющейся по закону

$$A = A(t) = A_0 e^{-\beta t}. \quad (6.6)$$

График функции $x(t)$ представлен на рисунке 6.1. Затухающие колебания являются непериодическими, так как в них значения величин (смещения, скорости, ускорения), характеризующих колебание, не повторяются.

Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Затухающие колебания маятника.

<http://www.youtube.com/watch?list=PL9F96E1E5307658DB&v=ui0h6PfBvBM>

2. Затухающие колебания камертона.

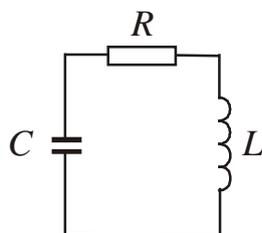
<http://www.youtube.com/watch?v=LP0u1GWRtFs&list=PL9F96E1E5307658DB>**6.2 Затухающие электромагнитные колебания**

Рисунок 6.2

Всякий реальный контур (рис. 6.2) обладает активным сопротивлением ($R \neq 0$). Энергия, запасённая в контуре, расходуется в этом сопротивлении на нагревание, поэтому свободные колебания затухают.

Получим дифференциальное уравнение затухающих электромагнитных колебаний, используя закон сохранения энергии. Потери энергии равны количеству тепла, выделившемуся на активном сопротивлении:

$$-d(W_{\text{эл}} + W_{\text{м}}) = \delta Q. \quad (6.7)$$

Знак « $-$ » перед дифференциалом означает, что энергия уменьшается. Согласно (3.19) и (3.20):

$$W_{\text{эл}} = \frac{q^2}{2C}, \quad W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}.$$

По закону Джоуля – Ленца

$$\delta Q = I^2 R dt. \quad (6.8)$$

Записанные соотношения подставим в (6.7) и найдём дифференциал:

$$-\left(\frac{1}{2C} 2q dq + \frac{L}{2} 2I dI \right) = I^2 R dt \quad (6.9)$$

Разделив (6.9) на произведение $L dt$ и учтя, что

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad \frac{dI}{dt} = \frac{d^2 q}{dt^2},$$

получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0 \quad (6.10)$$

или

$$\ddot{q} + 2\beta \dot{q} + \omega_0^2 q = 0, \quad (6.11)$$

где

$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}.$$

Уравнение (6.11) по своему виду совпадает с дифференциальным уравнением (6.3) для затухающих механических колебаний. Если затухание невелико ($\beta < \omega_0$), то его решение имеет вид:

$$q(t) = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (6.12)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – циклическая частота затухающих колебаний. (6.13)

График функции $q(t)$ имеет тот же вид, что и $x(t)$ (см. рис. 6.1).

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Затухающие колебания на экране осциллографа.

<http://www.youtube.com/watch?v=dmeYXD5zIjU&list=PL9F96E1E5307658DB>

6.3 Основные характеристики затухающих колебаний

Величинами, характеризующими затухающие колебания, являются:

1. **Коэффициент затухания** (β) – скалярная физическая величина, характеризующая быстроту убывания амплитуды.

$$[\beta] = 1/c.$$

В случае механических колебаний коэффициент затухания зависит от свойств среды и массы тела:

$$\beta = \frac{r}{2m}. \quad (6.14)$$

В случае электромагнитных колебаний – от активного сопротивления контура и величины индуктивности:

$$\beta = \frac{R}{2L}. \quad (6.15)$$

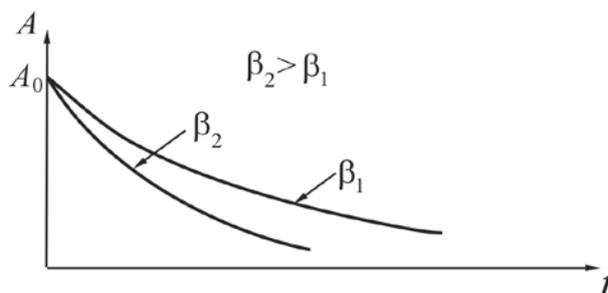


Рисунок 6.3

Чем больше коэффициент затухания, тем быстрее уменьшается амплитуда (рис. 6.3).

2. **Время релаксации** (τ) – время, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в $e = 2,71 \dots$ раз (e – основание натуральных логарифмов).

Найдём связь между β и τ . Амплитуда затухающих колебаний уменьшается согласно (6.6) по закону

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}$$

Если $t = \tau$, то $A(\tau) = \frac{A_0}{e}$. Сделаем подстановку:

$$\frac{A_0}{e} = A_0 e^{-\beta \tau}.$$

Отсюда $\beta \tau = 1$.

$$\tau = \frac{1}{\beta}. \quad (6.16)$$

3. **Логарифмический декремент затухания** (λ) – безразмерная величина, количественная характеристика быстроты затухания колебаний, численно равная натуральному логарифму отношения двух следующих друг за другом амплитуд $A(t)$ и $A(t+T)$ (см. рис. 6.1).

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}. \quad (6.17)$$

Установим связь между логарифмическим декрементом затухания и коэффициентом затухания.

$$\lambda = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \ln e^{\beta T} = \beta T.$$

$$\lambda = \beta T. \quad (6.18)$$

Средние значения логарифмических декрементов некоторых систем приведены в таблице 6.1.

4. **Число колебаний за время релаксации** – N_e .

$$N_e = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{\beta T} = \frac{1}{\lambda}. \quad (6.19)$$

5. **Добротность колебательной системы** (Q) – безразмерная физическая величина, характеризующая убыль энергии за период и равная произведению 2π на отношение энергии $W(t)$ колебаний системы в произвольный момент времени t к убыли этой энергии за один период T .

$$Q = 2\pi \frac{W(t)}{\Delta W_T}, \quad (6.20)$$

где $\Delta W_T = W(t) - W(t+T)$.

Если затухание невелико, то добротность определяется по соотношению:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda}. \quad (6.21)$$

Большим значениям Q соответствует слабое затухание.

Типичные значения добротности некоторых систем приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Средние значения логарифмических декрементов затухания λ и типичные значения добротности Q некоторых систем

Колебательная система	Декремент затухания, λ	Добротность, Q
Радиоконтурь обычные	0,02 ÷ 0,05	10 ÷ 100
Камертон	0,001	100
Кварцевая пластинка	$10^{-4} \div 10^{-5}$	$2 \cdot 10^4$
СВЧ резонаторы	$10^{-3} \div 10^{-4}$	$10^3 \div 10^4$
Оптический резонатор	$10^{-6} \div 10^{-7}$	$10^6 \div 10^7$
Сейсмические волны		25 ÷ 1400
Струна (скрипка, рояль)		1000

6. Энергия затухающих колебаний. Так как энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды (см. формулу (4.4)), то закон изменения энергии при затухающих колебаниях примет вид:

$$W(t) = W_0 e^{-2\beta t}, \tag{6.22}$$

где в соответствии с (4.4):

$$W_0 = \frac{k A_0^2}{2}. \tag{6.23}$$

6.4 Аперриодический процесс

Рассмотрим, каким будет характер движения при больших коэффициентах затухания. Согласно (6.5) частота затухающих колебаний

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}, \quad T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Если $\beta = \omega_0$, то частота затухающих колебаний обращается в нуль, а период – в бесконечность, то есть движение перестает быть периодическим.

Если $\beta > \omega_0$, то движение носит аперриодический (непериодический) характер. Это означает, что система, выведенная из положения равновесия какими-либо силами, после прекращения действия этих сил возвращается в положение равновесия, не совершая колебаний.

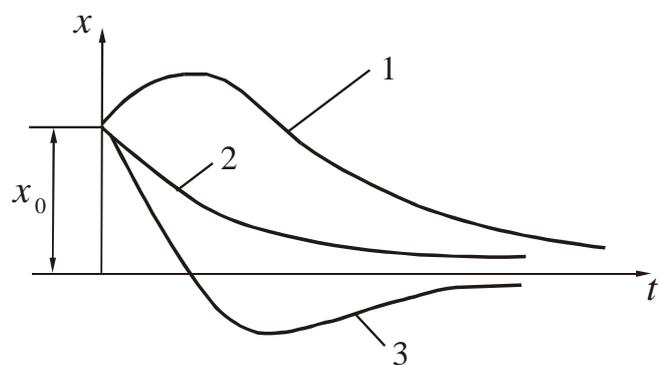


Рисунок 6.4

Таким образом, при $\beta \geq \omega_0$ колебательная система переходит к аперриодическому процессу.

На рис. 6.4 показаны графики изменения координаты при аперриодическом процессе.

На рис. 6.4 показаны графики изменения координаты при аперриодическом процессе.

дическом процессе в зависимости от начальных условий.

- 1 – направление отклонения и направление начальной скорости совпадают;
- 2 – направление отклонения и направление начальной скорости противоположны, но скорость маленькая;
- 3 – направление отклонения и направление начальной скорости противоположны.

На практике нередко возникает задача погашения колебаний в момент их возникновения (колебаний стрелки измерительного прибора, колебаний кузова автомобиля и т. п.). Устройства, которые позволяют увеличить затухание колебательной системы, называются *демпферами* или *амортизаторами*.

- **Давайте подумаем!**

6.1. Колебания в колебательном контуре затухают. Это значит, что максимальная величина заряда на любой из пластин его конденсатора становится всё меньше. Не противоречит ли такой ход процесса закону сохранения заряда?

§7 Вынужденные колебания

Чтобы вызвать вынужденные колебания нужно оказывать на систему внешнее периодически изменяющееся воздействие.

7.1 Вынужденные механические колебания

В качестве колебательной системы рассмотрим пружинный маятник, совершающий колебания вдоль оси Ox (см. п. 6.1). Для того, чтобы колебания были незатухающими, на маятник, кроме сил упругости и трения, должна действовать некоторая периодически меняющаяся внешняя сила. Внешняя периодически меняющаяся сила, приложенная к системе, называется *вынуждающей силой*. Пусть вынуждающая сила изменяется по закону

$$F(t) = F_0 \cos \Omega t, \quad (7.1)$$

где Ω – частота вынуждающей силы, а F_0 – её амплитудное значение.

Запишем второй закон Ньютона:

$$-kx - r \frac{dx}{dt} + F_0 \cos \Omega t = m \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

Разделив это уравнение на m , перепишем его в виде:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{r}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = \frac{F_0}{m} \cos \Omega t, \quad (7.2)$$

или

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \Omega t, \quad (7.3)$$

где

$$f_0 = \frac{F_0}{m}, \quad \beta = \frac{r}{2m}, \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m}.$$

Уравнение (7.3) является **дифференциальным уравнением вынужденных механических колебаний**. Из теории дифференциальных уравнений известно, что общее решение данного неоднородного дифференциального уравнения равно сумме общего решения соответствующего однородного уравнения и частного решения неоднородного:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t).$$

Общее решение однородного уравнения уже известно (см. формулу (6.4)):

$$x_1(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Можно показать, что частное решение, удовлетворяющее правой части уравнения (7.2), имеет вид:

$$x_2(t) = A \cos(\Omega t + \varphi).$$

Амплитудное значение $x_1(t)$, равное $A_0 e^{-\beta t}$, после начала вынужденных колебаний более или менее быстро уменьшается. Следовательно, через некоторое время τ после начала колебаний свободные колебания маятника практически прекращаются: $x(t) \approx x_2(t)$. Маятник переходит в состояние установившихся вынужденных колебаний, которые совершаются с частотой вынуждающей силы (см. рис. 7.1):

$$x(t) = A \cos(\Omega t + \varphi), \tag{7.4}$$

где φ – представляет собой величину отставания по фазе вынужденного колебания от обусловившей его вынуждающей силы.

С энергетической точки зрения действие внешней вынуждающей силы при установившихся колебаниях заключается в том, что работа этой силы восполняет потери энергии, вызванные трением.

Обратите внимание на важнейшее отличие свободных колебаний от вынужденных: **при свободных колебаниях система получает энергию только один раз, когда она выводится из положения равновесия, а при вынужденных колебаниях энергия пополняется всё время за счёт работы вынуждающей силы.**

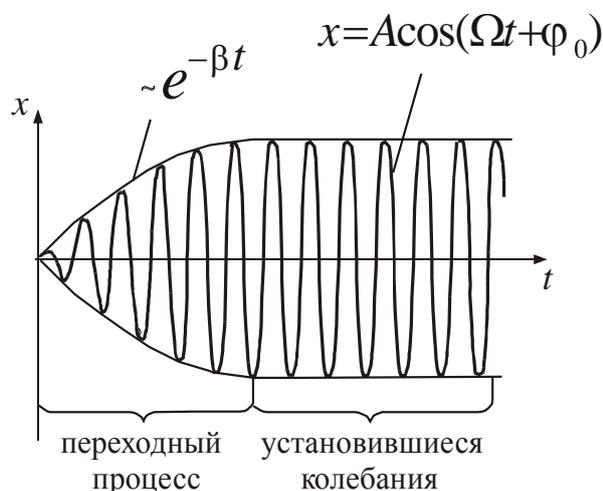


Рисунок 7.1

Амплитуда установившихся колебаний A и значение φ определяются как параметрами системы (m, ω_0), так и параметрами вынуждающей силы (F_0, Ω).

$$A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2}}. \quad (7.5)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = -\frac{2\beta\Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2}. \quad (7.6)$$

График зависимости амплитуды A вынужденных колебаний от частоты Ω вынуждающей силы (амплитудно-частотная характеристика) имеет вид, представленный на рис. 7.2.

Рассмотрим следствия из формул (7.5) и (7.6).

1). Если циклическая частота вынуждающей силы $\Omega = 0$, то $\varphi = 0$. В этом случае колебания не совершаются. Величину

$$A = A_{\text{ст}} = \frac{F_0}{m\omega_0^2} = \frac{F_0}{k}. \quad (7.7)$$

называют *статическим смещением* (статической амплитудой) маятника из положения равновесия под действием постоянной силы F_0 .

2). При некоторой частоте Ω_p , называемой резонансной, амплитуда достигает максимального значения A_p .

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к собственной частоте ω_0 называется резонансом.

Сущность резонанса очень содержательно определил академик Л. И. Мандельштам: это ситуация, когда система беспрепятственно совершает собственные свободные движения, потому что действующая на неё внешняя сила подобрана так, чтобы компенсировать потери на трение, как бы устранить его совсем. Внешняя сила при резонансе обеспечивает собственным колебаниям «режим наибольшего благоприятствования» – и они становятся незатухающими.

Чтобы определить резонансную частоту Ω_p , надо исследовать выражение (7.5) на экстремум. При этом для резонансной частоты получится следующее выражение:

$$\Omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}. \quad (7.8)$$

Подставив формулу (7.8) для резонансной частоты в (7.5), получим выражение для резонансной амплитуды:

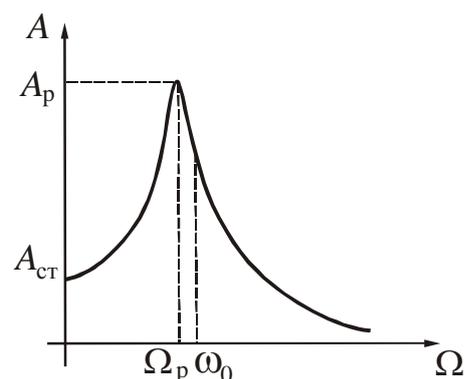


Рисунок 7.2

$$A_p = \frac{F_0}{2m\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (7.9)$$

Проведём анализ полученных соотношений.

1. Из (7.9) следует, что при $\beta = 0$ (сил сопротивления нет) амплитуда при резонансе обращалась бы в бесконечность. Резонансная частота при этом совпала бы с собственной частотой ω_0 .

2. Коэффициент затухания для механических колебаний $\beta = \frac{r}{2m}$. При малом сопротивлении среды значение коэффициента сопротивления r мало, затухание невелико. Поэтому на практике при малых затуханиях принимают $\Omega_p \approx \omega_0$.

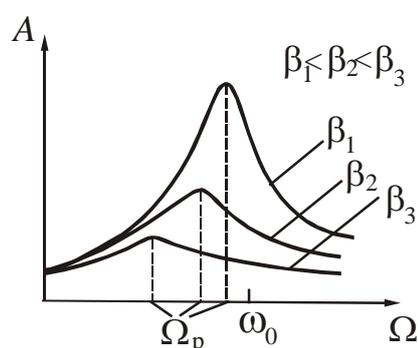


Рисунок 7.3

3. Из (7.8) и (7.9) также следует, что чем меньше β , тем выше и правее лежит максимум кривой (рис. 7.3).

Для $\beta \ll \omega_0$ отношение резонансной амплитуды к статической равно добротности системы:

$$\frac{A_p}{A_{ст}} = Q. \quad (7.10)$$

Добротность, таким образом, характеризует резонансные свойства колебательной системы.

Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Резонанс доски с мотором.

<http://www.youtube.com/watch?v=XbGCogAOgc&list=PL0EF568B1B4D11D88>

2. Резонанс: Колебания связанных маятников.

<http://www.youtube.com/watch?list=PL0EF568B1B4D11D88&v=ux27Dovb9Fs>

3. Механический частотомер: Резонансный язычковый частотомер и звуковой генератор.

<http://www.youtube.com/watch?v=4CBOOfGalTE&list=PL0EF568B1B4D11D88>

4. Линейка и струя воды.

<http://www.youtube.com/watch?v=66lVogXjkWg&list=PL0EF568B1B4D11D88>

7.2 Вынужденные электромагнитные колебания

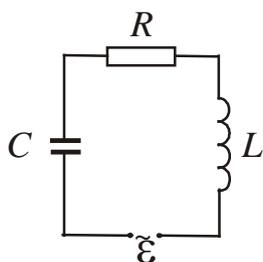


Рисунок 7.4

Чтобы колебания в колебательном контуре не затухали, необходимо компенсировать потери энергии на нагревание. Для этого последовательно с элементами контура включают переменную эдс (рис. 7.4):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos \Omega t, \quad (7.11)$$

где ε_0 – амплитудное значение эдс.

Получим дифференциальное уравнение вынужденных колебаний, применив закон сохранения энергии. В левую часть уравнения (6.7) (см. § 6, п. 6.2) добавим элементарную работу, которую совершает источник эдс:

$$\delta A = \varepsilon I dt. \quad (7.12)$$

Уравнение (6.7) примет вид:

$$-d(W_{\text{эл}} + W_{\text{м}}) + \delta A = \delta Q. \quad (7.13)$$

Проведя такие же преобразования, как в п. 6.2, получим следующее уравнение:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = \frac{\varepsilon_0}{L} \cos \Omega t \quad (7.14)$$

или:

$$\ddot{q} + 2\beta \dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_0}{L} \cos \Omega t. \quad (7.15)$$

Здесь β и ω_0 определяются теми же формулами, что в случае затухающих колебаний (см. п. 6.2).

Уравнение (7.15) является **дифференциальным уравнением вынужденных электромагнитных колебаний**. Оно имеет тот же вид, что и дифференциальное уравнение вынужденных механических колебаний (7.3). Следовательно, его решение также можно представить в виде:

$$q(t) = q_1(t) + q_2(t),$$

где $q_1(t) = q_{01} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$ – общее решение однородного дифференциального уравнения;

$q_2(t) = q_0 \cos(\Omega t + \varphi)$ – частное решение данного неоднородного уравнения.

При установившихся вынужденных колебаниях заряд изменяется по гармоническому закону:

$$q(t) = q_0 \cos(\Omega t + \varphi). \quad (7.16)$$

Амплитудное значение заряда q_0 и сдвиг фаз φ находятся по формулам, аналогичным для механических колебаний:

$$q_0 = \frac{\varepsilon_0}{L \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}} = \frac{\varepsilon_0}{\Omega \sqrt{R^2 + \left(\Omega L - \frac{1}{\Omega C}\right)^2}}, \quad (7.17)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{2\beta \Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2} = \frac{R}{\Omega L - \frac{1}{\Omega C}}. \quad (7.18)$$

В формулах (7.17) и (7.18) произведена замена:

$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

График зависимости заряда q от частоты Ω совпадает с графиком $A = f(\Omega)$ для вынужденных механических колебаний (см. рис. 7.3)

Сила тока в колебательном контуре при установившихся колебаниях

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_0 \Omega \sin(\Omega t + \varphi) = I_0 \cos\left(\Omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (7.19)$$

где $I_0 = q_0 \Omega$ – амплитуда силы тока, $\varphi = \varphi_0 + \frac{\pi}{2}$ – сдвиг фаз между током и приложенным напряжением.

Графики зависимости силы тока I_0 от Ω при различных R называются **резонансными кривыми** (рис. 7.5). Резонансная циклическая частота Ω_p , соответствующая максимуму амплитуды силы тока в контуре, не зависит от активного сопротивления R :

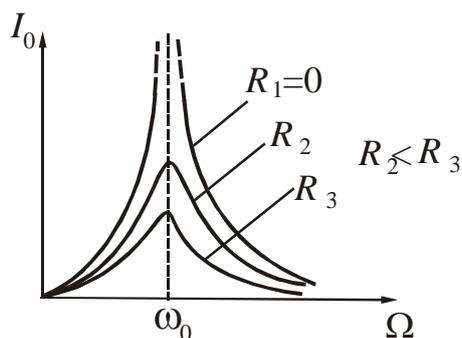


Рисунок 7.5

$$\Omega_p = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (7.20)$$

Явление резонанса играет большую роль в технике. Его используют в акустике для усиления звучания музыкальных инструментов, в электротехнике – для измерения частоты тока, в радиотехнике – для выделения нужного сигнала из других, отличающихся частотой, а также в многоканальной телеграфии и телефонии.

Резонанс может быть причиной аварий и катастроф. Периодические толчки от поршневых машин, силовых валов турбин, пропеллеров передаются на фундаментальные и другие части машин. Поэтому, например, собственная частота вибраций корпуса корабля или крыла самолета должна значительно отличаться от частоты возмущающей силы, обусловленной вращением силовых винтов. Амплитуду опасных резонансных колебаний также уменьшают, увеличив коэффициент затухания (это делается в амортизаторе автомобиля). Явление резонанса становится незаметным.

• **Давайте подумаем!**

7.1. Зависит ли резонансная частота в механических и электрических системах от коэффициента затухания?

Таблица 7.1 Сопоставление уравнений, описывающих гармонические колебания

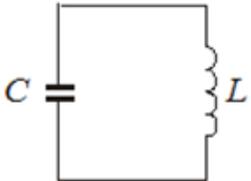
Физическая модель	Условия, необходимые для осуществления колебаний	Дифференциальное уравнение и его решение	Характеристики колебаний
<i>Механические колебания</i>			
Пружинный маятник	Наличие упругой или квазиупругой силы $F_{\text{упр}} = -kx$	$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ $x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ – период колебаний; $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – собственная частота колебаний.
Физический маятник	Наличие вращающего момента M , который стремится вернуть маятник в положение равновесия	$\ddot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = 0$ $\alpha(t) = \alpha_{\text{max}} \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$	$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}$ – период колебаний; $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{J}}$ – собственная частота колебаний.
Математический маятник	Наличие вращающего момента M , который стремится вернуть маятник в положение равновесия	$\ddot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = 0$ $\alpha(t) = \alpha_{\text{max}} \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$	$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ – период колебаний; $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ – собственная частота колебаний.
<i>Электромагнитные колебания</i>			
Колебательный контур 	Наличие заряженного конденсатора ёмкостью C и катушки индуктивностью L . Активное сопротивление контура $R = 0$.	$\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0$ $q = q_{\text{max}} \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$	$T = 2\pi \sqrt{LC}$ – период колебаний; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – собственная частота колебаний.

Таблица 7.2 Сопоставление уравнений, описывающих затухающие колебания

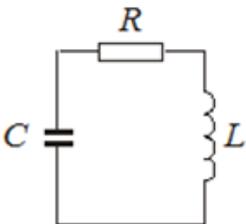
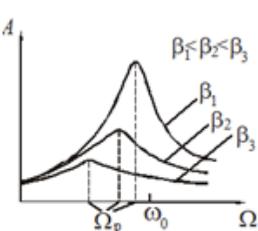
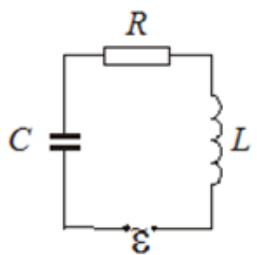
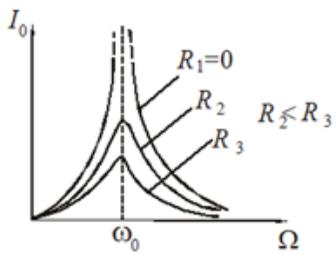
Физическая модель	Условия, необходимые для осуществления колебаний	Дифференциальное уравнение и его решение	Характеристики колебаний
<i>Механические колебания</i>			
Пружинный маятник	Наличие упругой или квазиупругой силы $F_{\text{упр}} = -kx$ Наличие силы сопротивления $F_c = -rv$	$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$ $x(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$	$\beta = \frac{r}{2m}$ – коэффициент затухания; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – циклическая частота затухающих колебаний; $\tau = \frac{1}{\beta}$ – время релаксации; $\lambda = \beta T$ – логарифмический декремент затухания; $Q = \frac{\pi}{\lambda}$ – добротность.
<i>Электромагнитные колебания</i>			
Колебательный контур 	Наличие заряженного конденсатора ёмкостью C и катушки индуктивностью L . Активное сопротивление контура $R \neq 0$.	$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = 0$ $q(t) = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$	$\beta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – циклическая частота затухающих колебаний; $\tau = \frac{1}{\beta}$ – время релаксации; $\lambda = \beta T$ – логарифмический декремент затухания; $Q = \frac{\pi}{\lambda}$ – добротность.

Таблица 7.3 Сопоставление уравнений, описывающих вынужденные колебания

Физическая модель	Условия, необходимые для осуществления колебаний	Дифференциальное уравнение и уравнение установившихся колебаний	Характеристики
<i>Механические колебания</i>			
Пружинный маятник	Наличие упругой или квазиупругой силы $F_{\text{упр}} = -kx$ Наличие силы сопротивления $F_c = -rv$ Наличие вынуждающей силы $F(t) = F_0 \cos \Omega t$	$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \Omega t$ $x(t) = A \cos(\Omega t + \varphi)$ $A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}};$ $\operatorname{tg} \varphi = -\frac{2\beta\Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2}$	$\Omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$ – резонансная частота; $A_p = \frac{F_0}{2m\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$ – резонансная амплитуда. 
<i>Электромагнитные колебания</i>			
Колебательный контур 	Наличие заряженного конденсатора ёмкостью C и катушки индуктивностью L . Активное сопротивление контура $R \neq 0$. Наличие переменной эдс $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos \Omega t$	$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_0}{L} \cos \Omega t$ $q(t) = q_0 \cos(\Omega t + \varphi)$ $q_0 = \frac{\varepsilon_0}{L\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}};$ $\operatorname{tg} \varphi = -\frac{2\beta\Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2} = \frac{R}{\Omega L - \frac{1}{\Omega C}}$	$\Omega_p = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота; 

- **Обратите внимание!**
- **Изучив раздел «Колебания», студент должен ЗНАТЬ:**

Суть понятий:

Колебания, осциллятор. Маятник пружинный, физический, математический. Колебательный контур. Колебания собственные, затухающие, вынужденные. Векторная диаграмма. Фигуры Лиссажу. Резонанс.

Определения физических величин, их единицы измерения и формулы, по которым рассчитываются величины:

Амплитуда колебаний. Период и частота. Циклическая частота. Фаза, начальная фаза. Коэффициент затухания. Время релаксации. Логарифмический декремент затухания. Добротность.

Уравнения:

Дифференциальное уравнение гармонических колебаний и его решение, уравнение скорости и ускорения при гармонических колебаниях. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний, уравнение установившихся колебаний.

Формулы:

Связь между циклической частотой, частотой и периодом гармонических колебаний. Период колебаний пружинного, физического, математического маятников. Формула Томсона для колебательного контура. Приведённая длина физического маятника. Энергия гармонических колебаний. Расчёт амплитуды и начальной фазы результирующего колебания, полученного при сложении двух колебаний одного направления и одинаковой частоты. Циклическая частота затухающих колебаний. Резонансная амплитуда, резонансная частота, статическая амплитуда.

Графики:

Графическое представление гармонических и затухающих колебаний. Резонансная кривая.

ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ «КОЛЕБАНИЯ»

Инструкция. Данный тест предназначен для проверки знаний по теме «Колебания». Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу кодов. Если Вы дали

- 1) 45-50 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
 - 2) 38-44 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
 - 3) 30-37 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
 - 4) меньше 30 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.
- Прочитайте его ещё раз.

1. Собственными называются колебания, ...
 - 1) которые происходят в системе, предоставленной самой себе после того, как она была выведена из положения равновесия.
 - 2) которые сопровождаются воздействием на систему внешних сил, но при этом система сама управляет этим воздействием.
 - 3) амплитуда которых уменьшается с течением времени.
2. Величинами, характеризующими колебания, являются ...
 - 1) частота колебаний.
 - 2) частота и время колебаний.
 - 3) частота, амплитуда, период, начальная фаза колебаний.
 - 4) частота колебаний, масса груза и коэффициент жёсткости пружины.
 - 5) масса маятника, его длина и время колебаний.
3. Начальная фаза гармонических колебаний материальной точки определяет ...
 - 1) амплитуду колебаний.
 - 2) отклонение точки от положения равновесия в начальный момент времени.
 - 3) максимальную скорость прохождения точкой положения равновесия.
 - 4) период и частоту колебаний.
 - 5) полный запас механической энергии точки.
4. Математическим маятником является ...
 - 1) стержень, колеблющийся относительно горизонтальной оси, проходящей через конец стержня.
 - 2) груз, подвешенный на пружине.
 - 3) шарик, подвешенный на нити, длина которой намного больше размеров шарика.
 - 4) шарик, подвешенный на нити, длина которой равна радиусу шарика.
5. Уменьшить частоту колебаний математического маятника позволит следующее действие
 - 1) уменьшение длины подвеса.
 - 2) увеличение амплитуды колебаний.
 - 3) увеличение массы груза.
 - 4) увеличение длины подвеса.
 - 5) уменьшение массы груза.

6. Если длину математического маятника уменьшить в 4 раза, то период колебаний ...

- 1) увеличится в 4 раза. 3) уменьшится в 4 раза.
 2) увеличится в 2 раза. 4) уменьшится в 2 раза.

7. Физическим маятником называется ...

- 1) материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити.
 2) груз, подвешенный на пружине.
 3) твёрдое тело, колеблющееся относительно оси, не проходящей через центр масс.
 4) цепь, состоящая из катушки индуктивности и конденсатора.

8. Уравнение движения точки дано в виде $x(t) = 2\cos(\pi t/2 + \pi/4)$. Период колебаний T равен ...

- 1) 2 с 2) 4 с 3) 0,5 с 4) 0,25 с

9. Имеется три маятника: математический, пружинный, физический. Укажите для каждого маятника выражение, которое позволяет рассчитать его период колебаний.

1. $2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ 2. $\frac{2\pi}{\omega}$ 3. $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 4. $\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$ 5. $\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$ 6. $2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}}$

10. Если период колебаний груза массой m , подвешенного на пружине жёсткостью k , равен T , то период колебаний груза массой $2m$, подвешенного на одной половине разрезанной пополам пружины, будет равен ...

- 1) $4T$ 2) $2T$ 3) T 4) $T/2$ 5) $T/4$

11. Груз массой m , подвешенный на легкой пружине, совершает свободные гармонические колебания. Для увеличения частоты колебаний в 2 раза надо подвесить к той же пружине груз, масса которого ...

- 1) $m/4$ 2) $m/2$ 3) $2m$ 4) $4m$

12. Точка совершает гармонические колебания по закону $x(t) = 0,05\cos(10\pi t + \pi/2)$. Скорость этой точки изменяется по закону ...

- 1) $v(t) = -0,5\pi\sin(10\pi t + \pi/2)$ 2) $v(t) = 0,05\pi\cos(10\pi t + \pi/2)$
 3) $v(t) = 0,05\sin(10\pi t + \pi/2)$ 4) $v(t) = 0,05\pi\cos(10\pi t - \pi/2)$.

13. Точка совершает колебания по закону $x = A\sin(\omega t + \varphi)$. Скорость колебаний равна 0, если фаза колебаний равна ...

- 1) $\omega t + \varphi = 0$ 2) $\omega t + \varphi = \pi$ 3) $\omega t + \varphi = \pi/2$ 4) $\omega t + \varphi = \pi/4$

14. Точка совершает гармонические колебания по закону $x = 0,8\cos(4t + \pi/2)$ (см). Максимальная скорость колеблющейся точки равна ...

- 1) $0,4\pi$ (см/с). 2) 0,2 (см/с). 3) $1,6\pi$ (см/с). 4) 3,2 (см/с).

15. Груз массой m , колеблется на пружине жёсткостью k с амплитудой A . Скорость при прохождении положения равновесия равна ...

1) $A\sqrt{\frac{k}{m}}$ 2) $A\sqrt{\frac{m}{k}}$ 3) $A\sqrt{mk}$ 4) $A\frac{k}{m}$ 5) $\sqrt{A\frac{k}{m}}$

16. Точка совершает гармонические колебания по закону $x = 0,6 \cos 3t$. Ускорение этой точки изменяется по закону ...

1) $a(t) = -1,8 \sin 3t$ 2) $a(t) = -5,4 \cos 3t$
 3) $a(t) = +5,4 \sin 3t$ 4) $a(t) = +1,8 \cos 3t$

17. Дано уравнение колебаний $x(t) = 0,02 \cos(5t + \pi)$ (м). Максимальное ускорение колеблющейся точки равно ...

1) 1 м/с^2 2) $0,5 \text{ м/с}^2$ 3) $0,25 \text{ м/с}^2$ 4) $0,1 \text{ м/с}^2$

18. Укажите дифференциальное уравнение гармонических (собственных) колебаний.

1. $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2x = 0$ 2. $\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega^2x = f_0 \cos \Omega t$ 3. $\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega^2x = 0$

19. Уравнение колебаний материальной точки задано в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi)$. Укажите выражение для кинетической энергии колеблющейся точки.

1. $\frac{kA^2}{2}$ 2. $\frac{kA^2}{2} \cdot \sin^2(\omega t + \varphi)$ 3. $\frac{2\pi A}{T} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$
 4. $\frac{4\pi^2 Am}{T^2} \cdot \sin^2(\omega t + \varphi)$ 5. $\frac{mA^2\omega^2}{2} \cdot \cos^2(\omega t + \varphi)$

20. Уравнение колебаний материальной точки задано в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi)$. Укажите выражение для потенциальной энергии колеблющейся точки.

1. $\frac{mA^2\omega^2}{2} \cdot \cos^2(\omega t + \varphi)$ 2. $\frac{kA^2}{2} \cdot \sin^2(\omega t + \varphi)$ 3. $\frac{kA^2}{2}$
 4. $\frac{2\pi A}{T} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$ 5. $\frac{4\pi^2 Am}{T^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$

21. Полная энергия при гармонических колебаниях ...

- 1) изменяется во времени по гармоническому закону.
- 2) убывает с течением времени.
- 3) возрастает с течением времени.
- 4) остается без изменения.

22. Уравнение колебаний материальной точки задано в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi)$. Укажите выражение для полной энергии колеблющейся точки.

$$1. \frac{mA^2\omega^2}{2} \cdot \cos^2(\omega t + \varphi) \quad 2. \frac{kA^2}{2} \cdot \sin^2(\omega t + \varphi) \quad 3. \frac{kA^2}{2}$$

$$4. \frac{2\pi A}{T} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad 5. \frac{4\pi^2 Am}{T^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

23. Складываются два одинаково направленных гармонических колебания с одинаковыми частотами. Результирующее колебание ...
- 1) имеет ту же частоту, но новую амплитуду и новую начальную фазу.
 - 2) увеличивает частоту в 2 раза, не изменяя амплитуды.
 - 3) увеличивает амплитуду в 2 раза, не изменяя частоты.
 - 4) имеет ту же частоту; начальную фазу, равную нулю, и амплитуду, равной сумме амплитуд складываемых колебаний.
24. Биениями называют колебания, которые получаются в результате ...
- 1) сложения колебаний одного направления с одинаковыми частотами, но разными амплитудами.
 - 2) сложения гармонических колебаний, происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях.
 - 3) сложения гармонических колебаний одного направления с различными, но близкими частотами.
25. Тело участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях. Оно описывает замкнутую фигуру Лиссажу, если ...
- 1) частоты колебаний одинаковы.
 - 2) частоты колебаний кратные.
 - 3) частоты колебаний разные (произвольные).
 - 4) амплитуды колебаний одинаковые.
 - 5) начальные фазы колебаний разные.
26. Складываются два колебания одного направления и одинаковой частоты. Амплитуда результирующего колебания будет наибольшей, если разность фаз складываемых колебаний равна ...
- 1) $\Delta\varphi=\pi/4$
 - 2) $\Delta\varphi=3\pi/4$
 - 3) $\Delta\varphi=\pi/2$
 - 4) $\Delta\varphi=\pi$
27. Складываются два колебания одного направления и одинаковой частоты. Амплитуда результирующего колебания равна сумме амплитуд складываемых колебаний, если разности фаз равны ...
- 1) 0
 - 2) $\pi/2$
 - 3) π
 - 4) $3\pi/2$
 - 5) 2π
 - 6) $2,5\pi$
 - 7) 4π
 - 8) 5π
28. Складываются два взаимно перпендикулярных колебания одинаковой частоты с разными амплитудами ($A_1 \neq A_2$). Разность фаз колебаний равна $\pi/2$. Траекторией движения при этом является ...
- 1) прямая
 - 2) эллипс
 - 3) окружность
 - 4) парабола
29. Складываются два взаимно перпендикулярных колебания одинаковой частоты. Разность фаз колебаний равна π . Траекторией движения при этом является...

- 1) прямая 2) окружность 3) эллипс 4) парабола

30. Затухающими называются колебания, ...

- 1) амплитуда которых уменьшается с течением времени.
- 2) частота которых уменьшается с течением времени.
- 3) при которых колеблющаяся система подвергается воздействию внешней, периодически изменяющейся силы.

31. Укажите дифференциальное уравнение затухающих колебаний.

1. $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$
2. $\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = f_0 \cos \Omega t$
3. $\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$
4. $\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{mgl}{J} \varphi = 0$

32. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний имеет вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 0,8 \frac{dx}{dt} + \frac{\pi^2}{4} x = 0. \text{ Коэффициент затухания колебаний равен ...}$$

- 1) $0,8 \text{ с}^{-1}$
- 2) $0,4 \text{ с}^{-1}$
- 3) $\pi/2 \text{ с}^{-1}$
- 4) $\pi^2/4 \text{ с}^{-1}$

33. Вынужденными называются колебания, ...

- 1) в процессе которых амплитуда колебаний возрастает с течением времени.
- 2) в процессе которых колеблющаяся система подвергается воздействию внешней, периодически изменяющейся силы.
- 3) которые происходят в системе, предоставленной самой себе после того, как она была выведена из положения равновесия.

34. Укажите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний.

1. $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$
2. $\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = f_0 \cos \Omega t$
3. $\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$

35. Колебания совершаются в двух различных средах с коэффициентами сопротивления r_1 и r_2 под действием внешней периодически изменяющейся силы $F_{\text{вын}} = F_0 \cos \Omega t$. При этом $r_1 > r_2$. Укажите правильное соотношение между резонансными амплитудами.

1. $A_1 = A_2$
2. $A_1 > A_2$
3. $A_1 < A_2$

36. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний тела, подвешенного на пружине, имеет вид $\frac{d^2x}{dt^2} + 0,3 \frac{dx}{dt} + 4\pi^2 x = 2 \sin 6\pi t$. Частота периодически действующей на тело силы равна ...

- 1) 2π
- 2) 6π
- 3) $4\pi^2$
- 4) $0,3$

37. Резонанс в колебательной системе наблюдается, если ...
- 1) отсутствует трение.
 - 2) частота внешней периодически действующей силы приближается к собственной.
 - 3) частота собственных колебаний не совпадает с частотой внешней, периодически действующей силы.
 - 4) действует любая внешняя сила.
38. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний имеет вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 10^{-5} \frac{dx}{dt} + 16\pi^2 x = 2\sin \Omega t$$
 Резонанс колебаний будет наблюдаться, если частота периодически действующей силы равна ...
- 1) $\approx 16\pi^2$
 - 2) $\approx 4\pi \cdot 10^{-5}$
 - 3) $\approx 10^{-5}$
 - 4) $\approx 4\pi$
39. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний груза, подвешенного на пружине, имеет вид $\frac{d^2x}{dt^2} + 0,3 \frac{dx}{dt} + 4\pi^2 x = 2\sin 6\pi t$. Резонансная частота равна ...
- 1) $\approx 6\pi$
 - 2) $\approx 4\pi^2$
 - 3) $\approx 2\pi$
 - 4) 0,15
40. В состав колебательного контура входят ...
- 1) конденсатор и резистор.
 - 2) катушка и резистор.
 - 3) катушка и конденсатор.
 - 4) трансформатор и резистор.
41. При свободных электромагнитных колебаниях ...
- 1) амплитуда колебаний напряжения на конденсаторе возрастает.
 - 2) заряд пластины конденсатора периодически изменяет знак.
 - 3) энергия колебаний возрастает.
 - 4) частота колебаний постепенно увеличивается.
42. Укажите, какую характеристику свободных электромагнитных колебаний можно вычислить как $2\pi\sqrt{LC}$.
1. Циклическую частоту
 2. Амплитуду
 3. Частоту
 4. Период
43. В колебательный контур входит конденсатор ёмкостью C . Если данный конденсатор заменить конденсатором ёмкостью $4C$, то частота колебаний в контуре ...
- 1) уменьшится в 4 раза
 - 2) увеличится в 2 раза
 - 3) уменьшится в 2 раза
 - 4) увеличится в 4 раза
44. В колебательный контур входит конденсатор ёмкостью C . Чтобы период свободных электромагнитных колебаний в контуре увеличился в 3 раза, надо ёмкость конденсатора ...
- 1) уменьшить в 9 раз.
 - 2) увеличить в 9 раз.
 - 3) уменьшить в 3 раза.
 - 4) увеличить в 3 раза.

45. Заряд на пластинах конденсатора изменяется со временем по закону $q(t) = 5 \cdot 10^{-5} \cos 200\pi t$. Сила тока в колебательном контуре при этом изменяется закону ...
- 1) $i(t) = 5 \cdot 10^{-5} \sin 200\pi t$ 2) $i(t) = -10^{-2} \pi \cos 200\pi t$
3) $i(t) = 10^{-2} \pi \cos 200\pi t$ 4) $i(t) = -10^{-2} \pi \sin 200\pi t$
46. При резонансе в колебательном контуре резко возрастает ...
- 1) частота переменного тока. 2) амплитудное значение тока.
3) циклическая частота переменного тока. 4) период переменного тока.
47. Колебательный контур состоит из конденсатора ёмкостью C и катушки индуктивностью L . Если ёмкость конденсатора, и индуктивность катушки увеличить в 3 раза, то период электромагнитных колебаний в этом контуре ..
- 1) увеличится в 3 раза. 2) уменьшится в 3 раза.
3) не изменится. 4) увеличится в 9 раз.
48. Чтобы частота собственных электромагнитных колебаний в контуре увеличилась в 3 раза, индуктивность L катушки в колебательном контуре надо ...
- 1) уменьшить в 9 раз. 2) увеличить 3 раза.
3) уменьшить в 3 раза. 4) увеличить в 9 раз.
49. Колебательный контур состоит из конденсатора ёмкостью C и катушки индуктивностью L . Если ёмкость конденсатора увеличить в 2 раза, а индуктивность катушки уменьшить в 2 раза, то период электромагнитных колебаний в этом контуре ...
- 1) увеличится в 4 раза. 2) увеличится в 2 раза.
3) не изменится. 4) уменьшится в 4 раза.
50. Укажите буквенное обозначение и единицу измерения каждой из перечисленных величин. *Пример:* сила – F – Н (ньютон).
- Период, частота колебаний, фаза колебаний, коэффициент затухания, логарифмический декремент затухания, добротность колебательной системы.

Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем!»

3.1. Период колебаний математического маятника определяется по формуле $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. На

маятник в воде действует выталкивающая сила (архимедова сила), которая уменьшает силу натяжения нити. Это равносильно уменьшению g . Следовательно, период колебаний увеличится.

3.2. Период колебаний математического маятника определяется по формуле $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Магнит будет притягивать шарик, поэтому сила натяжения нити увеличится. Это равносильно увеличению g . Следовательно, период колебаний уменьшится.

3.3. Стержень с грузом представляет собой физический маятник. Период колебаний физического маятника определяется по формуле $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}}$. При перемещении груза с середины

на нижний конец отношение J/l увеличится. Следовательно, период колебаний увеличится.

3.4. По мере того, как песок будет высыпаться из воронки, центр масс такого физического маятника будет опускаться. Отношение $\frac{J}{l}$ увеличивается, поэтому период колебаний постепенно будет увеличиваться.

3.5. Если масса пружинного маятника сосредоточена в грузе и масса пружины не учитывается, то период колебаний равен $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, k – жёсткость пружины. Если же учесть массу m'

пружины, распределенную по всей ее длине, то решение задачи усложняется. По соображениям размерности можно заключить, что общая масса $M = m' + m > m$ должна занять в формуле место m . Следовательно, период колебаний маятника должен увеличиться.

3.6. Подействовать на катушку переменным магнитным полем или на конденсатор – кратковременным импульсом напряжения.

3.7. Сила тока в контуре, заряд и напряжение на конденсаторе, индукция магнитного поля катушки, напряжённость электрического поля конденсатора, эдс самоиндукции в катушке.

3.8. Частота колебаний колебательного контура определяется по формуле $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

1) Введение диэлектрика увеличивает электроёмкость C конденсатора. Следовательно, частота колебаний уменьшится. 2) а) Введение сердечника из ферромагнетика увеличивает индуктивность катушки, так как магнитная проницаемость ферромагнетиков μ намного больше единицы. Следовательно, частота колебаний уменьшится. б) Введение сердечника из диамагнетика уменьшает индуктивность катушки, так как магнитная проницаемость диамагнетиков μ меньше единицы. Следовательно, частота колебаний увеличится.

3.9. К тому моменту, когда конденсатор разряжается полностью, ток в контуре достигает максимальной силы. К этому моменту достигает максимума энергия магнитного поля, запасённая в катушке. Наличие запаса этой энергии и служит причиной того, что процесс разрядки конденсатора не обрывается на указанной стадии.

Дальнейшее изменение тока в сторону его ослабления порождает эдс индукции такого направления, при котором за счёт уменьшения запасённой магнитной энергии поддерживается величина и прежнее направление тока. В итоге этот процесс приводит не только к исчезновению магнитной энергии, но и к перезарядке обкладок конденсатора. Последнее состояние конденсатора не является равновесным, и начинается его разрядка в обратном направлении.

3.10. Циклическая частота ω_0 свободных незатухающих электромагнитных колебаний в колебательном контуре определяется его электроёмкостью и индуктивностью: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Амплитуда колебаний тока в контуре $i_0 = \omega_0 q_0$, где q_0 – начальный заряд, сообщённый извне обкладкам конденсатора. Амплитуда колебаний напряжения U_C на обкладках конденсатора связана с зарядом q_0 соотношением $U_C = q_0 / C$. Следовательно, амплитуда тока зависит от первоначального заряда, электроёмкости и индуктивности, амплитуда напряжения от первоначального заряда и электроёмкости.

3.11. Изменяются амплитуды колебаний силы тока, напряжения, магнитной индукции. Не изменяется период и частота колебаний.

3.12. Фазы колебания напряжения на обкладках конденсатора и тока в колебательном контуре не совпадают и смещены на $\pi/2$.

3.13. а) Увеличение периода вызовет сближение вершин синусоиды, так как $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$.

б) Уменьшение максимального значения напряжения уменьшит высоту (амплитуду) синусоиды.

6.1. Нет, не противоречит. Согласно закону сохранения заряда постоянна только алгебраическая сумма зарядов, которая в данном случае всё время равна нулю.

7.1. В механических системах зависит, так как $\Omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$, где β – коэффициент затухания. В электрических – нет, так как $\Omega_p = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Колебания»

№ вопр.	Код ответа								
1	1	11	1	21	4	31	3	41	2
2	3	12	1	22	3	32	2	42	4
3	2	13	3	23	1	33	2	43	3
4	3	14	4	24	3	34	2	44	2
5	4	15	1	25	2	35	3	45	4
6	4	16	2	26	1	36	2	46	2
7	3	17	2	27	1,5,7	37	2	47	1
8	2	18	1	28	2	38	4	48	1
9	3,1,6	19	5	29	1	39	3	49	3
10	3	20	2	30	1	40	3	50	-

Глава 2. Упругие волны

§8 Общие сведения о волнах

Кроме механических колебаний отдельных тел – маятников, камертонов и т. д., в природе широко распространены колебания сплошных твёрдых, жидких и газообразных сред. Эти колебания не остаются на том месте, где они возникают, а распространяются в пространстве. Объясняется это тем, что между частицами среды существуют силовые связи. Распространение упругих волн в среде сопровождается переносом энергии.

Процесс распространения колебаний в пространстве называется *волной*.

8.1 Классификация волн

В зависимости от физической природы источника колебаний волны делят на:

- механические (звуковые, ударные, сейсмические и т. д.);
- волны на поверхности жидкости;
- электромагнитные (радиоволны, волны оптического диапазона, рентгеновское излучение, гамма-излучение).

Механическими волнами называется процесс распространения механических колебаний, возникающих в упругой среде, поэтому механические волны имеют второе название – *упругие* волны. В дальнейшем мы будем пользоваться этим термином.

Поверхностные волны распространяются вдоль свободной поверхности жидкости или вдоль поверхности двух жидкостей, которые не смешиваются. В образовании этих волн определяющую роль играют силы поверхностного натяжения и силы тяжести. В поверхностных волнах частицы жидкости одновременно совершают поперечные и продольные колебания, описывая эллиптические или более сложные траектории.

В зависимости от взаимной ориентации направления колебаний и направления распространения волн различают:

- поперечные волны;
- продольные волны.

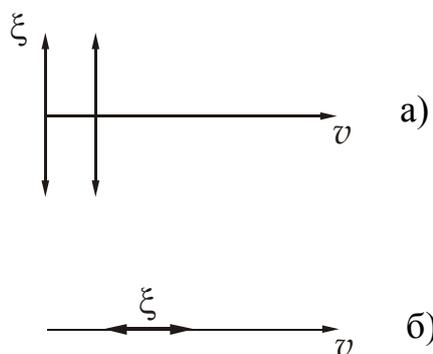


Рисунок 8.1

Волна называется *поперечной*, если направление колебаний частиц среды перпендикулярно направлению распространения волны (рис. 8.1 а). Поперечные упругие волны могут возникнуть лишь в среде, обладающей сопротивлением сдвигу.

Волна называется *продольной*, если направление колебаний частиц среды происходит вдоль направления распространения волны (рис. 8.1 б).

В жидкой и газообразной средах возможно возникновение только продольных волн. В

твёрдой среде возможно возникновение как продольных, так и поперечных волн.

Распространяясь от источника колебаний, волновой процесс охватывает всё новые области пространства.

Область пространства, в которой существует волновой процесс, называется **волновым полем**. Геометрическое место точек среды, колеблющихся в одинаковых фазах, называется **волновой поверхностью** или **фронтом волны**. В зависимости от геометрии фронта волны делят на:

- плоские (рис 8.2 а);
- сферические (рис 8.2 б).

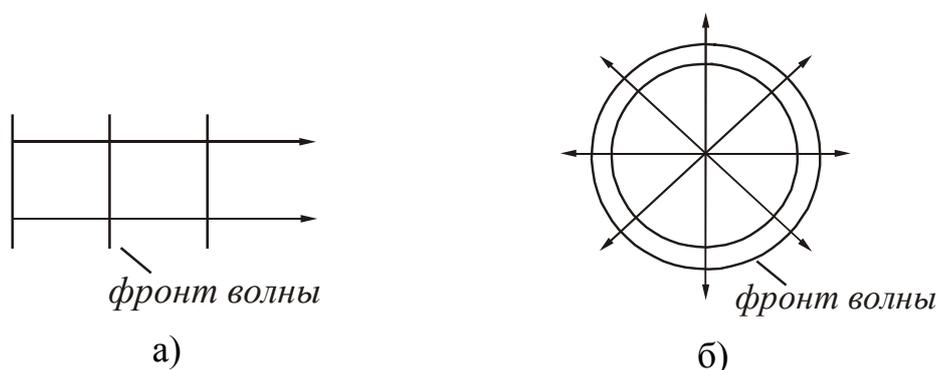


Рисунок 8.2

Стрелки на рисунке указывают направление распространения волны. Плоские волны возникают от плоского или удалённого источника. Их волновые фронты представляют собой плоскости. Сферические волны возникают от точечного источника в пространстве. Их волновые фронты представляют собой сферы.

Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Механические модели волн – 1.

http://www.youtube.com/watch?v=YJrtkpR1s24&list=PLWM8IO-3TQjNkI1_fdTv6qGnC8i-O9KxQ&index=2

2. Механические модели волн – 2.

http://www.youtube.com/watch?v=uKI69DR0HZI&list=PLWM8IO-3TQjNkI1_fdTv6qGnC8i-O9KxQ

8.2 Характеристики волн

Особое значение в теории волн имеет представление о гармонической волне, т. е. бесконечной синусоидальной волне, в которой все изменения состояния происходят по закону синуса или косинуса (рис. 8.3). Такие волны могли бы распространяться в однородной среде без искажения формы.

Гармоническая волна называется **монохроматической**, если её частота ν и амплитуда A с течением времени не меняются.

Монохроматическая волна периодична во времени. Это означает, что в каждой фиксированной точке $x = \text{const}$ через одинаковые промежутки времени

повторяются одинаковые волновые состояния. Этот промежуток времени называется периодом.

$$\Delta t = T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (8.1)$$

Период (T) – время, в течение которого совершается один полный цикл колебаний.

Монохроматическая волна периодична в пространстве. Это означает, что в любой фиксированный момент времени $t = \text{const}$ в волновом поле через одинаковые расстояния повторяются одинаковые волновые состояния (рис. 8.3).

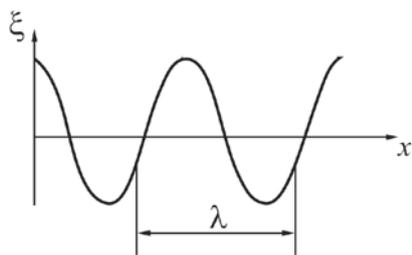


Рисунок 8.3

Такое расстояние называется длиной волны.

Длина волны (λ) – расстояние между ближайшими точками, колеблющимися в одинаковой фазе.

Длина волны и период связаны соотношением:

$$\lambda = vT, \quad (8.2)$$

где v – скорость распространения волны.

Данная формула справедлива для волн любой природы. Используя соотношение (8.2), можно дать другое определение длины волны.

Длина волны – расстояние, на которое распространяется фронт волны за время, равное периоду колебаний.

Амплитуда (A) – максимальное отклонение колеблющейся частицы от положения равновесия.

Вместо периода T часто пользуются частотой ν , которая равна числу колебаний за единицу времени $\nu = \frac{1}{T}$. Из (8.2) получим

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \quad (8.3)$$

Напомним, что период измеряется в секундах, частота – в герцах.

• **Давайте подумаем!**

8.1. Распространение волны, охарактеризовали рядом параллельных лучей. Какую форму имеет фронт такой волны?

8.2. Продольные волны в земной коре, вызванные землетрясением, распространяются на большую глубину, иногда пронизывая весь земной шар. Поперечные же волны проникают лишь на глубину до 2900 км. Почему? Какой вывод из этого можно сделать о состоянии ядра земного шара?

§9 Плоская монохроматическая волна

Если фронт монохроматической волны представляет собой плоскость, то волна называется *плоской*.

9.1 Уравнение плоской монохроматической волны

Уравнением волны называется выражение, которое определяет, как смещение ξ колеблющейся частицы зависит от координаты x и времени t : $\xi = \xi(x, t)$. Ось Ox совместим с направлением распространения волны. Волновые поверхности плоской волны будут перпендикулярны оси x (рис. 9.1).

Колебания точек, лежащих в плоскости $x = 0$, то есть колебания источника, имеют вид:

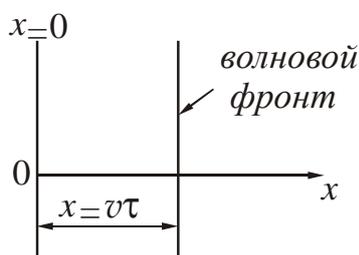


Рисунок 9.1

$$\xi(0, t) = A \cos \omega t.$$

По мере распространения волны в пространстве аналогичные колебания начнут совершать и другие частицы. Чтобы волна распространилась от плоскости $x = 0$ до плоскости с произвольной координатой x , нужно время

$$\tau = \frac{x}{v},$$

где v – скорость перемещения фронта волны.

Это значит, что колебания частиц, лежащих в плоскости x , будут отставать по времени на τ . Уравнение этих колебаний будет иметь вид:

$$\xi(x, t) = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right). \quad (9.1)$$

Уравнению (9.1) можно придать другой вид. Для этого введём величину k , которая называется волновым числом:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (9.2)$$

Волновое число показывает, сколько длин волн укладывается на расстоянии $6,28$ м. С учётом (9.2), а также того, что $\omega = 2\pi/T$, а $\lambda = vT$, получим:

$$\xi(x, t) = A \cos \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right),$$

или

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx). \quad (9.3)$$

Уравнения (9.1), (9.3) называют *уравнениями плоской бегущей волны*.

Смещения частиц плоской монохроматической волны будут определяться значениями фазы, т. е. аргумента косинуса в уравнении (9.3). На волновой по-

верхности, согласно её определению (см. п. 8.1), фазы колебаний различных точек в рассматриваемый момент времени имеют одно и то же значение, то есть, фронт волны представляет собой плоскость постоянной фазы:

$$(\omega t - kx) = \text{const}.$$

Продифференцируем это выражение по времени, получим:

$$\omega - k \frac{dx}{dt} = 0.$$

Преобразуем полученное уравнение:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k}.$$

Значение $\frac{dx}{dt} = v$ даёт скорость, с которой перемещается фазовая плоскость:

$$v = \frac{\omega}{k}. \quad (9.4)$$

Таким образом, скорость распространения гармонической волны – это скорость перемещения фазовой плоскости, поэтому её называют **фазовой скоростью** ($v = v_{\text{фаз}}$).

Монохроматические волны распространяются с конечной скоростью, зависящей от природы волны и свойств среды.

а) в твёрдых телах:

Скорость распространения продольной волны:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (9.5)$$

где E – модуль Юнга* (модуль упругой деформации), ρ – плотность среды.

Скорость распространения поперечной волны:

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (9.6)$$

где G – модуль сдвига.

б) в газах:

Скорость распространения продольной волны (звука):

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (9.7)$$

где γ – показатель адиабаты газа, M – молярная масса газа, R – молярная газовая постоянная, T – термодинамическая температура.

*Юнг Томас (1773–1829), английский физик.

Для каждого вида волн существует уравнение, которое связывает частоту ω и волновое число k . Возможны две ситуации: скорость не зависит от частоты, и скорость зависит от частоты. Зависимость фазовой скорости от частоты и, соответственно, от волнового числа, называется *дисперсией*. Среда, в которой наблюдается явление дисперсии, называется *диспергирующей средой*.

Дисперсия отсутствует, если $\omega = vk$. Как будет показано позже, такая ситуация наблюдается для электромагнитных волн в вакууме. Если эти же волны распространяются в среде, то дисперсия будет существовать. Сильная дисперсия наблюдается у звуковых и ультразвуковых волн.

9.2 Волновое уравнение

Уравнение любой волны является решением дифференциального уравнения, называемого волновым. Установим его вид для плоской монохроматической волны. Согласно (9.3):

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx).$$

Дважды продифференцируем это уравнение по x и t :

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -A\omega \sin(\omega t - kx); \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t - kx) = -\omega^2 \xi(x, t) \quad (9.8)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = Ak \sin(\omega t - kx), \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = -Ak^2 \cos(\omega t - kx) = -k^2 \xi(x, t) \quad (9.9)$$

Из сравнения (9.8) и (9.9) следует, что

$$\frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{1}{k^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}.$$

Так как по формуле (9.4) $v = \frac{\omega}{k}$, то

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (9.10)$$

Уравнение (9.10) называется *волновым уравнением* плоской монохроматической волны в канонической форме.

Если при анализе физических процессов той или иной природы вытекает уравнение подобного вида, то это означает, что в данной среде возможно возникновение волновых процессов.

В трёхмерном пространстве волновое уравнение (9.10) примет вид:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (9.11)$$

9.3 Перенос энергии волной. Вектор Умова

Частицы среды, в которой распространяется волна, не вовлекаются волной в поступательное движение, а лишь совершают колебания около своих положений равновесия, т. е. распространение упругих волн в среде **не связано с переносом массы**. При колебательном движении частиц происходит **перенос энергии** за счёт передачи её от одной частицы к другой.

Некоторый перенос вещества может осуществляться при распространении в среде сильных возмущений (например, ударных волн, возникающих при взрыве; цунами), когда колебания частиц среды становятся нелинейными.

Пусть в некоторой среде плотностью ρ распространяется плоская монохроматическая волна

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx).$$

Выделим в среде малый объём dV . Частицы среды движутся, поэтому они обладают кинетической энергией dW_k . При прохождении волны частицы среды подвергаются деформации, поэтому они обладают потенциальной энергией dW_p . По величине обе эти энергии одинаковы, поэтому полная энергия может быть представлена в виде:

$$dW = dW_p + dW_k = 2dW_k. \quad (9.12)$$

Кинетическая энергия частиц, заключённых в объёме dV :

$$dW_k = \frac{m_0}{2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)^2 dN, \quad (9.13)$$

где m_0 – масса частицы (молекулы), $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ – скорость колебаний частицы, dN – число частиц в объёме dV .

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -A\omega \sin(\omega t - kx). \quad (9.14)$$

Сделаем замену в (9.12), используя (9.13) и (9.14):

$$dW = m_0 dN A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t - kx). \quad (9.15)$$

Разделим (9.15) на объём dV и обозначим эту величину через w :

$$w = \frac{dW}{dV} = \frac{m_0 dN}{dV} A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t - kx), \quad (9.16)$$

где w – объёмная плотность энергии.

Объёмная плотность энергии (w) – скалярная физическая величина, численно равная энергии, заключённой в единице объёма.

Так как

$$\frac{m_0 dN}{dV} = \rho,$$

где ρ – плотность среды, то

$$w = \rho A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t - kx). \quad (9.17)$$

Из (9.17) следует, что объёмная плотность энергии в каждый момент времени в разных точках пространства различна. Среднее по времени значение квадрата синуса равно $1/2$. Соответственно, среднее по времени значение объёмной плотности энергии в каждой точке равно:

$$\langle w \rangle = \frac{\rho A^2 \omega^2}{2}. \quad (9.18)$$

Таким образом, среда, в которой распространяется волна, обладает дополнительным запасом энергии. Эта энергия доставляется от источника колебаний в различные точки среды волной, следовательно, волна переносит энергию. Переносимая энергия пропорциональна квадрату амплитуды:

$$W \sim A^2.$$

Переносимую энергию характеризуют потоком энергии.

Поток энергии (Φ) – скалярная физическая величина, численно равная энергии, переносимой волной через некоторую поверхность за единицу времени:

$$\Phi = \frac{dW}{dt}. \quad (9.19)$$

$$[\Phi] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Для характеристики течения энергии в различных точках пространства вводится величина, называемая плотностью потока энергии.

Плотность потока энергии (\vec{j}) – векторная физическая величина, численно равная энергии, переносимой за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны:

$$j = \frac{dW}{dS_{\perp} dt}. \quad (9.20)$$

$$[j] = \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Направление вектора плотности потока энергии совпадает с направлением скорости распространения волны:

$$\vec{j} = j \cdot \frac{\vec{v}}{v}. \quad (9.21)$$

Вектор плотности потока энергии впервые был введён Н. А. Умовым* и, поэтому, называется **вектором Умова**.

Можно показать, что плотность потока энергии связана с объёмной плотностью энергии соотношением:

$$j = w v, \quad (9.22)$$

или в векторном виде

$$\vec{j} = w \vec{v}, \quad (9.23)$$

где \vec{v} – вектор, модуль которого равен фазовой скорости, а направление совпадает с направлением распространения волны (и переноса энергии).

Скалярная величина I , равная модулю среднего значения вектора Умова, называется **интенсивностью волны**. Для звуковой волны – интенсивностью звука.

$$I = \langle j \rangle = v \langle w \rangle = \frac{\rho A^2 \omega^2}{2} v. \quad (9.24)$$

• **Давайте подумаем!**

9.1. Описывая свойства механических волн, мы различаем две скорости:

1) скорость движения частиц среды; 2) скорость волны. Которая из этих скоростей изменяется даже в однородной среде?

9.2. Когда небольшие морские волны приближаются к наклонному берегу, на них образуются пенные гребни. Почему?

§10 Звуковые волны

10.1 Характеристики звука

Звуковыми волнами называются упругие волны с частотами от 16 Гц до 20000 Гц, воспринимаемые органами слуха человека. Эти волны являются продольными. Они распространяются в твёрдых телах, жидкостях и газах.

Волны с частотами, меньшими 16 Гц, называют **инфразвуком**; волны с частотами, превышающими 20000 Гц, называют **ультразвуком**.

Воспринимаемые звуки можно различать по громкости, высоте и тембру. Каждой из этих физиологических характеристик соответствует определённая физическая характеристика звуковой волны (табл. 10.1).

Таблица 10.1. Характеристики звуковой волны

Физиологические	Физические
– громкость	– интенсивность звука
– высота	– частота звука
– тембр	– спектральный состав

*Умов Николай Алексеевич (1846 – 1915), русский физик.

Громкость звука зависит от амплитуды колебаний. Высота звука определяется частотой колебаний.

Реальный звук является наложением гармонических колебаний с определённым набором частот. Набор частот колебаний, присутствующих в данном

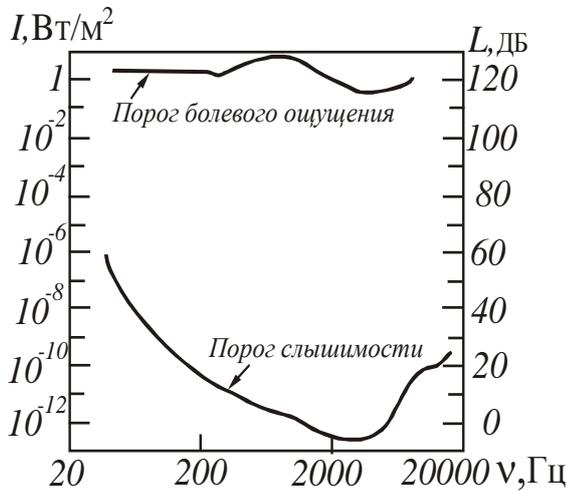


Рисунок 10.1

звуче, называется **акустическим спектром**. Этот набор частот придаёт каждому звуку определённую окраску или так называемый тембр (*timbre* (франц.) – колокольчик, метка, отличительный знак).

Акустический спектр может быть:

- сплошным (присутствуют колебания всех частот в интервале от ν_1 до ν_2);
- линейчатым (звук состоит из колебаний дискретных частот ν_1 , ν_2 , ν_3 и т. д.).

Сплошным акустическим спектром обладают шумы. Колебания с линейчатым спектром вызывают ощущение звука с более или менее определённой высотой. Такой звук называется тональным.

Чтобы вызвать ощущение звука волна должна обладать некоторой минимальной интенсивностью, которая называется **порогом слышимости**. Порог слышимости зависит от частоты звука и различен для разных людей. Ухо наиболее чувствительно к частотам от 1000 до 4000 Гц. Интенсивность звука при этом порядка 10^{-12} Вт/м² (рис. 10.1).

При интенсивностях $1 \div 10$ Вт/м² волна перестаёт восприниматься как звук, вызывая в ухе ощущение боли и давления. Это значение интенсивности называется **порогом болевого ощущения**. Порог болевого ощущения также зависит от частоты (рис. 10.1).

Для характеристики громкости звука используют величину, которая называется уровнем громкости.

Уровень громкости (L) определяется как логарифм отношения интенсивности I данного звука к интенсивности I_0 , на пороге слышимости ($I_0 \approx 10^{-12}$ Вт/м² при стандартной частоте 1000 Гц):

$$L = \lg \frac{I}{I_0}. \quad (10.1)$$

$[L] = \text{Б}$ (бел*).

На практике обычно пользуются кратными единицами – **децибелами** (дБ), которые определяются следующим соотношением:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}.$$

*Белл Александер Грэм (1847–1922), североамериканский учёный, изобретатель, бизнесмен шотландского происхождения, основатель компании Bell Telephone Company.

О звуках различной громкости принято говорить, что один громче другого не **во** столько-то раз, а **на** столько-то единиц. Когда интенсивность звука возрастает в 10 раз, то говорят, что она возросла на 10 децибел. Люди с нормальным слухом могут обнаружить увеличение громкости не меньше 1 дБ.

Весь диапазон интенсивностей, при которых волна вызывает в ухе звуковое ощущение (от 10^{-12} до 10 Вт/м^2), соответствует уровням громкости от 0 до 130 дБ (см. правую ось на рис. 10.1 и таблицу 10.2).

Таблица 10.2. Уровень громкости для некоторых звуков

Звук	L , дБ
Тиканье часов	20
Шепот на расстоянии 1 м	30
Тихий разговор	40
Речь средней громкости	60
Громкая речь	70
Крик	80
Шум самолетного мотора:	
- на расстоянии 5 м	120
- на расстоянии 3 м	130

Обратите внимание на то, что интенсивность звука является его **объективной** характеристикой, не зависящей от звукового ощущения. Уровень громкости является **субъективной** характеристикой, так как он зависит ещё и от интенсивности I_0 , которая в свою очередь зависит от частоты ν . Объясняется это тем, что ухо человека обладает разной чувствительностью к звукам разной частоты.

10.2 Ультразвук

Ультразвуком называются упругие волны с частотами от $2 \cdot 10^4$ Гц до 10^{13} Гц. Ультразвуковые волны с частотами порядка 10^9 Гц и выше называют **гиперзвуковыми**. Верхний предел частот ультразвука ($10^{12} \div 10^{13}$ Гц в кристаллах и жидкостях, 10^9 Гц в газах при нормальных условиях) соответствует частотам, при которых длина волны ультразвука становится соизмеримой с межмолекулярными расстояниями (в случае газов – со средней длиной свободного пробега молекул).

Основным свойством ультразвука является то, что он подобно свету **может излучаться в виде узких направленных лучей**, так как обладает малой длиной волны. Отражение и преломление ультразвуковых пучков на границе раздела двух сред происходит по законам геометрической оптики. Для изменения направления и фокусирования ультразвуковых лучей применяются зеркала различной формы, звуковые линзы и т. д. Ультразвуки сильно поглощаются газами и во много раз слабее – жидкостями. Например, коэффициент поглощения ультразвука в воздухе примерно в 1000 раз больше, чем в воде.

Для генерации ультразвука используются в основном два явления.

Обратный пьезоэлектрический эффект (см. т.1, §41, п.41.5) – возникновение деформации в вырезанной определённым образом кварцевой пластинке под действием электрического поля. Если такую пластинку поместить в высокочастотное переменное поле, то можно вызвать её вынужденные колебания. В режиме резонанса получают большие амплитуды колебаний пластинки и, следовательно, большие интенсивности излучаемой ультразвуковой волны. Идея кварцевого ультразвукового генератора принадлежит П. Ланжевену*.

Магнитострикция (см. т.1, §57, п.57.4) – изменение линейных размеров и объёма ферромагнетиков под действием магнитного поля. Поместив ферромагнитный стержень (например, из никеля или железа) в быстропеременное магнитное поле, возбуждают его механические колебания, амплитуда колебаний которых максимальна в случае резонанса.

Амплитуды скорости и ускорения колебательного движения частиц среды, а также амплитуда звукового давления в ультразвуковых волнах во много раз больше соответствующих величин для слышимых звуков. Благодаря большой амплитуде звукового давления, создаваемого мощными ультразвуковыми излучателями, в жидкостях возникает явление **кавитации** – в ней непрерывно образуются и исчезают внутренние разрывы сплошности. Исчезновение этих разрывов, имеющих вид мельчайших пузырьков, сопровождается кратковременным возрастанием давления до сотен и даже тысяч атмосфер.

Поэтому ультразвуки обладают дробящим действием – они разрушают находящиеся в жидкости твёрдые тела, живые организмы, крупные молекулы и т. д. Дробящее действие ультразвуков используют для создания эмульсий и суспензий, снятия плёнок окислов и обезжиривания поверхностей деталей, стерилизации жидкостей, размельчения зёрен фотоэмульсий и т. д. Разрушающее действие ультразвуковых волн в жидкости на поверхности твёрдого тела заметно увеличивается при введении в жидкость мелких абразивных частиц. Это явление используется для ультразвукового шлифования и полирования, а также «сверления» отверстий различной формы в стекле, керамике, сверхтвёрдых сплавах и кристаллах.

Ультразвуки ускоряют протекание процессов диффузии, растворения и химических реакций. Их широко используют в молекулярной акустике для исследования акустическими методами строения и свойств веществ.

Ультразвуки применяют для направленной подводной сигнализации, обнаружения подводных предметов и определения глубин (гидролокатор, эхолот), для контрольно-измерительных целей (дефектоскопия, измерение толщины трубопроводов и слоя накипи и т. д.), а также для осуществления и ускорения технологических процессов.

Применение ультразвука легло в основу новой области акустики – акустоэлектроники, позволяющей на её основе разрабатывать приборы для обработки сигнальной информации в микрорадиоэлектронике.

Также широкое применение ультразвуков находит в медицине – ультразвуковая диагностика, ультразвуковая хирургия.

*Ланжевен Поль (1872—1946) – французский физик.

10.3 Инфразвук

Инфразвук – это упругие волны с частотами ниже области слышимых человеком частот. Обычно за верхнюю границу инфразвука принимают частоты $16 \div 25$ Гц, нижняя граница не определена. Инфразвуки содержатся в шуме атмосферы, в шуме леса и моря. Источником инфразвуковых колебаний являются грозные разряды (гром), а также взрывы и орудийные выстрелы. В земной коре наблюдаются сотрясения и вибрации инфразвуковых частот от самых разнообразных источников, в том числе от обвалов, взрывов, движения транспорта.

Инфразвук мало поглощается в среде, поэтому инфразвуковые волны в воздухе, воде и земной коре могут распространяться на очень далекие расстояния. Это явление находит практическое применение в звукометрии, при определении места сильных взрывов, даёт возможность предсказать стихийное бедствие – цунами. Звуки взрывов, содержащие большое количество инфразвуковых частот, применяются для исследования верхних слоёв атмосферы, для исследования свойств водной среды.

• **Давайте подумаем!**

10.1. Через воду, землю и даже сталь можно слышать без изменения тональности звуки, которые раздаются в воздухе. Как это объяснить, ведь частота $\nu = \frac{v}{\lambda}$, а

скорость звука в воде и тем более в стали в несколько раз больше, чем в воздухе?

10.2. Почему стук получается более громким, если стучать не в стенку, а в дверь?

10.3. Если возбуждённый камертон поставить на его резонансный ящик, громкость звучания резко увеличится. Не противоречит ли это, закону сохранения энергии?

10.4. В окнах, под которыми проезжают автомашины, нередко назойливо дребезжат стекла. Это неприятное явление можно значительно ослабить, если на середины стекол наклеить куски пластилина. Объясните этот эффект.

10.5. Некоторые солдаты, впервые попав в боевую обстановку, «кланяются пулям» – нагибаются, услышав звук летящей пули. Насколько это разумно с физической точки зрения?

10.6. Стекло хорошо проводит звуковые волны. Почему же, закрывая окно, можно очень заметно снизить громкость звуков, проникающих с улицы?

10.7. Почему на верхних этажах здания закрытые окна гораздо заметнее защищают от дорожных шумов, чем нижних этажах?

10.8. Почему при проведении ультразвукового исследования (УЗИ) следят, чтобы между преобразователем и телом всегда был слой специального геля?

10.9. Почему на кораблях устанавливают не звуковые, а ультразвуковые гидролокаторы?

§11 Интерференция волн. Стоячие волны

11.1 Принцип суперпозиции волн. Интерференция волн

Если в среде распространяется одновременно несколько волн, то колебания частиц среды оказываются геометрической суммой колебаний, которые совершали бы частицы при распространении каждой из волн в отдельности. Волны накладываются одна на другую, не возмущая друг друга. Это утверждение называется *принципом суперпозиции волн*.

Две волны называются *когерентными*, если разность их фаз в каждой из точек среды постоянна. Синусоидальные волны, частоты которых одинаковы, когерентны всегда. Наложение когерентных волн, в результате которого колебания в одних точках усиливают, а в других ослабляют друг друга, называется явлением *интерференции*.

11.2 Стоячие волны

Стоячие волны – это колебательный процесс, возникающий в результате сложения (интерференции) двух встречных бегущих волн с одинаковой амплитудой и частотой.

На практике стоячие волны возникают при отражении от преград. Падающая на преграду волна и бегущая ей навстречу отражённая волна, накладываются друг на друга и дают стоячую волну. Запишем уравнения падающей и отражённой волн:

$$\xi_1(x, t) = A \cos(\omega t - kx) \text{ – падающая волна;}$$

$$\xi_2(x, t) = A \cos(\omega t + kx) \text{ – отражённая волна.}$$

Применив принцип суперпозиции, и преобразовав результат по формуле для суммы косинусов, получим:

$$\xi(x, t) = \xi_1(x, t) + \xi_2(x, t) = A \cos(\omega t - kx) + A \cos(\omega t + kx) = 2A \cos kx \cdot \cos \omega t$$

$$\xi(x, t) = 2A \cos kx \cdot \cos \omega t. \quad (11.1)$$

Уравнение (11.1) называется *уравнением стоячей волны*. Обозначим

$$2A \cos kx = A(x) \quad (11.2)$$

и назовём $A(x)$ амплитудой стоячей волны.

Заменив в (11.2) волновое число k согласно формуле (9.2), получим:

$$A(x) = 2A \cos \frac{2\pi}{\lambda} x. \quad (11.3)$$

Проведём анализ выражения (11.3).

1. Если $\cos \frac{2\pi}{\lambda} x = 1$, то амплитуда колебаний достигает максимального значения

$$A(x)_{\max} = 2A.$$

Это выполняется, если $\frac{2\pi}{\lambda} x = \pm n\pi$, где $n = 0, 1, 2, \dots$

Точки, в которых амплитуда колебаний максимальна, называются **пучностями** (рис. 11.1 б). Координаты пучностей:

$$x_{\text{пучн}} = n \frac{\lambda}{2}. \quad (11.4)$$

Пучность – это не одна единственная точка, а плоскость, точки которой имеют значения координаты, определяемые формулой (11.4).

2. Если $\cos \frac{2\pi}{\lambda} x = 0$, то амплитуда обращается в нуль

$$A = 0.$$

Это выполняется, если $\frac{2\pi}{\lambda} x = \pm \frac{\pi}{2}(2n + 1)$, где $n = 0, 1, 2, \dots$

Точки, в которых амплитуда колебаний равна нулю, называются **узлами** (рис. 11.1 б). Координаты узлов:

$$x_{\text{узел}} = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}. \quad (11.5)$$

Точки, находящиеся в узлах, колебаний не совершают. Узел, как и пучность, представляет собой не одну точку, а плоскость, точки которой имеют значения координаты, определяемые формулой (11.5).

Рассмотренный случай описывает образование стоячей волны, отражённой от менее плотной среды. График такой стоячей волны представлен на рис. 11.1 а. Примером является волна, возникающая в металлическом стержне с незакреплёнными концами.

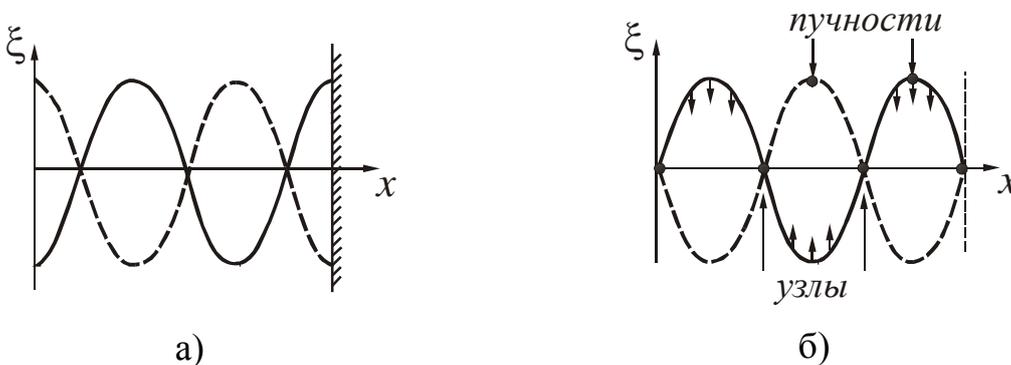


Рисунок 11.1

Из формул (11.4) и (11.5) следует, что расстояние между соседними пучностями, так же как и расстояние между соседними узлами, равно $\lambda/2$. Расстояние между ближайшими узлом и пучностью – $\lambda/4$ (см. рис. 11.1).

Если отражение происходит от более плотной среды, то отражённая волна меняет фазу на π . В этом случае формула (11.4) даст координату узла, а формула (11.5) – координату пучности, т. е. узлы и пучности меняются местами. График волны представлен на рис. 11.1 б. Такая волна возникает, например, в закреплённой струне. Для сравнения на рис. 11.2 дан график бегущей волны.

В бегущей и стоячей волне колебания отдельно взятой точки подчиняются одному и тому же синусоидальному закону. В этом отношении бегущая и стоячая волны неразличимы. Различие обнаруживается при сравнении колебаний «соседних» точек этих волн. В бегущей волне согласно уравнению $\xi(x,t) = A \cos(\omega t - kx)$ «соседние» по направлению распространения колебаний точки колеблются с одинаковой амплитудой, но имеют разные координаты x и, следовательно, разные фазы $(\omega t - kx)$. Чем дальше точка от источника, тем больше её колебания отстают по фазе.

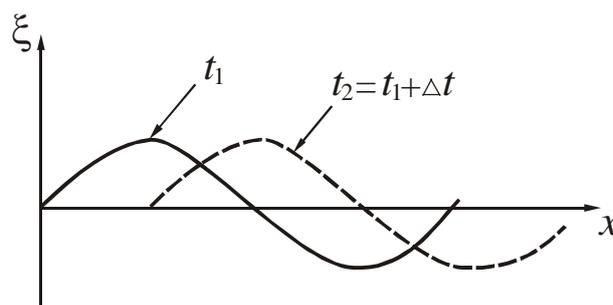


Рисунок 11.2

В стоячей волне, как видно из уравнения $\xi(x,t) = 2A \cos kx \cdot \cos \omega t$, амплитуда меняется от точки к точке, достигая максимального значения $2A$ в пучностях и оставаясь равной нулю в узлах. Фаза колебаний не зависит от расстояния x и, следовательно, одинакова у всех точек. Точнее, синфазно колеблются все точки, лежащие между соседними узлами. При переходе через узел фаза меняется на π .

В упругой стоячей волне энергия периодически мигрирует от узлов стоячей волны к пучностям и обратно. Однако в самих узлах и пучностях плотность потока энергии тождественно равна нулю. Среднее за период значение плотности потока энергии равно нулю в любой точке стоячей волны, так как две бегущие волны, образующие стоячую, переносят за период равную энергию в противоположных направлениях. Поэтому стоячие волны и получили своё название.

Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Поперечные стоячие волны на резиновом шнуре

<http://youtube.com/watch?v=MK1GljBxUz4&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

2. Поперечные стоячие волны на линейке со свободным концом

<http://youtube.com/watch?v=Bskje44cPbQ&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

3. «Стоячая волна» на экране осциллографа

http://www.youtube.com/watch?v=qxgngaCzD6g&list=PLWM8IO-3TQjNkI1_fdTv6qGnC8i-O9KxQ

11.3 Сложные волны. Групповая скорость

Понятие фазовой скорости применимо только к строго монохроматическим волнам. Такие волны реально не осуществимы, так как они должны существовать неограниченно долго во времени, и быть бесконечно протяжёнными в пространстве. На практике приходится иметь дело с более или менее сложным волновым импульсом, ограниченным во времени и в пространстве, и не являющимся синусоидой. Основываясь на принципе суперпозиции, можно любую сложную (не синусоидальную) волну разложить на некоторую систему синусоидальных волн, т. е. представить её в виде **группы волн**, которую также называют **волновым пакетом**.

Группа волн (волновой пакет) – совокупность большого числа синусоид с частотами, которые мало отличаются друг от друга. Совокупность частот этих синусоидальных волн называется **спектром частот** рассматриваемого волнового пакета.

Если дисперсия не наблюдается (т. е. скорость распространения волны не зависит от частоты (см. §9)), то все плоские волны, из которых складывается волновой пакет, распространяются с одинаковыми фазовыми скоростями и, поэтому, не смещаются друг относительно друга. В этом случае скорость распространения волнового пакета совпадает с фазовой скоростью v , а сам пакет сохраняет форму.

При наличии дисперсии составляющие волнового пакета имеют разные волновые числа k и распространяются с разными фазовыми скоростями. В результате составляющие пакета будут смещаться друг относительно друга, а сам пакет в процессе распространения будет менять свою форму.

Таким образом, скорость распространения реальной сложной волны в диспергирующей среде не совпадает с фазовой скоростью. В этом случае волновому пакету приписывают скорость u , под которой понимается скорость перемещения точки с максимальной энергией. Эту скорость называют групповой. Энергия пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому точка с максимальной энергией имеет максимальную амплитуду.

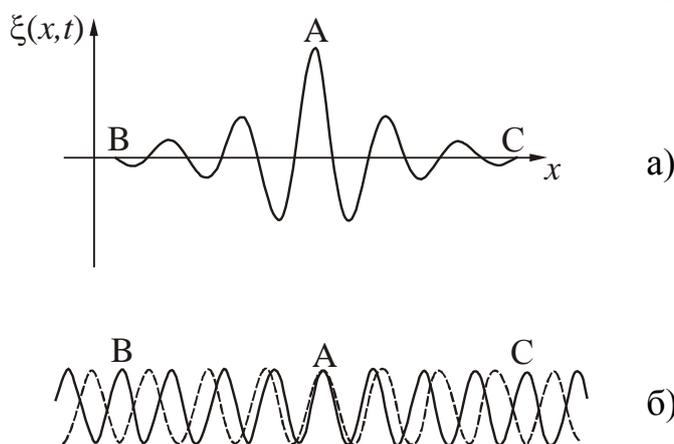


Рисунок 11.3

Групповая скорость – скорость перемещения точки с максимальной амплитудой. Таким образом, групповая скорость характеризует скорость, с которой волновой пакет (группа волн) переносит энергию.

Получим формулу для расчёта групповой скорости. Предположим, что волновой пакет (рис. 11.3 а) состоит из двух плоских волн с одинаковыми амплитудами,

близкими по значению частотами ω и $(\omega + d\omega)$, и волновыми числами k и $(k + dk)$. На рисунке 11.3 б дана «моментальная фотография» этих волн. Одна волна изображена сплошной линией, другая – пунктирной.

Интенсивность волнового пакета будет максимальной в точке А, где фазы обеих волн в данный момент времени совпадают. В точках В и С волны находятся в противофазе, поэтому интенсивность пакета равна нулю.

Напишем уравнения волн:

$$\xi_1 = A_0 \cos(\omega t - kx), \quad (11.6)$$

$$\xi_2 = A_0 \cos[(\omega + d\omega)t - (k + dk)x]. \quad (11.7)$$

В точке с максимальным значением амплитуды (точка А на рис. 11.3 а и 11.3 б) фазы обеих волн совпадают, поэтому в этой точке фазы не должны зависеть от волновых чисел k и $(k + dk)$. Это означает, что первая производная фазы $\varphi = \omega t - kx$ по волновому числу k должна быть равна нулю:

$$\frac{d\varphi}{dk} = 0.$$

Возьмём производную:

$$\frac{d\varphi}{dk} = t \cdot \frac{d\omega}{dk} - x = 0.$$

Отсюда:

$$\frac{x}{t} = \frac{d\omega}{dk}.$$

Отношение $\frac{x}{t}$ представляет собой групповую скорость u , так как оно определяет условие, при котором амплитуда максимальна. Тогда групповая скорость будет равна

$$u = \frac{d\omega}{dk}. \quad (11.8)$$

Таким образом, монохроматическая волна характеризуется фазовой скоростью $v = \frac{\omega}{k}$, которая равна скорости перемещения фазовой плоскости, а волновой пакет характеризуется групповой скоростью $u = \frac{d\omega}{dk}$, которая равна скорости переноса энергии волновым пакетом (группой волн).

Выражению (11.8) для групповой скорости можно придать другой вид. Заменив ω через произведение $v k$, получим:

$$u = \frac{d(vk)}{dk} = v + k \frac{dv}{dk}.$$

Далее напишем:

$$\frac{dv}{dk} = \frac{dv}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dk}.$$

Учтём, что волновое число $k = 2\pi/\lambda$, найдём записанные производные (попробуйте выполнить эти преобразования самостоятельно), получим

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}, \quad (11.9)$$

где λ – длина волны.

Если фазовая скорость не зависит от длины волны $\left(\frac{dv}{d\lambda} = 0\right)$, то $v = u$. Если фазовая скорость зависит от длины волны $\left(\frac{dv}{d\lambda} \neq 0\right)$, то фазовая и групповая скорости не совпадают. Понятие групповой скорости применимо только при условии, что поглощение энергии волны в данной среде невелико. При значительном затухании волн понятие групповой скорости утрачивает смысл.

При гидролокации, радиолокации и т. д. измеряют именно групповую скорость, так как большинство приёмных устройств подчиняется принципу суперпозиции, который означает, что результат нескольких одновременных воздействий представляет собой просто сумму результатов, вызванных каждым воздействием в отдельности.

• **Давайте подумаем!**

11.1. Капли дождя, падающие в пруд на или лужу, передают ей значительную энергию. Почему же дождь не возбуждает на поверхности водоёма сильных волн?

11.2. Сквозь открытую дверь можно хорошо слышать разговор даже в том случае, когда разговаривающие находятся за пределами видимости. Какое явление обеспечивает такую возможность?

11.3. Переносит ли энергию волна, которая описывается уравнением $\xi(x, t) = A \cos kx \cdot \cos \omega t$?

11.4. Какие превращения энергии происходят в стоячей волне в упругой среде?

11.5. Можно ли процесс возникновения стоячих волн считать частным случаем интерференции?

§12 Эффект Доплера в акустике

Эффектом Доплера* называется изменение частоты волн (соответственно, длины волны), регистрируемых приёмником, которое происходит вследствие движения источника этих волн и приёмника.

Выясним, как связаны между собой частоты источника и приёмника для различных случаев движения источника и приёмника относительно среды. Введём следующие обозначения: ν_0 – частота колебаний волн, испускаемых неподвижным источником; T_0 – период этих колебаний, λ_0 – соответствующая длина волны. Будем считать, что скорости источника и приёмника направлены по прямой, соединяющей источник и приёмник.

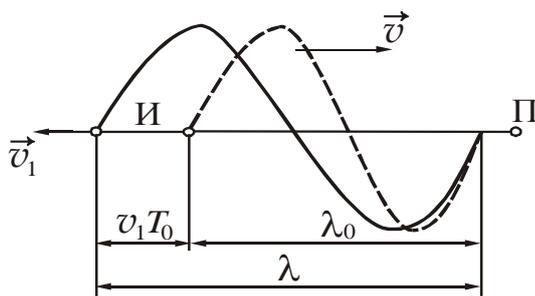


Рисунок 12.1

1. Пусть приёмник Π звуковых волн в упругой среде неподвижен относительно неё, а источник И удаляется со скоростью \vec{v}_1 (рис. 12.1). За время, равное периоду колебаний, источник переместится на расстояние

$$x = v_1 T_0 = \frac{v_1}{\nu_0}. \quad (12.1)$$

Длина волны λ , испускаемой движущимся источником, увеличивается на величину x (см. рис. 12.1):

$$\lambda = \lambda_0 + v_1 T_0 = (v + v_1) T_0$$

или

$$\lambda = \frac{v + v_1}{\nu_0}, \quad (12.2)$$

где v – фазовая скорость волны в среде, $\lambda_0 = v T_0$.

Частота, которую регистрирует приёмник:

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{\nu_0}{1 + \frac{v_1}{v}}. \quad (12.3)$$

Из анализа формулы (12.3) можно сделать следующий вывод:

Если источник удаляется от приёмника, то частота принимаемого сигнала уменьшается.

Если источник будет приближаться к приёмнику, то скорость \vec{v}_1 поменяет направление. В результате длина волны, испускаемая источником, станет меньше, а частота принимаемого сигнала увеличится:

*Доплер Иоганн Кристиан (1803–1853), австрийский математик, физик и астроном.

$$v = \frac{v}{\lambda} = \frac{v_0}{1 - \frac{v_1}{v}}$$

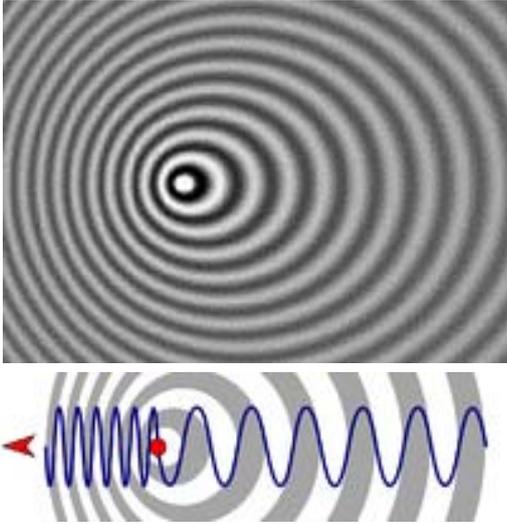


Рисунок 12.2

волны не изменится:

$$\lambda = \lambda_0 = \frac{v}{v_0}, \tag{12.4}$$

где v – фазовая скорость волны в среде.

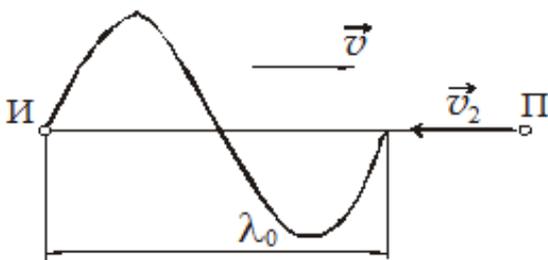


Рисунок 12.3

Из анализа формулы (12.5) можно сделать следующий вывод.

Если приёмник приближается к источнику, то частота принимаемого сигнала увеличивается.

Если приёмник будет удаляться от источника, то скорость \vec{v}_2 поменяет направление. Частота принимаемого сигнала станет меньше, чем частота источника:

$$v = \frac{v + v_2}{\lambda_0} = v_0 \left(1 - \frac{v_2}{v} \right).$$

Если направления скоростей не совпадают с проходящей через источник и приёмник прямой, то в формулах (12.3) и (12.5) надо брать проекции этих скоростей на направление указанной прямой.

Глава 3. Электромагнитные волны

§13 Уравнения Максвелла

«В истории человечества (если смотреть на неё, скажем, через десять тысяч лет) самым значительным событием XIX столетия, несомненно, будет открытие Максвеллом законов электродинамики. На фоне этого важного научного открытия гражданская война в Америке в том же десятилетии будет выглядеть мелким провинциальным происшествием».

Ричард Ф. Фейнман, лауреат Нобелевской премии 1965 года

Уравнения Максвелла – это фундаментальные уравнения классической макроскопической электродинамики, описывающие электромагнитные явления в любой среде, в том числе и в вакууме. Они сформулированы в 60-х годах XIX века английским учёным Дж. Максвеллом* на основе обобщения экспериментальных законов, которые устанавливают связь между электрическими и магнитными явлениями. Максвелл развил идеи Майкла Фарадея о том, что взаимодействие между электрически заряженными телами осуществляется посредством электромагнитного поля.

Первое уравнение является обобщением закона Фарадея для электромагнитной индукции. Максвелл предположил, что этот закон справедлив не только для проводящего, но и для любого замкнутого контура, мысленно выбранного в переменном магнитном поле. Согласно этому уравнению

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}, \quad (13.1)$$

т. е. циркуляция вектора напряжённости \vec{E} электрического поля по замкнутому контуру L равна скорости изменения потока вектора магнитной индукции через поверхность S , ограниченную данным контуром.

Таким образом, из этого уравнения следует, что **переменное магнитное поле всегда порождает вихревое электрическое поле**. Наличие проводящего контура не обязательно, он позволяет лишь обнаружить возникающее электрическое поле.

Знак «–» соответствует правилу Ленца для направления индукционного тока.

Второе уравнение является обобщением на переменные поля закона полного тока, утверждающего, что вокруг проводников с током существует магнитное поле. Максвелл предположил, что магнитное поле порождается не только токами, текущими в проводнике, но и переменными электрическими полями в диэлектриках или вакууме.

Второе уравнение Максвелла имеет вид:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{j}_{\text{пров}} + \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}, \quad (13.2)$$

*Максвелл Джеймс Клерк (1831–1879), английский физик.

т. е. циркуляция вектора напряжённости магнитного поля по произвольному замкнутому контуру L равна алгебраической сумме токов проводимости и тока смещения сквозь поверхность S , натянутую на этот контур.

$\vec{j}_{\text{пров}}$ – плотность тока проводимости.

Величина, пропорциональная скорости изменения электрического поля во времени, была названа Максвеллом **током смещения**.

$$\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{j}_{\text{см}} - \text{плотность тока смещения,}$$

Термин «ток смещения» является условным. По существу ток смещения – это изменяющееся со временем электрическое поле. Из всех физических свойств, присущих току проводимости, ток смещения обладает лишь одним – способностью создавать магнитное поле. Полный ток, равный сумме тока смещения и тока проводимости, всегда является замкнутым.

Ток смещения имеется везде, где есть изменяющееся со временем электрическое поле. Он существует и внутри проводов, по которым течёт переменный электрический ток. Но внутри проводов ток смещения бывает пренебрежительно мал по сравнению с током проводимости.

Таким образом, из второго уравнения следует, что **переменное электрическое поле приводит к появлению переменного магнитного поля**.

Третье уравнение:

$$\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0, \quad (13.3)$$

т. е. поток вектора магнитной индукции через произвольную замкнутую поверхность S равен нулю. Это означает, что **свободных магнитных зарядов в природе нет, а линии магнитной индукции замкнуты**. Магнитное поле порождается электрическими токами или движущимися электрическими зарядами.

Четвертое уравнение является обобщением теоремы Гаусса для электростатического поля на любое электрическое поле, как стационарное, так и переменное:

$$\oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{k=1}^N q_k, \quad (13.4)$$

т. е. поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность S определяется электрическим зарядом, находящимся внутри этой поверхности (в объёме V , ограниченном поверхностью S). Это означает, что **электрическое поле порождается зарядами**.

Уравнения Максвелла (13.1–13.4) не образуют полной замкнутой системы, позволяющей рассчитывать электромагнитные процессы при наличии материальной среды. Их дополняют соотношениями, связывающими векторы \vec{E} и \vec{D} , \vec{B} и \vec{H} , \vec{j} со свойствами среды и её состоянием.

Эти соотношения называют уравнениями состояния или материальными уравнениями. Они описывают электромагнитные свойства среды и для каждой конкретной среды имеют определённую форму. Для большинства изотропных сред уравнения состояния имеют простую линейную форму:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (13.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}, \quad (13.6)$$

$$\vec{j} = \sigma\vec{E}, \quad (13.7)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды,
 μ – магнитная проницаемость среды,
 σ – удельная электропроводность среды.

Из уравнений Максвелла следует, что переменное электрическое поле порождает магнитное поле, которое тоже оказывается переменным. Такое переменное магнитное поле в свою очередь порождает электрическое и т. д. Отсюда следует важный вывод о существовании нового физического явления: **электромагнитное поле способно существовать самостоятельно – без электрических зарядов и токов**. При этом изменение его состояния обязательно имеет волновой характер. Таким образом, если в некоторой области пространства возбудить с помощью колеблющихся зарядов переменное электромагнитное поле, то оно будет распространяться с некоторой скоростью в виде электромагнитных волн (ЭМВ).

Электромагнитная волна – периодическая последовательность взаимных превращений электрического и магнитного полей, распространяющихся в пространстве.

В случае однородной нейтральной непроводящей среды с постоянными проницаемостями ε и μ из системы уравнений Максвелла получают уравнения вида:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad (13.8)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \quad (13.9)$$

Уравнения (13.8) и (13.9) представляют собой типичные волновые уравнения (см. формулу (9.11)). Всякая функция, удовлетворяющая такому уравнению, описывает некоторую волну. Следовательно, уравнения (13.8) и (13.9) указывают на то, что **электромагнитные поля могут существовать в виде электромагнитных волн**.

Таблица 13.1

Система уравнений Максвелла и соответствующие физические явления и законы

№ п/п	Явление. Закон, описывающий явление	Уравнение Максвелла
1.	<p><u>Явление:</u> При изменении магнитного потока, пронизывающего проводящий контур, в нём возникает электродвижущая сила.</p> <p><u>Закон Фарадея:</u> Эдс электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур.</p> $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \text{ где } d\Phi = \vec{B}d\vec{S} - \text{ магнитный поток.}$ <p>Индукционный ток обусловлен возникающим в проводнике электрическим полем, которое порождается переменным магнитным полем.</p>	$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$ <p>Закон Фарадея справедлив не только для проводящего, но и для любого замкнутого контура, мысленно выбранного в переменном магнитном поле. Наличие проводящего контура не обязательно, он позволяет лишь обнаружить возникающее электрическое поле.</p> <p><u>Вывод:</u> Переменное магнитное поле всегда порождает вихревое электрическое поле.</p>
2.	<p><u>Явление:</u> Проводники с током создают магнитное поле.</p> <p><u>Закон полного тока:</u> Циркуляция вектора напряжённости магнитного поля \vec{H} по произвольному замкнутому контуру l равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром.</p> $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k=1}^N I_k$	$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{j}_{\text{пров}} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}$ <p>Магнитное поле порождается не только токами, текущими в проводнике, но и переменными электрическими полями в диэлектриках или вакууме. $\vec{j}_{\text{пров}}$ – плотность тока проводимости; $\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{j}_{\text{см}}$ – плотность тока смещения (величина, пропорциональная скорости изменения электрического поля).</p> <p><u>Вывод:</u> Переменное электрическое поле приводит к появлению переменного магнитного поля.</p>

3.	<p><i>Явление:</i> В природе отсутствуют свободные магнитные заряды, а линии магнитной индукции замкнуты.</p> <p><i>Теорема Гаусса для магнитного поля:</i> Поток вектора магнитной индукции \vec{B} сквозь произвольную замкнутую поверхность равен нулю.</p> $\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$	$\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$ <p>Поток вектора магнитной индукции через произвольную замкнутую поверхность S равен нулю.</p> <p><i>Вывод:</i> В природе отсутствуют свободные магнитные заряды, а линии магнитной индукции замкнуты. Магнитное поле порождается электрическими токами или движущимися электрическими зарядами.</p>
4.	<p><i>Явление:</i> Электростатическое поле создается неподвижными зарядами.</p> <p><i>Теорема Гаусса для электростатического поля:</i> Поток вектора электрического смещения сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охватываемых этой поверхностью.</p> $\oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{k=1}^N q_{k\text{охв}}$	$\oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{k=1}^N q_k$ <p>Поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность S определяется электрическим зарядом, находящимся внутри этой поверхности.</p> <p><i>Вывод:</i> Любое электрическое поле, как стационарное, так и переменное, порождается зарядами.</p>
<i>Соотношения, связывающие векторы \vec{E} и \vec{D}, \vec{B} и \vec{H}, \vec{j} со свойствами среды</i>		
5.	$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ <p>μ – магнитная проницаемость среды</p>	$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ <p>μ – магнитная проницаемость среды</p>
6.	$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$ <p>ε – диэлектрическая проницаемость среды</p>	$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$ <p>ε – диэлектрическая проницаемость среды</p>
7.	$\vec{j} = \sigma \vec{E}$ <p>σ – удельная электропроводность среды</p>	$\vec{j} = \sigma \vec{E}$ <p>σ – удельная электропроводность среды</p>

Сравнение с выражением (9.11) позволяет сделать вывод о том, что фазовая скорость электромагнитных волн равна

$$v_{\text{эмв}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}}. \quad (13.10)$$

Теория Максвелла опередила своё время и не была понята и принята его современниками. Сомнения вызывали как сложность теории, так и её основные выводы, не подтверждённые ещё экспериментально: предсказание токов смещения, электромагнитных волн, электромагнитной природы света, светового давления и др. Большой вклад в развитие этой теории внесли Г. Герц и А. Н. Лебедев.

• **Давайте подумаем!**

13.1. Объясните, почему слагаемое $\iint_S \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} d\vec{S}$ в уравнении Максвелла

$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{j}_{\text{пров}} + \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}$ важно для понимания распространения электромагнитной волны?

13.2. Что именно колеблется в электромагнитной волне?

§14 Электромагнитные волны

14.1 Плоская электромагнитная волна

Рассмотрим электромагнитную волну, распространяющуюся в нейтральной непроводящей среде (плотность тока $\vec{j} = 0$) с постоянными проницаемостями ϵ и μ ($\epsilon = \text{const}$, $\mu = \text{const}$). Направим ось Ox перпендикулярно волновым поверхностям. Тогда векторы \vec{E} и \vec{H} , а, значит, и их компоненты по координатным осям не будут зависеть от координат y и z . При этом уравнения (13.8) и (13.9) упрощаются и принимают вид:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}, \quad (14.1)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}. \quad (14.2)$$

Индексы y и z при E_y и H_z подчеркивают то обстоятельство, что векторы \vec{E} и \vec{H} направлены вдоль взаимно перпендикулярных осей Oy и Oz . (Напомним, что в этом случае $E_x = E_z = 0$, а $H_x = H_y = 0$).

Решением уравнения (14.1) является функция:

$$E_y(x, t) = E_{\text{max}} \cos(\omega t - kx + \alpha_1). \quad (14.3)$$

Решение уравнения (14.2) имеет аналогичный вид:

$$H_z(x, t) = H_{\max} \cos(\omega t - kx + \alpha_2). \quad (14.4)$$

В этих формулах ω – циклическая частота колебаний, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число,

α_1 и α_2 – начальные фазы колебаний в точке с координатой $x = 0$.

Колебания электрического и магнитного векторов в электромагнитной волне происходят с одинаковой фазой. Положив $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, получим:

$$E_y = E_{\max} \cos(\omega t - kx), \quad (14.5)$$

$$H_z = H_{\max} \cos(\omega t - kx). \quad (14.6)$$

Умножив уравнение (14.5) на единичный вектор оси Oy , а уравнение (14.6) – на единичный вектор оси Oz , получим уравнение плоской электромагнитной монохроматической волны в векторном виде:

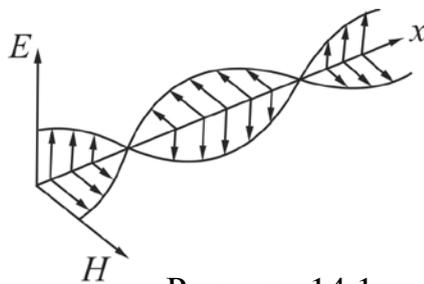


Рисунок 14.1

$$\vec{E} = \vec{E}_{\max} \cos(\omega t - kx), \quad (14.7)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_{\max} \cos(\omega t - kx). \quad (14.8)$$

На рис. 14.1 показана «моментальная фотография» плоской монохроматической волны. Из рисунка видно, что векторы \vec{E} и \vec{H} образуют с направлением распространения волны правовинтовую систему.

вую систему.

В фиксированной точке пространства векторы \vec{E} и \vec{H} изменяются со временем по гармоническому закону.

14.2 Экспериментальное исследование электромагнитных волн

Первые опыты с несветовыми электромагнитными волнами были осуществлены Г. Герцем* в 1887 – 1891 г.г. Приступая к работе над исследованием электромагнитных волн, Герц не был убежден в правильности теории Максвелла. Он больше склонялся к теории, предложенной его учителем – Г. Гельмгольцем*, в которой отвергалась идея токов смещения и возможность существования электромагнитных волн. И только убедившись на опыте в существовании электромагнитных волн и совпадении их свойств с теоретическими предсказаниями Максвелла, Герц стал сторонником этой теории.

С помощью больших металлических зеркал и асфальтовой призмы (размером более 1 м и массой 1200 кг) Герц осуществил отражение и преломление электромагнитных волн и обнаружил, что оба этих явления подчиняются законам, установленным в оптике для световых волн. Отразив бегущую плоскую волну с помощью металлического зеркала в обратном направлении,

*Герц Генрих Рудольф (1857–1894), немецкий физик.

*Гельмгольц Герман Людвиг Фердинанд (1821–1894), немецкий физик, математик, физиолог, психолог.

Герц получил стоячую волну. Расстояние между узлами и пучностями позволяло определить длину волны λ . Умножив длину волны на известную частоту колебаний, Герц рассчитал скорость электромагнитных волн. Она оказалась близкой к скорости света. Располагая на пути волн решётку из параллельных друг другу медных проволок, Герц обнаружил, что при вращении решётки вокруг луча интенсивность волн, прошедших сквозь решётку сильно изменяется. Когда проволоки, образующие решётку, были перпендикулярны к вектору \vec{E} , волна проходила сквозь решётку без помех. При расположении проволок параллельно \vec{E} волна сквозь решётку не проходила. Таким образом, было доказано, что электромагнитные волны являются поперечными.

П. Н. Лебедев в 1899 – 1900 г.г. получил волны сантиметрового и миллиметрового диапазона и исследовал их прохождение в кристаллах. При этом было обнаружено двойное лучепреломление (см. §23).

Передача сообщения с помощью электромагнитных волн на расстояние около 250 м была впервые осуществлена в 1896 году А. С. Поповым*. Были переданы слова «Генрих Герц».

14.3 Основные свойства электромагнитных волн

1. Электромагнитные волны – это электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью. Из теории Максвелла следует, что электромагнитные колебания распространяются в вакууме со скоростью света:

$$v_{\text{ЭМВ}}^{\text{вак}} = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}. \quad (14.9)$$

2. Скорость распространения электромагнитных волн в однородной изотропной среде равна

$$v_{\text{ЭМВ}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad (14.10)$$

т. е. она меньше скорости электромагнитных волн в вакууме.

Величина $\sqrt{\epsilon \mu} = n$ – называется абсолютным показателем преломления среды. Поэтому для скорости электромагнитных волн часто употребляется следующая формула:

$$v = \frac{c}{n}.$$

3. Электромагнитная волна – поперечная волна. Это означает, что $\vec{E} \perp \vec{v}$, $\vec{H} \perp \vec{v}$, т. е. направление колебаний векторов \vec{E} и \vec{H} перпендикулярно направлению распространения волны.

*Попов Александр Степанович (1859 – 1906), русский физик.

4. Электромагнитные волны переносят энергию. Объёмная плотность энергии w электромагнитного поля складывается из объёмной плотности энергии электрического поля $w_{\text{эл}}$ и объёмной плотности энергии магнитного поля $w_{\text{м}}$:

$$w = w_{\text{эл}} + w_{\text{м}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}. \quad (14.11)$$

В вакууме и непроводящей среде фазы векторов \vec{E} и \vec{H} совпадают, поэтому для любого момента времени будет выполняться соотношение:

$$w = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2. \quad (14.12)$$

Перенос энергии волной принято характеризовать вектором плотности потока энергии. Для механических волн этот вектор называется вектором Умова. Напомним, что вектор Умова равен произведению объёмной плотности энергии на вектор фазовой скорости волны, т. е.

$$\vec{j} = w\vec{v}.$$

Для электромагнитных волн вводят аналогичный вектор, который называют вектором Пойнтинга*.

Вектор Пойнтинга \vec{S} – векторная физическая величина, численно равная энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

Получим формулу, связывающую вектор Пойнтинга с характеристиками электромагнитной волны. Согласно (14.10)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu}}. \quad (14.13)$$

Тогда модуль вектора Пойнтинга будет равен

$$S = wv = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon}{\mu_0\mu}} E^2. \quad (14.14)$$

Учитывая, что $\varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2$, получим выражение для расчёта мгновенного значения вектора Пойнтинга:

$$S = \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon}{\mu_0\mu}} \cdot E \cdot E = EH = E_{\text{max}} H_{\text{max}} \cos^2(\omega t - kx). \quad (14.15)$$

Векторы \vec{E} и \vec{H} взаимно перпендикулярны, т. е. угол между ними 90° , а $\sin 90^\circ = 1$.

Следовательно, вектор Пойнтинга можно представить как векторное произведение векторов \vec{E} и \vec{H}

*Пойнтинг Джон Генри (1852–1914), английский физик.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}. \quad (14.16)$$

Направление вектора \vec{S} совпадает с направлением переноса энергии. Среднее значение вектора Пойнтинга определяет интенсивность электромагнитной волны:

$$I = \langle S \rangle = \frac{E_{\max} H_{\max}}{2}, \quad (14.17)$$

так как среднее значение $\cos^2(\omega t - kx)$ за период равно 1/2.

5. Для электромагнитных волн, как и для любых других волн, характерны интерференция, дифракция.

6. Электромагнитные волны – поперечные волны, поэтому у них может наблюдаться явление поляризации.

7. Электромагнитные волны поглощаются средой, а в диэлектрике, кроме этого, претерпевают дисперсию.

Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Поперечность волны

<http://youtube.com/watch?v=b8aGmez3qPQ&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

2. Установка для наблюдения трехсантиметровых волн

<http://youtube.com/watch?v=IuSbE4QmuUI&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

3. Куб и призма на пути трехсантиметровой волны

http://youtube.com/watch?v=rj2TYm_S630&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg

4. Трехсантиметровые волны: закон отражения (диэлектрик)

<http://youtube.com/watch?v=-JdhiLKZeXs&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

5. Трехсантиметровые волны: интерференция при отражении (просветление)

<http://youtube.com/watch?v=pgSgkAsc0Y&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

6. Трехсантиметровые волны: диэлектрическая линза

<http://youtube.com/watch?v=yRjOCOETIXQ&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

7. Трехсантиметровые волны: диэлектрическая призма

<http://youtube.com/watch?v=dBQTVLwiEq8&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

8. Решётка – зеркало для трёхсантиметровых волн

<http://youtube.com/watch?v=S2MNOtK2Weg&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

14.4 Шкала электромагнитных волн

Электромагнитные волны принято условно классифицировать по длинам волн в вакууме $\lambda = c/\nu$ или по частоте $\nu = \omega/2\pi$ (рис. 14.2). Между соседними диапазонами шкалы электромагнитных волн нет резких границ.

Отметим, что различные виды электромагнитного излучения отличаются лишь длиной волны (или, что то же самое, частотой). В зависимости от длины волны (частоты) меняются свойства волн, их действия, способы получения и названия отдельных участков.



Рисунок 14.2

Более подробная классификация волн дана в таблице 14.1.

Таблица 14.1. Шкала электромагнитных волн

Название диапазона волн	Примерный диапазон длин волн		Диапазон частот
	м	Другие единицы	Гц
Низкочастотные электрические колебания	$\infty \div 10^{+5}$	$\infty \div 100$ км	$0 \div 3 \cdot 10^3$
Радиоволны	$10^{+5} \div 10^{-3}$	100 км \div 1 мм	$3 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^{11}$
Инфракрасное излучение	$2 \cdot 10^{-3} \div 7,6 \cdot 10^{-7}$	2 мм \div 760 нм	$1,5 \cdot 10^{11} \div 4,0 \cdot 10^{14}$
Видимое излучение	$7,6 \cdot 10^{-7} \div 3,8 \cdot 10^{-7}$	760 \div 380 нм	$4,0 \cdot 10^{14} \div 8,0 \cdot 10^{14}$
Ультрафиолетовое излучение	$3,8 \cdot 10^{-7} \div 3 \cdot 10^{-9}$	380 \div 3 нм	$8,0 \cdot 10^{14} \div 10^{17}$
Рентгеновское излучение	$10^{-8} \div 10^{-12}$	10 нм \div 1 пм	$3 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{20}$
Гамма-излучение	10^{-11} и менее	10 пм и менее	$3 \cdot 10^{19}$ и выше

• **Давайте подумаем!**

14.1. Каково взаимное расположение векторов напряжённости электрического и магнитного полей в электромагнитной волне? Изобразите схему расположения указанных векторов относительно направления распространения волны.

14.2. Существует ли разность фаз между колебаниями напряжённости электрического и магнитного полей в данной точке электромагнитной волны?

§15 Способы получения электромагнитных волн

15.1 Радиоволны

Постоянные токи создают магнитные поля, не изменяющиеся со временем (стационарные). Если по проводу пропустить переменный ток высокой частоты, то вокруг провода возникают переменные электрическое и магнитное поля, образующие вместе единое электромагнитное поле.

Явление возбуждения переменным током электромагнитных полей принято называть излучением электромагнитных колебаний или излучением электромагнитных волн. При своём распространении электромагнитное поле теряет связь с проводом, вокруг которого оно первоначально создавалось. Если выключить ток в проводе, то электромагнитная волна продолжит свое движение в пространстве.

Встречая на своем пути проводники, магнитные составляющие электромагнитных колебаний возбуждают в этих проводниках переменное электрическое поле. Это электрическое поле создаёт такой же переменный ток, как ток, возбуждавший электромагнитные волны, только более слабый. На этом явлении основана техника радиопередачи и радиоприёма.

Впервые электромагнитные волны были получены Г. Герцем в 1888 году.

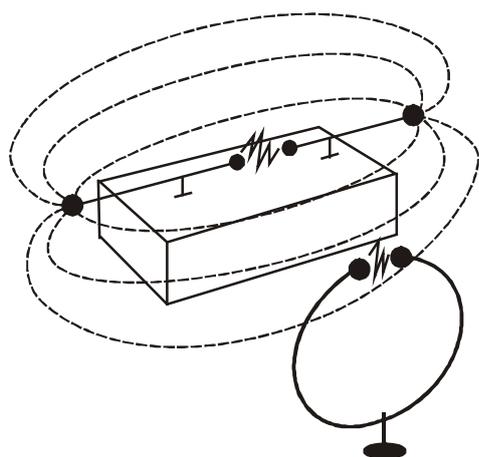


Рисунок 15.1

В его опытной установке излучателем электромагнитных волн был вибратор, который состоял из двух стержней с шарами на концах (рис. 15.1). Источником напряжения служила индукционная катушка Румкорфа. Обнаруживалась волна с помощью резонатора, представляющего собой незамкнутый виток провода, тоже с шарами на концах. Половинки вибратора заряжались до такого высокого напряжения, что между внутренними шарами через воздух проскакивала искра. Происходил электрический разряд. В этот момент, длившийся доли секунды, вибратор излучал серию затухающих электромагнитных волн. Пересекая

провод резонатора, расположенного поблизости, электромагнитная волна возбуждала в нём электрические колебания. Об этом свидетельствовала очень слабая искра, появлявшаяся между шарами резонатора.

Нельзя называть электромагнитным полем *постоянные* электрическое и магнитное поля, существующие в каком-либо месте пространства. В этом случае оба поля действуют самостоятельно и не взаимодействуют между собой. А электромагнитное поле всегда является сочетанием равноправных *переменных* электрического и магнитного полей, *взаимодействующих друг с другом*.

15.2 Электромагнитные волны оптического диапазона

Все тела, нагретые до высокой температуры, светятся, т. е. являются источниками видимого излучения. При обычных температурах они являются источниками невидимого инфракрасного излучения.

Из курса квантовой механики (см. § 39) известно, что электроны в атомах распределяются по энергетическим уровням. Каждому энергетическому уровню соответствует своё значение энергии. Если вещество нагреть, то электроны переходят на более высокие энергетические уровни, которые называются возбуждёнными. Отличительной особенностью возбуждённых состояний является то, что электроны находятся в этих состояниях порядка 10^{-8} секунд. Возвращаясь в основное состояние, электрон излучает энергию, равную разности энергий этих уровней.

Следовательно, электромагнитное излучение оптического диапазона объясняется переходами электронов с более высоких энергетических уровней на более низкие, т. е. уровни с меньшей энергией.

15.3 Рентгеновское излучение

Рентгеновское* излучение возникает при торможении веществом быстрых электронов, бомбардирующих это вещество. Рентгеновское излучение бывает двух типов.

Тормозное рентгеновское излучение возникает при торможении электронов, энергия которых не превышает некоторой критической величины, зависящей от вещества.

Характеристическое рентгеновское излучение связано с процессами, которые происходят в нижних застроенных оболочках атомов. При химических реакциях эти оболочки не изменяются, поэтому характеристическое рентгеновское излучение атомов вещества является индивидуальной характеристикой вещества.

15.4 Гамма-излучение

Гамма-излучение (гамма-лучи) испускается атомными ядрами при радиоактивных превращениях и ядерных реакциях, а также возникает при распаде частиц. Свойства гамма-излучения рассмотрены в разделе «Основы физики атомного ядра» (см. § 47, п. 47.4).

*Рентген Вильям Конрад (1845–1923), немецкий физик, лауреат Нобелевской премии 1901 г.

Таким образом, в классической электродинамике причиной электромагнитного излучения является ускоренное движение заряженных частиц (переменные токи). В квантовой теории – это рождение фотонов, происходящее при изменении состояния квантовой системы.

- **Давайте подумаем!**

15.1. Существует два вида эхолокации: ультразвуковая локация и радиолокация. Что между ними общего и в чём различие?

15.2. Определяя расстояние при помощи звуковой волны, измеряют время её распространения секундомером. Почему же в радиолокации для измерения времени распространения радиоволн используют электронно-лучевую трубку?

15.3. Радиоволна отразилась от металлической крыши. Как при этом изменяется длина волны и её частота?

15.4. Почему ухудшается или совсем прекращается радиоприем в автомобилях, при проезде их под мостом или в туннеле?

15.5. В летнее время качество радиоприёма ниже, чем в зимнее. Чем это можно объяснить?

Таблица 15.1

Сопоставление упругих и электромагнитных волн

Упругие	Электромагнитные
<i>Характер волны</i>	
– продольные, поперечные	– поперечные
<i>Основные характеристики</i>	
<p>T – период колебаний ν – частота колебаний λ – длина волны $\lambda = \nu T$</p> <p>где ν – скорость распространения волны.</p>	<p>T – период колебаний ν – частота колебаний λ – длина волны $\lambda = \nu T$</p> <p>где ν – скорость распространения волны.</p>
<i>Уравнение плоской монохроматической волны</i>	
<p>$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx)$</p> <p>$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число.</p>	<p>$E = E_{\max} \cos(\omega t - kx),$</p> <p>$H = H_{\max} \cos(\omega t - kx)$</p> <p>$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число.</p>
<i>Свойства</i>	
<p>Поперечные волны распространяются в твёрдой среде; продольные – в твёрдой, жидкой и газообразной среде.</p> <p>Не распространяются в вакууме.</p>	<p>Распространяются в твёрдой, жидкой и газообразной средах.</p> <p>Распространяются в вакууме.</p>
<p>Скорость упругих волн определяется свойствами среды (модулем упругости и плотностью). В системе отсчёта, движущейся относительно среды, скорость волны меняется в соответствии с классическим законом сложения скоростей.</p>	<p>Скорость электромагнитных волн в вакууме не зависит от движения источника или приёмника.</p> <p>$v_{\text{ЭМВ}}^{\text{вак}} = c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$</p>
<p>Переносят энергию. Перенос энергии волной характеризуют вектором Умова. Интенсивность волны:</p> $I = \frac{\rho A^2 \omega^2}{2} \nu$	<p>Переносят энергию. Перенос энергии волной характеризуют вектором Пойнтинга. Интенсивность волны:</p> $I = \frac{E_{\max} H_{\max}}{2}$
<p>Наблюдаются явления интерференции, дифракции. У поперечных волн наблюдается явление поляризации, у продольных – не наблюдается.</p>	<p>Наблюдаются явления интерференции, дифракции, поляризации.</p>
<p>Поглощаются средой, в диэлектрике претерпевают дисперсию.</p>	<p>Поглощаются средой, в диэлектрике претерпевают дисперсию.</p>

- **Обратите внимание!**

Термин применяется к объектам, к которым его применять нельзя

Сила звука – значение энергии, переносимой звуковой волной в единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны. Термин не имеет ничего общего с термином «сила» из курса механики.

Одно и то же понятие называется разными терминами

Сила звука – интенсивность звука.

- **Изучив раздел «Волны», студент должен ЗНАТЬ:**

Суть понятий:

Волна. Поперечные и продольные волны. Фронт волны. Звук, ультразвук, инфразвук, порог слышимости, порог болевого ощущения. Интерференция волн, стоячие волны, узел, пучность. Сложные волны, волновой пакет. Фазовая скорость, групповая скорость.

Определения физических величин, их единицы измерения и формулы, по которым рассчитываются величины:

Длина волны. Волновое число. Поток энергии, плотность потока энергии. Интенсивность волны. Сила звука. Уровень громкости звука.

Уравнения:

Волновое уравнение, уравнение плоской монохроматической волны. Система уравнений Максвелла.

Формулы:

Среднее значение объёмной плотности энергии волны. Вектор Умова. Интенсивность волны. Мгновенное и среднее значения вектора Пойнтинга.

Графики:

Графическое представление плоской бегущей волны, стоячей волны, электромагнитной волны.

Шкала электромагнитных волн.

ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ «ВОЛНЫ»

Инструкция. Данный тест предназначен для проверки знаний по теме “*Волны*”. Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу кодов. Если Вы дали

- 1) 36-40 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
- 2) 30-35 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
- 3) 24-29 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
- 4) меньше 24 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.
Прочитайте его ещё раз.

1. Продольными волнами являются ...
 - 1) электромагнитные волны.
 - 2) звуковые волны в газах.
 - 3) волны на поверхности воды.
 - 4) звуковые волны в жидкостях.
2. Поперечными волнами являются ...
 - 1) электромагнитные волны.
 - 2) звуковые волны в газах.
 - 3) волны на поверхности воды.
 - 4) звуковые волны в жидкостях.
3. Поперечные упругие волны возникают ...
 - 1) в газах и жидкостях.
 - 2) только в твердых телах.
 - 3) в жидкостях и твердых телах.
4. Длиной волны называется ...
 - 1) расстояние, которое проходит фронт волны в течение одного периода.
 - 2) расстояние между двумя точками, колеблющимися с разностью фаз π .
 - 3) расстояние, которое проходит волна за единицу времени.
 - 4) расстояние между двумя соседними точками, колеблющимися в одинаковых фазах.
5. Укажите уравнение, которое называется волновым уравнением.
 1. $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \omega^2 \xi = 0$
 2. $\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$
 3. $\xi(t) = a \cos(\omega t + \varphi)$
 4. $\xi(x, t) = a \cos(\omega t - kx)$
6. Укажите уравнение плоской монохроматической волны.
 1. $\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$
 2. $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \omega^2 \xi = 0$
 3. $\xi(t) = a \cos(\omega t + \varphi)$
 4. $\xi(x, t) = a \cos(\omega t - kx)$
7. Фазовой скоростью волн называется ...
 - 1) скорость перемещения фазовой плоскости.
 - 2) скорость распространения результирующих колебаний, получившихся при сложении нескольких волн.
 - 3) скорость распространения отдельной волны в среде.
 - 4) скорость изменения фазы колебаний точки среды, в которой распространяется волна.

8. Групповой скоростью волн называется ...
- 1) средняя скорость распространения волн в данной среде.
 - 2) скорость распространения энергии, переносимой группой волн (волновым импульсом).
 - 3) скорость распространения результирующих колебаний, получившихся при сложении нескольких волн.
 - 4) скорость изменения фазы колебаний точки среды, в которой распространяется волна.
9. При уменьшении периода колебаний источника в 2 раза длина волны ...
- 1) увеличивается в 4 раза.
 - 2) уменьшается в 4 раза.
 - 3) не изменяется.
 - 4) уменьшается в 2 раза.
 - 5) увеличивается в 2 раза.
10. Расстояние между узлом стоячей волны и соседней с ним пучностью равно ...
- 1) $0,5\lambda$
 - 2) λ
 - 3) $0,25\lambda$
 - 4) $0,75\lambda$
 - 5) $2\lambda/3$
11. Численное значение плотности потока энергии волны (вектора Умова) определяется ...
- 1) энергией, переносимой волной через единичную площадку.
 - 2) энергией, переносимой волной через данную площадку за единицу времени.
 - 3) энергией, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку.
 - 4) энергией, переносимой волной в единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.
12. Громкость звука зависит от ...
- 1) частотного состава звука.
 - 2) амплитуды колебания частиц среды, в которой распространяется звук.
 - 3) субъективного восприятия частоты звука.
 - 4) частоты колебания частиц среды, в которой распространяется звук.
13. Высота звука определяется ...
- 1) амплитудой колебания частиц среды, в которой распространяется звук
 - 2) субъективным ощущением интенсивности звуковой волны.
 - 3) частотным составом звука.
 - 4) частотой основного тона звука.
14. Тембр звука определяется ...
- 1) частотой основного тона.
 - 2) частотным составом звука.
 - 3) амплитудой основного тона.
 - 4) интенсивностью звука.
15. Областью слышимости называется ...
- 1) диапазон громкости звуков, воспринимаемых человеком.
 - 2) интервал частот звуков, воспринимаемых человеком.

- 3) воспринимаемый человеком частотный состав звука.
- 4) диапазон звуков, ограниченный пределами частот и интенсивностей, который воспринимается человеком.

16. К ультразвукам относятся звуки, ...

- 1) интенсивность которых превышает порог слышимости.
- 2) интенсивность которых меньше порога слышимости.
- 3) частота которых находится в интервале от 20 до 20 000 Гц.
- 4) частота которых больше 20 000 Гц.
- 5) частота которых меньше 20 Гц.

17. К инфразвукам относятся звуки ...

- 1) интенсивность которых превышает порог слышимости.
- 2) интенсивность которых меньше порога слышимости.
- 3) частота которых находится в интервале от 20 до 20 000 Гц.
- 4) частота которых больше 20 000 Гц.
- 5) частота которых меньше 20 Гц.

18. Эффект Доплера состоит ...

- 1) в изменении интенсивности волны вследствие поглощения в однородной среде.
- 2) в изменении частоты волны, регистрируемой приемником, которое происходит вследствие движения источника этих волн и приёмника.
- 3) в изменении фазы волны, регистрируемой приёмником, которое происходит вследствие движения источника этих волн.

19. Электромагнитными волнами являются ...

- | | | |
|----------------|--------------------|-------------------|
| 1) световые. | 2) ультразвуковые. | 3) рентгеновские. |
| 4) радиоволны. | 5) звуковые. | 6) сейсмические. |

20. Укажите перечень, в котором электромагнитные волны перечислены в порядке уменьшения их длин.

1. Радиоволны, инфракрасные, световые.
2. Ультрафиолетовые, световые, радиоволны.
3. Радиоволны, волны гамма-излучения, инфракрасные.
4. Световые, рентгеновские, волны гамма-излучения.

21. Укажите перечень, в котором электромагнитные волны перечислены в порядке возрастания их длин.

1. Радиоволны, инфракрасные, световые.
2. Ультрафиолетовые, световые, радиоволны.
3. Световые, рентгеновские, волны гамма-излучения.
4. Рентгеновские, ультрафиолетовые, инфракрасные.

22. Укажите перечень, в котором электромагнитные волны перечислены в порядке уменьшения их частот.

1. Радиоволны, инфракрасные, световые.
2. Ультрафиолетовые, световые, радиоволны.
3. Радиоволны, волны гамма-излучения, инфракрасные.
4. Световые, рентгеновские, волны гамма-излучения.

23. Условиями возникновения электромагнитных волн являются ...
- 1) изменение во времени магнитного поля.
 - 2) наличие проводников с постоянным током.
 - 3) наличие электростатического поля.
 - 4) изменение во времени электрического поля.
24. Электромагнитные волны обладают следующими свойствами ...
- 1) волны являются поперечными.
 - 2) волны являются продольными.
 - 3) волны могут распространяться в вакууме.
 - 4) при распространении волн происходит колебание частиц среды.
25. Электромагнитная волна распространяется в вакууме. Выберите правильное утверждение.
1. Для распространения электромагнитных волн нужна упругая среда.
 2. Скорость электромагнитных волн в вакууме зависит от длины волны.
 3. Период волны обратно пропорционален ее частоте.
 4. Частота колебаний электрического поля волны в два раза выше частоты колебаний ее магнитного поля.
26. Напряжённость электрического поля электромагнитной волны в вакууме в некоторой точке изменяется от максимального значения до нуля за 1 мкс. Длина волны равна ...
- 1) 300 м 2) 600 м 3) 900 м 4) 1200 м
27. Численное значение вектора Пойнтинга определяется ...
- 1) потоком энергии электромагнитной волны.
 - 2) энергией, переносимой электромагнитной волной в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны.
 - 3) энергией, переносимой электромагнитными волнами через данную площадку.
 - 4) энергией электромагнитной волны.
28. Из первого уравнения Максвелла $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$ следует, что ...
- 1) в пространстве, где изменяется электрическое поле, возникает вихревое магнитное.
 - 2) в пространстве, где изменяется магнитное поле, возникает вихревое электрическое.
 - 3) в природе не существуют единичные магнитные заряды.
 - 4) скорость распространения электромагнитных волн совпадает со скоростью света.

29. Из второго уравнения Максвелла $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{j}_{\text{пров}} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}$ следует ...

- 1) в пространстве, где изменяется электрическое поле, возникает вихревое магнитное.
- 2) в пространстве, где изменяется магнитное поле, возникает вихревое электрическое.
- 3) в природе не существуют единичные магнитные заряды.
- 4) скорость распространения электромагнитных волн совпадает со скоростью света.

30. Укажите уравнение Максвелла, которое отражает тот факт, что в пространстве, где изменяется электрическое поле, возникает вихревое магнитное поле.

$$\begin{array}{ll}
 1. \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} & 2. \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{j}_{\text{пров}} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S} \\
 3. \oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{k=1}^N q_k & 4. \oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \\
 5. \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} & 6. \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E} & 7. \vec{j} = \sigma \vec{E}
 \end{array}$$

31. Укажите уравнение Максвелла, которое отражает тот факт, что в пространстве, где изменяется магнитное поле, возникает вихревое электрическое поле.

$$\begin{array}{ll}
 1. \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} & 2. \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{j}_{\text{пров}} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S} \\
 3. \oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{k=1}^N q_k & 4. \oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \\
 5. \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} & 6. \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E} & 7. \vec{j} = \sigma \vec{E}
 \end{array}$$

32. Укажите уравнение Максвелла, которое отражает тот факт, что в природе не существуют единичные магнитные заряды.

$$\begin{array}{ll}
 1. \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} & 2. \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{j}_{\text{пров}} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S} \\
 3. \oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{k=1}^N q_k & 4. \oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \\
 5. \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} & 6. \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E} & 7. \vec{j} = \sigma \vec{E}
 \end{array}$$

33. Из системы уравнений Максвелла вытекает следующее утверждение ...

- 1) вокруг движущихся заряженных частиц возникает магнитное поле.
- 2) вокруг заряженных частиц или тел существует электрическое поле.

- 3) скорость распространения электромагнитных волн совпадает со скоростью света.
- 4) если в каком-то месте пространства электрическое или магнитное поле изменяется, то в окружающем пространстве будет распространяться электромагнитная волна.
34. Диапазон видимого света на шкале электромагнитных волн расположен ...
- 1) между радиоволнами и инфракрасным излучением.
 - 2) между инфракрасным и ультрафиолетовым излучением.
 - 3) между ультрафиолетовым и рентгеновским излучением.
 - 4) между рентгеновским и гамма-излучением.
35. Укажите правильное утверждение.
1. Световые волны распространяются только в вакууме.
 2. При переходе световых волн из одной среды в другую изменяется их частота.
 3. Для распространения световых волн обязательно нужна упругая среда.
 4. При переходе световых волн из одной среды в другую изменяется их длина волны.
36. Индуктивность катушки пропорциональна квадрату числа её витков. Чтобы в 2 раза увеличить длину волны, на которую настроен контур, надо число витков катушки электрического колебательного контура ...
- 1) уменьшить в 4 раза.
 - 2) увеличить в 4 раза.
 - 3) увеличить в 2 раза.
 - 4) уменьшить в 2 раза.
37. Радиоволны и световые волны имеют ...
- 1) одинаковый диапазон частот.
 - 2) одинаковую природу.
 - 3) одинаковую проникающую способность.
 - 4) одинаковую скорость распространения.
 - 5) одинаково выраженные квантовые свойства.
38. Скорость света в данной среде определяется по формуле ...
- 1) $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$
 - 2) $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0\epsilon\mu}}$
 - 3) $v = \frac{2\pi R}{T}$
 - 4) $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
 - 5) $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$.
39. Скорость света в данной среде зависит от ...
- 1) плотности среды.
 - 2) температуры
 - 3) давления.
 - 4) магнитных свойств среды.
 - 5) электрических свойств среды.
40. Укажите буквенное обозначение и единицу измерения каждой из перечисленных величин. *Пример:* сила – F – Н (ньютон).
- Длина волны, поток энергии, плотность потока энергии, интенсивность волны, громкость звука.

Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем!»

8.1. Фронт волны имеет форму плоскости.

8.2. При распространении продольных волн происходит деформация сжатия-растяжения среды, поэтому продольные волны могут распространяться в любых средах (твёрдых, жидких, газообразных). Поперечные же волны распространяются при наличии деформации сдвига, т. е. только в твёрдых телах. Следовательно, земная кора имеет толщину около 2900 км, в середине вещество находится в жидком состоянии.

9.1. Скорость волны в однородной среде не меняется. Скорости частиц изменяются, так как они совершают колебания.

9.2. При приближении к берегу нижние слои волн тормозятся о дно, а верхние, сохраняя скорость, забегают вперед, принимают такую острую форму, что их вершины срываются и, рассыпаясь, образуют пенный гребень.

10.1. Скорость распространения колебаний (скорость волны) возрастает во столько же раз, во сколько раз увеличивается длина волны. Поэтому частота колебаний не изменяется.

10.2. Громкость звука (сила звука) пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. При одной и той же силе ударов дверь деформируется больше, поэтому амплитуда её колебаний, вызванных ударами, больше.

10.3. Не противоречит. Увеличение громкости всегда сопровождается отчетливо наблюдаемым сокращением времени звучания. Значит, использование резонансного ящика увеличивает только мощность излучаемого звукового потока, но не общую энергию, излучаемую за время до полного затухания колебаний.

10.4. Пластилин увеличивает массу стекла. Это приводит к уменьшению собственной частоты стекла и расстраивает, таким образом, резонанс между ним и звуковыми волнами, приходящими от автомашины.

10.5. Совсем неразумно. Скорость звука (340 м/с) меньше скорости: пули ≈ 800 м/с). Поэтому момент, когда боец услышит звук пули, не предшествует моменту, когда пуля может его поразить.

10.6. Потому что на границе между стеклом и воздухом происходит частичное отражение звуковых волн.

10.7. Чем больше угол падения, тем большая часть волнового потока отражается.

10.8. При наличии геля ультразвук проходит в тело. Если же между преобразователем и телом образуется воздушный зазор, то волна полностью отразится от слоя воздуха и в тело не пройдет. Важно также, чтобы гель имел нужный показатель преломления.

10.9. Ультразвуковые волны имеют значительно меньшую длину волны, чем звуковые. Поэтому они имеют преимущества, связанные с направленностью излучения.

11.1. Потому что капли падают несогласованно друг с другом и возбуждаемые ими колебания на поверхности воды не когерентны.

11.2. Явление дифракции звуковых волн.

11.3. Это уравнение описывает стоячую волну. Стоячая волна энергию не переносит.

11.4. Энергия остается на месте, переходя из кинетической в потенциальную и обратно (это и является главным основанием, чтобы называть такую волну «стоячей»).

11.5. Можно. Прямая и обратная волны когерентны (вторая является продолжением первой).

13.1. Интерпретация уравнения
$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{j}_{\text{пров}} + \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$
, данная Максвеллом, сводится

к утверждению: магнитное поле создается не только токами проводимости, но и всяким переменным электрическим полем $\iint_S \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} d\vec{S}$ (\vec{E} – напряжённость электрического поля). Но

возникшее в какой-нибудь части пространства вихревое электрическое поле, по предположе-

нию Максвелла, не остается на месте, а распространяется в окружающем пространстве, как волна. Теоретическое предположение Максвелла получило экспериментальное подтверждение в опытах Герца, а в дальнейшем стало базой для всей радиотехники.

13.2. Значения модулей векторов индукции магнитного поля \vec{B} и напряжённости электрического поля \vec{E} .

14.1. Векторы напряжённости электрического и магнитного полей электромагнитной волны всегда перпендикулярны друг другу и к направлению движения волны.

14.2. Нет. Обе величины изменяются синфазно.

15.1. Общее: использование отражения волн, сведение измерения расстояний к измерению времени. Различие: в частоте и природе используемых волн; различными являются и области применения.

15.2. Скорость радиоволн равна 310^8 м/с. Время их распространения до большинства интересующих объектов не превышает нескольких миллисекунд. Такой малый промежуток времени нельзя измерить механическим секундомером. Поэтому приходится использовать в качестве часов электронно-лучевую трубку.

15.3. При отражении радиоволны от проводящей поверхности частота и длина волны не изменяются.

15.4. Мост или туннель экранируют (отражают и частично поглощают) электромагнитные волны.

15.5. Летом учащаются грозы. Они являются источником радиоволн, которые создают помехи радиоприёму.

КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Волны»

№ вопр.	Код ответа								
1	2,4	9	4	17	5	25	3	33	4
2	1	10	3	18	2	26	4	34	2
3	2	11	4	19	1,3,4	27	2	35	4
4	1,4	12	2	20	1,4	28	2	36	2
5	2	13	4	21	2,4	29	1	37	2,4
6	4	14	2	22	1,2	30	2	38	1
7	1	15	4	23	1,4	31	1	39	4,5
8	2	16	4	24	1,3	32	4	40	-

ЧАСТЬ 2. ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

§16 Предварительные сведения

Оптика – раздел физики, в котором изучаются свойства света, его физическая природа и взаимодействие с веществом. Под светом в оптике понимают электромагнитные волны с частотой ν от $1,5 \cdot 10^{11}$ до $3 \cdot 10^{16}$ Гц, соответствующие инфракрасному излучению, видимому свету и ультрафиолетовому излучению. Эту область частот принято называть **оптической областью спектра** электромагнитного излучения. Ей соответствуют длины волн λ от $2 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-8} м. Видимому свету соответствуют длины волн от $3,8 \cdot 10^{-7}$ до $7,6 \cdot 10^{-7}$ м. Выделение этой части спектра электромагнитных волн в отдельную область обусловлено общностью методов их экспериментального и теоретического исследования. В оптической области спектра частота ν уже сравнима с собственными частотами колебаний атомов и молекул, поэтому здесь существенны явления, обусловленные атомистическим строением вещества. Наряду с волновыми в этой области излучения проявляются и квантовые свойства света.

Таким образом, по современным представлениям свет обладает двойственной природой, т. е. ему присущ корпускулярно-волновой дуализм.

16.1 Некоторые сведения из геометрической оптики

Геометрической оптикой называют часть оптики, в которой изучаются законы распространения света в прозрачных средах на основе представления о нём, как о совокупности световых лучей. Под лучом понимают линию, вдоль которой переносится энергия электромагнитной волны.

Основу геометрической оптики образуют четыре закона: 1) закон прямолинейного распространения света; 2) закон независимости световых лучей; 3) закон отражения света; 4) закон преломления света.

Закон прямолинейного распространения света: **в однородной среде свет распространяется прямолинейно**. Этот закон является приближённым: при прохождении света через очень малые отверстия наблюдаются отклонения от прямолинейности, тем большие, чем меньше отверстие.

Закон независимости световых лучей: **лучи при пересечении не возмущают друг друга**. Пересечения лучей не мешают каждому из них распространяться независимо друг от друга. Этот закон справедлив при не слишком больших интенсивностях света. При интенсивностях, достигаемых с помощью лазеров, независимость световых лучей перестаёт соблюдаться.

При падении лучей света на границу раздела двух сред происходят явления отражения и преломления световых лучей (рис. 16.1).

Углом падения называют угол α между падающим лучом А света и перпендикуляром к границе раздела двух сред, восстановленным в точке падения О.

Углом отражения называют угол γ между отражённым лучом В света и перпендикуляром к поверхности отразившей свет, восстановленным в точке падения О.

Законы отражения: **1) угол падения α равен углу отражения γ** ;

2) *падающий луч А, отражённый луч В и перпендикуляр, восстановленный в точку падения О лежат в одной плоскости.*

Углом преломления называют угол β между лучом С, прошедшим через границу раздела двух сред, и перпендикуляром к границе, восстановленным в точке преломления О (рис. 16.1).

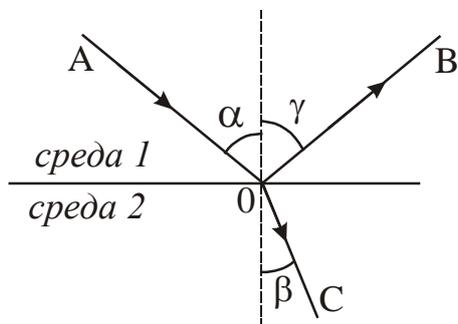


Рисунок 16.1

Законы преломления Снеллиуса*:

1) *преломлённый луч С, падающий луч А и перпендикуляр, восстановленный в точке падения О лежат в одной плоскости;*

2) *отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред:*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}. \quad (16.1)$$

Величина n_{21} называется *относительным показателем преломления* среды 2 относительно среды 1. Относительный показатель преломления n_{21} равен отношению абсолютных показателей преломления n_2 и n_1 этих сред:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (16.2)$$

Абсолютным показателем преломления среды называется показатель преломления среды относительно вакуума. Он равен отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (16.3)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, v – скорость света в данной среде.

Если $n_2 > n_1$, то среда 2 называется оптически более плотной по сравнению со средой 1.

Если $n_2 < n_1$, то среда 2 называется оптически менее плотной по сравнению со средой 1.

Следствия из закона Снеллиуса:

1. При переходе луча света из оптически менее плотной в оптически более плотную ($n_2 > n_1$) угол преломления β меньше угла падения α . Преломлённый луч С в точке падения луча отклоняется в сторону перпендикуляра к границе раздела двух сред (рис. 16.1).

2. При переходе луча света из оптически более плотной в оптически менее плотную среду ($n_2 < n_1$) угол преломления β больше угла падения α . Преломлённый луч С в точке падения луча отклоняется от перпендикуляра к границе раздела двух сред.

По мере увеличения угла падения α угол преломления β растёт, оставаясь всё время больше угла α . Наконец, при некотором угле падения значение угла

*Снеллиус Виллеброрд (1560–1626), голландский ученый.

преломления приблизится к 90° и преломлённый луч пойдёт почти по границе раздела сред (рис. 16.2а). Угол падения $\alpha_{\text{пр}}$, соответствующий углу преломления $\beta = 90^\circ$, называется **предельным углом полного отражения**. Он определяется из условия:

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = n_{21}. \quad (16.4)$$

Если $\alpha > \alpha_{\text{пр}}$, то происходит **полное внутреннее отражение** (рис. 16.2б).

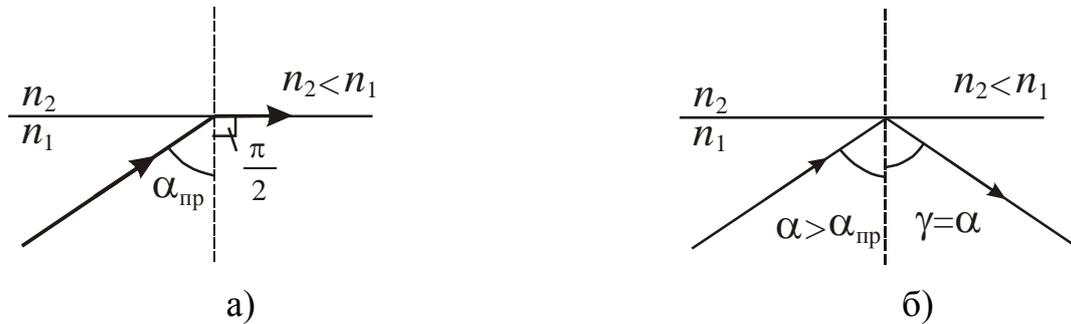


Рисунок 16.2

Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Полное внутреннее отражение

<http://youtube.com/watch?v=HN37Jz8DHYg&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

2. Модель световода

<http://youtube.com/watch?v=GQrykfs0eQ&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

16.2 Фотометрические величины

Раздел оптики, в котором рассматриваются энергетические характеристики оптического излучения и способы измерения энергии, переносимой электромагнитными волнами этого диапазона, называется **фотометрией**.

Наш глаз воспринимает из всего диапазона электромагнитных волн лишь узкий участок, называемый видимым светом. Этому участку соответствуют длины волн от 380 нм до 760 нм. Чувствительность глаза к свету с разными

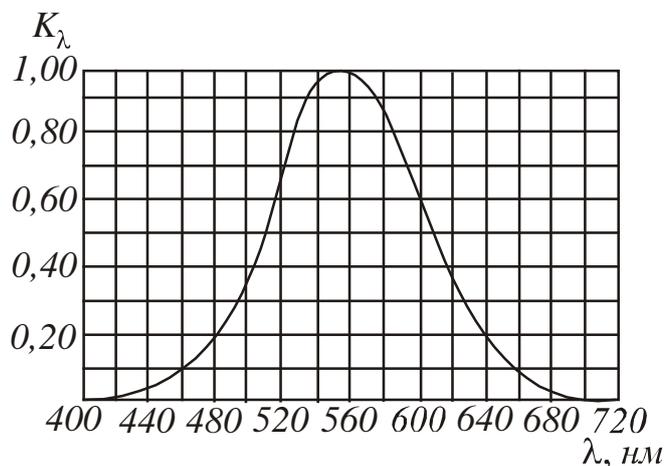


Рисунок 16.3

длинами волн не одинакова. Она имеет максимум при $\lambda = 555$ нм (зеленая часть спектра) и быстро падает к нулю при удалении от этого максимума (рис. 16.3). На этом графике по горизонтальной оси отложена длина волны λ , по вертикальной – относительная спектральная чувствительность глаза K_λ .

Относительная спектральная чувствительность K_λ – отношение чувствительности при данной длине волны к чувствитель-

ности при $\lambda = 555$ нм. Для длины волны $\lambda = 555$ нм K_λ равна единице.

При том же потоке энергии оцениваемая зрительно интенсивность света для других волн оказывается меньшей. Соответственно, K_λ для этих длин волн меньше единицы. Например, если $K_\lambda = 0,5$, то это означает, что для получения зрительного ощущения такой же интенсивности, какую имеет свет с $K_\lambda = 1$, свет данной длины волны должен иметь в два раза большую плотность потока энергии.

В связи с такими особенностями глаза количественные характеристики световых пучков оцениваются не по энергии, которую они переносят, а по зрительному ощущению.

Сначала введём такое геометрическое понятие, как телесный угол.

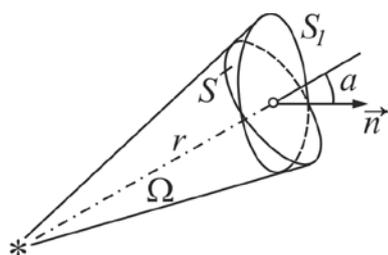


Рисунок 16.4

Телесный угол – угол, образованный конической поверхностью и численно равный отношению площади S , вырезаемой этим конусом на поверхности сферы радиусом r , к квадрату радиуса этой сферы (рис. 16.4):

$$\Omega = \frac{S}{r^2}. \quad (16.5)$$

Телесный угол измеряется в стерadians (ср). Стерadian – телесный угол, вершина которого расположена в центре сферы, и который вырезает на поверхности сферы площадь, равную квадрату радиуса. Полный телесный угол вокруг точки равен 4π стерadians, так как площадь сферы равна $S = 4\pi r^2$.

Если телесный угол опирается на некоторую площадку S_1 , нормаль к которой составляет угол α с радиусом (рис. 16.4), то

$$\Omega = \frac{S_1 \cos \alpha}{r^2}. \quad (16.6)$$

Для характеристики интенсивности света с учётом его способности вызывать зрительное ощущение вводится величина Φ , называемая световым потоком.

Световой поток (Φ) – физическая величина, равная мощности видимой части излучения, распространяющегося внутри данного телесного угла, оценивается по действию этого излучения на нормальный глаз.

Источник света, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием от места наблюдения до источника, называется **точечным**. Точечные источники характеризуют силой света.

Сила света (I) точечного источника в данном направлении – физическая величина, равная световому потоку, приходящемуся на единицу телесного угла:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (16.7)$$

Сила света измеряется в канделах. Кандела (кд) является одной из основных единиц Международной системы (СИ).

Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, сила излучения которого в заданном направлении составляет $1/683$ Вт/ср (ср – стерадиан).

Если точечный источник излучает равномерно по всем направлениям, то он называется **изотропным**. Для изотропного источника выполняется следующее соотношение:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}, \quad (16.8)$$

где Φ – полный световой поток, излучаемый источником. На основании этого соотношения вводится единица измерения светового потока – люмен.

Люмен (лм) равен световому потоку, излучаемому изотропным источником с силой света в 1 кд в пределах телесного угла в 1 стерадиан.

Опытным путём установлено, что световому потоку в 1 лм, образованному излучением с длиной волны $\lambda = 555$ нм, соответствует поток энергии в 1,6 мВт. Световому потоку в 1 лм, образованному излучением с другой λ , соответствует поток энергии

$$\Phi_{\lambda} = \frac{1,6}{K_{\lambda}} (\text{мВт}). \quad (16.9)$$

Освещённость (E) – физическая величина, равная отношению светового потока к площади освещаемой поверхности:

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (16.10)$$

Освещённость измеряется в люксах.

Люкс (лк) – это освещённость, создаваемая световым потоком 1 лм, равномерно распределённым на площади 1 м^2 .

Если поверхность освещается точечным источником, то освещённость в каждой точке поверхности может быть различной. Её можно выразить через силу света I , расстояние r от поверхности и угол α между нормалью к поверхности \vec{n} и направлением на источник:

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}. \quad (16.11)$$

Записанное соотношение называется **законом обратных квадратов**.

Освещённость рабочих мест оказывает большое влияние на работоспособность и психическое состояние человека. Нормы освещённости рабочего места устанавливаются на основе санитарных норм и правил. Их средние значения колеблются от 60 лк в складских помещениях до 2000 лк для особо сложных работ. Средняя освещённость рабочих столов в аудиториях, чертёжных залах и лабораториях высших учебных заведений должна составлять 400 лк. Минимальная освещённость для длительного пребывания людей составляет 120 лк.

- 16.1.** В каком случае угол преломления равен углу падения?
- 16.2.** При переходе света из воздуха в любое твёрдое тело или жидкость длина световой волны изменяется, но цвет света остается прежним. Почему?
- 16.3.** Почему при точных определениях коэффициента преломления пользуются не белым, а монохроматическим светом?
- 16.4.** Получено небольшое количество нового вещества, и нужно определить скорость света в нём. Прямой метод измерения времени распространения света нельзя применить. Какую характеристику вещества достаточно определить, чтобы можно было узнать скорость света в нём?
- 16.5.** Если через торец изогнутого стеклянного стержня или нити впустить световой поток, то он почти без ослабления доходит до другого торца. Какое явление лежит в основе действия таких световодов?
- 16.6.** Резкий изгиб световода приводит к прекращению, его действия. Почему?
- 16.7.** Какая из двух декоративных ламп одинаковой мощности – красная или зелёная – испускает больший световой поток?
- 16.8.** Со временем нить электрической лампы расплывается, становится тоньше и сопротивление её растёт. Должен ли этот процесс оказывать влияние на световой поток, испускаемый лампой и силу света этой лампы?
- 16.9.** Почему освещённость поверхности Земли в полдень больше, чем утром или вечером?

Глава 4. Волновая оптика

Волновая оптика – раздел физики, изучающий оптические явления, в которых проявляется волновая природа света. К ним относятся интерференция, дифракция, поляризация. В основе волновой оптики лежат уравнения Максвелла и вытекающие из них соотношения для электромагнитных волн. В классической волновой оптике рассматриваются среды, линейные по своим оптическим свойствам. В линейных средах диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемости не зависят от интенсивности света. Для таких сред справедлив принцип суперпозиции.

В электромагнитной волне колеблются векторы \vec{E} и \vec{H} . Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются колебаниями вектора напряжённости электрического поля \vec{E} . Поэтому вектор напряжённости электрического поля называют **световым вектором**.

§17 Интерференция света

17.1 Интерференция. Когерентность

Интерференция света – явление наложения когерентных световых волн, в результате которого происходит перераспределение энергии светового поля, т. е. образуются светлые участки (максимумы) и тёмные участки (минимумы) интерференционной картины.

Когерентные волны – волны, имеющие одинаковую частоту и постоянную разность фаз в заданной точке пространства.

Свет от обычных источников является некогерентным. Причины этого заключены в самом механизме излучения света атомами (молекулами, ионами) источника света. Возбуждённый атом излучает в течение очень короткого промежутка времени ($\Delta t \sim 10^{-8}$ с), после чего он, растратив свою избыточную энергию на излучение, возвращается в нормальное (невозбуждённое) состояние. Через некоторое время атом может вновь возбудиться, получив энергию извне, и начать излучать. Такое прерывистое излучение света атомами в виде отдельных кратковременных импульсов характерно для любого источника света, независимо от вида конкретных процессов, происходящих в нём. При спонтанном (самопроизвольном) излучении атомы излучают независимо друг от друга со случайными начальными фазами, беспорядочно изменяющимися от одного акта излучения к другому, поэтому спонтанно излучающие тела представляют собой некогерентные источники.

Для получения когерентных световых волн применяют метод деления света от одного источника на две или несколько волн. В каждой из них представлено излучение одних и тех же атомов источника, так что эти системы волн когерентны между собой. Затем волны проходят или разные расстояния, или идут в разных средах, после чего их вновь накладывают. Разность оптических

длин путей (см. п. 17.2), проходимых интерферирующими волнами не должна быть очень большой.

Один из способов получения когерентных волн показан на рис. 17.1. На пути источника света помещают узкую диафрагму Д, которая выделяет узконаправленный пучок. Затем этот пучок разделяют на два с помощью преграды П с двумя маленькими отверстиями. Интерференционную картину наблюдают на экране Э.

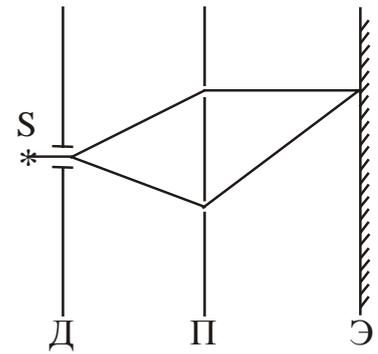


Рисунок 17.1

Разделение света также можно осуществить путём его отражения или преломления.

17.2 Условия максимума и минимума интерференции

Рассмотрим наложение двух световых волн, возбуждённых источниками S_1 и S_2 , в точке М (рис. 17.2). Пусть эти волны описываются уравнениями:

$$E_1(t, x_1) = A_1 \cos(\omega t - kx_1) \quad (17.1)$$

$$E_2(t, x_2) = A_2 \cos(\omega t - kx_2). \quad (17.2)$$

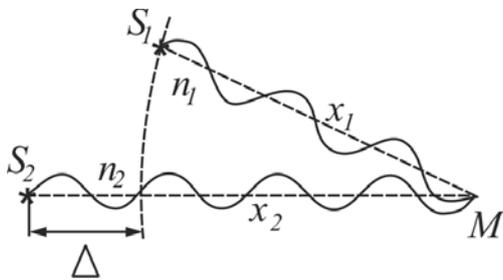


Рисунок 17.2

Амплитуду результирующего колебания определим методом векторных диаграмм:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi. \quad (17.3)$$

Как известно, интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды $I \sim A^2$ (см. §9, п. 9.3). С учётом этого в соотношении (17.3) заменим амплитуды через интенсивности и получим:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos \Delta\varphi. \quad (17.4)$$

Проанализируем (17.4). Если волны некогерентные, то $\Delta\varphi$ будет непрерывно меняться, а $\cos \Delta\varphi$ будет принимать с равной вероятностью любые значения от -1 до $+1$. Среднее значение $\cos \Delta\varphi$ по времени равно нулю. Отсюда можно сделать вывод, что при наложении некогерентных волн результирующая интенсивность световой волны равна сумме интенсивностей, создаваемых каждой из волн в отдельности:

$$I = I_1 + I_2. \quad (17.5)$$

Если волны когерентные, то $\cos \Delta\varphi$ имеет постоянное во времени (но своё для каждой точки пространства) значение. Если $\cos \Delta\varphi > 0$, то $I > I_1 + I_2$; если $\cos \Delta\varphi < 0$, то $I < I_1 + I_2$. Таким образом, при наложении когерентных волн происходит перераспределение энергии, в результате которого в одних областях волнового поля интенсивность волны усиливается (возникают максимумы), а в других – интенсивность уменьшается (возникают минимумы).

Установим, каковы условия наблюдения максимумов и минимумов.

1. Интенсивность **максимальна**, если в выражении (17.4) $\cos \Delta\varphi = 1$, или

$$\Delta\varphi = 2m\pi, \quad (17.6)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, т. е. целое число. Число m называется порядком максимума. Условие (17.6) является условием максимума интерференции.

2. Интенсивность **минимальна**, если в выражении (17.4) $\cos \Delta\varphi = -1$, или

$$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi, \quad (17.7)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$. Число m в этом случае называется порядком минимума. Условие (17.7) является условием минимума интерференции.

Условиям максимума и минимума можно придать другой вид. Пусть интерферирующие волны проходят через две однородные среды с различными показателями преломления n_1 и n_2 . Фазы волн, описываемых уравнениями (17.1) и (17.2), представим в виде (см. §9, п. 9.1):

$$\varphi_1 = \omega t - kx_1 = \omega\left(t - \frac{x_1}{v_1}\right),$$

$$\varphi_2 = \omega t - kx_2 = \omega\left(t - \frac{x_2}{v_2}\right),$$

где x_1 и x_2 – расстояния, которые прошли волны,
 v_1 и v_2 – скорости волн в этих средах.

Найдём разность фаз:

$$\Delta\varphi = \omega\left(t - \frac{x_1}{v_1} - t + \frac{x_2}{v_2}\right) = \omega\left(\frac{x_2}{v_2} - \frac{x_1}{v_1}\right). \quad (17.8)$$

Заменяем в (17.8) циклическую частоту ω через $2\pi/T$, а скорость волн в среде через c/n , где c – скорость света в вакууме, T – период колебаний. Получим:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 n_2 - x_1 n_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta, \quad (17.9)$$

где $\lambda = cT$ – длина волны в вакууме.

Величина

$$\Delta = n_2 x_2 - n_1 x_1, \quad (17.10)$$

называется **оптической разностью хода**.

Скалярная величина, численно равная произведению показателя преломления среды на геометрический путь, пройденный волной в этой среде, называется **оптическим путём**.

$$L = n x. \quad (17.11)$$

Заменив в (17.9) разность фаз по формулам (17.6), (17.7), можно получить:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (17.12)$$

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (17.13)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$, т. е. целое число.

Соотношение (17.12) определяет условие максимума интерференции. **Максимум интерференции наблюдается, если оптическая разность хода двух волн равна чётному числу полуволн.**

Соотношение (17.13) определяет условие минимума интерференции. **Минимум интерференции наблюдается, если оптическая разность хода двух волн равна нечётному числу полуволн.**

Полученные соотношения можно представить в виде таблицы.

Таблица 17.1. Условия максимумов и минимумов интерференции

Условие максимума	$\Delta\varphi = 2m\pi$	$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}$
Условие минимума	$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$	$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$

При отражении волны от оптически более плотной среды фаза колебаний вектора \vec{E} изменяется на противоположную, т. е. на π . Оптический путь при этом изменяется на половину длины волны.

$$L = nx - \frac{\lambda}{2}, \quad (17.14)$$

или

$$L = nx + \frac{\lambda}{2}. \quad (17.14a)$$

• **Давайте подумаем!**

17.1. Если две волны интерферируют друг с другом, то изменяет ли одна волна распространение другой?

17.2. Изменяется ли энергия при интерференции волн?

17.3. Можно ли наблюдать явление интерференции света, расположив на очень близком расстоянии друг от друга две раскалённые до свечения тонкие проволочки? Почему?

17.4. Световые волны поперечны, а звуковые – продольны. Можно ли наблюдать интерференцию при распространении звуковых волн?

17.3 Опыт Юнга

Интерференцию световых волн впервые наблюдал в 1802 году английский учёный Т. Юнг. Он пропустил яркий солнечный пучок света через небольшое отверстие в непрозрачной преграде, затем прошедшим через это отверстие светом освещались щели во второй непрозрачной преграде (рис. 17.3).

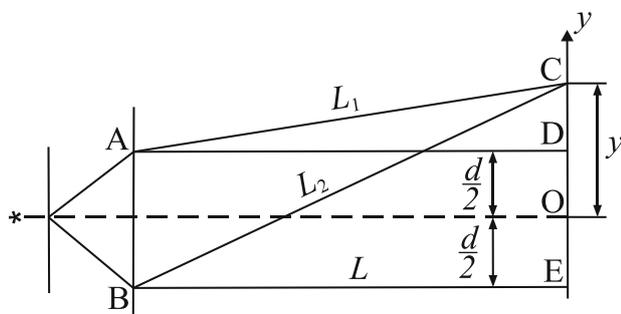


Рисунок 17.3

Если придерживаться господствовавшей в то время корпускулярной теории света, то на экране Юнг должен был увидеть две светящиеся точки. Вместо этого на экране он увидел чередующиеся светлые и тёмные полосы. Причём самая яркая из них находилась на экране посередине между отверстиями на перегородке. Юнг объяснил возникновение полос явлением интерференции света.

Используя данный опыт, можно определить длину волны. Пусть в точке С наблюдается максимум с произвольным номером m . Координата этой точки – y . Луч, выходящий из щели А, проходит до точки С путь L_1 ; луч, выходящий из щели В, проходит до точки С путь L_2 . Из $\triangle ADC$ и $\triangle BEC$ выразим пути L_1 и L_2 , используя теорему Пифагора:

$$L_1^2 = L^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2 = L^2 + y^2 - yd + \frac{d^2}{4}, \quad (17.15)$$

$$L_2^2 = L^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 = L^2 + y^2 + yd + \frac{d^2}{4}. \quad (17.16)$$

Вычтем из уравнения (17.15) уравнение (17.16), получим:

$$(L_2 - L_1)(L_2 + L_1) = yd - (-yd) = 2yd. \quad (17.17)$$

В формуле (17.17) произведена замена: $L_2^2 - L_1^2 = (L_2 - L_1)(L_2 + L_1)$.

Разность $(L_2 - L_1)$ представляет собой геометрическую разность хода ΔL . Расстояние от щелей до экрана значительно больше расстояния d между щелями, поэтому можно считать, что $(L_2 + L_1) \approx 2L$. С учётом этого можно уравнение (17.17) записать в следующем виде:

$$\Delta L \cdot 2L = 2yd. \quad (17.18)$$

Из уравнения (17.18) найдём ΔL :

$$\Delta L = \frac{yd}{L}. \quad (17.19)$$

В точке С наблюдается максимум, поэтому разность хода должна равняться чётному числу полуволн:

$$\Delta L = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (17.20)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ – порядок максимума.

Приравняем (17.19) и (17.20) и получим формулу для расчёта длины волны:

$$\lambda = \frac{yd}{mL}. \quad (17.21)$$

Измерив y, L и d , можно вычислить длину волны λ . Таким путём Юнгу впервые удалось измерить длину световых волн. Им же был предложен термин «интерференция».

Несмотря на то, что интерференционные эффекты наблюдались и до Юнга (кольца Ньютона, дифракционное окрашивание границ тени и др.), только Юнг смог дать им правильное описание. Он же впервые объяснил цветную окраску тонких плёнок, в частности, колец Ньютона.

Аналог опыта Юнга с электронами был поставлен в XX веке и показал справедливость основных представлений об интерференции.

§18 Интерференция в тонких плёнках

Интерференцию света можно наблюдать не только в лаборатории с помощью специальных оптических устройств, но и в естественных условиях. Примером может быть радужная окраска тонких плёнок (мыльных пузырей, плёнок нефти или масла на поверхности воды, прозрачных плёнок оксидов на

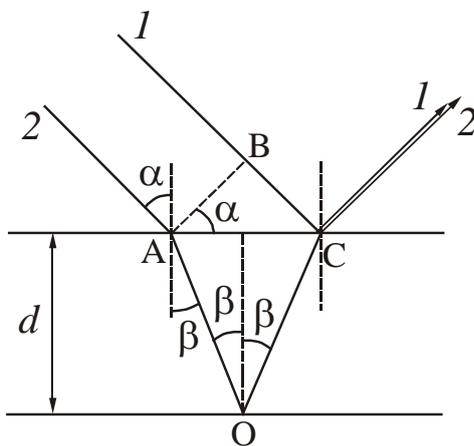


Рисунок 18.1

поверхностях закалённых металлических деталей и т. д.). В этом случае интерферируют волны, отражённые от верхней и нижней поверхности плёнки.

Рассмотрим плоскопараллельную прозрачную плёнку толщиной d , на которую падает плоская монохроматическая волна с длиной волны λ . Предположим, что по обе стороны от плёнки находится одна и та же среда, например, воздух (рис. 18.1). Волну можно рассматривать как параллельный пучок лучей. Плёнка отбрасывает вверх два параллельных пучка: один образовался за счёт

отражения от верхней грани, второй – за счёт отражения от нижней грани (пучки на рис. 18.1 представлены лучами).

Разность хода, приобретаемая лучами 1 и 2 до того, как они сойдутся в точке С, равна

$$\Delta = (AO + OC) n - BC, \quad (18.1)$$

где n – показатель преломления плёнки.

Из рисунка 18.1 следует, что

$$AO + OC = 2d / \cos \beta, \quad (18.2)$$

$$BC = AC \sin \alpha = 2d \operatorname{tg} \beta \sin \alpha. \quad (18.3)$$

По закону преломления

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n. \quad (18.4)$$

Подстановка соотношений (18.2), (18.3) и (18.4) в формулу (18.1) и проведение математических преобразований даст следующее выражение:

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}. \quad (18.5)$$

В точке С отражение волны происходит от оптически более плотной среды, поэтому её фаза изменяется на π . В точке О отражение происходит от оптически менее плотной среды, поэтому изменения фазы не происходит. В итоге между лучами 1 и 2 возникает дополнительная разность фаз, равная π . Её учитывают, вычитая из оптической разности хода Δ половину длины волны. В результате получим

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2}. \quad (18.6)$$

Из формулы (18.6) следует, что при постоянных d , n , α значение Δ для всей плёнки будет одним и тем же, и интенсивность отражённого от неё света одинакова для любой точки поверхности. Интерференционных полос нет, и в зависимости от значений Δ интенсивность отражённого света либо максимальна, либо уменьшается до нуля.

Для возникновения интерференционных полос в отражённом свете необходимо, чтобы либо толщина плёнки d , либо угол падения α для разных точек поверхности изменялись. Соответственно, рассматривая интерференцию в тонких плёнках, различают полосы равного наклона и полосы равной толщины.

Полосы равного наклона наблюдаются в тех случаях, когда на плоскопараллельную тонкую плёнку падает под разными углами α_1 , α_2 сходящийся (или расходящийся) пучок света (рис. 18.2). Так как толщина плёнки d и её показатель преломления n везде одинаковы, то оптическая разность хода интерферирующих лучей изменяется вдоль поверхности плёнки из-за изменения угла падения α . Условия интерференции для всех лучей, падающих на поверхность плёнки и отражающихся от неё под одним и тем же углом, одинаковы. Поэтому интерферен-

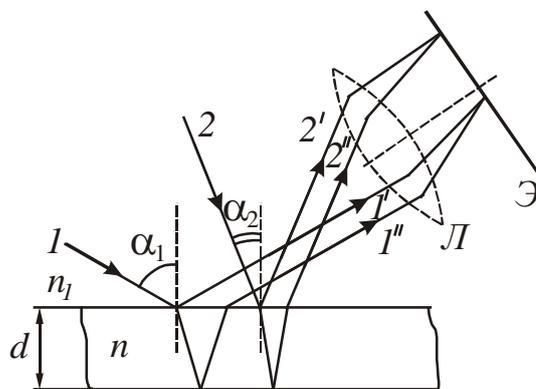


Рисунок 18.2

ционная картина в этом случае называется полосами равного наклона. Полосы равного наклона наблюдают на экране Э, который установлен в фокальной плоскости линзы Л. Если линзы не было бы, то интерференционную картину можно было бы наблюдать только на бесконечности – в месте пересечения лучей 1'1'', 2'2'' и т. д. Для их визуального наблюдения нужно аккомодировать глаз на бесконечность.

Полосы равной толщины наблюдаются при отражении параллельного пучка лучей (угол падения $\alpha = \text{const}$) от тонкой прозрачной плёнки, толщина которой d неодинакова в разных местах. Условия интерференции будут одинаковы в тех точках, которым соответствуют одинаковые значения d . Поэтому рассматриваемая интерференционная картина называется полосами равной толщины. Полосы равной толщины локализованы вблизи поверхности плёнки, т. е. для их наблюдения необходимо аккомодировать глаз практически на поверхность самой пленки. Примером полос равной толщины являются кольца Ньютона.

Кольца Ньютона наблюдаются в том случае, когда выпуклая поверхность линзы малой кривизны соприкасается с плоской поверхностью хорошо отполированной пластинки, так что остающаяся между ними воздушная прослойка постепенно утолщается от центра к краям (рис. 18.3). Если на линзу падает пучок монохроматического света, то световые волны, отражённые от верхней и нижней границ этой воздушной прослойки, будут интерферировать

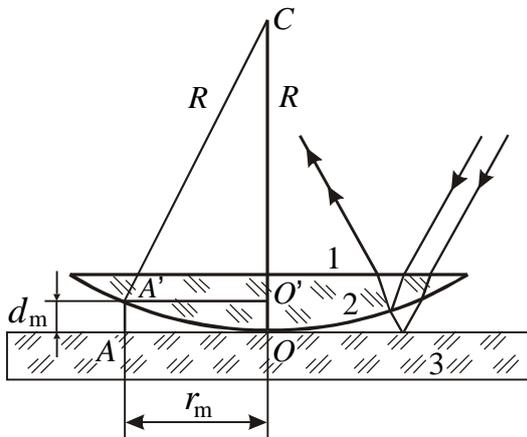


Рисунок 18.3

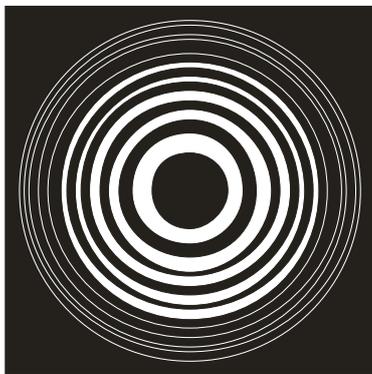


Рисунок 18.4

между собой. При этом получается следующая картина: в центре – тёмное пятно, окружённое рядом концентрических светлых и чёрных колец убывающей ширины (рис. 18.4).

Произведём расчёт колец Ньютона в отражённом свете. Так как интерференция происходит между волнами, отражёнными от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, то для вычисления разности хода надо иметь в виду не только разность хода внутри воздушной прослойки, но также и изменение фазы электрического вектора при отражении на границе воздух – стекло. Это изменение приводит к появлению дополнительной разности фаз π . В результате разность хода изменяется на $\lambda/2$.

Оптическая разность хода лучей, отражённых от двух поверхностей, в соответствии с формулой (18.6) будет равна:

$$\Delta = 2d_m \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2},$$

где d_m – толщина плёнки (толщина воздушного зазора);
 n – показатель преломления плёнки ($n = 1$, т. к. прослойка воздушная);
 α – угол падения лучей. Будем считать, что свет падает перпендикулярно поверхности линзы. В этом случае $\alpha = 0^\circ$.

Из треугольника $A'O'C$ (см. рис. 18.3) найдём величину d_m , используя теорему Пифагора (выполните это самостоятельно):

$$d_m = \frac{r_m^2}{2R}, \quad (18.73)$$

где r_m – радиус кольца, имеющего номер m ;
 R – радиус кривизны линзы.

Тёмное кольцо (минимум интерференции) наблюдается, если выполняется следующее условие:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (18.8)$$

Из формул (18.6), (18.7), (18.8) получим:

$$r_m = \sqrt{2mR \frac{\lambda}{2}}. \quad (18.9)$$

Аналогично можно получить выражение для расчёта радиуса светлых колец:

$$r_m = \sqrt{(2m + 1)R \frac{\lambda}{2}}. \quad (18.10)$$

Примечание: При расчёте колец Ньютона не нужно учитывать волну, отражённую от верхней (плоской) поверхности линзы, так как эта волна не будет когерентной волнам, отражённым от границ воздушной прослойки.

Интерференционную картину, называемую кольцами Ньютона, используют для проверки качества плоских поверхностей. Если интерференционная картина представляет собой кольца правильной формы, то они получены от линзы и пластины, поверхности которых изготовлены с требуемой высокой точностью.

Посмотрите лекционную демонстрацию:

1. Интерференция двух волн. Бипризма Френеля

<http://youtube.com/watch?v=1u6lo020NcQ&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

- Давайте подумаем!

18.1. Под действием сильного нагревания сталь покрывается ярко окрашенной радужной плёнкой. Объясните причину этого явления.

18.2. Почему интерференционные явления наблюдаются только в тонких плёнках и пластинках?

§19 Применение интерференции

Просветление оптики. Интерференция при отражении от тонких плёнок лежит в основе просветления оптики. Прохождение света через каждую преломляющую поверхность линзы сопровождается отражением примерно 4% падающего света. В сложных объективах такие отражения совершаются многократно, и суммарная потеря светового потока достигает заметной величины. В просветлённой оптике для устранения отражения света на каждую свободную

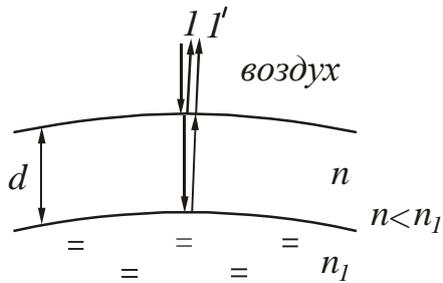


Рисунок 19.1

поверхность линзы наносится тонкая плёнка вещества с показателем преломления меньшим, чем у линзы (рис. 19.1). Толщина плёнки подбирается так, чтобы волны, отражённые от обеих её поверхностей, погасили друг друга.

Рассчитаем минимальную толщину плёнки, нанесённой на поверхность линзы. Лучи 1 и 1', отражённые от верхней и нижней граней, когерентны и будут интерферировать. В соответствии с формулами (18.6) и (17.11) запишем:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}. \quad (19.1)$$

Волна дважды отражается от оптически более плотной среды. Фаза колебаний вектора \vec{E} дважды изменяется на противоположную, т. е. в результате она не изменится. Это означает, что разность хода рассматриваемых лучей также не изменится.

Свет падает нормально, т. е. угол падения $\alpha = 0^\circ$, $\sin 0^\circ = 0$. С учётом этого получим:

$$2dn = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}. \quad (19.2)$$

Отсюда следует, что толщина плёнки, соответствующей минимуму интенсивности отражённого света равна:

$$d = \frac{(2m + 1)\lambda}{4n}. \quad (19.3)$$

Минимальная толщина плёнки будет при условии $m = 0$:

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4n}. \quad (19.4)$$

Особенно хороший результат достигается в том случае, если показатель преломления плёнки равен корню квадратному из показателя преломления линзы $n = \sqrt{n_1}$. При этом условии интенсивность обеих отражённых от поверхностей плёнки волн одинакова.

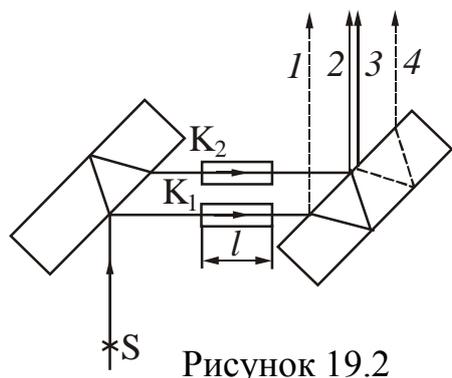
Белый свет – это свет, в котором присутствуют все длины волн видимого диапазона. Толщину плёнки в объективах фотоаппаратов принято рассчитывать для средней части спектра ($\lambda \sim 550$ нм), поэтому просветлённая оптика имеет сиреневатый оттенок (красная и фиолетовая части спектра не гасятся). Для наибольшего гашения отражённого света применяют двух, трёх и многослойные просветляющие плёнки, которые уменьшают степень отражения света в широком спектральном интервале.

Гашение света не означает превращение световой энергии в другие формы. Как и при интерференции механических волн, гашение волн друг другом в данном участке пространства означает, что световая энергия сюда просто не попадает. Гашение отражённых волн, следовательно, означает, что весь свет проходит сквозь объектив.

Просветлённый объектив требует бережного обращения, так как плёнки, нанесённые на поверхность линз, легко повредить. Кроме того, тончайшие плёнки загрязнений (жир, масло) на поверхности просветляющего покрытия нарушают его работу и резко увеличивают отражение света от загрязнённой поверхности. Следует помнить, что следы пальцев со временем разрушают просветляющее покрытие.

Интерферометры. Явление интерференции используют в ряде довольно точных приборов, которые называются *интерферометрами*. Интерферометр Жамена применяется для точных измерений изменения показателя преломления газов в зависимости от температуры, давления и влажности.

Схема интерферометра представлена на рис. 19.2. Две толстые одинаковые пластины устанавливаются параллельно друг другу. Монохроматический свет от источника S падает на поверхность первой пластины под углом, близким к 45° . Из первой пластины выйдет два луча, идущих на некотором расстоянии друг от друга.



На их пути помещаются кюветы K_1 и K_2 . Если одну из кювет заполнить газом с известным показателем преломления, а вторую – газом, показатель преломления которого измеряется, то между лучами возникает дополнительная разность хода. Затем эти лучи падают на вторую пластинку. Из неё выходят уже четыре луча, причём второй и третий накладываются друг на друга. В результате возникновения дополнительной разности хода интерференционная картина смещается. По смещению интерференционной картины определяют изменение показателя преломления газа, процентное содержание примеси и т.д. Интерферометры также применяются для точных измерений длин, в частности в станко- и машиностроении, и для оценки качества оптических поверхностей и проверки оптических систем в целом.



На рис 19.3 изображён шахтный интерферометр, который используют для определения процентного содержания метана и углекислого газа в рудничном воздухе действующих проветриваемых горных выработок. Действие прибора основано на измерении смещения интерференционной картины, происходящего вследствие изменения состава исследуемого воздуха, который находится на пути одного из двух лучей, способных интерферировать.

Давайте подумаем!

19.1. Для уменьшения отражения света линзы покрывают особой плёнкой. Что происходит с энергией, которая раньше отражалась? Поглощается ли она пленкой?

19.2. Почему линза, покрытая просветляющей плёнкой, кажется фиолетовой при рассмотрении её в отражённом свете?

§20 Дифракция света

Дифракция – это совокупность явлений, которые обусловлены волновой природой света и наблюдаются при его распространении в среде с резко выраженными неоднородностями. В узком смысле дифракция – это способность световой волны огибать препятствия, размеры которых соизмеримы с длиной волны, и попадать в область геометрической тени.

Между интерференцией и дифракцией нет существенного физического различия. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока, которое происходит при наложении когерентных волн (суперпозиции волн). Перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых конечным числом дискретных когерентных источников, принято называть интерференцией волн. Перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых когерентными источниками, расположенными непрерывно, принято называть дифракцией волн.

Приближённый метод, с помощью которого можно рассчитать закономерности дифракционных картин, называется **принципом Гюйгенса-Френеля***. Основные положения принципа Гюйгенса – Френеля заключаются в следующем:

1. Каждую точку фронта волны можно рассматривать, как источник вторичных сферических волн (рис. 20.1).
2. Вторичные волны когерентны, поэтому они интерферируют между собой.
3. Амплитуда колебаний в любой точке определяется как результат интерференции вторичных волн от бесконечного множества вторичных источников, т. е. в точке А (рис. 20.1) накладывается множество волн.

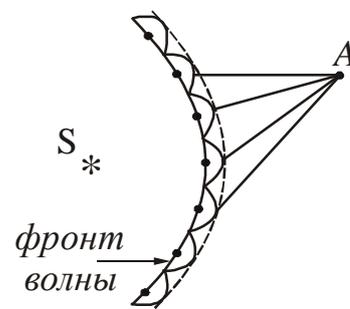


Рисунок 20.1

*Гюйгенс Христиан (1629–1695), голландский физик, математик и астроном.

*Френель Огюст Жан (1788–1827), французский физик.

20.1 Дифракционная решётка

Дифракционная решётка – спектральный оптический прибор, предназначенный для разложения света в спектр. Она представляет собой плоскую стеклянную пластинку, на которую с помощью делительной машины через строго одинаковые интервалы наносят параллельные штрихи. Промежутки между штрихами прозрачны для световых лучей и играют роль щелей. Штрихи рассеивают лучи и, поэтому, являются непрозрачными. Основным параметром решётки является расстояние между серединами соседних штрихов, которое называют **периодом d (постоянной) дифракционной решётки**:

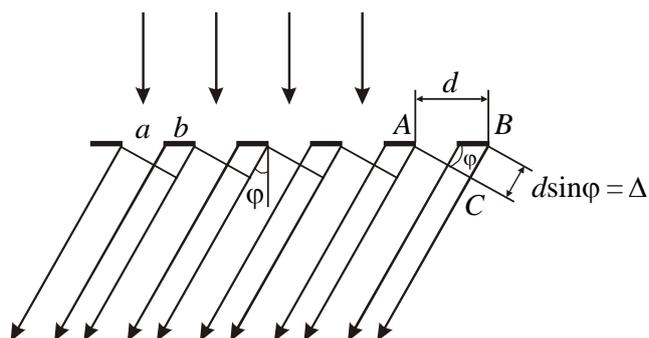


Рисунок 20.2

$$d = a + b, \quad (20.1)$$

где a – ширина щели, b – размер препятствия (см. рис. 20.2).

На 1 мм может быть нанесено $10^3 \div 10^5$ штрихов, а период решётки может иметь значение $(1 \div 10)$ мкм.

Рассмотрим дифракцию параллельных лучей. Чтобы получить пучок параллельных лучей

обычно используют небольшой источник света. Его помещают в фокусе собирающей линзы. Лучи после линзы идут параллельно друг другу. Распределение интенсивности изучают с помощью второй линзы, находящейся за решёткой и экрана, расположенного в фокальной плоскости этой линзы.

Пусть световая волна падает на решётку нормально (т. е. перпендикулярно её поверхности). Из каждой щели выходят лучи по всем направлениям (рис. 20.2). Для наглядности на рисунке из множества лучей указаны те, которые отклонились на некоторый угол φ от первоначального направления. Угол φ называется **углом дифракции**. С помощью линзы эти лучи можно собрать в одну точку на экране (рис. 20.3). Так как в эту точку лучи приходят с некоторой постоянной разностью хода, то будет наблюдаться их интерференция.

Для того чтобы наблюдался максимум, должно быть выполнено условие:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (20.2)$$

где Δ – разность хода лучей, λ – длина волны,
 $m = 0, 1, 2, 3 \dots$ – порядок (номер) дифракционного максимума.

Из прямоугольного треугольника ABC (см. рис. 20.2) можно найти разность хода лучей от соответствующих точек соседних щелей:

$$\Delta = d \sin \varphi. \quad (20.3)$$

Дифрагирующие лучи от всех других соответствующих точек соседних щелей будут иметь такую же разность хода в том же направлении. Другие пары щелей можно рассмотреть аналогичным путем.

Приравняв выражения (20.2) и (20.3), получим условие главных максимумов для дифракционной решётки:

$$d \sin \varphi = m\lambda. \quad (20.4)$$

Согласно (20.4) положения максимумов зависят от длины волны λ . По-

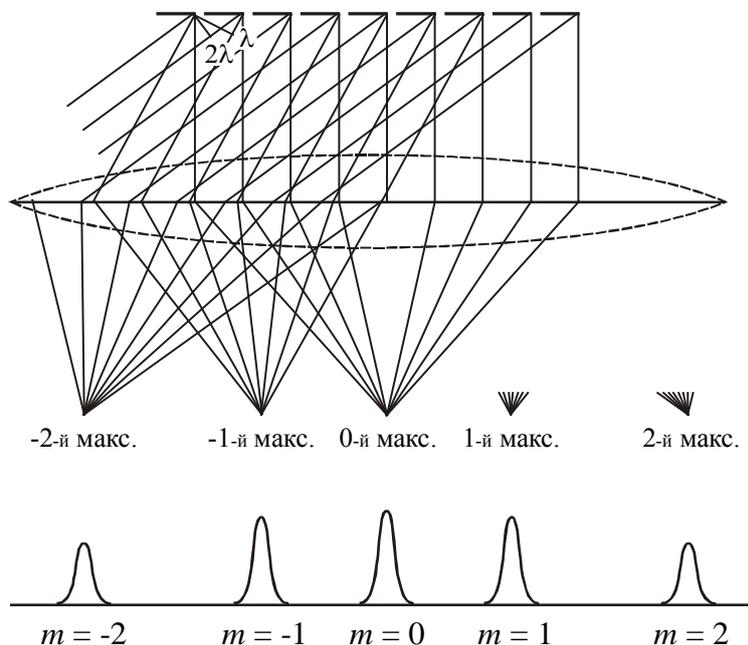


Рисунок 20.3

этому, используя это соотношение, можно определять длину волны соответствующего излучения. Дифракционную картину получают на экране, который располагают в фокальной плоскости собирающей линзы. Дифракционная картина будет иметь вид узких светлых полос, разделённых тёмными промежутками. Центральный максимум ($m = 0$) имеет наибольшую интенсивность. Все другие располагаются симметрично относи-

тельно центрального максимума справа и слева (рис. 20.3). По мере удаления от центра их интенсивность уменьшается.

При освещении решётки белым светом на экране наблюдается неокрашенный центральный максимум нулевого порядка, а по обе стороны от него – дифракционные спектры 1-го, 2-го и т. д. порядков. Спектры имеют вид радужных полосок, у которых наблюдается непрерывный переход окраски от фиолетового цвета у внутреннего края спектра к красному у внешнего края.

Основными характеристиками дифракционной решётки являются её разрешающая способность и дисперсия.

Разрешающей способностью спектрального прибора называют безразмерную величину

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \quad (20.5)$$

где $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ – минимальная разность длин волн двух спектральных линий, при которой эти линии воспринимаются отдельно.

Разрешающую способность решётки можно рассчитать, пользуясь условием Рэля*, по которому две монохроматические спектральные линии разрешаются (видны отдельно) в том случае, когда главный максимум одной линии

*Стретт Джон Уильям, лорд Рэлей (1842–1919), английский физик, лауреат Нобелевской премии 1904 г.

попадает на место ближайшего к нему минимума второй линии (рис. 20.4). Из этого условия следует, что разрешающая способность дифракционной решётки

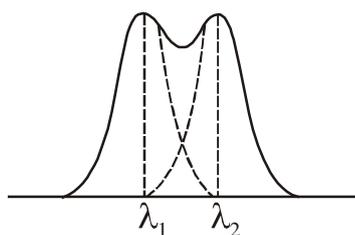


Рисунок 20.4

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN, \quad (20.6)$$

где N – число штрихов решётки, m – порядок дифракционного максимума. В решётке большая разрешающая способность достигается за счёт больших значений N , так как порядок m невелик.

Дисперсия определяется угловым расстоянием $\delta\varphi$ между двумя спектральными линиями, отнесёнными к разности их длин волн

$$D = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda}, \quad (20.7)$$

где $\delta\lambda$ обычно выражают в нанометрах.

Для небольших углов отклонения дисперсия решётки постоянна: $\delta\varphi$ пропорционально $\delta\lambda$. Чем больше значение угловой дисперсии, тем больше расстояние между двумя линиями, соответствующими определённым значениям длин волн.

20.2 Дифракция рентгеновских лучей

Пространственной, или трёхмерной, дифракционной решёткой называется такая оптически неоднородная среда, неоднородности которой периодически повторяются. Примером пространственной дифракционной решётки может быть кристаллическая решётка твёрдого тела. Частицы, находящиеся в узлах этой решётки (атомы, молекулы, ионы), играют роль упорядоченно расположенных центров, которые когерентно рассеивают свет. Постоянные кристаллических решёток твёрдых тел ($d \sim 5 \cdot 10^{-10}$ м) значительно меньше длин волн видимого света ($\lambda_{\text{вид.св.}} \sim 5 \cdot 10^{-7}$ м). Поэтому для видимого света кристаллы являются оптически однородной средой. В то же время для рентгеновских лучей ($\lambda_{\text{рентг.}} = 10^{-11} \div 10^{-9}$ м) кристаллы представляют собой естественные решётки.

Дифракцию рентгеновских лучей на кристаллах можно рассматривать как результат интерференции рентгеновского излучения, зеркально отражающегося от системы параллельных плоскостей. Эти плоскости проходят через узлы кристаллической решётки и называются **атомными плоскостями кристалла** (рис. 20.5). Расстояние d между соседними атомными плоскостями называется **межплоскостным расстоянием**. Угол θ между падающим лучом и атомной плоскостью кристалла называется **углом скольжения**.

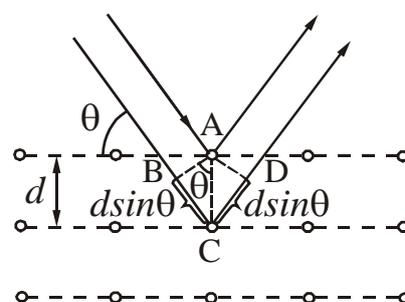


Рисунок 20.5

Разность хода лучей, отражённых от двух соседних межатомных плоскостей

$$\Delta = BC + CD = 2d \sin \theta. \quad (20.8)$$

Для того, чтобы наблюдался максимум, должно выполняться условие:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}. \quad (20.9)$$

Приравняв соотношения (20.8) и (20.9), получим:

$$2d \sin \theta = m \lambda. \quad (20.10)$$

Эта формула называется формулой Вульфа* – Брэгга*.

Дифракция рентгеновских лучей от кристаллов находит два основных применения:

1. Исследование спектрального состава рентгеновского излучения (рентгеновская спектроскопия).
2. Изучение структуры кристаллов (рентгеноструктурный анализ).

• **Давайте подумаем!**

- 20.1.** Если дифракционную решётку осветить белым светом, то дифракционная картина за решёткой представляет собой совокупность чередующихся максимумов волн разной длины, т. е. получаем дифракционный спектр, напоминающий спектр, полученный с помощью призмы. Чем отличается дифракционный спектр от дисперсионного (полученного с помощью призмы)?
- 20.2.** Почему дифракция звуковых волн более очевидна в повседневном опыте, чем дифракция световых волн, и почему радиоволны огибают здания, а световые и звуковые нет?
- 20.3.** На поверхности DVD-диска, рассматриваемого под небольшим углом, видны цветные полосы. Как объяснить это явление?
- 20.4.** При изготовлении искусственных перламутровых пуговиц на их поверхность наносят очень мелкую штриховку. Почему после такой обработки пуговица имеет радужную окраску?
- 20.5.** В период полного солнечного затмения поверхность Земли покрывают скользящие тени в виде широких полос. Какое явление приводит к этому?

*Вульф Георгий Викторович (1863–1925), русский физик.

*Брэгг Уильям Генри (1862–1942), англ. физик, лауреат Нобелевской премии 1915 г.

*Брэгг Уильям Лоренс (1890–1971), англ. физик, лауреат Нобелевской премии 1915 г.

§21 Взаимодействие световых волн с веществом

На характер распространения электромагнитных волн существенно влияет среда, в которой они распространяются. Согласно представлениям классической электронной теории, переменное электромагнитное поле световой волны, распространяющееся в диэлектрической среде, вызывает вынужденные колебания связанных зарядов (электронов и ионов), входящих в состав молекул среды.

Масса ионов намного больше массы электронов и они совершают заметные колебания под действием низкочастотного (инфракрасного) излучения. В области частот видимого и ультрафиолетового излучения определяющую роль играют вынужденные колебания внешних, наиболее слабо связанных электронов. Благодаря вынужденным колебаниям, электроны излучают вторичные волны, которые распространяются по всем направлениям.

Если среда оптически однородна, то расстояние между частицами среды меньше длины световой волны. Поэтому вторичные волны, излучаемые множеством соседних молекул, когерентны и интерферируют при наложении, гася друг друга во всех направлениях, кроме направления первичной волны. В результате интерференции в однородной изотропной среде образуется проходящая волна, фазовая скорость которой зависит от частоты, а направление распространения совпадает с направлением распространения первичной волны.

В неоднородной среде вторичные боковые волны не гасят друг друга. Реальные среды являются неоднородными, поэтому в реальных средах наблюдаются такие явления как рассеяние, дисперсия, полное внутреннее отражение. На границе раздела двух сред волны могут испытывать преломление, отражение и т. д.

21.1 Рассеяние световых волн

Рассеянием света называется явление преобразования света веществом, которое сопровождается изменением направления распространения света и проявляется как несобственное свечение вещества. Как уже отмечалось выше, в однородных средах вторичные волны, излучаемые колеблющимися электронами, гасят друг друга во всех направлениях, кроме направления первичной волны. Поэтому рассеяния света в однородной среде не происходит.

В неоднородной среде вторичные волны дифрагируют на неоднородностях среды и дают дифракционную картину, которая характеризуется равномерным распределением интенсивности по всем направлениям.

Среды с явно выраженной оптической неоднородностью называются **мутными средами**. К ним относятся: 1) дым – взвесь в газе мельчайших твёрдых частиц; 2) туман – взвесь в газе мельчайших жидких частиц; 3) взвеси или суспензии, образованные плавающими в жидкости твёрдыми частицами; 4) эмульсии – взвеси мельчайших частиц одной жидкости в другой, не растворяющей первую. Примером эмульсии является молоко.

Даже очень тщательно очищенные газы и жидкости в некоторой степени рассеивают свет. Причиной этого являются **флуктуации плотности** (отклонения плотности от средних значений, наблюдаемые в пределах малых объёмов).

Эти флуктуации вызваны беспорядочным движением молекул вещества. Обусловленное им рассеяние называется *молекулярным*.

Молекулярным рассеянием объясняется голубой цвет неба. Из-за беспорядочного движения молекул в атмосфере непрерывно возникают места сгущения и разрежения воздуха, которые рассеивают свет. Интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвертой степени длины волны, поэтому голубые и синие лучи рассеиваются сильнее, чем жёлтые и красные, обуславливая голубой цвет неба. Когда Солнце находится низко над горизонтом, распространяющиеся от него лучи проходят большую толщину рассеивающей среды. В результате этого они оказываются обогащёнными большими длинами волн. Поэтому небо на заре окрашивается в красные тона.

21.2 Поглощение световых волн

Поглощением света называется явление уменьшения энергии световой волны при её распространении в веществе, которое происходит вследствие преобразования энергии волны во внутреннюю энергию вещества. Поглощение света может вызвать нагревание вещества, возбуждение и ионизацию атомов или молекул, фотохимические реакции и другие процессы в веществе.

Интенсивность I электромагнитной волны, прошедшей поглощающий слой толщиной x , определяется законом Бугера*– Ламберта*:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (21.1)$$

где I_0 – интенсивность электромагнитной волны на границе среды,

μ – коэффициент поглощения, зависящий от химической природы и состояния среды, а также от частоты.

21.3 Преломление световых волн

Преломлением света называется изменение направления распространения волны в неоднородной среде, обусловленное зависимостью фазовой скорости от свойств среды. Различают преломление на плоской границе раздела двух однородных сред и преломление электромагнитных волн в плавно неоднородной среде (в масштабе длин волн).

Преломление света на плоской границе раздела двух однородных сред, подчиняется закону Снеллиуса (см. §16, п. 16.1).

От границы раздела диэлектриков распространяются две плоские волны – отраженная и преломлённая. При этом интенсивности падающей волны $I_{\text{пад}}$, отраженной $I_{\text{отр}}$ и преломлённой $I_{\text{прел}}$ связаны соотношениями

$$I_{\text{отр}} = I_{\text{пад}} \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2; \quad I_{\text{прел}} = I_{\text{пад}} \frac{4n}{(n+1)^2}, \quad (21.2)$$

*Бугер Пьер (1698–1758), французский математик, астроном и физик.

*Ламберт Иоганн Генрих (1728–1777), немецкий математик, астроном, физик и философ.

где n – показатель преломления среды.

Преломление электромагнитных волн в плавно неоднородной среде называют **рефракцией**. Рефракцией объясняются многие явления природы: миражи, звуковые каналы в океане и атмосфере, сверхдальнюю связь и т. д.

21.4 Дисперсия световых волн

Дисперсией света называется зависимость фазовой скорости электромагнитной волны в среде от её частоты. Среда, в которых фазовая скорость зависит от частоты, называются **диспергирующими средами**. Фазовая скорость электромагнитной волны $v = c/n$, где c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления среды. Скорость света в вакууме величина постоянная, поэтому существование дисперсии в среде обусловлено тем, что показатель преломления среды n зависит от частоты ω .

Если показатель преломления монотонно возрастает с увеличением частоты, то дисперсия называется **нормальной**. Если вещество поглощает часть лучей, то в области поглощения и вблизи неё наблюдается **аномальная** дисперсия. При аномальной дисперсии показатель преломления убывает с увеличением частоты. На рис. 21.1 показана зависимость показателя преломления для нормальной и аномальной дисперсией.

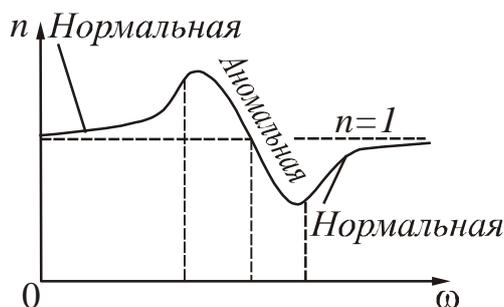


Рисунок 21.1

Обычное стекло, например, прозрачно для видимого света, и в этой области частот наблюдается нормальная дисперсия света в стекле (рис. 21.2). Белый свет, пройдя через

призму, образует радужный спектр. Фиолетовый луч преломляется больше, так как имеет большую частоту. В области инфракрасного и ультрафиолетового излучения для обычного стекла наблюдается аномальная дисперсия, так как оно поглощает эту часть спектра.

Если в некотором диапазоне частот фазовая скорость волны не зависит от частоты, то говорят, что дисперсия отсутствует. Примером такой волны является электромагнитная волна в вакууме.

Реальные источники создают переменные электромагнитные поля, которые описываются немонахроматическими волнами. При исследовании таких полей предполагается, что поле в данной точке может быть представлено суперпозицией бесконечного числа монохроматических волн (см. §11, п. 11.3), т. е. волна представляется в виде группы волн или волнового пакета. Волновой пакет характеризуют групповой скоростью, которая соответствует скорости распространения энергии поля. В дисперги-

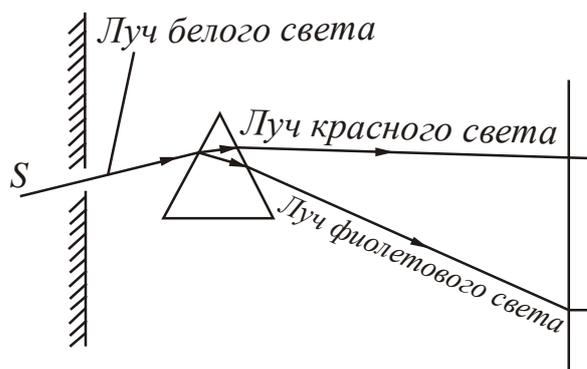


Рисунок 21.2

рующей среде происходит искажение формы группы волн в процессе их распространения и волновой пакет с течением времени расплывается. Понятие групповой скорости применимо только при условии, что поглощение энергии волны в данной среде невелико. При значительном затухании волн понятие групповой скорости утрачивает смысл. Такой случай имеет место в области аномальной дисперсии. В этой области поглощение очень велико и понятие групповой скорости оказывается неприменимым.

Дисперсия волн обуславливает многие природные явления и широко используется в технике. Например, все разновидности радуг объясняются спектральным расщеплением (из-за дисперсии света) и дифракцией солнечных лучей в дождевых каплях. Дисперсия волн в ионосферной плазме определяет частоту радиосигналов, отражающихся в данном слое ионосферы. На дисперсии волн основаны принципы действия многих радиотехнических, оптических и других устройств: рефрактометров, антенн с частотным сканированием, диаграмм направленности и т. д.

21.5 Давление световых волн

Давлением света называется давление, которое производят электромагнитные световые волны, падающие на поверхность какого-либо тела. В квантовой оптике показывается, что световое давление является следствием того, что у фотона имеется импульс \vec{p} . При столкновении фотона с поверхностью тела этот импульс передается атомам или молекулам вещества. Аналогично этому, давление газа рассматривается как результат передачи импульса молекулами газа частицам на поверхности стенки сосуда.

Из теории Максвелла можно получить формулу для расчёта давления, производимого электромагнитными волнами:

$$p = (1 + r) \cdot w, \quad (21.3)$$

где w – объёмная плотность энергии электромагнитных волн,

r – коэффициент отражения (если поверхность зеркальная, то $r = 1$, если поверхность абсолютно чёрная, то $r = 0$, и если тело серое, то $0 < r < 1$).

Экспериментально давление света было доказано опытами П. Н. Лебедева*.

• Давайте подумаем!

21.1. Известно, что заря красная, а небо – синее. Какие лучи сильнее рассеиваются в атмосфере?

21.2. Объясните происхождение цвета: а) синего неба; б) синего стекла; в) синей бумаги.

21.3. Почему сигналы опасности подаются красным светом, в то время как глаз наиболее чувствителен к желто-зеленому свету?

21.4. Играет ли роль когерентность в явлениях отражения и преломления?

*Лебедев Петр Николаевич (1866–1912), русский физик-экспериментатор.

- 21.5. Чем ближе к поверхности Земли, тем больше плотность воздуха. Как это сказывается на ходе луча, падающего в атмосферу Земли из космоса?
- 21.6. Почему в свете фар автомобиля лужа на асфальте ночью кажется водителю тёмным пятном?
- 21.7. На какую поверхность – чёрную или белую – при прочих равных условиях лучи света создают большее давление?
- 21.8. Земля постоянно находится в лучистом потоке Солнца. Может ли давление солнечного света оказать какое-нибудь влияние на будущее Земли?

§22 Поляризация света

22.1 Общие сведения о поляризации

Электромагнитные волны являются поперечными. Это означает, что вектор напряжённости электрического поля \vec{E} и вектор напряжённости магнитного поля \vec{H} ($\vec{E} \perp \vec{H}$) колеблются в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны (рис. 22.1). Свет – это часть диапазона шкалы электромагнитных волн.

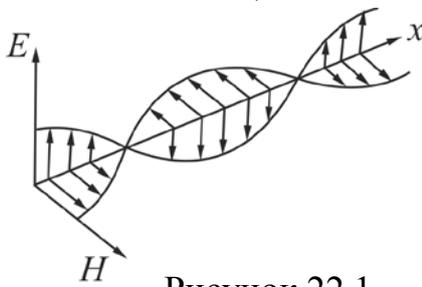


Рисунок 22.1

Как отмечалось ранее, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются колебаниями вектора напряжённости электрического поля \vec{E} . Поэтому вектор напряжённости электрического поля называют **световым вектором**.

Свет, испускаемый обычными источниками (солнечный свет, излучение ламп накаливания), в каждый момент времени состоит из вкладов огромного числа независимо излучающих атомов. Излучаемые этими атомами волны имеют различную ориентацию световых векторов. Поэтому в результирующей волне вектор \vec{E} беспорядочно изменяет свою ориентацию во времени, так что в среднем все направления колебаний оказываются равноправными.

Если все направления колебаний светового вектора в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, равновероятны, то свет называется **неполяризованным** или **естественным**. Если колебания светового вектора каким-либо образом упорядочены в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, то свет называется **поляризованным**. Поляризоваться могут только поперечные волны.

Кроме поляризованного света существует частично поляризованный свет. В этом случае направление светового вектора также изменяется хаотически, но имеется некоторое направление, при котором в среднем амплитуда колебаний больше. Чтобы показать соотношение поляризованного и неполяризованного света в частично поляризованном свете, вводят понятие **степени поляризации**. Для этого определяют значения максимальной I_{\max} и минимальной I_{\min} интенсивностей, соответствующих двум взаимно перпендикулярным направлениям колебаний. Степень поляризации определяется выражением:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (22.1)$$

Для неполяризованного света $I_{\max} = I_{\min}$. В этом случае степень поляризации $P = 0$. Для поляризованного света $I_{\min} = 0$, а степень поляризации равна 1.

Плоскость, в которой происходят колебания вектора \vec{E} и которая проходит через направление распространения волны, называется **плоскостью поляризации**.

Для того чтобы определить, поляризован свет или нет, используют приборы, которые пропускают свет только с определённым направлением вектора \vec{E} (рис. 22.2). В зависимости от назначения их называют поляризаторами или анализаторами. Если свет неполяризованный, то при повороте анализатора вокруг горизонтальной оси интенсивность света, воспринимаемого фотоприёмником, всегда одна и та же. Если свет поляризованный, то интенсивность света будет меняться в соответствии с законом Малюса.

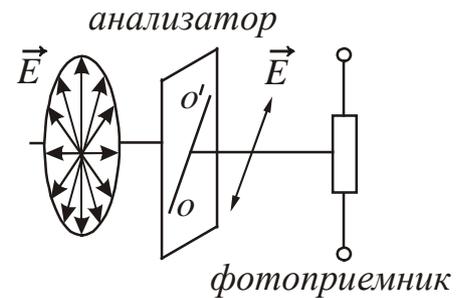


Рисунок 22.2

22.2 Закон Малюса

В 1810 году французский физик Малюс* открыл закон, выражающий зависимость интенсивности линейно-поляризованного света после его прохождения через анализатор от угла между плоскостями поляризации света и плоскостью пропускания анализатора. Пусть колебания светового вектора происходят в вертикальной плоскости, а амплитуда его колебаний равна E_0 (рис. 22.3). Если ось анализатора OO' повернута на угол φ по отношению к направлению плоскости поляризации, то к фотоприёмнику пройдёт свет с амплитудой

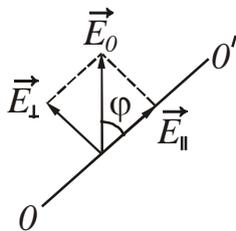


Рисунок 22.3

$$E_{\parallel} = E_0 \cos \varphi.$$

Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (22.2)$$

где I_0 – интенсивность поляризованного света, падающего на анализатор;

I – интенсивность света, вышедшего из анализатора;

φ – угол между плоскостью поляризации луча, падающего на анализатор и плоскостью пропускания анализатора.

Выражение (22.2) называется **законом Малюса**.

*Малюс Этьен Луи (1775–1812), французский физик.

В реальных условиях необходимо учитывать, что электромагнитные волны отражаются и поглощаются, т. е. для реальных условий закон Малюса будет выглядеть следующим образом:

$$I = I_0(1 - k) \cos^2 \varphi, \quad (22.3)$$

где k – коэффициент, учитывающий потери на отражение и поглощение.

• **Давайте подумаем!**

- 22.1.** Можно ли получить поляризованные звуковые волны?
- 22.2.** Могут ли быть поляризованными по кругу: а) луч радара; б) звуковая волна в воздухе?
- 22.3.** Почему при наблюдении поверхности Солнца защитные стекла, сделанные из поляризующих материалов, имеют явные преимущества по сравнению со стеклами, действие которых зависит просто от поглощения света?
- 22.4.** Если смотреть через поляризационную пластинку на ясное небо, то при поворачивании пластинки интенсивность пропущенного пластинкой света изменяется. Если же через пластинку рассматривать облако, то указанное явление не наблюдается. Чем это объяснить?

§23 Способы получения поляризованного света

23.1 Отражение от границы раздела двух диэлектриков. Закон Брюстера

Световые лучи, проходя через границу раздела двух сред с разными показателями преломления n_1 и n_2 , испытывают отражение и преломление. Отражённый и преломлённый лучи всегда оказываются частично поляризованными (рис 23.1). В отражённом свете колебания происходят преимущественно перпендикулярно плоскости падения луча, в преломлённом свете – в плоскости падения. На рисунках колебания, происходящие перпендикулярно плоскости падения луча, изображаются точками. Колебания, происходящие в плоскости падения луча, изображаются стрелками.

Д. Брюстер* экспериментально установил, что *отражённый луч будет полностью поляризован, если отражённый и преломлённый лучи перпендикулярны друг другу* (рис. 23.2). Соответствующий угол падения называют углом Брюстера и обозначают α_B .

*Брюстер Дейвид (1781–1868), шотландский физик и астроном.

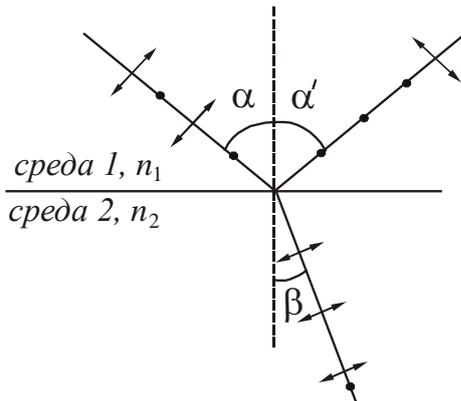


Рисунок 23.1

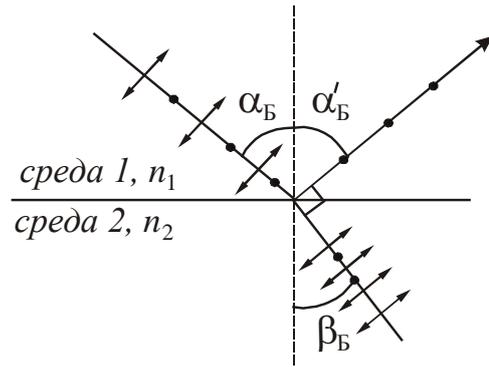


Рисунок 23.2

Найдём угол Брюстера. По закону преломления:

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin \beta_B} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Так как $\alpha_B = \alpha'_B$, то $\alpha_B + \beta_B = 90^\circ$, тогда

$$\sin \beta_B = \sin(90^\circ - \alpha_B) = \cos \alpha_B.$$

Сделав замену, получим:

$$\frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \frac{n_2}{n_1},$$

или

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}. \quad (23.1)$$

Выражение (23.1) называется законом Брюстера: *Отражённый свет полностью линейно поляризован при угле падения, тангенс которого равен относительному показателю преломления среды, отражающей свет.*

23.2 Преломление света в тонкой пластинке

Так как свет, отражённый от границы раздела двух диэлектриков оказывается частично (или полностью) поляризованным, то проходящий свет также частично поляризуется. Преимущественное направление колебаний электрического вектора в прошедшем свете совпадает с плоскостью преломления луча (рис. 23.1, 23.2). Максимальная поляризация проходящего света достигается при падении под углом Брюстера.

Степень поляризации проходящего света можно повышать, подвергая его ряду последовательных отражений и преломлений. Это осуществляется в стопе, состоящей из нескольких одинаковых и параллельных друг другу пластин из прозрачного диэлектрика (например, стекла), установленных под углом Брюстера к падающему свету. Если число пластин достаточно велико, то проходящий через стопу свет оказывается тоже практически линейно поляризованным.

23.3 Двойное лучепреломление

В 1669 году датский учёный Расмус Бартолин обнаружил, что луч света при прохождении сквозь кристалл исландского шпата (CaCO_3) расщепляется на два луча. Бартолин провёл тщательные исследования обнаруженного им **явления двойного лучепреломления**, однако объяснения ему дать не смог.

Преломлённые лучи имеют взаимно перпендикулярные плоскости колебаний (рис. 23.3). Один из лучей подчиняется законам преломления и удовлетворяет закону Снеллиуса (см. п. 16.1), поэтому его называют **обыкновенным** лучом и обозначают буквой *o*. Второй луч обозначают буквой *e* и называют **необыкновенным**. Например, необыкновенный луч преломляется даже в том случае, если свет падает нормально (рис. 23.3). Он не лежит в плоскости падения и не подчиняется закону Снеллиуса.

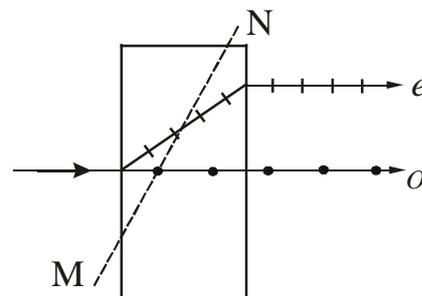


Рисунок 23.3

Только через двадцать лет Х. Гюйгенс дал объяснение явлению двойного лучепреломления на основе волновой теории света.

Причина образования двух лучей – различие условий распространения света в кристалле. В кристаллах могут быть два направления, в которых свет распространяется с разными скоростями. Напомним, что скорость света связана с диэлектрической и магнитной проницаемостями следующим соотношением:

$$v_{\text{ЭМВ}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

Различие скоростей распространения объясняется различием ди-

электрических свойств в рассматриваемых направлениях, т. е. **анизотропией*** кристаллов.

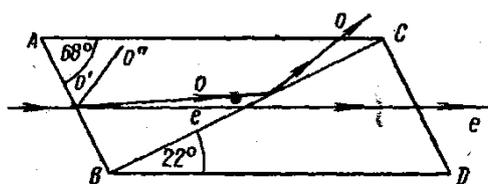


Рисунок 23.4

В таких кристаллах есть направление, вдоль которого лучи распространяются с одинаковой скоростью и не разделяются. Это направление называется **оптической осью** кристалла. Оптическая ось – это не прямая линия, как в геометрической оптике, а плоскость.

Из кристаллов, обладающих двойным лучепреломлением, изготавливают **поляризационные призмы**. Одной из них является **призма Николя** (сокращённо: **николь**). Она состоит из двух прямоугольных призм кристалла исландского шпата. Острые углы призм равны 68° и 22° ; призмы склеены тонким слоем канадского бальзама вдоль катета *BC* (рис. 23.4). Канадский бальзам – это вещество, которое используется для склеивания оптических стёкол. Оптическая ось *O'O''* лежит в плоскости чертежа под углом 48° к грани *BA* (аналогично во второй призме). Падающий луч разбивается в первой призме на два.

*Анизотропия – зависимость ряда физических свойств (механических, тепловых, электрических, оптических) от направления.

Угол падения обыкновенного луча o на слой канадского бальзама BC примерно равен 76° . Показатель преломления обыкновенного луча $n_0 = 1,658$ больше показателя преломления канадского бальзама $n = 1,550$. Угол падения $i = 76^\circ$ превышает предельный угол полного внутреннего отражения. В результате обыкновенный луч o испытывает на границе кристалл – канадский бальзам полное внутреннее отражение. Поэтому он не попадает во вторую призму и выходит через грань AC .

Показатель преломления необыкновенного луча e меньше показателя преломления канадского бальзама, поэтому он не испытывает полного внутреннего отражения и проходит сквозь вторую призму. Таким образом, призма Николя может быть использована как поляризатор.

Недостатком призмы Николя является непрозрачность канадского бальзама для ультрафиолетовых лучей, так что призму используют для получения плоско поляризованного света только в видимой области.

23.4 Поглощение света в дихроических кристаллах

Все двояко преломляющие кристаллы в той или иной степени поглощают свет. Это явление анизотропно, т. е. у некоторых двояко преломляющих кристаллов коэффициенты поглощения света для двух взаимно перпендикулярно поляризованных лучей отличаются настолько сильно, что уже при небольшой толщине кристалла один из лучей гасится практически полностью, и из кристалла выходит линейно поляризованный пучок света. Это явление называется **дихроизмом**, так как проявляется в различной окраске кристаллов по разным направлениям.

Примером сильно дихроичного кристалла является турмалин. Обыкновенный луч кристаллами турмалина поглощается (при толщине порядка 1 мм – полностью), а необыкновенный проходит. Ещё более ярко выраженным дихроизмом обладают кристаллы герпатита – один из лучей практически полностью поглощается уже при толщине кристалла 0,1 мм. Эти вещества используют для изготовления тонких пленок, преобразующих естественный свет в линейно поляризованный. Такие пленки называются **поляроидами**. Поляриод представляет собой тонкую стеклянную или целлулоидную пластинку, на которую наносится слой турмалина (или другого вещества). В процессе производства игольчатые кристаллы упорядочиваются под воздействием электрических или магнитных полей. Во всей совокупности кристалла происходит поляризация по принципу, описанному в предыдущем пункте. Образуется два луча – обыкновенный и необыкновенный.

Одно из распространённых применений поляризованного света – регулировка интенсивности освещения. Поляризованный свет часто используется для гашения света, зеркально отражённого от гладких диэлектрических поверхностей. Например, чтобы устранить ослепляющее действие света на водителей автомобилей от фар встречных машин. На этом принципе устроены поляридные солнечные очки. Явление поляризации используют для изготовления жидко-кристаллических экранов, устранения бликов и засветки неба при фотографировании и т. д. Также это явление используется для создания различных оптических эффектов, а также в 3D-кинематографе (технология IMAX), где поляризация используется

для разделения изображений, предназначенных правому и левому глазу. В ряде исследований широко применяется поляризационная микроскопия.

Посмотрите лекционные демонстрации:

1. Поляризация естественного света при отражении от стекла

<http://youtube.com/watch?v=UdmgVCi9VPY&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

2. Угол Брюстера

<http://youtube.com/watch?v=WickU6F8GrA&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

3. Естественный видимый свет. Три поляризатора. Закон Малюса

<http://youtube.com/watch?v=xDIVIk7Jf3I&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

4. Поляризатор и анализатор для видимого света – 1

<http://youtube.com/watch?v=TXeG2Tz0hb4&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

5. Поляризатор и анализатор для видимого света – 2

<http://youtube.com/watch?v=wR-WPocc128&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

6. Двойное лучепреломление (кристалл исландского шпата).

<http://www.youtube.com/watch?v=Ps0FcQY2y2k&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>
<http://youtube.com/watch?v=Ps0FcQY2y2k>

7. Двойное лучепреломление (видимый свет)

<http://www.youtube.com/watch?v=xDqXUOKxNKg&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>
<http://youtube.com/watch?v=xDqXUOKxNKg>

• Давайте подумаем!

- 23.1. Будет ли иметь место поляризация света при отражении, если свет падает на границу раздела двух сред со стороны среды с большим показателем преломления, например, при переходе из стекла в воздух?
- 23.2. Обыкновенный и необыкновенный лучи получаются путём разложения одного и того же пучка естественного света; следовательно, у соответствующих волн фазы абсолютно одинаковые. Возникнет ли картина интерференционных максимумов и минимумов, если свести оба луча вместе?
- 23.3. Является ли оптическая ось двоякопреломляющего кристалла определённой линией или это только направление в пространстве?
- 23.4. Для льда в таблицах можно найти следующие данные: показатель преломления обыкновенного луча $n_o = 1,309$; необыкновенного – $n_e = 1,313$. Но если лёд является двоякопреломляющим веществом, то почему мы не видим двойного изображения предметов при наблюдении их через ледяной куб?

§24 Искусственное двойное лучепреломление. Эффект Керра

Двойное лучепреломление может возникать в прозрачных телах под влиянием внешних воздействий. В частности это происходит при механических деформациях тел. Поместим стеклянную пластинку Q между скрещенными поляризаторами P и P' (рис. 24.1). Если стекло не деформировано, то такая система свет не пропускает.

Если пластинку сжать, то свет начинает проходить. Наблюдаемая в прошедших лучах картина оказывается испещрённой цветными полосами. По расположению полос можно судить о распределении напряжений внутри пластинки, так как каждая такая полоса соответствует одинаково деформированным местам пластинки. Данный метод исследования называется фотоупругим анализом.

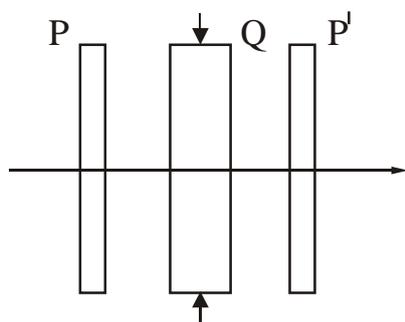


Рисунок 24.1

Поляризационные исследования особенно часто проводят в кристаллографии. Многие кристаллы и ориентированные полимерные материалы обладают значительным двойным лучепреломлением и дихроизмом. Изучая эти характеристики и определяя направление соответствующих осей, можно проводить идентификацию материалов, а также получать данные о химической структуре новых веществ.

Возникновение двойного лучепреломления в жидкостях и аморфных телах под воздействием электрического поля называется **эффектом Керра*** (обнаружен в 1875 г.). Схема установки для исследования эффекта Керра показана на рис. 24.2. Между скрещенными поляризаторами P и P' помещается ячейка Керра, которая представляет собой герметичный сосуд с жидкостью. В сосуд введены пластины конденсатора. Если на пластины подать напряжение, то под действием электрического поля жидкость приобретает свойства двойко преломляющего кристалла. Возникшая между обыкновенным и необыкновенным лучами разность фаз пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля:

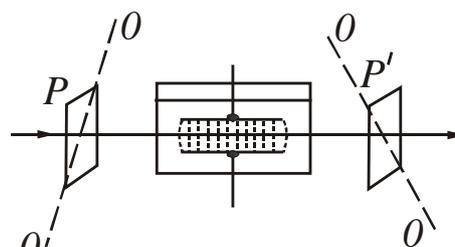


Рисунок 24.2

$$\Delta\varphi = 2\pi B l E^2, \tag{24.1}$$

где l – путь, пройденный лучами; B – постоянная Керра.

Постоянная Керра зависит от вещества, его температуры, длины волны света. Из жидкостей наибольшей постоянной Керра обладает нитробензол. Объясняется эффект Керра различной поляризуемостью молекул по разным направлениям под действием электрического поля. Время, в течение которого устанавливается преимущественная ориентация молекул, составляет порядка 10^{-10} с. Поэтому ячейку Керра можно использовать как безынерционный световой затвор. В отсутствие поля затвор будет закрыт, при включении напряжения затвор пропускает значительную часть света, прошедшего через первый анализатор P.

*Керр Джон (1824–1907), шотландский физик.

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Искусственная анизотропия – эффект Керра

<http://www.youtube.com/watch?v=NB-GLm4BOnA&list=UUFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg>

§25 Вращение плоскости поляризации

При прохождении поляризованного света через некоторые вещества происходит поворот плоскости поляризации световой волны. Это явление называется *вращением плоскости поляризации*. Вещества, которые способны поворачивать плоскость поляризации падающих на них световых волн, называются *оптически активными веществами*. Оптически активными могут быть как жидкости (скипидар, никотин, водные растворы сахара, винной кислоты и др.), так и кристаллы (киноварь, кварц). Различают правое вращение (положительное) и левое (отрицательное). При правом вращении плоскость поляризации поворачивается по часовой стрелке для луча, падающего в глаз наблюдателя, при левом – в противоположном направлении. Все оптически активные вещества существуют в двух разновидностях – правовращающей и левовращающей. Существуют правовращающий и левовращающий кварц, право- и левовращающий сахар и т. д. Молекулы или кристаллы одной разновидности являются зеркальным отражением молекул или кристаллов другой разновидности.

Направление вращения (относительно луча) не зависит от направления луча. Поэтому, если луч, прошедший через оптически активный кристалл вдоль оптической оси, отразить зеркалом и заставить пройти через кристалл ещё раз в обратном направлении, то первоначальное положение плоскости поляризации восстанавливается.

Для оптически активных жидкостей угол поворота φ плоскости поляризации определяется соотношением

$$\varphi = [a]lc, \quad (25.1)$$

где l – толщина слоя жидкости;

c – концентрация раствора;

$[a]$ – удельная постоянная вращения, зависящая от природы жидкости.

Угол поворота плоскости поляризации кристаллическими веществами определяется соотношением:

$$\varphi = al, \quad (25.2)$$

где l – путь, пройденный лучом в кристалле;

a – постоянная вращения, зависящая от длины волны.

Если между двумя скрещенными поляризаторами поместить оптически активное вещество (кристалл кварца, прозрачную кювету с раствором сахара и т.п.), то поле зрения просветляется. Чтобы снова получить темноту, нужно повернуть один из поляризаторов на угол φ , который определяется формулами

(25.1) и (25.2). В случае раствора, зная удельную постоянную вращения $[a]$ данного вещества и длину l , можно, измерив угол поворота φ , найти концентрацию раствора. Такой способ определения концентрации растворов применяют в производстве различных веществ.

Оптически неактивные вещества приобретают способность вращать плоскость поляризации под действием магнитного поля. Это явление было обнаружено Фарадеем* в 1845 году и поэтому называется **эффектом Фарадея** (магнитооптический эффект Фарадея). Оно наблюдается только при распространении света вдоль направления магнитного поля. Поэтому для наблюдения эффекта Фарадея в полюсных наконечниках электромагнита просверливают отверстия, через которые пропускается световой луч. Исследуемое вещество помещается между полюсами электромагнита.

Угол поворота плоскости поляризации φ пропорционален пути l , пройденному светом в веществе, и намагниченности вещества J . Намагниченность в свою очередь пропорциональна напряжённости магнитного поля H ($\vec{J} = \chi \vec{H}$). Поэтому можно написать,

$$\varphi = V l H, \quad (25.3)$$

где V – коэффициент пропорциональности, который называется **постоянной Верде*** или **удельным магнитным вращением**. Постоянная Верде V зависит от длины волны.

Направление вращения определяется направлением магнитного поля. От направления луча знак вращения не зависит. Если отразить луч зеркалом и заставить его пройти через намагниченное вещество ещё раз в обратном направлении, то угол поворота плоскости поляризации удвоится.

Оптически активные вещества под действием магнитного поля приобретают дополнительную способность вращать плоскость поляризации, которая складывается с их естественной способностью.

Эффект Фарадея используется для устройства оптического изолятора – пассивного оптического устройства, которое обеспечивает пропускание света в одном направлении почти без потерь, а другом направлении (обратном) с большим затуханием. Используется в волоконно-оптических системах передачи для эффективного уменьшения влияния обратных отражений.

- **Давайте подумаем!**

25.1. В результате прохождения линейно поляризованного света через оптически прозрачный материал, находящийся в магнитном поле, наблюдается вращение плоскости поляризации. После прохождения через материал и отражения от зеркала свет проходит через материал в противоположном направлении. Что произойдет с углом плоскости поляризации?

*Фарадей Майкл (1791–1867), английский физик.

*Верде Эмиль (1824–1866), французский физик.

- **Обратите внимание!**

Одним и тем же термином обозначаются различные явления или понятия

Поляризация диэлектриков – смещение положительных и отрицательных зарядов диэлектрика в противоположные стороны под действием электрического поля. (см. «Часть 3. Электростатика. Постоянный электрический ток»).

Поляризация света – нарушение осевой симметрии электромагнитной волны относительно направления её распространения. В плоско поляризованной (линейно поляризованной) волне колебание вектора \vec{E} происходит строго в одной плоскости.

Термин применяется к объектам, к которым его применять нельзя

Сила света – скалярная физическая величина, равная световому потоку, проходящему на единицу телесного угла. Термин не имеет ничего общего с термином «сила» из курса механики.

Различайте следующие, близкие по звучанию, термины:

Степень поляризации – величина, показывающая соотношение поляризованного и естественного света в частично поляризованном свете.

Поляризованность – векторная физическая величина, численно равная дипольному моменту единицу объёма диэлектрика. (см. «Часть 3. Электростатика. Постоянный электрический ток»).

- Изучив раздел «Волновая оптика», студент должен **ЗНАТЬ**:

Суть понятий:

Свет, угол падения, угол преломления, угол отражения, полное внутренне отражение. Точечный источник света. Тонкая плёнка, полосы равного наклона, полосы равной толщины. Двойное лучепреломление.

Определения физических величин, их единицы измерения и формулы, по которым рассчитываются величины:

Абсолютный показатель преломления, относительный показатель преломления. Световой поток, сила света, освещённость. Оптический путь, оптическая разность хода. Период (постоянная) дифракционной решётки.

Законы:

Законы отражения, законы преломления. Закон Снеллиуса. Закон Брюстера, закон Малюса.

Явления:

Интерференция. Дифракция. Поляризация, вращение плоскости поляризации. Преломление, поглощение, рассеяние, дисперсия света. Эффект Керра.

Формулы:

Условия максимума и минимума интерференции. Формула Вульфа-Брэгга.

Приборы и устройства:

Интерферометр. Дифракционная решётка. Призма Николя.

**ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ
«ВОЛНОВАЯ ОПТИКА»**

Инструкция. Данный тест предназначен для проверки знаний по теме «*Волновая оптика*». Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу кодов. Если Вы дали

- 1) 45-50 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
 - 2) 38-44 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
 - 3) 30-37 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
 - 4) меньше 30 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.
- Прочитайте его ещё раз.

2. Луч света падает на плоское зеркало. Угол между падающим и отражённым лучами равен 30° . Угол между отражённым лучом и зеркалом равен ...
1) 75° 2) 115° 3) 30° 4) 15°
3. При переходе луча света из первой среды во вторую угол падения был равен 30° , а преломления 60° . Относительный показатель преломления второй среды относительно первой равен ...
1) 0,5 2) $\sqrt{3}$ 3) $\sqrt{3}/3$ 4) $\sqrt{3}/2$ 5) 2 6) 0,8
4. Предельный угол полного отражения для луча света, идущего из среды с абсолютным показателем преломления n_1 , в среду с абсолютным показателем преломления n_2 определяется выражением ($n_1 > n_2$) ...
1) $\sin \alpha = n_2/n_1$ 2) $\sin \alpha = n_1/n_2$ 3) $\sin \alpha = 1/n_1$ 4) $\sin \alpha = 1/n_2$
5. В первых экспериментах по изучению распространения электромагнитных волн в воздухе были измерены длина волны $\lambda = 50$ см и частота излучения $\nu = 500$ МГц. На основе этих данных можно было утверждать, что скорость света в воздухе равна примерно ...
1) 10 м/с 2) 1000 м/с 3) 250000 км/с 4) 300000 км/с
6. При переходе светового луча из первой среды во вторую оказалось, что угол преломления меньше угла падения. Что можно сказать о скорости света v_2 во второй среде?
1. $v_2 > v_1$ 2. $v_2 = v_1$ 3. $v_2 < v_1$ 4. $v_2 = c = 3 \cdot 10^8$ м/с
7. После прохождения белого света через красное стекло свет становится красным. Это происходит из-за того, что световые волны других цветов в основном ...
1) отражаются. 2) рассеиваются.
3) преломляются. 4) поглощаются.
8. По современным представлениям свет представляет собой ...
1) волновой процесс. 2) механические колебания.
3) поток квантов. 4) явление той же природы, что и ультразвук.
9. Следствием волновой природы света являются ...
1) интерференция света. 2) тепловое излучение.
3) дифракция света. 4) поляризация света.
5) фотоэлектрический эффект.

10. Следствием квантовой природы света являются ...
- 1) интерференция света.
 - 2) дифракция света.
 - 3) поляризация света.
 - 4) тепловое излучение.
 - 5) фотоэлектрический эффект.
11. Когерентными называются волны ...
- 1) имеющие одинаковую частоту колебаний.
 - 2) отличающиеся по фазе на π .
 - 3) имеющие одинаковую амплитуду и частоту колебаний.
 - 4) имеющие одинаковую частоту колебаний и сохраняющие в каждой точке пространства постоянную разность фаз.
12. Явление интерференции света заключается ...
- 1) в усилении одного светового пучка другим.
 - 2) в получении спектра белого света.
 - 3) в огибании светом препятствий.
 - 4) в наложении когерентных световых волн, в результате чего в одних точках (направлениях) их амплитуда увеличивается, а в других – уменьшается.
13. Энергия W , приносимая на единицу площади поверхности экрана одной электромагнитной волной, пропорциональна квадрату амплитуды напряжённости электрического поля в ней. Если в данной точке экрана интерферируют две такие когерентные волны с одинаковой амплитудой, то энергия области интерференционного максимума, равна ...
- 1) 0
 - 2) W
 - 3) $2W$
 - 4) $4W$
14. Укажите необходимое условие интерференции волн.
1. Волны должны иметь одинаковые частоты.
 2. Волны должны быть когерентными.
 3. Волны должны иметь одинаковую амплитуду.
 4. Волны должны иметь одинаковые амплитуды и одинаковые частоты.
15. Укажите общее условие усиления света при интерференции (Δ – оптическая разность хода).
1. $\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$
 2. $\Delta = 2m\frac{\lambda}{2}$
 3. $\Delta = 0$
16. Укажите общее условие ослабления света при интерференции (Δ – оптическая разность хода).
1. $\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$
 2. $\Delta = 2m\frac{\lambda}{2}$
 3. $\Delta = 0$
17. Интерференционная картина от лампочек освещения в комнате не наблюдается, потому что ...
- 1) свет от лампочек немонахроматичен.
 - 2) лампочки питаются от сети переменного тока.
 - 3) свет от лампочек слишком ярк.
 - 4) световые волны от лампочек некогерентны.

18. Свет с длиной волны λ от двух синфазных когерентных источников S_1 и S_2 достигает экрана Э. На экране (рис. 17) наблюдается интерференционная картина. Тёмные полосы в точках А и В возникают потому, что ...

1) $S_2B = (2k + 1)\lambda/2$, $S_2A = (2m + 1)\lambda/2$, где k и m – целые числа

2) $S_2B - S_1B = (2k + 1)\lambda/2$,
 $S_2A - S_1A = (2m + 1)\lambda/2$, где k и m – целые числа

3) $S_2B = 2k\lambda/2$, $S_1A = 2m\lambda/2$, где k и m – целые числа

4) $S_2B - S_1B = 2k\lambda/2$, $S_2A - S_1A = 2m\lambda/2$, где k и m – целые числа

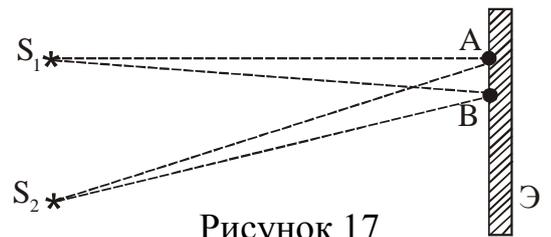


Рисунок 17

19. Две плоские электромагнитные волны с длиной волны 400 нм и с одинаковой амплитудой полностью гасят друг друга при интерференции. Разность фаз колебаний вектора напряжённости электрического поля этих волн в данной точке равна ...

1) $\pi/2$

2) π

3) 2π

4) $3\pi/2$

20. При отражении от тонкой плёнки (рис. 19) интерферируют световые пучки

1) 1 и 2

2) 2 и 3

3) 3 и 4

4) 4 и 5

21. При отражении света от оптически более плотной среды фаза колебаний светового вектора...

1) не изменяется.

2) изменяется на π .

3) изменяется на $\pi/2$.

4) изменяется на 2π .

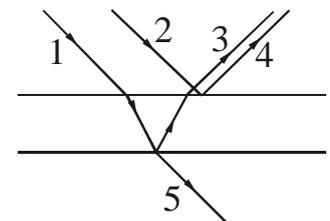


Рисунок 19

22. Просветление оптики заключается ...

1) в применении светофильтров.

2) в увеличении входного отверстия оптической системы.

3) в уменьшении отражения света от поверхности оптического стекла.

4) в интерференции света на поверхности оптического стекла.

5) в повышении прозрачности оптического стекла.

23. В основе просветления оптики лежит явление...

1) преломления света.

2) отражения света.

3) интерференции света в тонких пленках.

4) дифракции света.

24. При освещении солнечным светом бензиновой пленки на поверхности воды видны радужные пятна. Они возникают вследствие...

1) дисперсии света.

2) интерференции света.

3) дифракции света.

4) поглощения света.

25. Дифракцией света называется ...
- 1) совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.
 - 2) преломление светового луча при прохождении через призму.
 - 3) наложение преломленных лучей.
26. Явление дифракции света заключается ...
- 1) в усилении света при наложении световых волн.
 - 2) в отклонении луча света при прохождении прозрачной пластинки.
 - 3) в преломлении светового луча при прохождении через диафрагму.
 - 4) в огибании светом препятствия и попадании в область геометрической тени.
27. Свет огибает препятствие и попадает в область геометрической тени, если размеры препятствия ...
- 1) много больше длины волны.
 - 2) много меньше длины волны.
 - 3) соизмеримы с длиной волны.
28. В трёх опытах на пути светового пучка ставились экраны с малым отверстием, тонкой нитью, пересекающей центр широкого отверстия, и широкой щелью. Явление дифракции происходит ...
- 1) только в опыте с малым отверстием в экране.
 - 2) только в опыте с тонкой нитью.
 - 3) только в опыте с широкой щелью в экране.
 - 4) во всех трех опытах.
29. Дифракционная решётка представляет собой ...
- 1) совокупность большого числа одинаковых щелей, отстоящих друг от друга на одно и то же расстояние, сравнимое с длиной волны света.
 - 2) оптический прибор, с помощью которого можно разложить свет на спектр.
 - 3) совокупность препятствий, размеры которых больше длины волны.
30. Укажите условие, которое определяет положение главных дифракционных максимумов интенсивности, получаемых с помощью дифракционной решётки.
1. $d \sin \varphi = m\lambda$
 2. $2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} = m\lambda$
 3. $2d \sin \theta = m\lambda$
31. При увеличении длины волны падающего света расстояния между соседними максимумами дифракционной картины ...
- 1) увеличиваются.
 - 2) уменьшаются.
 - 3) не изменяются.
 - 4) увеличиваются для максимумов с малыми номерами и уменьшаются для максимумов с малыми номерами.
 - 5) уменьшаются для максимумов, близких к главному, и увеличиваются для дальних максимумов.

32. На рис. 31 показана установка для измерения длины световой волны с помощью дифракционной решётки. Расстояние от решётки до линейки – L , период решётки – d . На решётку падает луч от лазера перпендикулярно

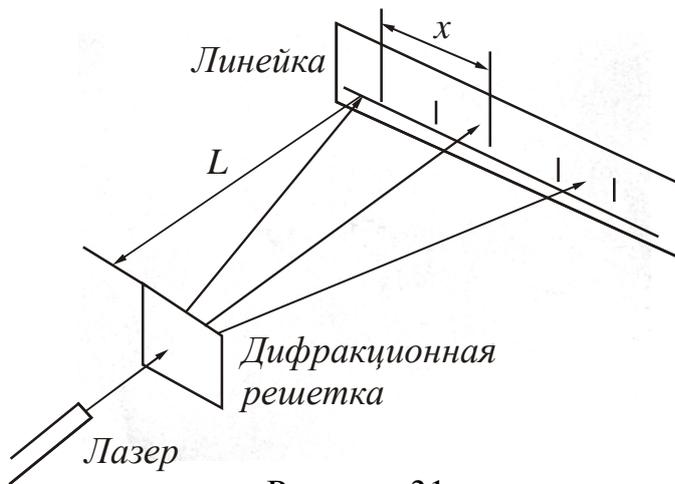


Рисунок 31

плоскости решётки, при этом на линейке на расстояниях x от центрального максимума возникают яркие пятна. Длина волны света, излучаемого лазером, равна ...

- 1) xd/L .
- 2) Ld/x .
- 3) xL/d .
- 4) x/Ld .

33. Лучи от двух лазеров с длинами волн λ и $1,5\lambda$ поочередно направляются перпендикулярно плоскости дифракционной решётки с периодом 20λ . Расстояние между нулевым и первым дифракционными максимумами на удаленном экране ...

- 1) в обоих случаях одинаково.
- 2) во втором случае в 1,5 раза больше.
- 3) во втором случае в 1,5 раза меньше.
- 4) во втором случае в 3 раза меньше.

34. Лазерный луч с длиной волны λ_1 падает перпендикулярно на дифракционную решётку. На линии ABC экрана (рис. 33) наблюдается серия ярких пятен. Какие изменения произойдут в расположении пятен на экране при замене этого лазерного луча, на лазерный луч с длиной волны $\lambda_2 > \lambda_1$?

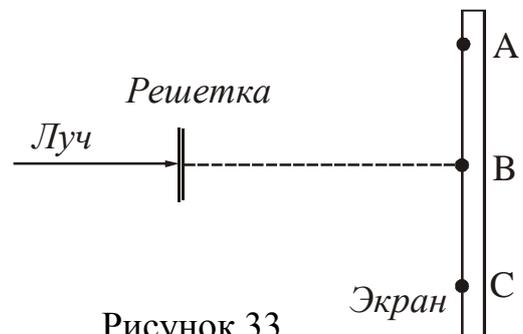


Рисунок 33

1. Расположение пятен не изменится.
2. Пятно в точке В не сместится, остальные раздвинутся от него.
3. Пятно в точке В не сместится, остальные сдвинутся к нему.
4. Пятно в точке В исчезнет, остальные раздвинутся от точки В.

35. Лазерный луч красного цвета падает перпендикулярно на дифракционную решетку (50 штрихов на 1 мм). На линии ABC экрана (рис. 33) наблюдается серия красных пятен. Какие изменения произойдут на экране при замене этой решётки на решётку со 100 штрихами на 1 мм?

1. Картина не изменится.
2. Пятно в точке В не сместится, остальные раздвинутся от него.
3. Пятно в точке В не сместится, остальные сдвинутся к нему.
4. Пятно в точке В исчезнет, остальные раздвинутся от точки В.

36. Пространственная решётка кристалла используется в качестве дифракционной решётки для ...
- 1) лучей видимого света.
 - 2) инфракрасных лучей.
 - 3) ультрафиолетовых лучей.
 - 4) рентгеновских лучей.
37. Поляризованным называется свет, в котором ...
- 1) направления колебаний светового вектора упорядочены каким-либо образом.
 - 2) колебания различных направлений быстро и беспорядочно сменяют друг друга.
 - 3) колебания светового вектора происходят перпендикулярно лучу.
 - 4) происходит вращение светового вектора вокруг луча.
38. Укажите свойство световой волны, с которым связано явление поляризации света.
1. Явление поляризации обусловлено электромагнитной природой световой волны.
 2. Явление поляризации связано с тем, что в плоской монохроматической волне векторы \vec{E} и \vec{H} изменяются по гармоническому закону.
 3. Явление поляризации обусловлено тем, что в световых явлениях основную роль играет вектор напряжённости электрического поля.
 4. Явление поляризации связано с поперечным характером световой волны.
39. Явление двойного лучепреломления обусловлено ...
- 1) анизотропией кристаллов.
 - 2) преломлением света в веществе.
 - 3) дифракцией света в кристаллах.
 - 4) интерференцией света при прохождении тонкой окисной плёнки на поверхности вещества.
40. Оптической осью кристалла называется ...
- 1) любая прямая, перпендикулярная граням кристалла.
 - 2) линия, вдоль которой распространяется свет в кристалле.
 - 3) направление, в котором в кристалле не происходит двойного лучепреломления.
 - 4) направление, вдоль которого колеблется вектор напряжённости электрического поля волны, распространяющейся в кристалле.
41. На поляризационный прибор падает естественный (неполяризованный) свет. При прохождении света через поляризационный прибор интенсивность света ...
- 1) не изменится.
 - 2) немного уменьшится за счет поглощения.
 - 3) уменьшится в два раза даже без учета поглощения.
 - 4) будет изменяться в соответствии с законом Малюса.

42. Причиной поворота плоскости поляризации может быть ...

- 1) изменение концентрации раствора.
- 2) изменение спектрального состава света.
- 3) изменение прозрачности среды.
- 4) усиление интенсивности падающего света.

43. Укажите формулу, выражающую закон Малюса.

$$1. P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad 2. I = I_0 \cos^2 \varphi \quad 3. I = I_0 \cos \varphi \quad 4. \operatorname{tg} \vartheta_B = n_{21}$$

44. Укажите формулу, выражающую закон Брюстера.

$$1. P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad 2. I = I_0 \cos^2 \varphi \quad 3. I = I_0 \cos \varphi \quad 4. \operatorname{tg} \vartheta_B = n_{21}$$

45. Луч, отраженный от границы двух диэлектриков полностью поляризован. При этом угол между отражённым и преломленным лучами составляет ...

- 1) 60°
- 2) 90°
- 3) 30°
- 4) 45°

46. Может ли стеклянная пластинка служить поляризационным прибором?

1. Нет, т. к. стекло не обладает анизотропией.
2. Да, т. к. стекло поглощает мало света.
3. Да, т. к. стекло – диэлектрик, а при отражении от диэлектрика происходит поляризация света.
4. Нет, т. к. обычно толщина стеклянной пластины гораздо больше длины световой волны.

47. Явление дихроизма состоит в том, что...

- 1) в некоторых кристаллах один из лучей (обыкновенный или необыкновенный) окрашивается.
- 2) в некоторых кристаллах один из лучей (обыкновенный или необыкновенный) поглощается сильнее другого.
- 3) в некоторых кристаллах для одного из лучей (обыкновенного или необыкновенного) нарушается закон преломления света.

48. Эффект Керра состоит в том, что...

- 1) под воздействием электрического поля в жидкостях и в аморфных твердых телах возникает двойное лучепреломление.
- 2) под воздействием магнитного поля в жидкостях и в аморфных твердых телах возникает двойное лучепреломление.
- 3) при механических деформациях в аморфных твердых телах возникает двойное лучепреломление.
- 4) происходит вращение плоскости поляризации.

49. Укажите непосредственное назначение ячейки Керра.

1. Поляризация света.
2. Вращение плоскости поляризации.
3. Анализ упругих напряжений.
4. Анализ концентрации растворов.

50. Разложение белого света в спектр при прохождении через призму обусловлено ...
- 1) дифракцией света.
 - 2) дисперсией света.
 - 3) отражением света.
 - 4) интерференцией света.
51. Разложение пучка солнечного света в спектр при прохождении его через призму объясняется тем, что свет состоит из набора электромагнитных волн разной длины, которые, попадая в призму ...
- 1) движутся с разной скоростью.
 - 2) имеют одинаковую частоту.
 - 3) поглощаются в разной степени.
 - 4) имеют одинаковую длину волны.

Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем!»

- 16.1.** Угол преломления равен углу падения в двух случаях: 1) если показатели преломления обеих сред одинаковы; 2) если луч перпендикулярен к поверхности раздела сред.
- 16.2.** Цвет света определяется его частотой. При переходе волны из одной среды в другую её частота не меняется, так как во сколько раз изменится скорость волны, во столько же раз изменится длина волны ($v = v/\lambda$).
- 16.3.** Показатели преломления лучей разного цвета для одной и той же среды неодинаковые, поэтому при точных определениях коэффициента преломления пользуются не белым, а монохроматическим светом.
- 16.4.** Отношение скорости света в вакууме к скорости света в данной среде равно абсолютному показателю преломления среды $n = c/v$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, v – скорость света в данной среде. Достаточно определить показатель преломления исследуемого вещества относительно воздуха, так как показатель преломления воздуха относительно вакуума практически равен единице.
- 16.5.** Явление полного отражения света на границе раздела стекло – воздух.
- 16.6.** В месте изгиба световода угол падения становится меньше предельного угла полного отражения, поэтому свет выходит из световода наружу через боковую поверхность.
- 16.7.** Световой поток оценивается по зрительному ощущению, а глаз человека наиболее чувствителен к зеленому свету. Поэтому большой световой поток дает зеленая лампа.
- 16.8.** Рост сопротивления приводит к снижению потребляемой электрической мощности, а, следовательно, и температуры нити. Это приведет к уменьшению светового потока и силы света лампы.
- 16.9.** Освещённость, создаваемая точечным источником на некоторой поверхности, зависит от угла между направлением падающих лучей и нормалью к поверхности: $E = \frac{I \cos \varphi}{r^2}$. В полдень угол φ принимает минимальное значение, $\cos \varphi \rightarrow 1$. Следовательно, освещённость будет максимальна.
- 17.1.** Интерференция – это следствие принципа суперпозиции, в силу которого фронты волн, проникающих одна в другую, взаимно не деформируются. Следовательно, интерферирующие волны не изменяют распространение одна другой.
- 17.2.** При интерференции волн происходит только пространственное перераспределение энергии, не нарушающее закона ее сохранения.
- 17.3.** Нельзя, потому что источники света не являются когерентными.

- 17.4.** Интерференция, как и дифракция, не зависит от того, какими – продольными или поперечными – являются волны, а потому может наблюдаться при распространении как световых, так и звуковых волн.
- 18.1.** Под действием нагревания на поверхности стали образуется тонкая плёнка окислов железа, имеющая разную толщину. Будет наблюдаться интерференция световых волн, отражённых от верхней и нижней границ плёнки. При этом может происходить гашение одних цветов спектра и усиление других. Результат интерференции зависит от толщины плёнки и от длины световых волн. Поэтому места плёнки, имеющие разную толщину, окрашены в разные цвета.
- 18.2.** Интерференционная картина обусловлена наложением волн, отражённых от верхней и нижней поверхностей пластинки. Но с увеличением толщины пластинки увеличивается число и густота максимумов и минимумов, уменьшается угловой интервал между ними и картина будет неразличима, при немонахроматическом свете интерференционная картина вообще исчезает, так как перекрываются максимумы и минимумы разных длин волн.
- 19.1.** Энергия, которая без плёнки отражалась, теперь пропускается внутрь оптической системы и воспринимается глазом. Поглощение света плёнкой сделало бы применение её лишённой смысла – такая плёнка не просветляла бы оптику.
- 19.2.** При просветлении оптики применяются многослойные плёнки, рассчитанные на то, чтобы уничтожить отражение большей части света и впустить в оптическую систему лучи, к которым человеческий глаз особенно чувствителен. Вне этого условия остается, главным образом, фиолетовая часть спектра, поэтому входные линзы просветленных оптических приборов в отраженном свете и кажутся фиолетовыми.
- 20.1.** Отличить дифракционный спектр от дисперсионного (призматического) нетрудно по такому признаку: в призме, чем больше длина волны, тем меньше угол преломления; для дифракционной решетки – чем больше длина волны, больше угол дифракции ($m\lambda = d \cdot \sin\varphi$). Поэтому порядок цветов в этих спектрах будет обратным.
- 20.2.** Дифракция волн проявляется, прежде всего, в отклонении луча от прямолинейного направления в однородной среде и в захождении его в область геометрической тени. В оптике это явление вне специально поставленных условий наблюдения совершенно незаметно из-за малой длины световых волн (доли микрометра). Достаточно, например, зайти за ствол дерева, чтобы оказаться внутри геометрической тени. Длина звуковых волн в среднем порядка одного метра и поэтому заход за ствол дерева, не даст ни малейшего признака звуковой тени и восприятие звука останется тем же самым. Заход за угол здания или за пригорок уже может дать заметный эффект звуковой тени. В то же время заход за угол здания окажет на распространение радиоволн длиной в один, два километра столь же малое действие, как ствол дерева на распространение звука.
- 20.3.** DVD-диск играет роль отражательной дифракционной решётки. Радужная окраска объясняется явлением дифракции в отражённом свете.
- 20.4.** Поверхность пуговицы играет роль отражательной дифракционной решётки. Радужная окраска объясняется явлением дифракции в отражённом свете.
- 20.5.** Дифракция солнечного света на краях Луны.
- 21.1.** Интенсивность рассеянного света в воздухе обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны света. Синие лучи имеют меньшую длину волны, поэтому рассеиваются больше.
- 21.2.** а) Интенсивность рассеянного света в воздухе обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны света. Голубая и синяя часть спектра имеет меньшую длину волны и рассеивается значительно больше, чем жёлтая и красная, обуславливая голубой или синий цвет неба.
б) Стекло имеет синий цвет, так как оно пропускает в основном синюю часть спектра.
в) Бумага имеет синий цвет, так как она отражает в основном синюю часть спектра.

- 21.3.** При подаче сигнала об опасности важнее всего, чтобы он был виден с наибольшего расстояния. Длинноволновые лучи рассеиваются меньше, поэтому для сигналов об опасности и выбран красный свет. Кроме этого учитывается физиологическое воздействие цвета на человеческий организм. Красный цвет способствует приведению человека в состояние большей внимательности и сосредоточенности.
- 21.4.** Падающая на среду световая волна вызывает вынужденные колебания электронов и ионов, входящих в состав молекул среды. Если среда однородная, то вторичные волны, излучаемые множеством соседних атомов и молекул, когерентны, так как возникли под действием одной и той же электромагнитной волны. Интерференция между ними позволяет объяснить такие явления в веществе, как отражение, преломление, дисперсия, рассеяние и т. д.
- 21.5.** При плавном изменении плотности воздуха меняется его показатель преломления. Луч света в атмосфере искривляется, видимое положение источника света (Солнца, звезды) не совпадает с его действительным положением. Это называется атмосферной рефракцией.
- 21.6.** Поверхность лужи отражает свет зеркально. Отражённый свет практически полностью устремляется прочь от водителя; асфальт же, имея шероховатую поверхность, отражает свет диффузно, и поэтому часть света попадает от асфальта в глаз водителя.
- 21.7.** Световое давление является следствием того, что у фотона имеется импульс $p = h/\lambda$. При столкновении фотона с поверхностью тела этот импульс передается атомам или молекулам вещества. От белой поверхности свет отражается, и импульс падающего фотона складывается с равным ему, но противоположно направленным, импульсом отдачи. Поверхность получит импульс, равный изменению импульса фотона, т.е. $p = 2h/\lambda$. При падении же на чёрную поверхность происходит поглощение света, и поверхность получит импульс $p = h/\lambda$. Следовательно, давление на белую поверхность будет вдвое больше.
- 21.8.** Световое давление – один из факторов, который обуславливает рассеивание в космос молекул из высоких слоев атмосферы. Поэтому может.
- 22.1.** Поляризоваться могут только поперечные волны, а звуковые волны являются продольными. Следовательно, получить поляризованные звуковые волны невозможно.
- 22.2.** Поляризоваться могут только поперечные волны. В воздухе возможны только продольные волны, поэтому поляризованных каким бы то ни было образом звуковых волн в воздухе быть не может.
Что касается электромагнитных волн, в частности радиолокационных, то известно, что спиральные антенны излучают радиоволны, поляризованные по кругу и по эллипсу.
- 22.3.** Поверхность Солнца имеет огромную яркость. Для её наблюдения надо применять какой-нибудь прибор, уменьшающий интенсивность света, пропускаемого в глаз наблюдателя. Если пропустить свет через два поляроида, то интенсивность I пропускаемого света будет подчиняться закону Малюса ($I = I_0 \cos^2 \varphi$). Вращением поляроида можно регулировать интенсивность пропускаемого света. Обыкновенные светопоглощающие фильтры уменьшают интенсивность света, но с их помощью регулировать интенсивность света нельзя.
- 22.4.** Свет, рассеянный молекулами атмосферного воздуха, свободного от облаков, обычно сильно поляризован, поэтому поворот плоскости поляризационной пластинки, через которую рассматривается ясное небо, меняет пропускаемую пластинкой интенсивность света в соответствии с законом Малюса. Свет, рассеянный облаками, не поляризован, поэтому интенсивность пропускаемого пластинкой света при любом положении пластинки будет одинакова.
- 23.1.** Свет, отражённый от границы двух диэлектриков, полностью линейно поляризован, если отражённый и преломленный лучи перпендикулярны друг другу. При этом выполняется условие: $\operatorname{tg} \alpha = n_2/n_1$ (1) – тангенс угла падения равен относительному показате-

лю преломления среды, отражающей свет. Так как законы отражения и преломления допускают обратимость лучей, то будет ли показатель преломления первой среды больше или меньше, чем второй, не играет роли. Важно лишь соблюдение условия (1).

23.2. У обыкновенного и необыкновенного лучей одинаковые частоты и фазы, но векторы напряжённости соответствующих полей взаимно перпендикулярны. Поэтому интерференционной картины они не дают.

23.3. Только направление в пространстве.

23.4. Чтобы получить приведённые значения n_0 и n_e , надо вырастить в особых условиях монокристалл льда. В природе же монокристаллы льда встречаются редко, так что обычная структура льда поликристаллична. В таких структурах кристаллографические направления повернуты относительно друг друга на всевозможные углы, и поэтому анизотропия микрокристаллов в виде двойного лучепреломления не обнаруживается.

25.1. Угол поворота удвоится.

26.1. а) К тепловому излучению. б) К тепловому излучению. в) К катодолюминесцентному.

26.2. В свете ламп накаливания преобладает длинноволновое излучение. Синее стекло больше поглощает длинноволновое излучение и поэтому быстрее нагревается. Следовательно, от синего стекла воск отпадет быстрее.

26.3. Нет, не опасны. Стекло для ультрафиолетовых, лучей практически непроницаемо.

КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Волновая оптика»

№ вопр.	Код ответа								
1	1	11	4	21	3	31	1	41	1
2	3	12	4	22	3	32	2	42	2
3	1	13	2	23	2	33	2	43	4
4	3	14	2	24	1	34	2	44	2
5	3	15	1	25	4	35	4	45	3
6	4	16	4	26	3	36	1	46	2
7	1,3	17	2	27	1	37	4	47	1
8	1,3,4	18	2	28	1,2	38	1	48	2
9	4,5	19	3	29	1	39	3	49	2
10	4	20	2	30	1	40	3	50	1

Глава 5. Квантовая оптика

Квантовой оптикой называется раздел оптики, занимающийся изучением явлений, в которых проявляются квантовые свойства света. К таким явлениям относятся тепловое излучение, фотоэлектрический эффект, эффект Комптона.

§26 Тепловое излучение. Закон Кирхгофа

Все тела в той или иной степени излучают электромагнитные волны. Например, сильно нагретые тела светятся, а при обычных температурах являются источниками только невидимого инфракрасного излучения.

Электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счёт его внутренней энергии, называется тепловым. Оно зависит только от температуры и оптических свойств излучающего тела.

Поместим излучающее тело в оболочку с идеально отражающей поверхностью (рис. 26.1). Воздух из оболочки удалим. Отражённое оболочкой излучение, упав на тело, поглотится им (частично или полностью). Следовательно, будет происходить непрерывный обмен энергией между телом и заполняющим оболочку излучением.

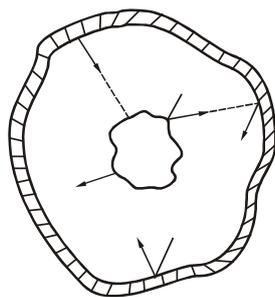


Рисунок 26.1

Если распределение энергии между телом и излучением остается неизменным для каждой длины волны, то состояние системы «тело – излучение» называется равновесным. При равновесии расход энергии тела на тепловое излучение компенсируется за счёт поглощения телом такого же количества энергии падающего на него излучения.

Тепловое излучение – это единственный вид излучения, который может находиться в термодинамическом равновесии с излучающими телами. Все остальные виды излучения оказываются неравновесными. Равновесное излучение устанавливается в адиабатически замкнутой системе, т. е. такой, которая не обменивается теплом с внешней средой. В такой системе все тела находятся при одной и той же температуре.

К равновесным процессам и состояниям применимы законы термодинамики, поэтому тепловое излучение должно подчиняться некоторым закономерностям термодинамики.

26.1 Характеристики теплового излучения

В физической литературе нет единой терминологии в отношении величин, характеризующих тепловое излучение, поэтому в скобках даётся второе название физической величины.

Энергетический поток (Φ_ν) – скалярная физическая величина, равная энергии электромагнитного излучения всех участков спектра, излучаемой за единицу времени:

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{dW}{dt}.$$

Для средних величин

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{W}{t}. \quad (26.1)$$

$$[\Phi_{\text{э}}] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Энергетическая светимость (излучательность) ($R_{\text{э}}$) – скалярная физическая величина, равная энергии, излучаемой с единицы поверхности за единицу времени во всём диапазоне длин волн (от 0 до ∞):

$$R_{\text{э}} = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Для средних величин
$$R_{\text{э}} = \frac{W}{St}. \quad (26.2)$$

$$[R_{\text{э}}] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) ($r_{\lambda, \Gamma}$) – скалярная физическая величина, равная энергии, излучаемой с единицы поверхности за единицу времени в единичном интервале, выбранном вблизи заданной длины волны:

$$r_{\lambda, \Gamma} = \frac{dR_{\text{э}}}{d\lambda}. \quad (26.3)$$

$$[r_{\lambda, \Gamma}] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{с} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

Значение спектральной плотности энергетической светимости (испускательной способности) зависит от длины волны, температуры, химического состава тела и состояния его поверхности. Энергетическая светимость (излучательность) и спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) связаны соотношением

$$R_{\text{э}} = \int_0^{\infty} r_{\lambda, \Gamma} d\lambda. \quad (26.4)$$

Поглощательная способность (монохроматический коэффициент поглощения) ($\alpha_{\lambda, \Gamma}$) – безразмерная физическая величина, показывающая какая доля энергии электромагнитных волн, падающих на тело, поглощается им:

$$\alpha_{\lambda, \Gamma} = \frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}}. \quad (26.5)$$

По определению поглощательная способность не может быть больше единицы. Поглощательная способность реальных тел зависит от свойств вещества и спектрального состава падающего излучения.

26.2 Классификация тел

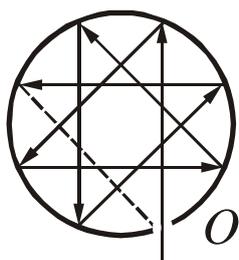
Абсолютно чёрным телом называется тело, которое полностью поглощает всё падающее на него излучение независимо от его спектрального состава и направления падающего излучения, ничего не отражая и не пропуская. Следовательно, поглощательная способность абсолютно чёрного тела тождественно равна единице:

$$\alpha_{\lambda, T, S} \equiv 1. \quad (26.6)$$

Индекс s – это первая буква немецкого слова *schwarz* – *чёрный*.

Абсолютно чёрных тел в природе не существует. Сажа и платиновая чернь имеют поглощательную способность, близкую к единице, но в ограниченном интервале длин волн. В далекой инфракрасной области их поглощательная способность меньше единицы.

Моделью абсолютно чёрного тела может служить почти замкнутая полость с небольшим отверстием (рис. 26.2). Излучение, проникшее внутрь полости через отверстие O , многократно отражается от стенок.



При каждом отражении часть энергии поглощается. В результате чего практически всё излучение любой частоты полностью поглощается стенками полости независимо от материала. Так что отверстие ведёт себя как тело, поглощающее все падающие на него лучи, – абсолютно чёрное тело.

Рисунок 26.2

В теории теплового излучения наряду с понятием абсолютно чёрного тела часто пользуются другой идеализированной моделью реальных тел – серым телом.

Серым телом называется тело, поглощательная способность которого меньше единицы и не зависит от длины волны (частоты) излучения и от абсолютной температуры.

Энергия $dW_{\text{пад}}$, падающая на непрозрачное тело, равна сумме отражённой $dW_{\text{отр}}$ и поглощённой $dW_{\text{погл}}$ энергий:

$$dW_{\text{пад}} = dW_{\text{погл}} + dW_{\text{отр}}.$$

Разделив это соотношение на $dW_{\text{пад}}$, получим:

$$\alpha_{\lambda, T} + \rho_{\lambda, T} = 1. \quad (26.7)$$

где

$$\rho_{\lambda, T} = \frac{dW_{\text{отр}}}{dW_{\text{пад}}}, \quad (26.8)$$

величина, называемая отражательной способностью.

Отражательная способность ($\rho_{\lambda,T}$) – безразмерная физическая величина, показывающая, какая доля энергии электромагнитных волн, падающих на тело, отражается им.

Отражательная способность $\rho_{\lambda,T}$ реальных тел зависит от свойств вещества и спектрального состава падающего излучения. Для реальных тел :

$$0 < \alpha_{\lambda,T} < 1 \quad \text{и} \quad 0 < \rho_{\lambda,T} < 1. \quad (26.9)$$

Отражательная способность абсолютно чёрного тела равна нулю, т.е. $\rho_{\lambda,T,S} = 0$. Непрозрачные тела, у которых поглотительная способность равна нулю, не излучают и не поглощают электромагнитных волн: они полностью отражают падающее на них излучение. Если отражение при этом происходит по законам геометрической оптики, то тело называется **зеркальным**. Для зеркальных тел:

$$\rho_{\lambda,T} \equiv 1, \quad \alpha_{\lambda,T} \equiv 0. \quad (26.10)$$

Абсолютно зеркальных тел в природе также не существует. Близкой к зеркалу является поверхность серебра ($\rho_{\lambda,T} \approx 0,95$).

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Как белое сделать чёрным. Natürlich! <https://www.youtube.com/watch?v=l-66WYjOB1s&index=1&list=PLWM8IO-3TQjNnOsEb5l0DZRc3cKp0aUSL>
<https://www.youtube.com/watch?v=l-66WYjOB1s>

26.3 Закон Кирхгофа

Между испускательной и поглотительной способностями непрозрачного тела имеется связь. Рассмотрим следующий эксперимент. Пусть внутри замкнутой вакуумированной оболочки, температура которой постоянна, находятся несколько тел (рис. 26.3). Эти тела могут обмениваться энергией между собой и оболочкой только путём испускания и поглощения электромагнитных волн. Опыт показывает, что через некоторое время все тела примут одинаковую температуру, равную температуре оболочки T . В таком состоянии тело, обладающее большей испускательной способностью $r_{\lambda,T}$ теряет больше энергии, чем то тело, у которого испускательная способность меньше. Так как температура тел не меняется, то тело, испускающее больше энергии, должно больше её поглощать, т.е. обладать большей поглотительной способностью.

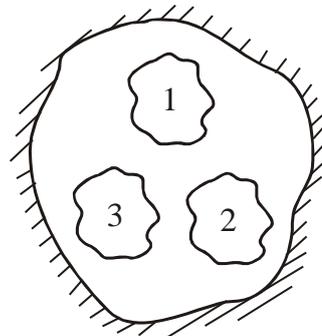


Рисунок 26.3

Таким образом, чем больше испускательная способность $r_{\lambda,T}$ тем больше поглотительная способность $\alpha_{\lambda,T}$. В 1895 году немецкий физик Кирхгоф* установил, что

*Кирхгоф Густав Роберт (1824–1887), немецкий физик.

Отношение испускательной способности к поглощательной способности не зависит от природы тел, а является для всех тел одной и той же универсальной функцией длины волны и температуры.

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}}\right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}}\right)_3 = \dots = f(\lambda, T), \quad (26.11)$$

где индексы 1, 2, 3 ... относятся к разным телам. Соотношение (26.11) называется законом Кирхгофа.

Для абсолютно чёрного тела поглощательная способность $\alpha_{\lambda,T,S} \equiv 1$. Следовательно, из соотношения (26.11) вытекает, что испускательная способность $r_{\lambda,T}$ для такого тела равна $f(\lambda, T)$. Таким образом, универсальная функция Кирхгофа – это испускательная способность абсолютно чёрного тела. Кирхгоф не сумел установить вид функции $f(\lambda, T)$. Все попытки получить её на основе классической термодинамики закончились неудачно.

После установления закона Кирхгофа стало очевидным, что первоочередная задача теории теплового излучения – найти вид универсальной функции $f(\lambda, T)$, т. е. надо было найти, как испускательная способность абсолютно чёрного тела $r_{\lambda,T,S}$ зависит от длины волны λ и температуры T .

Испускательная способность полости с очень маленьким отверстием очень близка к $f(\lambda, T)$, причём T означает температуру стенок полости. Таким образом, если стенки полости поддерживать при некоторой температуре T , то из отверстия выходит излучение, близкое по спектральному составу к излучению абсолютно чёрного тела при той же температуре. Разлагая излучение в спектр, и измеряя интенсивность различных участков спектра, удалось экспериментально найти вид функции $f(\lambda, T)$. Результаты этого эксперимента представлены на графике (рис. 26.4). Из анализа графика были сделаны следующие выводы.

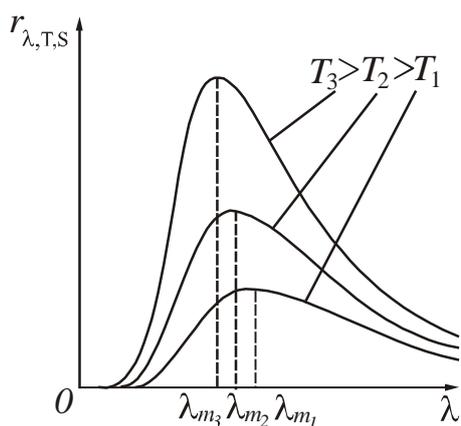


Рисунок 26.4

1. Энергетический спектр теплового излучения является непрерывным, т. е. в нём присутствуют все длины волн от 0 до ∞ .
2. В области малых и больших длин волн излучение мало.
3. Кривые имеют максимумы, т. е. существует длина волны, при которой испускательная способность абсолютно чёрного тела принимает наибольшее значение. С повышением температуры максимум смещается в сторону более коротких длин волн.
4. Площадь, охватываемая кривой, даёт излучательность абсолютно чёрного тела при соответствующей температуре.
5. Излучательность (энергетическая светимость) абсолютно чёрного тела сильно возрастает с температурой.

На основе этих выводов и других экспериментов был установлен ряд законов теплового излучения.

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Походная фляга или закон Кирхгофа.

<https://www.youtube.com/watch?v=ShDgf3GsiZc&list=PLWM8IO-3TQjNnOsEb5l0DZRc3cKp0aUSL&index=2>

<https://www.youtube.com/watch?v=ShDgf3GsiZc>

- Давайте подумаем!

26.1. К какому виду излучений следует отнести свет, испускаемый ..

- расплавленным чугуном, который течёт из доменной печи?
- нитью «горящей» электрической лампы?
- экраном телевизора?

26.2. Рядом с горящей электрической лампой поместили два стекла с прикреплёнными к ним кусочками воска – красное и синее. От которого из стекол быстрее отпадёт воск?

26.3. В лампах дневного света далеко не всё ультрафиолетовое излучение превращается в видимое. Не опасны ли в таком случае эти лампы для здоровья?

§27 Законы Стефана – Больцмана и Вина

Анализируя экспериментальные данные, Й. Стефан* и Л. Больцман* установили связь между энергетической светимостью (излучательностью) абсолютно чёрного тела и его температурой. По закону Стефана – Больцмана *энергетическая светимость (излучательность) абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его термодинамической температуры:*

$$R_3 = \sigma T^4, \quad (27.1)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

Для серых тел этот закон применяют в следующем виде:

$$R_3 = \alpha \sigma T^4, \quad (27.2)$$

где α – поглощательная способность (коэффициент монохроматического поглощения).

В. Вин* также не смог установить вид функции Кирхгофа, но зато ему удалось найти положение максимума функции и зависимость максимального значения испускательной способности абсолютно чёрного тела от температуры.

Длина волны, на которую приходится максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости (испускательной способности) абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре:

*Стефан Йозеф (1835–1893), австрийский физик.

*Больцман Людвиг (1844–1906), австрийский физик.

*Вин Вильгельм Карл Вернер (1864–1928), немецкий физик, лауреат Нобелевской премии 1911 г.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (27.3)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К – постоянная Вина.

Выражение (27.3) называют законом смещения Вина.

Максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости (испускательной способности) абсолютно чёрного тела пропорционально пятой степени его термодинамической температуры:

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = cT^5, \quad (27.4)$$

где $c = 1,3 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м³·К⁵) – постоянная величина.

Выражение (27.4) называют вторым законом Вина.

Все попытки теоретического обоснования экспериментально найденного вида функции Кирхгофа $f(\lambda, T) = r_{\lambda, T, S}$ в рамках классической физики оказались безуспешными.

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Закон смещения Вина.

<https://www.youtube.com/watch?v=SYG-hTIs954&index=4&list=PLWM8IO-3TQjNnOsEb5l0DZRc3cKp0aUSL>

<https://www.youtube.com/watch?v=SYG-hTIs954>

- Давайте подумаем!

27.1. Соотношение $R = \sigma T^4$ выполняется в точности для всех температур абсолютно чёрного тела. Почему же мы не можем применять это соотношение в качестве основы для определения температуры, скажем, в 100°C?

§28 Гипотеза Планка. Формула Планка

Все попытки объяснить закономерности теплового излучения на основе законов классической физики закончились неудачей, В 1894 году к исследованию проблемы излучения абсолютно чёрного тела приступил М. Планк*. В 1900 году он выдвинул новую гипотезу о природе излучения. Суть этой гипотезы заключается в следующем.

Электромагнитное излучение испускается в виде отдельных порций энергии (квантов), величина которых пропорциональна частоте излучения.

Энергия кванта:

$$\varepsilon = h\nu, \quad (28.1)$$

где ν – частота излучения.

*Планк Макс Карл Эрнст Людвиг (1858–1947), немецкий физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии 1918 г.

Коэффициент пропорциональности h впоследствии был назван постоянной Планка.

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}.$$

Используя соотношение, связывающее скорость, длину волны и частоту $c = \lambda\nu$, энергию кванта можно выразить формулой

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}. \quad (28.2)$$

Таким образом, в физику было введено совершенно новое представление о дискретности возможных значений энергии. Это нарушило основной принцип классической физики, согласно которому физические величины изменяются непрерывно.

На основе своей гипотезы М. Планк разработал квантовую теорию теплового излучения. Ему удалось найти правильное выражение для функции Кирхгофа, т. е. получить формулу для расчёта испускательной способности абсолютно чёрного тела $r_{\lambda,T,S}$. Эта формула имеет вид:

$$r_{\lambda,T,S} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (28.3)$$

где c – скорость света;

k – постоянная Больцмана.

Формула (28.3) называется формулой Планка. Кривые, рассчитанные по этой формуле, совпали с экспериментально полученными кривыми (рис. 26.4).

Если в выражение $R_\Sigma = \int_0^\infty r_{\lambda,T} d\lambda$ (см. формулу (26.4)) подставить значение испускательной способности в соответствии с формулой Планка и проинтегрировать, то можно получить закон Стефана – Больцмана. Если взять производную функции $r_{\lambda,T,S}$ по длине волны λ и приравнять её к нулю, то можно рассчитать

b – постоянную Вина. Полученное значение совпадает с экспериментальным значением. Это является подтверждением правильности теории Планка.

Таким образом, можно утверждать, что свету, кроме волновых свойств, присущи также и корпускулярные свойства.

§29 Оптическая пирометрия

Установление законов Стефана – Больцмана и Вина позволило создать приборы для измерения температуры, работающие без контакта с раскалёнными телами.

Совокупность методов измерения температуры, основанных на законах теплового излучения, называется *оптической пирометрией*. Приборы, применяемые для этого, называются *пирометрами*.

Радиационные пирометры основаны на фокусировке излучения раскалённой поверхности на некотором теплоприёмнике. Яркость резкого (сфокусированного) изображения не зависит от расстояния до объекта, если оно велико по сравнению с фокусным расстоянием объектива. Важным является то, что создаваемое объективом изображение должно полностью перекрывать теплоприёмник.

Предварительно пирометр градуируют по излучению абсолютно чёрного тела. Измеренная радиационная температура оказывается меньше действительной, так как излучательность раскалённой поверхности меньше излучательности абсолютно чёрного тела (по закону Кирхгофа). Соответствующие поправочные коэффициенты имеются в справочниках.

Действие **яркостных пирометров** основано на сравнении яркости свечения тела, температура которого измеряется, и некоторого другого – нити лампы накаливания. Наблюдение ведётся через красный светофильтр ($\lambda = 660$ нм). Применение этих пирометров связано с металлургией. На фоне изображения светящегося окошка доменной или мартеновской печи наблюдается нить накаливания. Регулируя ток через лампочку, добиваются уравнивания их яркостей в красном свете. При этом нить лампочки становится невидимой, поэтому такой пирометр называется пирометром с «исчезающей нитью».

Пирометр градуируется по абсолютно чёрному телу – при изменении тока накала по находящейся в поле наблюдения шкале считывается температура чёрного тела, при которой нить «исчезает». Так как излучательность реального тела при той же температуре меньше, чем излучательность чёрного тела, то для достижения равенства их яркостей реальное тело должно быть нагрето сильнее. Яркостная температура оказывается завышенной.

Для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности применяются **тепловизоры**. Распределение температуры отображается на дисплее (или в памяти) тепловизора как цветное поле, где определённой температуре соответствует определённый цвет. Как правило, на дисплее отображается диапазон температуры видимой в объектив поверхности. Типовое разрешение современных тепловизоров – $0,1^\circ\text{C}$.



Различают **наблюдательные** и **измерительные** тепловизоры. Первые просто делают изображение в инфракрасных лучах видимым в той или иной цветовой шкале. Измерительные тепловизоры, кроме того, присваивают значению цифрового сигнала соответствующую ему температуру, в результате чего получается картина распределения температур.

Тепловизоры применяют во всех отраслях промышленности, где необходимо обеспечить качественный контроль над технологическими процессами производства. Они позволяют оперативно и своевременно отслеживать тепловые изменения, происходящие в отдельно взятых частях машин или механизме в целом. При этом повышение температуры может быть расценено, как знак к возрастанию нагрузки, после чего может быть принято решение об остановке эксплуатации устройства. Тепловизор можно применять для поиска неисправностей

сетей различного назначения. Сканирование тепловизором может безошибочно показать место отхода контактов в системах электропроводки.

Особенно широкое применение тепловизоры получили в строительстве при оценке теплоизоляционных свойств конструкций. С помощью тепловизора можно определить области наибольших потерь тепла в строящемся доме и сделать вывод о качестве применяемых строительных материалов и утеплителей.

Тепловизоры также широко применяют в энергетике, металлургии, при строительстве дорог, судостроении, строительстве и эксплуатации железнодорожного полотна, метрополитене, автомобильной промышленности, медицине.

§30 Внешний фотоэлектрический эффект. Законы фотоэффекта

Внешним фотоэффектом называется явление испускания электронов поверхностью вещества под действием света. Электроны, вылетающие из вещества, называются **фотоэлектронами**, а электрический ток, образуемый ими при движении во внешнем электрическом поле, называется **фототоком**. Открыто явление Г. Герцем* в 1887 году, основные закономерности установлены в 1888-1889 годах А. Н. Столетовым*.

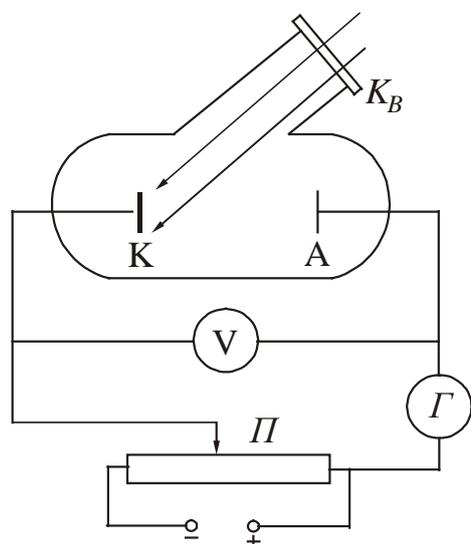


Рисунок 30.1

Исследование закономерностей фотоэффекта можно провести с помощью установки, схема которой изображена на рис. 30.1. Экспериментальные исследования показали, что даже ничтожные загрязнения поверхности металла существенно влияют на испускание электронов под действием света. Поэтому для изучения фотоэффекта пользуются вакуумной трубкой. Свет, проникающий через кварцевое окошко K_B , освещает катод K . Электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, перемещаются под действием электрического поля к аноду A . В результате в цепи течёт фототок, измеряемый гальванометром Γ . Напряжение между анодом и катодом можно изменять с помощью потенциометра Π .

Полученная зависимость фототока I от напряжения между электродами U (вольтамперная характеристика) представлена на рис. 30.2. Характеристика снималась при неизменном световом потоке Φ .

Из анализа этой кривой можно сделать следующие выводы:

1. При некотором не очень большом напряжении фототок достигает насыщения. Это значит, что все электроны, испущенные катодом, попадают на анод. Сила тока насыщения I_n будет определяться количеством электронов, испускаемых катодом в единицу времени под действием света.
2. Пологий ход кривой указывает на то, что электроны вылетают из катода с различными по величине скоростями. При напряжении $U = 0$ часть электронов долетает до анода «самостоятельно», без помощи ускоряющего поля.

*Герц Генрих Рудольф (1857–1894), немецкий физик.

*Столетов Александр Григорьевич (1839–1896), русский физик.

3. Для того чтобы обратить силу тока в нуль, нужно приложить **задерживающее напряжение** U_3 . При таком напряжении ни одному из электронов, даже обладающему при вылете из катода наибольшим значением скорости v_{\max} не удастся достигнуть анода.

На основании экспериментов были установлены следующие **законы фотоэффекта**.

1. Фототок насыщения пропорционален световому потоку при неизменном спектральном составе света, падающего на анод.
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.
3. Для каждого вещества существует минимальная частота света ν_0 , при которой ещё возможен фотоэффект. При $\nu < \nu_0$ (или при $\lambda > \lambda_0$) фотоэффекта нет. Длину волны λ_0 называют красной границей фотоэффекта.

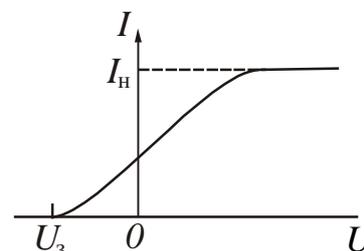


Рисунок 30.2

Фотоэффект – явление безынерционное. Это означает, что между началом освещения и моментом возникновения фотоэффекта не протекает заметного времени. Опыты, проведённые в последнее время, показывают, что промежуток времени между началом освещения и появлением фототока не превышает 10^{-9} с.

С точки зрения волновых представлений о свете фотоэффект объяснить не удалось. А. Эйнштейн* высказал гипотезу о том, что свет не только излучается, но также распространяется в пространстве и поглощается веществом в виде отдельных квантов электромагнитного излучения. Квант оптического диапазона излучения называют **фотоном**.

Все фотоны монохроматического света частоты ν имеют одинаковую энергию

$$\varepsilon = h\nu, \quad (30.1)$$

где h – постоянная Планка.

В случае поглощения света веществом каждый поглощённый фотон передаёт всю свою энергию электрону. Часть этой энергии электрон затрачивает на совершение работы выхода $A_{\text{вых}}$ из вещества. **Работой выхода** называется минимальная энергия, которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы удалить его из твёрдого или жидкого тела в вакуум. Остаток энергии образует кинетическую энергию электрона, покинувшего вещество. В этом случае по закону сохранения энергии должно выполняться соотношение

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (30.2)$$

которое называется уравнением Эйнштейна для фотоэффекта.

*Эйнштейн Альберт (1879–1955), немецкий физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии 1921 г.

Из уравнения Эйнштейна непосредственно вытекает второй закон фотоэффекта:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = h\nu - A_{\text{ВЫХ}}, \quad (30.3)$$

то есть максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно зависит от частоты, так как *работа выхода для данного вещества величина постоянная*.

При $\nu = \nu_0$ кинетическая энергия обращается в нуль. При этом

$$h\nu_0 = A_{\text{ВЫХ}}, \quad (30.4)$$

то есть красная граница фотоэффекта будет определяться природой вещества.

Если приложить задерживающее напряжение U_3 , то фототок обращается в нуль. При этом работа электрического поля будет равна максимальной кинетической энергии вылетевших фотоэлектронов.

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3, \quad (30.5)$$

m – масса электрона; e – заряд электрона.

Сделав замену в уравнении (30.2), получим еще одну форму записи уравнения Эйнштейна:

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + eU_3. \quad (30.6)$$

Приёмники излучения, работающие на основе фотоэффекта и преобразующие энергию излучения в электрическую, называются фотоэлементами. Они используются практически во всех отраслях производства.

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Фотоэффект – разрядка светом

https://www.youtube.com/watch?v=O5N_7jk3GWU

Простейшим электронным прибором, в основе работы которого лежит явление внешнего фотоэффекта является *вакуумный фотоэлемент*. Он представляет собой откачанный стеклянный баллон, внутренняя поверхность которого (за исключением окошка для доступа излучения) покрыта фоточувствительным слоем, служащим фотокатодом. В качестве анода обычно используется кольцо или сетка, помещаемая в центре баллона. Выбор материала фотокатода определяется рабочей областью спектра: для регистрации видимого света и инфракрасного излучения используется кислородно-цезиевый катод, для регистрации ультрафиолетового излучения и коротковолновой части видимого света – сурьмяно-цезиевый. Вакуумные фотоэлементы безынерционны, и для них наблюдается строгая пропорциональность между фототоком и интенсивностью излучения. Эти свойства позволяют использовать вакуумные фотоэлементы в качестве фотометрических приборов: фотоэлектрических экспонометров, люксметров (приборы для измерения освещённости).

Фотоэлементы широко применяют в различных схемах автоматики для управления электрическими цепями с помощью световых пучков, для автоматического включения и выключения маяков и уличного освещения, автоматизации станков на заводах и т. д.

- Давайте подумаем!

- 30.1.** Студент, объясняя уравнение Эйнштейна для фотоэффекта, сказал: «Энергия падающего света равна работе выхода электронов и кинетической энергии их движения». В чём неточность такого ответа?
- 30.2.** В какие виды энергии превращается при фотоэффекте энергия падающего на вещество света?
- 30.3.** Фотометристы судят об освещённости катода фотоэлемента по силе тока насыщения в цепи. Но ведь в этом токе принимают участие и термоэлектроны. Как можно было бы уменьшить роль термоэлектронов?

§31 Фотон. Свойства фотона

Фотон – это электрически нейтральная элементарная частица, не имеющая массы покоя и движущаяся со скоростью света. Рассмотрим основные отличительные свойства фотона и его особенности.

1. Скорость фотона всегда равна c – скорости света в вакууме. Поэтому всё, чем характеризовалась скорость света, относится и к фотону, так как фотон и есть свет: скорость фотона одинакова во всех инерциальных системах отсчёта, не зависит от скорости движения источника и приёмника света.

2. Энергия фотона определяется частотой соответствующей электромагнитной волны.

$$\varepsilon = h\nu. \quad (31.1)$$

3. Фотон – ультрарелятивистская частица. В отличие от частиц вещества (протонов, нейтронов, электронов и других элементарных частиц), скорость которых всегда меньше скорости света и которые обладают массой покоя, отличной от нуля, фотон не имеет массы покоя. Покажем это. Из законов релятивистской механики известна зависимость массы от скорости движения:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (31.2)$$

где m_0 – масса покоя частицы. Из (31.2) найдём m_0 :

$$m_0 = m\sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (31.3)$$

Фотон движется со скоростью света, т. е. $v = c$. Из (31.3) следует, что при $v = c$

$$m_0 = 0.$$

Это означает, что фотон существует только в движении.

4. Фотон не подчиняется законам Ньютона, так как у него нет массы покоя. Это означает, что его нельзя ни ускорить, ни замедлить и никакие силы на него не действуют. Искривление световых лучей в поле тяготения Солнца и звезд объясняется не притяжением фотонов, а изменением геометрии простран-

ства-времени, благодаря чему кратчайшее расстояние между двумя точками оказывается уже не прямой, а кривой линией.

5. Массу фотона найдём из формулы взаимосвязи массы и энергии. По формуле Эйнштейна $\varepsilon = mc^2$. С другой стороны энергия фотона $\varepsilon = h\nu$. Приравняв эти соотношения, найдём массу фотона

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (31.4)$$

6. Фотон обладает импульсом.

$$p = mc = \frac{h\nu}{c}. \quad (31.5)$$

Используя соотношение, связывающее скорость, длину волны и частоту: $c = \lambda\nu$, импульс фотона можно выразить формулой

$$p = \frac{h}{\lambda}, \quad (31.6)$$

где ν и λ – соответственно частота и длина световой волны.

Уравнение (31.6) указывает на связь корпускулярных и волновых свойств света: p – импульс – характеристика частицы, ν и λ – характеристики волны.

7. Фотон не делится на части. Он испускается, отражается, преломляется, поглощается только целиком.

Принятие фотонной теории света не означает возврата к корпускулярной теории. С точки зрения Ньютона и его последователей, световые корпускулы рассматривались как обычные частицы, подчиняющиеся законам ньютоновской механики. Фотон принципиально отличается от классической корпускулы тем, что его свойства неразрывно связаны с электромагнитной волной: его энергия и импульс полностью определяются частотой (или длиной) волны.

Таким образом, фотон обладает двойственными свойствами – как корпускулярными, так и волновыми.

• **Давайте подумаем!**

31.1. Изучая световой поток, состоящий из одинаковых фотонов, можно узнать массу любого из них. Какую характеристику света нужно для этого определить экспериментально?

31.2. Световой поток дает непрерывный спектр. Что можно сказать о наименьших различиях энергий фотонов в этом потоке?

31.3. Вдоль какого из векторов (\vec{H} , \vec{E} или \vec{v}), характеризующих световую волну, направлен импульс фотонов?

31.4. Когда свет падает на поглощающую его поверхность, фотоны перестают существовать. Не противоречит ли это закону сохранения импульса?

§32 Эффект Комптона

Наиболее отчётливо корпускулярные свойства света проявляются в явлении, которое было открыто в 1923 году и называется *эффектом Комптона**.

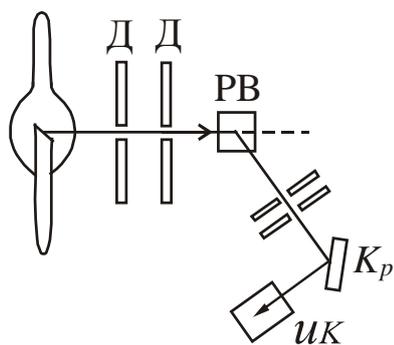


Рисунок 32.1

Суть явления заключается в следующем. Если на рассеивающее вещество направить пучок монохроматического рентгеновского излучения, то длина волны λ' рассеянного излучения окажется больше длины волны λ падающего.

Схема опыта Комптона представлена на рис. 32.1. Выделяемый диафрагмами пучок монохроматического рентгеновского излучения направлялся на рассеивающее вещество РВ. Спектральный состав исследовался с помощью рентгеновского спектрографа, состоящего из кристалла Кр и ионизационной камеры ИК.

Разность $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ оказалась зависящей только от угла θ , образуемого направлением рассеянного излучения с направлением первичного пучка. От длины волны λ и от природы рассеивающего вещества изменение длины волны $\Delta\lambda$ не зависит.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta), \quad (32.1)$$

где θ – угол рассеяния, т.е. угол между направлением первоначального и рассеянного пучков; m_0 – масса покоя частицы, на которой происходило рассеяние.

Обозначим

$$\frac{h}{m_0c} = \lambda_C \quad (32.2)$$

и назовём λ_C – комptonовской длиной волны.

Подстановка в (32.2) значений h , m_0 , c дает для электрона значение

$$\lambda_C = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

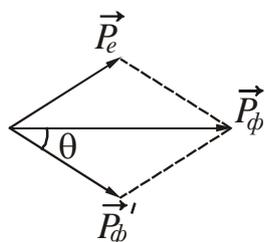


Рисунок 32.2

Эффект Комптона можно объяснить, рассматривая рассеяние как процесс упругого столкновения рентгеновских фотонов с практически свободными электронами. Свободными можно считать слабее всего связанные с атомами электроны. Энергия связи этих электронов значительно меньше той, которую фотон может передать электрону при соударении.

При упругом взаимодействии должны выполняться законы сохранения импульса (рис. 32.2) и энергии. До столкновения энергия

*Комптон Артур Холли (1892–1962), американский физик, лауреат Нобелевской премии 1927 г.

электрона равна m_0c^2 (энергия покоя), импульс равен нулю. После столкновения энергия электрона равна mc^2 , импульс электрона становится равным \vec{p}_e . Фотон до столкновения имел импульс \vec{p}_ϕ , энергию $h\nu$. После столкновения импульс фотона станет равным \vec{p}'_ϕ , а энергия $h\nu'$. Тогда можно записать следующие соотношения, выражающие законы сохранения импульса и энергии соответственно:

$$\vec{p}_\phi = \vec{p}'_\phi + \vec{p}_e \quad (32.2)$$

$$m_0c^2 + h\nu = mc^2 + h\nu' \quad (32.3)$$

Решение данной системы уравнений позволяет получить уравнение (32.1). Таким образом, из теории Кóмптона следует, что фотон передает электрону часть своей энергии и часть своего импульса. В результате уменьшения энергии фотона длина волны рассеянного фотона увеличивается.

Эффект Кóмптона находит применение в астрофизике: гамма-лучи от космических объектов подвергаются многократному рассеянию, пока их энергия не падает до длин волн рентгеновской части спектра, после чего их можно анализировать на стандартных рентгенографических установках.

- **Обратите внимание!**

Одно и то же понятие называется разными терминами

Излучательность – энергетическая светимость.

Испускательная способность – спектральная плотность энергетической светимости.

Поглощательная способность – монохроматический коэффициент поглощения.

- Изучив раздел «Квантовая оптика», студент должен **ЗНАТЬ**:

Суть понятий:

Абсолютно чёрное тело (АЧТ), серое тело, зеркальное тело. Квант, фотон. Красная граница фотоэффекта, работа выхода.

Определения физических величин, их единицы измерения и формулы, по которым рассчитываются величины:

Энергетический поток. Излучательность, испускательная способность, поглощательная способность, отражательная способность.

Законы:

Закон Кирхгофа, закон Стефана-Больцмана, законы Вина. Законы фотоэффекта.

Явления:

Тепловое излучение. Фотоэффект. Эффект Комптона.

Уравнения:

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

Формулы:

Формула Планка. Энергия, масса, импульс фотона.

Графики:

Зависимость лучеиспускательной способности АЧТ от длины волны. Зависимость фототока от напряжения.

Приборы и устройства:

Пирометр.

ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ «КВАНТОВАЯ ОПТИКА»

Инструкция. Данный тест предназначен для проверки знаний по теме «*Квантовая оптика*». Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу кодов. Если Вы дали

- 1) 41-45 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
 - 2) 34-40 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
 - 3) 27-33 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
 - 4) меньше 27 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.
- Прочитайте конспект ещё раз.

1. Тепловым излучением называется ...
 - 1) электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счёт его внутренней энергии.
 - 2) теплообмен между поверхностью тела и окружающей средой.
 - 3) процесс переноса тепла от одной среды к другой.
 - 4) распространение тепла от более нагретых элементов тела к менее нагретым.
2. Укажите основную особенность теплового излучения по сравнению с другими видами излучения.
 1. Его интенсивность не зависит от температуры излучающего тела.
 2. Оно может находиться в равновесии с излучающими телами.
 3. Оно является когерентным.
 4. Оно присуще только абсолютно чёрным телам.
3. Тепловым излучением является излучение ...
 - 1) лампы дневного (люминесцентного) света.
 - 2) лампы накаливания.
 - 3) инфракрасного лазера.
 - 4) экрана телевизора.
4. Тепловое излучение на шкале электромагнитных волн может лежать ...
 - 1) во всех областях спектра.
 - 2) в области радио- и инфракрасного излучения.
 - 3) в области видимого излучения.
 - 4) в области инфракрасного и видимого излучения.
5. Полная мощность теплового излучения тела зависит от ...
 - 1) частоты этого излучения.
 - 2) интенсивности излучения.
 - 3) температуры тела.
 - 4) материала, из которого изготовлено тело.
6. Излучательностью (энергетической светимостью) тела называется ...
 - 1) энергия, излучаемая всей поверхностью тела в единицу времени.
 - 2) энергия, излучаемая всей поверхностью тела.
 - 3) энергия, излучаемая телом в единичном спектральном интервале с единицы площади в единицу времени.
 - 4) энергия, излучаемая телом с единицы площади в единицу времени.

7. Были измерены спектры теплового излучения при трёх различных температурах ($T_3 > T_2 > T_1$). Укажите, какой из графиков зависимости мощности излучения P от частоты ν на рис. 7 соответствует результатам наблюдения.

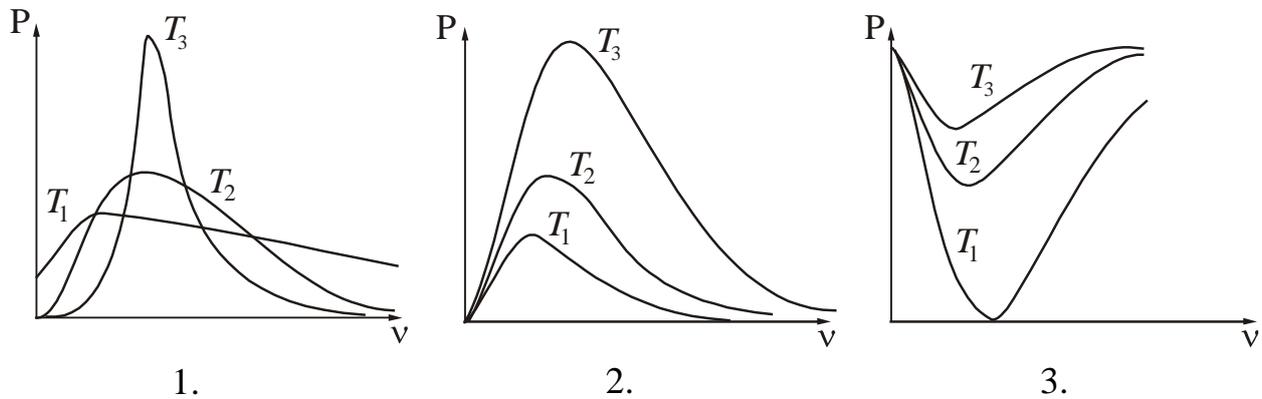


Рисунок 7

8. Формула $R_3 = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda$, где $r_{\lambda,T}$ – испускательная способность, выражает ...
- 1) полную энергию, излучаемую телом.
 - 2) излучательность (энергетическую светимость) тела.
 - 3) поглотительную способность тела.
9. Испускательной способностью (спектральной плотностью энергетической светимости) тела, называется ...
- 1) энергия, излучаемая всей поверхностью тела в единицу времени.
 - 2) энергия, излучаемая всей поверхностью тела.
 - 3) энергия, излучаемая телом в единичном спектральном интервале с единицы площади в единицу времени.
 - 4) энергия, излучаемая телом с единицы площади в единицу времени.
10. Поглотительной способностью (коэффициентом монохроматического поглощения) называется ...
- 1) энергия, поглощаемая телом за единицу времени.
 - 2) отношение поглощённой энергии к падающей.
 - 3) отношение поглощённой энергии к излучённой.
 - 4) температура, при которой происходит излучение.
11. Укажите формулу, выражающую закон Кирхгофа для теплового излучения.
1. $\lambda_m = \frac{b}{T}$
 2. $R_3 = \sigma T^4$
 3. $\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = f(\lambda, T)$
 4. $r_{\lambda,T,S}^{\max} = cT^5$
12. Укажите формулировку закона Кирхгофа для теплового излучения.
1. Длина волны, на которую приходится максимальное значение испускательной способности (спектральной плотности энергетической светимости) абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре.

2. Излучательность (энергетическая светимость) абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры.
3. Поглощательная способность абсолютно чёрного тела равна единице $a_{\lambda,T} = 1$.
4. Отношение испускательной способности к поглощательной способности не зависит от природы тел, а является для всех тел одной и той же универсальной функцией длины волны и температуры.
5. Максимальное значение испускательной способности (спектральной плотности энергетической светимости) абсолютно чёрного тела пропорционально пятой степени его абсолютной температуры.

13. Укажите формулу закона Стефана – Больцмана для теплового излучения.

$$1. \lambda_m = \frac{b}{T} \quad 2. R_{\lambda} = \sigma T^4 \quad 3. \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = f(\lambda, T) \quad 4. r_{\lambda,T,S}^{\max} = cT^5$$

14. Укажите формулировку закона Стефана – Больцмана для теплового излучения.

1. Длина волны, на которую приходится максимальное значение испускательной способности (спектральной плотности энергетической светимости) абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре.
2. Излучательность (энергетическая светимость) абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры.
3. Поглощательная способность абсолютно чёрного тела равна единице $a_{\lambda,T} = 1$.
4. Отношение испускательной способности к поглощательной способности не зависит от природы тел, а является для всех тел одной и той же универсальной функцией длины волны и температуры.
5. Максимальное значение испускательной способности (спектральной плотности энергетической светимости) абсолютно чёрного тела пропорционально пятой степени его абсолютной температуры.

15. Укажите формулу закона смещения Вина для теплового излучения.

$$1. \lambda_m = \frac{b}{T} \quad 2. R_{\lambda} = \sigma T^4 \quad 3. \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = f(\lambda, T) \quad 4. r_{\lambda,T,S}^{\max} = cT^5$$

16. Укажите формулировку закона смещения Вина для теплового излучения.

1. Длина волны, на которую приходится максимальное значение испускательной способности (спектральной плотности энергетической светимости) абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре.

2. Излучательность (энергетическая светимость) абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры.
3. Поглощательная способность абсолютно чёрного тела равна единице $a_{\lambda,T} = 1$.
4. Отношение испускательной способности к поглощательной способности не зависит от природы тел, а является для всех тел одной и той же универсальной функцией длины волны и температуры.
5. Максимальное значение испускательной способности (спектральной плотности энергетической светимости) абсолютно чёрного тела пропорционально пятой степени его абсолютной температуры.

17. Укажите формулу второго закона Вина для теплового излучения.

$$1. \lambda_m = \frac{b}{T} \quad 2. R_\lambda = \sigma T^4 \quad 3. \frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = f(\lambda, T) \quad 4. r_{\lambda,T,S}^{\max} = cT^5$$

18. Укажите формулировку второго закона Вина для теплового излучения.

1. Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре.
2. Энергетическая светимость абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры.
3. Поглощательная способность абсолютно чёрного тела равна единице $a_{\lambda,T} = 1$.
4. Отношение спектральной плотности энергетической светимости тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела, а является для всех тел универсальной функцией длины волны и температуры.
5. Максимальная спектральная плотность энергетической светимости абсолютно чёрного тела пропорциональна пятой степени его температуры.

19. Укажите условие, которое справедливо только для абсолютно чёрного тела.

1. Коэффициент отражения равен 1.
2. Излучательность для всех частот равна 1.
3. Отношение испускательной способности к поглощательной способности постоянно для всех температур и частот.
4. Коэффициент монохроматического поглощения для всех частот и температур равен 1.

20. Укажите утверждение, являющееся гипотезой Планка для теплового излучения.

1. Тепловое излучение имеет электромагнитную природу.
2. Излучательность тел зависит от температуры.
3. Тепловое излучение происходит в виде отдельных порций энергии (квантов).
4. Сумма поглощательной и отражательной способностей равна 1.

21. Укажите выражение, определяющее импульс фотона с частотой ν .
1. $h\nu c^2$ 2. $h\nu c$ 3. $h\nu$ 4. $\frac{h\nu}{c}$ 5. $\frac{h\nu}{c^2}$
22. Укажите выражение, определяющее энергию фотона с частотой ν .
1. $h\nu c^2$ 2. $h\nu c$ 3. $h\nu$ 4. $\frac{h\nu}{c}$ 5. $\frac{h\nu}{c^2}$
23. Укажите выражение, определяющее массу фотона с частотой ν .
1. $h\nu c^2$ 2. $h\nu c$ 3. $h\nu$ 4. $\frac{h\nu}{c}$ 5. $\frac{h\nu}{c^2}$
24. Дано четыре вида излучения: γ -излучение, видимый свет Солнца, излучение нагретого утюга, излучение линии электропередачи. Укажите, какие из них можно представить как поток квантов.
1. Все перечисленные.
 2. Все, кроме излучения линии электропередачи.
 3. Видимый свет и γ -излучение.
 4. Только γ -излучение.
25. Свет с частотой $4 \cdot 10^{15}$ Гц состоит из фотонов с электрическим зарядом, равным ...
- 1) $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл 2) $6,4 \cdot 10^{-19}$ Кл 3) 0 4) $6,4 \cdot 10^{-4}$ Кл
26. Внешним фотоэлектрическим эффектом называется ...
- 1) испускание электронов нагретыми телами.
 - 2) испускание электронов телами при бомбардировке их быстрыми частицами.
 - 3) испускание электронов телами под действием сильного электростатического поля.
 - 4) испускание электронов с поверхности вещества под действием света.
 - 5) изменение энергии электронов при взаимодействии с фотонами.
27. Укажите свойства электромагнитного излучения, которые проявляются в фотоэффекте.
1. Рентгеновские. 2. Волновые.
 3. Корпускулярные. 4. Классические.
28. Укажите формулу Эйнштейна для фотоэлектрического эффекта.
1. $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$ 2. $\lambda = \frac{h}{m\nu}$ 3. $h\nu = A + \frac{m\nu_{\max}^2}{2}$ 4. $\frac{m\nu_{\max}^2}{2} = eU_3$
29. Укажите, какие величины будут изменяться при фотоэффекте, если фотоэффект достигается монохроматическим светом различной частоты.
1. Работа выхода электрона. 2. Скорость электрона.
 3. Кинетическая энергия электрона. 4. Сила фототока.
 5. Количество вылетевших электронов.
30. Укажите правильное утверждение. Максимальная кинетическая энергия выбитых с поверхности металла электронов ...

- 1) пропорциональна частоте падающего света
 - 2) пропорциональна интенсивности падающего света
 - 3) обратно пропорциональна интенсивности падающего света
 - 4) обратно пропорциональна частоте падающего света.
31. Металлическую пластину освещали монохроматическим светом одинаковой интенсивности: сначала красным, потом зелёным, затем синим. Максимальная кинетическая энергия вылетающих фотоэлектронов была наибольшей ...
- 1) при освещении красным светом.
 - 2) при освещении зелёным светом.
 - 3) при освещении синим светом.
32. Укажите, какой из приведённых на рис. 32 графиков соответствует графику зависимости максимальной кинетической энергии электронов, вылетевших из пластины в результате фотоэффекта, от интенсивности I падающего света с постоянной длиной волны.

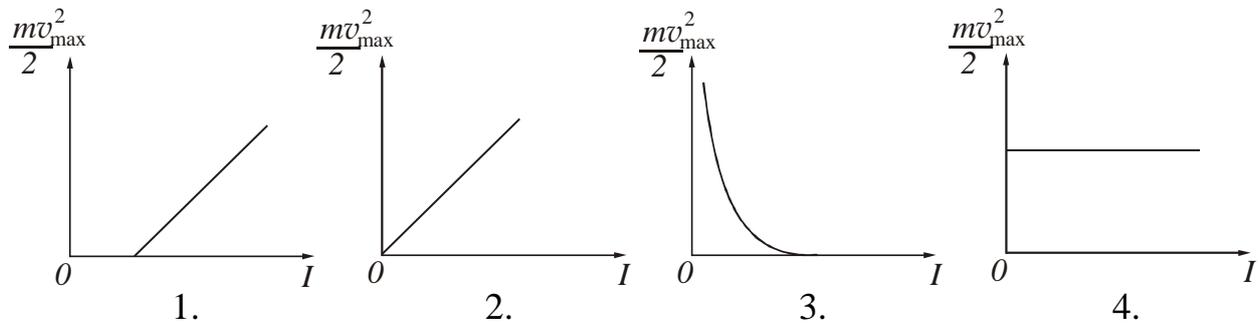


Рисунок 32

33. Скорость электронов при фотоэффекте зависит от ...
- 1) температуры
 - 2) работы выхода
 - 3) интенсивности света
 - 4) частоты светового кванта.
34. Как зависит скорость фотоэлектронов от длины волны света, падающего на фотокатод.
1. Убывает пропорционально $\sqrt{\lambda}$.
 2. Убывает пропорционально λ .
 3. Возрастает пропорционально λ .
 4. Возрастает пропорционально $\sqrt{\lambda}$.
35. Укажите, как зависит величина фототока насыщения от интенсивности облучающего монохроматического света.
1. Уменьшается пропорционально интенсивности.
 2. Возрастает пропорционально интенсивности.
 3. Возрастает пропорционально квадрату интенсивности.
 4. Убывает пропорционально квадрату интенсивности.
36. Интенсивность света, падающего на катод, при неизменной длине волны уменьшилась в 10 раз. При этом уменьшилась (-ось) ...
- 1) скорость фотоэлектронов.

- 2) энергия фотоэлектронов.
 - 3) число фотоэлектронов.
 - 4) масса фотоэлектрона.
37. Красной границей фотоэффекта называется ...
- 1) наименьшая длина световой волны, при которой возможен фотоэффект.
 - 2) наибольшая длина световой волны, при которой возможен фотоэффект.
 - 3) наименьшая частота света, при которой возможен фотоэффект.
 - 4) наибольшая частота света, при которой возможен фотоэффект.
38. Значение «красной границы» фотоэффекта зависит от ...
- 1) постоянной Планка
 - 2) формы освещаемого тела
 - 3) интенсивности излучения
 - 4) материала освещаемого тела.
39. Работа выхода электрона при фотоэффекте зависит от ...
- 1) частоты светового кванта
 - 2) интенсивности света
 - 3) длины волны света, вызывающего фотоэффект
 - 4) температуры
 - 5) свойств металла (материала), дающего фотоэффект.
40. Энергия фотонов, падающих на фотокатод, в 4 раза больше работы выхода материала фотокатода. Отношение максимальной кинетической энергии фотоэлектронов к работе выхода равно ...
- 1) 1
 - 2) 2
 - 3) 3
 - 4) 4
41. Укажите возможные способы применения фотоэлементов.
1. Усиление тока.
 2. Измерение освещённости.
 3. Увеличение скорости электронов.
 4. Преобразование световой энергии в электрическую.
42. Укажите, в каком случае давление света больше: когда он падает на зеркальную поверхность или на чёрную?
1. На зеркальную.
 2. На чёрную.
 3. Давление света не зависит от типа поверхности.
43. Эффект Комптона заключается ...
- 1) в изменении частоты излучения под действием магнитного поля.
 - 2) во вращении плоскости поляризации под действием магнитного поля.
 - 3) в дифракции рентгеновских лучей.
 - 4) в изменении длины волны рентгеновских лучей при рассеянии их электронами.
 - 5) в выбивании электронов световыми квантами.
44. Изменение длины волны в эффекте Комптона зависит от ...
- 1) длины рассеиваемых лучей.
 - 2) материала рассеивающего тела.
 - 3) энергии рассеиваемого излучения.
 - 4) угла рассеяния.

45. При эффекте Комптона выполняется закон...

- 1) сохранения энергии.
- 2) сохранения импульса.
- 3) сохранения момента импульса.
- 4) сохранения импульса и энергии.

Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем!»

- 27.1.** В законе Стефана – Больцмана $R = \sigma T^4$ величина R – это энергетическая светимость абсолютно чёрного тела. Зная абсолютную температуру такого тела в любых интервалах, можно с помощью этой формулы всегда определить R . Определение температуры T по известному значению R не всегда приводит к верным результатам. Результаты подсчета будут хорошими лишь тогда, когда теплообмен через электромагнитное излучение намного превосходит теплопередачу через теплопроводность и конвекцию. При невысоких же температурах теплообмен осуществляется преимущественно через конвекцию, так что оценка температуры с помощью закона излучения Стефана – Больцмана привела бы к неправильным результатам.
- 30.1.** Уравнение Эйнштейна записывается для одного поглощённого кванта. Не каждый квант света, падающий на поверхность, имеет достаточную энергию для выполнения работы выхода и сообщению электрону кинетической энергии. Поэтому говорить об энергии света в целом нельзя.
- 30.2.** В потенциальную энергию системы тело – электроны и в кинетическую энергию электрона.
- 30.3.** Чтобы уменьшить влияние явления термоэлектронной эмиссии (вырывание электронов посредством нагревания), надо охлаждать фотокатод.
- 31.1.** Нужно определить частоту. Масса фотона сможет быть найдена так: $m = h\nu/c^2$.
- 31.2.** Энергия фотонов зависит от их частоты. Если спектр непрерывный, то в нем присутствует набор мало отличающихся друг от друга частот. Наименьшая разность энергий фотонов должна стремиться к нулю.
- 31.3.** Вдоль вектора скорости волны \vec{v} .
- 31.4.** Не противоречит. Свет оказывает давление, а это значит, что фотоны передают свои импульсы поверхности. Расчёт светового давления на основе закона сохранения импульса полностью подтверждается опытами.

КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Квантовая оптика»

№ вопр.	Код ответа								
1	1	10	2	19	4	28	3	37	2,3
2	2	11	3	20	3	29	2,3	38	4
3	2,3	12	4	21	4	30	1	39	5
4	4	13	2	22	3	31	3	40	3
5	3	14	2	23	5	32	4	41	2,4
6	4	15	1	24	3	33	4	42	1
7	2	16	1	25	3	34	1	43	4
8	2	17	4	26	4	35	2	44	4
9	2	18	5	27	3	36	3	45	4

ЧАСТЬ 3. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Глава 6. Элементы квантовой механики

Квантовая механика – это физическая теория явлений и процессов микромира. Под микромиром понимают совокупность объектов, линейные размеры которых порядка $10^{-8} - 10^{-15}$ м. Возникла квантовая механика в связи с развитием экспериментальных исследований по изучению свойств теплового излучения, фотоэффекта, закономерностей атомных спектров.

Квантовая механика устанавливает способ описания и законы движения микрочастиц (атомов, молекул, атомных ядер, элементарных частиц) и их систем (например, кристаллов), а также связь величин, характеризующих частицы и системы, с физическими величинами, непосредственно измеряемыми на опыте. Законы квантовой механики позволили выяснить строение атомов, объяснить периодическую систему элементов, понять строение атомных ядер, изучить свойства элементарных частиц, понять свойства металлов и полупроводников.

На законах квантовой механики основан ряд крупнейших технических достижений двадцатого века. Они лежат в основе работы ядерных реакторов, обуславливают возможность осуществления в земных условиях термоядерных реакций, проявляются в ряде явлений в металлах и полупроводниках, в современных нанотехнологиях. Законы квантовой механики используются при поиске и создании новых материалов: магнитных, полупроводниковых, сверхпроводящих. Таким образом, квантовая механика стала «инженерной» наукой, знание которой необходимо не только физикам-исследователям, но и инженерам.

Изучение квантовой механики имеет свои особенности. Наш мозг привык оперировать наглядными представлениями и образами макроскопического мира. Объекты микромира наглядно представить нельзя. Поэтому изучение таких объектов и связанных с ними явлений осуществляют с помощью логики и математики без создания наглядных образов. Проверить правильность математического описания и законов, описывающих поведение микрообъектов, можно только экспериментально.

§33 Гипотеза де Бройля

Свойства частиц, из которых построены атомные системы, коренным образом отличаются от свойств макроскопических тел. Законы классической механики и классической электродинамики оказались непригодными для описания поведения микрочастиц. Необходимо было пересмотреть представление об электроны в виде механической частицы, характеризуемой определёнными координатами и определённой скоростью.

В процессе изучения природы света выяснилось, что в оптических явлениях наблюдается корпускулярно-волновой дуализм. Интерференция, дифракция и поляризация говорят о волновой природе света, а фотоэффект и эффект Комптона – о корпускулярной.

В 1924 году Луи де Бройль* выдвинул гипотезу о том, что *корпускулярно-волновая двойственность свойств имеет универсальный характер*, т. е. частицы вещества наряду с корпускулярными свойствами имеют также и волновые. Согласно гипотезе де Бройля, движение электрона или какой-либо другой частицы связано с волновым процессом, длина волны которого равна

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \quad (33.1)$$

где h – постоянная Планка, $p = mv$ – импульс частицы.

Если гипотеза справедлива, то должна наблюдаться дифракция микрочастиц.

В 1927 году Дэвиссон* и Джермер* изучали рассеяние электронов на монокристалле никеля. Схема установки представлена на рис. 33.1. В электронной пушке A создавался поток электронов, который направлялся на кристалл никеля B . Скорость электронов определялась ускоряющим напряжением, созданным внутри пушки. Никелевую мишень можно было вращать вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка. Приёмник электронов C вращался вокруг той же оси и регистрировал электроны, рассеянные мишенью по всем направлениям. Если бы электроны вели себя как классические частицы, то они должны были бы отражаться от мишени в соответствии с законами геометрической оптики. Но оказалось, что интенсивность рассеянных электронов различна по разным направлениям – имеются максимумы и минимумы числа электронов, рассеянных под разными углами, то есть наблюдалась дифракция.

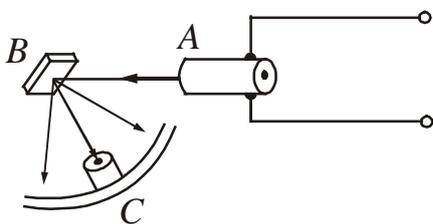


Рисунок 33.1

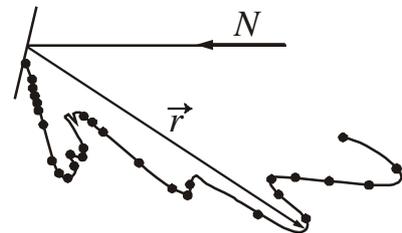


Рисунок 33.2

На рис. 33.2 дана диаграмма рассеяния по направлениям числа электронов, рассеянных мишенью B относительно падающего пучка электронов N . Длина радиус-вектора \vec{r} , проведённого из центра мишени, пропорциональна числу электронов, рассеянных в данном направлении. Видно, что существуют максимумы и минимумы числа электронов, рассеянных под разными углами. Результаты опытов Дэвиссона и Джермера можно объяснить, используя идею де Бройля о волновых свойствах частиц. Зная ускоряющую разность потенциалов $U_{\text{уск}}$, можно рассчитать скорость электронов:

*Де Бройль Луи (1892–1987), французский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии 1929 г.

*Дэвиссон Клинтон Джозеф (1881–1958), американский физик, лауреат Нобелевской премии 1937 г. Джермер Люстер Халберт (1896–1971), американский физик.

$$v = \sqrt{\frac{2eU_{\text{уск}}}{m}},$$

где e – заряд электрона, m – масса электрона.

Затем по формуле (33.1) можно найти соответствующую длину волны де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2emU_{\text{уск}}}}.$$

Если пучок электронов обладает волновыми свойствами, то он должен отражаться от кристалла никеля так же, как и рентгеновское излучение (см. §20, п. 20.2), т. е. должно выполняться условие Вульфа – Брэгга:

$$2d \sin \theta = m\lambda,$$

где d – межплоскостное расстояние, известное из рентгенографических исследований. Подстановка реальных данных (значений d, θ) дала значение длины волны, совпадающее с длиной волны де Бройля.

Волновые свойства электронов также были обнаружены в опытах П. С. Тартаковского* и Дж. П. Томсона*. Была получена дифракционная картина электронного пучка, проходящего через тонкую (толщиной порядка 10^{-7} м) металлическую фольгу. Опыт осуществлялся следующим образом (рис. 33.3). Пучок электронов, ускоренных разностью потенциалов порядка нескольких десятков киловольт, проходил через фольгу и попадал на фотопластинку. Электрон при ударе о фотопластинку оказывает на неё такое же действие, как и фотон. Полученная таким образом электронограмма золота представлена на рис. 33.4.

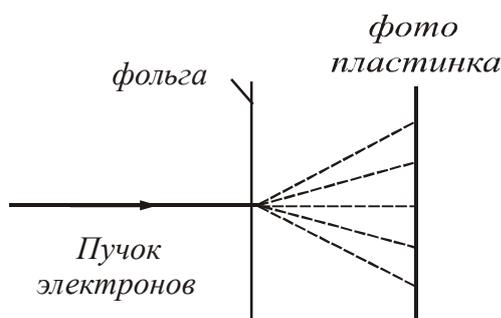


Рисунок 33.3

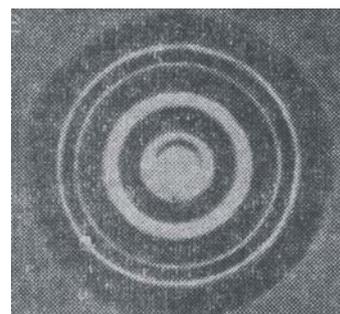


Рисунок 33.4

Пользуясь подобными фотографиями, Томсон проверил формулу де Бройля и определил по формуле Вульфа – Брэгга период кристаллической решётки металла, через который проходили электроны. Результаты совпали с известными ранее данными рентгеноструктурного анализа. Таким образом, идея де Бройля о волновых свойствах частиц получила экспериментальное подтверждение.

*Тартаковский Петр Саввович (1895–1940), российский физик. *Томсон Джордж Паджет (1892–1975), английский физик, лауреат Нобелевской премии 1937 г.

Посмотрите видеоролик.

Доктор Квантум и загадка квантовой физики

<http://youtube.com/watch?v=zGa9dfCRyys>

- **Давайте подумаем!**

33.1. Почему волновая природа материи не проявляется в нашем повседневном опыте?

33.2. На чём основано действие электронного, протонного и ионного микроскопов?

§34 Вероятностный смысл волн де Бройля. Волновая функция

Волны де Бройля, связанные с движущимися частицами вещества, не являются электромагнитными, то есть их распространение не связано с распространением какого-либо электромагнитного поля. Они имеют специфическую квантовую природу, не имеющую аналогии среди волн, изучающихся в классической физике.

Вопрос о природе волн можно сформулировать как вопрос о физическом смысле амплитуды этих волн. Вместо амплитуды A выберем интенсивность волны, пропорциональную квадрату модуля амплитуды $|A|^2$.

Из опытов по дифракции электронов следует, что пучки электронов, отражённых или рассеянных по разным направлениям, распределяются неодинаково: в одних направлениях наблюдается большее число электронов, чем в других. С волновой точки зрения наличие максимума числа электронов в некоторых направлениях означает, что эти направления соответствуют наибольшей интенсивности волн де Бройля, т. е. интенсивность волн де Бройля больше там, где имеется большее число частиц. С точки зрения статистики вероятность попадания электронов в эту точку также больше там, где частиц больше. Следовательно, интенсивность волны в данной точке пространства определяет вероятность попадания электронов в эту точку. Это дает основание говорить о статистическом, вероятностном смысле волн де Бройля. Таким образом, **квадрат модуля амплитуды волн де Бройля определяет вероятность нахождения частицы в данной области пространства в данный момент времени.**

Чтобы описать распределение вероятности нахождения частицы в данный момент времени в некоторой точке пространства, введём функцию $\psi(x, y, z, t)$. Эту функцию называют **волновой** или **пси-функцией**. Интерпретация пси-функции была дана М. Борном* в 1926 году. Определяется она так.

Вероятность dw того, что частица находится в элементе объёма dV , пропорциональна квадрату модуля волновой функции $|\psi|^2$:

$$dw = |\psi|^2 dV = |\psi|^2 dx dy dz. \quad (34.1)$$

*Борн Макс (1882–1970), немецкий физик, лауреат Нобелевской премии 1954 г.

Величина $|\psi|^2$ имеет смысл *плотности вероятности*:

$$\rho_w = \frac{dw}{dV} = |\psi|^2, \quad (34.2)$$

т. е. определяет вероятность пребывания частицы в данной точке пространства. Это означает, что интенсивность волн де Бройля определяется величиной $|\psi|^2$. Поэтому волны де Бройля также называют «волнами вероятности». Сама функция ψ физического смысла не имеет.

Из определения волновой функции следует, что она должна удовлетворять *условию нормировки вероятностей*:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi|^2 dV = 1. \quad (34.3)$$

Это условие означает, что пребывание частицы где-либо в пространстве есть достоверное событие и его вероятность должна быть равна единице. Волновая функция ψ является основной характеристикой состояния микрочастиц. Она должна быть конечной (вероятность не может быть больше единицы), однозначной (вероятность не может быть неоднозначной величиной), непрерывной (вероятность не может меняться скачком).

С помощью волновой функции ψ могут быть вычислены средние значения физических величин, характеризующих микрочастицу.

• **Давайте подумаем!**

- 34.1.** В классической физике интенсивность волны определяется её амплитудой. Существует ли в квантовой физике какая-либо связь между энергией частицы и интенсивностью её волны де Бройля? Можно ли измерить волновую функцию микрочастицы опытным путем?
- 34.2.** Как могут предсказания квантовой механики оправдываться столь точно, если единственная информация о местонахождении электронов носит статистический характер?

§35 Соотношения неопределённостей Гейзенберга

В классической механике в каждой точке траектории частица имеет определённые координаты x, y, z и определённый импульс \vec{p} с проекциями по осям p_x, p_y, p_z . Наличие у микрочастиц волновых свойств вносит ограничение в возможность применять к таким частицам понятия координаты и импульса в их классическом смысле. Поэтому описывать их движение, задавая точное значение координаты и импульса в каждый момент времени, как это делается в классической механике, невозможно. Это означает, что *к квантовой частице нельзя применять понятие траектории*. Однако можно указать с некоторой степенью точности величину той области пространства, в которой частица с по-

давяюще большей вероятностью будет обнаружена, и интервал тех значений импульса, которым она при этом обладает.

Пусть $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ означают интервалы координат (неопределённости значений координат), в которых может находиться частица, описываемая волной де Бройля, $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ – интервалы (неопределённости значений проекций импульса), в которых заключены проекции её импульса по осям координат. Неопределённости значений координаты и проекции импульса на соответствующую ось связаны соотношением:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (35.1)$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – постоянная Планка.

Аналогичные соотношения имеют место для y и p_y , z и p_z :

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (35.2)$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (35.3)$$

Соотношения (35.1), (35.2), (35.3) установлены В. Гейзенбергом* в 1927 году и называются соотношениями неопределённостей Гейзенберга. Они являются математическим выражением одновременного наличия у микрочастиц волновых и корпускулярных свойств.

Пары величин, входящих в соотношения неопределённостей Гейзенберга, называются канонически сопряжёнными. Утверждение о том, что **произведение неопределённостей двух канонически сопряженных величин не может быть по порядку величины меньше постоянной Планка \hbar** , называется принципом неопределённостей Гейзенберга.

Из соотношения неопределённостей вытекает следующее: микрочастица не может иметь одновременно вполне определённые значения координаты x и проекции импульса p_x , то есть, чем точнее для микрочастицы определена одна из величин – координата x или проекция импульса p_x , – тем больше становится неточность в определении другой. Таким образом, в квантовой механике в отличие от классической механики не существует таких состояний, в которых координата и соответствующая проекция импульса частицы имеют одновременно точные значения. Данный факт подтвержден экспериментально.

Невозможность одновременно определить, в пределах ошибки эксперимента координату и соответствующую ей проекцию импульса, не связана с несовершенством измерительных приборов и методов измерения. Это следствие волновых свойств микрочастиц.

*Гейзенберг Вернер Карл (1901–1976), немецкий физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии 1932 г.

Энергия и время также являются канонически сопряжёнными величинами. Для них справедливо соотношение неопределённостей в виде:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (35.4)$$

Это соотношение означает, что если частица некоторое время Δt находится в нестационарном состоянии, то энергия этого состояния может быть определена лишь с некоторой точностью до величины ΔE .

Соотношения неопределённостей указывают, в какой мере можно пользоваться понятиями классической механики, в частности, с какой степенью точности можно говорить о траекториях частиц. Подставив в (35.1) вместо Δp_x произведение $m \Delta v_x$, получим соотношение

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq \hbar/2m.$$

Из него следует, что чем больше масса частицы, тем меньше неопределённости её координаты и скорости и, следовательно, с тем большей точностью применимо понятие траектории.

При определённых условиях движение микрочастицы может приближённо рассматриваться как движение по траектории. Примером является движение электрона в электронно-лучевой трубке (рис. 35.1). След электронного пучка на экране имеет радиус r порядка 10^{-3} см, длина трубки l порядка 10 см. Тогда

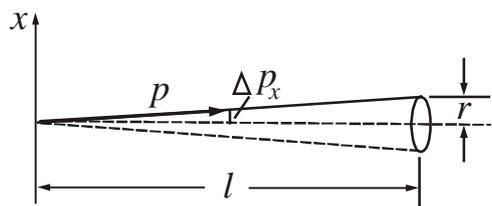


Рисунок 35.1

$\Delta p_x / p_x \sim r/l \sim 10^{-4}$. Импульс электрона связан с ускоряющим напряжением U соотношением

$$\frac{p^2}{2m} = eU.$$

Отсюда $p = \sqrt{2meU}$. При напряжении порядка $U \approx 10^4$ В энергия электрона равна 10^4 эВ. Оценим величину импульса:

$$p = \sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4} \approx 5,4 \cdot 10^{-23} \text{ (кг} \cdot \text{м/с)}.$$

Следовательно, $\Delta p_x \approx 5,4 \cdot 10^{-23} \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-27}$ (кг·м/с).

Согласно соотношению (35.1):

$$\Delta x = \frac{\hbar/2}{\Delta p_x} \approx \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 5,4 \cdot 10^{-27}} \approx 10^{-8} \text{ (м)}.$$

Неопределённость в определении координаты пренебрежимо мала, поэтому движение электрона в электронно-лучевой трубке практически неотличимо от движения по траектории. В то же время для электрона, движущегося в атоме, понятие траектории полностью утрачивает смысл.

Соотношения неопределённостей являются одним из фундаментальных положений квантовой механики. Они позволяют объяснить тот факт, что электрон не падает на ядро атома, а также оценить размеры простейшего атома и минимальную возможную энергию электрона в таком атоме.

- Давайте подумаем!

- 35.1.** Каков смысл соотношения неопределённостей $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$?
- 35.2.** Связана ли невозможность одновременного определения в пределах ошибки эксперимента координаты и соответствующей составляющей импульса с несовершенством приборов методов измерения?
- 35.3.** Существуют ли в природе такие состояния квантовой системы, в которых её кинетическая и потенциальная энергии были бы определены одновременно?

§36 Волновое уравнение Шрёдингера

В классической механике основными уравнениями, описывающими движение, являются законы Ньютона. Они позволяют для макроскопических тел решить основную задачу механики – по заданным силам, действующим на тело (или систему тел), и начальным условиям (начальным значениям координат и скорости) найти для любого момента времени координаты тела и его скорость.

Уравнение движения в квантовой механике должно быть таким, чтобы оно позволяло объяснить наблюдаемые на опыте волновые свойства частиц. Состояние частицы в пространстве в данный момент времени задается волновой функцией $\psi(x, y, z, t)$, точнее величиной $|\psi|^2$ – плотностью вероятности нахождения частицы в точке с координатами x, y, z в момент времени t . Поэтому основное уравнение квантовой механики должно быть уравнением относительно функции $\psi(x, y, z, t)$. Это уравнение должно быть волновым, так как из него получают своё объяснение эксперименты по дифракции частиц.

Основное уравнение квантовой механики было получено в 1926 году Э. Шрёдингером*. Шрёдингер установил своё уравнение, исходя из оптико-механической аналогии. Эта аналогия заключается в сходстве уравнений, описывающих ход световых лучей, с уравнениями, определяющими траектории частиц в аналитической механике. Волновое уравнение Шрёдингера в квантовой механике играет ту же роль, что уравнения Ньютона в классической механике. Его можно было бы назвать уравнением движения квантовой частицы. Задать закон движения частицы в квантовой механике – это значит определить значение ψ -функции в каждый момент времени и в каждой точке пространства.

Подобно уравнениям Ньютона и Максвелла уравнение Шрёдингера явилось с одной стороны обобщением известных опытных данных, с другой стороны, было великим научным предвидением. Его следует рассматривать как исходное основное предположение, справедливость которого доказывается тем, что все вытекающие из него следствия самым точным образом согласуются с опытными фактами.

Мы будем рассматривать уравнение Шрёдингера только для случая, когда пси-функция не зависит от времени, т. е. $\psi = \psi(x, y, z)$. Уравнение Шрёдингера при этом называют уравнением для стационарных состояний.

*Шрёдингер Эрвин (1887–1961), австрийский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии 1933 г.

Оно записывается в следующем виде:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0 \quad (36.1)$$

где Δ – оператор Лапласа (сумма вторых производных волновой функции по координатам)

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2};$$

m – масса частицы;

\hbar – постоянная Планка;

E – полная энергия частицы;

U – потенциальная энергия частицы.

Решив уравнение Шрёдингера, можно найти вид пси-функции для данного состояния и, следовательно, определить вероятность нахождения частицы в разных точках пространства.

Как уже было сказано, пси-функция должна быть однозначной, непрерывной и конечной. Кроме того, она должна иметь непрерывную и конечную производную. Перечисленные требования называются **стандартными условиями**. В теории дифференциальных уравнений доказывается, что уравнение вида (36.1) имеет решение, удовлетворяющее стандартным условиям, лишь при некоторых значениях параметра. В нашем случае этим параметром является полная энергия E частицы. Эти значения полной энергии называются **собственными значениями**. Решения, соответствующие собственным значениям энергии E , называются **собственными функциями** задачи.

Совокупность собственных значений называется **спектром величины**. Если эта совокупность образует дискретную последовательность, то спектр называется **дискретным**. Если собственные значения образуют непрерывную последовательность, то спектр называют **непрерывным** или **сплошным**.

В случае дискретного спектра собственные значения энергии и собственные функции можно пронумеровать:

$$E_1, E_2, E_3, \dots, E_n \quad (36.2)$$

$$\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \dots, \Psi_n \quad (36.3)$$

О величинах, которые могут принимать только дискретные значения, говорят, что они **квантуются**. Таким образом, из основных положений квантовой механики вытекает квантование энергии.

Нахождение собственных значений и собственных функций является сложной математической задачей, поэтому дальше рассмотрим только некоторые частные случаи.

• Давайте подумаем!

36.1. Какую роль играет уравнение Шрёдингера в квантовой механике? Какую дополнительную информацию следует иметь для того, чтобы с помощью этого уравнения определить волновую функцию частицы в любой момент времени?

§37 Частица в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме

Потенциальной ямой называется область пространства, в которой потенциальная энергия U частицы меньше некоторого значения U_{\max} . Если $U_{\max} = \infty$, и максимальная энергия зависит только от координаты x : $U = U(x)$, то получим *бесконечно глубокую одномерную потенциальную яму*.

Пусть движение частицы ограничено непроницаемыми стенками: $x = 0$, $x = l$ (l – ширина ямы). В этом случае потенциальная энергия частицы (рис. 37.1):

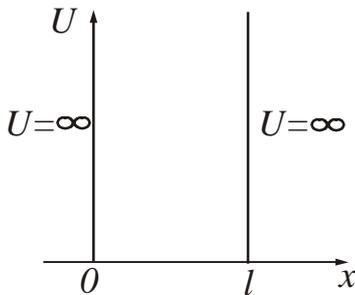


Рисунок 37.1

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & \text{если } x < 0 \\ 0, & \text{если } 0 \leq x \leq l \\ \infty, & \text{если } x > l \end{cases}$$

Пси-функция будет зависеть только от координаты x , поэтому уравнение Шрёдингера примет вид:

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0, \tag{37.1}$$

так как потенциальная энергия внутри ямы $U=0$. Введём обозначение:

$$\frac{2m}{\hbar^2} E = \omega^2. \tag{37.2}$$

Уравнение (37.1) при этом переписется следующим образом:

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \omega^2 \psi = 0. \tag{37.3}$$

Из теории колебаний известно (см. §2, п. 2.2), что решение уравнения (37.3) имеет вид:

$$\psi(x) = A \sin(\omega x + \alpha). \tag{37.4}$$

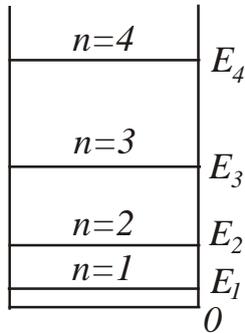
Найдём параметры ω и α . Для этого используем граничные условия. За пределы потенциальной ямы частица попасть не может, поэтому вероятность обнаружить частицу, а, следовательно, и функция ψ за пределами ямы равны нулю. Из условия непрерывности следует, что ψ должна быть равна нулю и на границах ямы, т. е.

$$\psi(0) = \psi(l) = 0. \tag{37.5}$$

Тогда можно записать: $\psi(0) = A \sin \alpha = 0$. Так как $A \neq 0$, то отсюда следует, что $\alpha = 0$ ($\sin 0 = 0$). Далее запишем, что $\psi(l) = A \sin \omega l = 0$.

При этом

$$\omega l = \pm n\pi, \tag{37.6}$$



где $n = 1, 2, 3, \dots$ ($n = 0$ отпадает, так как при этом получается, что $\psi \equiv 0$). Это означает, что частица нигде не находится.

Подставим (37.6) в уравнение (37.2) и найдём собственные значения энергии частицы:

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \tag{37.7}$$

Рисунок 37.2 Спектр энергии оказался дискретным (рис. 37.2).

Заменив ω в уравнении (37.4) по формуле (37.6), получим собственные значения волновой функции:

$$\psi_n(x) = A \sin \frac{n\pi x}{l}. \tag{37.8}$$

Для нахождения коэффициента A используют условие нормировки (см. формулу (34.3)):

$$\int_0^l A^2 \sin^2 \frac{n\pi x}{l} dx = 1. \tag{37.9}$$

Взяв интеграл, получим

$$A = \sqrt{\frac{2}{l}} \tag{37.10}$$

Тогда

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi x}{l} \tag{37.11}$$

Графики собственных функций изображены на рис. 37.3. На рис. 37.4 показана плотность вероятности обнаружения частицы в различных точках ямы, равная $|\psi|^2$. Из графиков следует, что в состоянии, например, с $n = 2$ частица не может быть обнаружена в середине ямы и вместе с

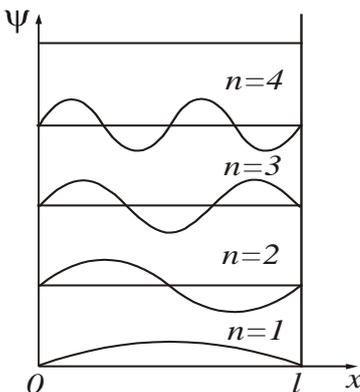


Рисунок 37.3

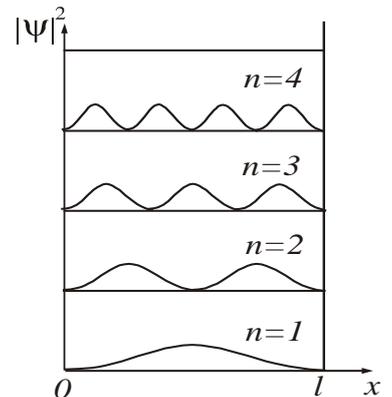


Рисунок 37.4

тем одинаково часто бывает как в левой, так и правой половине ямы. Такое поведение частицы несовместимо с представлением о траекториях, т. к. согласно классическим представлениям все положения частицы в яме равновероятны.

Модель частицы, находящейся в бесконечно глубокой потенциальной яме, применяют для объяснения электропроводности металлов и полупроводников.

- **Давайте подумаем!**

37.1. Какой характер имеет энергетический спектр свободной частицы – непрерывный или дискретный? Что нового по сравнению с классическим даёт квантовое описание свободной частицы?

Глава 7. Физика атомов и молекул

§38 Атом водорода и водородоподобные ионы

Атомом называется наименьшая частица вещества, обладающая всеми свойствами данного химического элемента. В состав атома входят положительно заряженное ядро и электроны, движущиеся в электрическом поле ядра. Заряд ядра по абсолютной величине равен суммарному заряду всех электронов атома. *Ионом* называется электрически заряженная частица, которая образуется при приобретении или потере электронов атомом или молекулой.

Простейшим атомом является атом водорода, состоящий из одного протона в ядре и одного электрона, движущегося в кулоновском электрическом поле ядра. *Водородоподобными* ионами являются ионы, имеющие ядро с зарядом Ze и один электрон. Например, ионы однократно ионизованного гелия – He^+ , двукратно ионизованного лития – Li^{++} , трехкратно ионизованного бериллия – Be^{+++} и т. д.

Единственный электрон водорода и водородоподобных ионов движется в кулоновском поле ядра и обладает потенциальной энергией

$$U(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r}, \quad (38.1)$$

где Z – порядковый номер элемента;

r – расстояние между ядром и электроном.

Уравнение Шрёдингера в этом случае примет вид:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r} \right) \psi = 0, \quad (38.2)$$

где E – полная энергия электрона в атоме.

Оператор Лапласа Δ при решении берут в сферических координатах. Мы не будем решать уравнение Шрёдингера, а только рассмотрим конечные результаты решения уравнения (38.2).

38.1 Квантовые числа

Из решения уравнения Шрёдингера для электрона в атоме вытекает, что волновая функция ψ зависит не только от пространственных координат, но и от целочисленных параметров n, l, m . Эти параметры называются **квантовыми числами**. Охарактеризуем каждое из них.

1. n – главное квантовое число. Принимает значения $1, 2, 3, \dots, n$. Соответствует номеру энергетического уровня.
2. l – орбитальное квантовое число. Принимает значения $0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$, то есть имеет n значений.
3. m – магнитное квантовое число. Принимает значения $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$, то есть имеет $(2l+1)$ значений.

Конкретный набор квантовых чисел определяет конкретный вид волновой функции и, следовательно, форму, размеры и ориентацию электронного облака. Значениями квантовых чисел определяются также основные динамические характеристики: энергия электрона в атоме, момент импульса, магнитный момент, проекции момента импульса и магнитного момента на направление внешнего магнитного поля.

38.2 Квантование энергии

Можно показать, что уравнение (38.2) имеет однозначные и непрерывные решения для электрона, связанного с ядром, при дискретных отрицательных значениях энергии. Эти значения энергии определяются соотношением:

$$E_n = -\frac{Rch}{n^2} Z^2, \quad (38.3)$$

где n – главное квантовое число, $n = 1, 2, 3, \dots$
 $R = 1,09 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга*;
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света;
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ – постоянная Планка.

Подставив значения постоянных и выразив энергию в электрон-вольтах, выражение (38.3) можно свести к виду:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} Z^2. \quad (38.4)$$

*Ридберг Иоганнес Роберт (1854–1919), шведский физик и математик.

Набор дискретных значений энергии E_n образует энергетический спектр атома. Состояние с $n = 1$ называется **основным**, состояния с $n > 1$ называются **возбуждёнными**. В основном состоянии электрон может находиться сколь угодно долго. Важнейшим отличием возбуждённых состояний является конечное время τ жизни электрона в этих состояниях: $\tau \approx 10^{-8}$ с.

В основном состоянии атом обладает минимальной энергией. Чтобы перевести атом из основного состояния в возбуждённое, (т. е. в состояние с большей энергией), ему необходимо сообщить энергию. Энергию можно сообщить одним из следующих способов:

- за счёт теплового соударения (поэтому нагретые тела светятся – атомы излучают, возвращаясь из возбуждённого состояния в основное состояние);
- за счёт столкновения атома с достаточно быстрым электроном;
- за счёт поглощения атомом фотона.

Фотон при поглощении его атомом исчезает, передавая атому всю свою энергию. Атом не может поглотить часть фотона, так как фотон является неделимым. Поглощаются только те фотоны, энергия которых соответствует разности энергий двух уровней.

Энергия возбуждения

$$E_B = E_n - E_1, \quad (38.5)$$

где E_1 – энергия электрона в основном состоянии;
 E_n – энергия электрона в возбуждённом состоянии.

Величина

$$\varphi_B = \frac{E_B}{e} \quad (38.6)$$

называется **потенциалом возбуждения** (e – заряд электрона).

Энергия электрона в атоме – величина отрицательная, поэтому наибольшее значение энергии, которое может иметь электрон $E_{\max} = 0$. При этом n стремится к бесконечности ($n \rightarrow \infty$). Это соответствует ионизации атома, т. е. отрыву от него электрона. **Потенциал ионизации**

$$\varphi_i = \frac{E_i}{e}, \quad (38.7)$$

где $E_i = -E_1$ – энергия ионизации атома.

Среди оптических свойств атома важнейшим является его спектр излучения. Так как любая спектральная линия возникает при переходе электрона с одного энергетического уровня на другой, то оптический спектр атома водорода и водородоподобных ионов является линейчатым. Длины волн спектральных линий описываются обобщенной формулой Бальмера*:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2} \right) Z^2, \quad (38.8)$$

*Бальмер Иоганн Якоб (1825–1893), швейцарский физик и математик.

где n_i – номер энергетического уровня, на который переходит электрон;
 n_k – номер энергетического уровня, с которого переходит электрон.

Спектральные линии принято группировать в спектральные серии. Спектральная серия – это группа линий, соответствующая переходу электронов (при излучении) на один и тот же нижний уровень с фиксированным n_i , с различных верхних.

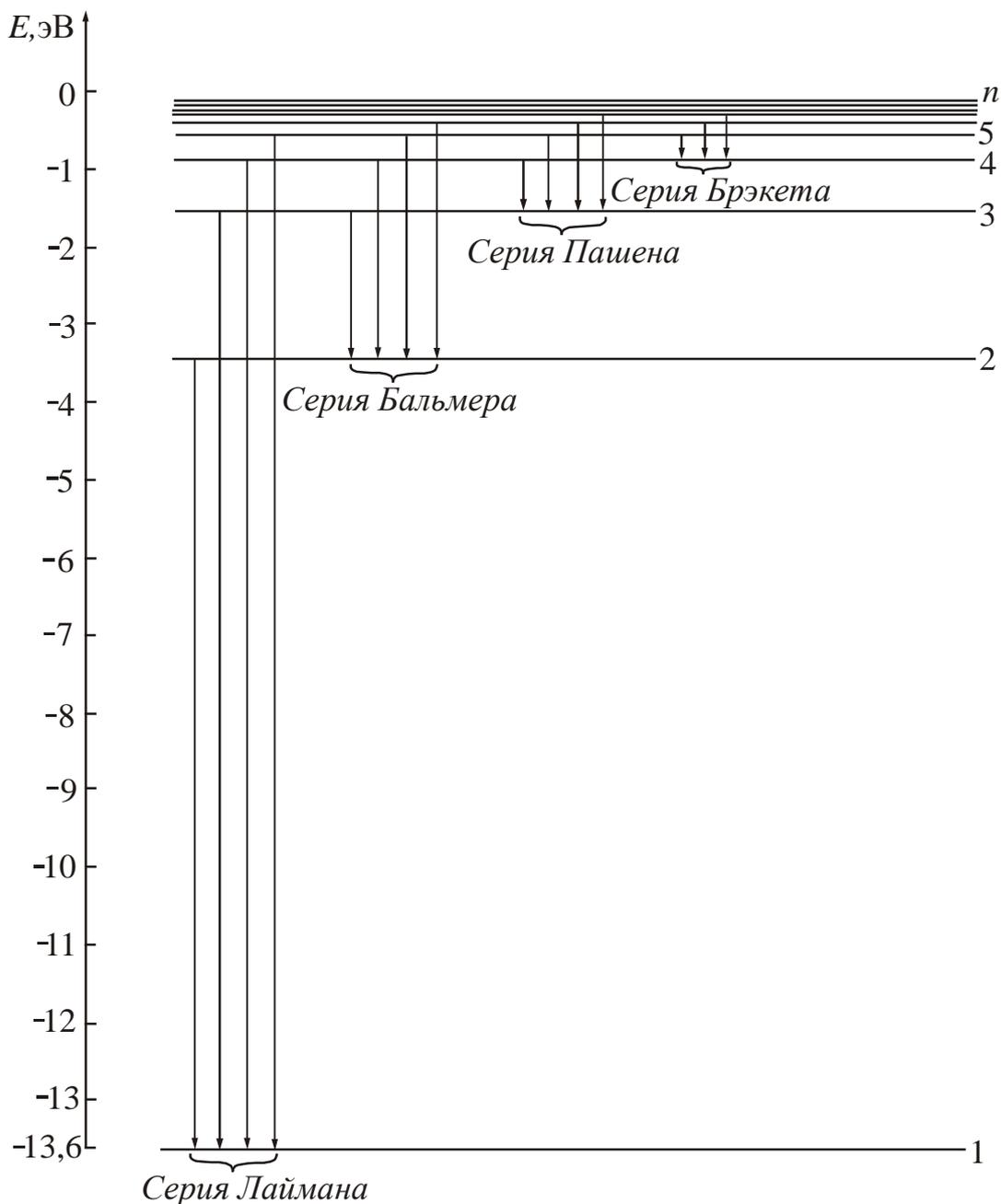


Рисунок 38.1

На рис. 38.1 показана схема уровней энергии атома водорода и его спектральные серии.

Серию с $n_i = 1$ ($n_k=2, 3, 4, \dots$) называют **серией Лаймана***. Линии находятся в области ультрафиолетового излучения.

*Лайман Теодор (1874–1954), американский физик.

Серия с $n_i = 2$ ($n_k = 3, 4, 5, \dots$) носит название *серии Бальмера*. Четыре первые линии этой серии лежат в видимой части спектра и обозначаются через $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$. Остальные линии серии Бальмера находятся в области ультрафиолетового излучения.

Серии с $n_i = 3$ ($n_k = 4, 5, 6, \dots$) – *серия Пашена*,
 $n_i = 4$ ($n_k = 5, 6, 7, \dots$) – *серия Бреккета*,
 $n_i = 5$ ($n_k = 6, 7, 8, \dots$) – *серия Пфунда*.

находятся в инфракрасной части спектра.

38.3 Квантование орбитального момента импульса и магнитного момента

Решение уравнения Шрёдингера даёт ещё один важный результат. Момент импульса электрона в атоме квантуется по формуле:

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)}, \quad (38.9)$$

где l – орбитальное квантовое число. При заданном главном квантовом числе n , орбитальное квантовое число принимает значения $0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$. Состояния электрона, обладающего различными значениями орбитального квантового числа, в атомной физике принято обозначать и называть следующим образом: если $l = 0$, то состояние электрона называется s – состоянием; если $l = 1$, то состояние электрона называется p – состоянием. Состояния с $l = 2, 3$, и т. д. называются соответственно d –, f – и т. д. состояниями, т. е. уже в порядке следования букв латинского алфавита. Значение главного квантового числа указывается перед условным обозначением квантового числа l . Например, электрон с $n = 2$ и $l = 0$ обозначается символом $2s$.

Хотя в квантовой механике представление об орбитах, как и представление о траекториях является неправомерным, момент, обусловленный движением электрона в атоме, называют орбитальным моментом импульса. Движение электрона в атоме эквивалентно некоторому замкнутому контуру с током (*орбитальному току*). Следовательно, кроме орбитального момента импульса электрон обладает орбитальным магнитным моментом.

Отношение орбитального магнитного момента элементарной частицы к её орбитальному моменту импульса называется магнитомеханическим (или гиромангнитным) отношением. Для электрона оно равно

$$\frac{p_m}{L} = -\frac{e}{2m}, \quad (38.10)$$

где e – заряд электрона, m – его масса. Знак « $-$ » указывает на то, что направления моментов противоположны. Из соотношений (38.9) и (38.10) следует, что орбитальный магнитный момент \vec{p}_m также квантуется:

$$p_m = \mu_B \sqrt{l(l+1)}, \quad (38.11)$$

где $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$ – величина, называемая магнетоном Бора*.

Для электрона $\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

38.4 Пространственное квантование

В классической механике считалось, что векторы орбитального момента импульса \vec{L} и магнитного момента \vec{p}_m могут быть ориентированы во внешнем магнитном поле совершенно произвольно. В квантовой механике доказывается, что существует **пространственное квантование**:

Вектор момента импульса электрона имеет лишь такие ориентации в пространстве, при которых проекция L_z вектора \vec{L} на направление Z внешнего магнитного поля принимает квантованные, целочисленные значения, кратные \hbar :

$$L_z = m\hbar, \tag{38.12}$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm l$ – магнитное квантовое число. Магнитное квантовое число может иметь $(2l+1)$ значений. Следовательно, момент импульса \vec{L} может иметь в пространстве $(2l+1)$ ориентаций.

Аналогично справедливо следующее утверждение:

Вектор магнитного момента электрона имеет лишь такие ориентации в пространстве, при которых проекция p_{m_z} вектора \vec{p}_m на направление Z внешнего магнитного поля принимает квантованные, целочисленные значения, кратные μ_B .

$$p_{m_z} = m\mu_B. \tag{38.13}$$

Пример: электрон находится в p – состоянии, при этом $l = 1, m = 0, \pm 1$.

Проекция орбитального момента импульса может иметь следующие значения: $L_z = +\hbar, L_z = 0, L_z = -\hbar$.

Изобразим вектор момента импульса \vec{L} в виде направленных отрезков (рис. 38.2). Такая схема называется **векторной моделью атома**.

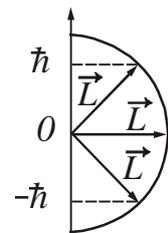


Рисунок 38.2

Аналогично изображают магнитный момент \vec{p}_m . Векторную модель нельзя понимать буквально. Её следует рассматривать как совокупность правил, позволяющих получить результаты, справедливость которых подтверждается строгими квантово-механическими расчётами.

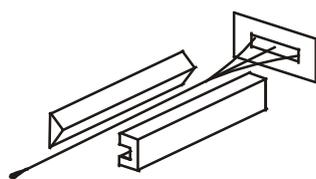


Рисунок 38.3

Экспериментальное определение магнитных моментов атомов было осуществлено Штерном и Герлахом. В их опытах пучок атомов пропусклся через сильное неоднородное магнитное поле, перпендикулярное пучку.

*Бор Нильс Хендрик Давид (1885–1962), датский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии 1922 г.

Неоднородность поля достигалась за счёт специальной формы полюсных сердечников электромагнита (рис. 38.3). На атомы пучка должна действовать сила (см. §54, п. 54.5):

$$F_z = p_m \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha.$$

Величина и знак силы зависят от угла α , образуемого вектором \vec{p}_m с направлением поля. При хаотическом распределении магнитных моментов по направлениям в пучке имеются частицы, у которых значения угла α изменяются в

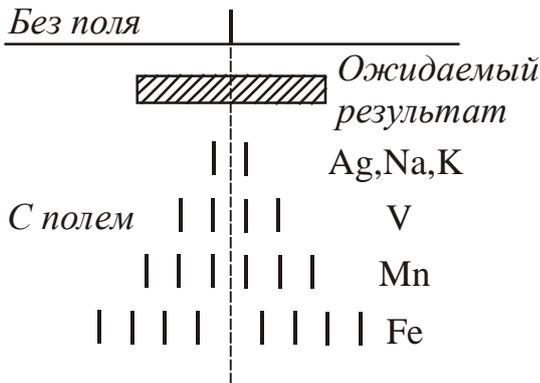


Рисунок 38.4

пределах от 0 до π . При этом можно было ожидать, что узкий пучок атомов после прохождения между полюсами образует на экране сплошной растянутый след. Края следа должны соответствовать атомам, магнитные моменты которых ориентированы под углами $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$. (см. рис. 38.4). Опыты, проведённые с серебром и другими элементами, привели к другому результату. Вместо сплошного растянутого следа на экране наблюдались отдельные линии, расположенные симметрично относительно пучка,

полученного в отсутствие поля. Число возможных проекций зависело от природы атома. Для серебра, алюминия, меди и щелочных металлов оно равно двум, для ванадия, азота – четырем, кислорода – пяти, марганца – шести и т. д. Таким образом, опыты Штерна* и Герлаха* подтвердили пространственное квантование проекций магнитных моментов на направление магнитного поля.

Магнитный момент атома (и его момент импульса) равен сумме моментов электронов, так как магнитные моменты ядер значительно меньше по величине. В свою очередь, магнитные моменты атомов совпадают с суммарными моментами валентных электронов, так как моменты электронов замкнутых оболочек компенсируются.

У элементов первой группы периодической системы имеется один валентный электрон. Следовательно, магнитные моменты и моменты импульса таких атомов совпадают с моментами валентного электрона. Важной особенностью атомов первой группы является то, что валентный электрон в основном состоянии атома имеет орбитальное квантовое число, равное нулю, т. е. электрон находится в s -состоянии. Из формул (38.9) и (38.11) следует, что при $l = 0$ момент импульса электрона L и магнитный момент равны нулю. Поэтому возник вопрос о том, пространственное квантование *какого* магнитного момента и *какого* момента импульса обнаружилось в опытах Штерна и Герлаха? Для объяснения полученного результата нужно было предположить, что у электрона кроме орбитального момента импульса и соответствующего ему магнитного момента имеется **собственный механический момент импульса** и **собственный магнитный момент**.

*Герлах Вольтер (1889–1979), немецкий физик-экспериментатор.

*Штерн Отто (1888–1969), немецкий физик-экспериментатор, лауреат Нобелевской премии 1943 г.

38.5 Спин электрона

В 1925 году С. Гаудсмит* и Дж. Уленбек* на основе анализа спектроскопических данных выдвинули гипотезу о том, что электрон обладает собственным моментом импульса \vec{L}_s и соответствующим ему собственным магнитным моментом \vec{p}_{m_s} . Этот собственный момент импульса был назван **спином**. Слово «спин» (англ. *spin*) означает верчение.

Сначала Гаудсмит и Уленбек предположили, что спин обусловлен вращением электрона вокруг своей оси. Согласно этим представлениям электрон уподоблялся волчку или веретену. Однако такое представление привело к противоречию с теорией относительности. Расчёты показали, что для того, чтобы вращающийся вокруг своей оси шарик-электрон приобрёл магнитный момент, равный одному магнетону Бора, угловая скорость вращения должна быть такой, что соответствующая ей линейная скорость на поверхности сферы в 200 раз превысит скорость света в вакууме. Эти факты заставили отказаться от подобных модельных представлений.

Спин следует считать внутренним свойством, присущим электрону так же, как заряд и масса. Предположение о спине электрона подтверждено большим количеством опытных фактов и считается совершенно доказанным.

Из общих выводов квантовой механики следует, что спин (т. е. собственный момент импульса или спиновый момент) квантуется по закону:

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}, \quad (38.14)$$

где s – спиновое квантовое число, которое для электрона может принимать только одно значение, равное $1/2$.

Проекция спина на заданное направление также квантуется:

$$L_{s_z} = m_s \hbar, \quad (38.15)$$

где для электрона $m_s = \pm s = \pm 1/2$.

Число m_s по аналогии с m можно было бы назвать магнитным спиновым числом. Но такое название редко применяется. Гораздо чаще, говоря о спиновом квантовом числе, понимают под ним число m_s , то есть приписывают спиновому квантовому числу значения $\pm 1/2$. Следует, однако, помнить, что число s имеет только одно значение: $s = 1/2$.

Для собственного магнитного момента электрона \vec{p}_{m_s} выполняются такие соотношения:

$$p_{m_s} = -2\mu_B \sqrt{s(s+1)}. \quad (38.16)$$

Знак « $-$ » указывает на то, что механический \vec{L}_s и магнитный \vec{p}_{m_s} моменты электрона направлены в разные стороны.

*Гаудсмит Сэмюэл Абрахам (1902–1979), американский физик-теоретик.

*Уленбек Джордж Юджин (1900 – 1988), американский физик.

Проекция собственного магнитного момента электрона на заданное направление может принимать следующие значения:

$$p_{m_{sz}} = \mp 2\mu_B m_s = \mp \mu_B. \quad (38.17)$$

Минус получается, если $m_s = +1/2$, плюс – если $m_s = -1/2$.

Таким образом, проекция собственного момента импульса электрона может принимать значения $+\hbar/2$ и $-\hbar/2$, а собственного магнитного момента – значения $+\mu_B$ и $-\mu_B$. В некоторые формулы входят не сами моменты, а их проекции. Поэтому принято говорить, что собственный механический момент (спин) равен $1/2$ (в единицах \hbar), а собственный магнитный момент равен магнетону Бора μ_B .

• Давайте подумаем!

38.1. Бальмер, предлагая свою формулу $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2}\right)Z^2$, указал, что число n_k

не меньше трех. Почему из возможных значений n_k были исключены значения $n_k = 1$ и $n_k = 2$?

38.2. Почему для исследования спиновых эффектов в опыте Штерна и Герлаха используются атомы элементов первой группы периодической системы элементов Менделеева, находящиеся в основном состоянии?

§39 Принцип Паули. Современные атомные системы

39.1 Принцип Паули. Периодическая система элементов Менделеева

В 1925 году В. Паули* установил квантово-механический закон, называемый принципом Паули или принципом запрета Паули. В своей простейшей формулировке он звучит так:

В одном и том же атоме (или в какой-либо другой квантовой системе) не может быть двух электронов, обладающих одинаковым набором четырех квантовых чисел: n, l, m, m_s . Это означает, что в одном и том же состоянии не могут находиться одновременно два электрона.

Максимальное число электронов, находящихся в состояниях, описываемых набором трех квантовых чисел n, l, m и отличающихся только ориентацией спинов электронов

$$N(n, l, m) = 2,$$

так как магнитное спиновое число может принимать только два значения $+1/2$ и $-1/2$.

*Паули Вольфганг (1900–1958), австрийский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии 1945 г.

Максимальное число электронов, находящихся в состояниях, определяемых двумя квантовыми числами n и l :

$$N(n, l) = 2(2l+1).$$

При этом учтено, что вектор \vec{L} при заданном l может принимать $(2l+1)$ ориентаций.

Максимальное число электронов, находящихся в состояниях, определяемых значением главного квантового числа n :

$$N(n) = 2n^2.$$

В 1869 году Д. И. Менделеев* открыл периодический закон изменения химических и физических свойств элементов в зависимости от их атомных масс. Если расположить химические элементы в порядке возрастания их атомных масс, то через промежутки, называемые периодами, элементы, оказавшиеся в одном вертикальном ряду (группе), обнаруживают сходные физико-химические свойства. В настоящее время известно, что элементы в таблице Менделеева расположены не по атомным массам, а в соответствии с их зарядовыми числами Z .

Менделеев ввёл понятие **порядкового номера** элемента. Физический смысл порядкового номера был установлен Резерфордом*: **порядковый номер элемента равен зарядовому числу, которое соответствует общему числу электронов в атоме данного элемента.**

Расположив химические элементы в порядке возрастания их номера, Менделеев получил полную периодичность в изменении химических свойств элементов. При этом часть клеток периодической системы оказалась свободной, так как соответствующие элементы ещё не были известны. Менделееву удалось предсказать ряд новых элементов (галлий, скандий, германий и т.д.). В дальнейшем все эти элементы были открыты.

Таким образом, открытая Менделеевым **периодичность свойств элементов отражает периодичность в расположении электронов в атомах.**

Важнейшей задачей физики явилось теоретическое истолкование периодического закона Менделеева и объяснение строения периодической системы. Современная теория периодической системы основывается на следующих положениях:

а) порядковый номер Z химического элемента соответствует общему числу электронов в атоме данного элемента;

б) состояние электронов в атоме определяется набором четырёх квантовых чисел: n, l, m, m_s .

*Менделеев Дмитрий Иванович (1834–1907), русский химик.

*Резерфорд Эрнест (1871–1937), английский физик, лауреат Нобелевской премии по химии 1908 г.

в) распределение электронов в атомах по энергетическим состояниям должно удовлетворять принципу минимума потенциальной энергии: с возрастанием числа электронов каждый следующий должен занять возможное энергетическое состояние с наименьшей энергией;

г) заполнение электронами энергетических состояний происходит в соответствии с принципом Паули.

Совокупность электронов в атоме с одинаковым значением главного квантового числа n называется электронным слоем (электронной оболочкой). Различают следующие электронные слои:

K -слой, главное квантовое число $n = 1$;

L -слой, главное квантовое число $n = 2$;

M -слой, главное квантовое число $n = 3$;

N -слой, главное квантовое число $n = 4$ и т. д.

Внутри слоя электроны распределяются по подоболочкам (подуровням), каждая из которых соответствует определённому значению орбитального квантового числа l (см. §38, п. 38.3).

У лёгких атомов сначала заполняется оболочка с меньшим n , и лишь затем должна заполняться электронами следующая оболочка. Внутри данной оболочки вначале заполняются состояния с $l = 0$, а затем состояния с большими l , вплоть до $l = (n-1)$.

Начиная с калия ($Z = 19$), начинаются нарушения этого порядка. Объясняется это следующим образом. При больших квантовых числах n взаимодействие между электронами в атоме приводит к тому, что состояния с большим n и меньшим l могут иметь меньшую энергию, чем состояния с меньшим n , но с большим l , т. е. быть энергетически более выгодными. Поэтому имеются химические элементы с недостроенными предыдущими оболочками, у которых застраиваются последующие.

В таблице 39.1 приведены основные сведения о квантовых числах, характеризующих состояние электрона в атоме.

39.2 Современные атомные системы*

К современным объектам изучения атомной физики относятся не только атомы с их сложным строением, но и различные атомные системы с необычной структурой, определяющей их уникальные химические и физические свойства. К таким атомным системам относятся эксимерные молекулы, кластеры, фуллерены, углеродные нанотрубки и другие.

Эксимерные молекулы существуют только в возбуждённом состоянии.

*По материалам книг: Карпенков С.Х. Концепция современного естествознания. Лозовский В.Н., Константинова Г.С., Лозовский С.В. Нанотехнология в электронике. Введение в специальность.

Известно, что атомы инертных газов, как правило, не образуют химических соединений. Исключение составляют фториды криптона и ксенона, а также некоторые их производные, синтезированные в последние десятилетия. Такое свойство инертных газов объясняется тем, что их атомы не имеют электронов вне заполненных оболочек, который мог бы составить пару электрону другого атома с противоположным спином. Наличие подобной пары является необходимым условием образования ковалентной химической связи, обеспечивающей стабильность химического соединения. Если атом инертного газа находится в возбужденном состоянии, то электрон занимает одну из незаполненных оболочек и может составить пару электрону другого атома. Это создает возможность образования молекулы. Такие молекулы называются *эксимерными*.

Эксимерная молекула, потенциальная энергия которой превышает энергию основного состояния, не может существовать долго. Она распадается в течение нескольких наносекунд, излучая световой квант. Несмотря на непродолжительное время жизни, эксимерная молекула имеет все признаки химического соединения. Главная особенность эксимерных молекул состоит в том, что они представляют собой готовую активную среду для создания *эксимерных лазеров* – мощных квантовых генераторов ультрафиолетового излучения.

Кластер (*cluster* (англ.) – пучок) – система из большого числа слабо связанных атомов или молекул. Кластеры занимают промежуточное положение между молекулярным и конденсированным состоянием вещества. Кластеры получают при охлаждении газа в результате его расширения в сверхзвуковом сопле. Возможен и другой способ их получения: при взаимодействии сфокусированного источника энергии (лазерного луча либо пучка заряженных частиц высокой энергии) с веществом, находящимся в конденсированном состоянии, образуется своеобразная среда, содержащая кластеры различных размеров.

Кластеры находят практическое применение в современных нанотехнологиях. При осаждении потока кластеров на подложку можно сформировать элемент электронной схемы, размеры которого составляют десятки нанометров, и получить, например, полупроводниковую зону чрезвычайно малых размеров.

Фуллерены – новая разновидность многоатомных молекул углерода, открытая в результате экспериментального исследования структур кластеров. Фуллерен объединяет 60 (C_{60}) или более атомов углерода (C_{70} и т. д.).

Фуллерен C_{60} (рис. 39.1) построен из 12 пятиугольных и 20 шестиугольных симметрично расположенных граней, образующих форму близкую к шару диаметром порядка 1 нм. Открытие фуллеренов явилось результатом исследований природы межзвездной среды. Ученые воспроизвели условия, в которых находятся пары углерода во внешних слоях особых звезд (красные гиганты), и в результате зафиксировали процесс образования фуллеренов C_{60} . Фуллерены обладают высокой химической активностью и способны образовывать множество новых соединений с необычными свойствами.

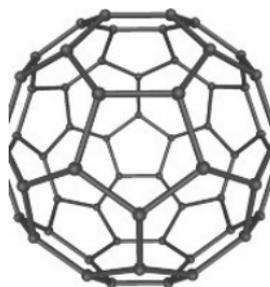


Рисунок 39.1

Легированные атомами щелочных металлов, фуллерены обладают сверхпроводимостью при температуре 18 – 40 К. Использование фуллеренов в качестве присадки к смазочному маслу существенно (до 100 раз) снижает коэффициент трения металлических поверхностей и, соответственно, повышает срок службы деталей. Возможно, фуллерены найдут применение в медицине и фармакологии.



Рисунок 39.2

После обнаружения (1984 – 1985 гг.) фуллеренов начались интенсивные поиски других углеродных наночастиц. В 1991 году были обнаружены трубчатые структуры из атомов углерода – **углеродные нанотрубки** (рис.39.2). Они образуются свёртыванием плоскости решётки графита, состоящей из шестигранных ячеек, в вершинах которой располагаются атомы углерода. Углеродные нанотрубки могут быть одно- и многослойными. Их диаметры изменяются в пределах от 0,4 (однослойные) до 100 нм (многослойные). Длины достигают 100 мкм.

Углеродные нанотрубки обладают необычными электрическими, механическими, магнитными и электронными свойствами. Эти свойства можно модифицировать технологическими воздействиями. Так, нанотрубки с открытыми концами проявляют капиллярный эффект – способность втягивать в себя расплавленные металлы и другие жидкие вещества. Нанотрубки имеют чрезвычайно малый поперечный размер, поэтому с их помощью можно сконцентрировать электрическое поле. Это свойство нанотрубок вместе с высокой прочностью открывает возможность использовать их в качестве материала для зонда сканирующего микроскопа, и тем самым существенно повысить его разрешающую способность. С помощью нанотрубок можно сформировать полупроводниковые переходы нанометровых размеров. В настоящее время научились получать нанотрубки и из других материалов.

Таким образом, рассмотренные атомные системы могут составить основу для синтеза новых перспективных материалов с уникальными физическими и химическими свойствами.

• **Давайте подумаем!**

- 39.1. Почему многоэлектронные атомы имеют электронные оболочки, которые застроены не полностью?
- 39.2. Каким образом проявляется в «жизни» электронной оболочки стремление систем к минимуму потенциальной энергии?
- 39.3. Вследствие взаимодействия ядра атома с электроном последний получает центростремительное ускорение. Но само ядро при этом также должно получить ускорение, направленное к электрону. В атомной физике ядро, однако, считают неподвижным, пренебрегая его ускорением. И это не приводит к сколько-нибудь заметным ошибкам при расчёте атомных процессов. Какой вывод можно сделать отсюда?

Таблица 39.1 Квантовые числа, характеризующие состояние электрона в атоме

Квантовое число и его значение	Величина, которая квантуется	Формула	Примечание
1. Главное квантовое число $n = 1, 2, 3, \dots$ Соответствует номеру энергетического уровня	Энергия	$E_n = -\frac{Rch}{n^2} Z^2 \text{ (Дж)}$ или $E_n = -\frac{13,6}{n^2} Z^2 \text{ (эВ)}$	$R = 1,09 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ – постоянная Планка.
2. Орбитальное квантовое число $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$	1. Орбитальный момент импульса 2. Орбитальный магнитный момент	1. $L = \hbar \sqrt{l(l+1)}$ 2. $p_m = \mu_B \sqrt{l(l+1)}$	$\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ А}\cdot\text{м}^2$ – магнетон Бора
3. Магнитное квантовое число $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$	1. Проекция орбитального момента импульса на направление внешнего магнитного поля 2. Проекция магнитного момента на направление внешнего магнитного поля	1. $L_z = m \hbar$ 2. $p_{m_z} = m \mu_B$	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – постоянная Планка
4. Спиновое квантовое число $s = 1/2$	1. Собственный момент импульса (спин) 2. Собственный магнитный момент	1. $L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}$ 2. $p_{m_s} = -2\mu_B \sqrt{s(s+1)}$	Число s имеет только одно значение: $s=1/2$, поэтому состояние электрона в атоме определяется набором четырех квантовых чисел: n, l, m, m_s . Число m_s чаще называют просто спиновым числом
5. Магнитное спиновое число $m_s = \pm 1/2$	1. Проекция собственного момента импульса 2. Проекция собственного магнитного момента	1. $L_{s_z} = m_s \hbar$ 2. $p_{m_{s_z}} = \mp 2\mu_B m_s = \mp \mu_B$	

§40 Лазеры

Подробное рассмотрение устройства и работы лазеров дается в квантовой электронике. В данном параграфе мы ограничимся только кратким изложением принципов работы лазеров.

40.1 Вынужденное излучение

- Существует два вида переходов атомов между энергетическими уровнями:
- спонтанные (самопроизвольные) переходы с более высоких уровней на более низкие;
 - переходы, происходящие под действием излучения (вынужденные или индуцированные переходы).

Переходы первого вида приводят к *спонтанному* испусканию атомами фотонов. Спонтанное излучение некогерентно. В этом случае атомы источника излучают свет независимо друг от друга. Фазы волн, испускаемых отдельными атомами, их поляризация и направление распространения никак не связаны между собой. Обычные источники света – лампы накаливания, газоразрядные трубки, люминесцентные лампы и др. – излучают некогерентно. В них свечение вызывается либо столкновениями между атомами, совершающими тепловое движение, либо электронными ударами. Испускаемый свет характеризуется большей или меньшей степенью беспорядка.

Вынужденные переходы могут с равной вероятностью происходить как в одном, так и в другом направлении. Переходы с более низких энергетических уровней на более высокие сопровождаются поглощением света атомом. Переходы с более высоких уровней на более низкие сопровождаются излучением света. Соответственно, это излучение называется *вынужденным* или *индуцированным*.

Вынужденное излучение по своим свойствам совершенно одинаково с тем излучением, которое вызывает его появление. Новый фотон, появившийся в результате того, что атом вещества переходит из возбуждённого состояния в основное под действием света, ничем не отличается от фотона, вызвавшего его появление. С точки зрения волновой оптики явление вынужденного излучения сводится к увеличению интенсивности электромагнитной волны, проходящей через вещество. При этом частота волны, направление её распространения, фаза и поляризация волны остаются неизменными. Вынужденное излучение строго когерентно с вызвавшим его проходящим светом. Когерентность состоит в согласованном протекании во времени и пространстве волновых процессов.

Допустим, что на атом падает фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$, где E_1 и E_2 – какие-либо два энергетических уровня атома. Если атом находится на нижнем уровне E_1 , то падающий фотон может поглотиться. Если же атом находится на верхнем уровне E_2 то может произойти вынужденный переход на нижний уровень E_1 с испусканием второго фотона. Вместо одного падающего фотона получается два тождественных фотона.

Рассмотрим теперь не единичный атом, а среду из атомов. Обозначим через N_1 и N_2 числа атомов в единице объёма на уровнях E_1 и E_2 соответственно. Допустим, что в среде распространяется плоская монохроматическая волна. Чтобы при распространении в среде волна усиливалась, необходимо выполнение условия

$$N_2 > N_1, \tag{40.1}$$

где N_1 и N_2 – число атомов на каждом из уровней E_1 и E_2 .

В обычных условиях, когда среда находится в термодинамическом равновесии, $N_2 < N_1$, то есть на каждом верхнем уровне находится меньше атомов, чем на нижнем.

Можно искусственно получить термодинамически неравновесную среду, у которой выполняется соотношение (40.1). Такая среда называется **активной** или **средой с инверсной заселённостью** по отношению к энергетическим уровням E_1 и E_2 . Следовательно, для усиления световой волны необходимо, чтобы

среда, в которой волна распространяется, была активной.

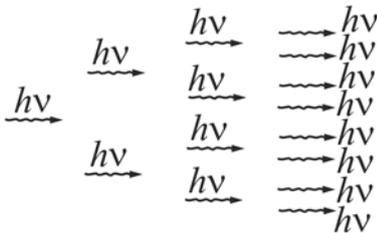


Рисунок 40.1

среда, в которой волна распространяется, была активной. Усиление света в активной среде обычно сравнивают с нарастанием лавины. Новый фотон, появившийся в результате индуцированного излучения, усиливает свет, проходящий через среду. Два фотона, образовавшиеся в одном акте вынужденного излучения, при встрече с двумя атомами, находящимися

в возбуждённом состоянии, переведут их с возбуждённого уровня на более низкий уровень, и в результате этого появится четыре одинаковых фотона и т. д. (рис. 40.1).

Но одновременно с индуцированным излучением происходит поглощение света. Среда будет активной (усиливающей), если процессы вынужденного излучения преобладают над процессами поглощения света. Усиливающая среда называется также средой с отрицательным поглощением света. В такой среде происходит быстрое возрастание интенсивности проходящего света с увеличением толщины усиливающей среды за счёт лавинообразного нарастания числа фотонов (рис. 40.2). Для получения среды с отрицательным поглощением света необходимо создать в среде необычное неравновесное состояние, которое называется инверсным (*inversio (лат.)* – переворачивание). В инверсном состоянии число атомов на возбуждённом уровне больше, чем на нижнем. Такое распределение атомов по уровням является «перевернутым» по сравнению с обычным. Процесс перевода среды в инверсное состояние называется **накачкой** усиливающей среды. Способ осуществления накачки определяется типом лазера.

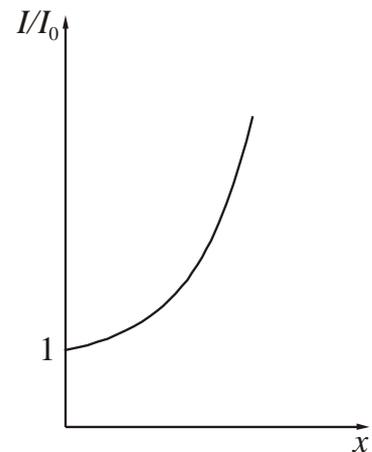


Рисунок 40.2

40.2 Принцип работы лазера

Физической основой работы лазера служит явление вынужденного (индуцированного) излучения. Излучение лазера может быть непрерывным, с постоянной мощностью, или импульсным, достигающим предельно больших пиковых мощностей. Слово «лазер» образовалось из первых букв полного английского названия «Light amplification by stimulated emission of radiation», что в переводе означает: усиление света посредством индуцированного излучения. Первые лазеры (оптические квантовые генераторы) были созданы в 1954 году А. М. Прохоровым* и Н. Г. Басовым* и независимо от них Ч. Таунсом*.



Рисунок 40.3

Чтобы активную среду превратить в генератор световых колебаний, надо осуществить обратную связь. Для этого необходимо, чтобы часть излучённого света все время находилась в зоне активной среды и вызывала вынужденное излучение все новых и новых атомов. Для этого активную среду помещают между двумя параллельными зеркалами. Допустим, например, что оно представляет собой цилиндр, а плоскости зеркал S_1 и S_2 перпендикулярны к оси этого цилиндра (рис. 40.3).

Луч света, претерпевая многократные отражения от зеркал S_1 и S_2 , будет много раз проходить через активную среду, усиливаясь при этом в результате вынужденных переходов атомов с высшего энергетического уровня E_2 на более низкий уровень E_1 . Получается открытый резонатор.

Если зеркала идеальные, то лучи, параллельные оси цилиндра, будут проходить через активную среду туда и обратно неограниченное число раз. Все лучи, идущие наклонно, в конце концов, попадут на боковую стенку цилиндра, где они рассеются или выйдут наружу (рис. 40.4 а). Очевидно, что максимально усилятся лучи, распространяющиеся параллельно оси цилиндра (рис. 40.4 б и 40.4 в). При хороших отражающих поверхностях лазер даёт очень тонкую, практически монохроматическую линию.

В реальном лазере часть света, чтобы её можно было использовать, должна быть выпущена из активной среды наружу. С этой целью одно из зеркал, например S_2 , делается полупрозрачным (рис. 40.4 б).

Для этого необходимо, чтобы часть излучённого света все время находилась в зоне активной среды и вызывала вынужденное излучение все новых и новых атомов. Для этого активную среду помещают между двумя параллельными зеркалами. Допустим, например, что оно представляет собой цилиндр, а плоскости зеркал S_1 и S_2 перпендикулярны к оси этого цилиндра (рис. 40.3).

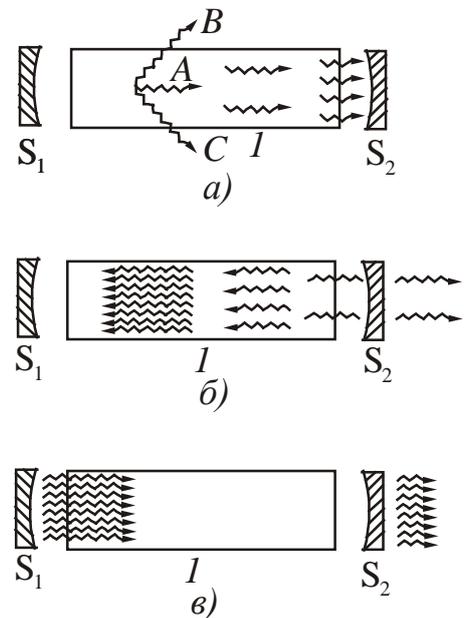


Рисунок 40.4

*Прохоров Александр Михайлович (1916–2002), совет. физик. Нобелевская премия 1964 г.

*Басов Николай Геннадьевич (1922–2001), советский физик. Нобелевская премия 1964 г.

*Таунс Чарльз Хард (1915–2015), американский физик. Нобелевская премия 1964 г.

Кроме того, и зеркало S_1 лишь частично отражает свет, хотя коэффициент отражения его и близок к 100%. Это приводит к ослаблению светового пучка. Чтобы лазер был генератором света, необходимо, чтобы усиление светового пучка в активной среде превосходило некоторое минимальное (пороговое) значение. Поэтому, должно быть выполнено следующее условие. Световой пучок, вышедший от S_1 после прохождения туда и обратно через активную среду и отражения от S_1 , должен вернуться в исходное положение с не меньшей интенсивностью. Иначе в результате последовательного повторения этих процессов интенсивность пучка будет непрерывно убывать, и лазер перестанет генерировать. Поэтому для генерации недостаточно выполнения простого неравенства (40.1). Оно должно быть выполнено с некоторым запасом, т. е. число атомов N_2 на верхнем уровне в единице объёма активной среды должно превышать некоторое минимальное (пороговое) значение.

Наращение интенсивности волны в активной среде не может продолжаться беспрестанно, так как заселённость верхнего энергетического уровня ограничена. По мере обеднения атомами верхнего уровня E_2 скорость нарастания интенсивности волны будет уменьшаться и волна начнет затухать ещё до того, как перестанет выполняться условие (40.1).

40.3 Способы накачки лазеров

Для создания инверсной заселённости среды лазера используются различные механизмы.

В гелий – неоновом лазере усиливающей средой служит плазма высокочастотного газового разряда, полученная в смеси гелия с неоном. Практически накачка осуществляется *по трехуровневой* схеме. На рис. 40.5 изображена упрощённая трехуровневая энергетическая диаграмма такого лазера. Атомы гелия возбуждаются ударами электронов и переходят в возбужденное состояние E_3 . При столкновениях возбуждённых атомов гелия с атомами неона последние также возбуждаются и переходят на один из возбуждённых уровней неона. Переход атомов неона с этого уровня на один из нижних уровней E_2 сопровождается лазерным излучением. Такие лазеры работают в непрерывном режиме.

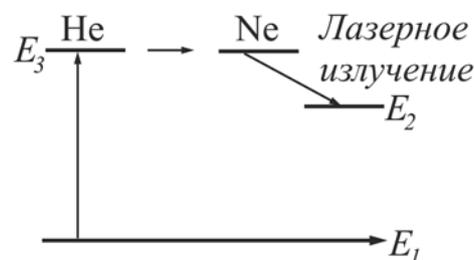


Рисунок 40.5

Следует отметить, что создать инверсию заселённостей атомов с помощью накачки непосредственно с уровня E_1 на уровень E_3 нельзя. Это связано с тем, что если поглощение и вынужденное излучение происходят между двумя уровнями, то оба эти процесса протекают с одинаковой скоростью. Поэтому в данном случае накачка может лишь уравнивать населённости двух уровней, чего недостаточно для возникновения генерации.

В твердотельных лазерах накачка осуществляется за счёт облучения мощными газоразрядными лампами вспышками, сфокусированным солнечным излучением (оптическая накачка) и излучением других лазеров (в частности, полупроводниковых). При этом возможна работа только в импульсном или импульсно-периодическом режиме, так как требуются очень большие плотности

энергии накачки, вызывающие при длительном воздействии сильный разогрев и разрушение стержня рабочего вещества. Примером твердотельного лазера является рубиновый лазер. В нём используется трёх или четырёхуровневая система накачки.

Накачка химических лазеров происходит посредством протекания в их активной среде химических реакций. При этом инверсия заселённостей возникает либо непосредственно у продуктов реакции, либо у специально введённых примесей с подходящей структурой энергетических уровней.

Накачка полупроводников лазеров происходит под действием сильного прямого тока через p - n -переход, а также пучком электронов.

40.4 Применение лазеров

Лазеры широко применяются во многих отраслях науки и техники. С помощью лазера можно осуществить мощное воздействие светового луча на вещество. Это позволяет проводить локальную термическую обработку и связанную с ней механическую обработку (резку, сварку, пайку, гравировку). Точный контроль зоны нагрева позволяет сваривать материалы, которые невозможно сварить обычными способами (например, керамику и металл). Для этого в основном используют газовые лазеры, обладающие высокой средней мощностью.

Лазеры применяют в метрологии и измерительной технике, причём не только для измерения расстояний, но и для измерения времени, давления, температуры, скорости потоков жидкостей и газов, угловой скорости (лазерный гироскоп), концентрации веществ, оптической плотности, разнообразных оптических параметров и характеристик.

Луч лазера можно сфокусировать в точку диаметром порядка микрометра, поэтому его используют в микроэлектронике для резки полупроводниковых кристаллов, сверления особо тонких отверстий в печатных платах. Лазеры используются для получения поверхностных покрытий материалов с целью повышения их износостойкости. При лазерной обработке материалов на них не оказывается механическое воздействие, зона нагрева мала, поэтому возникают лишь незначительные термические деформации.

С помощью лазеров получают голографические объёмные изображения. В медицине лазеры применяются как бескровные скальпели, используются при лечении глазных, кожных и других заболеваний.

Лазеры применяются в быту, например, для воспроизведения аудио- и видеoinформации с компакт-дисков, а также в лазерных принтерах, считывателях штрих-кодов, лазерных указках и т.д.

С использованием лазера удалось измерить расстояние до Луны с точностью до нескольких сантиметров. Лазерная локация космических объектов уточнила значения ряда фундаментальных астрономических постоянных и способствовала уточнению параметров космической навигации, расширила представления о строении атмосферы и поверхности планет Солнечной системы.

Лазеры используются и в военных целях, например, в качестве средств наведения и прицеливания. Рассматриваются варианты создания на основе

мощных лазеров боевых систем защиты воздушного, морского и наземного базирования.

Перспективным является использование лазеров для развития средств связи.

Следует помнить, что любой, даже маломощный **лазер, представляет опасность** для зрения человека. Зафиксировано множество случаев получения ожогов сетчатки глаза, что приводило к временной или полной слепоте.

Сравнение классической и квантовой механики

Классическая механика	Квантовая механика
Объект исследования	
Моделируется объект, имеющий совокупность «точно» установленных характеристик.	Моделируется состояние объекта, которое задаётся вероятностями значений характеристик.
Типы моделирования	
<ul style="list-style-type: none"> – материальное: эксперимент, макеты, опытные образцы технических изделий и др; – идеальное: мысленное представление об изучаемом объекте, оформляемое в условном, символическом виде (математическая запись, чертёж и др.); – вычислительный эксперимент с математической моделью (компьютерное моделирование). 	<ul style="list-style-type: none"> – математическое моделирование; – вычислительный эксперимент с математической моделью (компьютерное моделирование).
Наглядность модели	
Наглядное представление модели объекта существует.	Наглядной модели микрообъекта не существует.
Основное уравнение	
Законы Ньютона, которые позволяют по заданным силам, действующим на тело, и начальным условиям найти для любого момента времени координаты тела и его скорость.	Уравнение Шрёдингера, которое позволяет рассчитать вероятность нахождения микрообъекта в заданном объёме. Нельзя одновременно с одинаковой точностью определить координату и скорость микрообъекта.
Наличие траектории	
Есть понятие траектории.	Понятие траектории отсутствует
Характер изменения величин	
Характеристики объектов меняются непрерывно, могут принимать любые значения.	Величины, характеризующие состояние микрообъекта принимают дискретные значения, т. е. квантуются.

Таким образом, из рассмотрения законов квантовой механики следует вывод, что *статистические, вероятностные законы имеют в природе фундаментальную, приоритетную роль. Закономерности динамического типа носят подчинённый характер. Вероятностное поведение характерно не только для большого коллектива частиц, поведение даже одного микрообъекта имеет вероятностный характер.*

- **Обратите внимание!**
- **Изучив раздел «Элементы квантовой механики», студент должен *ЗНАТЬ*:**

Суть понятий:

Волновая функция (пси-функция). Спектр значений величины: сплошной и непрерывный. Квантование. Потенциальная яма. Атом, ион, водородоподобный ион. Квантовые числа. Оптический спектр атома. Гиромагнитное отношение. Пространственное квантование. Спин.

Гипотезы:

Гипотеза де Бройля.

Законы:

Принцип Паули.

Уравнения:

Соотношение неопределённостей Гейзенберга. Волновое уравнение Шрёдингера.

Формулы:

Формула длины волны де Бройля. Энергия электрона в водородоподобном атоме. Формула Бальмера. Орбитальный момент импульса и магнитный момент электрона. Проекция орбитального момента импульса и магнитного момента электрона. Собственный момент импульса и собственный магнитный момент электрона.

Классические опыты:

Девиссона и Джермера, Тартаковского и Дж. П. Томсона, Штерна и Герлаха.

ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ»

Инструкция. Данный тест предназначен для проверки знаний по теме “*Элементы квантовой механики*”. Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу кодов. Если Вы дали

- 1) 30-27 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
- 2) 23-26 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
- 3) 18-22 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
- 4) меньше 18 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.
Прочитайте его ещё раз.

1. В чём состоит сущность гипотезы де Бройля?

1. Частицы вещества наряду с корпускулярными свойствами имеют также и волновые.
2. Электромагнитное излучение испускается в виде отдельных порций энергии (квантов), величина которых пропорциональна частоте излучения.
3. Излучение оптического диапазона наряду с волновыми свойствами проявляет также и квантовые свойства.

2. Укажите формулу для расчёта длины волны де Бройля.

$$1. \Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad 2. \lambda = \frac{h}{mc} \quad 3. \lambda = \frac{h}{p} \quad 4. \lambda = \frac{d \sin \varphi}{m} \quad 5. \lambda = \frac{2d \sin \theta}{m}$$

3. Укажите явления, в которых проявляется волновая природа электрона.

1. Дифракция электронов.
2. Термоэлектронная эмиссия.
3. Фотоэлектрический эффект.
4. Эффект Комптона.
5. Вторичная эмиссия электронов.

4. Результаты опытов Дэвиссона и Джермера подтверждают ...

- 1) волновые свойства света.
- 2) волновую природу электронов.
- 3) корпускулярные свойства электронов.
- 4) квантовый характер поглощения света.

5. Укажите формулы выражающие соотношение неопределенностей Гейзенберга.

$$1. \Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad 2. \Delta x = t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad 3. \Delta p = p \sin \varphi \quad 4. \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

6. Укажите, какие выводы следуют из соотношения неопределенностей Гейзенберга.

1. Микрочастица не может иметь одновременно вполне определенные значения координаты x и импульса p_x .

2. Чем точнее для микрочастицы определена одна из величин – координата x или импульс p_x , – тем больше становится неточность в определении другой.
 3. Микрочастица может иметь одновременно вполне определенные значения координаты x и импульса p_x .
 4. Микрочастица всегда имеет одновременно вполне точные значения координаты и импульса.
7. Укажите неверное утверждение.
1. В основном состоянии атом может находиться сколь угодно долго.
 2. Все возможные состояния атома – стационарные состояния.
 3. В возбуждённом состоянии атома происходит излучение.
 4. Среднее время жизни возбуждённого состояния атома порядка 10^{-8} с.
8. Для описания поведения микрочастицы не применимы понятия ...
- 1) траектория движения
 - 2) координата
 - 3) энергия микрочастицы
 - 4) ψ -функция
 - 5) функция – $|\psi|^2$.
9. Вероятность нахождения микрообъекта в данной точке пространства определяет ...
- 1) траектория движения.
 - 2) координата.
 - 3) энергия микрочастицы.
 - 4) ψ -функция.
 - 5) функция – $|\Psi|^2 dV$.
10. Укажите правильную запись уравнения Шрёдингера для стационарных состояний.
1. $\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$
 2. $\Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}$
 3. $\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0$
 4. $\xi(x, t) = a \cos(\omega t - k x)$
11. ψ – функция характеризует ...
- 1) значение координаты микрочастицы.
 - 2) значение импульса микрочастицы.
 - 3) состояние микрочастицы в квантовой системе.
12. Квадрат модуля амплитуды волновой функции – $|\psi|^2$ выражает ...
- 1) энергию частицы.
 - 2) вероятность попадания фотона в данную точку пространства.
 - 3) амплитуду волн де Бройля для данной микрочастицы.
 - 4) плотность вероятности нахождения микрообъекта в данной области пространства.
 - 5) вероятность нахождения микрообъекта где-либо в пространстве.
13. Укажите правильную формулу для расчёта условия нормировки волновой функции.
1. $\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi|^2 dV = 1$
 2. $\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + \omega^2 \psi = 0$
 3. $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$

$$4. \Delta x = t_{\alpha,n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}$$

$$5. \frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0$$

14. Укажите правильную запись уравнения Шрёдингера для стационарных состояний атома водорода.

$$1. \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

$$2. \Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}$$

$$3. \frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0$$

$$4. \Delta \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} \right) \Psi = 0$$

15. Энергия стационарного состояния водородоподобного атома с ростом главного квантового числа n ...

- 1) не меняется. 2) $\sim n^2$. 3) $\sim 1/n^2$. 4) $\sim n$.

16. Укажите формулу, по которой рассчитывается полная энергия электрона в атоме водорода на n -м энергетическом уровне.

$$1. E_n = -\frac{Rhc}{n^2} \quad 2. E_n = \frac{mv_n^2}{2} \quad 3. E_n = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad 4. E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2}$$

17. Укажите, какое из следующих утверждений является принципом Паули.

1. Состояние электрона в атоме характеризуется набором четырёх квантовых чисел – n, l, m, m_s .
2. В нормальном (невозбуждённом) состоянии атома электроны должны располагаться на самых низких доступных для них энергетических уровнях.
3. В одном и том же атоме (или в какой-либо другой квантовой системе) не может быть двух электронов, обладающих одинаковой совокупностью четырёх квантовых чисел – n, l, m, m_s .
4. В квантовой системе первоначально заполняются состояния с наименьшей энергией.

18. Укажите, какая из квантующихся физических величин в атоме водорода определяется главным квантовым числом n .

1. Собственный момент импульса L_s .
2. Орбитальный момент импульса L_l .
3. Энергия электрона.
4. Проекция вектора орбитального момента импульса электрона L_{lz} на направление магнитного поля.
5. Проекция вектора собственного момента импульса электрона L_{sz} на направление магнитного поля.

19. Укажите, какая из квантующихся физических величин в атоме водорода определяется орбитальным квантовым числом l .

1. Собственный момент импульса L_s .
2. Орбитальный момент импульса L_l .

3. Энергия электрона.
 4. Проекция вектора орбитального момента импульса электрона L_{lz} на направление магнитного поля.
 5. Проекция вектора собственного момента импульса электрона L_{sz} на направление магнитного поля.
20. Укажите, какая из квантующихся физических величин в атоме водорода определяется магнитным квантовым числом m .
1. Собственный момент импульса L_s .
 2. Орбитальный момент импульса L_l .
 3. Энергия электрона.
 4. Проекция вектора орбитального момента импульса электрона L_{lz} на направление магнитного поля.
 5. Проекция вектора собственного момента импульса электрона L_{sz} на направление магнитного поля.
21. Главное квантовое число $n = 2$. Орбитальное квантовое число при этом может принять значения ...
- 1) $l = 0$ 2) $l = 1$ 3) $l = 2$ 4) $l = 3$ 5) $l = 4$
22. Укажите формулу, по которой определяется орбитальный момент импульса электрона.
1. $L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ 2. $L_{sz} = \hbar m_s$ 3. $L_l = \hbar\sqrt{l(l+1)}$ 4. $L_{lz} = \hbar m$
23. Укажите формулу, по которой определяется проекция вектора орбитального момента импульса электрона на направление магнитного поля.
1. $L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ 2. $L_{sz} = \hbar m_s$ 3. $L_l = \hbar\sqrt{l(l+1)}$ 4. $L_{lz} = \hbar m$
24. Орбитальное квантовое число $l = 2$. Сколько ориентаций в магнитном поле может принимать проекция вектора орбитального момента импульса электрона?
- 1). 0 2). 1 3). 3 4). 4 5). 5 6). 2
25. Орбитальное квантовое число $l = 1$. Магнитное квантовое число m при этом может принять значения ...
- 1) ± 1 2) ± 2 3) ± 3 4) ± 4 5) 0
26. Магнитным спиновым числом m_s в атоме водорода определяется ...
- 1) собственный момент импульса L_s .
 - 2) орбитальный момент импульса L_l .
 - 3) энергия электрона.
 - 4) проекция вектора орбитального момента импульса электрона L_{lz} на направление магнитного поля.
 - 5) проекция вектора собственного момента импульса электрона L_{sz} на направление магнитного поля.
27. Укажите, какие выводы следуют из опытов Штерна и Герлаха.

1. Существует пространственное квантование моментов импульсов электронов и атомов в магнитном поле.
 2. Магнитные моменты электронов и атомов имеют дискретную природу.
 3. Энергия электронов в атоме принимает дискретные значения.
 4. Электрон обладает волновыми свойствами.
28. Укажите формулу, по которой определяется собственный момент импульса (спин) электрона.
1. $L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)}$
 2. $L_{sz} = \hbar m_s$
 3. $L_l = \hbar\sqrt{l(l+1)}$
 4. $L_{lz} = \hbar m$
29. Элементы в таблице Менделеева расположены в соответствии с их ...
- 1) массовым числом.
 - 2) зарядовым числом.
 - 3) главным квантовым числом.
 - 4) магнитным квантовым числом.
30. Атом какого элемента таблицы Менделеева имеет электронную формулу $1s^2s^1$?
1. Водород
 2. Гелий
 3. Литий
 4. Натрий

Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем!»

33.1. Рассчитаем для примера длину волн, связанную с футбольным мячом массой 1 кг, движущимся со скоростью 10 м/с. По формуле де Бройля получаем: $\lambda = \frac{h}{mv} \approx 7 \cdot 10^{-27}$ см. Обна-

ружить волны столь малой длины невозможно никакими средствами. Для электрона же длина волны может быть порядка 0,1 нм, так что, падая на решётку кристалла с периодом несколько большим, он даст вполне различимую для человеческого глаза дифракционную картину.

33.2. Принцип действия электронного, протонного и ионного микроскопов заключается в использовании волновых свойств частиц для исследования материальных объектов.

34.1. Нет. Интенсивность волн де Бройля определяет не энергию частицы, а распределение вероятности пребывания частицы в разных областях пространства. Волновую функцию опытным путём измерять нельзя, потому что она не описывает распространения колебаний реальных физических величин, которые бы действовали на измерительный прибор.

34.2. Существует коренная разница в понимании статистического характера тех или иных величин. Если частицы обладают только корпускулярными свойствами, а волновые не проявляются, то статистический характер математической обработки их поведения указывает просто на неполноту наших знаний и на необходимость усреднения искомых величин. Например, в молекулярно-кинетической теории система уравнений движения Ньютона для молекул не применяется не потому, что она неправильна, а потому, что ее невозможно применить к очень большому количеству частиц. Микрочастицы наряду с корпускулярными свойствами проявляют и волновые. Здесь статистический смысл волновой функции, точно описывающей поведение микрочастиц, отражает не недостаточность наших знаний о них, а саму вероятностную сущность микроявлений. Поэтому предсказания квантовой механики выполняются с высокой точностью.

35.1. Если частица некоторое время Δt находится в нестационарном состоянии, то энергия этого состояния может быть определена лишь с некоторой точностью до величины ΔE .

35.2. Невозможность одновременного определения в пределах ошибки эксперимента координаты и соответствующей составляющей импульса не связана с несовершенством приборов или методов измерения. Это следствие волновых свойств микрочастиц.

35.3. Нет. Кинетическая энергия зависит от скорости (импульса), а потенциальная – от координаты. В результате действия соотношения неопределённостей кинетическая и потенциальная энергии не могут быть определены одновременно.

36.1. Уравнение Шрёдингера в квантовой механике играет ту же роль, что и уравнения Ньютона в классической. Его можно было бы назвать уравнением движения квантовой частицы. Для того, чтобы определить с помощью этого уравнения волновую функцию в любой момент времени, следует знать её значение в начальный момент.

37.1. Свободная частица имеет непрерывный спектр – энергия частицы не квантуется, потому что нет никаких ограничений на неё в виде граничных условий. По сравнению с классическим описанием здесь сказывается согласование с принципом неопределённостей для координат и проекций импульсов.

38.1. Бальмер наблюдал видимую часть спектра атома водорода. Для серии Бальмера $n_i = 2$. Значению $n_k = 1$ соответствовало бы отрицательное значение длины волны, а значению $n_k = 2$ соответствовала бы нулевая длина волны. И то и другое лишено физического смысла.

38.2. Атомы элементов первой группы периодической системы имеют один валентный электрон, поэтому можно выделить вклад отдельного электрона (для двух электронов спины могут быть скомпенсированы). Эти атомы должны быть в основном состоянии, потому что орбитальный момент импульса валентного электрона в основном состоянии равен нулю. Следовательно, можно наблюдать пространственное квантование собственного механического момента импульса (спина) и собственного магнитного момента.

39.1. При больших квантовых числах n взаимодействие между электронами в атоме приводит к тому, что состояния с большим n и меньшим l могут иметь меньшую энергию, чем состояния с меньшим n , но с большим l , т. е. быть энергетически более выгодными. Поэтому имеются химические элементы с недостроенными предыдущими оболочками, у которых застраиваются последующие.

39.2. При испускании фотона возбуждённым атомом потенциальная энергия атома уменьшается.

39.3. Масса ядра несравнимо больше массы электрона.

КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Элементы квантовой механики»

№ вопр.	Код ответа								
1	1	7	2	13	1	19	2	25	1,5
2	3	8	1,2	14	4	20	4	26	5
3	1	9	5	15	3	21	1,2	27	1,2
4	2	10	3	16	1	22	3	28	1
5	1,4	11	3	17	3	23	4	29	2
6	1.2	12	4	18	3	24	5	30	3

ЧАСТЬ 4. ОСНОВЫ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА

Физика твёрдого тела, как наука, родилась в начале 20-го века в связи с развитием атомной физики. Она занимается главным образом изучением физических свойств и структуры кристаллических твёрдых тел и поведением электронов в этих телах.

Развитие физики твёрдого тела во многом стимулируется потребностями техники, так как она является основой современной электроники. Физике твёрдого тела принадлежит ведущая роль в исследовании возможностей получения материалов с совершенно новыми, уникальными свойствами в отношении механической прочности, теплостойкости, электрических, магнитных и оптических характеристик.

Одним из направлений этого развития является разработка методов получения надежных и миниатюрных полупроводниковых устройств.

Физические идеи, рождающиеся в физике твёрдого тела, используются не только в физике вообще, но и других областях науки.

Глава 8. Электропроводность металлов и полупроводников

§41 Строение твёрдых тел

Твёрдыми называются тела, которые обладают постоянством формы и объёма. Различают кристаллические и аморфные тела.

Кристаллическое строение имеет подавляющее большинство твёрдых тел в природе. Характерной чертой, отличающей кристаллическое состояние от жидкого и газообразного, является наличие у кристаллов анизотропии*.

Причиной анизотропии кристаллов служит упорядоченное расположение частиц (атомов, молекул), из которых они построены. Упорядоченное расположение частиц проявляется в правильной внешней огранке кристаллов. Кристаллы ограничены плоскими гранями, пересекающимися под некоторыми, определёнными для данного рода кристаллов, углами. Раскалывание кристаллов легче происходит по определённым плоскостям, которые называются плоскостями спайности.

Правильность геометрической формы и анизотропия кристаллов обычно не проявляются по той причине, что кристаллические тела встречаются, как правило, в виде *поликристаллов*, то есть в виде множества сросшихся между собой, беспорядочно ориентированных мелких кристаллов. В поликристаллах анизотропия наблюдается только в пределах каждого отдельно взятого кристаллика. Тело же в целом вследствие беспорядочной ориентации кристалликов анизотропии не обнаруживает. Создав специальные условия кристаллизации из расплава или раствора, можно получить большие одиночные кристаллы – *монокристаллы* любого вещества. Монокристаллы некоторых минералов встречаются в природе в естественном состоянии.

*Анизотропия—зависимость ряда физических свойств (механических, тепловых, электрических, оптических) от направления.

Аморфные тела (стекло, вар и др.) представляют собой переохлаждённые жидкости и не обладают чётко выраженными свойствами кристаллов, т. е. являются изотропными.

41.1 Дефекты в кристаллах

В данной части курса мы будем рассматривать кристаллические вещества. Неограниченный кристалл, построенный из ядер и электронов, находящихся при температуре абсолютного нуля в самом низком возможном энергетическом состоянии, является абсолютно упорядоченным, математически идеальным. Всякое отклонение от этого однозначно заданного идеального состояния называют **дефектом**. Всё неограниченное множество дефектов можно условно поделить на макродефекты и микродефекты. Макроскопическим нарушением структуры решётки являются границы кристалла, трещины, поры, инородные включения, царапины и т. д. Микродефектами являются инородные атомы, отдельные атомы, занимающие нерегулярные положения в решётке: домены (области спонтанной электризации или намагничивания), а также всевозможные элементарные возбуждения в кристалле. Микродефекты делят на точечные и линейные.

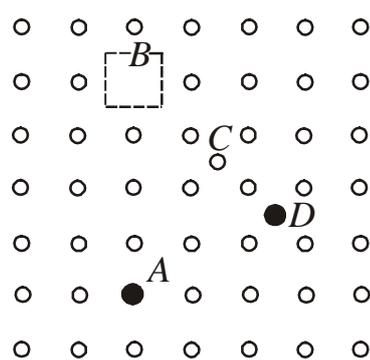


Рисунок 41.1

Точечный дефект – это нарушение кристаллической структуры, размеры которого во всех трёх измерениях сравнимы с одним или несколькими (немногими) междуатомными расстояниями. Простейшие точечные дефекты кристалла (см. рис. 41.1): **вакансии** – отсутствие атома или иона в узле решётки (пустой квадрат, обозначенный буквой *B*); **внедрённые атомы** – атомы (свои или чужие), располагающиеся на незаконном месте между узлами решётки (*C* и *D*); **атомы замещения** – атомы (*A*), замещающие атомы основного вещества в узлах решётки (атомы примеси).

Атомы примеси присутствуют в кристалле всегда. Проблема синтеза кристаллов с заданными свойствами зависит в основном от чистоты исходных материалов и от создания таких условий выращивания кристалла, при которых невозможно его загрязнение примесями из окружающей среды. В то же время, вводя примеси, можно по желанию изменять свойства кристалла. Введение нужной примеси в этом случае строго контролируется.

Линейный дефект это нарушение правильности структуры вдоль линии (не обязательно прямой). Поперечные размеры линейного дефекта не превышают одного или нескольких междуатомных расстояний, а длина может достигать размеров кристалла. Устойчивыми, стабильными в кристалле являются **дислокации**. Дислокации нарушают правильное чередование кристаллических плоскостей.

Реальный кристалл обладает всеми перечисленными дефектами и его свойства в связи с этим должны существенно отличаться от свойств идеализированных кристаллов. Дефекты структуры оказывают сильное влияние (как по-

ложительное, так и отрицательное) на многие свойства твёрдых тел. К ним относятся прочность, электропроводность, оптические свойства и т. д. Эти свойства получили название структурно чувствительных. Другая группа свойств – плотность, модули упругости, удельная теплоёмкость, диэлектрическая проницаемость и др. – слабо зависит от несовершенства структуры. Их называют структурно нечувствительными (независимыми) свойствами.

41.2 Энергетические зоны в кристаллах

Рассмотрим воображаемый процесс объединения атомов в кристалл. Пусть первоначально имеется N изолированных атомов какого-либо вещества. Пока атомы изолированы друг от друга, они имеют полностью совпадающие схемы энергетических уровней (рис. 41.2, правая часть). Заполнение уровней электронами осуществляется в каждом атоме независимо от заполнения аналогичных уровней в других атомах. По мере сближения атомов между ними возникает всё усиливающееся взаимодействие, которое приводит к изменению положения уровней. Вместо одного одинакового для всех N атомов уровня возникает N очень близко расположенных энергетических уровней, образующих зону.

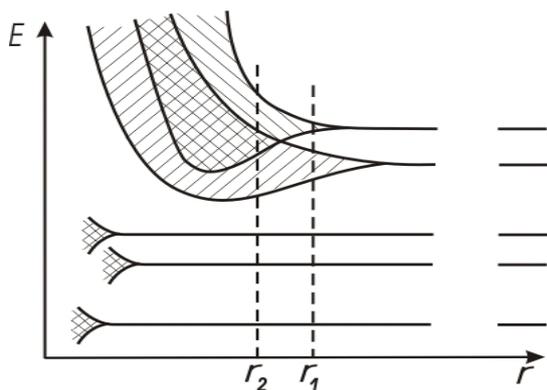


Рисунок 41.2

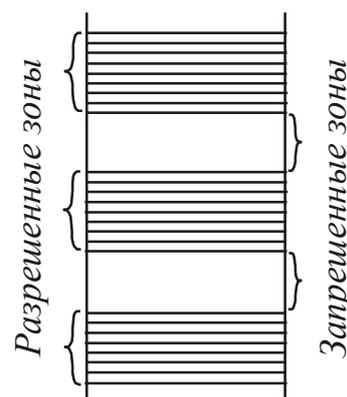


Рисунок 41.3

Энергетическая зона – это область допустимых значений энергии электронов в кристалле, состоящая из большого, но конечного числа очень близко расположенных уровней энергии. Соседние энергетические уровни в зоне отстоят друг от друга приблизительно на 10^{-22} эВ. Величина расщепления для разных уровней не одинакова. Сильнее расщепляются уровни, заполненные в атоме внешними электронами. Уровни, заполненные внутренними электронами, расщепляются мало. На рис. 41.2 (левая часть) показано расщепление уровней в зависимости от расстояния r между атомами. Видно, что возникающее в кристалле расщепление уровней, занятых внутренними электронами, очень мало. Заметно расщепляются лишь уровни, занимаемые валентными электронами. Такому же расщеплению подвергаются и более высокие уровни, не занятые электронами в основном состоянии атома.

Расщепление уровней зависит от конкретных свойств атомов. Если равновесие между соседними атомами наступает при расстоянии r_1 (см. рис. 41.2), то между разрешёнными зонами образуются запрещённые зоны (рис. 41.3).

Запрещённая зона – это интервал значений энергии, которые электроны принимать не могут.

Если равновесие между соседними атомами наступает при расстоянии r_2 (см. рис. 41.2), то соседние уровни перекрываются. Число уровней в такой слившейся зоне равно сумме уровней, на которые расщепляются уровни отдельных атомов.

Разрешённые энергетические зоны в кристаллах могут быть по-разному заполнены электронами. Как правило, энергетические зоны внутренних оболочек заполнены полностью, поэтому электрические свойства твёрдых тел объяс-

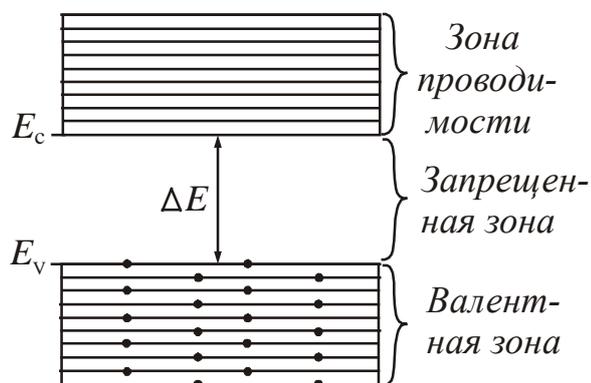


Рисунок 41.4

няются различным заполнением двух

верхних разрешённых зон и шириной запрещённой зоны. Энергетическая зона, заполненная валентными электронами, называется **валентной** (рис. 41.4). Ближайшая к ней энергетическая зона, не заполненная электронами, называется **зоной проводимости**. Между валентной зоной и зоной проводимости находится запрещённая зона.

ΔE – ширина запрещённой зоны:

$\Delta E = E_c - E_v$; где E_c – дно зоны проводимости, E_v – потолок валентной зоны.

Электроны в твёрдых телах могут переходить из одной разрешённой зоны в другую. Для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости необходимо затратить энергию, равную ширине запрещённой зоны, расположенной между ними (энергию порядка нескольких эВ). Для внутризонных переходов достаточно сообщить энергию порядка 10^{-22} эВ. Например, электроны в металле приобретают эту энергию под действием электрического поля при обычных разностях потенциалов. Тепловым электронам можно сообщить различную энергию, достаточную как для внутризонных, так и для межзонных переходов.

Существование энергетических зон позволяет объяснить с единой точки зрения деление твёрдых тел на проводники, полупроводники и диэлектрики (изоляторы). В зависимости от степени заполнения валентной зоны электронами и ширины запрещённой зоны возможны три случая, изображённые на рис. 41.5.

На рисунке 41.5 а) электроны заполняют валентную зону не полностью. Поэтому достаточно сообщить электронам, находящимся на верхних уровнях, совсем небольшую энергию ($\sim 10^{-22}$ эВ) для того, чтобы перевести их на более высокие уровни. Энергия теплового движения составляет при 1 К величину порядка 10^{-4} эВ, а при комнатных температурах – 0,026 эВ. Следовательно, при температурах, отличных от абсолютного нуля, часть электронов переводится на более высокие уровни. Дополнительная энергия, вызванная действием на электрон электрического поля, также оказывается достаточной для перевода элект-

трона на более высокие уровни. Таким образом, кристалл с подобной схемой энергетических уровней будет представлять собой проводник (металл).

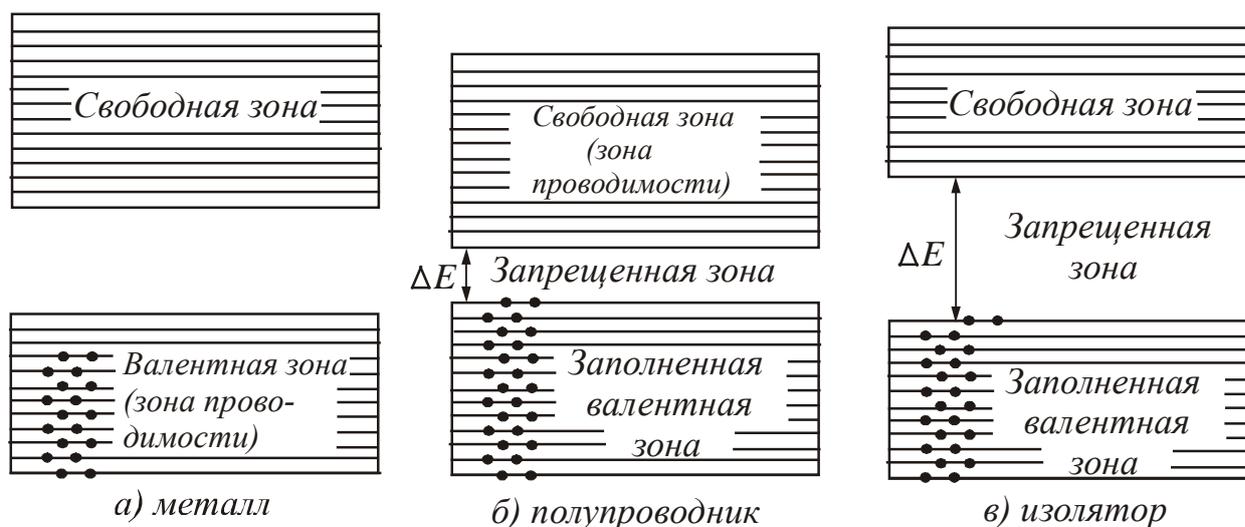


Рисунок 41.5

На рисунках 41.5 б) и 41.5 в) уровни валентной зоны при $T=0$ К полностью заняты электронами – зона заполнена. Для того, чтобы увеличить энергию электрона, необходимо сообщить ему количество энергии не меньше, чем ширина ΔE запрещённой зоны. Электрическое поле сообщить электрону такую энергию не в состоянии. При этих условиях, электрические свойства кристалла определяются шириной ΔE запрещённой зоны. Если она невелика ($\Delta E < 3$ эВ), то энергия теплового движения атомов решётки оказывается достаточной для того, чтобы перевести часть электронов в свободную верхнюю зону. Эти электроны будут находиться в условиях, аналогичных тем, в которых находятся валентные электроны в металле. Свободная зона окажется для них зоной проводимости. В оставленном электроном месте возникает избыток положительного заряда – «дырка».

Дырка – это квазичастица, которой приписывают единичный положительный заряд. Она возникает при нарушении ковалентных связей в атоме кристалла полупроводника, когда какой-либо валентный электрон одного из атомов покидает своё место. Вещество с таким типом проводимости является полупроводником.

Если ширина запрещённой зоны велика ($\Delta E > 3$ эВ), тепловое движение не сможет забросить в свободную зону заметное число электронов. В этом случае кристалл оказывается диэлектриком (изолятором). Следует отметить, что различие между полупроводниками и диэлектриками является количественным и связано оно только с различиями в ширине запрещенной зоны. При $T = 0$ полупроводник не проводит ток, т. е. является диэлектриком. Это объясняется тем, что все валентные электроны связаны с атомами.

- Давайте подумаем!

41.1. В чём заключается разница между кристаллическими и аморфными телами?

41.2. В чём заключается содержание понятий «дальний» и «ближний» порядок в расположении атомов? Какой из этих порядков имеет место в кристаллах, жидкостях и аморфных телах?

41.3. В чём заключается разница между монокристаллом и поликристаллом?

41.4. Что называется дефектами кристаллических решёток? Какие типы точечных дефектов вам известны? Как влияют эти дефекты на электрические свойства кристаллов?

§42 Электрические свойства твёрдых тел

42.1 Общие сведения

Все твёрдые тела по их способности пропускать электрический ток делят на проводники, полупроводники и диэлектрики. Типичными проводниками являются металлы, типичными диэлектриками – ионные кристаллы. Полупроводники – это широкий класс веществ с ковалентным типом связи.

Способность вещества проводить электрический ток характеризуется удельной проводимостью σ или удельным сопротивлением ρ (см. т. 1, гл. «Постоянный электрический ток»).

Ещё раз подчеркнём, что сопротивление проводника – это свойство проводника, зависящее от его материала, формы и размеров, а удельное электрическое сопротивление является свойством только вещества.

Удельное сопротивление связано с удельной проводимостью соотношением:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \quad (42.1)$$

Приблизительные интервалы значений удельного сопротивления ρ , которые имеют металлы, полупроводники и диэлектрики, представлены на рис. 42.1.

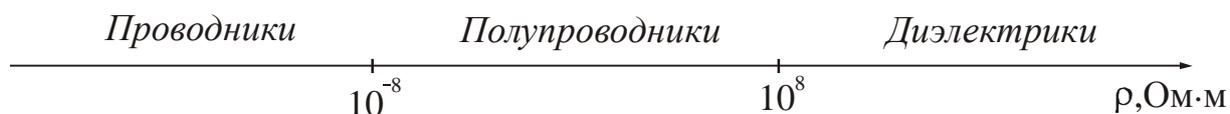


Рисунок 42.1

Величина удельного сопротивления и удельной проводимости зависит также от температуры, при которой находится вещество. Изменение сопротивления вещества с изменением температуры характеризуют температурным коэффициентом сопротивления. Напомним, что температурный коэффициент сопротивления – это величина, численно равная относительному изменению сопротивления проводника при изменении его температуры на 1 градус:

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}. \quad (42.2)$$

Электрический ток возникает под действием внешнего электрического поля, поэтому электрические свойства описывают графиком зависимости силы тока от приложенного напряжения $i = f(U)$. Такой график называют **вольт-амперной характеристикой** (ВАХ).

Так как электрический ток может быть распределён по поверхности, через которую он течёт, неравномерно, то более детально ток характеризуют с помощью вектора плотности тока \vec{j} . Значение плотности тока зависит от величины напряжённости \vec{E} электрического поля в данной точке. Зависимость $j = f(E)$ также называется вольтамперной характеристикой.

42.2 Электропроводность металлов

Квантово-механические расчёты показывают, что в случае идеальной кристаллической решётки электроны проводимости не испытывали бы при своём движении никакого сопротивления и электропроводность металлов была бы бесконечно большой. Однако кристаллическая решётка никогда не бывает идеальной. Нарушения строгой периодичности решётки бывают обусловлены наличием примесей или вакансий, дислокаций, а также тепловыми колебаниями решётки. В отличие от молекул газа электроны в металле сталкиваются не между собой, а с ионами, образующими кристаллическую решётку. Именно этими соударениями свободных электронов с ионами обусловлено электрическое сопротивление металлов. Чем чище металл и чем ниже температура, тем меньше это сопротивление.

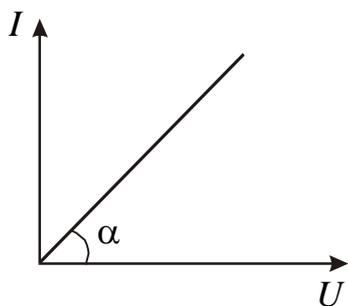


Рисунок 42.2

У металлов зависимость силы тока от приложенного напряжения описывается законом Ома и представляет собой прямую линию (рис. 42.2). Такую же зависимость имеет зависимость плотности тока от напряжённости электрического поля (см. т. 1, гл. «Постоянный электрический ток»).

Для большинства металлов при температурах, близких к комнатной, удельное сопротивление линейно меняется с температурой:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (42.3)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при 0°C , t — температура (в $^\circ\text{C}$), α — температурный коэффициент сопротивления. Для чистых металлов в твёрдом состоянии $\alpha \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$.

Зависимость электрического сопротивления от температуры положена в основу работы термометров сопротивления. Такой термометр представляет собой металлическую проволоку (обычно платиновую), намотанную на фарфоровый или слюдяной каркас. Проградуированный по постоянным температурным точкам термометр сопротивления позволяет измерять с точностью порядка нескольких сотых ($\sim 0,05^\circ\text{C}$) градуса как низкие, так и высокие (до 600°C) температуры. В последнее время всё большее применение находят термометры сопротивления из полупроводников.

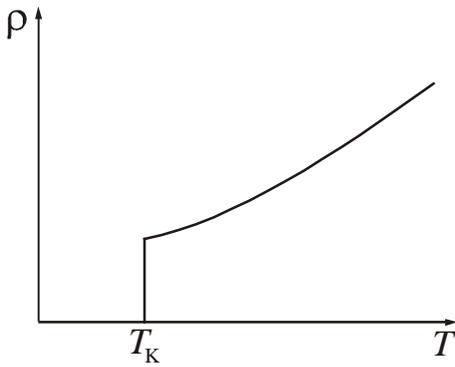


Рисунок 42.3

В 1911 г. Камерлинг-Оннес*, исследуя электрическое сопротивление металлов, обнаружил, что при охлаждении ртути до температуры жидкого гелия (4,2 К) её электрическое сопротивление скачком уменьшается до нуля (рис. 42.3). Это явление называется **сверхпроводимостью**. Температура T_K , при охлаждении до которой совершается переход в сверхпроводящее состояние, называется **температурой сверхпроводящего перехода**.

В дальнейшем были обнаружены и другие материалы, способные переходить в сверхпроводящее состояние (тантал, свинец, ниобий, а также сплавы: галлид ниобия Nb_3Ga , галлид ванадия V_3Ga и др.). Эти материалы получили название **сверхпроводников**. По мере синтеза новых материалов температура перехода в сверхпроводящее состояние неуклонно повышалась: в 1941 г. она достигла около 15 К, а в 1973 г. — примерно 23 К. С 1986 г. начался новый этап исследования сверхпроводимости — высокотемпературной сверхпроводимости, т. е. сверхпроводимости при относительно высокой температуре. Для четырёхкомпонентного керамического вещества на основе оксидов меди была достигнута критическая температура 37 К. Затем последовательно через сравнительно короткие промежутки времени она увеличилась до 40, 52, 70, 92 и даже выше 100 К. В 1993 г. обнаружены сверхпроводящие свойства ртутьсодержащего металлооксидного вещества при температуре около 170 К, которая достигается при охлаждении не только жидким азотом, но и более дешёвым — жидким ксеноном.

Экспериментально сверхпроводимость можно пронаблюдать следующим образом. Кольцо из сверхпроводника помещают в перпендикулярное к нему магнитное поле. Затем кольцо охлаждают до температуры ниже T_K , а поле выключают. В кольце индуцируется незатухающий электрический ток. Этот ток циркулирует неограниченно долго. В ряде экспериментов отсутствие затухания наблюдалось в течение двух с половиной лет. Для сверхпроводящего состояния характерно то, что магнитное поле не проникает в толщу сверхпроводника. Если сверхпроводящий образец охлаждать, поместив его в магнитное поле, то в момент перехода в сверхпроводящее состояние поле выталкивается из образца. Магнитная индукция в образце обращается в нуль. Это явление называется **эффектом Мейснера**.

Сверхпроводимость представляет собой явление, в котором квантово-механические эффекты обнаруживаются не в микроскопических, а в крупных, макроскопических масштабах. Теория классической сверхпроводимости была создана Дж. Бардиным*, Л. Купером* и Дж. Шриффером* в 1957 году. Она является очень сложной, поэтому мы её рассматривать не будем.

Применение сверхпроводников позволяет существенно сократить рассеяние энергии в электрических цепях, и особенно при электропередаче, потери в которой в настоящее время составляют около 20%.

* Камерлинг-Оннес Хейке (1853–1926), голландский физик, лауреат Нобелевской премии 1913 г.

*Бардин Джон (1908–1991), Купер Леон (родился в 1930 г.), Шриффер Джон Роберт (родился в 1931 г), американские физики, лауреаты Нобелевской премии 1972 г.

Посмотрите лекционную демонстрацию.

1. Зависимость сопротивления металлов от температуры.

<http://www.youtube.com/watch?v=NL1vjrwQNX8&list=PLWM8IO-3TQjOvDBfNI-V-DT2dJ5AHQnv>

42.3 Электропроводность полупроводников

Полупроводниками являются кристаллические вещества, у которых валентная зона полностью заполнена электронами, а ширина запрещённой зоны невелика ($\Delta E < 3$ эВ). Своё название они получили потому, что по величине электропроводности занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками (см. рис. 42.1). Основное отличие полупроводников от металлов заключается в том, что сопротивление полупроводников уменьшается с ростом температуры (у металлов оно возрастает).

Различают полупроводники с собственной и примесной проводимостью. Собственной проводимостью обладают химически чистые полупроводники. Электрические свойства примесных полупроводников определяются искусственно вводимыми в них примесями.

42.3.1 Собственная проводимость полупроводников

Типичными полупроводниками являются элементы четвёртой группы периодической системы Менделеева – германий и кремний. Они образуют решётку типа алмаза, в которой каждый атом связан ковалентными (парно – электронными) связями с четырьмя равноотстоящими от него соседями. Условно

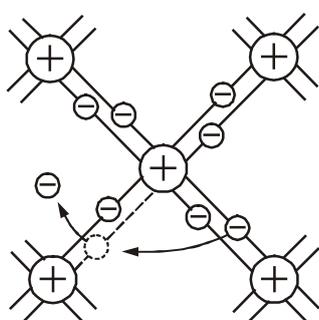


Рисунок 42.4

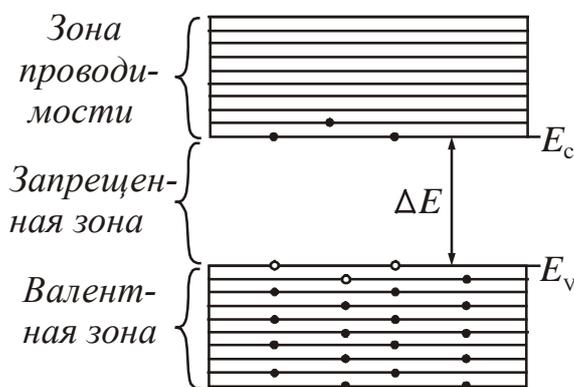


Рисунок 42.5

такое взаимное расположение атомов можно представить в виде плоской структуры, изображённой на рис. 42.4. Кружки со знаком «+» обозначают положительно заряженные ионы, находящиеся в узлах кристаллической решётки; кружки со

знаком «-» – валентные электроны, двойные линии – ковалентные связи.

При температуре порядка $T \approx 250 \div 300$ К тепловое движение может разорвать отдельные пары, освободив один электрон. Покинутое электроном место перестаёт быть нейтральным, в его окрестности возникает избыточный положительный заряд $+e$ – образуется дырка (на рис. 42.4 – пунктирный кружок). На это место может перескочить соседний электрон. В результате дырка начинает также странствовать по кристаллу, как и освободившийся электрон.

Если внешнее электрическое поле отсутствует, то электроны проводимости и дырки движутся хаотически. При включении поля на хаотическое движе-

ние накладывается упорядоченное движение: электронов против поля и дырок – в направлении поля. Оба движения – и дырок, и электронов – приводят к переносу заряда вдоль кристалла. Следовательно, собственная проводимость обуславливается носителями заряда двух знаков – отрицательными электронами и положительными дырками, то есть имеет *электронно-дырочный* характер проводимости.

С точки зрения зонной теории твёрдых тел собственная проводимость возникает в результате перехода электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости (см. рис. 42.5) При этом в зоне проводимости появляется некоторое число носителей тока – электронов, занимающих уровни вблизи дна зоны. Одновременно в валентной зоне освобождается такое же число мест на верхних уровнях, в результате чего появляются дырки.

У собственных полупроводников количество электронов, перешедших в зону проводимости, будет равно количеству образовавшихся дырок в валентной зоне. Удельная проводимость σ пропорциональна концентрации носителей тока и их подвижности:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p), \quad (42.4)$$

где n и p – концентрации электронов и дырок соответственно;
 μ_n – подвижность электронов проводимости;
 μ_p – подвижность дырок.

Подвижность (μ) – отношение средней скорости $\langle v \rangle$ направленного движения носителей тока к напряжённости электрического поля, вызвавшего это движение. $[\mu] = \text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Для собственных полупроводников концентрация электронов равна концентрации дырок ($n = p$), поэтому

$$\sigma = en(\mu_n + \mu_p), \quad (42.5)$$

Удельная проводимость собственных полупроводников быстро растёт с температурой T , изменяясь по закону

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (42.6)$$

где ΔE – ширина запрещённой зоны;
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

σ_0 – величина, определяемая свойствами конкретного материала, слабо изменяющаяся с температурой. Её можно считать константой для данного полупроводника. Формула (42.6) означает, что электроны, обеспечивающие электропроводность полупроводников, связаны с атомами энергией связи порядка ΔE . С повышением температуры тепловое движение начинает разрывать эти

связи и часть электронов, пропорциональная $e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$, становится свободными носителями.

Прологарифмировав соотношение (42.6), получим

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E}{2kT}, \quad (42.7)$$

т. е. зависимость $\ln \sigma$ от $1/T$ является линейной. График зависимости $\ln \sigma$ от $1/T$ для собственных полупроводников изображён на рис. 42.6.

Сопротивление полупроводников в широком интервале температур изменяется по закону:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (42.8)$$

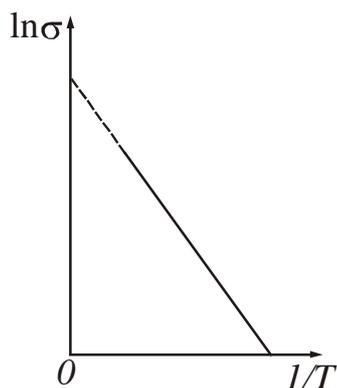


Рисунок 42.6

где R_0 – величина, определяемая свойствами конкретного материала, слабо изменяющаяся с температурой. Её можно считать константой для данного полупроводника (нельзя говорить, что это начальное сопротивление или сопротивление при нуле температуры).

График зависимости температуры от сопротивления $R = f(T)$, представлен на рис. 42.7.

Используя соотношения (42.2) и (42.8) для собственных полупроводников можно получить выражение для расчёта температурного коэффициента сопротивления:

$$\alpha_T = -\frac{\Delta E}{2kT^2}. \quad (42.9)$$

Из (42.9) следует, что для собственных полупроводников $\alpha_T < 0$ и убывает по модулю с ростом температуры.

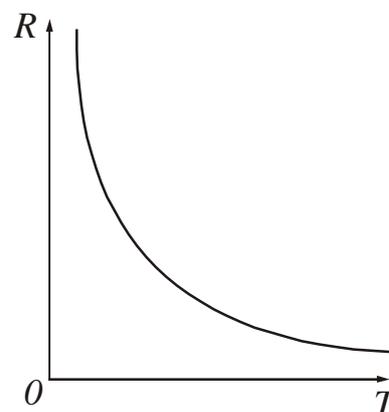


Рисунок 42.7

Посмотрите лекционную демонстрацию.

Зависимость сопротивления полупроводника от температуры.

<http://www.youtube.com/watch?v=lvZpe9CC7c8&list=PLWM8IO-3TQjOvDBfNI-V-DT2dJ5AHQnv>

42.3.2 Примесная проводимость полупроводников

Примесная проводимость возникает, если некоторые атомы данного полупроводника заменить в узлах кристаллической решётки атомами, валентность которых отличается на единицу от валентности основных атомов.

а). **Электронная проводимость.** На рис. 42.8 а) условно изображена решётка германия с примесью пентавалентных атомов фосфора. Для образования ковалентных связей с соседями атому фосфора достаточно четырёх электронов. Следовательно, пятый валентный электрон оказывается как бы лишним и легко отщепляется от атома за счёт энергии теплового движения, образуя странствующий свободный электрон.

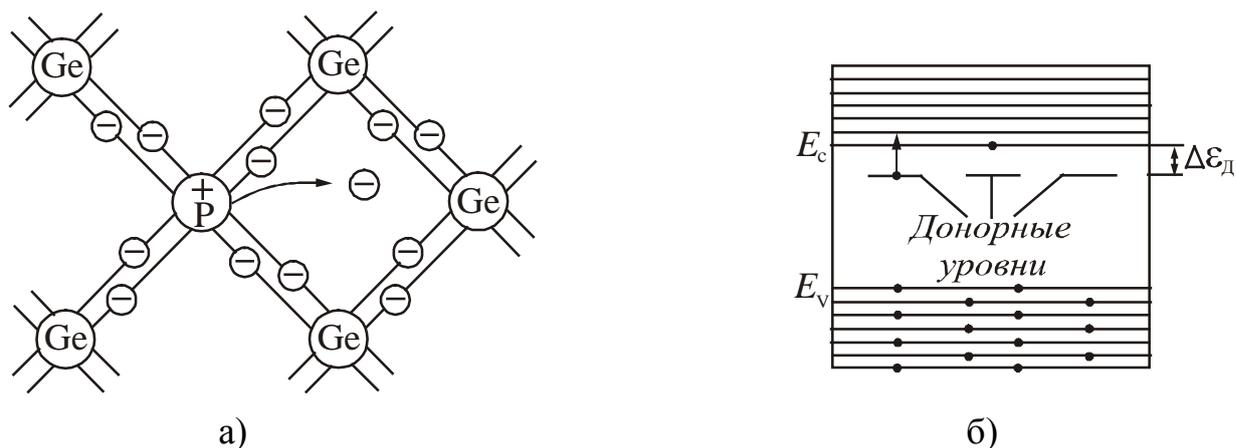


Рисунок 42.8

В отличие от собственного в примесном полупроводнике образование свободного электрона не сопровождается нарушением ковалентных связей, т. е. образованием дырки. В окрестности атома примеси возникает избыточный положительный заряд, но он связан с этим атомом и не может перемещаться по решётке. Благодаря этому заряду атом примеси может захватить приближившийся к нему электрон, но связь захваченного электрона с атомом будет непрочной и легко нарушается вновь за счёт тепловых колебаний решётки.

Таким образом, в полупроводнике с примесью, валентность которой на единицу больше валентности основных атомов, преобладающим типом носителей тока являются электроны. Проводимость в этом случае называют **электронной** проводимостью, а о полупроводнике говорят, что он относится к *n* – типу (от слова *negative* – отрицательный). Атомы примеси, поставляющие электроны проводимости, называются **донорами**. Например, для кремния типичными примерами донорных примесей являются элементы V группы: фосфор (P), мышьяк (As), сурьма (Sb).

Примеси искажают поле решётки. Это приводит к возникновению на энергетической схеме примесных уровней, расположенных в запрещённой зоне кристалла. В случае полупроводников *n* – типа примесные уровни называются донорными (рис. 42.8 б). На схеме $\Delta\varepsilon_d$ – разность энергий донорного уровня и дна зоны проводимости (энергия активации донорных примесей).

Если энергия активации гораздо меньше, чем ширина запрещённой зоны ($\Delta\varepsilon_d \ll \Delta E$), то энергии теплового движения даже при низких температурах оказывается достаточно для того, чтобы перевести электрон с донорного уровня в зону проводимости (рис. 42.8 б). Этому процессу соответствует отщепление пятого валентного электрона от атома примеси.

Для получения монокристаллов с однородным распределением примесей можно использовать метод радиационного легирования. В его основе лежат ядерные реакции, протекающие под действием тепловых нейтронов. Нейтроны являются незаряженными частицами, обладают большой проникающей способностью. При облучении кристалла потоком нейтронов атомы основного изотопа ${}_{14}\text{Si}^{30}$ превращаются в неустойчивый радиоактивный изотоп ${}_{14}\text{Si}^{31}$. Этот изотоп, имея период полураспада всего 2,6 часа, испускает определённое число

γ - и β -частиц и переходит в устойчивый изотоп фосфора ${}_{15}\text{P}^{31}$. В результате ядерной реакции происходит легирование донорами. Размер равномерно легированной области достигает в кристаллах кремния десятков сантиметров.

Концентрацию атомов фосфора в кристалле кремния можно регулировать дозой нейтронного облучения длительностью облучения. После ядерного легирования кристаллы подвергаются термическому отжигу при температуре около 1350 К для устранения радиационных нарушений. Облучённые в реакторе полупроводники обладают остаточной радиоактивностью, поэтому работа с ними возможна лишь после снижения удельной активности ниже определённого предела. Ядерно-легированными кристаллами кремния можно пользоваться через сутки после облучения. А вот арсенида галлия – через значительно большее время.

б). **Дырочная проводимость.** Рассмотрим случай, когда валентность примеси на единицу меньше валентности основных атомов. На рис. 42.9 а) условно изображена решётка кремния с примесью трёхвалентных атомов бора.

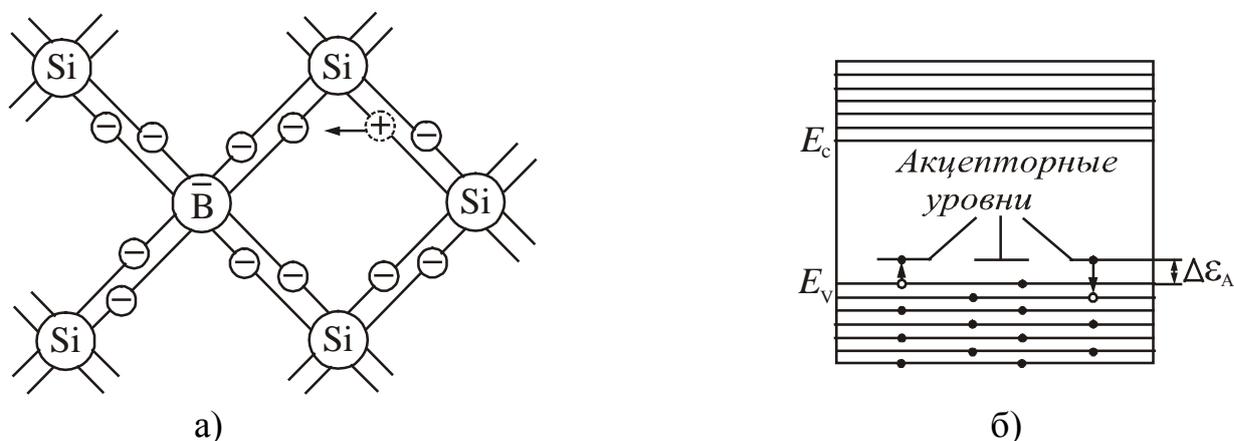


Рисунок 42.9

Трёх валентных электронов атома бора недостаточно для образования связей со всеми четырьмя соседями. Поэтому одна из связей окажется не укомплектованной, и будет представлять собой место, способное захватить электрон. При переходе на это место электрона в одной из соседних пар возникает дырка, которая будет перемещаться по кристаллу. Вблизи атома примеси возникает избыточный отрицательный заряд, но он будет связан с данным атомом и не может стать носителем тока.

Таким образом, в полупроводнике с примесью, валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов, преобладающим типом носителей тока являются дырки. Проводимость в этом случае называется **дырочной**, а о полупроводнике говорят, что он относится к *p* – типу (от слова *positive* – положительный). Примеси, вызывающие возникновение дырок, называются **акцепторными** (*acceptor* (лат.) – приёмщик). Типичные примеры акцепторных примесей в кремнии – это элементы III группы: бор (B), алюминий (Al), индий (In).

На энергетической диаграмме возникают примесные уровни, которые называются акцепторными (рис. 42.9 б). На схеме $\Delta\varepsilon_A$ – разность энергий потолка валентной зоны и акцепторного уровня (энергия активации акцепторных примесей). Акцепторные уровни оказывают существенное влияние на электри-

ческие свойства кристалла в том случае, если они расположены недалеко от потолка валентной зоны, т. е. если $\Delta\varepsilon_A \ll \Delta E$ (рис. 42.9 б). Образованию дырки соответствует переход электрона из валентной зоны на акцепторный уровень.

Электронный характер проводимости полупроводников n -типа и дырочной характер проводимости полупроводников p -типа подтверждается экспериментально при исследовании эффекта Холла (см. т. 1, §56). Наблюдаемый знак постоянной Холла совпадает со знаком носителей тока. Также при исследовании эффекта Холла в полупроводниках (селене, кремнии, германии, окислах ряда металлов и т. д.) выяснилось, что постоянная Холла для них примерно в 10^5 раз больше, чем в металлах; электропроводность в 10^5 раз меньше, примерно во столько же раз меньше и концентрация свободных электронов. **Постоянная Холла полупроводников с ростом температуры резко падает, следовательно, концентрация свободных электронов растет при увеличении температуры полупроводника.**

Второй характерной особенностью полупроводников является то, что у некоторых из них разность потенциалов имеет противоположный знак – при таких же направлениях тока и индукции магнитного поля, как на рис. 56.1 (см. т. 1, §56), нижняя грань пластины заряжается положительно. Это означает, что проводимость осуществляется за счёт движения положительных зарядов.

Таким образом, эффект Холла является одним из эффективных методов исследования носителей заряда в полупроводниках. Он позволяет оценивать концентрацию носителей и определять их знак, судить о количестве примесей в полупроводниках и характере химических связей.

При повышении температуры концентрация примесных носителей тока быстро достигает насыщения. Это значит, что практически освобождаются все донорные уровни. Температура, при которой достигается насыщение, называется температурой истощения примесей (T_s). По мере роста температуры всё в большей степени начинает сказываться собственная проводимость полупроводника, обусловленная переходом электронов непосредственно из валентной зоны в зону проводимости. Эта температура называется температурой перехода к собственной проводимости T_i (*intrinsic – собственный*). Таким образом, электропроводность примесного полупроводника в широком интервале температур складывается из примесной и собственной. При низких температурах преобладает примесная, а при высоких – собственная проводимость.

Удельная электропроводность примесного полупроводника может быть выражена соотношением

$$\ln \sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} + \sigma_{\text{прим}} e^{-\frac{\Delta \varepsilon_{\text{прим}}}{2kT}}, \quad (42.11)$$

где $\Delta \varepsilon_{\text{прим}}$ – энергия активации примеси;

$\sigma_{\text{прим}}$ – константа, определяемая типом примеси.

Первое слагаемое соответствует собственной проводимости, а второе – примесной. Схематично, график зависимости $\ln \sigma$ от $1/T$ имеет вид, представленный на рис. 42.10. По наклону линейных участков можно определять ширину запрещённой зоны ΔE и энергию активации примесей $\Delta \varepsilon_{\text{прим}}$.

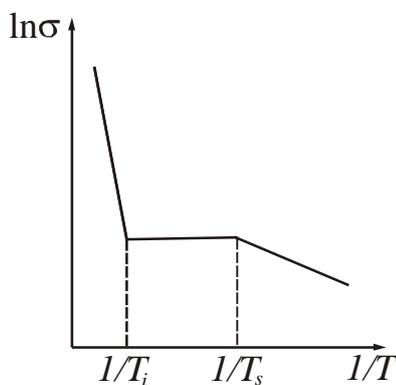


Рисунок 42.10

Для каждого полупроводника существует температура T_K (критическая), выше которой p - n -структуры на его основе перестают работать. Чем больше ширина запрещённой зоны, тем выше эта температура. Например, для германия $T_K \approx 80^\circ\text{C}$ ($\Delta E = 0,66$ эВ), для кремния $T_K \approx 120^\circ\text{C}$ ($\Delta E = 1,11$ эВ), для арсенида галлия $T_K \approx 250^\circ\text{C}$ ($\Delta E = 1,43$ эВ). Эта критическая температура равна температуре T_i перехода к собственной проводимости, так как при достижении этой температуры концентрация собственных носителей превышает концентрацию примесных. В отдельных приборах и интегральных микросхемах используют специальные системы теплоотвода для того, чтобы обеспечить постоянство температуры.

В заключение обратим внимание на очень существенное отличие поведения носителей тока в полупроводниках от свойств электронов в металлах. Квантовая теория привела к выводу о том, что в металлах концентрация электронов и их энергия практически не зависят от температуры. Этот вывод подтверждён экспериментально и означает, что числом носителей тока в металлах практически нельзя управлять. В полупроводниках, при любом характере их проводимости, число носителей тока значительно меньше, чем в металлах. Но концентрация носителей тока в полупроводниках и их энергия сильно зависят от температуры и возрастают при её повышении. Это создает возможность управления числом носителей тока и их энергией в полупроводниках, широко применяемую в полупроводниковых устройствах.

Таблица 42.1. Электрические характеристики электротехнических материалов различных классов при 20°C и постоянном напряжении

Класс материала	ρ , Ом·м	Знак α_ρ , в широком интервале температур	Тип проводимости
Проводники	$10^{-8} \div 10^{-5}$	положительный	электронная
Полупроводники чистые	$10^{-6} \div 10^{+8}$	отрицательный	электронно-дырочная
Полупроводники с донорной примесью	$10^{-6} \div 10^{+8}$	отрицательный	электронная
Полупроводники с акцепторной примесью	$10^{-6} \div 10^{+8}$	отрицательный	дырочная
Диэлектрики	$10^{+8} \div 10^{16}$	отрицательный	Ионная и электронная

• Давайте подумаем!

42.1. Из классической электронной теории следует, что сопротивление металлов прямо пропорционально их абсолютной температуре. Какое явление не согласуется с этим выводом?

- 42.2. Как известно, при температурах, близких к абсолютному нулю, некоторые металлы переходят в сверхпроводящее состояние. Можно ли путём понижения температуры получить сверхпроводящие кремний или германий?
- 42.3. Одинаково ли изменяется удельное сопротивление проводников и полупроводников с ростом температуры?
- 42.4. Сила тока в веществе обуславливается напряжённостью электрического поля, концентрацией свободных носителей заряда, частотой тепловых соударений и пр. Какой из этих факторов подвержен особенно значительным изменениям в полупроводниках?
- 42.5. Какую проводимость имеет чистый кремний? Какие носители зарядов будут основными в кристалле кремния после внесения туда индия как примеси?
- 42.6. Можно ли считать полупроводником сплав фосфора с индием InP, если ширина запрещённой зоны равна 1,26 эВ?
- 42.7. Что надо сделать, чтобы электропроводность полупроводника стала такой же, как электропроводность диэлектрика? Сохранятся ли при этом его полупроводниковые свойства?
- 42.8. Что надо сделать, чтобы электропроводность полупроводника стала такой же, как электропроводность металла? Сохранятся ли при этом его полупроводниковые свойства?
- 42.9. Как можно опытным путём узнать о знаке носителя тока в полупроводнике?
- 42.10. Какие данные о полупроводниках можно получить на основе экспериментального изучения эффекта Холла в них?

Глава 9. Контактные и термоэлектрические явления

§43 Электронно-дырочный переход. Полупроводниковый диод

В современной электронике широко используются специальные неоднородные структуры, выполненные с использованием полупроводников. Полупроводниковая структура представляет собой некую границу раздела, в которой присутствует полупроводниковый материал. К числу таких структур относятся:

- граница раздела между областями с электронной и дырочной проводимостью (*p-n*-переход). Является основным элементом микросхем.
- граница раздела между областями с различной шириной запрещённой зоны (гетеропереход). Гетеропереходы являются основой оптоэлектронных приборов различного назначения, в частности светодиодов.
- контакт «металл – полупроводник»;
- структура «металл – диэлектрик – полупроводник».

Наиболее ярко универсальные схемные свойства проявляются у *p-n*-перехода, поэтому рассмотрим его более подробно. **Электронно-дырочным переходом** (*p-n*-переходом) называется область монокристаллического полупроводника, в которой происходит смена проводимости с электронной на ды-

рочную (или наоборот). Универсальность p - n -перехода заключается в том, что он одновременно обладает резистивными (используется как сопротивление), ёмкостными, выпрямительными и другими свойствами. Поэтому электронно-дырочные переходы применяются как для изготовления полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и т. п.), так и интегральных микросхем. В полупроводниковых интегральных микросхемах на одном кристалле формируется множество миниатюрных схемных элементов: резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы. Все они могут выполняться на основе p - n -перехода.

p - n -переход образуется в кристалле полупроводника, если в нём с помощью соответствующих примесей будут созданы участки с различной (n и p) проводимостью. Так, если при выращивании монокристалла германия в расплав вводить необходимые примеси, то получается монокристалл, в котором имеются последовательно расположенные области с различными типами проводимости. Основными носителями заряда в n -области являются электроны, неосновными – дырки. В p -области основными носителями являются дырки, неосновными – электроны (рис. 43.1).

Рассмотрим, какие явления наблюдаются на границе, разделяющей области с разными типами проводимости. Электроны и дырки диффундируют через граничный слой во встречных направлениях. Электроны, перешедшие в p -область, будут рекомбинировать с дырками. В результате этого в приграничной части p -области атомы акцепторной примеси превращаются в отрицательно заряженные неподвижные ионы. Этот отрицательный заряд, связанный с атомами акцепторной примеси не может перемещаться по кристаллу.

В свою очередь, уход электронов из n -области приводит к появлению в приграничной части n -области положительно заряженных неподвижных ионов

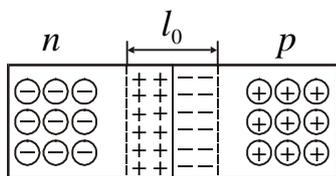


Рисунок 43.1

донорной примеси. Этот положительный заряд также не может перемещаться по кристаллу. Таким образом, p - n -переход становится подобным заряженному конденсатору. Этот эффект лежит в основе ёмкостных свойств p - n -перехода. Число носителей заряда в граничном слое уменьшается, а сопротивление слоя резко возрастает.

Контактное электрическое поле, возникшее в двойном электрическом слое толщиной l_0 , будет препятствовать дальнейшему движению основных носителей через границу раздела двух полупроводников (рис. 43.1), поэтому его называют **запирающим**.

Действие внешнего электрического поля существенным образом влияет на сопротивление запирающего слоя. Подадим на p - n -переход внешнее напряжение такого направления, чтобы плюс был подключен к p -области, а минус – к n -области (рис. 43.2). Такое включение называется **прямым**. Тогда под действием электрического поля электроны в n -полупроводнике будут перемещаться к границе раздела полупроводников. Дырки в p -полупроводнике под действием того же поля будут двигаться навстречу элект-

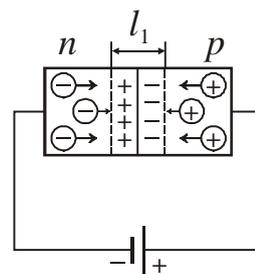


Рисунок 43.2

тронам также к этой границе. При таком пропускном (прямом) направлении тока в полупроводнике ширина запирающего слоя будет непрерывно уменьшаться, соответственно будет уменьшаться его сопротивление. Таким образом, в направлении от p -области к n -области p - n -переход пропускает ток, который быстро нарастает при увеличении приложенного напряжения. Соответственно, этот ток называется **прямым**.

Изменим полярность подключения, т. е. приложим к p - n -переходу напряжение такого направления, чтобы плюс был подключен к n -области, а минус – к p -области (рис. 43.3). Такое включение называется **обратным**. Дырки в p -полупроводнике и электроны в n -полупроводнике будут оттягиваться электрическим полем от границы раздела в противоположные стороны. В этом случае ширина запирающего слоя будет увеличиваться. В области обеднённой подвижными зарядами, увеличивается двойной электрический слой неподвижных зарядов противоположного знака (рис. 43.3).

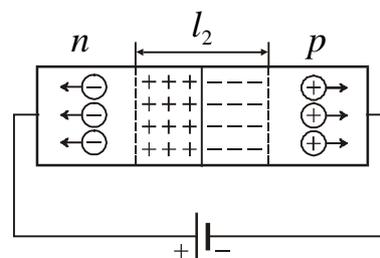


Рисунок 43.3

Увеличение ширины запирающего слоя приводит к увеличению сопротивления и уменьшению тока основных носителей. Возникающий при этом результирующий ток (он называется **обратным**) быстро достигает насыщения и становится равным току неосновных носителей. Ток, обусловленный неосновными носителями очень мал, так как концентрация неосновных носителей мала.

Чем больше будет приложенное обратное напряжение, тем толще двойной слой, обеднённый подвижными носителями тока, и, вследствие этого, тем больше сопротивление такого слоя. В итоге, при равных по величине напряжениях прямой ток будет на несколько порядков больше обратного тока. При достаточном обратном напряжении запирающий слой представляет собой практически изолятор, в котором отсутствуют подвижные носители тока.

На рис. 43.4 представлена вольт-амперная характеристика p - n -перехода.

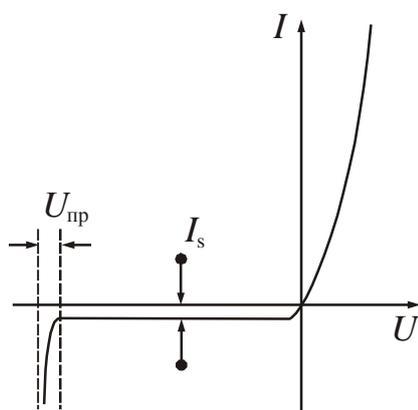


Рисунок 43.4

Небольшой обратный ток I_s обусловлен неосновными носителями (см. левую ветвь рис. 43.4). Заметим, что p - n -переход может выдерживать обратное напряжение до определённого предела $U_{пр}$, после чего наступает пробой, аналогичный пробую диэлектрика. При некоторых условиях p - n -переход, работающий в режиме пробоя, может играть роль стабилизатора напряжения в цепи. Это ещё одна схемная функция p - n -перехода.

Сила тока в p - n -переходе

$$I = I_s \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right), \quad (43.1)$$

где I_s – предельное значение силы обратного тока; U – внешнее напряжение, приложенное к p - n -переходу.

Из сказанного выше следует, что p - n -переход обладает свойством односторонней проводимости. Способность p - n -перехода пропускать ток в одном направлении и не пропускать или почти не пропускать его в противоположном направлении используется в приборах, называемых полупроводниковыми диодами. **Полупроводниковый диод** – выпрямитель переменного тока, основанный на использовании свойств p - n -перехода.

Это свойство диода характеризуется коэффициентом выпрямления

$$\alpha = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}}, \quad (43.2)$$

т. е. отношением прямого $I_{\text{пр}}$ и обратного $I_{\text{обр}}$ токов, измеренных при одинаковых по величине прямом и обратном напряжении. Обычно коэффициент выпрямления составляет величину в несколько сотен единиц, но может достигать и больших значений ($10^5 \div 10^6$).

Достоинством полупроводникового диода являются малые размеры и масса, длительный срок службы, высокая механическая прочность, высокий коэффициент полезного действия, а недостатком – зависимость их параметров от температуры. При повышении температуры концентрация неосновных носителей возрастает, при этом возрастает ток насыщения. При достижении температуры перехода к собственной проводимости p - и n -примесные части кристалла становятся собственными, p - n -переход и эффект выпрямления исчезают.

• **Давайте подумаем!**

- 43.1. Можно ли получить p - n -переход, произведя сплавление олова в германий или кремний?
- 43.2. Почему свободные носители зарядов не могут удержаться в области p - n -перехода?
- 43.3. Почему прямой ток в p - n -переходе значительно больше обратного при одинаковой величине напряжения?

§44 Внутренний фотоэффект

Появление носителей тока в полупроводниках может быть вызвано поглощением света. Если энергия кванта $h\nu$ превышает ширину запрещенной зоны, т. е. $h\nu \geq \Delta E$, то электрон, поглотивший квант, переходит из валентной зоны в зону проводимости (рис. 44.1). В результате появляется дополнительная пара носителей тока – электрон и дырка, что проявляется в увеличении электропроводности вещества. Таким образом, под действием электромагнитного излучения происходит генерация дополнительных носителей тока в полупроводнике. Увеличение электропроводности полупроводников под действием электромагнитного

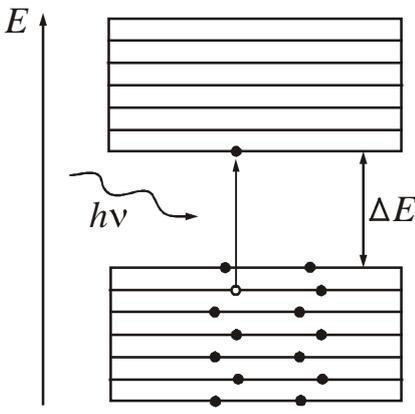


Рисунок 44.1

излучения называется **фотопроводимостью**.

Явление перераспределения электронов по энергетическим уровням под действием света называется **внутренним фотоэффектом** (в отличие от внешнего фотоэффекта при этом электроны не покидают вещество).

При увеличении освещённости электрическое сопротивление полупроводниковых материалов уменьшается (за счёт увеличения концентрации носителей).

Приборы, в которых используется свойство полупроводниковых кристаллов изменять своё электрическое сопротивление при освещении светом, называются **фоторезисторами**.

Фотосопротивление (фоторезистор) – двухэлектродный полупроводниковый фотоэлемент, который изменяет свою электропроводность в зависимости от интенсивности и спектрального состава падающего света.

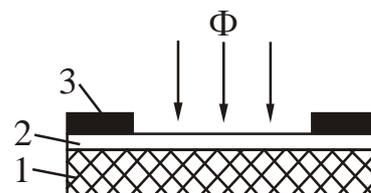


Рисунок 44.2

Принцип устройства фоторезистора показан на рис. 44.2. На диэлектрическую пластину 1 наносится тонкий слой полупроводника 2 с контактами 3 по краям. Затем полупроводник помещают в защитный корпус, который оборудован «окном» для проникновения света. В качестве полупроводниковых материалов используют Se, Te, Ge, WiS, PbS, PbSe и т. д., в зависимости от спектрального состава излучения, направляемого на фоторезистор. Так, например, фоторезистор из сернистого чугуна чувствителен к инфракрасному излучению, из сернистого висмута – к лучам на границе между видимым и инфракрасным излучением, сернистого кадмия – к видимому излучению.

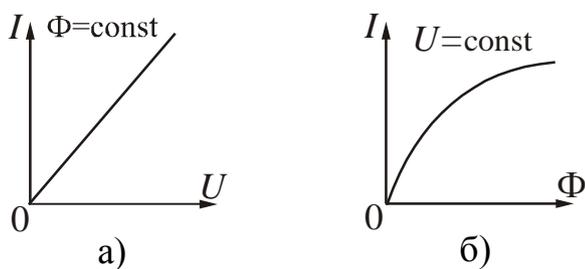


Рисунок 44.3

Фоторезисторы имеют линейную вольтамперную (рис. 44.3 а) и нелинейную люксамперную характеристики (рис. 44.3 б). Вольтамперная характеристика – зависимость фототока от приложенного напряжения – снимается при неизменном световом потоке. Люксамперная – зависимость фототока от светового потока – при неизменном напряжении.

Основными характеристиками фоторезисторов являются темновое сопротивление R_T и удельная чувствительность K .

Темновое сопротивление R_T – сопротивление фоторезистора при отсутствии облучения. Оно составляет величину порядка $10^4 - 10^7$ Ом.

Удельная чувствительность – отношение фототока I_Φ к произведению величины падающего на фоторезистор светового потока Φ на приложенное напряжение U :

$$K = \frac{I_\Phi}{\Phi U}. \quad (44.1)$$

Обычно удельная чувствительность составляет несколько сотен или тысяч микроампер на вольт-люмен.

Значительная зависимость сопротивления от температуры, характерная для полупроводников, является недостатком фоторезисторов. Существенным недостатком также считается их большая инерционность, которая объясняется довольно большим временем рекомбинации электронов и дырок после прекращения облучения. Тем не менее, фоторезисторы широко применяются в различных схемах автоматики. Фоторезисторы применяют как детекторы излучения в системах автоматического регулирования, фототелеграфии, в фотоэлектрических пирометрах, а также в схемах измерения прозрачности жидкости и газа (дымномеры, колориметры), для измерения качества поверхности (шероховатости, блеклости), контроля размеров деталей, линейных размеров и т. д.

Они позволяют управлять на расстоянии процессами производства, автоматически отличать нарушения нормального хода процесса и останавливать в этих случаях процесс. При нарушениях хода процесса изменяется поток света, попадающего на фотоэлемент, и создается ток, выключающий весь процесс.

Количество образующихся носителей тока пропорционально падающему световому потоку, поэтому фоторезисторы применяют в фотометрии для измерения освещённости.

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Фоторезистор: "А каковы Ваши намерения?"

https://www.youtube.com/watch?v=_9R7hIRE0CY

- **Давайте подумаем!**

44.1. Какое физическое явление используется в фоторезисторе?

44.2. В чём заключается различие между внешним и внутренним фотоэффектом?

44.3. Имеются отдельные электрически нейтральные пластинки из металла и полупроводника. При освещении металла возникает внешний фотоэффект, а при освещении полупроводника – внутренний фотоэффект. Остаются ли пластинки нейтральными? Если нет, то каков будет знак заряда?

§45 Термоэлектрические явления

Между тепловыми и электрическими процессами в металлах и полупроводниках имеется взаимосвязь, которая обуславливает явления, называемые термоэлектрическими. К их числу относятся явление Зеебека, явление Пельтье и явление Томсона. Эти эффекты связаны с взаимным превращением тепловой энергии в энергию электрического тока.

45.1 Явление Зеебека

Если спаи 1 и 2 двух разнородных металлов А и В, образующих замкнутую цепь (рис. 45.1), имеют неодинаковую температуру ($T_1 \neq T_2$), то в цепи течёт электрический ток. Изменение знака у разности температур приводит к изменению направления тока. Это явление было открыто в 1821 году Зеебеком*.

*Зеебек Томас (1770–1831), немецкий физик.

Возникшая электродвижущая сила называется термоэлектродвижущей силой (термо-эдс). Содержащая два спаев цепь называется **термопарой**. В общем случае величина термоэдс определяется следующим образом:

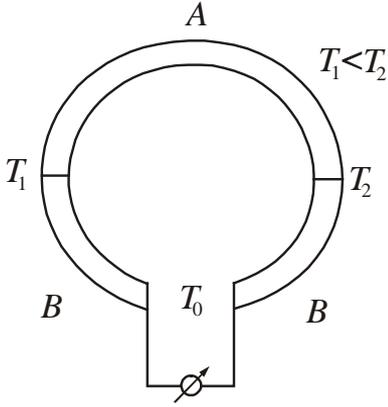


Рисунок 45.1

$$\varepsilon_{\text{термо}} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{AB}(T) dT, \quad (45.1)$$

где $\alpha_{AB}(T)$ – удельная термо-эдс. данной пары металлов или полупроводников.

Для большинства пар металлов удельная термоэдс $\alpha_{AB}(T)$ зависит от температур спаев и имеет значения $(10^{-5} \div 10^{-4})$ В/К; для полупроводников она может оказаться значительно больше (до $1,5 \cdot 10^{-3}$ В/К).

В отдельных случаях удельная термо-эдс слабо зависит от температуры. Тогда формулу (45.1) можно приближённо представить в виде

$$\varepsilon_{\text{термо}} = \alpha_{AB}(T_2 - T_1), \quad (45.2)$$

т. е. термо-эдс пропорциональна разности температур спаев. Таким образом, в эффекте Зеебека происходит прямое преобразование тепловой энергии в энергию электрического тока.

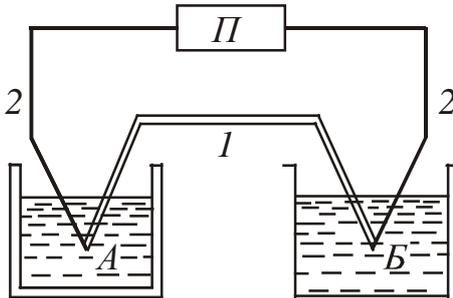


Рисунок 45.2

Термопары используют для измерения температур. Один спай термопары поддерживают при постоянной температуре (например, комнатной, или при 0°C), другой помещают в среду, температуру которой хотят измерить (рис. 45.2). При использовании термопар для точных измерений температуры лучше измерять возникающую в цепи электродвижущую силу, а не текущий в ней ток. Это связано с тем, что электродвижущая сила

зависит только от рода образующих термопару металлов и температуры спаев, а сила текущего в цепи тока определяется, кроме того, сопротивлением измерительного прибора, соединительных проводов и внутренним сопротивлением спаев. Внутреннее сопротивление спаев сильно зависит от состояния спаев и поэтому меняется со временем. Для получения правильных результатов измерений, термопару необходимо предварительно градуировать или использовать стандартные пары с табулированными значениями термо-эдс. Градуировка термопары заключается в установлении зависимости величины термо-эдс от разности температур спаев.

Для проведения быстрых измерений температуры, не требующих высокой точности, в цепь термопары включают милливольтметр по схеме, изображённой на рис. 45.3. Измерительный спай термопары приводится в контакт с телом А, температуру которого надо определить.

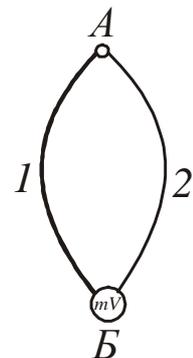


Рисунок 45.3

С помощью термопар можно измерять с точностью порядка сотых долей градуса как низкие (до 0,1 К), так и высокие (до 1600 К) температуры.

В качестве источников тока термопары из металлов и их спаев не используются вследствие весьма низкого КПД (не более 0,5 %). Термопары из полупроводниковых материалов обладают гораздо большим КПД (до 10%) и они уже нашли применение в качестве источников питания радиоэлектронной аппаратуры.

Посмотрите лекционную демонстрацию:

Эффект Зеебека (термопара)

<https://www.youtube.com/watch?v=Gv1IHc1B8Mc>

45.2 Явление Пельтье

Эффект Пельтье* (открыт в 1834 году) состоит в обратимом выделении дополнительного (к эффекту Джоуля – Ленца) тепла на контакте двух металлов или полупроводников при прохождении через него электрического тока. Таким образом, явление Пельтье оказывается обратным явлению Зеебека.

Опытным путём установлено, что количество выделившегося или поглощённого в спае тепла пропорционально заряду $q = I t$, прошедшему через спай:

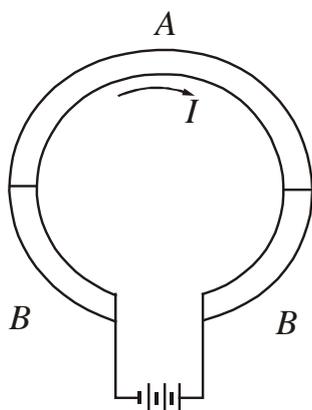


Рисунок 45.4

$$Q_{AB} = \Pi_{AB} q = \Pi_{AB} I t. \tag{45.3}$$

Коэффициент пропорциональности Π_{AB} называется коэффициентом Пельтье, индексы указывают, что ток течёт от звена А к звену В (рис. 45.4). Из (45.3) следует, что в отличие от тепла Джоуля – Ленца ($Q = I^2 R t$), тепло Пельтье пропорционально не квадрату, а первой степени силы тока. Это означает, что при перемене направления тока Q_{AB} меняет знак, т. е. вместо выделения тепла наблюдается поглощение такого же количества тепла, т. е. $\Pi_{AB} = -\Pi_{BA}$.

Из законов термодинамики вытекает, что коэффициент Пельтье и удельная термоэлектродвижущая сила связаны соотношением

$$\Pi_{AB} = \alpha_{AB} T. \tag{46.4}$$

В случае контакта двух веществ с одинаковым видом носителей тока (металл – металл, металл – полупроводник *n*-типа, два полупроводника *n*-типа, два полупроводника *p*-типа) эффект Пельтье объясняется следующим образом.

*Пельтье Жан Шарль (1785–1845), французский физик.

Носители тока по разные стороны от спая имеют разную полную энергию. Если носители, пройдя через спай, попадают в область с меньшей энергией, то они отдают избыток энергии кристаллической решётке: спай нагревается. На другом спае носители переходят в область с большей энергией; недостающую энергию они заимствуют у решётки. Это приводит к охлаждению спая.

А.Ф. Иоффе* выдвинул идею использования эффекта Пельтье для создания холодильных установок. Рабочим элементом таких приборов является батарея из чередующихся полупроводников n -типа и p -типа. Спаи одного вида (соответствующие переходу от n к p) введены в охлаждаемую область, а спаи другого вида (соответствующие переходу от p к n) выведены наружу. При надлежащем направлении тока внутренние спаи поглощают тепло, понижая температуру окружающего их пространства, наружные спаи отдают тепло внешней среде. Такие холодильники имеют невысокий КПД, но находят применение в микроэлектронике.

45.3 Явление Томсона

Явление заключается в том, что при прохождении тока по однородному проводнику, вдоль которого имеется градиент (неоднородность) температуры, в проводнике выделяется тепло. Этот эффект был сначала Томсоном* теоретически предсказан, а затем уже экспериментально им обнаружен в 1856 году.

Количество тепла, выделяющегося в единицу времени в элементе проводника длины dl , равно

$$dQ = \tau I \frac{dT}{dl} dl, \quad (45.5)$$

где I – сила тока;

dT/dl – градиент температуры вдоль проводника;

τ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом Томсона, зависящий от природы проводника.

Явление Томсона объясняется по аналогии с явлением Пельтье. Пусть ток течёт в сторону возрастания температуры. Если носители тока – электроны, то они при своём движении будут переходить из мест с более высокой температурой (и, следовательно, большей средней энергией электронов), в места с более низкой температурой (и меньшей средней энергией). Избыток своей энергии электроны отдадут решётке, что приведёт к выделению тепла. Если носителями тока служат дырки, то эффект будет иметь обратный знак.

*Иоффе Абрам Федорович (1880–1960), российский физик.

*Томсон Уильям (лорд Кельвин) (1824–1907), английский физик.

- Давайте подумаем!

45.1. Во время прохождения электрического тока через контакт двух проводников в окружающей среде выделяется тепло. Как на опыте убедиться, который из эффектов даёт основной вклад в это тепло: Пельтье или Джоуля – Ленца?

- Обратите внимание!

- Изучив раздел «Основы физики твердого тела», студент должен **ЗНАТЬ**:

Суть понятий:

Кристалл. Анизотропия. Дефекты точечные и линейные. Энергетическая зона. Валентная зона, запрещённая зона, зона проводимости. Ширина запрещённой зоны. Потолок валентной зоны. Дно зоны проводимости. Проводник, полупроводник, диэлектрик. Донор, акцептор. Дырка. Собственная и примесная проводимость. *p-n*-переход. Основные и неосновные носители тока. Прямое и обратное включение *p-n*-перехода. Фотопроводимость. Термо-эдс.

Явления:

Принцип работы *p-n*-перехода. Внутренний фотоэффект. Явления Зеебека, Пельтье, Томсона.

Формулы:

Удельная электропроводность полупроводников. Зависимость сопротивления и электропроводности полупроводников от температуры. Температурный коэффициент сопротивления полупроводников. Коэффициент выпрямления диода.

Графики:

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры. Графическое представление электропроводности примесных полупроводников. Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода.

Приборы и устройства:

Диод. Фоторезистор. Термопара.

ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ «ОСНОВЫ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА»

Инструкция. Данный тест предназначен для проверки знаний по теме «*Основы физики твёрдого тела*». Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу ответов. Если Вы дали

- 1) 14-15 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
 - 2) 11-13 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
 - 3) 9-10 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
 - 4) меньше 9 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.
- Прочитайте конспект ещё раз.

1. Какие условия с точки зрения зонной теории являются необходимыми и достаточными для появления у тел высокой электропроводности? Наличие...
 - 1) свободных электронов, способных перемещаться по кристаллу.
 - 2) частично заполненной зоны проводимости.
 - 3) полностью заполненных зон.
 - 4) связанных электронов.
 - 5) запрещённых зон.
2. Какие вещества по ширине запрещённой зоны ΔE следует отнести к диэлектрикам?

1. Алмаз С ($\Delta E = 5,2$ эВ);	2. Арсенид галлия GaAs ($\Delta E = 1,43$ эВ);
3. Кремний Si ($\Delta E = 1,08$ эВ);	4. Нитрид бора ($\Delta E = 4,6$ эВ);
5. Германий Ge ($\Delta E = 0,66$ эВ).	
3. Какие вещества по ширине запрещённой зоны ΔE следует отнести к полупроводникам?

1. Алмаз С ($\Delta E = 5,2$ эВ);	2. Арсенид галлия GaAs ($\Delta E = 1,43$ эВ);
3. Кремний Si ($\Delta E = 1,08$ эВ);	4. Нитрид бора ($\Delta E = 4,6$ эВ);
5. Германий Ge ($\Delta E = 0,66$ эВ).	
4. Какие полупроводники обладают собственной проводимостью?
 1. Полупроводники, содержащие акцепторные примеси.
 2. Полупроводники, содержащие донорные примеси.
 3. Химически чистые полупроводники при абсолютном нуле.
 4. Химически чистые полупроводники при $T > 0$ К.
 5. Полупроводники, содержащие акцепторные и донорные примеси.
5. Чем может быть обусловлено наличие проводимости у собственных полупроводников?
 1. Возбуждением путем нагревания.
 2. Возбуждением путем облучения электромагнитными волнами (светом).
 3. Наличием донорных примесей.
 4. Наличием акцепторных примесей.
6. У каких полупроводников преобладает электронный тип проводимости?
 1. У полупроводников, содержащих акцепторные примеси.
 2. У полупроводников, содержащих донорные примеси.
 3. У химически чистых полупроводников при абсолютном нуле.

4. У химически чистых полупроводников при $T > 0$ К.
 5. У полупроводников, содержащих акцепторные и донорные примеси.
7. Чем может быть обусловлено наличие проводимости у полупроводников n -типа?
1. Возбуждением путём нагревания.
 2. Возбуждением путём облучения электромагнитными волнами (светом).
 3. Наличием донорных примесей.
 4. Наличием акцепторных примесей.
8. У каких полупроводников преобладает дырочный тип проводимости?
1. У полупроводников, содержащих акцепторные примеси.
 2. У полупроводников, содержащих донорные примеси.
 3. У химически чистых полупроводников при абсолютном нуле.
 4. У химически чистых полупроводников при $T > 0$ К.
 5. У полупроводников, содержащих акцепторные и донорные примеси.
9. Чем может быть обусловлено наличие проводимости у полупроводников p -типа?
1. Возбуждением путём нагревания.
 2. Возбуждением путём облучения электромагнитными волнами (светом).
 3. Наличием донорных примесей.
 4. Наличием акцепторных примесей.
10. По какой формуле можно определить зависимость собственной проводимости полупроводников от температуры?
1. $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$
 2. $\sigma = \sigma_0 e^{+\frac{\Delta E}{2kT}}$
 3. $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} + \sigma_n e^{-\frac{E_n}{2kT}}$
11. Какая формула определяет зависимость сопротивления от температуры для собственных полупроводников?
1. $R = R_0(1 + \alpha t)$
 2. $R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$
 3. $R = R_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$
12. Какая формула определяет зависимость проводимости примесных полупроводников от температуры?
1. $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$
 2. $\sigma = \sigma_0 e^{+\frac{\Delta E}{2kT}}$
 3. $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} + \sigma_n e^{-\frac{E_n}{2kT}}$
13. Какой из указанных на рис. 13 графиков является вольтамперной характеристикой полупроводникового диода?
14. Какой из указанных на рис. 13 графиков является вольтамперной характеристикой проводника?

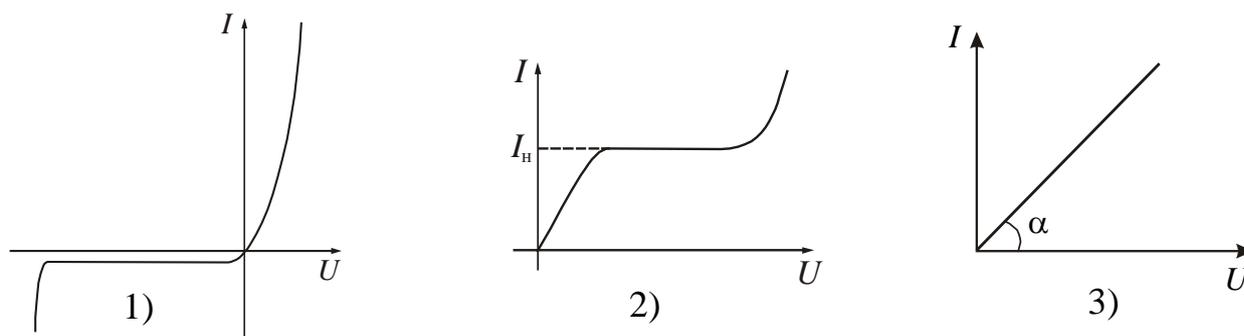


Рисунок 13

15. Какой из указанных на рис. 15 графиков показывает зависимость сопротивления полупроводников от температуры?

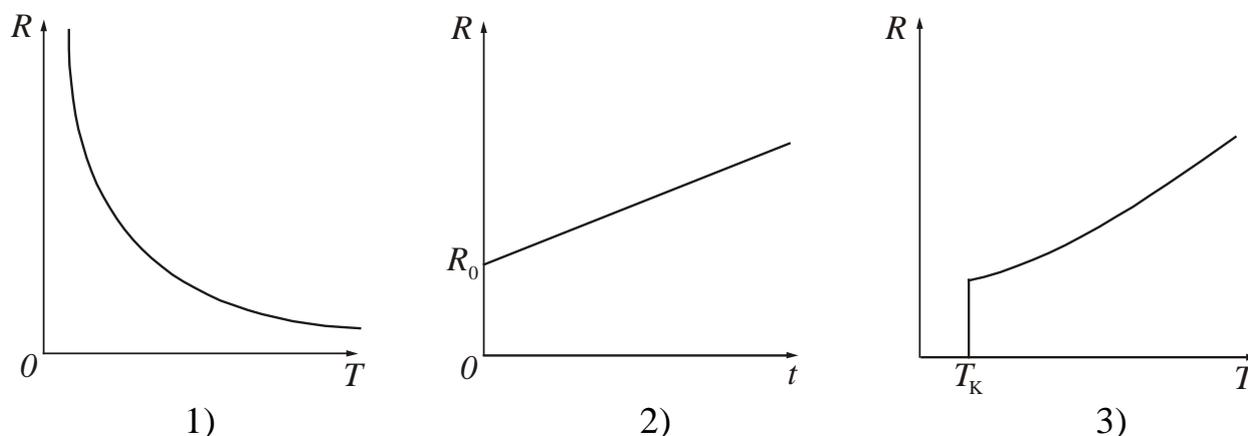


Рисунок 15

Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем!»

41.1. Важнейшим различием между кристаллическими и аморфными телами является отсутствие у аморфных тел точки плавления, в отличие от кристаллических.

41.2. Периодичность в расположении частиц, которая наблюдается относительно любой выбранной части, при «дальнем» порядке не нарушается на далеких расстояниях от неё внутри среды. Такой порядок существует в кристаллах. Если указанная периодичность достаточно быстро нарушается, то имеет место «ближний» порядок. Он наблюдается в жидкостях и аморфных телах.

41.3. Монокристалл имеет правильную форму, поликристалл – это совокупность монокристаллов, он имеет неправильную форму.

41.4. Дефекты кристаллических решёток – это нарушение правильности заполнения их узлов. Типы точечных дефектов: вакансии, атомы внедрения, атомы замещения. Дефекты кристаллических решёток увеличивают сопротивление металлов, изменяют концентрацию носителей заряда в полупроводниках.

42.1. Явление сверхпроводимости. У большой группы металлов и сплавов при температуре порядка несколько кельвин сопротивление скачком обращается в нуль.

42.2. При понижении температуры сопротивление полупроводников возрастает, следовательно, в сверхпроводящее состояние они перейти не могут.

42.3. С ростом температуры у полупроводников удельное сопротивление уменьшается, а у проводников – увеличивается.

42.4. Концентрация носителей заряда.

42.5. Чистый полупроводник имеет электронно-дырочную проводимость. После внесения индия как примеси основными носителями будут дырки. Кремний – элемент IV группы и имеет четыре валентных электрона. В чистом кристалле кремния каждый атом кремния образует с соседними атомами кремния четыре ковалентных связи. Индий – элемент III группы, потому у него три валентных электрона. Эти три валентных электрона атома индия образуют три, а не четыре ковалентных связи с соседними атомами кремния. Одна связь остается свободной. Но в результате теплового движения это вакантное место может двигаться по полупроводниковому кристаллу, при переходе валентных электронов из соседних связей. Создается впечатление, что по кристаллу движется свободный носитель, заряд который равен заряду электрона, но имеет противоположный, т.е. положительный знак.

42.6. Ширина запрещённой зоны полупроводников $\Delta E < 3$ эВ. В соответствии с этим критерием InP является полупроводником.

42.7. При очень низких температурах количество носителей (электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне) в полупроводнике уменьшается, поэтому их электропроводность уменьшается и становится такой же, как у диэлектрика. Полупроводниковые свойства при этом сохраняются.

42.8. При сильном нагревании количество электронов проводимости в полупроводнике резко увеличивается, и их электропроводность могла бы стать такой же у металлов. Но при таком нагревании полупроводники переходят в жидкое состояние, ковалентные связи разрываются, и это влечёт за собой исчезновение полупроводниковых свойств.

42.9. Знак носителя тока в полупроводнике можно определить по знаку холловской разности потенциалов.

42.10. Эффект Холла является одним из эффективных методов исследования носителей заряда, особенно в полупроводниках. Он позволяет оценивать концентрацию носителей и определять их знак, судить о количестве примесей в полупроводниках и характере химических связей.

43.1. Получить *p-n*-переход на основе германий-олово или кремний-олово нельзя, так как олово также четырёхвалентное, и атомы олова, попадая в решётку германия или кремния, не создадут в ней дополнительно ни дырок, ни электронов.

43.2. На них действует сила электрического поля, выбрасывающая их из области *p-n*-перехода.

43.3. Прямой ток создается основными носителями зарядов в полупроводниках, а обратный – неосновными. Концентрация основных носителей заряда значительно больше концентрации неосновных носителей.

44.1. В работе фоторезистора используется внутренний фотоэффект, благодаря которому фоторезистор изменяет свое электрическое сопротивление под действием излучения.

44.2. При внешнем фотоэффекте электроны выбиваются из вещества, а при внутреннем – остаются внутри него.

44.3. Металлическая пластинка зарядится положительно, полупроводниковая пластинка останется нейтральной.

45.1. С изменением направления тока тепло, которое выделяется в результате эффекта Джоуля – Ленца, не изменяет знак, а при эффекте Пельтье – изменяет, то есть нагревание сменяется его охлаждением.

КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Основы физики твёрдого тела»

№ вопр.	Код ответа	№ вопр.	Код ответа	№ вопр.	Код ответа
1	2	6	2	11	2
2	1,4	7	3	12	3
3	2,3,5	8	1	13	1
4	4	9	4	14	3
5	1,2	10	1	15	1

ЧАСТЬ 5. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА

Ядерная физика – раздел физики, изучающий структуру и свойства атомных ядер и их превращения: процессы радиоактивного распада и ядерные реакции.

Ядерная физика возникла до установления факта существования атомного ядра, её возраст можно исчислять со времени открытия радиоактивности. В качестве экспериментальных средств в ядерной физике используют ускорители заряженных частиц, ядерные реакторы, служащие мощными источниками нейтронов, детекторы частиц. Множество данных, получаемых в одном опыте, требует использования компьютеров, сопрягаемых непосредственно с регистрирующей аппаратурой.

Прикладное значение ядерной физики очень велико; её практические приложения широки и разнообразны – от ядерного оружия и ядерной энергетики до диагностики и терапии в медицине. Вместе с тем ядерная физика остается фундаментальной наукой, от прогресса которой можно ожидать выяснения глубоких свойств строения материи и открытия новых законов природы.

Глава 10. Атомное ядро

§46 Состав и размеры ядер. Энергия связи ядер

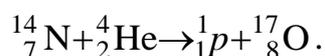
46.1 Состав ядра

Ядро – центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный электрический заряд. В состав ядра входит два вида частиц:

– протоны (1_1p);

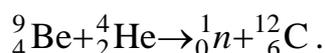
– нейтроны (1_0n).

Протон имеет положительный заряд, равный по величине заряду электрона: $q = +e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса протона $m_p = 1,00728$ а.е.м. $\approx 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Протон впервые получен Резерфордом* в 1919 году в результате ядерной реакции:



Протон – стабильная частица, тенденции к распаду не имеет.

Нейтрон не имеет заряда, т. е. $q = 0$. Масса нейтрона $m_n = 1,00866$ а.е.м. $\approx 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Открыт в 1932 году Чедвиком* при осуществлении реакции:



*Резерфорд Эрнест (1871–1937), английский физик, лауреат Нобелевской премии по химии 1908 г.

*Чедвик Джеймс (1891–1974), английский физик-экспериментатор, лауреат Нобелевской премии 1935 г.

В свободном состоянии нейтрон испытывает радиоактивный распад с периодом полураспада $T_{1/2} = 14,5$ мин.

В ядерной физике считается, что протон и нейтрон – это два зарядовых состояния одной частицы, которая называется **нуклоном**. Протон – протонное состояние нуклона с зарядом $+e$; нейтрон – нейтронное состояние нуклона с нулевым электрическим зарядом.

46.2 Характеристики атомного ядра

1. **Зарядовое число Z** . Оно равно числу протонов в ядре и определяет заряд ядра, который равен $Z \cdot e$, где e – величина заряда протона. Число Z соответствует порядковому номеру химического элемента в периодической системе элементов Менделеева.

В настоящее время известны ядра с зарядовыми числами от $Z = 1$ до $Z = 118$. Элементы с Z от 1 до 92, кроме Tc (технеция) с $Z = 43$ и Pm (прометия) с $Z = 61$, встречаются в природе. Элементы с Z от 93 до 118 получены искусственным путем. Их называют трансурановыми элементами. Pu (плутоний), $Z = 94$, обнаружен в природе в очень незначительных количествах в природном минерале – смоляной обманке.

2. **Массовое число ядра A** – целое число, ближайшее к атомной массе, выраженной в а.е.м. Оно определяет число нуклонов, т. е. общее число протонов и нейтронов в ядре: $A = N + Z$. Тогда число нейтронов

$$N = (A - Z). \quad (46.1)$$

Масса атомного ядра практически совпадает с массой всего атома, так как масса электронов очень маленькая. Напомним, что масса электрона в 1836 раз меньше массы протона. Массы атомов измеряют в атомных единицах массы (обозначается а. е. м.): $1 \text{ а. е. м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Ядра обозначаются тем же символом, что и нейтральный атом:

$${}^A_Z X \quad \text{или} \quad {}_Z X^A,$$

где X – символ химического элемента.

Массы атомов измерены с большой точностью. При измерениях были обнаружены изотопы и изобары.

Изотопы – ядра, имеющие одинаковый порядковый номер Z , но разное массовое число A . Водород имеет 3 изотопа: ${}^1_1\text{H}$ – протий, ${}^2_1\text{H}$ – дейтерий, которые являются стабильными и ${}^3_1\text{H}$ – тритий, являющийся радиоактивным. Кислород имеет 3 изотопа: ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{17}_8\text{O}$, ${}^{18}_8\text{O}$. В большинстве случаев изотопы обладают одинаковыми физическими свойствами (исключение водород H), т. к. они определяются в основном структурой электронных оболочек, а она у изотопов одинакова. В природе встречается 300 устойчивых изотопов химических элементов и имеется около 1000 искусственных (радиоактивных) изотопов.

Изобары – ядра, имеющие одинаковое массовое число A , но разный порядковый номер Z . Например, изобары бериллия: ${}^{10}_4\text{Be}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{10}_6\text{C}$. Изобары в основном встречаются среди тяжелых ядер.

46.3 Размеры ядер

Ядро является системой частиц, подчиняющихся законам квантовой механики и, следовательно, соотношениям неопределённостей Гейзенберга. Вследствие этого размеры области, в которой могут находиться ядерные частицы, могут быть заданы лишь с точностью, допускаемой этими соотношениями. В первом приближении ядро считается шаром, радиус которого определяется эмпирической формулой:

$$R = R_0 \sqrt[3]{A}, \quad (46.2)$$

где A – массовое число,

Величина $R_0 = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^{-15}$ м может быть истолкована как пропорциональность объёма ядра числу нуклонов. В ядерной физике принята следующая единица измерения размеров: 10^{-15} м = 1 Ф (ферми*).

Объём ядра пропорционален числу нуклонов, т. е. плотность ядерного вещества примерно одинакова ($\sim 10^{17}$ кг/м³). Очень высокая плотность говорит об исключительно высокой интенсивности ядерного взаимодействия.

46.4 Свойства ядерных сил

Ядерное взаимодействие между нуклонами называется **сильным взаимодействием**. Оно удерживает нуклоны на расстоянии $\sim 10^{-15}$ м друг от друга. Ядерные силы отличаются от ранее рассмотренных типов сил. Перечислим основные особенности этих сил.

1. Ядерные силы – это короткодействующие силы притяжения. Действуют на расстояниях $\sim 4,2$ ферми.
2. Ядерные силы являются зарядово независимыми. Это означает, что ядерные силы между двумя протонами, между протоном и нейтроном, а также между двумя нейтронами имеют одинаковую величину.
3. Ядерные силы не являются центральными. Они зависят не только от расстояния между нуклонами, но от ориентации их спинов.
4. Для ядерных сил характерно насыщение. Насыщение проявляется в том, что нуклон взаимодействует не со всеми остальными нуклонами ядра, а лишь с некоторыми ближайшими соседями, причём не со всеми, даже если они находятся в радиусе действия сил.
5. Ядерные силы имеют обменный характер. Считается, что взаимодействие между двумя частицами осуществляется благодаря обмену третьей частицей. В 1935 году Юкава* и Тамм* обнаружили, что эти частицы имеют массу покоя $m_0 = 200m_{0э}$, $m_{0э}$ – масса покоя электрона. Назвали эти частицы π -мезонами или пионами.

*Ферми Энрико (1901–1954), итальянский физик, лауреат Нобелевской премии 1938 г.

*Юкава Хидоки (1907–1981), японский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии 1949 г.

*Тамм Игорь Евгеньевич (1895–1971), российский физик, лауреат Нобелевской премии 1968 г.

46.5 Дефект массы ядра. Энергия связи

Масс-спектрометрические измерения показали, что масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов.

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}. \quad (46.3)$$

Величина Δm называется **дефектом массы**. В справочных таблицах приводятся массы атомов, а не ядер, поэтому выразим дефект массы через массу атома.

$$\begin{aligned} \Delta m &= Z m_p + (A - Z) m_n - m_a + Z m_e = \\ &= Z (m_p + m_e) + (A - Z) m_n - m_a = Z m_{\text{H}} + (A - Z) m_n - m_a, \end{aligned}$$

так как протон и электрон в сумме дают массу атома водорода:

$$m_p + m_e = m_{\text{H}}.$$

Таким образом,

$$\Delta m = Z m_{\text{H}} + (A - Z) m_n - m_a. \quad (46.4)$$

Всякому изменению массы должно соответствовать изменение энергии, т. е. при образовании ядра должна выделяться определённая энергия. И наоборот – для разделения ядра необходимо затратить такое же количество энергии, которое выделяется при его образовании.

Энергия связи ядра $E_{\text{св}}$ – минимальная энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны. Энергия связи:

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2 = (Z m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}) \cdot c^2.$$

Или

$$E_{\text{св}} = (Z m_{\text{H}} + (A - Z) m_n - m_a) \cdot c^2, \quad (46.5)$$

где c – скорость света.

Если массы выразить в а.е.м., то энергия связи вычисляется по формуле:

$$E_{\text{св}} = 931,5 \Delta m \quad (\text{МэВ}), \quad (46.6)$$

так как одной атомной единице массы соответствует атомная единица энергии

$$1 \text{ а. е. э.} = c^2 \cdot 1 \text{ а. е. м.} = 9 \cdot 10^{16} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 1,491 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,5 \text{ МэВ}.$$

Удельная энергия связи $\varepsilon_{\text{уд}}$ – энергия связи, приходящаяся на один нуклон. Она характеризует устойчивость (прочность) атомных ядер.

$$\varepsilon_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}. \quad (46.7)$$

Чем больше удельная энергия связи, тем устойчивее ядро. Зависимость удельной энергии связи от массового числа приведена на рис. 46.1. Для большинства элементов $\varepsilon_{\text{уд}} \approx 8 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$. Для сравнения: энергия связи валентных электронов $\sim 10 \text{ эВ}$ (в 10^6 раз меньше).

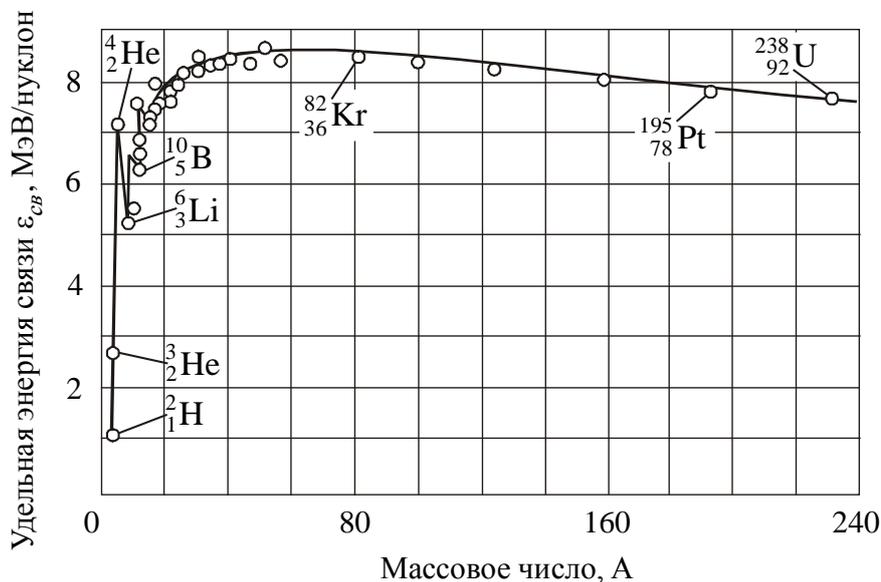


Рисунок 46.1

Наиболее устойчивыми являются ядра средней части периодической таблицы Менделеева. Легкие или тяжёлые ядра менее устойчивы, т. е. энергетически выгодны следующие процессы:

1. Деление тяжёлых ядер на более легкие (реакция деления). Реакции деления лежат в основе работы ядерных реакторов и ядерной бомбы.

2. Слияние легких ядер друг с другом в более тяжёлые (требуют температуры $T \sim 10^8 \text{ К}$, поэтому их называют термоядерными). Происходят в недрах Солнца и звезд. Неуправляемые термоядерные реакции происходят при взрыве водородной бомбы.

Это объясняется тем, что энергия будет выделяться при таких ядерных реакциях, при которых удельная энергия связи продуктов реакции будет превышать удельную энергию связи исходных ядер.

• **Давайте подумаем!**

46.1. Что понимают под термином «радиус ядра атома»?

46.2. Одинаковы ли по размеру ядра изотопов и изобар некоторого химического элемента?

46.3. При обстреливании ядер быстрыми частицами (в исследовательских целях), естественно, нет возможности целиться. В результате в ядра попадает крайне ничтожная доля снарядов. К какому выводу об относительных размерах ядер можно отсюда прийти?

46.4. Почему открыть нейтрон было значительно сложнее, чем открыть протон?

- 46.5.** Нуклоны способны притягиваться друг к другу. Почему же все ядра до сих пор не слились в одно гигантское ядро?
- 46.6.** О каком свойстве ядерных сил свидетельствуют относительно постоянные значения удельной энергии связи атомных ядер средней массы (см. рис. 46.1) ?
- 46.7.** Какие выводы относительно устойчивости атомных ядер можно сделать, анализируя вид графика зависимости удельной энергии связи $\varepsilon_{\text{уд}} = E_{\text{св}}/A$ ядер от массового числа A (см. рис. 46.1)?
- 46.8.** Пользуясь графиком зависимости удельной энергии связи от массового числа, выясните, какое из ядер ${}_{36}^{82}\text{Kr}$ или ${}_{92}^{238}\text{U}$ – образуются из отдельных нуклонов с большим выделением энергии?

§47 Ядерные превращения

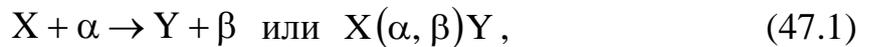
Существуют два типа ядерных превращений:

- ядерные реакции;
- радиоактивность.

47.1 Ядерные реакции

Ядерные реакции – это превращения атомных ядер при их взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом.

Символически ядерные реакции записываются в следующем виде:



где X и Y – исходное и конечное ядра;

α и β – бомбардирующая и испускаемая в ядерной реакции частица.

В любой ядерной реакции выполняются законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел:

Сумма зарядов ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов продуктов реакции (ядер и частиц).

Сумма массовых чисел ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме массовых чисел продуктов реакции (ядер и частиц).

Ядерная реакция характеризуется энергией ядерной реакции Q , равной разности энергий конечной и исходной пар в реакции:

$$Q = (\sum m_i - \sum m_k) \cdot c^2, \quad (47.2)$$

где $\sum m_i$ – сумма масс частиц до реакции;

$\sum m_k$ – сумма масс частиц после реакции.

Ядерные реакции могут быть:

а) экзотермическими (с выделением тепла), при этом $\sum m_i > \sum m_k$ ($Q > 0$);

б) эндотермическими (с поглощением тепла), при этом $\sum m_i < \sum m_k$ ($Q < 0$).

Если массы выразить в а. е. м., то энергия ядерной реакции вычисляется в МэВ (мегаэлектрон-вольтах) по формуле:

$$Q = 931,5 \cdot (\sum m_i - \sum m_k). \quad (47.3)$$

47.2 Радиоактивность

47.2.1 Общие сведения

Радиоактивность – явление самопроизвольного (спонтанного) распада ядер, при котором образуется новое ядро, и испускаются частицы.

Ядро, испытывающее распад, называется материнским, возникающее ядро называется дочерним.

Естественная радиоактивность наблюдается в основном у тяжёлых ядер, которые располагаются в периодической системе Менделеева за свинцом. Открыто явление Анри Беккерелем* в 1896 году.

В зависимости от того, какая частица испускается, различают следующие виды распада:

1. **α -распад** – испускание альфа-частиц, т. е. ядер гелия – ${}^4_2\text{He}$.

Сущность процесса заключается в вылете из ядра двух протонов и двух нейтронов, связанных в одну α -частицу:



Альфа-излучение отклоняется электрическими и магнитными полями, обладает высокой ионизирующей способностью и слабой проникающей способностью (поглощается, например, слоем алюминия толщиной 0,05 мм).

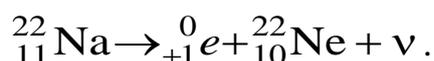
2. **β -распад** – испускание:

а) электронов – e^- (β^- -распад)

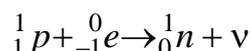


При β^- -распаде ядро испускает две частицы – электрон и антинейтрино, которые в ядре не присутствуют, а появляются в самом акте распада в результате превращения нейтрона в протон.

б) позитронов – e^+ (β^+ -распад)



в) K -захват (электронный захват). Превращение протона в нейтрон идёт по схеме



Электронный захват заключается в том, что один из электронов на ближайшем к ядру K -слое атома захватывается ядром. Здесь ν и $\tilde{\nu}$ – электронные нейтрино и антинейтрино.

*Беккерель Антуан Анри (1852–1908), французский физик, лауреат Нобелевской премии 1903 г.

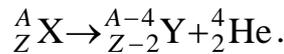
Бета-излучение отклоняется электрическими и магнитными полями, обладает сравнительно слабой ионизирующей способностью и относительно высокой проникающей способностью (поглощается слоем алюминия толщиной около 2 мм).

3. **Гамма-излучение (γ -излучение)** – это жёсткое электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda < 10^{-10}$ м.

Гамма-излучение не отклоняется электрическими и магнитными полями, обладает сравнительно слабой ионизирующей способностью и очень высокой проникающей способностью, так как энергия квантов $\geq 10^4$ эВ (проходит через слой свинца толщиной 5 см).

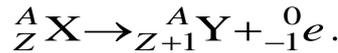
При анализе результатов радиоактивных распадов опытным путем были открыты правила смещения (правила Фаянса* и Содди*).

1) при α -распаде:



α -распад уменьшает массовое число на 4, а зарядовое на 2, т. е. дочерний элемент смещается на две клетки влево в таблице Д. И. Менделеева.

2) при β -распаде:



β -распад не изменяет массового числа, зарядовое число увеличивает на единицу, т. е. дочерний элемент смещается на 1 клетку вправо.

47.2.2 Закон радиоактивного распада

Радиоактивный распад уменьшает с течением времени число нераспавшихся ядер. Самопроизвольный распад ядер подчиняется закону радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (47.4)$$

где N_0 – число ядер в данном объеме вещества в момент времени $t = 0$;

N – число ядер в том же объеме к моменту времени t ;

λ – постоянная распада.

Постоянная распада λ – это физическая величина, численно равная доле ядер, распадающихся за единицу времени:

$$\lambda = \frac{dN}{N dt}. \quad (47.5)$$

$$[\lambda] = \text{с}^{-1}.$$

*Фаянс Казимир (1887–1975), американский химик и физик, поляк по происхождению.

*Содди Фредерик (1877–1956), английский химик, лауреат Нобелевской премии по химии 1921 г.

Таким образом, постоянная распада определяет скорость радиоактивного распада.

Величина $\tau = 1/\lambda$ называется *средней продолжительностью жизни* (среднее время жизни) радиоактивного изотопа.

Для оценки устойчивости ядер обычно используют не постоянную распада, а величину, которая называется периодом полураспада.

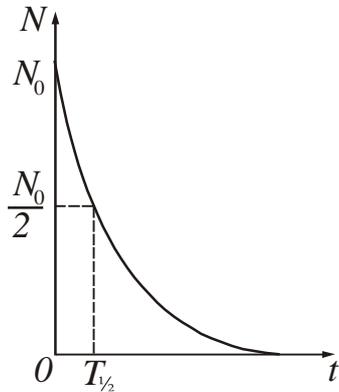


Рисунок 47.1

Период полураспада ($T_{1/2}$) – время, в течение которого распадается половина первоначального количества ядер данного радиоактивного вещества (рис. 47.1). Период полураспада может меняться в очень широких пределах (от долей секунд до тысяч лет). Период полураспада и постоянная распада связаны следующим соотношением:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (47.6)$$

Закон самопроизвольного радиоактивного распада основывается на двух предположениях: 1) постоянная распада не зависит от внешних условий; 2) число ядер, распадающихся за время dt пропорционально начальному количеству ядер N_0 . Это означает, что закон радиоактивного распада является статистическим законом. Статистические законы можно применять только к большому количеству ядер. Закон радиоактивного распада не отвечает на вопрос, какое именно ядро распадется, т. к. все ядра неразличимы и распад данного ядра является случайным событием, имеющим ту или иную вероятность.

Часто бывает, что возникающие в результате радиоактивных превращений ядра в свою очередь оказываются радиоактивными. Новые продукты распада также могут оказаться радиоактивными, т. е. возникает целый ряд радиоактивных превращений. В природе существуют три радиоактивных ряда, родоначальниками которых служат уран ($^{238}_{92}\text{U}$), торий ($^{232}_{90}\text{Th}$) и актиний ($^{235}_{89}\text{Ac}$). Конечным продуктом во всех случаях служат изотопы свинца.

Для исследования радиоактивных изотопов обычно используют препараты. **Препарат** – это определённое количество радиоактивного вещества, специально приготовленного для эксперимента, например, нанесённого на подложку или заключённого в оболочку.

Активность a препарата (радиоактивного источника) – число распадов, происходящих за единицу времени:

$$a = \frac{dN}{dt}. \quad (47.7)$$

$$[a] = 1 \frac{\text{расп}}{\text{с}} = 1 \text{ Бк} \quad (\text{беккерель}).$$

Для измерения активности допускается применение внесистемной единицы – кюри* (Ки).

1 кюри – активность препарата, в котором происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду.

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк.}$$

Такой активностью обладает 1 г радия.

Активность препарата равна произведению постоянной распада λ на число N нераспавшихся атомов, содержащихся в этом препарате:

$$a = -\lambda N. \quad (47.8)$$

Знак « $-$ » означает, что активность с течением времени уменьшается.

Заменяя N по формуле (47.4), получим закон изменения активности:

$$a = a_0 e^{-\lambda t}, \quad (47.9)$$

где a_0 – активность в момент времени $t = 0$.

Удельная активность $a_{\text{уд}}$ – активность, отнесённая к единице массы вещества.

$$a_{\text{уд}} = \frac{a}{m}. \quad (47.10)$$

$$[a_{\text{уд}}] = 1 \frac{\text{Бк}}{\text{кг}}.$$

47.3 Использование явления радиоактивности для измерения времени

Явление радиоактивности может играть роль часов. Используя закон радиоактивного распада (47.4)

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

можно получить формулу для определения времени существования ядер

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N}. \quad (47.11)$$

В качестве N обычно берётся количество нераспавшихся ядер в настоящее время, поэтому приведённая формула определяет возраст данной совокупности радиоактивных ядер.

Для определения возраста минералов, содержащихся в земной коре, нужно брать «геологические» часы, то есть использовать процессы с периодом полураспада того же порядка, что и геологические эпохи – сотни миллионов и миллиарды лет.

*Кюри (Склодовская) Мария ((1867–1934), польский и французский физик и химик, лауреат Нобелевской премии по физике 1903 г., лауреат Нобелевской премии по химии 1911 г.

*Кюри Пьер (1859–1906), французский физик, лауреат Нобелевской премии 1903 г.

Этому условию отвечают изотопы урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ ($T_{1/2} = 4,46 \cdot 10^9$ лет) и ${}_{92}^{235}\text{U}$ ($T_{1/2} = 7,04 \cdot 10^8$ лет). Продуктом распада изотопов урана являются изотопы свинца. По соотношению свинца и урана можно рассчитать промежуток времени, в течение которого накопилось данное количество свинца вследствие распада урана.

В археологии для определения возраста предметов, найденных при раскопках, используют радиоактивный распад с периодом полураспада порядка нескольких столетий или тысячелетий (углерод ${}^6_{14}\text{C}$, $T_{1/2} = 5730$ лет). В живом растении или животном процентное содержание радиоактивного углерода по сравнению с обычным углеродом остается постоянным, так как потери углерода восполняются питанием. С момента гибели организма начинают идти радиоактивные часы: содержание радиоактивного углерода в организме или изделии из органических материалов начинает убывать в соответствии с законом радиоактивного распада. Таким образом, можно определить время, прошедшее с момента гибели организма или время жизни предмета, сделанного из органического материала.

47.4 Гамма-излучение

Гамма-лучи (γ -лучи) представляют собой коротковолновое электромагнитное излучение. Так как γ -излучение обладает очень малой длиной волны ($\lambda \leq 10^{-10}$ м), то, вследствие этого, оно имеет ярко выраженные корпускулярные свойства, то есть является потоком частиц – гамма-квантов.

Испускание γ -квантов не является, как правило, самостоятельным видом излучения. Оно сопровождает α - и β -распады. Массовое и зарядовое число при γ -распаде не изменяются.

Различают:

- мягкое γ -излучение с энергией квантов $\varepsilon \sim \text{кэВ}$;
- жесткое γ -излучение с энергией квантов $\varepsilon \sim \text{МэВ}$.

γ -излучение может взаимодействовать с электронной оболочкой атомов и молекул, вызывая их ионизацию, а также с ядрами. При прохождении γ -лучей через вещество происходит их ослабление. Изменение интенсивности гамма-излучения подчиняется закону:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (47.12)$$

где I_0 – интенсивность γ -излучения, падающего на поверхность вещества;

μ – коэффициент линейного ослабления γ -лучей в веществе, зависящий от природы вещества и спектрального состава потока γ -излучения;

x – толщина поглощающего слоя.

γ -излучение может вызывать в веществе различные процессы:

- 1) фотоэффект (существенное значение имеет для мягкого излучения, $\varepsilon \sim 10^4 - 10^5$ эВ);
- 2) эффект Комптона ($\varepsilon \sim 0,5$ МэВ);
- 3) рождение электронно-позитронных пар:

$$\gamma \rightarrow {}_{-1}^0e + {}_{+1}^0e.$$

Большая энергия γ -квантов объясняет их высокую проникающую способность, поэтому γ -излучение применяют во многих областях. Например:

- γ -дефектоскопия – метод обнаружения дефектов в изделии путем просвечивания их γ -лучами. Повреждения обнаруживаются по различной интенсивности γ -лучей, прошедших через исследуемую поверхность. Так исследуют размеры и формы дефектов (трещины, раковины, непроваренные швы и т.д.).
- Медицина – лучевая терапия, стерилизация инструментов и помещений.
- Пищевая промышленность – стерилизация продуктов питания.
- Получение мутаций с последующим отбором хозяйственно-полезных форм. Так выводят высокопродуктивные сорта микроорганизмов (например, для получения антибиотиков) и растений.

• **Давайте подумаем!**

- 47.1. Ядро ${}_{92}^{238}\text{U}$ разделяется на две равные части. Будут ли получившиеся таким путем ядра устойчивы или они будут радиоактивны?
- 47.2. Чем объясняется тот факт, что, α -радиоактивными оказываются именно тяжёлые ядра?
- 47.3. Почему при электронном захвате (К-захвате) с большей вероятностью захватываются s -электроны и с меньшей вероятностью – электроны из других оболочек?
- 47.4. Отличается ли спектр электромагнитного излучения, которое испускается атомными ядрами, от спектра, который испускает атом, и если отличается, то чем?
- 47.5. Бомбардируя ядра одного элемента ядрами другого (соответствующим образом подобранного), можно получить (в принципе) любой элемент. Почему это открытие не используют для промышленного получения золота или платины?
- 47.6. И атом водорода, и нейтрон могут распадаться на протон и электрон. Почему же атом водорода не считают элементарной частицей, а нейтрон причисляют к ним?
- 47.7. В чём заключается назначение ядерного реактора?

§48 Элементарные частицы

Элементарными называются частицы, которым нельзя приписать внутренней структуры, являющейся простым соединением других стабильных частиц. При взаимодействии с другими частицами и полями элементарная частица ведёт себя как единое целое. Термин «элементарная частица» является условным. Элементарные частицы могут превращаться друг в друга. У каждой частицы, кроме фотона, есть ещё и античастица, т. е. частица с противоположным знаком. Уже известно более трёхсот элементарных частиц. Элементарные частицы получают на мощных циклотронах, синхротронах и других ускорителях.

Есть элементарные частицы, возникающие при прохождении через атмосферу космических лучей. Они существуют несколько миллионов долей секунды, а потом распадаются, превращаясь в другие элементарные частицы, или испускают энергию в виде излучения.

- В основе классификации элементарных частиц лежат их различия по массам покоя: **фотоны** – кванты электромагнитного поля (не имеют массы покоя и электрического заряда); **лептоны** (от греч. *leptos* – лёгкий); **мезоны** (средние, промежуточные частицы); **барионы** (тяжелые частицы). Барионы разделяются на **нуклоны** и **гипероны**.

- По наличию электрического заряда различают положительные, отрицательные и нейтральные частицы.

- По значениям спина элементарные частицы делят на частицы с полуцелым, целым и нулевым спином (в единицах \hbar). В зависимости от значения спина группы (ансамбли) частиц подчиняются разным квантовым статистикам. Частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми – Дирака*, поэтому их называют **фермионами**. Частицы, обладающие целочисленным спином (в частности нулевым) подчиняются статистике Бозе – Эйнштейна*, поэтому их называют **бозонами**.

- По времени жизни частицы делятся на стабильные и нестабильные.

Между элементарными частицами существует четыре вида взаимодействия: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное. Виды взаимодействий перечислены в порядке убывания их интенсивности.

Сильное взаимодействие. Обеспечивает связь нуклонов в ядре, а также процессы рождения и распада мезонов и гиперонов в ядерных взаимодействиях при высоких энергиях. Наибольшее расстояние, на котором проявляется сильное взаимодействие (радиус действия), составляет примерно 10^{-15} м. Процессы, в которых проявляется сильное взаимодействие, являются быстрыми, время порядка 10^{-23} с. Сильно взаимодействующие частицы имеют общее название – **адроны** (от греч. *adros* – сильный).

Электромагнитное взаимодействие. Характеризует процессы, обусловленные наличием у частиц электрического заряда: кулоновское отталкивание протонов в ядре, рождение и уничтожение электронно-позитронных пар. Радиус действия не ограничен.

Слабое взаимодействие. Характеризует процессы, происходящие с лептонами. Примерами таких процессов являются все виды распада ядер, в том числе процессы взаимодействия нейтрино с веществом. Является короткодействующим. Слабые взаимодействия являются наиболее медленными из всех взаимодействий, проявляющихся в микромире, и протекают за время $\sim 10^{-10}$ с.

*Ферми Энрико (1901–1954), итальянский физик, лауреат Нобелевской премии 1938 г.

*Дирак Поль Адриен Морис (1902–1984), английский физик, лауреат Нобелевской премии 1933 г.

*Бозе Шатъендранат (1894–1974), индийский физик.

*Эйнштейн Альберт (1879–1955), немецкий физик, лауреат Нобелевской премии 1921 г.

Гравитационное взаимодействие. Гравитационное взаимодействие существует между всеми частицами без исключения, но в микромире ощутимой роли не играет. Радиус действия не ограничен.

Дадим краткую характеристику частиц.

К **лептонам** относятся мюоны, электроны, электронные нейтрино и мюонные нейтрино. Спин всех лептонов $\frac{1}{2}$, следовательно, они являются фермионами. Все лептоны обладают слабым взаимодействием. Те из них, которые имеют электрический заряд (электроны и мюоны), обладают электромагнитным взаимодействием.

Среди лептонов наиболее известен электрон. В природе широко распространён ещё один лептон – мюон. Обнаружен в космических лучах в 1936 году. Мюон похож на электрон, но является нестабильной частицей. Фоновое космическое излучение в большей части состоит из мюонов. В конце 70-х был обнаружен третий заряженный лептон – тау-лептон. Его масса в 3500 раз больше массы электрона. Ещё один лептон – нейтрино. Это самый распространённый и самый неуловимый лептон во Вселенной. Он не участвует ни в сильном, ни в электромагнитном взаимодействиях. Нейтрино бывает трёх видов – электронное, мюонное и тау-нейтрино. После предсказания нейтрино было обнаружено только через 30 лет на ускорителях. У каждого лептона есть античастица, всего их 12.

Мезоны – сильно взаимодействующие нестабильные частицы. Сильное взаимодействие проявляется при взаимодействии мезонов между собой, а также при взаимодействии между мезонами и бозонами. Спин всех мезонов равен нулю, следовательно, они являются бозонами.

Барионы объединяют в себе нуклоны (протон и нейтрон) и нестабильные частицы с массой, большей массы нуклонов. Эти частицы называются гиперонами. Они бывают электрически заряженными и нейтральными. Все барионы обладают сильным взаимодействием и активно взаимодействуют с атомными ядрами. Спин всех барионов равен $\frac{1}{2}$, поэтому они являются фермионами. Все барионы, за исключением протона, являются нестабильными. Мезоны и барионы, как сильно взаимодействующие частицы, часто объединяют в одну группу адронов.

Элементарных частиц открыто так много, что появились сомнения в их «элементарности». В 1964 году Гелл-Манн* выдвинул гипотезу, согласно которой все элементарные частицы построены из трёх частиц, названных **кварками**. Этим частицам приписываются дробные квантовые числа, в частности электрический заряд, равный $+\frac{2}{3}$, $-\frac{1}{3}$, $-\frac{1}{3}$ заряда электрона, соответственно для каждого из трёх кварков.

Все кварки имеют спин $\frac{1}{2}$, т. е. относятся к фермионам. Считается, что они сцепляются сильным взаимодействием, но участвуют и в слабом. В дальнейшем систему кварков пришлось расширить, так как связанные состояния из трёх кварков противоречили принципу Паули: в одной системе не может быть двух кварков с одинаковым набором квантовых чисел.

Сейчас считают, что существует 12 кварков. Шесть из них – это частицы с экзотическими именами – «верхний», «нижний», «очарованный», «странный», «истинный», «прелестный».

*Гелл-Манн Марри (1929), американский физик, лауреат Нобелевской премии 1969 г.

Например, протон состоит из двух «верхних» кварков и одного «нижнего». Нейтрон – из двух «нижних» и одного «верхнего». Каждый атом состоит из ядра (сильно связанных протонов и нейтронов), окружённого электронным облаком.

Гипотеза кварков позволила систематизировать уже известные частицы и предсказать новые. Ответ на вопрос о том, являются ли кварки и лептоны основными «кирпичикам природы», пока не получен, его ищут в современной космологии, а также с помощью ускорителей.

Подтверждением того, что мы ещё многого не знаем об элементарных частицах, является открытие осцилляций нейтрино, которые говорят о наличии у нейтрино массы. Нейтрино рождаются в процессе ядерных и термоядерных реакций, поэтому источником электронных нейтрино является Солнце (электронные нейтрино иногда называют солнечными). Долгое время нейтрино считали невесомыми.

Более 30 лет рожденные в недрах Солнца частицы озадачивали ученых. Приборы регистрировали в 2-3 раза меньше нейтрино, чем предсказывала теория. Как выяснилось, по пути к Земле нейтрино никуда не исчезают, а видоизменяются. Процесс перехода нейтрино из одного вида в другой называется *осцилляцией*. Такие переходы возможны лишь при условии, что нейтрино должны иметь массу. Масса этих частиц ничтожно мала, но она отлична от нуля.

Открытие изменило наше представление о материи и может решающим образом изменить представление о Вселенной. Природный поток нейтрино несёт в себе богатейшую, и во многих отношениях уникальную, информацию об окружающем нас мире. Исследование этого потока позволит изучить ранние стадии эволюции Вселенной, процессы формирования химических элементов, механизмы эволюции массивных звёзд и взрывов Сверхновых, состав и внутреннее строение Солнца сегодня и в достаточно удалённом прошлом, и даже продвинуться в понимании проблемы внутреннего строения одного из наиболее трудных для изучения объектов – планеты Земля.

За открытие осцилляций нейтрино и обнаружение у них массы Такааки Каите (Япония) и Артуру Б. Макдональду (Канада) присуждена Нобелевская премия по физике за 2015 год.

Глава 11. Элементы дозиметрии

§49 Элементы дозиметрии ионизирующих излучений

Об опасности, возникающей при работе с радиоактивными веществами, рентгеновским излучением и другими источниками ионизирующих излучений известно давно. Первоначально развитие дозиметрии определялось главным образом необходимостью защиты от воздействия рентгеновского и γ -излучения естественных радиоактивных веществ. Защита человека от вредного действия ионизирующих излучений сводится к защите от внешних потоков излучения (внешнее облучение) и от попадания радиоактивных веществ внутрь организма (внутреннее облучение).

В настоящее время под *дозиметрией* понимают измерения, исследования и теоретические расчёты тех характеристик ионизирующих излучений, от которых зависят радиационные эффекты в облучаемых объектах живой и неживой природы.

49.1 Характеристики ионизирующих излучений

1. **Поглощённая доза D** – отношение энергии ионизирующего излучения, поглощённой облучаемым веществом, к массе этого вещества:

$$D = \frac{W}{m}.$$

$$[D] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \text{Гр} \quad (\text{грей}^*)$$

Поглощённая энергия расходуется на нагрев вещества и на его химические и физические превращения. Величина дозы зависит от вида излучения, энергии его частиц, плотности их потока и от состава облучаемого вещества. При прочих равных условиях доза тем больше, чем больше время облучения, то есть доза накапливается со временем.

Широко распространена внесистемная единица дозы – рад (от англ. radiation absorbed dose):

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}.$$

2. **Мощность дозы излучения N** – доза, отнесённая к единице времени:

$$N = \frac{D}{t},$$

$$[N] = \text{Гр/с}.$$

3. **Экспозиционная доза излучения $D_{\text{Э}}$** – доза рентгеновского и γ -излучения, определяемая по ионизации воздуха. Она определяется как отношение суммарного заряда всех ионов одного знака $\sum_{i=1}^N q_i$, созданных в единице объёма воздуха, к массе воздуха Δm в этом объёме:

$$D_{\text{Э}} = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{\Delta m}.$$

$$[D_{\text{Э}}] = \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Экспозиционная доза в 1 Кл/кг означает, что суммарный заряд всех ионов одного знака, образованных в 1 кг воздуха, равен 1 Кл.

Внесистемной единицей экспозиционной дозы является рентген* (Р): $1 \text{ Р} = 2,57976 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$, что соответствует образованию $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 см^3 воздуха (при 0°C и 760 мм рт. ст.)

4. **Эквивалентная доза H** – оценивается по биологическому воздействию ионизирующего излучения. При облучении живых организмов, в частности человека, возникают биологические эффекты, величина которых при одной и той

*Грей Льюис Харольд (1905–1965), английский физик и радиобиолог.

*Рентген Вильям Конрад (1845–1923), немецкий физик, лауреат Нобелевской премии 1901 г.

же поглощённой дозе различна для разных видов излучения. Таким образом, знание поглощённой дозы недостаточно для оценки радиационной опасности. Принято сравнивать биологические эффекты, вызываемые любыми ионизирующими излучениями, с эффектами от рентгеновского и γ -излучения. Коэффициент, показывающий, во сколько раз радиационная опасность в случае хронического облучения человека (в сравнительно малых дозах) для данного вида излучения выше, чем рентгеновского излучения при одинаковой поглощённой дозе, называется коэффициентом качества излучения (K). Для рентгеновского и γ -излучения $K = 1$. Для всех других ионизирующих излучений K устанавливается на основании радиобиологических данных. Все эти величины используются при установлении норм радиационной безопасности.

Эквивалентная доза H определяется как произведение поглощённой дозы на коэффициент качества излучения:

$$H = D \cdot K$$

Эквивалентная доза может измеряться в тех же единицах, что и поглощённая.

Однако существует специальная единица эквивалентной дозы – бэр (биологический эквивалент рентгена). Эквивалентная доза в 1 бэр соответствует поглощённой дозе в 1 рад при $K = 1$. Единица эквивалентной дозы СИ – зиверт* (Зв).

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$$

Основные сведения о характеристиках ионизирующих излучений обобщены в таблице 48.1.

Радиационный контроль и измерение доз осуществляется дозиметрическими приборами. *Дозиметрические приборы* (дозиметры) – это устройства для измерения доз ионизирующих излучений и их мощностей. Основными частями дозиметрических приборов являются детектор и измерительное устройство. В зависимости от типа детектора дозиметры делятся на

- ионизационные (с ионизационной камерой, пропорциональными счетчиками или счётчиками Гейгера),
- радиолюминесцентные (сцинтилляционные, термо- и фотолюминесцентные),
- полупроводниковые,
- фотографические,
- химические,
- калориметрические.

Дозиметрические приборы существуют для измерения одного вида излучения (например, нейтронные дозиметрические приборы, γ -дозиметры и др.) либо для измерения в полях смешанного излучения.

*Зиверт Рольф Максимилиан (1896–1966), шведский физик.

Таблица.49.1 Характеристики ионизирующих излучений

Характеристика и её обозначение	Определение	Единица измерения в СИ	Внесистемная единица измерения
Поглощённая доза, D $D = \frac{W}{m}$	Отношение энергии ионизирующего излучения, поглощённой веществом, к массе этого вещества	Грей (Гр) 1 Гр = 100 рад	рад 1 рад = 0,01 Гр
Мощность поглощённой дозы, N $N = \frac{D}{t}$	Энергия ионизирующего излучения, поглощённая 1 кг вещества за единицу времени	Гр/с 1 Гр/с = 100 рад/с	рад/с 1 рад/с = 0,01 Гр/с
Экспозиционная доза излучения. $D_{\text{э}}$ $D_{\text{э}} = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{\Delta m}$	Отношение суммарного заряда всех ионов одного знака $\sum_{i=1}^N q_i$, созданных в единице объёма воздуха, к массе воздуха Δm в этом объёме	Кл/кг 1 Кл/кг = $3,86 \cdot 10^3$ Р	Рентген (Р) 1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
Эквивалентная доза, H $H = D \cdot K$	Произведение поглощённой дозы на коэффициент K качества излучения	Зиверт (Зв) 1 Зв = 100 бэр 1 Зв = $K \cdot 1$ Гр	Бэр 1 бэр = 0,01 Зв 1 бэр = $K \cdot 1$ рад
Мощность эквивалентной дозы $N_{\text{э}} = \frac{D_{\text{э}}}{t}$	Эквивалентная доза, поглощённая за единицу времени	Зв/с 1 мкЗв/с = 100 мкР/с	мкР/ч 1 мкР/ч = 0,01 мкЗв/ч

49.2 Основные нормативные данные по радиационному фактору

Естественный радиоактивный фон складывается из излучения естественных радиоактивных элементов горных пород и космического излучения. Интенсивность космического излучения зависит от широты места и высоты над уровнем моря. С ним связано образование некоторого количества углерода-14, трития, бериллия-7 и некоторых других природных радионуклидов. Природная радиоактивность горных пород варьирует в широких пределах в зависимости от геологического строения региона. Она обусловлена преимущественно долгоживущими элементами – ураном-238, торием-232, калием-40 и др. Естественный радиационный фон, с учётом техногенных факторов, колеблется от 0,10 до 0,25 мкЗв/с (от 10 до 25 мкР/час).

На изменение радиационного фона значительное влияние оказывает деятельность человека. Атомные и тепловые электростанции, заводы по переработке ядерных материалов являются источником радиоактивных отходов. Возможна утечка радиоактивных продуктов через нерасплавленное топливо, выделение продуктов деления при окислении топлива, плавление тепловыделяющих элементов с последующим испарением и аварии с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу.

При эксплуатации ТЭС, ТЭЦ в качестве топлива используется уголь, в котором в малых количествах содержатся радионуклиды. После сжигания углей в топках большая часть минеральных компонентов спекается в шлак и золу, а лёгкая зольная пыль с радиоактивными веществами уносится в трубы электростанций. На уровень радиоактивности влияют промышленные и горнодобывающие предприятия, предприятия по добыче и переработке радиоактивного сырья, аварии транспортных средств, возникающие при перевозке сырья, и т. д.

Критерием, служащим основой комплекса защитных мероприятий, является установление предельно-допустимых доз облучения. Этот вопрос является очень сложным. Сложность его заключается в том, что ни одна доза излучения, превышающая естественный фон не может считаться абсолютно «безопасной».

Дозовые нагрузки регламентируются на основе следующих принципов:

- никакой вид использования ионизирующих излучений не должен вводиться в практику, если он не приносит реальной «чистой» пользы;
- все дозы облучения должны поддерживаться на таких низких уровнях, какие только можно разумно достичь с учётом экономических и социальных факторов;
- эквивалентная доза облучения отдельных лиц не должна превышать предела, рекомендуемого Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ) для соответствующих условий.

Допустимая доза – это такая доза, ежедневное облучение которой в течение многих лет в свете современных научных данных не должно вызвать у человека необратимых изменений в организме в течение всей жизни. На основе допустимых доз облучения рассчитываются предельно-допустимые потоки ионизирующих излучений и предельно-допустимые концентрации радиоактивных веществ в воде и воздухе. Кроме того, рассчитываются и сооружаются защитные стены, экраны и другие устройства, защищающие человека.

По рекомендациям Международной комиссии по радиационной защите установлены **нормативные дозы** облучения, которые могут воздействовать на людей:

- профессиональные работники в области радиации (категория А) – лица, которые постоянно или временно работают непосредственно с источниками ионизирующих излучений). Предельно допустимая доза облучения составляет 2 бэра в год (20 мЗв);
- лица, которые не работают непосредственно с источниками ионизирующего излучения, но по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воздействию радиоактивных веществ или других источников излучения, применяемых в учреждении или удаляемых во внешнюю среду

объектами с радиационно-ядерными технологиями (категория Б). Предельно допустимая доза облучения составляет 0,2 бэра в год (2 мЗв);

- всё население (категория В). Установленный норматив получаемой дозы составляет 0,01 бэр (100 мбэр или 1 мЗв).

Доза от естественного космического ионизирующего излучения колеблется в пределах 100 – 200 мбэр.

Согласно Нормам радиационной безопасности *предельно допустимые* нормы составляют:

- 5 бэр в год (за 50 лет жизни – 250 бэр) – для специалистов категории А;
- 0,5 бэр в год (за 70 лет жизни 35 бэр) – для лиц категории Б;
- 0,05 бэр в год – для остального населения (категория В).

§50 Основные этапы развития физической картины мира

Физика зародилась в античный период человеческой истории и прошла в своей истории несколько этапов.

В XVII – XVIII веках произошло становление физики как точной науки, опирающейся на эксперимент, и были заложены основы теоретической физики. Научные поиски и исследования, проведённые на протяжении многих веков, позволили И. Ньютону сформулировать фундаментальные законы механики – науки о механическом движении материальных тел и взаимодействиях между ними (1687 г., «Математические начала натуральной философии»). Основной идеей механики Ньютона была идея корпускулярности, дискретности материи. Согласно этой теории все тела должны состоять из абсолютно твёрдых частиц, находящихся в непрерывном движении. Все явления природы следовало рассматривать как проявление механических процессов. Многообразие природы по Ньютону заключалось в различии движения частиц. Картина мира была доведена до образа гигантской механической машины, работа которой предопределялась однозначными законами.

Таким образом, на протяжении XVII – XVIII веков сложилась *механическая картина* мира, которая явилась важной ступенью не только в развитии физики, но и наук о природе вообще. Её основные положения сводятся к следующему.

1. Законы механики пригодны для всех уровней материального мира, включая явления микромира и явления космического масштаба.
2. В мире нет объективной случайности, всё можно характеризовать однозначными причинно-следственными связями. Любая случайность является проявлением неполноты знаний о природе.
3. В механической картине отсутствует развитие; природа в ней предстаёт абсолютно неизменной. Взаимодействие между телами передаётся мгновенно (теория дальнодействия).
4. Всё сложное можно изучить посредством изучения частей.
5. Наблюдатель не влияет на исследуемое явление.

Следующий этап развития физики начался в XIX веке с экспериментальных исследований, выполненных Г. Эрстедом, А. Ампером и М. Фарадеем. Было введено понятие поля, а также установлена связь между электрическими и

магнитными полями. Д. Максвелл обобщил результаты экспериментов и ввёл понятие электромагнитного поля, в котором переменные электрические и магнитные поля взаимосвязаны (1873 г., «Трактат по электричеству и магнетизму»). Из полученной Максвеллом системы уравнений следовал важный вывод о существовании нового физического явления, а именно: электромагнитное поле способно существовать в виде электромагнитных волн. Господство механической картины мира закончилось, начала формироваться **электромагнитная картина мира**.

Исследования, связанные с электромагнетизмом и измерением скорости света, привели к новым важным положениям.

1. Электромагнитное поле – это особый вид материи.
2. Взаимодействие между заряженными телами осуществляется с конечной скоростью, равной скорости света в вакууме посредством электромагнитного поля (теория близкодействия).
3. Не существует абсолютной системы отсчёта с выделенными свойствами. Относительность распространяется не только на механические, но и на электромагнитные явления.

Созданная в 1905 году А. Эйнштейном специальная теория относительности (СТО) распространила принцип относительности на все физические явления. Открытие постоянства скорости света в вакууме позволило отделить движение с малыми скоростями (по сравнению со скоростью света) в область, где остаётся справедливой ньютоновская механика.

Теория относительности изменила классическое представление об объективности познания, в соответствии с которым описание явлений не зависит от наблюдателя. Из её положений вытекает, что наблюдатель является частью наблюдаемого мира. Но теория относительности по-прежнему считала вероятностное описание природных процессов следствием недостаточной полноты знаний о природе.

Объяснить все явления, происходящие в мире, с помощью законов электродинамики не удалось.

Первым шагом к созданию **квантовой** физики была гипотеза М. Планка, сформулированная в 1900 году: атомы излучают свет дискретными порциями, квантами. Гипотеза Планка о корпускулярном характере электромагнитного излучения не предусматривала дискретность поля, оно рассматривалось как непрерывное в пространстве образование. А. Эйнштейном для объяснения закономерностей фотоэффекта было высказано предположение, что свет не только излучается, но и распространяется, а также поглощается веществом дискретными порциями, квантами. Отличие заключается в том, что Эйнштейн рассматривает свет как пространственно обособленные частицы – кванты, названные затем фотонами.

Следующий этап развития квантовой физики связан с тем, что классическая физика не смогла объяснить планетарную модель атома, вытекающую из опытов Э. Резерфорда. С позиций классической физики не удалось объяснить линейчатые спектры испускания и поглощения атомов, дискретность энергетических спектров атомов. Основные закономерности электронного строения

атомов отражены в постулатах Н. Бора. Постулаты определяют условия стационарных состояний электронов в атоме и энергию, выделяемую или поглощаемую атомом при переходе из одного стационарного состояния в другое. Эти постулаты носят полуквантовый характер, и не вытекают ни из каких физических положений.

В 1924 году Луи де Бройль делает следующий шаг: формулирует принцип корпускулярно-волнового дуализма. Подтверждением того, что корпускулярно-волновая двойственность свойств имеет универсальный характер, явились опыты по дифракции электронов и других микрочастиц. Из этих опытов следовало, что одна и та же квантовая частица в одних условиях ведёт себя как частица, в других – как волна. Для правильного описания поведения такой частицы надо поставить в соответствие её движению распространение некоторого волнового процесса, который называется волной де Бройля. Волна де Бройля отражает вероятностный характер поведения микрочастицы. Чтобы описать распределение вероятности нахождения частицы в данный момент времени в данной точке пространства, вводят волновую функцию. Квадрат модуля волновой функции позволяет рассчитать плотность вероятности нахождения микрочастицы в окрестности данной точки. Именно волновая функция определяет состояние квантовой системы. Основным уравнением квантовой механики является уравнение Э. Шрёдингера, которое позволяет найти волновые функции.

Квантовым системам присущи статистические свойства. Они состоят в том, что при одних и тех же условиях возможны разные способы поведения. Для каждого возможного способа поведения можно рассчитать его вероятность.

Наблюдатель в квантовой системе включен в наблюдаемую систему. До проведения опыта невозможно предсказать, какой из способов поведения будет реализован в опыте. Вероятностное поведение характерно не только для системы частиц, но и для отдельного объекта. Вероятностный характер законов для микромира является фундаментальным.

В эпоху классической физики картины мира отличались преувеличением или законов механики, или законов электромагнетизма. Это видно из названий соответствующих картин мира (механическая и электромагнитная). В квантовой физике объект описывают, не разделяя его свойства – корпускулярные и волновые. В современной картине мира и вещество, и поле состоят из элементарных частиц. Исчезает разделение между веществом и полем, которые способны взаимопревращаться. Таким образом, ***для современной картины природы характерно фундаментальное единство её различных проявлений.***

На современном этапе развития физики возник эволюционный подход к изучению сложных природных систем. Развитие термодинамики неравновесных систем, нелинейной динамики, исследование различных процессов образования упорядоченных структур из первоначально хаотического состояния среды привело к развитию новой области науки – ***синергетики***. Одна из задач синергетики – поиск механизмов и закономерностей самоорганизации природных систем, образования «порядка из хаоса». Развитие синергетики возвращает науку к фундаментальной связи между неживой природой и миром человека, существовавшей в античные времена.

- **Обратите внимание!**

- **Изучив раздел «Элементы физики атомного ядра», студент должен ЗНАТЬ:**

Суть понятий:

Ядро, нуклон, нейтрон, протон. Массовое число, зарядовое число. Изотопы, изобары. Дефект массы, энергия связи, удельная энергия связи. Ядерная реакция. Период полураспада, постоянная распада.

Определения физических величин, их единицы измерения и формулы, по которым рассчитываются величины:

Активность радиоактивного препарата. Удельная активность.

Явления:

Радиоактивность.

Законы:

Закон радиоактивного распада. Правила смещения (правила Фаянса и Содди). Закон изменения интенсивности радиоактивного излучения.

Формулы:

Дефект массы, энергия связи, удельная энергия связи ядра. Энергетический выход реакции. Связь периода полураспада с постоянной распада.

Графики:

Зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа.

ТЕСТ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА»

Инструкция. Данный тест предназначен для проверки знаний по теме «*Элементы физики атомного ядра*». Ответьте на вопросы. Подсчитайте количество правильных ответов, используя таблицу кодов. Если Вы дали

- 1) 14-15 правильных ответов – уровень усвоения материала темы высокий.
 - 2) 11-13 правильных ответов – уровень усвоения материала темы средний.
 - 3) 9-10 правильных ответов – уровень усвоения материала темы низкий.
 - 4) меньше 9 правильных ответов – Вы не усвоили учебный материал.
- Прочитайте конспект ещё раз.

1. Естественной радиоактивностью называется ...

- 1) распад ядер под влиянием γ -лучей.
- 2) превращение ядер атомов под воздействием нейтронов.
- 3) самопроизвольный (спонтанный) распад ядра, в результате которого образуется новое ядро и испускается частица.
- 4) превращение ядер атомов при бомбардировке α -частицами.
- 5) превращение ядер атомов при бомбардировке β -частицами.

2. Укажите, какие из названных превращений встречаются при естественной радиоактивности.

1. Альфа-распад.
2. Бета-электронный распад.
3. Бета-позитронный распад.
4. К-захват.
5. Выбрасывание нейтрона ядром.

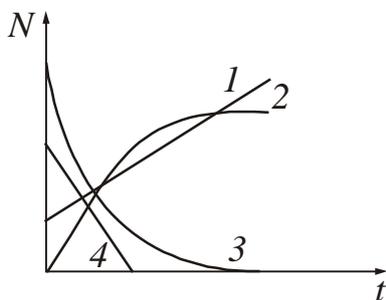
3. Укажите формулу, выражающую закон радиоактивного распада.

1. $N_{1/2} = \frac{N_0}{2}$ 2. $N_e = \frac{N}{e}$ 3. $N = N_0 e^{-\lambda t}$ 4. $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ 5. $dN = -\lambda N dt$

4. Укажите единицу измерения постоянной распада радиоактивного вещества.

1. с 2. с⁻¹ 3. Дж/с 4. Дж/(кг·с) 5. Дж/кг

5. Укажите на рис. 5 кривую, выражающую изменение числа радиоактивных атомов со временем (N – число атомов, t – время).



6. Периодом полураспада радиоактивного элемента называется ...

- 1) время, в течение которого распадается 100% атомов.
- 2) время, в течение которого количество радиоактивных атомов уменьшается в e раз.
- 3) время, в течение которого распадается 50% атомов.

- 4) время, в течение которого распадается $1/e$ часть атомов.
- 5) среднее время распада одного атома.

7. Как зависит активность заданного количества радиоактивного вещества от периода полураспада T ?

1. Прямо пропорционально T^2 .
2. Прямо пропорционально T .
3. Обратно пропорционально T .
4. Прямо пропорционально $\ln T$.
5. Обратно пропорционально $\ln T$.

8. Активность радиоактивного вещества измеряется в ...

- 1) с 2) с⁻¹ 3) Дж/кг 4) Вт/кг 5) Бк

9. Поглощённая доза излучения измеряется в ...

- 1) Гр 2) с⁻¹ 3) Дж/кг 4) Вт/кг 5) Бк

10. В состав ядра входят ...

- 1) электроны 2) протоны 3) гипероны 4) мезоны 5) нейтроны

11. Массовым числом называется ...

- 1) масса атома.
- 2) масса ядра.
- 3) количество нуклонов в ядре.
- 4) количество нейтронов в ядре.
- 5) округлённое до целых значение массы ядра в атомных единицах массы.

12. Зарядовым числом ядра называется ...
- 1) электрический заряд в кулонах.
 - 2) число протонов в ядре.
 - 3) число нейтронов в ядре.
 - 4) число нуклонов в ядре.
13. Взаимодействие нуклонов в ядре обеспечивает обмен ...
- 1) μ -мезонами.
 - 2) π -мезонами.
 - 3) электронами.
 - 4) нейтрино.
 - 5) гиперонами.
14. Какие силы преобладают при взаимодействии нуклонов в атомном ядре?
1. Ядерные.
 2. Гравитационные.
 3. Электростатические.
 4. Магнитные.
15. Укажите свойства ядерного взаимодействия.
1. Ядерные силы – это короткодействующие силы притяжения.
 2. Ядерные силы являются зарядово независимыми.
 3. Ядерные силы не являются центральными.
 4. Ядерные силы уменьшаются пропорционально квадрату расстояния.
 5. Взаимодействие осуществляется за счёт обмена π -мезонами.
16. При α -распаде массовое число ядра ...
- 1) уменьшится на 4.
 - 2) уменьшится на 1.
 - 3) уменьшится на 2.
 - 4) уменьшится на 3.
17. Порядковый номер ядра при β -электронном распаде ...
- 1) уменьшится на 2.
 - 2) уменьшится на 1.
 - 3) увеличится на 2.
 - 4) увеличится на 1.
 - 5) не изменится.
18. Ядро испытало один α -распад, а затем один β -электронный распад. Как изменилось зарядовое число ядра?
1. Увеличился на 4
 2. Увеличился на 1
 3. Уменьшился на 1
 4. Уменьшился на 2
 5. Увеличился на 2
19. Какие из названных эффектов связаны с поглощением γ -лучей?
1. Эффект Комптона.
 2. Рождение пары частиц.
 3. Фотоэффект.
 4. Деление тяжёлых ядер.
 5. Синтез легких ядер.

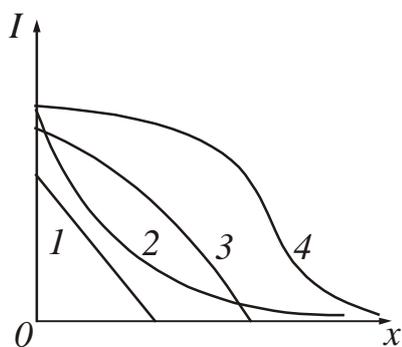
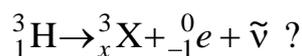


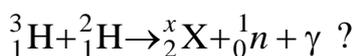
Рисунок 20

20. Укажите на рис. 20 кривую, соответствующую ослаблению γ -лучей в веществе.

21. Определите зарядовое число ядра, образовавшегося в результате реакции



22. Определите массовое число ядра, образовавшегося в результате реакции



23. Укажите, какие из названных величин сохраняются при ядерных реакциях.
1. Масса частиц.
 2. Энергия частиц.
 3. Электрический заряд.
 4. Барионный заряд.
24. У каких ядер энергия связи в расчёте на один нуклон наибольшая?
1. У очень легких.
 2. У средних.
 3. У тяжёлых.
 4. У ядер трансурановых элементов.
25. Масса продуктов реакции больше массы исходных частиц. Укажите характер реакции.
1. Эндотермической.
 2. Экзотермической.
 3. Без изменения энергии.

Ответы на вопросы рубрики «Давайте подумаем!»

46.1. Под термином «радиус ядра атома» нужно понимать то расстояние, за пределами которого действие ядерных сил становится уже пренебрежимо малым.

46.2. Радиус ядра определяется эмпирической формулой $R \sim \sqrt[3]{A}$, где A – массовое число. Изотопы – это ядра, имеющие одинаковый порядковый номер, но разные массовые числа. Изобары – это ядра, имеющие одинаковые массовые числа. Следовательно, размеры ядер изобар одинаковы, а размеры ядер изотопов разные.

46.3. Размеры ядер много меньше размеров электронных оболочек.

46.4. Нейтрон не обладает зарядом, поэтому с помощью счётчиков и ионизационных камер его непосредственно зарегистрировать нельзя.

46.5. Ядерные силы являются близкодействующими и имеющими свойство насыщения. Поэтому уже у первых трансурановых элементов очень заметно разрушительное действие сил кулоновского отталкивания протонов.

46.6. Относительно постоянные значения удельной энергии связи атомных ядер средней массы говорят о свойстве насыщения, то есть о свойстве нуклонов взаимодействовать лишь с ближайшими соседними нуклонами.

46.7. Чем больше удельная энергия связи, тем устойчивее ядро. Наиболее устойчивые ядра соответствуют химическим элементам, которые содержатся в середине периодической системы элементов Менделеева (приблизительно, с массовым числом $40 < A < 80$), так как они обладают большей удельной энергией связи. Лёгкие и тяжёлые ядра менее устойчивы, так как обладают меньшей удельной энергией связи.

46.8. С большим выделением энергии образуется ядро ${}_{92}^{238}\text{U}$.

47.1. Ядра, образующиеся при делении тяжёлых ядер, радиоактивны, так как все они оказываются пересыщены нейтронами, избыток которых несовместим с устойчивостью ядер. Поэтому осколки деления испытывают несколько радиоактивных распадов, прежде чем превратиться в стабильные ядра.

47.2. У тяжёлых ядер действуют достаточно большие силы кулоновского отталкивания между протонами, что уменьшает энергию связи этих ядер.

47.3. Потому, что с точки зрения классической механики s -электроны находятся ближе к ядру, и их связь с ядром является самой сильной.

47.4. Атомные и ядерные спектры принадлежат разным участкам шкалы электромагнитных волн. Атомные спектры соответствуют оптическому или рентгеновскому излучению, а ядерные спектры – гамма-излучению.

47.5. Бомбардирующее ядро должно сохранить большую энергию вплоть до встречи с ядром-мишенью. Однако, прежде чем ядро-снаряд встретит ядро-мишень, оно теряет почти всю свою энергию при взаимодействии с электронными оболочками. Эффективность такого метода очень мала и синтетическое золото оказалось бы гораздо более дорогим, чем добываемое из недр Земли.

47.6. Нейтрон не содержит в себе протона и электрона в готовом виде (раздельно), подобно тому как, это имеет место в атоме водорода.

47.8. Ядерный реактор – это устройство, в котором происходит управляемая цепная реакция деления ядер. Он предназначен для получения ядерной энергии и превращения её в другие виды в промышленных масштабах, получения радиоактивных изотопов для обработки ядерным излучением материалов с целью изменения их физических свойств.

КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТУ «Элементы физики атомного ядра»

№ вопр.	Код ответа								
1	3	6	3	11	3,5	16	1	21	2
2	1,2,3,4	7	3	12	2	17	4	22	4
3	3	8	5	13	2	18	3	23	4
4	2	9	1,3	14	1	19	1,23	24	2
5	3	10	2,5	15	1,2,3,5	20	2	25	1

ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

Абсолютно чёрное тело – тело, которое полностью поглощает всё падающее на него излучение независимо от его спектрального состава и направления падающего излучения, ничего не отражая и не пропуская.

Активность препарата (активность радиоактивного источника) (a) – число распадов, происходящих за единицу времени:

Амплитуда колебаний (A) – максимальное значение колеблющейся величины.

Биения – негармонические колебания, полученные при сложении колебаний одного направления с различными, но близкими частотами.

Вектор Пойнтинга (\vec{S}) – векторная физическая величина, численно равная энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

Волна – процесс распространения колебаний в пространстве.

Волновое поле – область пространства, в которой существует волновой процесс.

Волновое число – модуль волнового вектора, численно равно количеству длин волн, которое укладывается на расстоянии 2π м.

Время релаксации (τ) – время, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в e раз (e – основание натуральных логарифмов).

Диаграмма векторная – представление гармонического колебания в виде вектора, длина которого равна амплитуде колебания. Направление вектора образует с координатной осью угол, равный фазе колебания.

Дифракционная решётка – спектральный оптический прибор, представляющий собой совокупность большого числа регулярно расположенных щелей.

Дифракция – способность световой волны огибать препятствия, размеры которых соизмеримы с длиной волны, и попадать в область геометрической тени.

Длина волны (λ) – 1) расстояние между ближайшими точками, колеблющимися в одинаковой фазе; 2) расстояние, которое проходит волна за время, равное периоду колебаний.

Добротность колебательной системы (Q) – безразмерная физическая величина, характеризующая относительную убыль энергии системы, равная произведению 2π на отношение энергии $W(t)$ колебаний системы в произвольный момент времени t к убыли этой энергии за один период T .

Интенсивность волны (I) – скалярная величина, равная модулю среднего значения энергии, переносимой за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

Интерференция света – явление наложения когерентных световых волн, в результате которого происходит перераспределение энергии светового поля, т. е. образуются светлые участки (максимумы) и тёмные участки (минимумы) интерференционной картины.

Колебание – процесс в той или иной мере повторяющийся во времени.

Колебания гармонические – колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется по закону косинуса или синуса.

Контур колебательный – электрическая цепь, содержащая катушку индуктивностью L , конденсатор ёмкостью C и сопротивление R .

Коэффициент затухания (β) – скалярная физическая величина, характеризующая скорость затухания.

Красная граница фотоэффекта – минимальная частота света ν_0 (максимальная длина волны λ_0), при которой ещё возможен фотоэффект. При $\nu < \nu_0$ (или при $\lambda > \lambda_0$) фотоэффект не происходит.

Логарифмический декремент затухания (λ) – безразмерная величина, количественная характеристика быстроты затухания колебаний, численно равная натуральному логарифму отношения двух следующих друг за другом амплитуд $A(t)$ и $A(t + T)$.

Люмен (лм) – световой поток, излучаемый изотропным источником с силой света в 1 кд в пределах телесного угла в 1 стерадиан.

Люкс (лк) – освещённость, создаваемая световым потоком 1 лм, равномерно распределённым на площади 1 м^2 .

Маятник математический – материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити и совершающая колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести.

Маятник физический – твёрдое тело, способное совершать колебания под действием силы тяжести относительно неподвижной горизонтальной оси, не проходящей через центр масс.

Объёмная плотность энергии (w) – скалярная физическая величина, численно равная энергии, заключённой в единице объёма.

Оптический путь – скалярная величина, численно равная произведению показателя преломления среды на геометрический путь, пройденный волной в оптически однородной среде.

Освещённость (E) – физическая величина, равная отношению светового потока к площади освещаемой поверхности:

Осциллятор – система, совершающая колебания.

Отражательная способность ($\rho_{\lambda, T}$) – безразмерная физическая величина, показывающая, какая доля энергии электромагнитных волн, падающих на тело, отражается им.

Период колебаний (T) – время, за которое происходит одно полное колебание.

Период полураспада ($T_{1/2}$) – время, в течение которого распадается половина первоначального количества ядер данного радиоактивного вещества.

Плотность потока энергии (\vec{j}) – векторная физическая величина, численно равная энергии, переносимой за единицу времени через площадку единичной площади, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

Поглощательная способность (монохроматический коэффициент поглощения) ($\alpha_{\lambda, T}$) – безразмерная физическая величина, показывающая, какая доля энергии электромагнитных волн, падающих на тело, поглощается им.

Поляризация света – упорядочение в ориентации векторов напряжённости электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей световой волны в плоскости, перпендикулярной световому лучу. В плоско поляризованной (линейно поляризованной) волне колебание вектора \vec{E} происходит строго в одной плоскости.

Поток световой (Φ) – физическая величина, равная мощности видимой части излучения, которое распространяется внутри данного телесного угла, и оцениваемая по действию этого излучения на нормальный глаз.

Поток энергии (Φ) – скалярная физическая величина, численно равная энергии, переносимой волной через некоторую поверхность за единицу времени.

Поток энергетический (Φ_e) – скалярная физическая величина, равная энергии электромагнитного излучения всех участков спектра, излучаемой за единицу времени.

Приведённая длина физического маятника – длина такого математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника.

Пучности – точки, в которых амплитуда колебаний стоячей волны максимальна.

Работа выхода – минимальная энергия, которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы удалить его из твёрдого или жидкого вещества в вакуум.

Резонанс – явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний.

Серое тело – тело, поглощательная способность которого меньше единицы и не зависит от длины волны (частоты) излучения и от абсолютной температуры.

Сила света (I) точечного источника в данном направлении – физическая величина, равная световому потоку, приходящемуся на единицу телесного угла.

Спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) ($r_{\lambda, T}$) – скалярная физическая величина, равная энергии, излучаемой с единицы поверхности за единицу времени в единичном интервале длин волн, выбранном вблизи заданной длины волны.

Степень поляризации – величина, показывающая соотношение поляризованного и естественного света в частично поляризованном свете.

Стоячие волны – колебательный процесс, возникающий в результате наложения (интерференции) двух встречных бегущих волн с одинаковой амплитудой и частотой.

Тепловое излучение – электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счёт его внутренней энергии.

Угловая или циклическая частота (ω) – число колебаний за 2π секунд.

Узлы – точки, в которых амплитуда колебаний стоячей волны равна нулю.

Уровень громкости (L) – логарифм отношения интенсивности I данного звука к интенсивности I_0 , на пороге слышимости ($I_0 \approx 10^{-12}$ Вт/м² при стандартной частоте 1000 Гц):

Фазовая скорость волны – скорость перемещения фазовой плоскости.

Фигуры Лиссажу – траектории точки, одновременно совершающей гармонические колебания с кратными частотами в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Фотон – квант электромагнитного излучения (чаще оптического диапазона).

Фотоэффект внешний – явление испускания электронов поверхностью вещества под действием электромагнитного излучения.

Фотоэффект внутренний – явление увеличения электропроводности полупроводников и диэлектриков под действием электромагнитного излучения.

Фронт волны – геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t .

Частота колебаний (ν) – число колебаний за единицу времени.

Энергетическая светимость (излучательность) (R_ν) – скалярная физическая величина, равная энергии, излучаемой с единицы площади поверхности за единицу времени во всем диапазоне длин волн.

Энергия связи удельная ($\epsilon_{уд}$) – энергия связи, приходящаяся на один нуклон.

Энергия связи ядра ($E_{св}$) – минимальная энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны.

Эффект Доплера – изменение частоты волн, регистрируемых приёмником, которое происходит при движении источника и приёмника волн друг относительно друга.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Активность радиоактивного препарата 250

— — — удельная 251

Акцептор 224

Альфа-распад 248

Альфа-частица 248

Амортизатор 39

Амплитуда биений 28

— волны стоячей 69

— колебаний 15, 58

— — статическая 39

Анизотропия 168

Атом 185

Бел 65

Бета-распад 248

Биения 27

Вектор Пойнтинга 85

— световой 107, 127

— Умова 54

Волна 56

— звуковая 64

— монохроматическая 57

— плоская 57, 59

— стоячая 69

— поперечная 56

— продольная 56

— световая 107

— сферическая 57

— упругая 54

— электромагнитная 57, 79, 82

Волны де Бройля 176

— когерентные 67, 107

Время жизни радиоактивного изотопа 250

— релаксации 34

Высота звука 64

Гамма-лучи 89, 249, 252

Гипотеза де Бройля 175

— Планка 155

Грей 257

Громкость звука 64

Группа волн 72

Давление света 126

Дейтерий 243

Декремент затухания логарифмический 35, 36

Демпфер 39

Дефект 213

— массы 245

Децибел 65

Диаграмма векторная 26

Диод полупроводниковый 230

Дисперсия 61, 121, 125

Дифракция света 118

— электронов 175

Дихроизм 130

Длина волны 58

Добротность колебательной системы 35, 36, 40

Дозиметрия 226

Донор 223

Дуализм корпускулярно-волновой 101, 174

Дырка 216

Единица активности препарата 250

— освещённости 105

— потока светового 105

— — — энергии 63

— — —, плотности 63

— силы света 104

— угла телесного 104

— уровня громкости 65

— частоты 15

Единицы характеристик ионизирующих излучений 257, 258, 259

Закон Брюстера 129, 130

— Бугера – Ламбета 124

— Вина второй 155

— Кирхгофа 152

— Малюса 128

— Менделеева периодический 194

— независимости световых лучей 101

— обратных квадратов 105

— отражения света 101, 102

— преломления света Снелиуса 101

— прямолинейного распространения света 101

— радиоактивного распада 249

— смещения Вина 154

— сохранения зарядовых и массовых чисел 247

— Стефана – Больцмана 154

Законы фотоэффекта 159

Заселенность инверсная 200

Звук 64

- Зиверт 204
Зона валентная 215
— запрещённая 215
— проводимости 215
— разрешенная 215
— энергетическая 214
- И**злучательность 150
Излучение вынужденное 199
— рентгеновское 89
— спонтанное 107, 199
— тепловое 149
Изобары 243
Изотопы 243
Интенсивность волны 64, 86
Интерференция волн 69
— света 107
Интерферометр 117
Инфразвук 64, 68
Ион 185
Источник света точечный 104
- К**авитация 67
Кандела 105
Квазичастица 216
Квант 155
Квантовое число главное 186
— — магнитное 186
— — орбитальное 185
— — спиновое 192
Кластер 196
Колебания 14
— , авто 14, 15
— вынужденные 14, 15, 37, 40
— гармонические 16, 19, 20, 23, 27
— затухающие 14, 15, 31, 33
— собственные 14, 15
Кольца Ньютона 114
Контур колебательный 21
Коэффициент выпрямления 230
— затухания 32, 34
— Пельтье 186
— поглощения 106
— Томсона 235
Кривая резонансная 42
Кюри, единица радиоактивности 251
- Л**азер 201
Луч 101
— необыкновенный 131
— обыкновенный 131
Лучепреломление двойное 131, 133
Люкс 105
Люмен 105
- М**агнетон Бора 190
Магнитный момент атома орбитальный 189
— — — собственный 191, 192
Маятник математический 20
— пружинный 18
— физический 19
Механический момент орбитальный 189
— — собственный 192
Модель атома векторная 190
- Н**акачка среды 200
Нанотрубка углеродная 197
Нейтрон 242
Номер элемента порядковый 194
- О**ператор Лапласа 182
Оптика 101
— волновая 107
— геометрическая 101
— квантовая 149
Опыт Дэвиссона и Джермера 175
— Штерна и Герлаха 191
Опыты Герца 83
— Лебедева 126
— Тартаковского и Томсона 176
— Юнга 111
Освещённость 105
Осциллятор 14
Ось оптическая 131
Отношение гироманнитное 189
Отражение внутреннее 103
- П**акет волновой 72
Переход электронно-дырочный 227
Период биений 28
— дифракционной решётки 119
— колебаний 15, 58
— — колебательного контура 23
— — маятника математического 21
— — — пружинного 19
— — — физического 20
— полураспада 20
Пирометр 156
Плоскость поляризации 128

- Плотность вероятности 178
 Плотность потока энергии 63
 — энергетической светимости
 спектральная 150
 — энергии объёмная 62
 Поверхность волновая 57
 Поглощение света 124
 Подвижность 221
 Подоболочка электронная 195
 Показатель преломления 102
 Поле волновое 57
 Полосы равного наклона 113
 — равной толщины 114
 Полупроводник 217, 220
 Поляроид 132
 Порог болевого ощущения 65
 — слышимости 65
 Постоянная Верде 136
 — Вина 154
 — вращения 135
 — Керра 134
 — Планка 159
 — распада 249
 — решётки дифракционной 119
 — Ридберга 186
 — Стефана – Больцмана 154
 Потенциал возбуждения 187
 — ионизации 187
 Поток световой 104
 — энергетический 149
 — энергии 63
 Правила смещения 249
 Преломление света 124
 Приведённая длина физического маятника 21
 Призма Николя 131
 Примесь акцепторная 224
 — донорная 223
 Принцип Гюйгенса – Френеля 118
 — запрета Паули 193
 — суперпозиции волн 69
 Проводимость дырочная 224
 — примесная 222
 — собственная 220, 221
 — электронная 222
 Просветление оптики 114
 Против 243
 Протон 242
 Процесс аperiодический 36
 Путь оптический 109
 Пучность 70
 Работа выхода 159
 Радиоактивность естественная 248
 Радиоволны 88
 Разность хода оптическая 109
 Рассеяние света 123
 Реакция термоядерная 246
 Реакция ядерная 247
 Резонанс 39
 Рекомбинация 228
 Рефракция 125
 Решетка дифракционная 118, 121
 Сверхпроводимость 219
 Свет естественный 127
 — поляризованный 127
 Светимость энергетическая 150
 Серия 188
 Сила вынуждающая 37
 — квазиупругая 19
 — света 104
 Система элементов Менделеева, периодическая 153
 Скорость волны групповая 72
 — — фазовая 60
 — — электромагнитной 54, 56
 Скорость звука 60
 — света 84
 Смещение статическое 39
 Соотношения неопределённостей 179
 Состояние возбуждённое 187
 — основное 187
 Спектр акустический 65
 — оптический 101
 Спин 192
 Способность испускательная 150
 — отражательная 152
 — поглощательная 150
 — разрешающая 120
 Среда диспергирующая 61
 Степень поляризации 127
 Стерadian 104
 Тело абсолютно чёрное 151
 — серое 151
 — зеркальное 152
 Тембр звука 64
 Термопара 233
 Термоэлектрические явления 232
 Термоэлектродвижущая сила 233
 Ток смещения 78
 Тритий 243

- Угол Брюстера** 129
— дифракции 119
— отражения 101
— падения 101
— предельный полного отражения 103
— преломления 102
— скольжения 121
— телесный 101
Узел 70
Ультразвук 64, 66
Уравнение волновое 61
— дифференциальное колебаний 17
— — — вынужденных 38, 41
— — — гармонических 17, 19, 20
— — — затухающих 32, 33
— плоской волны 59
— стоячей волны 69
— Шрёдингера 181, 182
— Эйнштейна 159
Уравнения Максвелла 77, 80
Уровень акцепторный 224
— громкости 65, 66
— донорный 223
Условие максимума интерференции 109, 110
— минимума интерференции 109, 110
— нормировки 178
- Фаза колебаний** 16
Ферми, единица длины 244
Фигуры Лиссажу 31
Флуктуации 123
Формула Бальмера 187
— Вульфа – Брэгга 122
— Планка 156
— Томсона 23
Фотометрия 103
Фотон 159, 161
Фотопроводимость 231
Фотосопротивление 231
Фотоэффект внешний 158
— —, красная граница 159
— внутренний 231
Фронт волны 57
Фуллерен 196
Функция волновая 177
- Характеристика амплитудно-частотная** 39
— вольт-амперная 218
- Частицы элементарные** 253
Частота колебаний 15
— — затухающих 32, 34
— резонансная 39, 42
— собственная 19
— циклическая 16
Число волновое 59
— зарядовое 243
— квантовое 186
— массовое 243
Чувствительность относительная
спектральная 103
- Ширина запрещённой зоны** 215
Шкала электромагнитных волн 86, 87
- Энергия активации** 223
— колебаний затухающих 36
— — кинетическая 24
— — полная 25
— — потенциальная 24
— связи ядра 245
— — — удельная 245
Эффект Доплера 76
— Керра 134
— Комптона 163
— Мейснера 219
— Фарадея 136
- Явление Зеебека** 232
— Пельтье 234
— Томсона 235
Явления контактные
Ядро атома 242
Яма потенциальная 183
Ячейка Керра 134

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Волков, А. Ф. Лабораторный практикум по физике : учеб. пособие для студентов инж.-техн. специальностей высш. учеб. заведений / А. Ф. Волков, Т. П. Лумпиева. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – 389 с.
2. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Высш. шк., 2002. – 718 с.
3. Курс физики : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 1. / под ред. В. Н. Лозовского. – Санкт-Петербург : Лань, 2000. – 576 с.
4. Курс физики : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 2. / под ред. В. Н. Лозовского. – Санкт-Петербург : Лань, 2000. – 592 с.
5. Лумпиева, Т. П. Практикум по физике. Решение задач : учеб. пособие для студентов инж.-техн. специальностей высш. учеб. заведений : в 2 т. Т. 2: Колебания и волны. Волновая и квантовая оптика. Элементы квантовой механики. Основы физики твёрдого тела. Элементы физики атомного ядра / Т. П. Лумпиева, Н. М. Русакова, А. Ф. Волков. – Донецк : ДонНТУ, 2018. – 230 с.
6. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие : в 3 т. Т. 1: Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – 3-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1987. – 432 с.
7. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие : в 3 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – 3-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1988. – 496 с.
8. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие : в 3 т. Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. – 3-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1987. – 320 с.
9. Физика. Сборник вопросов и задач (для контроля знаний с применением машин) / В. И. Гакен [и др]. – Киев : Вищ. шк., Голов. изд-во, 1984. – 136 с.
10. Фриш, С. Э. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1: Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 480 с.
11. Фриш, С. Э. Курс общей физики : в 3 т. Т. 2: Электрические и электромагнитные явления / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 528 с.
12. Фриш, С. Э. Курс общей физики : в 3 т. Т. 3: Оптика. Атомная физика / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 656 с.
13. Фурсов В. К. Задачи-вопросы по физике / В. К. Фурсов. – Москва : Просвещение, 1977. – 64 с.
14. Холидей, Д. Вопросы и задачи по физике : пособие для студентов пед. интов / Д. Холидей, Р. Резник ; пер. с англ. С. Н. Немирова. – Москва : Просвещение, 1969. – 239 с.
15. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – Москва : Наука, 1981. – 507 с.

**Волков Александр Фёдорович
Лумпиева Таисия Петровна**

КУРС ФИЗИКИ

ТОМ 2

Учебное пособие
(на русском языке)

Редакционно-техническое оформление,
компьютерная вёрстка *А.Ф. Волков*