

**КРАСНОАРМІЙСЬКИЙ ІНДУСТРІАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ
ДЕРЖАВНОГО ВИЩОГО НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра ІНЖЕНЕРНОЇ МЕХАНІКИ

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Для студентів навчального напрямку "Електромеханіка"

Затверджено на засіданні
кафедри Інженерної механіки
протокол № 1 від 28.08.2010р.

Затверджено на навчально-
видавничій Раді Дон НТУ
протокол № від . .2010р.

2010

УДК 621.315.5(075)

Електротехнічне матеріалознавство: Конспект лекцій. Для студентів навчального напрямку 6.050301 "Електромеханіка" / Горячева Т.В., – Красноармійськ: КП Дон НТУ, 2010р. – 114 с.

В конспекті лекцій розглянуті фізичні основи явищ, що протікають в діелектриках, провідниках, напівпровідниках та магнітних матеріалах. Надає класифікацію матеріалів, описуються їх електричні, фізико-хімічні та механічні властивості. Дана характеристика основних електротехнічних матеріалів. Приведені необхідні відомості про використання в техніці сучасних електротехнічних матеріалів.

Конспект лекцій призначений для студентів навчального напрямку "Електромеханіка". Може бути корисним для студентів при вивченні дисципліни "Основи електротехніки".

Укладачі: Т.В. Горячева, старший викладач кафедри Інженерної механіки Красноармійського індустріального інституту Донецького національного технічного університету

Рецензент: В.Г. Кондратенко, к.т.н., доцент кафедри Електромеханіки та автоматики Красноармійського індустріального інституту Донецького національного технічного університету

Відповідальний за випуск: зав. кафедрою ІМ, доцент С.О.Вірич

@ Горячева Т.В.
Красноармійськ, КП ДонНТУ, 2010

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕННЯ | 5 |
| Тема 1. Загальні відомості про будову речовини..... | 6 |
| 1.1 Види зв'язку..... | 6 |
| 1.2. Будова твердих тіл..... | 8 |
| 1.3. Класифікація речовин за електричними властивостями..... | 9 |
| 1.4. Класифікація речовин за магнітними властивостями..... | 10 |
| РОЗДІЛ 1. Діелектричні матеріали..... | 12 |
| Тема 2. Загальні відомості про діелектрики, їх основні характеристики.. | 12 |
| 2.1. Загальна характеристика діелектриків..... | 12 |
| 2.2. Поляризація діелектриків та діелектрична проникність..... | 13 |
| 2.3. Пружна поляризація та її різновиди..... | 14 |
| 2.4. Поляризація релаксаційного типу та її різновиди..... | 16 |
| 2.5. Класифікація діелектриків по виду поляризації..... | 17 |
| 2.6. Особливості поляризації активних діелектриків..... | 18 |
| Тема 3. Електропровідність діелектриків. Її характеристика..... | 21 |
| 3.1. Електропровідність діелектриків..... | 21 |
| 3.2. Вплив напруженості електричного поля на електропровідність діелектриків..... | 23 |
| 3.3. Вплив температури на електропровідність діелектриків..... | 23 |
| 3.4. Особливості електропровідності різних рідких і газових діелектриків..... | 24 |
| Тема 4. Діелектричні втрати діелектриків. Їх основні характеристики. | 21 |
| 4.1. Діелектричні втрати діелектриків. Основні поняття..... | 25 |
| 4.2. Види діелектричних втрат в діелектриках..... | 28 |
| 4.3. Особливості діелектричних втрат рідких і газових і твердих діелектриках..... | 30 |
| Тема 5. Пробій діелектриків. Основні характеристики пробою..... | 33 |
| 5.1. Загальна характеристика явища пробою. Електрична міцність..... | 33 |
| 5.2. Пробій твердих діелектриків..... | 34 |
| 5.3. Особливості пробою газових діелектриків..... | 36 |
| 5.4. Пробій рідких діелектриків..... | 38 |
| Тема 6. Фізико-хімічні та механічні властивості діелектриків..... | 39 |
| 6.1. Фізичні властивості діелектриків..... | 39 |
| 6.2. Хімічні властивості діелектриків..... | 43 |
| 6.3. Механічні властивості діелектриків..... | 43 |
| Тема 7. Види та характеристика промислових діелектриків..... | 45 |
| 7.1. Газові діелектрики..... | 45 |
| 7.2. Рідкі діелектричні матеріали..... | 48 |
| 7.3. Органічні полімерні діелектрики: смоли, лаки, компаунди..... | 51 |
| 7.4. Пластмаси. Загальні відомості та характеристика..... | 56 |
| 7.5. Еластомери. Гума..... | 58 |
| 7.6. Скло та кераміка..... | 60 |
| 7.7. Неорганічні та мінеральні діелектрики..... | 64 |

| | |
|---|-----|
| РОЗДІЛ 2. Магнітні матеріали | 68 |
| Тема 8. Загальні відомості про магнітні матеріали..... | 68 |
| 8.1. Класифікація магнітних матеріалів, та загальна характеристика... | 68 |
| 8.2. Природа феромагнетизму..... | 69 |
| 8.3. Основні магнітні характеристики матеріалів..... | 70 |
| Тема 9. Класи магнітних матеріалів. Види та їх характеристика..... | 74 |
| 9.1. Класифікація магнітних матеріалів на класи..... | 74 |
| 9.2. Промислові магнітно-м'які матеріали. Матеріали для роботи в постійних і низькочастотних полях..... | 74 |
| 9.3. Промислові магнітно-м'які матеріали для роботи в слабких полях. | 76 |
| 9.4. Магнітно-м'які матеріали, призначені для роботи у високочастотних полях..... | 77 |
| 9.5. Магнітно-тверді матеріали..... | 79 |
| РОЗДІЛ 3. Провідникові матеріали..... | 84 |
| Тема 10. Класифікація і основні властивості провідникових матеріалів. | 84 |
| 10.1. Класифікація провідникових матеріалів..... | 84 |
| 10.2. Електропровідність та електроопір провідників..... | 85 |
| 10.3. Теплові властивості провідників..... | 90 |
| Тема 11. Характеристика провідникових матеріалів..... | 91 |
| 11.1. Матеріали високої електропровідності..... | 91 |
| 11.2. Надпровідники та криопровідники..... | 93 |
| 11.3. Матеріали високого питомого електроопору..... | 96 |
| 11.4. Матеріали для електричних контактів..... | 98 |
| РОЗДІЛ 4 Напівпровідникові матеріали..... | 101 |
| Тема 12. Явище напівпровідності. Основні характеристики напівпровідників..... | 101 |
| 12.1. Загальні відомості про напівпровідники..... | 101 |
| 12.2. Електропровідність напівпровідників..... | 103 |
| 12.3. Вплив зовнішніх факторів на електропровідність напівпровідника | 106 |
| Тема 13. Характеристика напівпровідникових матеріалів..... | 108 |
| 13.1. Елементарні напівпровідники..... | 108 |
| 13.2. Напівпровідникові хімічні сполуки..... | 110 |
| Список використаної літератури..... | 113 |

ВВЕДЕННЯ

Коротка історична хронологія та завдання курсу

Розробка нових матеріалів, необхідних для розв'язання задач електротехніки, удосконалення вже відомих, розширення характеристик нових матеріалів відбувалося одночасно з загальним розвитком електротехніки.

Одними з перших випадків використання ЕТМ для створення електричних приладів наступні:

1802г.- академік В. В. Петров: виготовив батарею, що складається з 8100 мідних і цинкових дисків з прокладками з паперу, просоченого електролітом і вперше в світі електричну дугу .

1832г.- Шиллінг П.А. при створенні електромагнітного телеграфу використовував як ізоляцію прядиво, просочене воском, каучук і шовкову

1836г. – Якобі Б. С. вперше створив двигун постійного струму

1873г.- Ладигін А. Н. створив першу лампу розжарювання.

1876г.- Яблочков П. Н. винайшов електричну свічку.

1891г.- Доліво-Добровольський М.М. винайшов трифазну систему і створив трифазні трансформатори і асинхронні двигуни.

У цих винаходах були використані основні класи електротехнічних матеріалів (ЕТМ), діелектрики (ДЕМ), провідники (ПМ), магнітні матеріали (ММ) і її електрична ізоляція (ЕІ).

Прискорений розвиток електротехніки в наш час супроводжується безперервним створенням нових матеріалів, розширенням властивостей, удосконаленням їх технології. Для розуміння особливостей сучасних ЕТМ необхідне всебічне і глибоке вивчення фізичних, механічних, характеристик матеріалів, що використовуються в цих якостях, для розуміння електричних і магнітних властивостей, механічної міцності та інших особливостей необхідно досліджувати структуру та хімічний склад матеріалів. Ці задачі дозволяють розв'язати курс "Електроматеріалознавство".

Курс "**Електротехнічне матеріалознавство**" ставить перед собою наступні основні завдання:

- 1) розгляд теоретичних основ, вивчення і використання ЕТМ;
- 2) встановлення класифікації ЕТМ за їх складом, призначенням і властивостям;
- 3) вивчення основних характеристик ЕТМ;
- 4) ознайомлення з основними особливостями технології ЕТМ;
- 5) дослідження найбільш характерних, технічно і економічно обумовлених випадків застосування ЕТМ в практиці.

ЛЕКЦІЯ 1.

Тема 1: Загальні відомості про будову речовини.

- 1.1. Види зв'язку.
- 1.2. Будова твердих тіл.
- 1.3. Класифікація речовин за електричними властивостями.
- 1.4. Класифікація речовин за магнітними властивостями.

1.1. Види зв'язку.

Основними елементарними частками, з яких будуються всі відомі нам речовини є протони, нейтрони і електрони.

З протонів та нейтронів будуються атомні ядра, електрони – заповнюють оболонки атома, компенсуючи позитивний заряд ядра.

Гази, рідкі і тверді тіла можуть складатися з атомів, молекул або іонів. Розміри атомів – порядку ангстрема (\AA), розміри позитивних іонів, що вийшли з атомів, електронів, що позбулися частини, менше, ніж розміри атомів, а розміри негативних іонів, що приєднали додаткові електрони, більше, ніж розміри відповідних атомів. Іонами можуть бути і групи атомів, що втратили або приєднали електрони. Молекули газів містять різне число атомів (*наприклад*: гелій, аргон, неон — одноатомні гази, водень, азот, кисень, окисел вуглецю складаються з двоатомних молекул, вуглекислий газ, водяна пара – з трьохатомних, молекула аміаку побудована з чотирьох атомів, а метану – з п'яти).

Залежно від будови зовнішніх електронних оболонок атомів можуть утворюватися різні види зв'язку.

Ковалентним називається зв'язок атомів один з одним, що досягається за рахунок електронів, які стають, спільними, як це схематично показано для двоатомної молекули на рис. 1.1.

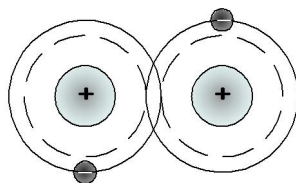


Рисунок 1.1. – Схематичне зображення двоатомної молекули з ковалентним зв'язком

Молекули, в яких центри позитивних і негативних зарядів співпадають, є *нейтральними*. Якщо ж в окремих молекулах центри протилежних по знаку зарядів не співпадають і знаходяться на деякій відстані один від одного, то такі молекули називаються *полярними* або *дипольними*. Полярна молекула характеризується величиною дипольного моменту, який визначається як добуток заряду на відстань між центрами позитивних і негативних зарядів.

Ковалентний зв'язок спостерігається в молекулах, утворених атомами металоїдів (*наприклад* в молекулі хлору (Cl)), також в трьох агрегатних станах, між атомами, що утворюють решітку кристалів (*наприклад*: алмаз, германій,

кремній), Ковалентним зв'язком утримуються не тільки однорідні ($-Cl-Cl-$), але й різні атоми (*наприклад*: $-C-H-$, $-Si-C-$) і інші.

Іонний зв'язок (ІС) визначається силами тяжіння між позитивними і негативними іонами. Іонний зв'язок може утворюватися, як між співвимірними іонами, так і з різнорозмірними іонами речовини (рис. 1.2), створюючи щільні або нещільні упаковки.

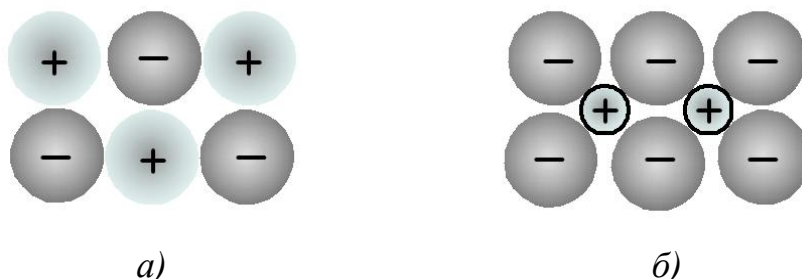


Рисунок 1.2. – Схематичне зображення двоатомної молекули з іонним щільним (а) і не щільним (б) зв'язком

Тверді тіла іонної структури характеризуються підвищеною механічною міцністю і досить високою температурою плавлення (*наприклад*: солі лужних металів, галоїди тощо).

Металевий зв'язок (МС) приводить до утворення твердих кристалічних тіл. Метали – це впорядковані системи позитивно заряджених атомів (іонів), що знаходяться в середовищі вільних електронів. Атоми знаходяться в вузлах і складають угруповання, що називають *кристалічні решітки* або ґратки. Сили міжатомного тяжіння між атомами і електронами обумовлюють монолітність і механічну міцність металів. Рухливі електрони, які можуть переходити з орбіт, забезпечують високу електропровідність і теплопровідність, а також блиск металу.

Молекулярний зв'язок (МС) – зв'язок між молекулами з ковалентними внутрішньо молекулярними зв'язками. Міжмолекулярне тяжіння в такому разі обумовлене узгодженим рухом валентних електронів в сусідніх молекулах. Цей тим хімічного зв'язку називають зв'язком Ван-дер-Ваальса. Молекулярний зв'язок характеризується взаємодією нейтральних молекул (або атомів) на основі слабких електростатичних сил. Молекулярний зв'язок характерний для атомів з електронними оболонками, що відносно легко деформуються, і для тих, що об'єднали в молекули атоми, здібні до деформації зовнішніх з'єднаних оболонок (*наприклад*: більшість полімерів, органічних речовин, парафін).

Спільним для будови всіх матеріалів є прагнення до самоорганізації (впорядкованого розташування) всіх часток, що є прямим наслідком основного закону природи: *стійким є такий стан системи, при котрому її енергія буде мінімальна*. Утворення кристалів чи молекул з ізольованих атомів чи багатоатомних груп пов'язане зі зниженням енергії системи, і як наслідок, збільшенням її стійкості.

Самоорганізація речовин може бути представлена як впорядкування його структурних часток. Впорядкування на відстанях, порівняльних з між-атомними, називається *ближнім* порядком, а впорядкування на необмежено великих відстанях – *дальнім* порядком. Наявність виду впорядкування обумовлено силами міжатомної взаємодії.

У електротехніці знаходять широке застосування матеріали з пришвидшеною і неврегульованою будовою (з дефектами). До дефектів кристалічних решіток твердого тіла відносяться будь-які порушення періодичності електростатичного поля його ґраток.

1. 2. Будова і дефекти твердих тіл.

Геометрична класифікація кристалів недостатня для розпізнавання структур, що здаються тотожними. Вони можуть виявляти відмінність по подвійному променезаломленню, по п'єзо- і піроелектричним властивостям, утворенню адсорбційних центрів, роботі виходу електронів і тому подібне. Це обумовлено різними видами симетрії, яких налічують 32 класи, об'єднуючих до 230 можливих просторових груп.

Причина утворення яким-небудь елементом або з'єднанням даних просторових ґраток в основному залежить від розмірів атома і електронної конфігурації його зовнішніх оболонок.

Основні типи кристалічних ґраток металів приведені на рис.1.3.

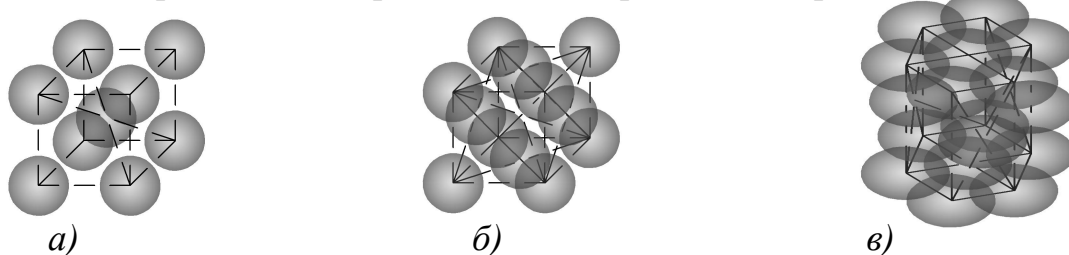


Рисунок 1.3. – схеми кристалічних ґраток металів: а - об'ємно – центровані кубічні ґратки; б - гранецентровані кубічні ґратки; в – гексагональні ґратки.

Об'ємно – центровані кубічні ґратки (ОЦК). Ці ґратки мають метали: Pb, K, Na, Li, W, V, Cr, Nb, Ti_β, Fe_α.

Гранецентровані кубічні ґратки (ГЦК) Характерні металам: Ca_α, Ni, Ag, Au, Cu, Co_α, Fe_γ.

Гексагональні ґратки (ГПУ). Характерні металам: Os, Zn, Co_β, Be, Mg, Ti_α, Cd, Re.

Порушення правильності будови кристалів і можливість зміни цих порушень треба вважати такою ж невід'ємною властивістю реальних кристалів, як і правильність їх побудови з атомів. Уявленню про порядок в світі атомів відповідає кристалічна решітка із строго періодичним електростатичним полем. Відомо, що найбільш високим порядком як ближнього (в межах елементарного осередку), так і дальнього (на великих відстанях) розташування частинок відрізняються хімічні сполуки, коли вони знаходяться в твердому (кристалічному) стані. У разі твердих розчинів кристалічних речовин, а також при скло-

видному стані можна говорити лише про той або інший ступінь ближнього і дальнього порядку розташування частинок. Впорядкований і неврегульований стан можна спостерігати у разі високомолекулярних — полімерних матеріалів, Практично повна відсутність порядку в розташуванні частинок повинна бути у аморфних тіл.

У електротехніці знаходять широке застосування матеріали з впорядкованою і неврегульованою будовою, і важко віддати перевагу тим або іншим відносно практичної значущості.

Дефекти будови речовини, від яких залежать особливі фізичні властивості матеріалів, використовуються для отримання в техніці самих різних матеріалів і приладів. Сюди відноситься, зокрема, люмінесцентна техніка, що застосовує кристалофосфори для освітлювальних цілей, оптичних перетворювачів, фарб, що світяться, і ін.

В наслідок фазових перетворень відбувається відхилення реальної будови матеріалу від ідеального. Також до дефектів кристалічного твердого тіла відносяться будь-які порушення періодичності електростатичного поля кристалічної решітки: порушення стехіометричного складу, наявність сторонніх домішок, механічно напружені ділянки структури, додаткові кристалографічні площини (дислокації, тріщини, пори) і т. д. Тому в металах можливі дефекти кристалічних ґраток. За геометричними ознаками їх розрізняють на точкові — розміри яких малі в всіх трьох вимірах, лінійні — малі в двох вимірах, поверхневі, та об'ємні — розміри яких значні у всіх вимірах. За розташуванням та природою існують такі дефекти як вакансії, дислокації, міжвузловий атом, домішкові атоми. Наявність дефектів будови викривлює кристалічні ґратки, впливає на властивості металу. Тому властивості металів визначаються параметрами кристалічних ґраток та видом і кількістю дефектів.

1. 3. Класифікація речовин по електричних властивостях

Всі речовини залежно від їх електричних властивостей відносять до діелектриків, провідників або напівпровідників. Відмінність між провідниками, напівпровідниками і діелектриками найнаочніше можна показати за допомогою енергетичних діаграм зонної теорії твердих тіл.

Дослідження спектрів випромінювання різних речовин в газоподібному стані, коли атоми розташовані один від одного на великих відстанях, показує, що для атомів кожної речовини характерні цілком певні спектральні лінії. Це говорить про наявність певних *енергетичних станів (рівнів)* для різних атомів.

Частина цих рівнів заповнена електронами в нормальному, не збудженому стані атома, на інших рівнях електрони можуть знаходитися тільки після того, як атом піддається зовнішній енергетичній дії; при цьому він стає збуджений. Прагнучи прийти до стійкого стану, атом випромінює надлишок енергії у момент повернення електронів на рівні, при яких енергія атома мінімальна.

Сказане можна охарактеризувати енергетичною діаграмою матеріалів, приведенною на рис. 1.4.

Під час переходу газоподібної речовини в рідину, а потім утворенні кристалічної решітки твердого тіла що все є у даного типу атомів електронні рівні

(як заповнені електронами, так і незаповнені) декілька зміщуються унаслідок дії сусідніх атомів один на одного. Таким чином, з окремих енергетичних рівнів атомів в речовині утворюється смуга – зона енергетичних рівнів.

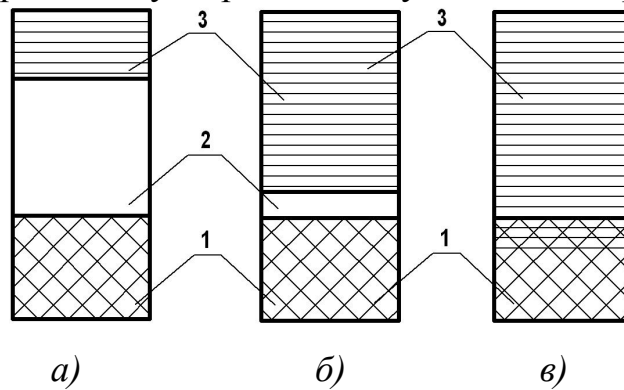


Рисунок 1.4. – Енергетична діаграма класифікації матеріалів за електричними властивостями:

- 1 – заповнена електронами зона, зона високої електронної провідності;
- 2 – заборонена зона;
- 3 – зона вільних енергетичних рівнів, зона низької провідності.

Всі речовини відносять до провідників, діелектриків і напівпровідників. Розрізняються вони розмірами зони енергетичних рівнів – зонна теорія будови твердих речовин (рис. 1.4).

Діелектриками (а) будуть такі матеріали, у яких заборонена зона настільки велика, що електронної провідності в обмінних умовах не спостерігається.

Напівпровідники (б) – речовини з вузькою забороненою зоною, яка може бути подолана за рахунок зовнішніх електронних дій.

При відсутності в напівпровідникові вільних електронів (0°К) прикладена до нього різниця потенціалів не визиває струму. Якщо до напівпровідника ззовні підвести енергію, то електрони переходять у вільну зону, а в заповненій зоні, звідки пішов електрон, утворилася «електронна дірка», інші електрони заповнюватимуть цю дірку, тобто дірка переміщатиметься під впливом електричного поля, як еквівалентний позитивний заряд, створюючи електронну провідність. Енергія, що викликає електронну провідність – тепловий рух, світло, потік електронів і ядерних частинок, електричне і магнітне поле, механічна дія).

Провідники (в) – речовини, у яких заповнена електронами зона впритул прилягає до вільної енергетичної зони або навіть перекривається нею (характерно металам). Електрони в металі вільно переходять по рівням визиваючи електричний струм, навіть при дуже слабких напруженнях зовнішнього електричного поля.

1. 4. Класифікація речовин по магнітних властивостях

Електротехнічні матеріали підрозділяється по магнітних властивостях на дві групи:

- 1) Слабомагнітні – діамагнетики і парамагнетики

2) Сильномагнітні – феромагнетики

Діамагнетики – речовини з магнітною проникністю $\mu < 1$, значення якої не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля (*наприклад*: водень, інертні гази), мідь, цинк, срібло, золото, ртуть та інші).

Парамагнетики – речовини з магнітною проникністю $\mu > 1$, значення якої також не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля (*наприклад*: кисень, солі заліза, кобальту, нікелю, лужні метали, алюміній, платина).

Діамагнетики і парамагнетики мають магнітну проникність близьку до одиниці, і по магнітних властивостях знайшли обмежене застосування в техніці.

Феромагнетики (магнітні матеріали) - мають $\mu \gg 1$, яка залежить від напруженості магнітного поля (*наприклад*: залізо, нікель, кобальт і їх сплави, сплави хрому і марганцю, ферити різного складу).

РОЗДІЛ 1. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

ЛЕКЦІЯ 2.

Тема 2: Загальні відомості про діелектрики, їх основні характеристики.

- 2.1. Загальна характеристика діелектриків.
- 2.2. Поляризація діелектриків та діелектрична проникність.
- 2.3. Пружна поляризація та її різновиди.
- 2.4. Поляризація релаксаційного типу та її різновиди.

2. 1. Загальна характеристика діелектриків

Діелектричними прийнято називати матеріали, що мають низьку щільність рухомих носіїв заряду (іонів і електронів), тому питомий електричний опір таких матеріалів в $10^{12} - 10^{25}$ разів вищий, ніж у провідникових матеріалів. Очевидно, що діелектричними є матеріали з ковалентним, поляризаційним або іонним зв'язком між атомами, причому останні тільки в твердому стані. Крім того, енергія збудження електронів на рівні провідності перевершує 5 електрон-вольт (ЕВ).

По *агрегатному стану* діелектрики бувають твердими, рідкими і газоподібними.

За походженням діелектрики можуть бути природними і штучними, органічними і неорганічними.

По *електричній структурі* всі діелектрики можна розділити на неполярні та полярні. У неполярних діелектриків у відсутності зовнішнього поля власний дипольний момент структурних одиниць (атомів, молекул, елементарних кристалічних осередків) рівний нулю. У полярних діелектриків власний дипольний момент структурних одиниць відмінний від нуля і у відсутності зовнішнього поля.

В свою чергу, полярні діелектрики можуть бути параелектричними і сегнетоелектричними. У параелектриків дипольні моменти структурних одиниць розподілені по різних напрямках хаотично, і сумарний дипольний момент навіть невеликого об'єму рівний нулю. У сегнетоелектриків дипольні моменти орієнтовані паралельно, і сумарний дипольний момент малих об'ємів не рівний нулю.

При приміщенні діелектрика в електричне поле в нім розвиваються два основні процеси: поляризація і наскрізна електропровідність. Розвиток основних процесів може, у свою чергу, привести до ряду додаткових процесів, до втрати енергії електричного поля в діелектрику і пробією діелектрика.

Розглянемо вплив зовнішніх умов на розвиток основних процесів в діелектриках.

2. 2. Поляризація діелектриків та діелектрична проникність.

Поляризацією називається такий стан діелектрика, коли сумарний електричний момент відмінний від нуля.

Поява поляризації є наслідком дії різних чинників: електричного поля, температури, механічної напруги і ін. У більшості діелектриків поляризація виникає під дією електричного поля, тому в основному ми розглядатимемо цей випадок.

При розміщенні діелектрика в електричному полі диполі в *полярних* діелектриках повертаються по полю; при відсутності поля диполі дезорієнтуються внаслідок теплового руху.

У *неполярних* діелектриках зовнішнє електричне поле приводить до лінійного зсуву зарядів усередині електрично нейтральних молекул, що також приводить до появи електричних диполів. Таким чином, усередині діелектрика виникає власне поле, направлене протилежно зовнішньому полю. У результаті напруженість зовнішнього поля в діелектрику слабшає в певну кількість разів.

Особливу групу складають діелектрики в яких із зміною напруженості поля зміщення відбувається нелінійно, виявляючи насичення зарядів при деякому значенні напруженості поля. Такі діелектрики називають *сегнетоелектрики*.

Величина дипольних моментів (\mathbf{m}), що наводяться зовнішнім полем, пропорційна напруженості зовнішнього поля (\mathbf{E}):

$$\mathbf{m} = \alpha \mathbf{E} \quad (2.1)$$

де α – коефіцієнт пропорційності, названий *поляризуємість*.

Сумарний дипольний момент в одиниці об'єму тіла V є чисельною характеристикою поляризації (P)

$$P = \frac{\sum \mathbf{m}}{V} \quad (2.2)$$

Буди який діелектрик, з нанесеними на нього підключеними до мережі електродами можна розглядати як конденсатор певної ємності (рис.2.1).

Заряд конденсатора, як відомо, дорівнює

$$Q = C \cdot U \quad (2.3)$$

де C – ємність конденсатора;

U – прикладена до нього напруга.

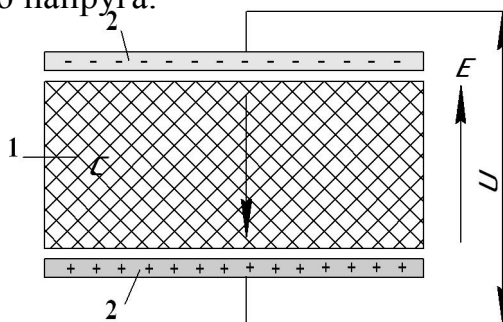


Рисунок 2.1. – Діелектрик в електричному полі(конденсатор): 1 – діелектрик; 2 – електроди.

Заряд конденсатора буде складатися з двох складових: Q_0 – у випадку вакууму та Q_d – діелектрика, що фактично розділяє електроди. Тоді повний заряд:

$$Q = Q_0 + Q_d$$

Однією з важливіших характеристик діелектриків є його *відносна діелектрична проникність* ϵ .

Ця величина представляє собою відношення заряду, отриманого при деякій напрузі на конденсаторі, що є діелектриком, до заряду, який можна отримати тому ж конденсаторі, якби діелектриком був вакуум.

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0} \quad (2.4)$$

З формули 2.4. виходить, що відносна діелектрична проникність будь якої речовини завжди більше одиниці; вона може дорівнювати одиниці ($\epsilon = 1$) тільки у випадку вакууму.

Діелектричну проникність також можна визначити як відношення вектора електричного зсуву \vec{D} до напруженості \vec{E} зовнішнього поля, що викликало це зсув:

$$\epsilon = \frac{\vec{D}}{\vec{E}} \quad (2.5)$$

Оскільки вектор електричного зсуву є суперпозицією напруженості електричного зсуву і поляризації, то:

$$\vec{D} = \vec{E} + \vec{P} \quad (2.6)$$

тоді діелектричну проникність можна виразити як:

$$\epsilon = 1 + P/E \quad (2.7)$$

По механізму зсуву заряджених частинок розрізняють електронну, іонну і дипольну поляризацію.

По характеру зсуви заряджених частинок поляризація може бути пружною (без гістерезисною) і релаксаційною (гістерезисною).

Переходячи до розглядання явища поляризації в зв'язку з агрегатним станом і структурою діелектриків можна виділити декілька її різновидів:

- пружна поляризація;
- релаксаційна поляризація;
- резонансна поляризація.

2. 3. Пружна поляризація, та її різновиди.

Пружна поляризація діелектриків не пов'язана з тепловим рухом молекул. До неї відносяться наступні види поляризації:

- а) поляризація пружного електронного зсуву;
- б) поляризація іонного пружного зсуву;
- в) дипольно-пружна поляризація;
- г) поляризація пружного ядерного зсуву.

Характерним для цих видів поляризації є те, що заряджені частинки під дією поля зміщуються на дуже малі відстані в межах поля пружних сил, що пов'язують ці частинки з іншими. В зв'язку з цим поляризацією пружного ядерного зсуву в промислових матеріалах можна нехтувати.

а) *Поляризація пружного електронного зсуву.* Цей вид поляризації пов'язаний із зсувом електронних оболонок атомів щодо ядер і має місце у всіх без виключення діелектриках, за винятком абсолютного вакууму. Важливо від-

значити, що у неполярних діелектриків з ковалентним зв'язком між атомами поляризація пружного електронного зсуву є основним видом поляризації (поліетилен, трансформаторне масло, парафін, водень) .

Дипольний момент, що виникає в атомах унаслідок пружного електронного зсуву, збільшується при збільшенні радіусів електронних оболонок атомів і кількості електронів на них. Оскільки загальний ефект поляризації при пружній деформації електронних оболонок в електричному полі невеликий, діелектрична проникність неполярних діелектриків мала.

Так у парафіну діелектрична проникність $\epsilon = 1,8 - 2,2$; у алмазу $\epsilon = 2,4$; у кремнію - 12,5; у германію - 16,0. Оскільки такі діелектричні матеріали як алмаз, кремній, германій часто не використовуються, а використовуються різні вуглеводні, то типові значення ϵ для діелектриків з неполярними молекулами складають 1,8 – 2,6.

При зростанні температури об'єм діелектрика зростає, і діелектрична проникність діелектрика у відповідності з формулою (2.5) зменшується. Особливо помітно зменшення ϵ при плавленні і випаровуванні діелектриків, коли їх об'єм істотно зростає. У неполярних діелектриках діелектрична проникність практично не залежить від частоти зовнішнього поля. Це пов'язано з тим, що частота обертання електронів на орбітах велика $\sim 10^{15} - 10^{16}$ Гц.

б) Поляризація пружного іонного зсуву. Цей вид поляризації викликаний пружним зміщенням іонів з рівноважних положень під дією зовнішнього електричного поля. Він характерний для іонних кристалів (мармур, куховарська сіль, слюда, кварц і ін.). Важливо відзначити, що в таких матеріалах, разом з поляризацією пружного іонного зсуву, присутня і поляризація пружного електронного зсуву. Типова величина діелектричної проникності складає $\epsilon = 5 \div 150$. Так у натрієвої солі (NaCl) $\epsilon = 6$, у корунду (Al_2O_3) $\epsilon = 10$, у рутилу (TiO_2) $\epsilon = 110$, у титанату кальцію ($CaTiO_3$) $\epsilon = 150$. З приведених даних виходить, що величина поляризації зростає із збільшенням радіусів іонів і із збільшенням їх зарядів.

Підвищення температури збільшує міжатомні відстані, унаслідок чого зв'язок між окремими іонами ослабляється, і полегшується взаємний зсув іонів під дією зовнішнього електричного поля. Тому при підвищенні температури діелектрична проникність іонних кристалів зростає

Час встановлення цього механізму поляризації порівняно з періодом оптичних коливань іонів в кристалічній решітці і складає $10^{-12} - 10^{-13}$ с. Тому до частот $10^{12} - 10^{13}$ Гц діелектрична проникність речовин з іонним зв'язком не залежить від частоти зовнішнього поля.

в) Дипольно-пружна поляризація. Ця поляризація полягає в повороті на малий кут диполів і має місце в полярних твердих діелектриках, де диполі міцно зв'язані зв'язками з іншими молекулами. Час встановлення цієї поляризації складає $10^{-12} - 10^{-13}$ с.

г) *Поляризація пружного ядерного зсуву*. Цей вид поляризації спостерігається в газах з складними молекулами. Час встановлення $10^{-12} - 10^{-13}$ с. Вне-сок цієї поляризації в діелектричну проникність нехтує малий.

2. 4. Поляризація релаксаційного типу та її різновиди.

У ряді діелектриків електрони іони і дипольні молекули можуть стрибком переходити з одного положення в інше. Ці переходи здійснюються частками завдяки отриманню ними енергії при теплових коливаннях. Електричне поле знижує енергетичний бар'єр для переходу по полю і підвищує енергетичний бар'єр для переходу проти поля. У результаті, *діелектрик поляризується, причому для поляризації потрібний час*. Інакше кажучи, *ці види поляризації є релаксаційними*. Основні види релаксаційної поляризації:

- а) дипольно-релаксаційна,
- б) іонно-релаксаційна,
- в) електронно-релаксаційна поляризація,
- г) резонансна поляризація.

а) *Дипольно-релаксаційна поляризація*. Поляризація цього вигляду спостерігається в багатьох твердих і рідких діелектриках з полярними групами: компаунди, бакеліт, амінопласти і ін. При дипольно-релаксаційній поляризації відбувається зсув полярних молекул або зсув радикалів, що входять до складу крупних молекул. Важливо відзначити, що дипольно-релаксаційна поляризація супроводжується необоротними втратами енергії при знаходженні діелектриків в змінному електричному полі.

Діелектрична проникність полярних речовин сильно залежить від їх температури і частоти зовнішнього електричного поля. При низьких температурах, коли рухливість молекул і радикалів, що входять до складу молекул, мала, поворот диполів на великі кути неможливий, і в матеріалі спостерігається поляризація електронного пружного зсуву і дипольно-пружна поляризація. У зв'язку з цим діелектрична проникність полярних матеріалів при низьких температурах мала ($\epsilon = 2 \div 2,5$). Із зростанням температури рухливість диполів збільшується, і полегшується їх орієнтація під дією зовнішнього поля. Отже, діелектрична проникність росте. Проте при подальшому зростанні температури кінетична енергія теплового руху диполів зростає настільки, що броунівський рух диполів руйнує орієнтацію, що задається зовнішнім полем. Тому діелектрична проникність може знижуватися (рис.2.2). Таким чином, залежність $\epsilon=f(t)$ для речовин з дипольно-релаксаційною поляризацією має характерну форму "горба".

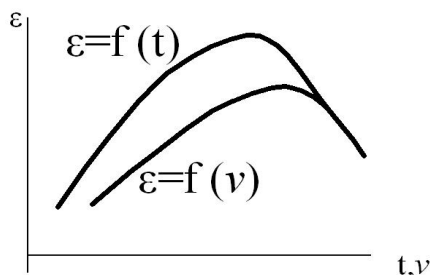


Рисунок 2.2. – Залежність діелектричної проникності від температури $\epsilon = f(t)$ і від частоти електричного поля $\epsilon = f(v)$

Оскільки орієнтація диполів по напрямку поля здійснюється в процесі теплового руху, те настання стану поляризації вимагає часу. Із збільшенням в'язкості зростає час, необхідний для настання поляризації. При збільшенні частоти електричного поля час дії поля на диполі за половину періоду зменшується, а отже, зменшується величина поляризації і знижується величина діелектричної проникності. Із збільшенням частоти максимум діелектричної проникності не тільки знижується, але і зміщується у бік високих температур, тобто меншої в'язкості діелектрика.

б) Іонно-релаксаційна поляризація. Релаксаційна поляризація також може бути пов'язаною з перекиданням з одного рівноважного положення в інше слабо зв'язаних іонів або полярних груп. Типовими прикладами є перекидання лужних іонів (Na^+ , K^+) з одного положення в інше в склі або перекидання гідроксильних груп (OH^-) в целюлозі. В цьому випадку говорять про іонно-релаксаційну поляризацію.

в) Електронно-релаксаційна поляризація. У діелектриках з кристалічною структурою, замість частини іонів у вузлах кристалічної решітки можуть знаходитися електрони і дірки (додатково іонізовані іони). При додатку електричного поля ці дефекти кристалічної решітки також можуть перекидатися з одного положення в інше. В цьому випадку говорять про електронно-релаксаційну поляризацію. Залежності діелектричної поляризації від температури і частоти зовнішнього поля якісно такі ж, як і для дипольно-релаксаційної поляризації.

г) Резонансна поляризація. При збігу власної частоти коливання структурної одиниці речовини (електрона, іона, радикала, що входить до складу молекули, або полярної молекули) з частотою зовнішнього поля спостерігається резонансна поляризація. В цьому випадку у вузькому інтервалі частот різко зростає діелектрична проникність. Очевидно, що резонансні частоти для поляризації пружного електронного і пружного іонного зсуву дуже великі (10^{16} - 10^{13} Гц), тому резонансна поляризація спостерігається для діелектриків з дипольно-релаксаційним типом поляризації.

ЛЕКЦІЯ 3.

Тема 2. Загальні відомості про діелектрики, їх основні характеристики.

2.5. Класифікація діелектриків по виду поляризації

2.6. Особливості поляризації активних діелектриків

2.5. Класифікація діелектриків по виду поляризації

Особливості поляризації дають можливість підрозділити всі діелектрики на декілька груп.

До першої групи можна віднести діелектрики, що мають в основному тільки електронну поляризацію, наприклад *неполярні* і *слабополярні* тверді речовини в кристалічному і аморфному станах (парафін, сіра, полістирол), а також неполярні і слабополярні рідини і гази (бензол, водень і ін.).

До *другої групи* відносяться діелектрики, що мають одночасно електронну і дипольно-релаксаційну поляризацію. Сюди належать полярні (дипольні) органічні, напіврідкі і тверді речовини (масляно-каніфольні компаунди, епоксидні смоли, целюлоза, деякі хлоровані вуглеводні і т. п.).

Третю групу складають тверді неорганічні діелектрики з електронною, іонною і іонно-електронно-релаксаційною поляризаціями. У цій групі доцільно виділити дві підгрупи матеріалів зважаючи на істотну відмінність їх електричних характеристик:

- 1) діелектрики з електронною та іонною поляризацією,
- 2) діелектрики з електронною, іонною і релаксаційною поляризацією.

До перших переважно відносяться кристалічні речовини з щільною упаковкою іонів [кварц, слюда, кам'яна сіль, корунд, рутил].

До других належать неорганічні стекла, матеріали, що містять склоподібну фазу (фарфор, мікалекс), і кристалічні діелектрики з нещільною упаковкою частинок в ґратках.

Четверту групу складають сегнетоелектрики, що характеризуються спонтанною, електронною, іонною і електронно-іонно-релаксаційною поляризаціями: сегнетова сіль, метатитанат барію і ін.

Приведена вище класифікація діелектриків дозволяє до певної міри зумовлювати основні електричні властивості їх, як це буде показано далі.

2. 6. Особливості поляризації в активних діелектриках

Під активними діелектриками прийнято розуміти діелектрики, поляризація яких відбувається не тільки під дією зовнішнього поля, але і під дією інших чинників: механічних зусиль, температури, дії світла і проникаючої радіації і ін. Такі діелектрики можуть бути використані як активні елементи датчиків зовнішніх дій. Розглянемо три основні групи таких діелектриків: сегнетоелектрики, п'єзоелектрики і електрети.

Сегнетоелектрики.

У сегнетоелектриках в певному діапазоні температур спостерігається спонтанна або мимовільна поляризація. Назву ця група діелектриків отримала за пропозицією І.В. Курчатова від сегнетової солі (подвійна калієво-натрієва сіль виннокам'яної кислоти $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \times 4\text{H}_2\text{O}$), у кристалах якої вперше була виявлена спонтанна поляризація. Оскільки властивості сегнетоелектриків багато в чому аналогічні властивостям феромагнетиків, за кордоном їх часто називають фероелектриками. У 1944 р. наш співвітчизник Б. М. Вул відкрив новий сегнетоелектрик - титанат барію BaTiO_3 . Декілька пізніше було показано, що сегнетоелектричними властивості мають титанати інших металів, ряд цирконітів, танталатів і ніобітів (SrTiO_3 , PbZrO_3 , NaTaO_3 , KNbO_3), а також тверді розчини на основі цих з'єднань.

Розглянемо природу спонтанної поляризації в таких матеріалах на прикладі титанату барію. Елементарну комірку кристалічної решітки цього матеріалу можна представити таким чином. У вершинах куба знаходяться іо-

ни барію, по центрах граней куба знаходяться іони кисню, а в центрі куба знаходиться іон титану (рис.2.3)

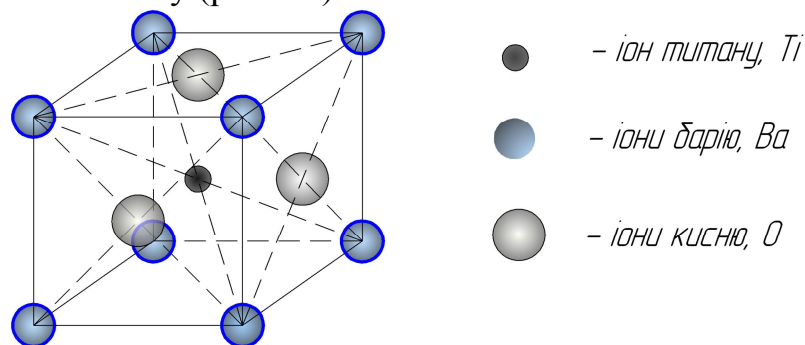


Рисунок 2.3. – Схема елементарної комірки кристалічної решітки титанату барію $BaTiO_3$.

Оскільки між атомами титану, кисню і барію здійснюється іонний зв'язок кристалічна решітка даного з'єднання упакована нещільно. Отже, іон титану може зміщуватися щодо центру елементарної комірки. При зсуві іона титану до якогось або іону кисню (або групі іонів), кулонівські сили утримують іон титану в цьому положенні, і елементарна комірка стає поляризованою. Поляризація однієї елементарної комірки приводить до появи диполя, електричне поле якого поляризує сусідні елементарні комірки. Таким чином, кристал мимоволі (спонтанно) поляризується.

Підвищення температури приводить до активізації коливань іона титану, і при рівності енергії теплового руху цього іона з енергією електростатичної взаємодії з іонами кисню елементарні комірки кристала деполіризуються. У результаті кристал переходить з сегнетоелектричного в параелектричний стан. Температуру переходу прийнято називати температурою Кюрі.

Важливо відзначити, що при температурах, менших температури Кюрі, у відсутності зовнішнього поля достатньо великі кристали сегнетоелектриків не мають електричного моменту. Це обумовлено тим, що у разі, коли всі дипольні моменти елементарних осередків кристала орієнтовані однаково, навколо кристала з'являється електричне поле. Потенційна енергія такого кристала різко зростає. Для зниження потенційної енергії кристал розбивається на області (домени), в межах яких дипольні моменти елементарних осередків паралельні, але сумарні електричні моменти сусідніх доменів антипаралельні або перпендикулярні. Таким чином, сумарний електричний момент кристала рівний нулю.

При приміщенні сегнетоелектрика в електричне поле сумарні моменти диполів орієнтуються по полю і поляризація сегнетоелектрика зростає (рис.2.4.)

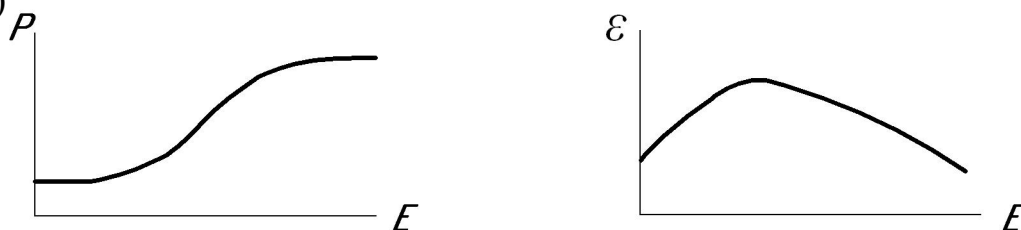


Рисунок 2.4. – Залежності поляризації (P) і діелектричної проникності сегнетоелектриків (ϵ) від напруженості електричного поля (E).

Зростання поляризації приводить до зростання відношення P/E , а отже, до зростання діелектричної проникності. Проте у міру зростання напруженості поля приріст поляризації знижується, падає відношення P/E , і тому залежність діелектричної проникності від напруженості поля має куполоподібний вигляд. У сегнетоелектриків максимальні значення діелектричної проникності досягають сотень тисяч одиниць, відповідно, габарити конденсаторів з таких матеріалів можуть бути вельми малими.

Істотний вплив на діелектричну проникність надає температура. При підвищенні температури кінетична енергія ангармонічних коливань іонів зростає, і електростатичний зв'язок між іонами слабшає. Зовнішньому полю легко перекинути іони з одного положення в інше, відповідно, поляризація і діелектрична проникність зростають. Максимум діелектричної проникності спостерігається при температурі Кюрі.

Легування сегнетоелектриків приводить до зміни енергії зв'язку між іонами і дає можливість змінювати температуру Кюрі і величину діелектричної проникності.

П'єзоелектрики.

П'єзоелектриками називають діелектрики, в яких під дією механічної напруги з'являється поляризація, а під дією електричного поля п'єзоелектрики пружно деформуються. Таким чином, п'єзоелектрики є електромеханічними перетворювачами, що перетворюють механічну енергію в електричну і назад.

П'єзоелектричний ефект спостерігається в кристалах, що не мають центру симетрії, у яких при деформації елементарної комірки відбувається поява електричного моменту.

П'єзоелектричними властивостями володіють багато кристалів, позбавлені центру симетрії: кварц, турмалін, сегнетова сіль і ін. Часто використовується п'єзокераміка. П'єзоелектрики знайшли широке застосування для виготовлення резонаторів, перетворювачів коливань і ін.

Електрети.

Електретами називають діелектрики, у яких постійний електричний момент або надмірний заряд зберігаються тривалий час. Електрети можуть служити джерелами електричного поля в навколишньому просторі, аналогічно постійним магнітам, джерелами існуючого магнітного поля. Ця аналогія у властивостях постійних магнітів і електретів відбита в їх назві (по-англійськи постійний магніт - magnet). Залежно від способів отримання розрізняють:

- термоелектрети,
- фотоелектрети та радіоелектрети,
- трибоелектрети.

Термоелектрети. Вперше термоелектрет був отриманий японським фізиком Егутсі в 1921 році. У ванну між двома електродами заливалася суміш полярних діелектриків карнаубського і бджолиного воску з додаванням каніфолі, яка застигала при додаванні напруги між електродами. Після застигання діелектрика він ставав джерелом постійного електричного поля.

При порівняно слабких зовнішніх полях ($E < 10$ кВ/мм) у термоелектретах відбуваються в основному процеси поляризації. При цьому сторони елек-

трета, звернені до електродів, мають заряд протилежний по знаку заряду електроду. Такі електрети називають гетероелектретами. При електризації в сильних полях ($E > 10$ кВ/мм), крім поляризації, відбувається емісія зарядів з поверхні електроду в діелектрик. В цьому випадку поверхні діелектрика, прилеглі до електродів, набувають заряду однакового по знаку із зарядом електроду. Такі електрети називають гомоелектретами. Хороші термоелектрети виходять їх діелектриків з довгими полярними молекулами - поліамідів і полівінілацетатів. Для отримання електретів також використовують неорганічні матеріали: слюду, сірку, сегнетоелектрики. При отриманні електретів з неорганічних сегнетоелектриків не обов'язково доводити їх до плавлення, досить нагрівати їх до температури Кюрі.

Фотоелектрети і радіоелектрети. Вперше фотоелектрет був отриманий болгарським ученим Г. Наждаковим в 1937 році. Він наніс на металевий лист, що був нижнім електродом, шар сірки. Через верхній сітчастий електрод сірка освітлювалася. За рахунок внутрішнього фотоефекту в сірці утворювалися електрони і дірки, які розносилися діючим зовнішнім полем до відповідних електродів. Після зняття зовнішнього поля навколо плівки сірки з'являлася ЕДС.

Фотоелектрети широко використовуються в ксерографії і моментальній фотографії.

При опромінюванні діелектриків γ - квантами і потоками швидких електронів вони також електризуються. Такі діелектрики прийнято називати *радіоелектретами*. Як правило, радіоелектрети готують на основі неорганічного скла.

Трибоелектрети.

Трибоелектретами прийнято називати матеріали, що електризуються при терті. Типові представники трибоелектретів - янтар, ебоніт, плексиглас. При терті відбувається руйнування міжатомних зв'язків і перенесення заряду з однієї поверхні на іншу.

ЛЕКЦІЯ 4.

Тема 3. Електропровідність діелектриків. Її характеристика.

3.1. Електропровідність діелектриків.

3.2. Вплив напруженості електричного поля на електропровідність діелектриків.

3.3. Вплив температури на електропровідність діелектриків.

3.4. Особливості електропровідності різних рідких і газових діелектриків.

3.1. Електропровідність діелектриків

Особливістю електропровідності діелектриків в більшості випадків є її неелектронних характер.

Електропровідність діелектриків визначається в основному переміщенням іонів. На концентрацію іонів впливають: склад матеріалу, температура, опромінювання матеріалу частинками високих енергій.

Для твердих діелектриків слід розрізняти *об'ємну і поверхневу електропровідність*. Для порівняльної характеристики різних матеріалів у відношенні їх об'ємної та поверхневої електропровідності користуються значенням *питомого об'ємного електроопору* ρ і *питомого поверхневого електроопору* ρ_s .

По питомому об'ємному чи поверхневому електроопору можна визначити відповідну питому об'ємну або поверхневу електропровідність.

Так для зразка простого перерізу при однорідному полі питомий *об'ємний електроопір* визначиться формулою:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{h} \quad (3.1.)$$

де R – об'ємний електроопір зразка, Ом;

S – площа електроду, м²;

h – товщина зразка, м.

Питома об'ємна електропровідність γ [См · м⁻¹] визначається як:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{h}{R \cdot S} \quad (3.2.)$$

Питомий поверхневий електроопір розраховується по формулі:

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{l} \quad (3.3)$$

де R_s – поверхневий електроопір матеріалу зразка, Ом;

d – ширина паралельно поставлених електродів, м;

l – відстань між електродами зразка, м.

Питома поверхнева електропровідність $\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}$, вимірюється в Сименсах [См].

Повна електропровідність твердого діелектрика складається з об'ємної та поверхневої.

При тривалій роботі під напругою струм через тверді і рідкі діелектрики з часом може зменшуватися або збільшуватися. Зменшення струму з часом говорить про те, що електропровідність матеріалу була обумовлена іонами сторонніх домішок і зменшувалася за рахунок електричного очищення зразка. Збільшення струму з часом говорить про участь в нім зарядів, що є структурними елементами самого матеріалу, і про те, що в ньому протікає незворотній процесі старіння під напругою, здатний поступово привести до руйнування – пробією діелектрика.

Електропровідність діелектриків обумовлюється агрегатним станом речовини, залежить від впливу температури, вологості, зовнішнього електричного, магнітного поля чи інших видів випромінювання.

3.2. Вплив напруженості поля на електропровідність діелектриків.

При порівняно невеликих значеннях напруженості поля електропровідність діелектриків слідує закону Ома. Проте при підвищенні напруженості поля електропровідність перестає слідувати закону Ома. При подальшому підвищенні напруженості поля можливі два випадки:

- у першому електропровідність швидко наростає із зростанням напруженості поля (рис.3.1 (а))

- у другому - спочатку настає насичення електропровідності, і лише потім в сильних полях спостерігається її різке зростання (рис.3.1 (б)).

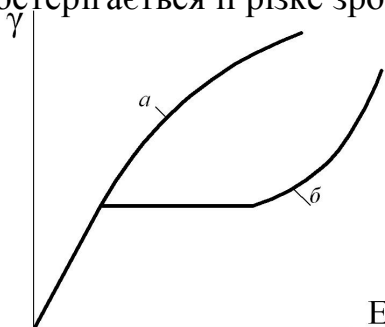


Рисунок 3.1. – Залежність електропровідності від напруженості поля для забруднених і чистих діелектриків з іонним зв'язком (а), і не іонних кристалів високої чистоти (б).

Перший випадок спостерігається в забруднених діелектриках і чистих діелектриках з іонним зв'язком, в яких при збільшенні напруженості поля відбувається розмноження заряджених часток. Другий випадок типовий для не іонних діелектриків високої чистоти, в яких число заряджених часток обмежене, що і викликає насичення електропровідності. У дуже сильних полях відбувається розмноження іонів в результаті переходу до пробою.

3.3. Вплив температури на електропровідність діелектриків

При підвищенні температури енергія системи підвищується на величину αT і вірогідність виходу іона з потенційної ями зростає. Тому електропровідність діелектриків при підвищенні температури росте відповідно до виразу:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(\frac{E_a}{\alpha T}\right) \quad (3.4.)$$

где: γ – питома електропровідність діелектрика,

γ_0 – константа,

E_a – енергія активації виходу іона з потенційної ями,

αT – теплова енергія системи.

Залежність електропровідності від температури показана на рис.3.2.

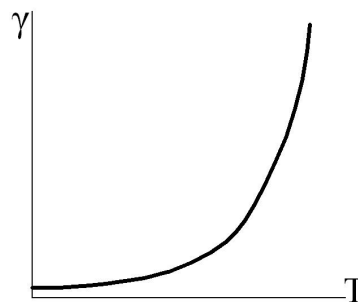


Рисунок 3.2. – Залежність електропровідності від температури.

3.4. Особливості електропровідності різних газових і рідких діелектриків.

Електропровідність газів

Гази при невеликих значеннях напруженості електричного поля володіють виключно малою провідністю. Струм в газах може виникнути тільки за наявності в них іонів або вільних електронів. Іонізація нейтральних молекул газу виникає або під дією зовнішніх чинників, або унаслідок зіткнень заряджених частинок з молекулами.

Зовнішніми чинниками, що викликають іонізацію газу, є рентгенівські промені, ультрафіолетові промені, космічні промені, радіоактивне випромінювання, а також термічна дія (сильний нагрів газу). Електропровідність газу, обумовлена дією зовнішніх іонізаторів, називається *несамостійною*

З іншого боку, особливо в розріджених газах, можливе створення електропровідності за рахунок іонів, що утворюються в результаті зіткнення заряджених частинок з молекулами газу. Ударна іонізація виникає в газі в тих випадках, коли кінетична енергія заряджених частинок, що набуває під дією електричного поля, досягає достатньо великих значень. Електропровідність газу, обумовлена ударною іонізацією, носить назву *самостійної*.

У слабких полях ударна іонізація відсутня і самостійній електропровідності не виявляється. При іонізації газу, обумовленій зовнішніми чинниками, відбувається розщеплювання молекул на позитивні і негативні іони. Одночасно частина позитивних іонів, з'єднуючись з негативними частинками, утворює нейтральні молекули. Цей процес, як відомо, називається *рекомбінацією*.

Наявність рекомбінації перешкоджає безмежному зростанню числа іонів в газі і пояснює встановлення певної концентрації іонів через короткий час після початку дії зовнішнього іонізатора.

На рис.3.3. показано залежність струму в повітрі від напруги зовнішнього поля. До напруження U_n виконується закон Ома. По мірі зростання прикладеної напруги іони уносяться до електродів, не встигаючи при цьому рекомбінувати, що викликає насичення струму.

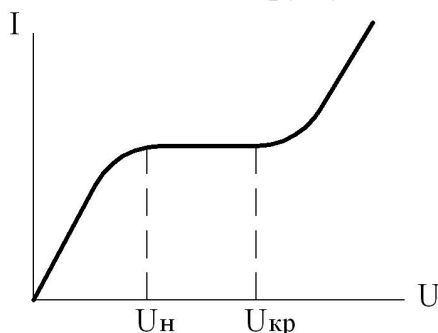


Рисунок 3.2. – Залежність струму в газі від напруги

Струм насичення U_n досягається для повітря в нормальних умовах при відстані між електродами в 10 мм і напруженості поля. Реальне значення щільності струму насичення в повітрі вельми мало і складає приблизно 10^{-15} А/м². Тому повітря можна розглядати як вельми досконалий діелектрик до тих пір, поки не створяться умови для появи ударної іонізації.

При збільшенні напруги струм залишається постійним лише до тих пір, поки іонізація здійснюється під дією зовнішніх чинників. При виник-

ненні ударної іонізації з'являється самостійна електропровідність (за $U_{кр}$) і струм знов починає збільшуватися із зростанням напруги.

Електропровідність рідин

Електропровідність рідких діелектриків тісно пов'язана з будовою молекул рідини. У неполярних рідинах електропровідність залежить від наявності дисоційованих домішок, зокрема води; у полярних рідинах електропровідність визначається не тільки домішками, але іноді і дисоціацією молекул самої рідини. Струм в рідині може бути обумовлений як пересуванням іонів, так і переміщенням щодо крупних заряджених колоїдних часток. Неможливість повного видалення здібних до дисоціації домішок з рідкого діелектрика утрудняє отримання електроізоляційних рідин з малими значеннями питомої провідності.

Полярні рідини завжди мають підвищену провідність в порівнянні з неполярними, причому зростання діелектричної проникності приводить до зростання провідності. Сильнополярні рідини відрізняються настільки високою провідністю, що розглядаються вже не як рідкі діелектрики, а як провідники з іонною електропровідністю.

Очищення рідких діелектриків від домішок, що містяться в них, помітно підвищує їх питомий опір. При тривалому пропусканні електричного струму через нейтральний рідкий діелектрик також можна спостерігати зростання опору за рахунок перенесення вільних іонів до електродів (*електричне очищення*).

Питома електропровідність будь-якої рідини сильно залежить від температури. Із збільшенням температури зростає рухливість іонів у зв'язку із зменшенням в'язкості і може збільшуватися ступінь теплової дисоціації. Обидва ці чинники підвищують провідність.

ЛЕКЦІЯ 5.

Тема 4. Діелектричні втрати діелектриків. Їх основні характеристики.

4.1. Діелектричні втрати діелектриків. Основні поняття.

4.2. Види діелектричних втрат в діелектриках.

4.3. Особливості діелектричних втрат рідких і газових і твердих діелектриках.

4.1. Діелектричні втрати діелектриків. Основні поняття.

Під дією електричного поля в діелектрику розвиваються два основні процеси: поляризація і кризна електропровідність. Розвиток цих процесів може привести до розсіяння енергії електричного поля в діелектрику у вигляді тепла. Так, під дією електричного поля вільні носії заряду набирають кінетичну енергію і, стикаючись з молекулами речовини, передають їм цю енергію. Таким чином, енергія електричного поля трансформується в теплову енергію

матеріалу. Крім того, у разі, коли структурні одиниці речовини (молекули) полярні, зовнішнє електричне поле здійснює роботу по повороту диполів по полю, і як наслідок, енергія поля знов розсівається в матеріалі.

Діелектричними втратами називають енергію, що розсіюється в одиницю часу в діелектрику при дії на нього електричного поля і що викликає нагрів діелектрика.

Втрати енергії в діелектриках спостерігаються як при змінній напрузі, так і при постійній, оскільки в матеріалі виявляється крізний струм, обумовлений електропровідністю. При постійній напрузі, коли немає періодичної поляризації, якість матеріалу характеризується значеннями питомих об'ємного і поверхневого електроопорів. При змінній напрузі необхідно використовувати іншу характеристику якості матеріалу, оскільки в цьому випадку, окрім крізної електропровідності, виникає ряд додаткових причин, що викликають втрати енергії в діелектрику.

Діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі можна характеризувати розсіюваною потужністю, віднесеною до одиниці об'єму, або *питомими втратами*. Для кількісної оцінки величини діелектричних втрат використовують поняття *тангенс кута діелектричних втрат*. Введемо це поняття.

Кутом діелектричних втрат називається кут, доповнюючий до 90° кут зрушення фаз φ між струмом і напругою в ємкісному ланцюзі. У разі ідеального діелектрика вектор струму в такому ланцюзі випереджатиме вектор напруги на 90° , при цьому кут δ буде рівний нулю. Чим більше потужність розсіювання, перехідна в тепло в діелектрику, тим менше кут зрушення фаз φ і тим більше кут діелектричних втрат δ і його функція $\text{tg } \delta$.

У ідеальному діелектрику зрушення фаз між напругою U і реактивною складовою струму I_p дорівнює 90 градусам. У реальному діелектрику з'являється активна складова струму I_a . Тому векторна діаграма струмів і напруги виглядає, як показано на рис.4.1.

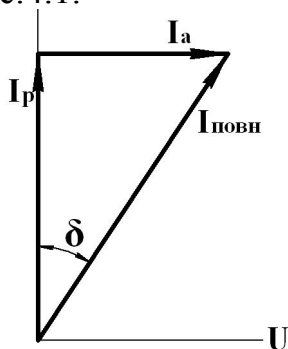


Рисунок 4.1. – Векторна діаграма струмів і напруги в реальному діелектрику.

Знаючи величину напруги U , кругову частоту ω і ємкість конденсатора C , можна визначити реактивну складову струму:

$$I_p = U \cdot \omega \cdot C \quad (4.1.)$$

Тоді активна складова струму визначиться формулою:

$$I_a = I_p \cdot \text{tg} \delta \quad (4.2.)$$

Розсіювану потужність можна визначити таким чином:

$$P = U \cdot I_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (4.3)$$

Важливо відзначити, що в приведеній вище формулі величина напруги і кругова частота не залежать від матеріалу діелектрика, а ємкість конденсатора і тангенс кута втрат визначаються матеріалом діелектрика. Оскільки ємкість залежить від діелектричної проникності діелектрика і геометрії конденсатора (площі обкладань і відстані між обкладаннями), то розсіювана в матеріалі потужність електричного поля буде пропорційна добутку діелектричної проникності на тангенс кута втрат. Величину

$$K_\delta = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (4.4)$$

називають *коефіцієнтом діелектричних втрат*.

При дослідженні властивостей матеріалів за допомогою вимірювальних мостів, є можливість визначення ємкості, прикладеної напруги і кругової частоти. Отже, вимірювальні мости можуть автоматично визначати активну складову струму і повний струм, інакше кажучи, відбувається автоматичне вимірювання тангенса кута втрат. Таким чином, $\operatorname{tg} \delta$ можна використовувати як міру втрат енергії поля в діелектрику.

Неприпустимо великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають сильний нагрів виготовленого з нього виробу і можуть привести до його теплового руйнування. Навіть якщо напруга, прикладена до діелектрика, недостатньо велика для того, щоб за рахунок діелектричних втрат міг відбутися неприпустимий перегрів, то і в цьому випадку великі діелектричні втрати можуть принести істотну шкоду.

Природа діелектричних втрат електроізоляційних матеріалах різна і залежність від агрегатного стану речовини.

Діелектричні втрати можуть обумовлюється крізним струмом або, як указувалося при розгляді явища поляризації, активними складовими поляризаційних струмів. У технічних електроізоляційних матеріалах, крім втрат від крізної електропровідності і втрат від сповільненої поляризації, виникають діелектричні втрати, які сильно впливають на електричні властивості діелектриків. Ці втрати викликаються наявністю ізольованих один від одного сторонніх провідних або напівпровідних включень вуглецю, оксидів заліза і так далі і значні навіть при малому вмісті таких домішок в електроізоляційному матеріалі.

У разі високої напруги втрати в діелектрику виникають унаслідок іонізації газових включень усередині діелектрика, що особливо інтенсивно відбувається при високих частотах.

Зважаючи на сказане можна бачити, що діелектричні втрати набувають серйозного значення для матеріалів, використовуваних в установках високої напруги, у високочастотній апаратурі і особливо у високовольтних високочастотних пристроях, оскільки величина діелектричних втрат пропорційна квадрату прикладеної до діелектрика напруги і частоті поля. Матеріали, що призначаються для застосування у вказаних умовах, повинні відрізнятися малими значеннями кута втрат і діелектричної проникності.

4.2. Види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах

Діелектричні втрати по їх особливостях і фізичній природі можна підрозділити на чотири основні види:

- 1) діелектричні втрати, обумовлені поляризацією;
- 2) діелектричні втрати крізної електропровідності;
- 3) іонізаційні діелектричні втрати;
- 4) діелектричні втрати, обумовлені неоднорідністю структури.

Діелектричні втрати, обумовлені поляризацією, особливо виразно спостерігаються в речовинах, що володіють релаксаційною поляризацією: у діелектриках дипольної структури і в діелектриках іонної структури з нещільною упаковкою іонів.

Релаксаційні діелектричні втрати викликаються порушенням теплового руху частинок під впливом сил електричного поля. Це порушення приводить до розсіяння енергії і нагріву діелектрика.

У температурній залежності тангенса кута релаксаційних діелектричних втрат спостерігається максимум при деякій температурі, характерній для даної речовини. При цій температурі час релаксації частинок діелектрика приблизно співпадає з періодом зміни прикладеного змінного електричного поля. Якщо температура така, що час релаксації частинок значно більше напівперіоду зміни прикладеної змінної напруги, то тепловий рух частинок буде менш інтенсивним, і втрати зменшаться; якщо температура така, що час релаксації частинок значно менше напівперіоду зміни напруги, то інтенсивність теплового руху буде більша, зв'язок між частинками зменшиться, внаслідок чого втрати також знизяться.

Діелектричні втрати, спостережувані в сегнетоелектриках, пов'язані з явищем спонтанної поляризації. Тому втрати в сегнетоелектриках є значними при температурах нижче за точку Кюрі, коли має місце спонтанна поляризація. При температурах вище за точку Кюрі втрати в сегнетоелектриках зменшуються. Електричне старіння сегнетоелектрика з часом супроводжується деяким зменшенням втрат.

До діелектричних втрат, обумовлених поляризацією, слід віднести також так звані *резонансні втрати*, що виявляються в діелектриках при світлових частотах. Цей вид втрат з особливою чіткістю спостерігається в деяких газах при строго певній частоті і виражається в інтенсивному поглинанні енергії електричного поля.

Резонансні втрати можливі і в твердих речовинах, якщо частота вимушених коливань, що викликаються електричним полем, співпадає з частотою власних коливань частинок твердої речовини. Наявність максимуму в частотній залежності $\text{tg}\delta$ характерний також і для резонансного механізму втрат, проте в даному випадку, температур а на положення максимуму не впливає.

Діелектричні втрати, обумовлені крізною електропровідністю, виявляються в діелектриках, що мають помітну об'ємну або поверхневу електропровідність.

Діелектричні втрати цього вигляду не залежать від частоти поля; $\text{tg}\delta$ зменшується з частотою по гіперболічному закону.

Діелектричні втрати, обумовлені електропровідністю, зростають з температурою по експоненціальному закону.

Іонізаційні діелектричні втрати властиві діелектрикам в газоподібному стані, Іонізаційні втрати виявляються в неоднорідних електричних полях при напрузі, що перевищує значення, відповідне початку іонізації даного газу. Із збільшенням тиску газу величина напруги початку іонізації зростає.

Діелектричні втрати, обумовлені неоднорідністю структури, спостерігаються в шаруватих діелектриках з просоченого паперу і тканини, в пластмасах з наповнювачем, в пористій кераміці, в похідних слюди, міканітах, мікалексі тощо.

Для наочності основні відомості про особливості різних видів діелектричних втрат зведемо в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1. –

Класифікація втрат в діелектриках

| Діелектричні втрати | Головні особливості | Види діелектриків |
|-------------------------------------|---|--|
| Обумовлені поляризацією | | |
| релаксаційні (дипольні і іонні) | Наявність максимуму тангенса кута втрат, залежного від температури і частоти | Дипольні рідкі і тверді діелектрики, іонні з нещільною упаковкою |
| резонансні | Наявність різко вираженого максимуму при деякій частоті (вище за 10^{13} Гц), положення якого не залежить від температури | Всі види діелектриків |
| спонтанній поляризації | Великі: вище за точку Кюрі спостерігається різке зменшення | Сегнетоелектрики |
| Обумовлені електропровідністю | Незалежність втрат від частоти (тангенс кута втрат з частотою знижується по гіперболі) і помітне зростання з температурою | Рідкі і тверді діелектрики з великою електропровідністю |
| Іонізаційні | Спостерігаються при напрузі вище іонізаційного | Газоподібні діелектрики і тверді з газовими включеннями |
| Обумовлені неоднорідністю структури | Складна залежність втрат від компонентів, що входять до складу діелектрика і випадкові домішки | Неоднорідні діелектрики |

4.3. Особливості діелектричних втрат рідких і газових і твердих діелектриках.

Діелектричні втрати в газах .

Діелектричні втрати в газах при напруженості поля, нижчих за значення, необхідних для розвитку ударної іонізації молекул газу, дуже малі. В цьому випадку газ можна практично розглядати як ідеальний діелектрик.

Джерелом діелектричних втрат газу може бути в основному тільки електропровідність, оскільки орієнтація дипольних молекул газів при їх поляризації не супроводжується діелектричними втратами.

Як відомо, всі гази відрізняються вельми малою електропровідністю, і кут діелектричних втрат у зв'язку з цим буде малий, особливо при високих частотах. Питомий об'ємний опір газів $\gamma \sim 10^{16}$ Ом·м, $\epsilon \approx 1$, $\text{tg}\delta < 4 \cdot 10^{-8}$ при $f = 50$ Гц (у відсутність іонізації).

При високій напрузі і неоднорідному полі, коли напруженість в окремих місцях перевершить деяке критичне значення, молекули газу іонізуються, внаслідок чого, в газі виникають втрати на іонізацію.

При високих частотах іонізація і втрати в газах зростають настільки, що явище може повісти до розігрівання і руйнування виробів з газовою ізоляцією.

Виникнення іонізації газу, що заповнює закриті пори в твердій ізоляції, нерідко приводить до такого ж руйнування. Іонізація повітря супроводжується утворенням озону і оксидів азоту, що викликає хімічне розкладання органічної ізоляції, що містить газові включення.

На лініях електропередачі високої напруги втрати на іонізацію повітря у верхні провідів (явище *корони*) знижують ККД лінії.

Діелектричні втрати в рідких діелектриках

У неполярних рідинах діелектричні втрати обумовлені тільки електропровідністю, якщо рідина не містить домішок з дипольними молекулами. Питома провідність нейтральних чистих рідин, як було вказано раніше, надзвичайно мала, завдяки чому малі і діелектричні втрати. Прикладом може служити ретельно очищене від домішок нафтове конденсаторне масло, $\text{tg}\delta$ якого дуже малий.

Полярні рідини залежно від умов (температура, частота) можуть володіти помітними втратами, пов'язаними з дипольно-релаксаційною поляризацією, крім втрат, обумовлених електропровідністю.

Вживані в техніці рідкі діелектрики часто є сумішами неполярних і полярних речовин (наприклад, масляно-каніфольні компаунди) або є полярними рідинами (совол).

У рідких діелектриків з полярними молекулами помітно виявляється залежність діелектричних втрат від в'язкості. Питома провідність таких рідин при кімнатній температурі $10^{-10} - 10^{-11}$ См · м⁻¹. Діелектричні втрати, спостережувані в полярних в'язких рідинах при змінній напрузі, значно перевершують втрати, обумовлені електропровідністю. Такі втрати називають *дипольно-релаксаційними втратами*. Пояснення природи втрат в полярних в'язких рі-

динах можна дати, ґрунтуючись на уявленнях про механізм дипольно-релаксаційної поляризації.

Дипольні молекули, слідує за зміною електричного поля, повертаються у в'язкому середовищі і викликають втрати електричної енергії на тертя з виділенням тепла. Якщо в'язкість рідини достатньо велика, молекули не встигають слідувати за зміною поля і дипольна поляризація практично зникає; діелектричні втрати при цьому будуть малі. Дипольні втрати будуть також малі, якщо в'язкість рідини мала і орієнтація молекул відбувається без тертя. При середній в'язкості дипольні втрати можуть бути істотні і при деякому значенні в'язкості мають максимум.

При підвищенні частоти максимум $\text{tg}\delta$ зміщується в область вищої температури: велика частота вимагає меншого часу релаксації, необхідного для отримання максимуму кута втрат, а для зменшення часу релаксації, необхідне зниження в'язкості, тобто підвищення температури. Найменші значення $\text{tg}\delta$ відповідають температурам, при яких в'язкість рідини стає настільки малою, що орієнтація диполів відбувається практично без тертя. Втрати в цьому випадку малі. Подальше зростання $\text{tg}\delta$ з підвищенням їх вельми малими втратами знаходять застосування як високочастотні діелектрики.

Діелектричні втрати в твердих діелектриках

Діелектричні втрати в твердих діелектриках необхідно розглядати у зв'язку з їх структурою. Тверді речовини володіють різноманітним складом і будовою; у них можливі всі види діелектричних втрат.

Для зручності розгляду діелектричних втрат в твердих речовинах останні можна підрозділити на чотири групи:

- діелектрики молекулярної структури,
- іонної структури,
- сегнетоелектрики,
- діелектрики неоднорідної структури.

Діелектричні втрати в діелектриках молекулярної структури залежать від виду молекул.

У разі неполярних молекул, в речовинах, що не мають домішок, діелектричні втрати нікчемно малі. До таких діелектриків відносяться сірка, парафін, неполярні полімери — поліетилен, політетрафторетилен, полістирол і ін. Вказані речовини в зв'язку з їх малими втратами знаходять застосування як високочастотні діелектрики.

Діелектрики молекулярної структури з полярними молекулами є головним чином органічними речовинами, широко використовуваними в техніці. До них належать матеріали на основі целюлози (папір, картон і ін.), полярні полімери: поліметилметакрилат (органічне скло), поліаміди (капрон і ін.) і поліуретани, каучукові матеріали (ебоніт), фенолформальдегідні смоли (бакеліт і ін.), ефіри целюлози (ацетилцелюлоза і ін.) — і ряд інших матеріалів. Всі вони із-за властивої їм дипольно-релаксаційної поляризації володіють великими втратами.

Втрати в цих діелектриках істотно залежать від температури; при деяких температурах виявляються максимум і мінімум втрат; зростання втрат після мінімуму пояснюється збільшенням втрат кризної електропровідності.

Діелектричні втрати твердих речовин іонної структури пов'язані з особливостями упаковки іонів в ґратках.

У речовинах кристалічної структури з щільною упаковкою іонів при відсутності домішок, що спотворюють ґрати, діелектричні втрати вельми малі. При підвищених температурах в таких речовинах з'являються втрати від кризної електропровідності. До речовин цього типу відносяться численні кристалічні неорганічні з'єднання, що мають велике значення в сучасному виробництві електротехнічної кераміки, наприклад корунд (Al_2O_3), що входить до складу ультрафарфору. Прикладом з'єднань такого роду є також кам'яна сіль. До діелектриків кристалічної структури з нещільною упаковкою іонів відноситься ряд кристалічних речовин, що характеризуються релаксаційною поляризацією, що викликає підвищені діелектричні втрати. До цих речовин відносяться: муліт, вхідний в склад ізоляторного фарфору, кордієрит.

Діелектричні втрати в аморфних речовинах іонної структури.— неорганічних стеклах — пов'язані з явищем поляризації і наявністю електропровідності.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках вищі, ніж у звичайних діелектриків. Особливістю сегнетоелектриків є наявність в них мимовільній поляризації, що виявляється в певному температурному інтервалі, аж до точки Кюрі. Діелектричні втрати в сегнетоелектриках мало змінюються з температурою в області мимовільної поляризації і різко падають при температурі вище за точку Кюрі, коли сегнетоелектричні властивості втрачаються і мимовільна поляризація зникає.

Діелектричні втрати в твердих речовинах неоднорідної структури. До твердих речовин цього типу, використовуваних як діелектрики, належать матеріали, до складу яких входить не менше двох компонентів, механічно змішаних один з одним. До неоднорідних діелектриків відноситься раніше всього кераміка. Будь-який керамічний матеріал є складною багатофазною системою. У складі кераміки розрізняють кристалічну фазу, склоподібну і газову (гази в закритих порах). Діелектричні втрати в кераміці залежать від характеру кристалічної і склоподібної фаз і кількісного співвідношення між ними. Газова фаза в кераміці викликає підвищення діелектричних втрат при високих напруженостях поля унаслідок розвитку іонізації.

До неоднорідних матеріалів слід віднести слюду, що володіє шаруватою структурою. Наявність напівпровідних прошарків в пластинках слюди викликає збільшення, $tg\delta$ при змінній напрузі низької частоти в порівнянні із значенням $tg\delta$ самих вельми тонких монокристалів цього матеріалу.

Просочений папір слід також віднести до діелектриків неоднорідної структури. Такий папір, окрім волокон целюлози, містить просочуючу речовину того або іншого складу. Діелектричні втрати просоченого паперу визначаються електричними властивостями обох компонентів, їх кількісним співвідношенням і залишковими повітряними включеннями.

ЛЕКЦІЯ 6.

Тема 5. Пробій діелектриків. Основні характеристики пробою.

- 5.1. Загальна характеристика явища пробою. Електрична міцність.
- 5.2. Пробій твердих діелектриків.
- 5.3. Особливості пробою газових діелектриків.
- 5.4. Пробій рідких діелектриків.

5.1. Загальна характеристика явища пробою. Електрична міцність.

Діелектрик, знаходячись в електричному полі, втрачає властивості електроізоляційного матеріалу, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення. Це явище носить назву *пробою діелектрика* або порушення його електричної міцності.

Значення напруги, при якій відбувається пробій діелектрика, називається *пробивною напругою*, а відповідне значення напруженості поля – *електричною міцністю* діелектрика.

Напруга пробою це те значення напруги зовнішнього електричного поля при якому різко знижується питомий електроопір матеріалу. Робоча напруга для діелектрика повинна бути нижчою за напругу пробою в 2,5 – 4 рази.

Пробивна напруга позначається $U_{пр}$ і вимірюється найчастіше в кіловольтах.

Електрична міцність це одна з основних характеристик діелектрика. *Електрична міцність* визначається пробивною напругою, віднесеною до товщини діелектрика в місці пробою:

$$E_{пр} = U_{пр} / h \quad (5.1.)$$

де h — товщина діелектрика.

Зручні для практичних цілей чисельні значення електричної міцності діелектриків виходять, якщо пробивну напругу виражати в кіловольтах, а товщину діелектрика – в міліметрах. Тоді електрична міцність буде в кВ/мм.

Явище електричного пробою пов'язане з електронними процесами в діелектрику, що виникають в сильному електричному полі і приводять до раптового різкого місцевого зростання щільності електричного струму до моменту пробою.

Тепловий пробій є наслідком зменшення активного опору діелектрика під впливом, нагріву в електричному полі, що приводить до зростання активного струму і подальшого збільшення нагріву діелектрика аж до його термічного руйнування.

При тривалій дії напруги пробою може бути викликаний електрохімічними процесами, що відбуваються в діелектрику під впливом електричного поля.

Пробій газу обумовлюється явищем ударній і фотонній іонізації. Пробій рідких діелектриків відбувається в результаті іонізаційних теплових процесів. Одним з найголовніших чинників, сприяючих пробою рідин, є наявність в них сторонніх домішок. Пробій твердих тіл може викликатися як електричним, так і тепловим процесами, що виникають під дією поля.

З викладеного виходить, що пробій газів — явище чисте електричне. Тому всі чисельні дані по пробію газів відносяться до максимальних (амплітудним) значень напруги. Оскільки в руйнуванні рідких і особливо твердих діелектриків істотну роль грають теплові процеси, то у разі додатку до діелектриків змінної напруги чисельні значення пробивної напруги відносяться до тих, що діють (ефективним).

5.2. Пробій твердих діелектриків

Важливою особливістю пробію твердих діелектриків є зниження їх електричної міцності після пробію. Пробій супроводжується плавленням або пропалюванням діелектрика. При повторному додатку напруги пробію виникає в цій області при порівняно малій напруженості поля. Особливо небезпечний пробій для органічних діелектриків, в місці пробію яких відбувається розкладання органіки і виділення елементарного вуглецю. Отже, пробій твердої ізоляції електричної машини або апарату означає аварійний стан пристрою. Після пробію рідин або газів висока рухливість молекул приводить до зникнення каналу пробію. Тому, хоча газова ізоляція і має меншу електроміцність, але після пробію експлуатаційні властивості матеріалу відновлюються, тобто вона надійніша.

Розрізняють чотири види пробію твердих діелектриків:

- 1) електричний пробій мікроскопічно однорідних діелектриків
- 2) електричний пробій неоднорідних діелектриків
- 3) тепловий (електротепловий) пробій
- 4) електрохімічний пробій.

Кожен з вказаних видів пробію може мати місце для одного і того ж матеріалу залежно від характеру електричного поля (постійного або змінного, імпульсного, низької або високої частоти), наявності в діелектрику дефектів, зокрема закритих пір, від умов охолодження, часу дії напруги.

Електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків.

Цей вид пробію характеризується вельми швидким розвитком, він протікає за час, менший 10^{-7} — 10^{-8} с, і не обумовлений тепловою енергією, хоча електрична міцність при електричному пробію в деякій мірі залежить від температури.

Електричний пробій за своєю природою є чисто електронним процесом, коли з небагатьох початкових електронів в твердому тілі створюється електронна лавина. Електрони розсіюють енергію свого руху, накопичену в електричному полі, порушуючи пружні коливання кристалічної решітки. Електрони, що досягли певної критичної швидкості, проводять відщеплення нових електронів, і стаціонарний стан порушується, тобто виникає ударна іонізація електронами в твердому тілі. Чисто електричний пробій має місце, коли виключений вплив електропровідності і діелектричних втрат, що обумовлюють нагрів матеріалу, а також відсутня іонізація газових включень. У разі однорідного поля і повної однорідності структури матеріалу напруженість поля при електричному пробію може служити мірою електричної міцності речовини.

Електричний пробій неоднорідних діелектриків.

Такий пробій характерний для технічних діелектриків, які найчастіше містять газові включення. Так само як і електричний пробій однорідного діелектрика, він відрізняється вельми швидким розвитком.

Пробивна напруга для неоднорідних діелектриків, що спостерігається в зовнішньому однорідному або неоднорідному полі, як правило, невисока і мало відрізняються один від одного.

Низькою електричною міцністю відрізняються діелектрики з відкритою пористістю. До таких діелектриків відносяться мармур, непросочений папір, дерево, пориста кераміка. Електрична міцність їх порівняно мало відрізняється від такої для повітря, виняток становить папір з підвищеною щільністю. Тверді діелектрики із закритими порами, наприклад щільна кераміка, характеризуються вищою електричною міцністю. Наявність газових включень в твердій ізоляції особливо небезпечно при високих частотах.

Високою електричною міцністю характеризуються діелектрики, що мають щільну структуру і що не містять газових включень. До них відносяться слюда, папір, ретельно просочений рідким діелектриком, стекла.

Тепловий пробій.

Електротепловий (скорочено тепловий) пробій зводиться до розігрівання матеріалу в електричному полі до температур, відповідних хоч би місцевій втраті ним електроізоляційних властивостей, пов'язаної з надмірним зростанням кризової електропровідності або діелектричних втрат. Пробивна напруга при тепловому пробіі залежить від ряду чинників: частоти поля, умов охолодження, температури навколишнього середовища і ін. Крім того, напруга теплового пробію пов'язана з нагрівостійкістю матеріалу. Органічні діелектрики унаслідок малої нагрівостійкості за інших рівних умов мають нижчі значення пробивної напруги при тепловому пробіі, чим неорганічні. При розрахунках напруги теплового пробію повинні братися до уваги $\text{tg}\delta$ діелектрика і його залежність від температури, а також діелектрична проникність матеріалу.

Температура нагріву ізолятора в електричному полі високої напруги встановлюється тоді, коли тепловиділення виявляється рівним тепловіддачі в навколишнє середовище. В більшості випадків тепловідвід обумовлюється конвекцією повітря. Тепловідвід за рахунок теплопровідності навколишнього середовища має місце для кабелів, введень, вмонтованих в стіни.

Електрохімічний пробій.

Електрохімічний пробій ізоляційних матеріалів має особливо істотне значення при підвищених температурах і високій вологості повітря, Цей вид пробію, спостерігається при постійній і змінній напрузі низької частоти, коли в матеріалі розвиваються електролітичні процеси, що обумовлюють необоротне зменшення опору ізоляції.

Таке явище часто називають також *старінням* діелектрика в електричному полі, оскільки воно призводить до поступового зниження електричної міцності, що закінчується пробієм при напруженості поля, значно меншій пробивній напруженості, отриманій при короткочасному випробуванні.

Раніше вважалося, що старіння властиве лише органічним діелектрикам (просочений папір, гума і т. д.), в яких воно обумовлене перш за все розвитком іонізаційного процесу в повітряних включеннях; іонізація пов'язана з виділенням озону і оксидів азоту, що приводять до поступового хімічного руйнування ізоляції. Пізніше було показано, що явище старіння може мати місце і в деяких неорганічних діелектриках, наприклад в титановій кераміці.

Електрохімічний пробій вимагає для свого розвитку тривалого часу, оскільки він пов'язаний з явищем електропровідності, що приводить до повільного виділення в матеріалі малих кількостей хімічно активних речовин, або з утворенням напівпровідних з'єднань. У кераміці, що містить оксиди металів змінної валентності (наприклад, TiO_2), електрохімічний пробій зустрічається значно частіше, ніж в кераміці, що складається з оксидів алюмінію, кремнію, магнію, барії. Наявність лужних оксидів в алюмосилікатній кераміці сприяє виникненню електрохімічного пробою і обмежує допустиму робочу температуру. При електрохімічному пробі, спостережуваному при постійній напрузі і низьких частотах в умовах підвищених температур або високої вологості повітря, велике значення має матеріал електроду.

5.3. Особливості пробою газових діелектриків.

Зовнішньою ізоляцією в багатьох видах електротехнічних конструкцій: у трансформаторах, конденсаторах, на лініях електропередачі – служить повітря. Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика в порівнянні з $E_{пр}$ більшості рідких і твердих діелектриків

Невелика кількість тих, що містяться в газі позитивних і негативних іонів і електронів, що знаходяться, як і нейтральні молекули газу, в безладному тепловому русі, при накладенні поля отримує деяку додаткову швидкість і починає переміщатися в напрямі, поля або в протилежному, залежно від знаку заряду. При цьому заряджена частинка газу набуває додаткової енергії.

Додаткова енергія заряджених частинок повідомляється молекулам, з якими вони стикаються. Якщо ця енергія достатньо велика, відбувається збудження атомів і молекул, пов'язане з переходом електрона на віддаленішу від ядра орбіту, або навіть іонізація молекул, тобто їх розщеплювання на електрони і позитивні іони.

У деяких газах, наприклад в кисні, вуглекислому газі, парах води, електрон, що відокремився, при одній з найближчих зустрічей з іншою нейтральною молекулою з'єднується до неї, перетворюючи її на електронегативний іон. Приєднання, «прилипання» електрона до нейтральної молекули приводить в подібних випадках до такої перебудови її електронної оболонки, що у результаті енергія молекули, що захопила зайвий електрон, виявляється менше енергії нейтральної молекули на деяку величину, яку називають *енергією спорідненості до електрона*. Вона коливається у різних газів від 0,75 до 4, 5 еВ. У інертних газах — в аргоні, неоні, гелії, криптоні, ксеноні, а також в азоті — негативні іони не виникають.

Іонізація при зіткненні іонів з частинками газу залежить від хімічної природи частинок, що зіткнулися, бо зіткнення є елементарним актом хімічної реакції. У явищах розряду в газі, що знаходиться між металевими електродами, позитивні іони вивільняють електрони з металу, бомбардуючи поверхню катода.

У ряді випадків електрон, розігнаний полемо, може не іонізувати молекулу, а привести її, як указувалося вище, в збуджений стан. У наступний момент ця збуджена молекула віддає свою надмірну енергію у формі випромінювання — випускає фотон. Фотон поглинається якій-небудь іншою молекулою, яка при цьому може іонізуватися. Така внутрішня *фотонна іонізація* газу завдяки великій швидкості розповсюдження випромінювання приводить до особливо швидкого розвитку в розрядному проміжку каналів з підвищеною провідністю газу.

Зазвичай пробій газу, здійснюється практично миттєво: тривалість підготовки пробією газу при довжині проміжку 1 см складає $10^{-7} - 10^{-8}$ с. Чим більше напруга, прикладена до газового проміжку, тим швидше може розвинути пробій. Якщо тривалість дії напруги дуже мала, то пробивна напруга підвищується.

Явище пробією газу залежить від ступеня однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій. Розглянемо явище пробією газу в *однорідному полі*.

Однорідне поле можна отримати між плоскими електродами із закругленими краями, а також між сферами великого діаметру при малій відстані між ними. У такому полі пробій наступає практично миттєво досягнувши строгої певної напруги, залежної від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, яка потім переходить в дугу, якщо джерело напруги має достатню потужність. Поява іскри при відомій відстані між електродами використовують для визначення значення прикладеної напруги (вимірювання високої напруги за допомогою кульових розрядників).

Електрична міцність газу в сильному ступені залежить від його щільності (тобто від тиску, якщо температура постійна). При малих змінах температури і тиску газу пробивна напруга пропорційна щільності газу.

При великому тиску і відповідно підвищеній щільності газу відстань між окремими молекулами стає менше; тим самим зменшується довжина вільного пробігу електронів, і для того, щоб пробій відбувся, повинна бути збільшена напруженість поля.

Закономірності яким підкоряється пробій газів в *неоднорідному полі*, помітно відрізняється від описаних вище закономірностей, спостережуваних при пробію в однорідному полі. Неоднорідне поле виникає між двома вістрями, вістрям і площиною, між проводами ліній електропередачі, між сферичними поверхнями при відстані між ними, що перевищує радіус сфери, і так далі

Особливістю пробією газу в неоднорідному полі є виникнення часткового розряду у вигляді *корони* в місцях, де напруженість поля досягає критичних значень, з подальшим переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги.

У разі електродів "голка – площа" і позитивній полярності голки пробій відбувається при меншій напрузі, чим при зворотній полярності. Це пояснюється тим, що іонізація газу при будь-якій полярності на електродах відбувається в районі голки, де існують найбільші значення напруженості електричного поля, і, отже, біля неї утворюється хмара з позитивно заряджених іонів-молекул, з орбіт яких зірвані електрони. При позитивній полярності на голці цей об'ємний заряд служить продовженням голки і скорочує протяжність розрядного проміжку. Тому пробій і настає при меншій напрузі, чим у разі протилежної полярності електродів, коли об'ємний заряд частково нейтралізує і екранує голку з негативною полярністю від площини, зарядженої позитивно.

Розряд в повітрі у поверхні твердого діелектрика, званий в техніці *поверхневим розрядом (перекриттям)*, виникає зазвичай при нижчій напрузі, ніж у тому випадку, коли між електродами є тільки повітря. На розрядну напругу впливають форма електричного поля, обумовлена конфігурацією електродів і діелектрика, частота поля, стан поверхні діелектрика, тиск повітря.

Відносна вологість повітря сильно впливає на розрядну напругу ізоляторів при низькій частоті і постійній напрузі і мало позначається при радіочастотах.

5.4. Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики відрізняються значно вищою електричною міцністю, ніж гази в нормальних умовах.

Гранично чисті рідини отримати надзвичайно важко. Постійними домішками в рідких діелектриках є вода, гази і тверді частинки. Наявність домішок і визначає в основному явище пробою рідких діелектриків і викликає великі утруднення для створення точної теорії пробою цих речовин.

Представлення теорії електричного пробою застосовують до рідин, максимально очищених від домішки. При високих значеннях напруженості електричного поля може відбуватися викидання електронів з металевих електродів і, як і для газів, руйнування молекул самої рідини за рахунок ударів зарядженими частинками. При цьому підвищена електрична міцність рідкого діелектрика в порівнянні з газоподібним обумовлена значно меншою довжиною вільного пробігу електронів. Пробій рідин, що містять газові включення, пояснюють місцевим перегрівом рідини (за рахунок енергії, що виділяється у відносно бульбашках газу, що легко іонізуються), який приводить до утворення газового каналу між електродами.

Наявність води знижує електричну міцність масла при нормальній температурі. Зниження електричної міцності може пояснюється процесами кипіння рідини. Збільшення електричної міцності при низьких температурах пов'язане із збільшенням в'язкості масла і меншими значеннями діелектричної проникності. Тверді забруднення (сажа, обривки волокон і т. п.) спотворюють електричне поле усередині рідини і також призводять до зниження електричної міцності діелектричних рідин.

Очищення рідких діелектриків, зокрема масел, від домішок помітно підвищує електричну міцність.

ЛЕКЦІЯ 7.

Тема 6. Фізико-хімічні та механічні властивості діелектриків.

6.1. Фізичні властивості діелектриків.

6.2. Хімічні властивості діелектриків.

6.3. Механічні властивості діелектриків.

6.1. Фізичні властивості діелектриків.

При виборі електроізоляційного матеріалу для конкретного застосування доводиться звертати увагу не тільки на його електричні властивості в нормальних умовах, але розглядати також їх стабільність при дії вологості навколишнього повітря, підвищених температур, морозу і радіоактивних випромінювань.

Нормальне використання виробу у великій мірі залежить від механічних властивостей матеріалів: їх міцності на розтягування, стиснення, вигин, удар, твердості або еластичності. У ряді випадків до виробів, а, отже, до певної міри і до матеріалів пред'являються вимоги вібростійкості при різних амплітудах і частотах коливань. Для деталей, в яких є сполучення різних матеріалів, велике значення мають температурні коефіцієнти лінійного розширення.

Розробка технологічних процесів виготовлення електричних машин і апаратів також вимагає знання фізичних, механічних і хімічних властивостей (наприклад, окислюваність, розчинність, склеюваність) матеріалів.

Термін служби виробів в тропічних умовах залежить від надійності хімічного захисту матеріалів проти гнильних бактерій, комах і утворення цвілі.

Властивості діелектриків по відношенню до вологи.

Електроізоляційні матеріали більшою чи меншою мірою *гігроскопічні*, тобто володіють здатністю вбирати в себе вологу з навколишнього середовища, і *вологопроникні*, т. е, здатні пропускати крізь себе пари води. Атмосферне повітря завжди містить деяка кількість водяної пари

Абсолютну вологість повітря оцінюють масою (m) водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря (m^3). Кожній температурі відповідає певне значення абсолютної вологості при насиченні ($t_{\text{нас}}$). Більшої кількості води повітря містити не може, і вона випадає у вигляді роси. Абсолютна вологість, необхідна для насичення повітря, різко зростає із збільшенням температури, тобто росте і тиск водяної пари.

Відносною вологістю повітря називають відношення маси водяної пари m до її максимального насичення, у відсотках

$$\varphi = \frac{m}{m_{\text{нас}}} \cdot 100\% = \frac{p}{p_{\text{нас}}} \cdot 100\% \quad (6.1.)$$

де m, p – маса та тиск водяного пару;

$m_{\text{нас}}, p_{\text{нас}}$ – граничні значення при насиченні водяним паром.

За нормальну вологість повітря (для різних випробувань, для визначення властивостей гігроскопічних матеріалів в стандартних умовах зволоження. За

нормальну приймають відносну вологість повітря $\phi = 65\%$. В повітрі з нормальною вологістю при 20°C зміст водяної пари $m = 11,25 \text{ г/м}^3$.

Вода є сильно дипольним діелектриком з низьким питомим опором, порядку $10^3 - 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а тому попадання її в пори твердих діелектриків веде до різкого зниження їх електричних властивостей. Особливо помітно дія вологості при підвищених температурах ($30 - 40^\circ\text{C}$) і високих значеннях ϕ , близьких до $98\% - 100\%$.

В першу чергу дія підвищеної вологості повітря відбивається на поверхневому опорі діелектриків. Для оберігання поверхні електроізоляційних деталей з полярних твердих діелектриків від дії вологості їх покривають лаками, що не змочуються водою.

За наявності в діелектрику об'ємної відкритої пористості або при нещільній структурі волога потрапляє і всередину матеріалу.

Вологість матеріалів.

Зразок електроізоляційного матеріалу, поміщений в умови певної вологості і температури навколишнього середовища, через необмежено великий час досягає деякого рівноважного стану вологості. Якщо порівняно сухий зразок матеріалу буде поміщений у вологе повітря (з відносною вологістю ϕ), то можна спостерігати поступове поглинання матеріалом вологи з повітря, причому вологість матеріалу, тобто вміст вологи в одиниці маси матеріалу, протягом часу підвищуватиметься, наближаючись до рівноважної вологості ψ_p , відповідною заданому значенню. Навпаки, якщо в повітрі тій же відносній вологості ϕ буде поміщений зразок того ж матеріалу з початковою вологістю, більшою ψ_p , то вологість зразка зменшуватиметься, наближаючись до значення рівноважної вологості, в цьому випадку відбувається сушка *матеріалу*. Для різних матеріалів значення рівноважної вологості при одному і тому ж значенні відносної вологості повітря ϕ можуть бути вельми різні.

Визначення вологості електроізоляційних матеріалів вельми важливе для уточнення умов, при яких проводиться випробування електричних властивостей даного матеріалу. Для текстильних і тому подібних матеріалів встановлюється так звана *кондиційна вологість*, відповідна рівноважній вологості матеріалу при знаходженні його в повітрі в нормальних умовах; так, для кабельного паперу кондиційна вологість приймається рівною 8% . На гігроскопічність матеріалу істотний вплив робить будова і хімічна природа. Велику роль грають наявність і розмір капілярних проміжків усередині матеріалу, в які проникає волога. Сильно пористі матеріали, зокрема волокнисті, більш гігроскопічні, ніж матеріали щільної будови.

Найбільш помітне зниження питомого об'ємного опору під впливом вологості спостерігається у пористих матеріалів, що містять розчинні у воді домішки, що створюють електроліти з високою питомою провідністю.

При змінній напрузі найбільш чутливим параметром пористих діелектриків є $\text{tg}\delta$, що помітно зростає із зволоженням матеріалу. Менш чутлива величина ϵ , проте і вона, як правило, збільшується з поглинанням вологи зважаючи на велике значення діелектричної проникності води в порівнянні з іншими діе-

лектриками. Тому в ряді випадків про гігроскопічність матеріалу судять по збільшенню електричної ємкості зразка під дією вологості.

Вологопроникність.

Окрім гігроскопічності, велике практичне значення має вологопроникність зразка електроізоляційних матеріалів, тобто здатність їх пропускати крізь себе пари води. Ця характеристика надзвичайно важлива для оцінки якості матеріалів, вживаних для захисних покривів (шланги кабелів, опресовування конденсаторів, компаундні заливки, лакові покриття деталей). Тільки для стекл, добре обпалений кераміки і металів вологопроникність практично рівна нулю.

Для зменшення гігроскопічності і вологопроникності пористих ізоляційних матеріалів широко застосовується їх *просочення*. Необхідно мати на увазі, що просочення целюлозних волокнистих матеріалів і інших органічних діелектриків дає лише уповільнення зволоження матеріалу, не впливаючи на величину p після тривалої дії вологості; це пояснюється тим, що молекули просочувальних речовин, вельми великі розміри, що мають, по порівнянню, з розмірами молекул води, не в змозі створити повну непроникність пір матеріалу для вологи, а в найбільш дрібні пори матеріалу, що просочується, вони взагалі не можуть проникнути.

Теплові властивості діелектриків

До найважливіших теплових властивостей діелектриків відносяться Нагрівостійкість, холодостійкість, теплопровідність і теплове розширення.

Нагрівостійкість.

Здатність електроізоляційних матеріалів і виробів без шкоди для них як короткочасно, так і тривало витримувати дію високої температури називають *нагрівостійкістю*. Нагрівостійкість неорганічних діелектриків визначають, як правило, по початку істотної зміни електричних властивостей, наприклад по помітному зростанню $tg\delta$ або зниженню питомого електричного опору. Нагрівостійкість оцінюють відповідними значеннями температури, при якій з'явилися ці зміни. Нагрівостійкість органічних діелектриків часто визначають по початку механічних деформацій розтягування або вигину, зануренню голки в матеріал під тиском при нагріві (визначення «тепlostійкості»). Проте і для них можливе визначення нагрівостійкості по електричних характеристиках.

Температурою спалаху називають температуру рідини, при нагріві до якої суміш пари її з повітрям спалахує при тому, що піднесло до неї невеликого полум'я. *Температура займання* — ще вища температура, при якій при тому, що піднесло полум'я випробовувана рідина спалахує.

Ці характеристики представляють особливий інтерес при оцінці якості трансформаторного масла, а також розчинників, вживаних у виробництві електроізоляційних лаків.

Питання про найвищу допустиму робочу температуру вирішується на підставі ретельного вивчення короткочасної і тривалої нагрівостійкості матеріалу з урахуванням коефіцієнта запасу, залежного від умов експлуатації, необхідного ступеня надійності і терміну служби ізоляції.

Якщо погіршення якості ізоляції може виявитися лише при тривалій дії підвищеної температури унаслідок поволі протікаючих хімічних процесів, то це явище називають *тепловим старінням* ізоляції. Старіння може виявлятися, наприклад, у лакових плівок і целюлозних матеріалів у вигляді підвищення твердості і крихкості, утворення тріщин і тому подібне

Крім температури істотний вплив на швидкість старіння можуть надати зміну тиску повітря або концентрації кисню, присутність озону, що є сильнішим окислювачем, ніж кисень, а також різних хімічних реагентів, що прискорюють або уповільнюють старіння. Теплове старіння прискорюється від освітлення зразка ультрафіолетовими променями, дії електричного поля, механічних навантажень і тому подібне

Для ряду електроізоляційних матеріалів, особливо *крихких* (стекла, керамічні матеріали і ін.), важлива стійкість по відношенню до різких змін температури (термоударам), в результаті яких в матеріалі можуть утворюватися тріщини.

В результаті випробувань встановлюється стійкість матеріалів тепловим діям, причому вона в різних випадках може бути неоднаковою: наприклад, матеріал, що витримує стисло тимчасовий, нагріваючи до деякої температури, може виявитися нестійким по відношенню до теплового старіння при тривалій дії навіть нижчої температури.

Холодостійкість.

У багатьох випадках експлуатації ізоляції, скажімо, ізоляції устаткування відкритих підстанцій польової апаратури зв'язку, важлива холодостійкість, *тобто* здатність ізоляції працювати без погіршення експлуатаційної надійності при низьких температурах, наприклад від -60 до -70°C . При низьких температурах, як правило, електричні властивості ізоляційних матеріалів поліпшуються, проте багато матеріалів, гнучких і еластичних в нормальних умовах, при низьких температурах стають вельми крихкими і жорсткими, що створює утруднення для роботи ізоляції. Випробування електроізоляційних матеріалів і виробів з них на дію низьких температур нерідко проводяться при одночасній дії вібрацій.

Теплопровідність.

Практичне значення теплопровідності пояснюється тим, що тепло, що виділяється унаслідок втрат потужності в оточених електричною ізоляцією провідниках і магнітопроводах, а також унаслідок діелектричних втрат в ізоляції, переходить в навколишнє середовище через різні матеріали. Теплопровідність впливає на електричну міцність при тепловому пробі і на стійкість матеріалу до теплових імпульсів.

Теплове розширення діелектриків, як і інших матеріалів, оцінюють *температурним коефіцієнтом лінійного розширення* (ТКЛР), вимірюваним в К-1:

Матеріали, що володіють малими значеннями ТКЛР, мають, як правило, найбільш високу нагрівостійкість і навпаки.

6.2. Хімічні властивості діелектриків

Знання хімічних властивостей діелектриків важливе для оцінки надійності їх в експлуатації і для розробки технології.

При тривалій роботі діелектрики повинні не руйнуватися з виділенням побічних продуктів і не викликати корозії дотичних з ними металів; не реагувати з різними речовинами (наприклад, газами, водою, кислотами, лугами, розчинами солей і т. п.). Стійкість до дії всіх цих речовин у різних діелектриків вельми різноманітна.

Матеріали у виробництві деталей можуть оброблятися різними хіміко-технологічними способами: склеюватися, розчинятися в розчинниках з утворенням лаків і так далі. Розчинність *твердих* матеріалів може бути оцінена кількістю матеріалу, що переходить в розчин за одиницю часу з одиниці поверхні матеріалу, дотичної з розчинником. Крім того, нерідко оцінюють розчинність по тій найбільшій кількості речовини, яка може бути розчинена в даному розчині (т. е. по концентрації насиченого розчину). Найлегше розчиняються речовини близькі до розчинника по хімічній природі і схожі угруповання атомів, що містять в молекулах; дипольні речовини легше розчиняються в дипольних рідинах, нейтральні — в нейтральних. Так, неполярні або слабополярні вуглеводні (парафін, каучук) легко розчиняються в рідких вуглеводнях, наприклад в бензині; полярні смоли, що містять гідроксильні угруповання (фенолформальдегідні і інші смоли), розчиняються в спирті і інших полярних розчинниках.

Біологічна стійкість.

При тривалому використанні електроапаратури, особливо на органічних діелектриках спостерігається розвиток цвілі. Появу цвілі зменшує питомий поверхневий опір діелектриків, приводить до зростання втрат, може понизити механічну міцність ізоляції і викликати корозію дотичних з нею металевих частин. Найуразливіші для розвитку цвілі целюлозні матеріали, у тому числі і просочені (гетинакс, текстоліт), каніфоль, масляні лаки і ін. Найбільш стійкими до утворення цвілі є неорганічні діелектрики: кераміка, скла, слюда, кремнійорганічні матеріали і деякі органічні, наприклад епоксидні смоли, фторопласт-4, поліетилен, полістирол.

З метою підвищення цвілестійкості органічної електричної ізоляції в її склад вводять добавки *фунгіцидів*, тобто речовин, що отруйних для цвілевих грибків і затримують їх розвиток, або ж покривають ізоляцію ласий, що містить фунгіциди. До сильних фунгіцидів, що діють, належать, зокрема, деякі органічні сполуки, що містять азот, хлор, ртуть.

6.3. Механічні властивості діелектриків

Оскільки деталі з електроізоляційних матеріалів піддаються дії механічних навантажень, велике практичне значення мають механічна міцність цих матеріалів і здатність їх не деформуватися від механічної напруги.

Механічна міцність на розрив, стиснення та вигин.

Прості види статичних механічних навантажень — що розтягують, стискають і вигинають — вивчаються на підставі закономірностей, відомих з курсу матеріалознавства і опору матеріалів.

Показники механічних властивостей діелектричних матеріалів характеризуються межами міцності при розтягуванні ($\sigma_{т.о.}$, σ_{01} , σ_{02}), стисненні (σ_c) і вигині ($\sigma_{зг}$).

Для електроізоляційних матеріалів анізотропної будови (шаруватих, волокнистих і т. п.) значення механічної міцності сильно залежать від напрямку додатку навантаження. Важливо відзначити, що для ряду діелектриків (стекло, керамічних матеріалів, багатьох пластмас і ін.) межа міцності при стисненні значно більше, чим при розриві і вигині (тоді як у металів величини мають один і той же порядок).

Механічна міцність ряду діелектриків сильно залежить від площі поперечного перетину зразків.

Механічна міцність електроізоляційних матеріалів сильно залежить від температури, як правило, зменшуючись з її зростанням.

Визначення межі міцності і відносної деформації при руйнуванні дає деяке уявлення про механічну міцність матеріалу і його здатності деформуватися під навантаженням (про пластичні властивості матеріалу). Проте ці випробування ще не дають вичерпних відомостей про поведінку матеріалу в багатьох практично важливих випадках механічного навантаження. Так, для деяких матеріалів (особливо термопластичних) характерна здатність при тривалій дії порівняно малих навантажень давати помітні деформації. Це так зване *пластична*, або *холодна текучість* матеріалу. Пластична текучість є небажаною, якщо виріб в експлуатації повинен тривало зберігати незмінними форму і розміри. При підвищенні температури і наближенні її до температури розм'якшення даного матеріалу пластичний перебіг матеріалу сильно збільшується.

У ряді випадків велике практичне значення мають крихкість, твердість і деякі інші механічні характеристики електроізоляційних матеріалів.

Крихкість.

Багато матеріалів крихкі, т. е., володіючи порівняно високою міцністю по відношенню до *статичних* навантажень, в той же час легкий руйнуються зусиллями, що додаються. Поширений прийом для оцінки здатності матеріалу чинити опір дії динамічних навантажень — випробування на *ударний вигин* (визначення *ударної в'язкості*).

В ряду випадків перевіряють здатність електроізоляційних матеріалів витримувати без руйнування тривалу дію *вібрацій*, тобто коливань певної частоти і амплітуд, що повторюються. Така перевірка найчастіше проводиться на готових виробах, які для цієї мети кріпляться на платформах (вібростендах), що піддаються вібраціям по заданому режиму від відповідного приводного механізму.

Твердість.

Твердість – здатність поверхневого шару матеріалу протистояти деформації від контактного зусилля, з боку іншого предмету малих розмірів. Тве-

рдість має для діелектриків менш істотне значення і визначається різними методами. Для неорганічних матеріалів — за мінералогічною шкалою Мооса, для органічних діелектриків способом Брінелля, Роквелла або за допомогою маятника Кузнецова.

В'язкість.

Для рідких і напіврідких електроізоляційних матеріалів, масел, лаків, заливальних і просочувальних компаундів і тому подібне важливою механічною характеристикою є в'язкість.

Динамічна в'язкість η або коефіцієнт внутрішнього тертя є величина, що входить в цілий ряд законів гідродинаміки в'язких середовищ.

Кінематична в'язкість ν рівна відношенню динамічної в'язкості рідини до її щільності:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (6.2.)$$

В'язкість всіх речовин, що не зазнають при нагріві хімічних змін, сильно зменшується з підвищенням температури .

ЛЕКЦІЯ 8

Тема 7. Види та характеристика промислових діелектриків.

7.1. Газові діелектрики.

7.2. Рідкі діелектричні матеріали.

7.3. Органічні полімерні діелектрики: смоли, лаки, компаунди.

7.1. Газоподібні діелектрики

У числі газоподібних діелектриків перш за все повинне бути згадане повітря, яке через свою загальну поширеність, майже завжди входить до складу електричних пристроїв і грає в них роль електричної ізоляції, додаткової до твердих або рідких електроізоляційних матеріалів. У окремих частинах електричних установках, наприклад на ділянках повітряних ліній електропередачі між опорами, повітря утворює єдину ізоляцію між голими проводами лінії. При недостатньо ретельно проведеному просоченню ізоляції електричних машин, кабелів, конденсаторів в ній можуть залишатися повітряні включення, часто небажані, оскільки вони при високій робочій напрузі ізоляції можуть стати вогнищами утворення іонізації.

У табл. 7.1. приведені властивості повітря і ряду широко вживаних в техніці газів, а також властивості тих же газів в зрідженому стані, що мають велике значення для електротехнічних пристроїв, що працюють при низькому тиску (так звані пристрої *криоелектротехніки*).

Властивості газів

| Параметр | Повітря | Азот N ₂ | Кисень O ₂ | Водень H ₂ | Метан CH ₄ | Елегаз SF ₆ | Інертні гази | | | | |
|---|---------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | He | Ne | Ar | Kr | Xe |
| Молекулярна маса | 29 | 28 | 32 | 2 | 16 | 146 | 4 | 20,2 | 40 | 83,8 | 131,3 |
| Температура кипіння, t _к (К) | 79 | 77,4 | 90,2 | 20,4 | 111,7 | 318,7 | 4,2 | 27,2 | 87,52 | 120,2 | 166 |
| Температура плавлення, t _п , (К) | 60 | 63,2 | 54,4 | 14 | 89,2 | 209,3 | - | 24,5 | 84 | 115,6 | 161 |
| Густина, ρ(кг/м ³) | 1,29 | 1,25 | 1,43 | 0,09 | 0,717 | 6,39 | 0,18 | 0,9 | 1,78 | 3,47 | 5,58 |
| Теплота випаровування, кДж/кг | 212 | 197 | 213 | 458 | 510 | - | 21 | 88 | 162 | 110 | - |
| Теплопровідність | 24 | 24 | 24 | 166 | 26 | - | 142 | 45,5 | 16,3 | 8,73 | 5 |
| Теплоємність | 1,05 | 1,06 | 0,915 | 14,2 | 2,18 | 0,62 | 5,2 | 1,03 | 0,52 | 0,25 | 0,16 |
| Динамічна в'язкість | 19 | 18 | 21 | 9,5 | 12 | 15 | 19 | 30 | 21 | 25 | 22 |

За інших рівних умов (при однаковому тиску і температурі, формі електродів, відстані між ними і так далі) різні гази можуть мати значення електричної міцності, що помітно розрізняються. Азот має практично однакову з повітрям електричну міцність. Він нерідко застосовується замість повітря для заповнення газових конденсаторів і для інших цілей, оскільки, будучи близький по електричних властивостях до повітря, він не містить кисню, який надає окислюючу дію на дотичні з ним матеріали.

Деякі гази, що мають високу молекулярну масу і з'єднання, що містять галогени (фтор, хлор), для іонізації яких потрібна велика енергія, мають помітно підвищену в порівнянні з повітрям електричну міцність. Так, гексафторид сірки SF₆ (шестифториста сірка) має електричну міцність приблизно в 2,5 разу вище, ніж у повітря. Гексафторид сірки називають *елегазом* (скорочення від слів "електрика" і "газ"). Елегаз не токсичний, хімічно стійкий, не розкладається при нагріві до 800°C, його з успіхом можна використовувати в конденсаторах, кабелях. Особливо великі переваги елегазу при підвищеному тиску.

Дихлордифторметан CCl₂F₂ – *фреон*, має електричну міцність, близьку до електричної міцності елегаза, але його температура кипіння всього лише 242,7К (-30,5°C), і він при нормальній температурі може бути стислий без зріджування лише до 0,6 МПа. Фреон викликає корозію деяких твердих органічних електроізоляційних матеріалів, що треба мати на увазі при конструюванні електричних холодильників.

Перфторировані вуглеводні.

Багато перфторированих вуглеводнів, тобто вуглеводні, в молекулах яких всі атоми водню замінені атомами фтору, що мають загальний склад C_xF_y за нормальних умов, є газами (*наприклад*, CF₄, C₂F₆, C₃F₈, C₄F₈, C₄F₁₀) або рідинами (*наприклад*, C₇F₁₁, C₇F₈, C₈F₁₆, C₁₄F₂₄).

Електрична міцність деяких з цих газів, а також пари рідин істотно (6 – 10 разів) перевершує електричну міцність повітря. Електрична міцність фторомістких газів і пари за нормальних умов може бути того ж порядку, що і електрична міцність електроізоляційних рідин, в той же час дані гази в порівнянні з рідкими діелектриками мають переваги значно меншої щільності (що приводить до зменшення маси заповнюваних газом апаратів), вищій нагрівостійкості і стійкості до старіння.

Навіть невелика домішка, до повітря елегазу, фреону, перфторорганічних газів або пару помітно підвищує його електричну міцність, що використовується в деяких електричних пристроях високої напруги.

Водень.

Значний інтерес представляє водень. Це дуже легкий газ, що володіє вельми сприятливими властивостями для використання як середовище, що охолоджує, замість повітря. Водень характеризується високими значеннями питомої теплопровідності і теплоємності. При використанні водню охолодження електричних машин, що обертаються, істотно поліпшується. Крім того, при заміні повітря воднем помітно знижуються втрати потужності на тертя ротора машини об газ і на вентиляцію, оскільки ці втрати приблизно пропорційні щільності газу. Унаслідок відсутності окислюваної дії кисню повітря сповільнюється старіння органічної ізоляції обмоток машини і усувається небезпека пожежі у разі короткого замикання усередині машини. У атмосфері водню поліпшуються умови роботи щіток. Тому водневе охолодження дозволяє підвищити потужність машини та її к.к.д. Крупні турбогенератори, синхронні компенсатори і тому подібне виконуються з водневим охолодженням (ще ефективніше охолодження досягається циркуляцією рідини усередині порожнистих провідників обмоток статора і, іноді, ротора). Застосування циркуляційного водневого охолодження вимагає герметизації машини (підшипники ущільнюються за допомогою масляних затворів). Щоб уникнути попадання всередину машини повітря (водень при змісті його в повітрі від 4 до 74% за об'ємом утворює вибухову суміш — гримучий газ), усередині машини підтримується деякий надмірний тиск понад атмосферний, поступовий витік водню заповнюється подачею газу з балонів. За інших рівних умов електрична міцність водню приблизно на 40%, а вугільного ангідриду CO_2 — на 10% нижче, ніж електрична міцність повітря.

Для заповнення електровакуумних приладів і ламп уживаються інертні гази аргон, неон та інші, а також пари ртуті і натрію. Інертні гази володіють низькою електричною міцністю. Слід зазначити малу теплопровідність криптону і ксенону, ця обставина використовується у виробництві деяких типів електричних ламп.

Гелій.

Особливо велике значення в якості, низькотемпературного хладагенту, зокрема для пристроїв, що використовують явище надпровідності, має зріджений гелій. Гелій взагалі є виключно цікавим матеріалом, що володіє унікальними властивостями. Так, у нього найнижча в порівнянні з іншими газами температура зріджування (4,216К при атмосферному тиску). Рідкий гелій має

дуже малу щільність. Квантовомеханічні явища в рідкому гелії роблять його поведінку багато в чому схожим з поведінкою газів, а не рідин. Діелектрична проникність рідкого гелію вельми мала. Вельми мала відмінність питомих теплопровідностей рідкого і газоподібного гелію. Мало і поверхневе, натягнення рідкого гелію. Теплота випаровування його надзвичайно низка, що вельми істотно для криогенної техніки.

При подальшому охолодженні нормальний рідкий гелій (гелій I) переходить в нову модифікацію — гелій II. В'язкість гелію II практично рівна нулю (цей стан називають надтекучістю, так гелій II легко протікає крізь щілину між пришліфованими скляними пластинками). Питома теплопровідність гелію II практично нескінченно велика, питома теплоємність рідкого гелію зростає у багато разів.

Неон.

Іноді як криогенного хладагенту застосовується рідкий неон, температура кипіння якого лише ненабагато перевершує температуру кипіння водню. Для неону, як і для інших інертних газів, характерна вельми мала відмінність між температурою кипіння і температурою плавлення.

Хімічна інертність неону складає його перевагу перед вибухонебезпечним воднем. Проте неон дуже дорогий.

Рідкий азот легко виходить при розділенні повітря на азот і кисень; рідкий водень проводиться промисловістю у великих кількостях.

7. 2. Рідкі діелектрики. Нафтові і синтетичні електроізоляційні масла

Трансформаторне масло.

Трансформаторне масло — це рідина від майже безбарвної до темно-жовтого кольору, по хімічному складу є сумішшю різних вуглеводнів.

Цим маслом заливають силові трансформатори. Зі всіх рідких електроізоляційних матеріалів знаходить найбільше застосування в електротехніці. Його призначення двояко:

- по-перше, масло, заповнюючи пори у волокнистій ізоляції, а також проміжки між проводами обмоток і між обмотками і баком трансформатора, значно підвищує електричну міцність ізоляції;
- по-друге, воно покращує відведення тепла, що виділяється за рахунок втрат в обмотках і сердечнику трансформатора.

Лише деякі силові і вимірвальні трансформатори виконуються без заливки маслом ("сухі" трансформатори).

Ще одна важлива область застосування трансформаторного масла — масляні вимикачі високої напруги. У цих апаратах розрив електричної дуги між контактами вимикача, що розходяться, відбувається в маслі або в газах, що знаходяться під підвищеним тиском, виділяються маслом під дією високої температури дуги. Це сприяє охолодженню каналу дуги і швидкому її гасінню.

Трансформаторне масло застосовується також для заливки маслonaповнених вводів, деяких типів реакторів, реостатів і інших електричних апаратів.

Трансформаторні, а також інші *нафтові* ("мінеральні") *електроізоляційні масла* отримують з нафти за допомогою її ступінчастої перегонки з виділенням на кожному ступені певної (по температурі кипіння) фракції і подальшого ретельного очищення від хімічно нестійких домішок шляхом обробки сірчаною кислотою, потім лугом, промивки водою і сушки. Часто електроізоляційні масла додатково обробляються адсорбентами, тобто речовинами (особливі типи глин або ж отримувані штучним шляхом матеріали), які володіють сильно розвинутою поверхнею і при зіткненні з маслом поглинають воду і різні полярні домішки. Така обробка проводиться або перемішуванням нагрітого масла з подрібненим адсорбентом з подальшим відстоюванням, - або ж фільтруванням масла крізь шар адсорбенту (перколяція). Застосовуються і інші способи очищення масла.

Крім трансформаторного масла в електротехнічній промисловості широко застосовуються і інші види нафтових електроізоляційних масел.

Конденсаторне масло

Служить для просочення паперових конденсаторів, особливо силових, призначених для компенсації індуктивного зрушення фаз. При просоченні паперового діелектрика підвищується як його діелектрична проникність, так і електрична міцність; то і інше дає можливість зменшити габарити, масу і вартість конденсатора при заданих робочій напрузі, частоті і ємкості.

Конденсаторне масло схоже з трансформаторним, але вимагає особливо ретельного очищення адсорбентами.

Кабельні масла

Використовуються у виробництві силових електричних кабелів, просочуючи паперову ізоляцію цих кабелів, вони підвищують її електричну міцність, а також сприяють відведенню тепла втрат. Кабельні масла бувають різних типів. Для просочення паперової ізоляції звичайних силових кабелів на робочу напругу до 35 кВ в свинцевих або алюмінієвих оболонках (кабелі з в'язким просоченням) найчастіше застосовується масло марки МН-4, в яке для підвищення в'язкості додається каніфоль або синтетичний загусник. Масло тієї ж марки, але без добавок, що збільшують в'язкість, застосовується для маслonaповнених кабелів на напругу 110 кВ і вище, в яких за допомогою спеціальних живильних пристроїв під час експлуатації підтримується надмірний тиск 0,3-0,4 МПа.

Трансформаторне та інші електроізоляційні масла нафтового походження мають ряд переваг, які забезпечили їх широке застосування:

- 1) вони порівняно дешеві і можуть проводитися заводами нафтопереробної промисловості у великих кількостях;
- 2) при хорошому очищенні їх $\text{tg}\delta$, як це і властиво чистим неполярним діелектрикам, малий, а електрична міцність достатньо висока.

Недоліками є:

- пожежна небезпека;
- вибухонебезпечність;
- інтервал робочих температур нафтових масел обмежується, з одного боку, температурою застигання або надмірного підвищення в'язкості, з

іншого боку, температурою початку швидкого теплового старіння в даних умовах експлуатації;

- нафтові масла схильні і до електричного старіння, тобто вони можуть погіршувати свої властивості під дією електричного поля високої напруженості.

Синтетичні рідкі діелектрики

Є ряд синтетичних рідких діелектриків, які по тих або інших властивостях перевершують нафтові електроізоляційні масла. Розглянемо найважливіші з них.

Хлоровані вуглеводні виходять з різних вуглеводнів шляхом заміни в їх молекулах деяких (або навіть всіх) атомів водню атомами хлору. Найбільш широке застосування мають полярні продукти хлорування *дифеніл*, що має загальний склад $C_{12}H_{10-n}Cl_n$. Найчастіше застосовуються суміші різних ізомерів хлорованих дифенілів з середнім ступенем хлорування від 3 до 6.

З числа більш вживаних хлорованих дифенілів є *совол*. По складу близький до пентахлордифенілу $C_{12}H_5Cl_6$. Совол – прозора безбарвна рідина. Він стабільніший при роботі в електричному полі, чим масло. Заміна соволом нафтового масла у виробництві силових паперових конденсаторів дозволяє понизити об'єм конденсатора при рівній реактивній потужності приблизно в два рази. Це дає великий економічний вигащ, хоча совол і дорожче за масло. Недоліком конденсаторів, просочених соволом, є сильне зменшення ємкості при падінні температури нижче $0^\circ C$.

Сприятливими властивостями володіють і суміші хлорованих дифенілів з іншими хлорованими з'єднаннями, вживані для просочення конденсаторів. Хлоровані дифеніли негорючі. Проте їх недоліком є висока токсичність як самих рідин, так і їх пари.

Кремнійорганічні рідини

Ці рідкі діелектрики володіють вельми малим кутом діелектричних втрат, низькою гігроскопічністю і підвищеною нагрівостійкістю. Для них характерна слабо виражена залежність в'язкості від температури. Як і інші кремнійорганічні з'єднання, кремнійорганічні рідини вельми дорогі, що обмежує їх застосовність. Залежно від характеру радикалів, приєднаних до атомів Si, розрізняють поліметилсилоксанові (ПМС), поліетилсилоксанові (ПЕС) і поліметилфеніл-силоксанові (ПМФС) рідини. Ці рідини мають при 1 кГц і $20^\circ C$ значення $\epsilon = 2,5 \div$ до $3,3$ і $tg\delta = 0,0001 \div 0,0003$; найвища робоча температура, що допускається, деяких з цих рідин доходить до $250^\circ C$ тривало і до $350^\circ C$ короткочасно.

Фторорганічні рідини

Мають вельми малий $tg\delta$, малу гігроскопічність і високу нагрівостійкість. Окремі фторорганічні рідини можуть тривало працювати при температурі $200^\circ C$ і вище. Пари деяких фторорганічних рідин мають незвично високу для газоподібних діелектриків електричну міцність.

Характерними властивостями фторорганічних рідин є мала в'язкість, низьке поверхневе натягнення (що сприяє просоченню пористої ізоляції), високий температурний коефіцієнт об'ємного розширення (значно більший, ніж у

інших електроізоляційних рідин), порівняно висока летючість. Остання обставина вимагає герметизації апаратів, що заливаються фторорганічними рідинами.

Фторорганічні рідини здатні забезпечувати значно інтенсивніше відведення тепла втрат від охолоджуваних ними обмоток і магнітопроводів, чим нафтові масла або кремнійорганічні рідини. Існують спеціальні конструкції малогабаритних електротехнічних пристроїв із заливкою фторорганічними рідинами, в яких для поліпшення відведення тепла використовується випаровування рідини з подальшою конденсацією її в охолоджувачі і поверненням в пристрій (кипляча ізоляція); при цьому теплота випаровування віднімається від охолоджуваних обмоток, а наявність в просторі над рідиною фторорганічної пари, особливо під підвищеним тиском, значно збільшує електричну міцність газового середовища в апараті.

Важливою перевагою фторорганічних рідин в порівнянні з кремнійорганічними є повна негорючість і висока дугостійкість. Як і кремнійорганічні з'єднання, фторорганічні рідини дорогі.

7.3. Органічні полімерні діелектрики: смоли, лаки, компаунди.

Серед діелектриків особливе значення мають високомолекулярні органічні матеріали. Органічними речовинами називають з'єднання вуглецю з іншими елементами. Деякими органічними електроізоляційними матеріалами є низькомолекулярні речовини, молекули яких утворені одиницями або десятками атомів. Проте найбільше число органічних електроізоляційних матеріалів належить до *високомолекулярних з'єднань*, тобто до речовин великими молекулами, що містять іноді багато тисяч атомів.

Високомолекулярні з'єднання по своїй хімічній природі є *полімерами*, тобто речовинами, молекули яких представляють сукупність великого числа що мають однакову будову груп атомів, і виходять в результаті об'єднання один з одним молекул порівняно простих по своєму складу речовин, так званих мономерів.

Полімери діляться на дві групи: *лінійні* і *просторові полімери*. Молекули лінійних полімерів мають вид ланцюжків або ниток (не прямих, а зігнутих і переплетених один з одним. Молекули просторових (тривимірних) полімерів розвинені в просторі в різних напрямках більш рівномірно, так що вони мають компактнішу форму.

Між властивостями лінійних і просторових полімерів є істотні відмінності. Як правило, лінійні полімери порівняно гнучкі і еластичні. Багато з них при помірному підвищенні температури розм'якшуються, а потім розплавляються. Просторові полімери володіють більшою жорсткістю, їх розм'якшення відбувається лише при досить високих температурах, а багато з них ще до досягнення температури розм'якшення хімічно, руйнуються (згорають, обвуглюються і т. п.). Лінійні полімери зазвичай здатні розчинятися у відповідних по складу розчинниках; просторові полімери розчиняються насилу, багато з них практично нерозчинні.

У практиці поширено розділення полімерів на дві групи: термопластичні і термореактивні матеріали.

Термопластичні матеріали при достатньо низьких температурах тверді, але при нагріві стають м'якими (пластичними) і легко деформуються; вони можуть розчинятися у відповідних розчинниках. Характерною особливістю термопластичних матеріалів є те, що нагріваючи до температури, відповідної їх пластичному стану, не викликає необоротних змін їх властивостей. Після охолодження ці матеріали зберігають здатність розчинятися і при новому підйомі температури розм'якшуватися.

В протилежність матеріалам цієї групи *термореактивні* матеріали (*реактопласти*) при нагріві зазнають необоротну зміну властивостей, набуваючи значної механічної міцності і твердості.

Смоли

Смоли назва групи матеріалів, які характеризуються як деякою схожістю хімічної природи (це складні суміші органічних речовин, головним чином високомолекулярних) і деякими загальними для них фізичними властивостями. При достатньо низьких температурах смоли — це аморфні, скловидні маси, більш менш крихкі. При нагріві смоли розм'якшуються, стаючи пластичними, а потім рідкими. Вживані в електроізоляційній техніці смоли переважно нерозчинні у воді і мало гігроскопічні, але розчинюються у відповідних по хімічній природі органічних розчинниках.

Смоли широко застосовуються у вигляді найважливішої складової частини лаків, компаундів, пластичних мас, плівок, штучних і синтетичних волокнистих матеріалів. По своєму походженню смоли діляться на природні, штучні і синтетичні.

Природними смолами є продукти життєдіяльності тваринних організмів (шелак) або рослин – смолоносіїв (каніфоль); їх отримують в готовому вигляді і лише піддають порівняно нескладним операціям очищення, переплавлення. Сюди ж відносяться викопні смоли (копали), що є залишками тих, що розклалися в землі дерев-смолоносіїв (янтар, гагат).

Синтетичні смоли

Найбільше значення в електричній ізоляції мають *синтетичні смоли* полімеризації і конденсаційні.

Поліолефіни. Простий олефін *етилен* $H_2C=CH_2$ або C_2H_4 при нормальній температурі є газоподібною речовиною. Полімеру етилену — *поліетилен*, є вже твердою речовиною.

Довгий час єдиним способом отримання поліетилену була полімеризація етилену при високому (до 300 МПа) тиску і температурі біля $200^\circ C$. Отримуваний матеріал називається поліетиленом високого тиску (ПЕВД). Згодом було створено виробництво поліетилену низького тиску (ПЕНД), тиск при полімеризації всього 0,3—0,6 МПа, температура біля $80^\circ C$.

Поліетилен різних типів широко використовується в ізоляції кабелів (як радіочастотних і кабелів телефонного зв'язку, так і силових); випускається у вигляді плівок, стрічок і інших виробів.

Поліпропілен $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_3$. Електроізоляційні властивості поліпропілену такого ж порядку, як і поліетилену. Одна з перспективних областей застосування поліпропілену — діелектрик намотаних (плівкових, а також комбінованих паперово-плівкових) силових конденсаторів.

Полістирол. Він виходить полімеризацією стиролу, що у свою чергу отримується шляхом синтезу, а також як побічний продукт при сухій перегонці кам'яного вугілля.

Недоліками його є крихкість при знижених температурах, схильність до поступового утворення поверхневих тріщин, мала стійкість до дії розчинників (зокрема, рідких вуглеводнів) і невисока нагрівостійкість.

Розглянуті вище полімери чисто вуглеводневого складу — поліетилен, поліпропілен, поліізобутилен, полістирол — є практично неполярними діелектриками, з чим і пов'язані їх високі електроізоляційні властивості і низька гігроскопічність.

Фторорганічні полімери. Фторорганічні смоли можуть бути як нейтральними, так і полярними. Деякі з діелектриків, до складу яких входить хімічно активний елемент фтор **F**, володіють цінними властивостями. Фтор входить до складу газів, що мають особливо високу електричну міцність і рідких діелектриків. Завдяки симетричній будові молекул політетрафторетилен неполярний. Цей матеріал випускається під назвою *фторлон-4* (*фторопласт-4*); цифра 4 указує на число атомів **F** в мономері. Аналогічний матеріал відомий за кордоном під назвами "тефлон", "дайфлон" і ін. Фторлон-4 володіє високою нагрівостійкістю.

Поліефірні смоли. Ненасичені поліефірні смоли — продукти поліконденсації гліколів або багатоатомних спиртів з ненасиченою мі кислотами або їх ангідридами. У електротехніці застосовуються гліфталеві смоли, полікарбонати, поліефіракрилати і ін. Застосовуються для виготовлення термореактивних компаундів, для ізоляції електричних машин і апаратів, як що пов'язують у виробництві шаруватих пластиків. Багато хто з них має хороші електроізоляційні властивості і нагрівостійкість. Вони володіють високими механічними властивостями і застосовуються для виготовлення плівок, як пов'язує для склотекстоліту, для виробництва литих виробів і тому подібне

Епоксидні смоли характеризуються наявністю в їх молекулі епоксидних груп — "кілець". Епоксидні смоли в чистому вигляді є термопластичними матеріалами. Вони розчиняються в ацетоні і інших відповідних розчинниках, можуть тривало зберігатися, не змінюючи властивостей. Проте після додавання до них затверджувачів епоксидні смоли порівняно швидко твердіють, набуваючи просторової будови. Епоксидні смоли, до яких безпосередньо перед їх вживанням були додані затверджувачі, будучи вже термореактивними матеріалами, можуть рівномірно тверднути у товстому шарі, утворюючи при цьому монолітну, у високому ступені водонепроникну ізоляцію.

Важливою перевагою епоксидних смол є їх висока адгезія до різних пластичних мас, стекол, кераміки, металів і інших матеріалів.

Епоксидні смоли самі по собі або в композиції з іншими матеріалами застосовуються для виготовлення клеїв, лаків, заливальних компаундів, наприклад для заливки невеликих трансформаторів або вузлів апаратури.

Кремнійорганічні смоли (поліорганосилоксани, силікони). У їх склад крім характерного для органічних полімерів вуглецю С входить кремній, що є однією з найважливіших складових частин багатьох неорганічних діелектриків: слюди, азбесту, ряду стекло, керамічних матеріалів і ін. Таким чином, ці матеріали повинні бути віднесені до елементоорганічних. Основу будови їх молекул утворює силосанове угруповання атомів кремнію і кисню, що чергуються. Поліорганосилоксани можуть бути термопластичними і мати лінійну будову. Кремнійорганічні полімери використовуються в лаках, компаундах, пластмасах; деякі з них вельми еластичні. Кремнійорганічні з'єднання можуть бути отримані і у вигляді рідин.

Електроізоляційні властивості кремнійорганічних з'єднань високі навіть при підвищених температурах. Нагрівостійкість кремнійорганіки указує на доцільність її використання в композиції з нагрівостійкими неорганічними матеріалами (слюда, скляне волокно, азбест і ін.) у вигляді міканітів, склолакотканин, пластмас. Крім того, кремнійорганічні з'єднання володіють малою гігроскопічністю і практично не змочуються водою. Покриття цими з'єднаннями целюлозних матеріалів, пластичних мас, кераміки створює гідрофобізацію оброблюваних матеріалів, тобто знижує їх змочуваність, роблячи їх водовідштовхувальними. Проте кремнійорганічні матеріали порівняно дорогі. До того ж кремнійорганічні смоли, як правило, мають низьку механічну міцність, володіють поганою адгезією до більшості інших матеріалів і мало маслостійкі.

Лаки

Це колоїдні розчини смол, бітумів, масел, які з часом висихають. Складають *лакову основу* летючі розчинники. При сушці лаку розчинник випаровується, а лакова основа переходить в твердий стан, утворюючи (у тонкому шарі) *лакову плівку*.

По застосуванню електроізоляційні лаки розділяються на три групи: просочувальні, покривні і склеювальні.

Просочувальні лаки служать для просочення пористої, і зокрема волокнистої, ізоляцій (папір, картон, пряжа, тканина, ізоляція обмоток електричних машин і апаратів). Після просочення пори в ізоляції опиняються заповненими вже не повітрям, а висохлим лаком, що має значно вищу електричну міцність і теплопровідність, чим повітря. Тому в результаті просочення підвищується пробивна напруга, збільшується теплопровідність (це важливо для відведення тепла втрат), зменшується гігроскопічність, поліпшуються механічні властивості ізоляції. Після просочення органічна волокниста ізоляція в меншій мірі підпадає під окислювальний вплив повітря, а тому її нагрівостійкість підвищується.

Покривні лаки служать для освіти механічно міцної, гладкої, блискучої, вологостійкої плівки на поверхні твердої ізоляції. Така плівка підвищує напругу поверхневого розряду і поверхневий опір ізоляції, створює захист лакованого виробу від дії вологи, розчинників і хімічно активних речовин, а також по-

кращує зовнішній вигляд виробу і утрудняє докучання до нього забруднень. Деякі покривні лаки (*емаль-лаки*) наносять не на тверду ізоляцію, а безпосередньо на метал, утворюючи на його поверхні електроізоляційний шар (*наприклад*: ізоляція емальованих проводів, ізоляція листів електротехнічної сталі в розшарованих магнітопроводах електричних машин і апаратів).

До покривних лаків належать також *пігментовані емалі*. Це — лаки, до складу яких входить пігмент, тобто порошок неорганічного складу, що додає плівці певне забарвлення, поліпшуючий її механічну міцність, теплопровідність і адгезію до поверхні, на яку нанесений лак.

Склеювальні лаки застосовуються для склеювання між собою твердих електроізоляційних матеріалів (*наприклад*: склеювання листочків розщепленої слюди при виготовленні міканітів) або для приклеювання їх до металу. Крім високих електроізоляційних властивостей і малої гігроскопічності, склеювальні лаки повинні забезпечувати особливо високу адгезію до склеюваних матеріалів.

Целюлозні лаки — розчини ефірів целюлози. Плівки їх термопластичні. Велика частина целюлозних лаків — лаки холодної сушки. Особливе значення з них мають лаки нітроцелюлози (*нітролак*). Плівки нітролаку механічно міцні, відрізняються блиском, добре чинять опір дії повітря, волога, масел і ін. Нітролак застосовує також для просочення бавовняних обплетень автомобільних і літакових проводів (поверх шару гумової ізоляції), для захисту гуми від впливу озону, масла і бензину.

Компаунди

Компаунди відрізняються від лаків відсутністю в їх складі розчинника. Вони складаються з різних смол, бітумів, воску, масел і ін. Якщо компаунд в початковому стані твердий, його перед вживанням нагрівають до необхідної температури, щоб отримати масу достатньо низької в'язкості.

По застосуванню компаунди діляться на дві основні групи.

Просочувальні компаунди призначення яких аналогічно призначенню просочувальних лаків.

Заливальні компаунди служать для заповнення порівняно великих порожнин, проміжків між різними деталями в електричних машинах і апаратах, а також для отримання порівняно товстого покриття на тих або інших електротехнічних деталях, вузлах, блоках. Застосування заливальних компаундів переслідує цілі захисту ізоляції від зволоження і від дії хімічно активних речовин, збільшення розрядної напруги, поліпшення умов відведення тепла і ін.

При заповненні компаундом повітряних проміжків між котушками електричних апаратів і металевими кожухами істотно поліпшуються умови відведення тепла, унаслідок чого потужність апарату може бути підвищена.

У кабельній техніці велике значення мають *кабельні компаунди*.

Описані вище компаунди — термопластичні, вони розм'якшуються (для просочення або заливки) за допомогою нагрівання, а твердіють при подальшому охолодженні. Термореактивні компаунди застосовуються для просочення і заливки різних деталей і вузлів: сухих трансформаторів, ізоляції водо-

стійких електричних машин і т. п.; заливка значно покращує електричні властивості ізоляції, захищає від зволоження, механічних пошкоджень і ін.

Широко поширені епоксидні компаунди, що є епоксидною смолою з додаванням наповнювачів, пластифікаторів і інших інгредієнтів. Епоксидні компаунди останнім часом застосовуються, зокрема, як кабельні заливальні маси, завдяки високій механічній міцності затверділого епоксидного компаунда у ряді випадків залита таким компаундом муфта може виконуватися без металевого кожуха.

ЛЕКЦІЯ 9

Тема 7. Види та характеристика промислових діелектриків.

7.4. Пластмаси. Загальні відомості та характеристика.

7.5. Еластомери. Гума.

7.6. Скло та кераміка.

7.7. Неорганічні та мінеральні діелектрики.

7.4. Пластмаси . Загальні відомості та характеристика.

Пластмаси (пластики) характеризуються здатністю під впливом зовнішнього тиску (часто при одночасному нагріві) набувати певної форми, відповідної контурам *прес-форми*, використовуваної для виготовлення (пресування) виробів.

Пластмаси широко застосовують в електротехніці як електроізоляційні, так і як конструкційні матеріали.

Багато пластмас мають високу механічну міцність, невисоку щільність і хороші електроізоляційні властивості.

В більшості випадків пластмаси складаються з двох основних компонентів: зв'язувача і наповнювача.

Зв'язувач — зазвичай органічний полімер, що володіє здатністю деформуватися під впливом тиску. Іноді застосовується неорганічний зв'язувач, наприклад скло в мікалексі, цемент в азбоцементі.

Наповнювач, що міцно зчіплюється з речовиною, що зв'язує, може бути порошкоподібним, волокнистим, листовим ("кам'яна мука", "деревна мука", дрібна тирса, бавовняне, азбестове або скляне волокно, слюда, папір, тканина і т. п.); наповнювач істотно здешевлює пластмасу і в той же час може покращувати її механічні характеристики (збільшувати міцність, зменшувати крихкість). Гігроскопічність і електроізоляційні властивості в результаті введення наповнювача можуть погіршуватися, тому в пластмасах, від яких потрібні високі електроізоляційні властивості, наповнювач найчастіше відсутній.

До складу пластмас вводять іноді *пластифікатори*, що збільшують пластичність і що зменшують крихкість матеріалу, *фарбники*, що додають пластмасі певне забарвлення, і інші добавки.

Залежно від вигляду зв'язувача розрізняють пластмаси гарячого пресування, що вимагають при пресуванні нагріву, і пластмаси холодного пресування.

ня, які пресуються при нормальній температурі. Більшість електроізоляційних пластмас з органічним зв'язувачем вимагають гарячого пресування, ці пластмаси розділяють на термопластичні (*термопласти*) і термореактивні (*реактопласти*). Зв'язувачі термопластичних мас після гарячого пресування зберігають здатність до повторного розм'якшення і розчинення в тих або інших розчинниках. Зв'язувачі в термореактивних пластмасах після дії нагріву під час пресування (або при подальшій тепловій обробці) переходять в неплавкий і нерозчинний стан.

До термопластів належать пластмаси на основі полівінілових і поліамідних смол, ефірів целюлози і ін., а до реактопластів — пластмаси на основі фенолоформальдегідних, карбомідних і інших термореактивних смол.

Шаруваті пластики

Широке застосування як конструкційні і електроізоляційні матеріали мають шаруваті пластики, в яких наповнювачем є той або інший листовий волокнистий матеріал. До цих матеріалів відносяться гетинакс, текстоліт і ін.

Гетинакс виходить за допомогою гарячого пресування паперу, просоченого бакелітом. Для виробництва гетинаксу береться міцна і нагрівостійкий просочувальний папір.

Шарувата структура гетинаксу, як і інших шаруватих пластиків, приводить до помітної анізотропії властивостей в напрямках перпендикулярному і паралельному шарам.

Електрична міцність гетинаксу, як і інших пластиків на фенолоформальдегідному зв'язувачі невисока: після дії розряду на поверхні матеріалу залишається вуглецевий слід, що має значну електричну провідність (явище трекінгу).

Гетинакс знайшов застосування у високо- і низьковольтному апарато-приборобудуванні, а також в техніці зв'язку.

Текстоліт. Цей пластик аналогічний гетинаксу, але виготовляється не з просоченого паперу, а з просоченої тканини. Властивості текстоліту на основі бавовняної тканини близькі до властивостей гетинаксу; текстоліт має підвищену питому ударну в'язкість, стійкість до стирання і опір розколюванню (при втискуванні клину в торець дошки). Текстоліт в дорожче за гетинакс, оскільки вартість тканини значно вища за вартість паперу, і застосовується лише в окремих випадках для виробів, що піддаються ударним навантаженням або що працюють на стирання (деталі перемикачів і т. п.).

Інші види шаруватих пластиків.

Це *текстогетинакс* (комбінований шаруватий пластик з внутрішніми шарами паперу і зовнішніми шарами бавовняної тканини); *древинношаруваті пластики* (ДСП) — типу фанери на бакелітовій смолі, дешевші, ніж гетинакс, але з гіршими електроізоляційними властивостями і більш гігроскопічні. Більш нагрівостійкі шаруваті пластики — на неорганічних основах: *асбогетинакс* на основі азбестового паперу і *асботекстоліт* на основі азбестової тканини. Найбільш нагрівостійкі, вологостійкі і механічно міцні шаруваті пластики — *склотекстоліти* на основі неорганічної — скляної тканини з нагрівостійкими зв'язувачами.

Фольговані матеріали — шаруваті пластики або синтетичні плівки, фанеровані з однією або з обох боків металевою (зазвичай — мідною) фольгою. Вони застосовуються для виготовлення електронних плат в різних електротехнічних і радіоелектронних пристроях, а також для виготовлення мікромашин з печатними схемами замість звичайних обмоток.

Фасонні і намотані вироби. Крім описаних вище листових шаруватих пластиків, знаходять застосування і фасонні шаруваті вироби. Такі намотані вироби, відомі на практиці під найменуванням гетинаксових (бакелітових) трубок. Виготовляються також текстолітові циліндри, стрижні і різні фасонні деталі складної форми, зокрема гасильні камери для масляних вимикачів. Текстоліт застосовується і як конструкційний матеріал, *наприклад* для виготовлення підшипників і безшумних зубчатих передач.

7. 5. Еластомери. Гума.

Велике значення в найрізноманітніших галузях техніки і в побуті мають матеріали на основі каучуку і близьких до нього по властивостях речовин. Ці речовини називають еластомери.

Натуральний каучук

Натуральний каучук отримують з особливих рослин — *каучуконосів*. Велика частина каучуконосів містить каучук в молочному соку (*латексі*), що є суспензією мікроскопічних частинок закругленої форми (*глобул*) у воді; глобули мають тонку оболонку з білкових речовин і жирних кислот. Каучук виділяється при коагуляції латексу і видаленні домішок. По хімічному складу натуральний каучук є полімерним вуглеводнем.

Висока еластичність каучуку пов'язана із зигзагоподібною, "шарнірною" формою ланцюжків його молекул; при дії на каучук розтягуючого зусилля форма ланцюжка наближається до прямолінійної. Каучук — аморфна речовина, але в розтягнутому стані він дає рентгенограми, характерні для кристалічних тіл, що мають впорядковане розташування молекул в просторі. Після зняття розтягуючого зусилля каучук знов набуває властивостей аморфного тіла. Із-за малої стійкості до дії як підвищених, так і знижених температур, а також розчинників чистий каучук для виготовлення електричної ізоляції не вживають. Для усунення вказаних вище недоліків каучук піддають так званій *вулканізації*, тобто нагріву після введення в нього сірки. При вулканізації відбувається утворення просторової структури.

Гума

Вулканізація покращує як нагрівостійкість, так і холодостійкість каучуку, підвищує його механічну міцність і стійкість до розчинників. Залежно від кількості сірки, що додається до каучуку, при вулканізації отримують різні продукти:

- м'яку гуму (1 – 3% сірки), що має високу розтяжність і пружність;
- тверду гуму, ебоніт (30 – 35%) сірки, що володіє високою стійкістю до ударних навантажень.

Крім каучуку і сірки при виготовленні гуми і ебоніту до складу гумової суміші вводять різні *наповнювачі* (крейду, тальк і ін.), а також *фарбники, каталізатори* (прискорювачі) процесу вулканізації і інші речовини.

Гуму широко застосовують в електропромисловості для ізоляції настановних і монтажних проводів, гнучких переносних проводів і кабелів. Вона уживається також для виготовлення захисних рукавичок, калош, килимків і ізоляційних трубок, вживаних при монтажі проводів. До недоліків гуми як електроізоляційного матеріалу слід віднести низьку нагрівостійкість (при нагріві гума старіє, стає крихкою і тріскається), малу стійкість до дії нафтових масел, в яких гума набухає, і інших неполярних рідин (бензол, бензин і ін.); малу стійкість до дії світла, особливо ультрафіолетового, під впливом якого гума швидко старіє. Згубно діє на гуму озон, що утворюється при іонізації в повітряних включеннях або в навколишньому повітрі.

Залишки вільної (не пов'язаною хімічно з каучуком) сірки, що містяться в гумі, можуть надавати шкідливу дію на мідь, дотичну з гумою, особливо при підвищеній температурі: мідь з'єднується з сіркою, утворюючи сірчисту мідь. Тому неприпустимо безпосередньо накладати звичайну гумову ізоляцію на мідну жилу кабельного виробу; заздалегідь мідь покривають так званим роздільником — шаром олова або не іншого схильного до впливу сірки металу або папером. На алюмінієві жили гума може накладатися безпосередньо, без роздільника.

Останнім часом широко застосовують тіурамову гуму, при виготовленні якої беруть не чисту сірку, а *тіурам* — органічна сірчиста сполука, що при нагріві забезпечує вулканізацію каучуку; тіурамова гума не містить вільної сірки, і тому її можна накладати безпосередньо на мідь. Крім того, тіурамова гума володіє вищою нагрівостійкістю.

Гуми, що містять наповнювачем сажу мають чорний колір, вони володіють хорошими механічними властивостями, але електроізоляційні властивості їх низькі. Тому такі гуми в електротехніці використовують лише в тих випадках, коли від них не потрібні високі електричні властивості; *наприклад* зовнішні захисні оболонки (шланги) гумових кабелів.

Синтетичний каучук

Сировиною для отримання СК служать спирт, нафта і природний газ. У кабельній промисловості гуми для захисних оболонок виготовляються виключно на основі СК, а в ізоляційних сумішах більше половини НК замінюється СК.

Бутадієновий каучук (СКВ, ескапон) отримують полімеризацією газоподібного вуглеводню бутадієну. На основі ескапону виготовляється цілий ряд електроізоляційних матеріалів (лаки, лакотканини, компаунди і т. п.).

СКВ нагрівостійкий і мало схильний до дії кислот і органічних розчинників, має високі електроізоляційні властивості, що пояснюється неполярною природою цього просторового полімеру.

Бутадієн-стирольний каучук (СКС) отримують при сумісній полімеризації бутадієну і стиролу. По електроізоляційних властивостях СКС наближається до НК. Він володіє підвищеною нагрівостійкістю, маслостійкістю і бензиностійкістю.

Бутілкаучук отримують сумісною полімеризацією ізобутилену з невеликою кількістю ізопрена або бутадієну. У бутілкаучука і гум на його основі підвищена стійкість до дії кисню, озону і кислот. Його еластичність відносно невисока, але зберігається і при температурах нижче -60°C , що характеризує високу холодостійкість бутілкаучука.

Хлоропреновий каучук (наїрит, за кордоном неопрен) виходить полімеризацією хлоропрена. Це полярний (унаслідок присутності атомів хлора) матеріал з невисокими електроізоляційними властивостями; зате він порівняно стійкий до дії масла і бензину, а також озону і інших окислювачів, завдяки чому може застосовуватися для захисних оболонок кабельних виробів, маслостійких прокладок і тому подібне. Він стійкіший до теплового старіння і менш проникний для газів, чим НК.

Кремнійорганічні каучуки. У основі будови молекули такі каучуки мають полісилоксановий ланцюжок. Вони вулканізуються лише при введенні спеціальних добавок, наприклад органічних перекисів. Кремнійорганічні каучуки володіють високою нагрівостійкістю, хорошою холодостійкістю, при хороших електроізоляційних властивостях, але мають невисокі механічні властивості, малостійкі до дії розчинників і досить дорогі.

7.6. Скло та кераміка.

Скло. Види і характеристика. Діелектричні властивості скла.

Скло – це неорганічні аморфні речовини, що є складними системами різних оксидів. Окрім склоутворюваних оксидів, тобто таких, кожен з яких здатний сам по собі в чистому вигляді утворювати скло (SiO_2 , B_2O_3), до складу стекол входять і інші оксиди: лужні Na_2O , K_2O , лужноземельні CaO , BaO , а також PbO , Al_2O_3 і ін. Основу більшості стекол складає SiO_2 . Такі стекла називаються силікатними.

Велику групу аморфних тіл складають неорганічні стекла, Електропровідність стекол найтіснішим чином пов'язана з хімічним складом, що дає можливість у ряді випадків отримувати заздалегідь задану величину питомої провідності.

Кварцеве скло, плавлений кварц і плавлений борний ангідрид володіють малою питомою провідністю.

Введення до складу скла оксидів металів різних груп таблиці Менделєєва по-різному відбивається на електропровідності. Додавання до складу скла оксидів лужних металів першої групи сильно збільшує питому провідність. Додавання до складу скла важких оксидів (*наприклад*, оксидів барію або свинцю) не тільки нейтралізує шкідливий вплив лужних оксидів, але і приводить до значного пониження питомої провідності стекол.

Властивості стекол.

Властивості стекол міняються в широких межах залежно від їх складу і режиму теплової обробки.

Щільність. Стекла мають щільність, яка коливається від 2 до 8,1 Мг/м³. До важких стекол належать стекла з високим вмістом свинцю (кристали, флінти). Щільність звичайних силікатних стекол (наприклад шибки) близька до 2,5 Мг/м³.

Механічні властивості. Міцність стекол на стиснення багато більше, ніж міцність на розрив: межа міцності при стисненні складає $\sigma_c = 6000 \div 21000$ МПа, при розтягуванні $\sigma_p = 100 \div 300$ МПа.

Теплові властивості. Як і інші аморфні речовини, стекла не мають різко вираженої температури плавлення. При нагріві в'язкість стекол зменшується поступово. Додатки до SiO₂ лужних оксидів знижують температуру розм'якшення, що грає велику роль в оцінці стійкості стекол до різких змін температури (термоударам). При раптовому нагріві або охолодженні зовні предмету з скла (або іншого крихкого матеріалу) унаслідок нерівномірного розподілу температур в зовнішньому шарі матеріалу виникає механічне (температурне) напруження, яке може з'явитися причиною розтріскування скла.

Температурний коефіцієнт розширення стекол грає важливу роль при спайці і зварюванні один з одним різних стекол, при упаюванні металевого дроту або стрічки в скло, при нанесенні склоемалі на ту або іншу поверхню. Необхідно підбирати значення α_t скла і матеріалів, що сполучаються з ним, приблизно однаковими, інакше при зміні температур може відбутися розтріскування скла, порушення герметичності в місці введення металевого дроту в скло.

Оптичні властивості. Звичайні стекла прозорі для променів видимої частини спектру. Деякі добавки додають стеклам певне забарвлення, що використовується при отриманні кольорових стекол, емалей і глазурі. Більшість технічних стекол завдяки змісту домішки оксидів заліза сильно поглинають ультрафіолетові промені.

Силікатні стекла практично стійкі до дії кислот, за винятком лише плавикової кислоти, але малостійкі до лугів.

Електрична міцність стекол при електричному пробі мало залежить від їх складу. Вирішальний вплив на $E_{пр}$ роблять повітряні включення – міхури в товщі скла. При постійній напрузі в однорідному електричному полі електрична міцність скла велика і досягає 500 Мв/м. При високих частотах пробій скла має електротепловий характер.

Типи стекол

Залежно від призначення можна відзначити наступні основні види електротехнічних стекол:

1. Конденсаторні стекла використовуються як діелектрик конденсаторів, вживаних у високовольтних фільтрах, імпульсних генераторах, коливальних контурах високочастотних пристроїв. Вони повинні мати по можливості підвищену ϵ і малий $tg\delta$ втрат.

2. Установочні стекла служать для виготовлення установочних деталей, ізоляторів.

3. Лампові стекла застосовуються для балонів і ніжок освітлювальних ламп, різних електронних приладів.

4. Стекла з наповнювачем, до них належить пластмаса гарячого пресування

з скла і слюдяного порошку — мікалекс.

Склоемалі

Склоемалями називаються плівка скла, що наносяться тонким шаром на поверхню металевих і інших предметів з метою захисту від корозії, додання певного забарвлення і поліпшення зовнішнього вигляду, створення відзеркалювальної поверхні.

Важлива область застосування склоемалей, як електроізоляційних матеріалів – покриття трубчастих резисторів. У цих резисторах на зовнішню поверхню керамічної трубки нанесена дротяна обмотка (з ніхрому або константана), поверх якої наплавляється шар емалі, що створює ізоляцію між окремими витками обмотки і навколишніми предметами і, захищає обмотку від вологи, забруднення і окислення киснем повітря при високій робочій температурі (приблизно 300°C). Крім того, склоемалі використовуються в електроапаратобудуванні для отримання міцного і нагрівостійкого електроізоляційного покриття на металі, а також для пристрів вводу в металеві вакуумні прилади. Склоемалі застосовуються і як діелектрик в деяких типах конденсаторів.

Скловолокно

Скло в товстому шарі — крихкий матеріал, але тонкі скляні вироби володіють підвищеною гнучкістю. Тонкі (діаметром 4-7 мкм) скляні волокна мають вже настільки високу гнучкість, що можуть оброблятися прийомами текстильної технології. Велика гнучкість і міцність скловолокна пояснюються орієнтацією молекул поверхневого шару скла, що має місце при витягуванні скловолокна з розплавленої скломаси і його швидкому охолодженню.

З скляних ниток, скручених з окремих волокон, прядуть скляні тканини, стрічки і шланги; ці ж нитки використовують для ізоляції обмотувальних проводів. Скляні тканини використовуються у виробництві нагрівостійких склолакотканин і склотекстолітів.

Керамічні діелектричні матеріали

Керамічними матеріалами (керамікою) називають неорганічні матеріали, з яких можуть бути виготовлені вироби тієї або іншої форми, що піддаються надалі випаленню при високій температурі; в результаті випалення в керамічній масі відбуваються складні фізико-хімічні процеси, завдяки яким готовий виріб набуває потрібних властивостей. Раніше керамічні матеріали виготовлялися на основі глини, яка в суміші з водою може створювати пластичну, здатну формуватися масу і після випалення набувати значної механічної міцності. Згодом з'явилися і інші види керамічних матеріалів, до складу яких глина входить лише в дуже малій кількості або ж зовсім не входить.

Керамічні матеріали можуть бути дуже різноманітні по властивостях і області застосування; у електротехніці використовують керамічні матеріали у якості як напівпровідникових, магнітних і тому подібних матеріалів.

Надзвичайно велике значення мають керамічні діелектричні, зокрема електроізоляційні, а також сегнетоелектричні та деякі інші спеціальні керамічні матеріали. Багато керамічних електроізоляційних матеріалів мають високу механічну міцність, дуже малий кут діелектричних втрат, значну нагрівостійкість і інші

цінні властивості. В порівнянні з органічними електроізоляційними матеріалами кераміка, як правило, стійкіша до електричного і теплового старіння, не дає залишкових деформацій при тривалому додатку до неї механічного навантаження. Металізація кераміки забезпечує можливість здійснення спайки з металом, що має особливе значення для створення герметичних конструкцій.

Фарфор. Відомий здавен, як електроізоляційний матеріал. В його основі лежать спеціальні сорти глини (каолін, опак) мінерали: кварц і польовий шпат. Відформовані вироби піддають глазуровці та відпалюванню. Глазур покриває поверхню виробів тонким шаром, запобігаючи попаданню всередину вологи, забезпечує хімічну стійкість та механічну міцність.

З фарфору виготовляють електричні лінійні підвісні ізолятори для високої. Напруги, штирбові, станційні, опорні, вводи, різні фасонні апаратні вироби для трансформаторів, вмикачів тощо.

Кераміка з низькою діелектричною проникністю. Ця група матеріалів містить у вигляді основної кристалічної фази кварц $\beta\text{-SiO}_2$, корунд $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, муліт $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, цельзіан $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, циркон $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ та інші.

Радіофарфор, ультрафарфор це фарфор, склоподібна фаза якого ушляхетнена введенням в неї важкого оксиду BaO . Виготовляється різних марок і є подальшим удосконаленням фарфору, характеризується великим змістом Al_2O_3 . У радіофарфору $\text{tg}\delta$ значно менше, а ρ більше, ніж у звичайного електротехнічного фарфору, а електроізоляційні властивості ультрафарфору ще кращі. Крім того, ультрафарфор має істотно підвищену в порівнянні із звичайним фарфором механічну міцність.

Високоглиноземиста кераміка (алюмініоксид) в основному складається з окислу алюмінію (глинозему) Al_2O_3 . Цей матеріал, що вимагає складної технології, виготовлення з високою температурою випалення (до 1750°C), володіє високою нагрівостійкістю (робоча температура до 1600°C), високим ρ і малим $\text{tg}\delta$ при підвищених температурах, надзвичайно високою механічною міцністю і теплопровідністю (його теплопровідність в 10 – 20 разів вища, ніж у фарфору). Особливо щільною структурою володіє *полікор* (за кордоном — люкалокс), на відміну від звичайної непрозорої корундової кераміки, прозорий; крім того, він має ρ на порядок вище, ніж непрозора глиноземиста кераміка. Полікор, зокрема, застосовується для виготовлення колб деяких спеціальних електричних джерел світла.

Стеатит. Це вид кераміки, що виготовляється на основі мінералу тальку $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Тоді як звичайна кераміка (фарфор і його різновиди) складається в основному з силікатів алюмінію, стеатитова кераміка - з силікатів магнію, перш за все *клиноенстатита*.

Тальк відомий мінерал, що має здатність завдяки його надзвичайній м'якості легко розмелюватися в порошок. Стеатитова кераміка зазвичай виготовляється випаленням маси, що складається з порошку тальку з деякими добавками. Можливо також виготовляти деталі з каменя тальку шляхом його безпосередньої механічної обробки з подальшим випаленням. Спеціальні сорти стеатиту з особливо малим змістом домішок оксидів заліза, призначені для високочастотної ізоляції, мають малий $\text{tg}\delta$ і хороші механічні властивості. Перевагою стеати-

тової кераміки є також мала усадка при випаленні, що дозволяє отримувати вироби порівняно точних розмірів. До того ж він не потребує глазуровки (завдяки щільній структурі) і може порівняно легко додатково оброблятися шліфівкою. Стеатит широко використовується для настановної ізоляції в радіотехнічній апаратурі, а також і в силовій електротехніці.

Кераміка з високою діелектричною проникністю. Така кераміка застосовується, зокрема, для виготовлення керамічних конденсаторів; в порівнянні з конденсаторами з кераміки з малою ϵ такі конденсатори мають значно менші розміри і масу. Велика частина керамічних матеріалів з високою ϵ має як основну складову частину двоокис титана TiO_2 .

Сегнетокераміка — це особлива група матеріалів, що володіють сегнетоелектричними властивостями: різкою залежністю ϵ від температури і напруженості електричного поля, наявністю діелектричного, гістерезису і ін. Значною не лінійністю ємкості володіють сегнетокерамічні конденсаторні матеріали, що отримали назву *варіконди* (скорочення слів "варіація" і "конденсатор"), типів ВК-1, ВК-2, ВК-3, ВК-4, ВК-5 і ін.

Кераміка особливо високої нагрівостійкості. Для роботи при високих температурах і різких змінах температури застосовуються спеціальні види керамічних матеріалів з малим α_t , зокрема на основі кордиєриту $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, титанату алюмінію $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{TiO}_2$.

Інтерес представляють *чисті оксиди* різних металів, які мають високу нагрівостійкість. Ряд оксидів володіє також незвичайно високою для електроізоляційних матеріалів теплопровідністю: такі окисли берилія BeO , магнію MgO і алюмінію Al_2O_3 . Характерно, що окисел берилія має теплопровідність вище, ніж металевий берилій. Кераміка з BeO застосовується в тих випадках, коли основною вимогою до електроізоляційного матеріалу є особливо висока теплопровідність.

Безоксидні керамічні матеріали. Це нітриди, карбіди, силіциди, боріди і їх композиції. Деякі з них є напівпровідниками (*наприклад*, карбід кремнію SiC), а деякі діелектриками. Електроізоляційними матеріалами високої нагрівостійкості є нітрид бору BN , кремнію Si_3N_4 і ін. Нітрид бору (*боразон*) може працювати при високих температурах, але в нейтральному або відновному середовищі; на повітрі він окислюється вже при температурі 800°C ; кипляча вода і слабкі кислоти руйнують його з утворенням H_3BO_3 і NH_3 .

7. 7. Неорганічні та мінеральні діелектрики.

Слюда і слюдяні матеріали

Слюда є найважливішою з природних мінеральних електроізоляційних матеріалів. Завдяки їй виключно цінним якостям: високій електричній міцності, нагрівостійкості, вологостійкості, механічній міцності і гнучкості — слюду застосовують у відповідальних випадках зокрема для ізоляції електричних машин високої напруги і великих потужностей (зокрема крупних турбогенераторів і гідрогенераторів, тягових електродвигунів і т. п.), і як діелектрик в деяких конструкціях конденсаторів. Слюда зустрічається в природі у вигляді

кристалів, характерною особливістю яких є здатність легко розщеплюватися на пластинки по паралельних один одному площинам (*площини спайності*).

По хімічному складу різні види слюди, є водні алюмосилікати (найважливіший з них *мусковіт*, *флогопіт*), крім того, до складу слюди можуть входити з'єднання заліза, натрію, кальцію і ін.

Крім щипаної слюди, яка у вигляді міканітів широко використовується в ізоляції електричних машин, слюда в електро- і радіопромисловості застосовується у вигляді штампованих пластинок прямокутної форми для конденсаторів (*конденсаторна слюда*), фасонних штампованих деталей в електронних і освітлювальних лампах, штампованих шайб в різних апаратах і тому подібне Конденсаторна слюда — мусковіт найвищої якості (так звана зразкова *конденсаторна слюда* мазкі З) застосовується для виготовлення вимірювальних конденсаторів. Для ізоляції електричних машин слюду використовують у вигляді клеєних слюдяних виробів — міканітів, а останнім часом також у вигляді слюдяних паперів.

Міканіти — листові або рулонні матеріали, склеєні з окремих пелюсток слюди за допомогою склеювального лаку або сухої смоли, іноді із застосуванням волокнистої підкладки з паперу або тканини, яка наклеюється з однією або з обох боків; підкладка збільшує міцність матеріалу на розрив і утрудняє відставання пелюсток слюди при вигині матеріалу.

Унаслідок вмісту великої кількості (не менше 50% по масі) слюди міканіти володіють порівняно високою нагрівостійкістю.

Тверді міканіти. До них належать колекторний і прокладка міканіти. Вони є твердими як при нормальній, так і при підвищеній (~100°C) температурі і застосовуються для плоских, таких, що не піддаються вигину електроізоляційних прокладок.

Колекторний міканіт застосовують у вигляді штампованих заготовок, які прокладаються між мідними пластинами колекторів електричних машин (міжпластинна ізоляція колектора). Колекторний міканіт виготовляється із слюди флогопіт, як що легше стирається, пов'язує служить шелак, гліфталь або інші смоли; в порівнянні з рештою типів міканітів він має найменший зміст, що пов'язує (не більше 4%) і високу щільність, при ударі видає характерний дзвінкий звук. Завдяки малому змісту того, що пов'язує і високому тиску під час пресування описуваний міканіт має хороші механічні властивості, і зокрема дає малу усадку при роботі в умовах великого тиску і підвищеної температури; це забезпечує міцність колектора під час роботи машини. Колекторний міканіт випускається в листах завтовшки від 0,4 до 1,5 мм.

Міканіт прокладки. Його застосовують для різного роду електроізоляційних прокладок, шайб і тому подібне Виготовляється з мусковіту, флогопіту або їх суміші; пов'язуючем є шелак, гліфталь або кремнійорганічна смола. Містить від 80 до 97% слюди.

Формувальні міканіти при нормальній температурі також тверді, але при нагріві набувають здатності приймати ту або іншу форму, яку зберігають і при охолодженні. Їх застосовують для виготовлення колекторних манжет (ізоляція колектора від валу електричної машини, а також фланців, каркасів

котушок, трубок і інших фасонних виробів. Формувальні міканіти виготовляють в листах завтовшки від 0,1 до 0,5 мм. Зміст слюди — від 80 до 95%; пов'язуючем є гліфталь, шелак або кремнійорганічна смола в кількості від 5 до 20%

Особливий різновид формувального міканіту — *мікафолій*. Він має з одного боку підкладку з паперу, склотканини або склосітки і застосовується для виготовлення твердої ізоляції стрижнів якірних обмоток машин високої напруги, де потрібні великі зусилля при намотуванні. Мікафолій виготовляється з флогопіту або мусковіту, пов'язувачем є гліфталевий, шеллачний, поліефірний або кремнійорганічний лак.

Гнучкі міканіти володіють гнучкістю при нормальній температурі. Вони призначаються для ізоляції різних частин електричних машин і апаратів (гнучкі прокладки, обмотка секцій, пазова ізоляція). Виготовляються в листах завтовшки від 0,15 до 0,50 мм з мусковіту або флогопіту на масляно-бітумному лаку без сикативів, масляно-гліфталевому або кремнійорганічному лаку.

Різновид гнучкого міканіту — *мікастрічка* — клеїться з щипаної слюди крупних розмірів (від 30 до 6) тільки в один шар, з перекриттям пластин приблизно на одну третину; вона має підкладки з склотканини, склосітки або мікалентного паперу з обох боків. Мікастрічка є дуже відповідальним видом продукції; вона утворює основну ізоляцію обмоток багатьох електричних машин високої напруги.

Нагревостійкий (термостійкий) міканіт, не містить органічних речовин, його застосовують для ізоляції електронагрівальних приладів і в інших випадках, коли міканітова ізоляція повинна працювати при температурі в декілька соті градусів. Такий міканіт виготовляється в листах завтовшки 0,2—1,0 мм з нагревостійких різновидів слюди флогопіт; пов'язувачем служить розчин фосфорнокислого амонію або легкоплавке скло (аммофос).

Висока трудомісткість виготовлення щипаної слюди і міканітової ізоляції стимулювали розробку нових матеріалів із слюдяних відходів без попереднього ручного щипання. Ці матеріали називають слюдяними паперами. Два основні види слюдяних паперів — слюденіти і слюдопласти (за кордоном — саміка). Слюденітові матеріали по властивостях наближаються до міканітових і навіть мають перевагу — велику рівномірність властивостей за площею; при застосуванні пов'язуючих (епоксидних, кремнійорганічних і ін.) і підкладок (скловолоконних) вони можуть мати достатньо високу механічну міцність і нагревостійкість. Але слюденітові матеріали мають і недоліки: знижену, як правило, в порівнянні з міканітами вологостійкість, мале подовження при розриві.

Мікалекс — пластична маса з великим змістом наповнювача (слюда), з пов'язуючим - легкоплавким склом. Мікалекс володіє високою нагревостійкістю, дугостійкістю, великою механічною міцністю, допускає механічну, обробку, шліфовку і тому подібне Цей матеріал використовується головним чином в радіотехніці і електровакуумній техніці; з нього виготовляють утримувачі потужних ламп, гребінки котушок індуктивності, плати і тому подібне У ряді випадків використовується можливість запресовувати в мікалекс металеві деталі.

Азбест і азбестові матеріали

Азбест — назва групи мінералів, що володіють волокнистою будовою. Найбільш поширений тип азбесту — *хризотилловий* — є волокнистим різновидом мінералу хризотилу $3\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Перевагою азбесту перед органічними волокнистими матеріалами є висока нагрівостійкість: міцність азбесту зберігається при температурах, при яких звичайні органічні волокна вже повністю руйнуються. Азбест володіє помітною гігроскопічністю, яка зменшується при просоченні смолами, бітумами і тому подібне. Електроізоляційні властивості азбесту невисокі, чому він не застосовується в ізоляції для високої напруги і високих частот.

Азбест знаходить застосування в різних областях електротехніки. З азбесту виготовляють пряжу, стрічки, тканини, папери, картони і інші вироби. Азбест як волокнистий наповнювач входить до складу ряду пластичних мас з тими, що органічними пов'язують, які зазвичай мають вищу нагрівостійкість і механічну міцність в порівнянні з масами на тому, що тому ж пов'язує, але з органічним наповнювачем. Азбестовий папір і тканина утворюють основу шаруватих пластиків — *асбогетинаксу* і *асботекстоліту*.

РОЗДІЛ 2

МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

ЛЕКЦІЯ 10

Тема 8. Загальні відомості про магнітні матеріали.

- 8.1. Класифікація магнітних матеріалів, та загальна характеристика
- 8.2. Природа феромагнетизму
- 8.3. Основні магнітні характеристики матеріалів

8.1. Класифікація магнітних матеріалів, та загальна характеристика.

По характеру взаємодії з магнітним полем всі матеріали прийнято ділити на ті, що слабо взаємодіють і сильно намагнічуються.

Мірою взаємодії матеріалів з магнітним полем є магнітна індукція \mathbf{B} , тобто середня напруженість магнітного поля усередині матеріалу при знаходженні в зовнішньому магнітному полі напруженістю \mathbf{H} .

Магнітна індукція є суперпозицією напруженості зовнішнього магнітного поля і намагніченості:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M} \quad (8.1)$$

де \mathbf{M} - намагніченість матеріалу, тобто відношення векторної суми елементарних магнітних моментів до об'єму матеріалу.

У речовин тих, що слабо взаємодіють з полем намагніченість невелика $\mathbf{B} \approx \mathbf{H}$. У діамагнетиках індукція нижча за напруженість зовнішнього поля, а в парамагнетиках індукція вища за напруженість зовнішнього поля. До таких речовин відносяться діамагнетики і парамагнетики

Діамагнетики – речовини з магнітною проникністю $\mu < 1$, значення якої не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля (*наприклад*: водень, інертні гази), мідь, цинк, срібло, золото, ртуть та інші).

Парамагнетики – речовини з магнітною проникністю $\mu > 1$, значення якої також не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля (*наприклад*: кисень, солі заліза, кобальту, нікелю, лужні метали, алюміній, платина).

Діамагнетики і парамагнетики мають магнітну проникність близьку до одиниці, і по магнітних властивостях знайшли обмежене застосування в техніці.

У речовин тих, що сильно взаємодіють з полем намагніченість велика. До таких речовин відносяться феромагнетики, антиферомагнетики (ферити), супермагнетики, стекла спинів.

Феромагнетики (магнітні матеріали) - мають $\mu \gg 1$, яка залежить від напруженості магнітного поля (*наприклад*: залізо, нікель, кобальт і їх сплави, сплави хрому і марганцю, ферити різного складу).

3.2. Природа феромагнетизму.

Магнітні властивості матеріалів обумовлені внутрішніми схованими формами руху електричних зарядів, що представляють собою елементарні колові токи.

Згідно гіпотезі Ампера усередині атомів і молекул течуть молекулярні струми, а отже, є магнітні диполі. Рух електронів навколо ядер атомів є елементарними струмами, що створюють магнітні моменти.

Розгляд елементарних магнітних моментів свідчить про те, що у атома є магнітні моменти ядер, орбітальні магнітні моменти електронів і магнітні моменти спинів електронів. Магнітні моменти ядер атомів малі в порівнянні з магнітними моментами електронів, тому їх впливом на магнітні властивості матеріалів можна нехтувати. Орбітальні магнітні моменти електронів також помітно менше магнітних моментів спинів. Тому магнітні властивості матеріалів в основному визначаються магнітними моментами спинів електронів.

Явище феромагнетизму пов'язане з утворенням всередині деяких матеріалів нижче температури Кюрі таких кристалічних структур, при яких в межах макроскопічних областей, так названих, магнітних доменів, електронні спини стають орієнтовані паралельно і однаково направленими.

Таким чином, характерним для феромагнітного стану речовини є наявність в ній самовільної (спонтанної) намагніченості без прикладання зовнішнього магнітного поля.

Магнітні моменти сусідніх атомів феромагнетиків орієнтовані паралельно, проте в кристалі достатньо великої величини всі магнітні моменти не можуть бути орієнтовані паралельно. Інакше навколо кристала з'явиться магнітне поле і енергія системи зросте. Для зниження енергії системи кристал розбивається на домени - області спонтанної намагніченості, причому розбиття проводиться так, щоб зовнішнє магнітне поле було відсутнє (рис.8.1).

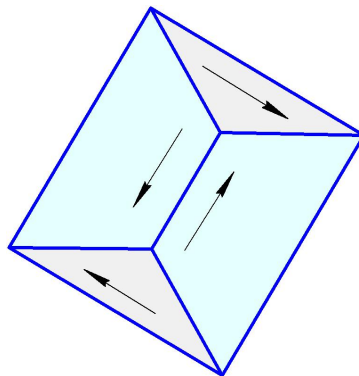


Рисунок 8.1. – Розбиття кристала на домени. Стрілками показані напрямки векторів намагніченості в кожному домені

Розміри доменів коливаються в межах $0,001 \div 10 \text{мм}^2$, для особливо чистих матеріалів розміри доменів можуть бути більшими.

Важливо відзначити, що на межі доменів магнітні моменти атомів не можуть бути антипаралельними. Інакше енергія атомів підвищиться на величину обмінної енергії. Таким чином, на межі доменів відбувається поступовий поворот магнітних моментів атомів з одного положення в інше. Оскільки від-

стань між атомами по різних кристалографічних напрямках різна, то і значення обмінної енергії по різних напрямках різне. Таким чином, у феромагнетиках з'являється *магнітна анізотропія*. Очевидно, що усередині доменів магнітні моменти атомів орієнтовані уподовж найбільш енергетично вигідних напрямів. Такі напрями прийнято називати напрямками легкого намагнічування. На межах доменів магнітні моменти орієнтовані в менш вигідних магнітонапрямках.

Процес намагнічування під впливом зовнішнього магнітного поля зводиться до:

- росту тих доменів, магнітні моменти яких складають найменший кут з напрямом поля;
- зменшення розмірів інших доменів (процес зміщення границь доменів);
- повороту магнітних моментів в напрямку зовнішнього поля (процес орієнтації).

Отже, для того, щоб енергія матеріалу була мінімальною необхідно, щоб протяжність меж доменів була мінімальною, або розмір доменів був як можна великим.

В той же час, зростанню доменів перешкоджає зміна їх лінійних розмірів. Це явище носить назву *магнітострикція* - деформація кристалічної решітки під впливом магнітного поля. Обмінна взаємодія між атомами приводить до появи додаткових сил взаємодії і кристалічна решітка деформується.

Магнітострикція спостерігається у полікристалічних матеріалів. З трьох основних феромагнетиків Fe, Ni, Co найбільшою магнітострикцією володіє нікель.

Зростання домена веде до збільшення напруженості локального поля усередині домена і зростання деформації кристалічних ґраток.

При цьому енергія системи збільшується. Таким чином, протиборство магнітній анізотропії і магнітострикції приводить до встановлення оптимального розміру магнітних доменів.

8.3. Основні магнітні характеристики матеріалів

При розміщенні феромагнетика в зовнішнє магнітне поле вектори намагніченості доменів можуть виявлятися такими, що співпали або близькі до збігу з вектором напруженості зовнішнього магнітного поля. Енергія таких доменів буде мінімальною, тоді як енергія решти всіх доменів підвищиться. Для того, щоб знизити енергію системи сприятливо орієнтовані домени ростуть. При цьому збільшується намагніченість M і, отже, зростає магнітна індукція B . Протікання процесів намагнічування феромагнітного матеріалу характеризується кривою намагнічування, залежність індукції від напруженості зовнішнього магнітного поля прийнято називати кривою намагнічування (рис.8.2.).

При попаданні феромагнетика в зовнішнє магнітне поле починається зростання сприятливо орієнтованих доменів, тобто їх межі зміщуються. Проте структурні неоднорідності матеріалу перешкоджають зсуву меж доменів (тобто є точками закріплення меж доменів) і межі згинаються під дією зов-

нішнього поля. Вигин меж енергетично не вигідний, оскільки приводить до збільшення їх поверхні, тому при відключенні зовнішнього поля межі знов випрямляються і намагніченість зникає. Таким чином, при малих значеннях напруженості зовнішнього поля утворюється ділянка оборотного намагнічування. На початковій ділянці кривої намагнічування збільшення напруженості зовнішнього поля веде до незначного зростання індукції, причому при відключенні зовнішнього поля індукція знижується до нуля. Цю ділянку прийнято називати областю Релея (I).

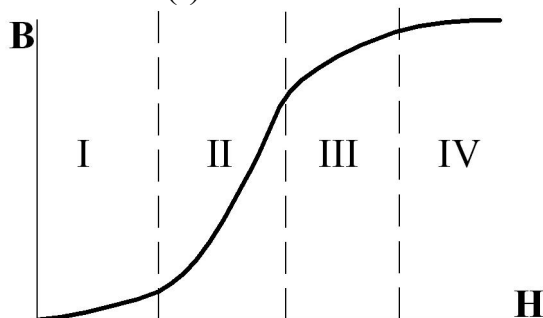


Рисунок 8.2. – Крива намагнічування ферромагнетиків.

При подальшому збільшенні напруженості зовнішнього поля вигин меж стає настільки великим, що енергія зігнутих меж співпадає з енергією меж що відірвалися від точок закріплення. Подальший вигин меж стає енергетично невигідним, межі відриваються від точок закріплення і скачками переміщаються до наступного ряду точок закріплення. На другій ділянці незначна зміна напруженості зовнішнього поля веде до помітних змін індукції. Цю ділянку прийнято називати ділянкою різкого зростання індукції або областю стрибків Баркгаузена (II).

Після того, як зсув меж доменів приведе до того, що сприятливо орієнтовані домени заповнять весь об'єм кристала, і починається зростання намагніченості за рахунок повороту магнітних моментів атомів з напрямку легкого намагнічування в напрямки важкого намагнічування. Оскільки поворот магнітних моментів енергетично не вигідний, то для його здійснення потрібна висока напруженість зовнішнього поля. На третій ділянці кривої намагнічування залежність індукції від напруженості зовнішнього поля знов слабшає. Цю ділянку називають ділянкою сповільненого намагнічування або областю намагнічування за рахунок процесів обертання (III).

Нарешті, після того, як всі магнітні моменти атомів будуть направлені по зовнішньому полю, приросту намагніченості відбуватися не може, а зростання індукції відбувається за рахунок зростання напруженості магнітного поля як в парамагнетиках. На четвертій ділянці індукція росте пропорційно напруженості магнітного поля. Цю ділянку називають ділянкою насичення або областю парапроцеса (IV).

Магнітна проникність μ – одна з основних характеристик магнітних матеріалів. Вона визначається як відношення індукції B до напруженості магнітного поля H в даній точці кривої намагнічування:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (8.2.)$$

В сильних полях області насичення магнітна проникність прагне до одиниці $\mu \rightarrow 1$.

Характеристикою феромагнетиків в перемінних полях є динамічна магнітна проникність $\mu \sim$, що представляє відношення амплітудних значень індукції та напруженості магнітного поля. Зі збільшенням частоти перемінного поля динамічна магнітна проникність зменшується з-за інерційності магнітних процесів.

Магнітна проникність феромагнітних матеріалів залежить від температури і має вид (рис. 8.3.):

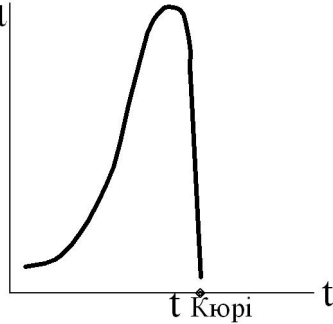


Рисунок 8.3. – Типова залежність магнітної проникності феромагнітних матеріалів від температури.

Так для чистого заліза точка Кюрі складає 786°C , для нікелю – 358°C , для кобальту – 1131°C . При температурах, вищих за точку Кюрі намагнічування руйнується тепловим рухом структурних часток і матеріал перестає бути магнітним.

Для характеристики зміни магнітної проникності використовують *температурний коефіцієнт магнітної проникності* α_μ (K^{-1}):

$$\text{TK}\mu = \alpha_\mu = \frac{1}{\mu_t} \cdot \frac{d\mu}{dt} \quad (8.3.)$$

Якщо повільно виконувати намагнічування феромагнетику у зовнішньому магнітному полі, а далі починаючи з будь якої точки основної кривої намагнічування, почати повільно зменшувати напруженість поля, то індукція теж почне зменшуватися, але не основній кривій, а з відставанням (рис.8.4.). Це пояснюється процесом гістерезису.

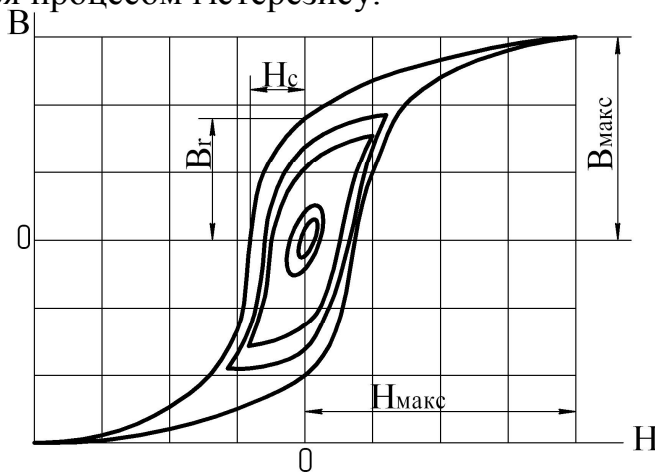


Рисунок 8.4. – Петлі гістерезису для різних граничних значень напруженості зовнішнього магнітного поля.

При зміні напрямку магнітного поля зразок може бути перемагніченим і крива намагнічування повернеться у початкову точку. Таким чином графік зміни намагніченості феромагнітних матеріалів носить назву *петлі гістерезису* (рис.8.4.).

Граничне значення магнітної індукції при якому здійснюється насичення позначають $B_{\text{макс}}$.

Якщо після намагнічування феромагнетика до насичення відключити зовнішнє магнітне поле ($H = 0$) намагніченість феромагнетика повністю не знімається і зберігається *залишкова магнітна індукція* B_r . Це викликано тим, що дефекти структури, що перешкоджають переміщенню меж доменів при намагнічуванні, перешкоджають зворотному зсуву меж доменів при розмагнічуванні.

Для того, щоб зняти залишкову індукцію необхідно прикласти поле зворотної полярності. При деякому значенні напруженості поля індукція зникне, це значення називають *затримуючою* або *коерцитивною силою* H_c .

Подальше збільшення напруженості поля у зворотному напрямі приведе до намагнічування феромагнетика.

Природно, що знак вектора магнітної індукції при цьому поміняється. Відключення зовнішнього магнітного поля знов приведе до появи залишкової індукції, для зняття якої необхідно прикласти коерцитивну силу. Таким чином, при знаходженні феромагнетика в змінному магнітному полі з'являється петля гістерезису. Чим більше в матеріалі дефектів структури, що утрудняють зсув меж зерен, тим вище значення коерцитивної сили і ширше петля гістерезису.

Площа петлі гістерезису характеризує витрати енергії на перемагнічування матеріалу за один цикл:

$$P = \int H dB \quad (8.4)$$

Матеріали з малим значенням H_c і великою магнітною проникністю називають *магнітно-м'якими*. Матеріали з великою коерцитивною силою і порівняно малою магнітною проникністю носять назву *магнітно-тверді*.

Помітно впливають на магнітні властивості пружні зміни розмірів феромагнетиків. При від'ємній магнітострикції в випадку зовнішніх розтягувальних зусиль спостерігається зменшення проникності та її зростання при додатних значеннях магнітострикції.

Також слід зазначити, що наявність внутрішніх механічних напружень веде до зменшення проникності і до зростання коерцитивної сили, Тому холодну обробку тиском часто застосовують з метою забезпечення потрібного комплексу магнітних характеристик феромагнетиків.

Важливо відзначити, що при знаходженні магнітних матеріалів в змінному магнітному полі в них виникають вихрові струми. Це пов'язано з тим, що змінне магнітне поле викликає появу змінного електричного поля. Вихрові струми викликають нагрів матеріалу і обумовлюють появу магнітного поля, що ослабляє зовнішнє поле. У зв'язку з цим з'являються втрати енергії зовнішнього магнітного поля на вихрові струми, їх називають *динамічними втратами* або *магнітною в'язкістю*.

ЛЕКЦІЯ 11

Тема 9. Класи магнітних матеріалів. Види та їх характеристика.

- 9.1. Класифікація магнітних матеріалів на класи.
- 9.2. Промислові магнітно-м'які матеріали. Матеріали для роботи в постійних і низькочастотних полях.
- 9.3. Промислові магнітно-м'які матеріали для роботи в слабких полях.
- 9.4. Магнітно-м'які матеріали, призначені для роботи у високочастотних полях.
- 9.5. Магнітно-тверді матеріали

9.1. Основні класи магнітних матеріалів.

Всі магнітні матеріали прийнято умовно розділяти на магнітно-м'які і магнітно-тверді.

Магнітно-м'якими називають матеріали що легко перемагнічуються під дією зовнішнього магнітного поля. Для таких матеріалів характерні низькі значення коерцитивної сили і високі значення магнітної проникності. Їх використовують для концентрації магнітного поля. В більшості випадків магнітно-м'які матеріали працюють в перемінних магнітних полях, тому для них важливий високий питомий електричний опір. Історично першим магнітно-м'яким матеріалом було залізо, що мало низьку твердість. Тому такі матеріали отримали назву магнітно-м'яких.

Магнітно-твердими називають матеріали з високою коерцитивною силою і великою залишковою індукцією. Їх застосовують для виготовлення постійних магнітів - джерел постійного магнітного поля. Історично першими магнітно-твердими матеріалами були механічно тверді, загартовані вуглецеві сталі. Тому, такі матеріали отримали назву магнітно-твердих.

9.2. Промислові магнітно-м'які матеріали. Матеріали для роботи в постійних і низькочастотних полях.

Магнітно-м'які матеріали, маючи високу магнітну проникність, невелику коерцитивну силу і малі витрати на гістерезис, використовуються як якості сердечників трансформаторів, електромагнітів, вимірювальних приладах, та в інших випадках, коли при найменшій витраті енергії необхідно досягнути найбільшої індукції. Для зменшення витрат на вихрові струми і трансформаторах використовують магнітно-м'які матеріали з збільшеним електроопором, зазвичай застосовуючи магнітопроводи, що зібрані з окремих ізольованих листів.

Залізо

Для роботи як магнітопроводи в постійних і низькочастотних полях найбільш відповідними є залізо і його сплави з кремнієм. Оскільки у заліза для заповнення 3d орбіталі не хватає 4 електронів, атоми заліза мають великий магнітний момент. У зв'язку з цим, у заліза висока індукція насичення (2,2

Тл). Слід зазначити, що часто зустрічаються домішки вуглецю, кисню, сірки і фосфору, що виділяються у вигляді карбідів, оксидів, сульфідів і фосфідів. Ці включення утрудняють переміщення границь доменів і, тим самим знижують магнітну проникність і збільшують коерцитивну силу.

Найбільш дешевим матеріалом є технічно чисте залізо з сумарним змістом домішок до $0,08 \div 0,1\%$. Завдяки порівняно низькому питомому електричному опору ($\approx 0,1$ мкОм·м) технічно чисте залізо використовується в основному для магнітопроводів постійного магнітного потоку. Істотним недоліком технічно чистого заліза є його старіння, тобто підвищення коерцитивної сили з часом за рахунок виділення тонко дисперсних частинок карбідів і нітриду. Для зменшення шкідливого впливу старіння хімічні сполуки виділяють заздалегідь у вигляді порівняльних крупних частинок. Для цього матеріал піддають відпалу при $910 - 950^\circ\text{C}$ і повільному охолодженню.

Очищення заліза від домішок приводить до зростання магнітної проникності і зниження коерцитивної сили. Ці переваги особливо яскраво виявляються в слабких полях, тобто в полях використовуваних в радіоелектроніці і вимірювальних пристроях. Очищення заліза проводиться електролізом, відновленням у водні хімічно чистих оксидів заліза і термічним розкладанням пентакарбонілу заліза ($\text{Fe}(\text{CO})_5$). Відповідно розрізняють електролітичне, відновлювальне і карбонільне залізо. Оскільки очищення істотно збільшує вартість матеріалу, його застосування украй обмежено. Найбільше застосування отримало карбонільне залізо. Це пов'язано з тим, що при розкладанні пентакарбонілу заліза виходить металевий порошок. Змішавши цей порошок з яким-небудь лаком можна отримати матеріал, що поєднує високий питомий електричний опір з високою магнітною проникністю.

Електротехнічна сталь

Низький електричний опір заліза приводить до того, що в змінних полях в залізі виникають великі втрати на вихрові струми і знижується магнітна проникність. При легуванні заліза кремнієм питомий електричний опір істотно зростає. Так у сплав, що містить 5% кремнію, питомий електричний опір досягає $0,7$ мкОм·м, тобто збільшується більш ніж в 7 разів в порівнянні з чистим залізом.

Крім того, присутність кремнію в залізі знижує магнітну анізотропію і магнітострикцію. У сплав, що містить 6,8% Si магнітна анізотропія в 3 рази менше ніж у чистого заліза, а магнітострикція практично рівна нулю. При додаванні до заліза кремнію нейтралізується шкідливий вплив домішок кисню і вуглецю.

Важливо відзначити, що кремній знижує пластичність сплавів. У зв'язку з цим промислові сплави заліза з кремнієм - *електротехнічні сталі* містять не більше 5% Si.

Оскільки у електротехнічних сталей зберігається магнітна анізотропія, то для поліпшення магнітних властивостей застосовують текстуровану сталь, тобто сталь, у якої деякі кристалографічні напрями в сусідніх зернах співпадають. Для отримання стали з високою магнітною проникністю і малими втратами необхідний збіг напрямів типу [111]. Для того, щоб отримати маг-

нітну текстуру застосовують холодну прокатку з великими обтисканнями і подальший відпал при температурі 900÷1000°C. В ході холодної деформації відбувається орієнтація зерен, а при відпалі йде рекристалізація, що призводить до зниження щільності дислокацій і зростання зерен. Текстуровану сталь називають також холоднокатаною. Холоднокатана сталь в 1,5 разу дорожче гарячекатаної, але динамічні втрати в ній удвічі нижчі. Важливо мати на увазі, що для ефективного використання текстурованої електротехнічної сталі магнітний потік повинен проходити уздовж напрямку легкого намагнічування.

Листова електротехнічна сталь розділяється на марки:

- Э11, Э12, Э13
- Э21, Э22
- Э31, Э32
- Э41, Э42, ...Э48
- Э310, Э320, Э330....
- Э1100, Э1200, Э1300, Э3200

Перше число вказує орієнтований вміст кремнію(%); друге число характеризує сталь по електричним і магнітним характеристикам (від 1 до 8); третє число "0" означає, що сталь холоднокатана текстурована, "00" – холоднокатана мало текстурована.

9. 3. Промислові магнітно-м'які матеріали для роботи в слабких полях.

Для матеріалів, що працюють в слабких полях, надзвичайне значення має високе значення початкової магнітної проникності. Інакше кажучи, для таких матеріалів важлива велика рухливість меж доменів в умовах малої напруженості зовнішнього магнітного поля. Отже, такі матеріали повинні бути однофазними і мати малу магнітну анізотропію і магнітострикцію.

Як наголошувалося раніше, збільшення міжатомних відстаней між атомами перехідних металів унаслідок легування, призводить до зниження магнітної анізотропії. Тому для досягнення максимальної магнітної проникності використовують сильно леговані сплави. Прикладом можуть служити альсифер і пермалой.

Альсифер - сплав системи Fe-Si-Al, що містить близько 9,5% кремнію і 5,5% алюмінію. При цьому складі магнітна анізотропія мінімальна і сплав має дуже високу магнітну проникність. Сплав відрізняється достатньо високим питомим електричним опором ($\rho=0,81$ мкОм×м), що знижує втрати на вихрові струми. Разом з тим, сплав непластичний і твердий. Деталі з нього виготовляють методом порошкової металургії, а остаточна обробка деталей можлива тільки анодно-механічним і електроіскровими способами, а також шліфівкою. Трудність обробки підвищує вартість виробів, проте, оскільки сплав не містить дорогих компонентів його широко застосовують для виготовлення магнітних екранів і магнітопроводів.

Пермалой. Пермалоем називають сплав заліза і нікелю. При цьому розрізняють низько нікелеві пермалої і високо нікелеві пермалої. Низько нікелевий пермалой містить 45- 65% Ni, високо нікелевий пермалой – 76 - 80% Ni. Для низько нікелевих пермалоїв характерні вищий питомий електроопір і підвищена індукція насичення, проте, магнітна проникність нижча за магнітну проникність високо нікелевого пермалою. Важливо відзначити, що індукція насичення високо нікелевого пермалою нижча за індукцію насичення низько нікелевого пермалою. Ця обставина пов'язана з тим, що магнітний момент іона нікелю нижчий за магнітний момент іона заліза.

Магнітні характеристики пермалоїв сильно залежать від хімічного складу, наявності домішок, зовнішніх механічних напружень і режимів термічної обробки.

Для стабілізації параметрів до складу пермалоїв вводять легуючі добавки. Мо, Сг збільшують питомий електроопір і початкову магнітну проникність, зменшують чутливість до механічних деформацій. Си – збільшує і стабілізує μ , покращує температурну стабільність і оброблюваність. Si, Mn в основному збільшують питомий електроопір.

Марки пермалоїв: 45Н, 50Н, 50ХНС, 76НХД, 79НМ, 80НХС, суперпермалой – 79% Ni, 5% Мо, 15% Fe, 0,5% Mn.

Використовують пермалої для виготовлення сердечників силових трансформаторів, дроселів, реле і деталей магнітних кіл, що працюють при високих індукціях без підмагнічення; для магнітних екранів, підсилювачів, безконтактних реле, комірок пам'яті в обчислювальній та електронній техніці.

9.4. Магнітно-м'які матеріали, призначені для роботи у високочастотних полях.

У високочастотних полях різко зростають втрати на вихрові струми. Тому у високочастотних полях використовують матеріали з високим питомим електричним опором – магнітодіелектрики, феромагнетики з аморфною структурою і ферити.

Магнітодіелектрики отримують, змішуючи порошкоподібні феромагнетики і органічний або неорганічний зв'язувач. Як феромагнетик використовують карбонільне залізо, альсифер або молібденовий пермалой, додатково легований сіркою. Сірку в пермалой вводять для додання крихкості. Як зв'язувач використовують фенолформальдегідні смоли, полістирол, легкоплавке скло. Зв'язувач повинен утворювати тонку суцільну плівку між частинками феромагнетику. Частинки феромагнетику повинні бути достатньо малими, для зниження вихрових струмів. Проте у малих частинок не відбувається розбиття на домени, тому знижується магнітна проникність магнітодіелектриків. Магнітодіелектрики не мають зараз промислового значення, бо їх магнітний потік малокерований.

До цієї групи матеріалів також можна віднести немагнітні чавуни та немагнітні сталі.

Немагнітний чавун містить легуючі добавки нікелю, марганцю, які забезпечують йому аустенітну структуру. Приблизний хімічний склад такого чавуну: 2,6%С, 2,5% Si; 5,6% Mn, 9÷12% Ni, інше – Fe. Ці чавуни зберігають свої парамагнітні властивості до 400°C, мають значний електроопір, низькі втрати на вихрові струми, мають гарну технологічність. Немагнітний чавун використовують для виготовлення кришок, кожухів, втулок масляних вимикачів, зварювальних трансформаторів тощо.

Немагнітна сталь. Виготовляється легуванням, з метою зниження температури переходу $Fe_\gamma \leftrightarrow Fe_\alpha$ до 20°C. Наприклад : 0,25 - 0,35%С, 22 – 25% Ni, 2 – 3% Cr, інше Fe. Немагнітна сталі має високу міцність, гарну технологічність і може застосовуватись замість деяких деталей з мідно-алюмінієвих сплавів.

Феромагнетики з аморфною структурою отримують надшвидким охолодженням розплаву, при цьому швидкості охолодження досягають 10^6 – 10^8 градуса за секунду. При такому швидкому охолодженні кристалічна решітка не встигає формуватися, і матеріал є переохолодженою рідиною. Відсутність кристалічної решітки приводить до повної ізотропії магнітних властивостей, а за відсутності магнітної анізотропії рухливість меж доменів стає високою. Таким чином, матеріали з аморфною структурою є магнітно-м'якими. Крім того, відсутність кристалічної решітки приводить до зростання питомого електричного опору, тому втрати на вихрові струми в матеріалах з аморфною структурою дуже малі.

Ферити.

Ферити представляють собою магнітну кераміку з незначною електронною електропровідністю. Ферити є системи з окислів заліза і окислів двохвалентних металів, тобто іонні з'єднання типу $MeO \cdot Fe_2O_3$, які по хімічній природі є солями. Більшість феритів мають симетричну кубічну кристалічну решітку типу шпінелю або граната. Проте деякі ферити (ферит барію) має несиметричні гексагональні ґрати. Іноді, для того, щоб підкреслити тип ґраток ферити називають *фероксубами* або *гексаферитами*.

Як магнітно-м'які матеріали найширше застосовують нікель-цинкові, літій-цинкові і марганець-цинкові ферити.

По електричних властивостях ферити відносяться до напівпровідників або до діелектриків, тому втрати на вихрові струми у феритах дуже малі. Крім того, вони мають високу діелектричну проникність, що призводить до зниження швидкості розповсюдження електромагнітних хвиль у феритах. Ця обставина дозволяє виготовляти на базі феритів лінії затримки, фазоротори, магнітні вентиля і ін. Монокристали магнітно-м'яких феритів застосовуються для виготовлення магнітних головок запису і відтворення сигналів звукового і відео діапазону в магнітофонах. Оскільки кристалічна решітка феритів упакована нещільно, то такі головки володіють підвищеною зносостійкістю.

Для пристроїв пам'яті в обчислювальній та електронній техніці використовують ферити з прямокутною петлею гістерезису (ППГ). Вони мають швидко перемагнічування, значну температурну стабільність магнітних характеристик, високу точку Кюрі.

Особливе значення мають спеціальні ферити для СВЧ. В цій області частот в першу чергу використовуються ферити з керованими магнітними характеристиками. Прикладом можуть служити нікелеві ферити, магнієві ферити, магнієві фeroамонікати, нікелеві та магнієві фeroхроміти а також ітрієві ферити – гранати.

В промисловості також застосовують магнітострикційні ферити. Їх використовуються в області високих частот.

9. 5. Магнітно-тверді матеріали

Характеристиками магнітно-твердих матеріалів служить коерцитивна сила, залишкова індукція і максимальна енергія, що віддається магнітом у зовнішній простір. Магнітна проникність цієї групи матеріалів нижча.

Магнітно-тверді матеріали йдуть на виготовлення постійних магнітів. Постійні магніти знайшли поширене застосування. Вони різноманітні по конструкції, габаритам і призначенню.

Запасена магнітна енергія магнітно-твердих матеріалів оцінюється як добуток залишкової індукції на величину коерцитивної сили

$$E_m = B_r \cdot H_c \quad (9.1.)$$

Для того, щоб збільшити коерцитивну силу потрібно ускладнити зсув меж доменів. Для цього необхідно щоб магнітна анізотропія була максимальною, розмір зерен був мінімальним і матеріал повинен містити частинки, що перешкоджають руху меж доменів. Інакше кажучи, вимоги до структури магнітно-твердих матеріалів прямо протилежні вимогам до вимог магнітно-м'яких матеріалів.

По складу, стану і способу отримання магнітно-тверді матеріали розділяють на групи:

- 1) вуглецеві та леговані сталі, загартовані на мартенсит;
- 2) ливарні магнітно-тверді сплави;
- 3) пластично-деформовані сплави, магнітні стрічки;
- 4) магнітно-тверді ферити;
- 5) магніти з порошків;

1) *Вуглецеві та леговані сталі, гартовані на мартенсит.*

Для розуміння природи підвищення коерцитивної сили при гартуванні сталей слід коротко розглянути діаграму стану сплавів системи "залізо – цементит" (рис.9.1.).

Залізо – метал білого кольору з сильно виявленими феромагнітними властивостями. Міцність заліза невисока $\sigma_B = 200 \dots 250 \text{ МПа}$, твердість $H_B = 60 \dots 80 \text{ МПа}$, пластичність гарна $\delta = 40 \dots 50\%$. При нормальній температурі залізо має ОЦК решітку, але при збільшенні температури до 768°C (точка Кюрі) втрачає магнітні властивості. Втрата ця не пов'язана з перебудовою атомів у кристалічній решітці, тобто ОЦК решітка при цьому зберігається. Щоб відрізнити магнітне Fe_α від немагнітного, немагнітне іноді називають Fe_β . Залізо при зміні температури набуває поліморфних перетворень. При темпе-

ратурі 911°C Fe_{β} перетворюється в Fe_{γ} з ГЦК решіткою. При температурі 1392°C ГЦК решітка знову перетворюється в ОЦК. Цю модифікацію на відміну від низькотемпературної ОЦК решітки називають Fe_{δ} . При температурі 1539°C залізо плавиться.

Гранична розчинність вуглецю в Fe_{α} при нормальній температурі не перевищує 0,006 %. Такий розчин є практично чистим залізом. Називають його *феритом* (Φ). Міцність фериту $\sigma_B = 250...300$ МПа, твердість 90... 100 НВ і відносне видовження $\delta = 30...40$ %.

Твердий розчин вуглецю в Fe_{γ} називається *аустенітом* (А). Розчинність вуглецю в аустеніті з підвищенням температури збільшується від 0,8% (727°C) до 2,14 % (1147°C). Аустеніт немагнітний і має підвищену порівняно з феритом пластичність. Твердість аустеніту НВ = 160 – 200 МПа

Залізо з вуглецем утворює ряд хімічних сполук. З них практичне значення має карбід Fe_3C , який містить 6,67 % С. Цей карбід називають *цементитом* (Ц). Цементит досить твердий (~ 800 НВ), але крихкий, температура плавлення близько 1600°C. Отже, фазами в залізобуглецевих сплавах можуть бути *ферит, аустеніт, цементит і графіт*.

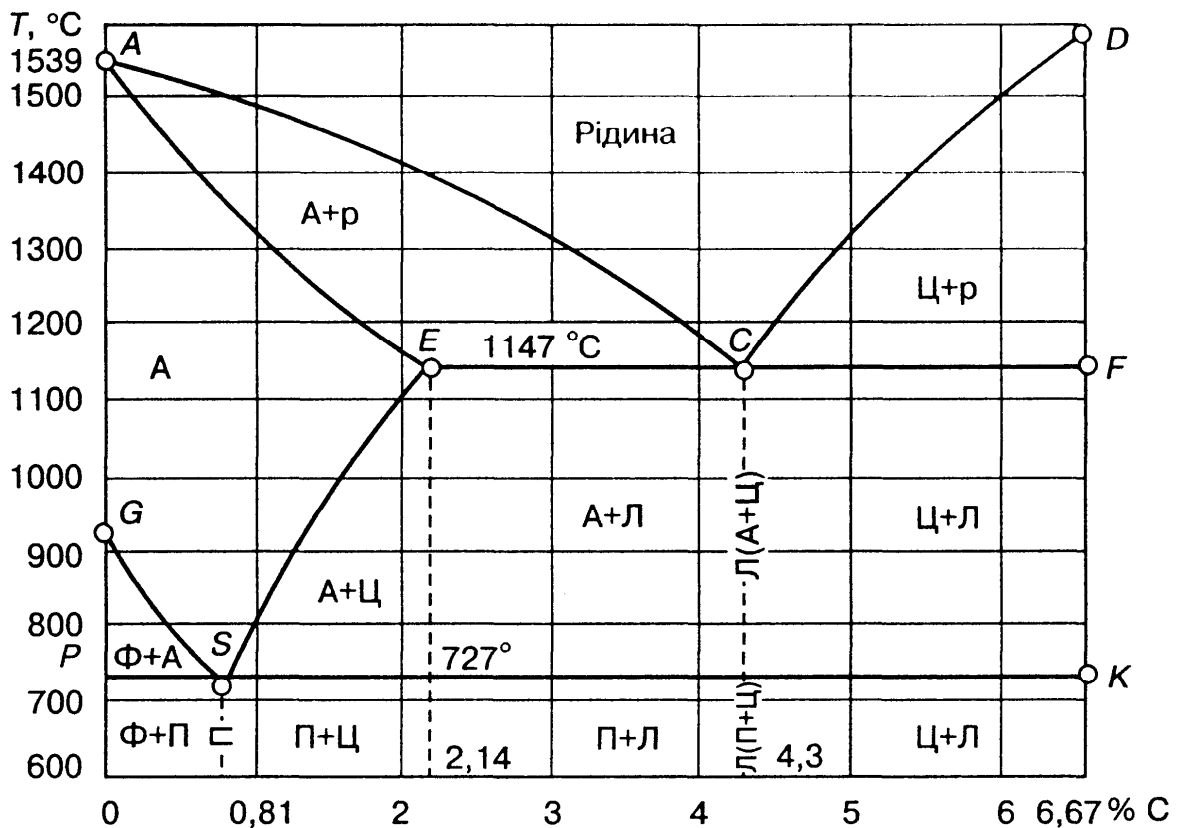


Рисунок 9.1. – Діаграма стану системи сплавів "залізо-цементит".

При повільному охолодженні сплавів системи Fe – Fe₃C (сталей) з температурної області аустеніту вуглець дифузійним шляхом виділяється у вигляді цементиту, а грати аустеніту перебудовуються в грати фериту (рис. 9.1.).

При різкому охолодженні сталей вуглець не встигає виділитися з аустеніту і при перебудові кристалічної решітки гратки фериту виявляються спо-

твореними атомами вуглецю. В результаті замість ОЦК граток виходять тетрагональні гратки або гратки мартенситу. Оскільки гратки мартенситу упаковані нещільно, то при мартенситному перетворенні в сталі виникають внутрішні напруження. Зростання напружень приводить до зростання енергії системи, тому повного перетворення аустеніту на мартенсит не відбувається і в сталі формується структура, що полягає в дисперсній суміші мартенситу і залишкового аустеніту. Оскільки гратки аустеніту щільно упаковані, то аустеніт не феромагнітний. У мартенситу нещільно упаковані тетрагональні гратки обумовлюють його феромагнетизм. Крім того, тетрагональна будова мартенситу приводить до великої анізотропії його магнітних властивостей. Таким чином, виходить ідеальна з погляду магнітно-твердих матеріалів структура - дисперсна суміш феромагнітної і не феромагнітної фаз, причому у феромагнітної фази велика магнітна анізотропія.

Проте властивості сталей, загартованих на мартенсит далекі від ідеалу, причина полягає в тому, що у загартованих сталей великий об'єм зайнятий не феромагнітною фазою - аустенітом, тому їх намагніченість, а отже, і залишкова індукція, невеликі.

Іншим недоліком сталей мартенситного класу є їх низька прогартованість - здатність сприймати гартування на значну глибину, що перешкоджає мартенситному перетворенню в глибинних шарах матеріалу. Для підвищення прогартованості сталі додатково легують хромом, вольфрамом, молібденом і кобальтом. Оскільки атоми легуючих елементів взаємодіють з вакансіями, то швидкість дифузії знижується і прогартованість сталей зростає. Особливо ефективно легування сталей кобальтом, оскільки у атомів кобальту є магнітний момент і за наявності кобальту залишкова індукція зростає.

Прикладом вуглецевих сталей, гартованих на мартенсит є сталі марок EX, EX3, E7B6, EX5K5, EX9K15M.

Ливарні магнітно-тверді сплави.

До таких сплавів відносяться сплави системи Fe – Ni – Al (альні-сплави). При високих температурах алюміній і нікель розчиняються в аустеніті, але при різкому охолодженні утворюється пересичений розчин легуючих елементів в залізі. При подальшій відпущенню відбувається виділення дисперсних частинок інтерметаліда Fe₂NiAl. В результаті формується структура, що складається з феромагнітної матриці і дисперсних частинок, що перешкоджають руху меж доменів. Найбільшою магнітною енергією володіють сплави, що містять приблизно 28% Ni і 14% Al. Для покращення структури і магнітних характеристик сплави додатково легують міддю, кремнієм і кобальтом. Особливо ефективно легування кобальтом, оскільки іони кобальту володіють магнітним моментом, і добавка кобальту не тільки уповільнює дифузю, але і підвищує залишкову індукцію сплаву.

Сплави системи Fe – Ni – Al – Cu – Co отримали назву *альніко*. Для підвищення магнітних властивостей загартований сплав піддають термомагнітній обробці, тобто проводять нагрів для старіння в сильному магнітному полі. При цьому дисперсні частинки інтерметалідів виділяються по межах до-

менів і закріплюють вже зорієнтовані домени. Сплави, що пройшли термомагнітну обробку отримали назву *магніко*.

Вироби із сплавів системи Fe-Ni-Al-Cu-Co можна отримувати литтям або методами порошкової металургії. При литті важко отримувати вироби із строго витриманими розмірами. Крім того, після лиття необхідний тривалий відпал, гомогенізація для вирівнювання неоднорідності хімічного складу. У виробів отриманих методами порошкової металургії коерцитивна сила практично така ж що і у литих, але залишкова індукція на 35- 50% нижча.

Недоліками сплавів типу альні, альніко, магніко є складність в обробці, висока твердість, крихкість.

Приклади марок ливарних магнітно-твердих сплавів: ЮНД4 (альні), ЮНД12, ЮНДК15(альніко), ЮНДК35Т5, ЮНДК24Б(магніко), ЮНДК25БА

Пластично-деформовані сплави, магнітні стрічки.

Як правило, магнітно-тверді матеріали непластичні, оскільки дисперсні частинки виділень, що перешкоджають зсуву меж доменів, утрудняють рух дислокацій. Проте у ряді випадків необхідно мати магнітно-твердий матеріал у вигляді стрічок, листів, дроту для виготовлення штампуванням елементів вимірювальних систем, стрілок компасів і бусолей, стрічок магнітного запису і так далі. Такі матеріали повинні володіти помітною пластичністю.

До магнітно-твердих матеріалів, що деформуються, відносяться сплави систем Fe – Cu – Ni. Це сплави *куніфе* (60%Cu, 20%Ni, 20%Fe), *куніко* (35%Cu, 41%Co, 24%Fe), *вікаллоу* (52%Co, (10-13)%V, 25%Fe).

У сплавів на мідній основі велика коерцитивна сила виникає після значного обтискання (на 90-95%) і подальшої відпущення при 600°C. Високі магнітні властивості цих матеріалів обумовлені виділенням однодомених частинок феромагнітної фази в процесі відпущення пересиченого твердого розчину. Важливо відзначити, що в ході попередньої деформації в матеріалі виникає гостра текстура, тому частинки, що виділяються, є орієнтованими.

Особливістю сплаву куніко є можливість отримання ізотропних магнітів з високою коерцитивною силою без великого обтискання. Тому з цього сплаву виготовляють магніти складної форми, наприклад багатополюсні зірочки.

Сплави системи Co-V-Fe характеризуються високою індукцією (до 1,8 Тл). Їх використовують для виготовлення невеликих магнітів, стрілок компасів і бусолей, магнітного дроту.

Магнітно-тверді ферити.

З магнітно-твердих феритів найбільш відомий барієвий ферит $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ФБ, фероксдюр). На відміну від магнітно-м'яких феритів він має не кубічні, а гексагональні грати з одноосною анізотропією. Висока коерцитивна сила обумовлена малим розміром зерен і сильною кристалографічною анізотропією. Крім барієвого фериту використовуються хромбарієвий ферит (ХБ) і кобальтовий ферит

Технологія отримання магнітно-твердих феритів у загальних рисах схожа на технологію отримання магнітно-м'яких феритів. Проте для отримання дрібнокристалічної структури, здійснюють дуже тонкий помел (як правило, у

водному середовищі), а спікання проводять при невисоких температурах для уникнення зростання зерен.

Для додання анізотропії магнітних властивостей матеріал текстурують. Для створення текстури сметаноподібну масу поміщають в сильне магнітне поле, яке відключають тільки після формування виробу і його повного висихання. Барієві анізотропні ферити маркіруються БА, хромобарієві - ХБА, кобальтові КА. Ізотропні, не текстуровані магніти маркіруються Бі, ХБі і Кі відповідно.

Феритні матеріали значно дешевше металевих. Разом з тим у них істотно нижче питома вага. Висока коерцитивна сила дозволяє виготовляти магніти з малим відношенням довжини до поперечного перетину.

До недоліків магнітно-твердих феритів слід віднести низьку механічну міцність, крихкість, високу чутливість до зміни температури. Крім того при охолодженні до -60°C і повторному нагріві вони втрачають феромагнітні властивості.

Порошкові магніти.

Складність отримання високоточних дрібних магнітів складної форми обумовила застосування методів порошкової металургії для отримання постійних магнітів. Розрізняють два методи їх отримання: металокерамічний і металопластичний. В першому випадку процес отримання зводиться до пресування порошку, що являє собою подрібнені тонко дисперсні магнітно-тверді сплави (альні, магніко), з подальшим спіканням при високих температурах, аналогічно процесам випалювання кераміки. Виготовлення другим способом аналогічно пресуванню виробів з пластмас. Зв'язувач і наповнювач з дисперсного магнітно-твердого матеріалу пресуються при дуже високому питомому тиску.

Використання таких технологій доцільно у масовому автоматизованому виробництві. Однак магнітні характеристики таких магнітів у порівнянні з іншими не високі.

Останнім часом знаходить поширення технологія отримання спечених магнітів на основі сплавів кобальту і рідко земляних металів (наприклад: кобальт – самарій – празеодим). Вони мають високу коерцитивну силу, запасену магнітну індукцію.

РОЗДІЛ 3.

ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

ЛЕКЦІЯ 12

Тема 10. Класифікація і основні властивості провідникових матеріалів.

- 10.1. Класифікація провідникових матеріалів.
- 10.2. Електропровідність та електроопір провідників.
- 10.3. Теплові властивості провідників.
- 10.4. Механічні властивості провідникових матеріалів.

10.1. Класифікація провідникових матеріалів.

Як провідники електричного струму можуть бути використані як тверді тіла, так і рідини, а за відповідних умов і газу. Найважливішими практично вживаними в електротехніці твердими провідниковими матеріалами є метали і їх сплави.

До металевих провідникових матеріалів можуть бути виділені:

- метали високої провідності;
- надпровідники і криопровідники;
- сплави високого опору;
- контактні матеріали;
- припої;
- провідники особливої нагрівостійкості.

Метали високої провідності використовуються для проводів, струмопровідних жил кабелів, обмоток електричних машин і трансформаторів і тому подібне

Метали і сплави високого опору застосовуються для виготовлення резисторів, електронагрівальних приладів, ниток ламп розжарювання і т. п.

Особливий інтерес представляють ті, що володіють надзвичайно малим питомим опором при низьких (криогенних) температурах, ці матеріали називають надпровідники і гіперпровідники.

Агрегатний стан провідникових матеріалів може бути різним.

Всі газу і пари, у тому числі і пари металів, при низькій напруженості електричного поля не є провідниками. Проте, якщо напруженість поля перевершить деяке критичне значення, що забезпечує початок ударної і фотоіонізації, то газ може стати провідником з електронною і іонною провідністю. Сильно іонізований газ при рівності числа електронів числу позитивних іонів в одиниці об'єму є особливим провідним середовищем, що носить назву *плазми*.

До рідких провідників відносяться розплавлені метали і різні електроліти. Для більшості металів температура плавлення висока; тільки ртуть, що має температуру плавлення біля мінус 39 °С, може бути використана як рідкий металевий провідник при нормальній температурі. Інші метали, є рідкими провідниками при підвищених температурах.

Проте більшість провідників є твердими матеріалами, зазвичай металами.

Механізм проходження струму в металах, як в твердому, так і в рідкому стані обумовлений рухом (дрейфом) вільних електронів під впливом електричного поля, тому метали називають *провідниками з електронною електропровідністю* або *провідниками першого роду*.

Провідниками другого роду, або електролітами, є розчини кислот, лугів і солей. Проходження струму через ці речовини пов'язане з перенесенням разом з електричними зарядами іонів відповідно до законів Фарадея, унаслідок чого склад електроліту поступово змінюється, а на електродах виділяються продукти електролізу. Іонні кристали в розплавленому стані також є провідниками другого роду. *Прикладом* можуть служити соляні гартівні ванни з електронагрівом.

Класична електронна теорія металів представляє твердий провідник у вигляді системи, що складається з вузлів кристалічної іонної решітки, усередині якої знаходиться електронний газ з колективізованих (вільних) електронів. У вільний стан від кожного атома металу переходить від одного до двох електронів. Розглядаючи хаотичний (тепловий) і направлений під дією сили електричного поля рух електронів, при зіткненнях електронів з вузлами кристалічної решітки енергія, накопичена при прискоренні електронів в електричному полі, передається металевій основі провідника, унаслідок чого він нагрівається. Таким чином, електронна теорія металів дала можливість аналітично описати і пояснити знайдені раніше експериментальним шляхом основні закони електропровідності і втрат електричної енергії в металах. Виявилось можливим також пояснити і зв'язок між електропровідністю і теплопровідністю металів.

Для провідників можна виділити ряд основних законів, а саме:

1. При тривалому пропусканні електричного струму через ланцюг, що складається з одних металевих провідників, не спостерігається проникнення атомів одного металу в інший.

2. При нагріві металів до високих температур швидкість теплового руху вільних електронів збільшується, і найбільш швидкі з них можуть вилітати з металу, долаючи сили поверхневого потенційного бар'єру.

3. У момент несподіваної зупинки провідника, що швидко рухався, відбувається зсув електронного газу за законом інерції у напрямі руху. Зсув електронів приводить до появи різниці потенціалів на кінцях загальмованого провідника.

4. Унаслідок викривлення траєкторії електронів в металевій пластинці, поміщеній в поперечне магнітне поле, з'являється поперечна е. р. с. і змінюється електричний опір провідника.

Представляючи метал як систему, в якій позитивні іони скріпляються за допомогою вільно рухомих електронів, легко зрозуміти природу всіх основних властивостей металів: пластичності, ковкості, гарної теплопровідності і високої електропровідності.

10.2. Електропровідність та електроопір провідників.

До найважливіших параметрів, що характеризують властивості провідникових матеріалів, відносяться:

- 1) питома електропровідність γ , або зворотна до нею величина питомий електроопір ρ ;
- 2) температурний коефіцієнт питомого опору TK_ρ або α_ρ ;
- 3) теплопровідність γ_r ;
- 4) контактна різниця потенціалів і термоелектрорушійна сила (термо-е.р.с);
- 5) робота виходу електронів з металу;
- 6) межа міцності при розтягуванні і відносне подовження.

Питома електропровідність і питомий електроопір провідників.

Електропровідність γ провідникових матеріалів описується виразом:

$$\gamma = n \cdot q \cdot \mu \quad (10.1)$$

де n – концентрація носіїв заряду,

q – величина заряду,

μ – рухливість носіїв заряду.

Зв'язок щільності струму I , $[\text{A}/\text{m}^2]$, і напруженості електричного поля E , $[\text{V}/\text{m}]$, в провіднику дається відомою формулою (диференціальна форма закону Ома):

$$I = \gamma \cdot E \quad (10.2)$$

де γ – параметр провідникового матеріалу, званий його *питомою електропровідністю*, $[\text{Cm}/\text{m}]$.

Відповідно до закону Ома γ не залежить від напруженості електричного поля E при зміні останньої у широких межах.

Величина, зворотна питомій провідності називається *питомим опором*:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{E}{I} \quad (10.3)$$

Для провідника, що має опір R довжиною l з постійним поперечним перетином S електроопір обчислюється за формулою

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad (10.4)$$

Всі чисті метали з найбільш правильною кристалічною решіткою характеризуються найменшими значеннями питомого опору; домішки, спотворюючи ґратки, приводять до збільшення ρ . Значення основних характеристик деяких металів приведені в таблиці 10.1.

Розглянемо фактори, що впливають на електроопір провідників.

Температурний коефіцієнт питомого опору металів.

Число носіїв заряду (концентрація вільних електронів) в металевому провіднику при підвищенні температури залишається практично незмінним. Проте унаслідок посилень коливань вузлів кристалічної решітки із зростанням температури з'являється все більше і більше перешкод на шляху направлено руху вільних електронів під дією електричного поля, тобто зменшується середня довжина вільного пробігу електронів, зменшується рухливість електронів і, як наслідок, зменшується питома провідність металів і зростає питомий опір. Іншими словами, температурний коефіцієнт питомого опору металів (K^{-1})

Таблиця 10.1. –

Властивості провідникових металів

| Метал | Температура плавлення °С | Температура кипіння °С | Щільність Мг/м ³ | Питома теплоємність Дж/кг·К | Тепло провідність Вт/м·К | ТКЛР 10 ⁶ К ⁻¹ | Питомий електроопір мкОм·м | Робота виходу електронів, еВ |
|-------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Ртуть Hg | -38,9 | 357 | 13,6 | 138 | 10 | 61 | 0,958 | 4,5 |
| Цезій Cs | 28,5 | 700 | 1,87 | 234 | - | 95 | 0,21 | 1,9 |
| Галій Ga | 29,7 | 2070 | 5,91 | 381 | - | 18 | 0,56 | - |
| Калій K | 63,7 | 775 | 0,87 | 753 | 92 | 80 | 0,069 | 2,2 |
| Натрій Na | 97,8 | 883 | 0,97 | 1260 | 125 | 70 | 0,046 | 2,3 |
| Індій In | 156 | 2075 | 7,28 | 243 | 25 | 25 | 0,09 | - |
| Літій Li | 186 | 1220 | 0,53 | 3620 | 71 | - | - | - |
| Олово Sn | 232 | 2260 | 7,31 | 226 | 65 | 23 | 0,12 | 4,4 |
| Кадмій Cd | 321 | 767 | 8,65 | 230 | 93 | 30 | 0,076 | 4,0 |
| Свинець Pb | 327 | 1620 | 11,4 | 130 | 35 | 29 | 0,21 | - |
| Цинк Zn | 420 | 907 | 7,14 | 390 | 111 | 31 | 0,059 | - |
| Магній Mg | 651 | 1103 | 1,74 | 1040 | 167 | 26 | 0,045 | 3,6 |
| Алюміній Al | 657 | 1800 | 2,7 | 922 | 209 | 24 | 0,028 | 4,3 |
| Барій Ba | 710 | 1637 | 3,5 | 268 | - | 17 | 0,5 | - |
| Срібло Ag | 961 | 1950 | 10,5 | 234 | 415 | 19 | 0,016 | 4,4 |
| Золото Au | 1063 | 2600 | 19,3 | 126 | 293 | 14 | 0,024 | 4,8 |
| Мідь Cu | 1083 | 2300 | 8,94 | 385 | 390 | 16 | 0,017 | 4,3 |
| Берилій Be | 1284 | 2500 | 1,85 | 200 | 167 | 13 | 0,04 | 3,9 |

Продовження таблиці 10.1.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 118 | 9 |
|-------------|------|------|------|-----|-----|------|-------|-----|
| Нікель Ni | 1455 | 2900 | 8,9 | 444 | 95 | 13 | 0,073 | 5,0 |
| Кобальт Co | 1492 | 2900 | 8,71 | 435 | 79 | 12 | 0,062 | - |
| Залізо Fe | 1535 | 3000 | 7,87 | 452 | 73 | 11 | 0,098 | 4,5 |
| Палладій Pd | 1554 | 2200 | 12,1 | 243 | 72 | 12 | 0,11 | - |
| Титан Ti | 1725 | 2800 | 4,5 | 577 | 15 | 8,1 | 0,48 | - |
| Хром Cr | 1850 | 2430 | 7,1 | - | - | 6,5 | 0,21 | - |
| Платина Pt | 1770 | 4240 | 21,4 | 134 | 71 | 0,0 | 0,105 | - |
| Торій Th | 1850 | 3500 | 11,5 | 113 | - | 11,2 | 0,186 | 3,3 |
| Цирконій Zr | 1860 | 4900 | 6,5 | 276 | 17 | 5,4 | 0,41 | 3,7 |
| Іридій Ir | 2350 | 4830 | 22,5 | - | - | - | - | - |
| Ніобій Nb | 2410 | 3300 | 8,57 | 272 | 50 | 7,2 | 0,14 | 4,0 |
| Молібден Mo | 2620 | 3700 | 10,2 | 264 | 151 | 5,1 | 0,057 | 4,2 |
| Тантал Ta | 2850 | 4200 | 16,7 | 142 | 54 | 6,5 | 0,135 | 4,1 |
| Реній Re | 3180 | - | 20,5 | 138 | 71 | 4,7 | 0,21 | 4,8 |
| Ванадій V | 3240 | 4100 | 18,1 | 192 | 124 | 4,5 | 0,05 | 4,3 |
| Вольфрам W | 3380 | 5500 | 19,3 | 218 | 168 | 4,4 | 0,055 | 4,5 |

$$\text{TK}_\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} \quad (10.5.)$$

Підвищеними значеннями α_ρ володіють деякі метали, зокрема феромагнітні метали — залізо, нікель і кобальт).

Зміна питомого електроопору металів при плавленні.

При переході з твердого стану в рідкий у більшості металів спостерігається збільшення питомого опору ρ , проте деякі метали при плавленні зменшують ρ . Питомий опір збільшується при плавленні у тих металів, які при плавленні збільшують об'єм, тобто зменшується щільність; у металів з протилежним характером зміни об'єму при плавленні ρ зменшується.

Зміна питомого електроопору металів при деформаціях.

Зміна питомого опору при пружному розтягуванні або стисненні приблизно може оцінюватися формулою

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 \pm s \cdot \sigma) \quad (10.6.)$$

де ρ – питомий опір металу при механічній напрузі

ρ_0 – питомий опір металу, не схильного до механічної дії

s – коефіцієнт механічної напруги, що характеризує даний метал;

" \pm " – знак "+" відповідає розтягуванню, знак "–" відповідає стисненню.

Зміна ρ при пружних деформаціях пояснюється зміною амплітуди коливань вузлів кристалічної решітки металу. При розтягуванні ці амплітуди збільшуються, при стисненні зменшуються. Збільшення амплітуди коливань вузлів приводить до зменшення рухливості носіїв зарядів i , як наслідок, до зростання ρ . Зменшення амплітуди коливань, навпаки, приводить до зменшення ρ .

Пластична деформація, як правило, підвищує питомий опір металів унаслідок спотворення кристалічної решітки. При рекристалізації, шляхом термічної обробки (відпалу) питомий опір може бути знов понижене до первинного значення.

Питомий електроопір металевих сплавів.

Як вже указувалося, домішки і порушення правильної структури металів ведуть до збільшення їх питомого опору. Значне зростання ρ спостерігається при сплаві двох металів в тому випадку, якщо вони утворюють один з одним структуру твердий розчин, тобто створюють при твердінні сумісну кристалічну решітку, тобто атоми одного металу входять в кристалічну решітку іншого.

Залежності властивостей металевих сплавів від їх будови були встановлені Н.С. Курнаковим (рис.10.1).

У разі утворення будови твердого розчину властивості сплаву змінюються по криволінійному закону (1).

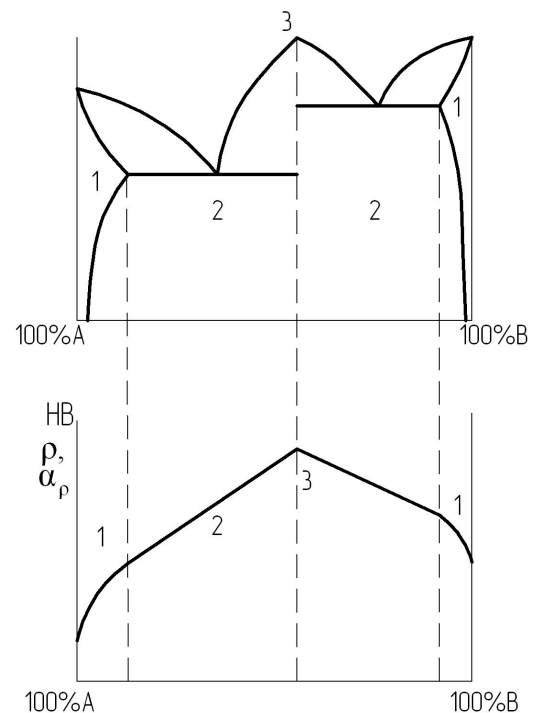


Рисунок 10.1. – Залежність Курнакова

Якщо ж сплав двох металів створює роздільну кристалізацію і структура застиглого сплаву є сумішшю кристалів кожного з компонентів, то питома провідність γ сплаву міняється із зміною складу приблизно лінійно (2).

У тих випадках, коли при певному співвідношенні між компонентами вони утворюють один з одним явно виражені хімічні сполуки (інтерметаліди), на кривих ρ , α_p у функції спостерігаються злами.

10.3. Теплові властивості провідників.

Теплопровідність металів.

За передачу тепла через метал в основному відповідають ті ж вільні електрони, які визначають і електропровідність металів і кількість яких в одиниці об'єму металу вельми велика. Тому, як правило, теплопровідність металів набагато більша, ніж теплопровідність діелектриків. Очевидно, що за інших рівних умов, чим більше питома електрична провідність металу, тим більше повинна бути його теплопровідність.

Термоелектрорушійна сила.

При зіткненні двох різних металевих провідників між ними виникає *контактна різниця потенціалів*. Причина появи цієї різниці потенціалів полягає у відмінності значень роботи виходу електронів з різних металів, а також в тому, що концентрація електронів, а отже, і тиск електронного газу у різних металів і сплавів можуть бути неоднаковими.

З електронної теорії металів виходить, що контактна різниця потенціалів між металами А і В дорівнює:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} \quad (10.7.)$$

де U_A , U_B – потенціали дотичних провідників;
 n_A , n_B – концентрація електронів в металах А і В;
 k , e – постійна Больцмана і заряд електрона.

При різниці температур на провідниках T_1 і T_2 формула (10.7.) може бути перетворена:

$$U = c \cdot (T_1 - T_2) \quad (10.8)$$

де c – постійний для даної пари провідників коефіцієнт термо-е.р.с.

Таким чином, термо-е.р.с. повинна бути пропорційна різниці температур.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення провідників (ТКЛР).

Цей коефіцієнт, обчислюється по тому ж виразу, що і для діелектриків, цікавий з погляду роботи різних пов'язаних матеріалів в тій або іншій конструкції. Він враховує можливість розтріскування або порушення вакуум-щільного з'єднання із стеклами, керамікою при зміні температури і т. п.).

$$\text{ТКЛР} = \alpha_l = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT} \quad (10.9)$$

При нормальній температурі легкоплавкі метали мають порівняно високе, а тугоплавкі – порівняно низьке значення α_l .

10.4. Механічні властивості провідникових матеріалів.

Механічні властивості провідників характеризують межею міцності при розтягуванні σ_p і відносним подовженням при розриві δ , а також крихкістю, в'язкістю (КСУ), твердістю (НВ, HRC) і іншими властивостями. Механічні властивості металевих провідників у великій мірі залежать від хімічного складу, від наявності легуючих домішок термічної і механічної обробки, і тому подібне Основні механічні характеристики металів вивчалися раніше, в курсі "Конструкційні матеріали".

ЛЕКЦІЯ 13.

Тема 11. Характеристика провідникових матеріалів.

11.1. Матеріали високої електропровідності.

11.2. Надпровідники та криопровідники.

11. 1. Матеріали високої електропровідності.

До матеріалів високої електропровідності пред'являються наступні вимоги:

- висока електропровідність
- висока механічна міцність
- технологічність - тобто здібність до зварки, паяння, висока пластичність.
- висока корозійна стійкість.
- низька вартість.

Очевидно, що високою електропровідністю володітимуть чисті неперехідні метали з ГЦК ґратами (Ag, Cu, Al, Au).

Високою механічною міцністю володітимуть метали з низькою енергією дефекту упаковки або сплави металів. Проте у разі утворення твердого розчину крім зростання міцності збільшується і питомий електроопір. Тому для матеріалів високої електропровідності використовують лише таке легування, коли компоненти не розчиняються один в одному.

Що стосується технологічності, то у всіх металів з ГЦК ґратками висока пластичність, отже, з них легко виходять вироби методами обробки тиском. Тому проблема технологічності зводиться в легкості паяння і зварки.

Розглянемо властивості найбільш часто вживаних матеріалів високої електропровідності.

Срібло

Найбільшу електропровідність зі всіх металів має срібло. При кімнатній температурі його питомий електричний опір складає 0,0150 мкОм·м. Срібло пластичне - відносне подовження при розтягуванні порядку 50%. Крім того, срібло має високу теплоємність і теплопровідність, а також характеризується і високою корозійною стійкістю. У срібла висока щільність - 10,49 Мг/м³, що

у поєднанні з щільно упакованими ГЦКГ свідчить про малий радіус іона. Тому срібло активно дифундує в кераміку, що дозволяє створювати міцні покриття кераміки сріблом (керамічні конденсатори).

До недоліків срібла як провідникового матеріалу відносяться його вартість, а також взаємодія срібла з сіркою з утворенням Ag_2S . Сульфід срібла відноситься до вироджених напівпровідників. З одного боку, утворення сульфиду срібла підвищує електричний опір поверхневих шарів, що не допустимо у високочастотній техніці. З іншого боку, в певних умовах кристали сульфиду срібла ростуть у вигляді тонких вусів і в ході зростання можуть замикати ділянки електричного ланцюга. Тому не рекомендується застосовувати срібло по сусідству з ебонітом, гумою і іншими матеріалами, що містять сірку.

Мідь.

Основні характеристики мідь, що забезпечує їй широке застосування як провідниковий матеріал, наступна:

- 1) малий питомий опір (зі всіх металів тільки срібло має декілька менший питомий опір, чим мідь);
- 2) достатньо висока механічна міцність;
- 3) задовільна в більшості випадків застосування стійкість по відношенню до корозії (мідь окислюється на повітрі навіть в умовах високої вологості значно повільніше, ніж, наприклад, залізо);
- 4) хороша оброблюваність (мідь прокатується в листи, стрічки і протягується в дріт, товщина якого може бути доведена до тисячних доль міліметра);
- 5) відносна легкість паяння і зварки.

Марки міді. Як провідниковий матеріал використовується мідь мазкий М00, М0 і М1. Мідь марки М00 містить 99,990% Cu , марки М1 містить 99,90% Cu , домішок кисню повинно бути не більше 0,08%, бо присутність в міді кисню погіршує її механічні властивості. У електровакуумній техніці застосовують безкисневу мідь.

Сплави міді. В окремих випадках крім чистої міді використовують її сплави з оловом, кремнієм, берилієм, кадмієм, фосфором та іншими елементами. Ці сплави мають назву бронза. При заданому хімічному складі бронзи мають значно більш високі механічні характеристики, чим чиста мідь. Бронзи використовують для струмопровідних пружин, контактних дротів, колекторних пластин тощо. Латуні – сплави міді з цинком, застосовуються в тій же якості як і бронзи.

Алюміній

Алюміній є другим за значенням (після міді) провідниковим металом. Питомий опір алюмінію в 1,6 разів вище за питомий опір міді, але алюміній в 3,5 разу легше за мідь. Завдяки цьому при однаковому опорі і однаковій довжині алюмінієві дроти в два рази легше мідних, не дивлячись на більший поперечний перетин. До того ж алюміній дешевший за мідь. Вказані обставини привели до широкого застосування алюмінію в електротехніці.

Недоліком алюмінію є низька механічна міцність. Для підвищення міцності алюміній легують елементами, що погано розчиняються в основному металі, та створюють інтерметалідні з'єднання. Так, при легуванні алюмінію магнієм і кремнієм в алюмінієвій матриці утворюються частинки силіциду магнію, що утрудняють рух дислокацій. При такому легуванні грати алюмінію залишаються неспотвореними і електропровідність алюмінію практично не змінюється.

Характерною особливістю алюмінію є наявність на його поверхні хімічно стабільної плівки Al_2O_3 . Окисна плівка ускладнює паяння алюмінію.

Для електротехнічних цілей використовують марки особливо чистого і технічно чистого алюмінію А999, А99, А90, А1. Домішки знижують питому електропровідність алюмінію.

Завдяки високій пластичності алюміній легко прокатується у фольгу і застосовується в паперових і плівкових конденсаторах.

Сплави алюмінію. Різновидів сплавів алюмінію багато, але в електротехніці їх застосовують обмежено, тільки як конструкційний сплав. Виключення становить сплав альдрей (0,3 – 0,5% Cu, 0,4 – 0,7% Si, 0,2 – 0,3% Fe, Al - основа), який близький за електричними властивостями до міді наблизений до неї і по механічній міцності.

Залізо.

Технічно чисте залізо має відносно низьку питому електропровідність. Механічна міцність, хімічна стійкість заліза не високі. Його основна перевага висока магнітність. Тому в електротехніці використовують залізо як основу електротехнічних сталей, та як феромагнетик.

Сталі в якості провідникових конструкційних матеріалів застосовуються для електрошин, електрорейок залізниць, метро.

З метою економії досить дорогих кольорових металів в електротехніці використовують біметал. Це сталь, що покрита зверху шаром міді, причому обидва метали з'єднані між собою міцно і безперервно по всій поверхні дотику. Біметал між механічні і електричні характеристики проміжні між властивостями мідного і сталевого провідника. Біметал використовують для ліній зв'язку, шин розподільчих пристроїв, струмопровідних частин електричних апаратів тощо.

Натрій. Є перспективним провідниковим металом. Не зважаючи на те, що електроопір Na в 2,8 рази більший за мідь, його дуже мала щільність забезпечує його легкість серед усіх провідників. Однак натрій надзвичайно хімічно активний, тому натрієві провідники повинні бути ізольовані герметизуючою оболонкою, яка б додавала це й міцності. З натрію виготовляють дроти, кабелі.

11. 2. Надпровідники та криопровідники.

Надпровідники.

Як вже наголошувалося, при пониженні температури питомий опір металів зменшується. Особливий інтерес представляє питання про електропровідність

металів при низьких (кріогенних) температурах, що наближаються до абсолютного нуля.

У 1911р. голландський учений Х. Каммерлінг-Оннес виявив, що при охолодженні до температури 4,2К електроопір кільця із замороженої ртуті раптово, різким стрибком падає до надзвичайно малого значення, яке практично не може бути вимірним. Явище зникнення електричного опору, тобто поява практично нескінченної питомої електропровідності матеріалу, було назване *надпровідністю*, а температура, при охолодженні до якої здійснюється перехід речовини в надпровідний стан — температурою *надпровідного переходу* T_c . Перехід в надпровідний стан є оборотним: при підвищенні температури до значення T_c надпровідність руйнується і матеріал переходить в нормальний (не надпровідний) стан, набуваючи кінцевого значення питомої провідності γ . Надалі, крім ртуті, було виявлено багато інших матеріалів, притому не тільки чисті метали, але і різні сплави і хімічні сполуки, здатні при охолодженні до достатньо низької температури переходити в надпровідний стан. Такі матеріали отримали загальну назву *надпровідників*. В даний час відомо більше 27 простих надпровідників (чистих металів), і більше тисячі складних надпровідників (сплавів і з'єднань).

В той же час деякі речовини, зокрема срібло і мідь, при найбільш низьких, досягнутих в даний час температурах не вдається перевести в надпровідний стан.

Слід відзначити, що надпровідниками можуть бути не тільки з'єднання і сплави металів, що володіють надпровідністю, але і з'єднання таких елементів з ненадпровідними і навіть з'єднання, до складу молекул яких входять виключно атоми елементів, що не є надпровідниками.

Явище надпровідності пов'язане з тим, що електричний струм, одного разу націлений в надпровідному контурі, тривало (роками) циркулюватиме по цьому контуру без помітного зменшення своєї сили, і притому без жодного підведення енергії ззовні (звичайно, якщо не враховувати неминучої витрати енергії на роботу охолоджувального пристрою, який повинен підтримувати температуру надпровідного контуру нижче за значення T_c , характерну для даного надпровідного матеріалу). Такий надпровідний контур створює в навколишньому просторі магнітне поле, подібно до постійного магніту. Тому обтічний електричним струмом надпровідний соленоїд повинен бути надпровідниковим електромагнітом, що не вимагає живлення від джерела струму.

У 1933 р. німецькі фізики В. Майснер і Р. Оксенфельд зробили друге фундаментальне відкриття в області надпровідності. Вони виявили, що надпровідники при переході в надпровідний стан стають ідеальними діамагнетиками, тобто їх магнітна проникність стрибком падає з $\mu \approx 1$ до $\mu \approx 0$.

У 50-х роках нашого сторіччя були відкриті тверді надпровідники, що є сплавами або хімічними сполуками. Деякі з твердих надпровідників володіють не тільки порівняно високою критичною температурою переходу T_{c0} , але і досить високою критичною магнітною індукцією B_{c0} , що дало можливість застосовувати ці матеріали для виробництва надпровідних електромагнітів, які створюють сильні магнітні поля, а також і для інших практичних цілей.

Тверді надпровідники володіють поряд особливостей:

- при охолодженні перехід в надпровідний стан відбувається не так різко, як у м'яких надпровідників, а впродовж деякого температурного інтервалу;
- у цих надпровідників можуть також спостерігатися проміжні стани між надпровідним і нормальним при змінах магнітної індукції;
- надпровідникові властивості їх у значному ступені залежать від технологічного режиму виготовлення.

Відкриття явища надпровідності і дало широкі можливості його практичного використання. Крім надпровідних електромагнітів, які застосовуються для найрізноманітніших цілей, можна відзначити можливості використання надпровідників для створення електричних машин, трансформаторів і тому подібних пристроїв, малої маси і габаритів, але з високим к.к.д.; ліній електропередачі великих потужностей на дальні відстані; хвилеводів з особливо малим загасанням; накопичувачів енергії і ін. Ряд пристроїв пам'яті і управління ґрунтується на переході надпровідника в надпровідний або нормальний стан при зміні, магнітної індукції (сили струму) або температури.

Часто надпровідникові дроти покриваються стабілізуючою оболонкою з міді або іншого добре провідного електричний струм і тепло металу; це дає можливість уникнути пошкодження основного матеріалу надпровідника при випадковому підвищенні температури і руйнуванні надпровідності в окремих ділянках дроту. Крім того, у ряді випадків з успіхом застосовують композитні надпровідникові дроти, в яких велике число порівняльне тонких, ниткоподібних твердих надпровідників поміщено в масивну матрицю з міді або іншого ненадпровідного матеріалу.

Надпровідники мають низькі температури переходу T_c , тому пристрої, що використовують надпровідність, повинні працювати в умовах охолодження рідким гелієм, що складно і дорого в зв'язку як з високою вартістю і дефіцитністю гелію, так і з трудністю отримання таких низьких (гелієвих) температур взагалі. Сучасна техніка вимагає мати надпровідники з температурою переходу вище температури зріджування водню (20,4К) або, тим більше, вище за температуру зріджування азоту (77,4К), а також матеріали, що зберігають стан надпровідності при нормальній або ще вищих температурах.

Криопровідники.

Крім явища надпровідності, в сучасній електротехніці все ширше використовується явище *криопровідності*, тобто досягнення деякими металами малої питомої провідності при криогенних температурах (але вищих, ніж температура надпровідного переходу, якщо даний метал взагалі належить до надпровідників. Матеріали, що володіють особливо сприятливими властивостями для застосування як провідники в умовах криогенних температур називаються *криопровідниками* або *гіперпровідниками*.

Дуже мале, але все таки кінцеве значення питомого опору криопровідника при його робочій температурі обмежує допустиму щільність струму в ньому, хоча ця щільність може бути набагато вища, ніж в звичайних провідниках при нормальній або підвищеній температурі. Природно, що гіперпровідники, у яких

при зміні температури в широких межах питомий опір ρ змінюється плавно, без стрибків, не можуть використовуватися у ряді пристроїв, дія яких заснована на тригерному ефекті появи і руйнування надпровідності. Проте застосування криопровідників в електричних машинах, апаратах, кабелях має і свої переваги. Тоді як в надпровідних пристроях як охолоджувальний агент, застосовується рідкий гелій, робоча температура криопровідників досягається застосуванням більш висококиплячих і дешевих хладагентів: рідкого водню або навіть рідкого азоту, що значно спрощує і здешевлює виконання і експлуатацію пристроїв.

Найбільший інтерес для використання як криопровідника, крім звичайних провідникових матеріалів — алюмінію і міді, представляє *берилій*. Алюміній і мідь можуть працювати як криопровідники при охолодженні рідким воднем. Берилій є значно дорожчий, складніший в технологічному відношенні, але берилій при охолодженні рідким азотом має найменше в порівнянні з алюмінієм і міддю значення ρ .

У всіх випадках для отримання криопровідних матеріалів потрібна висока чистота металу і відсутність структурних ушкоджень. Криопровідники можуть з успіхом використовуватися для обмоток електричних машин і трансформаторів, для струмопровідних жил кабелів і тому подібному.

ЛЕКЦІЯ 14

Тема 11. Характеристика провідникових матеріалів.

11.3. Матеріали високого питомого електроопору.

11.4. Матеріали для електричних контактів.

11.3. Матеріали високого питомого електроопору.

Матеріали високого електричного опору використовуються для поглинання електричної енергії і перетворення її в тепло. Очевидно, що до таких матеріалів пред'являтимуться наступні вимоги:

- високий питомий опір;
- низьке значення термо- е.р.с. у парі з міддю;
- малий температурний коефіцієнт опору;
- висока механічна міцність;
- технологічність - тобто схильність до зварювання, паяння, висока пластичність;
- висока корозійна стійкість;
- низька вартість.

Очевидно, що для того, щоб матеріал мав високий питомий опір, він повинен бути твердим розчином одного металу в іншому. Причому хоч би один з компонентів сплаву повинен бути перехідним металом. З теорії сплавів відомо, що необмежене розчинення одного металу в іншому можливо при бли-

зкості розмірів іонів і однаковому типі кристалічних решіток. Розглянемо деякі матеріали високого опору.

Сплави на основі міді.

Манганін.

Це найбільш типовий і широко вживаний сплав. МНМц 3-12 (80%Cu, 3%Ni, 12%Mn). Достатньо дешевий сплав, що відрізняється високим питомим опором ($\rho = 0,45$ мкОм·м), і низькою термо-е.р.с. в парі з міддю. Недоліком сплаву є низька корозійна стійкість і невисока гранична робоча температура ($<200^\circ\text{C}$). Манганін може витягатися в дуже тонкий дріт (до 0,02мм) і часто випускається з емалевою ізоляцією.

Константан.

Твердий розчин нікелю в міді, точніше 40%Ni, 1,5%Mn, останнє мідь. Цей сплав маркірується як НММц 58,5-1,5. Найменування цього сплаву підкреслює незмінність його електроопору при зміні температури. Практично при зміні температури від -100°C до $+100^\circ\text{C}$ його питомий опір залишається постійним, тобто температурний коефіцієнт опору $\alpha_\rho = 0$. У даного сплаву досить-таки високий питомий опір (0,5 мкОм·м), він пластичний і легко деформується. При нагріві на його поверхні утворюється окисна плівка, що має ізоляційні властивості. Оксидна ізоляція дозволяє щільно навивати константановий дріт якщо напруга між витками не перевищує 1В. Використання константану для виготовлення прецизійних резисторів обмежено високим значенням термо- е.р.с. у парі з міддю (40 мкВ/°C). Остання обставина дозволяє використовувати сплав в термопарах для вимірювання температур до 500°C .

Нікелін.

Із-за меншого змісту нікелю сплав дешевший, проте його питомий опір менше ніж у константану ($\rho=0,35$ мкО·мм). Крім того, температурний коефіцієнт питомого електроопору сплаву відмінний від нуля. МНМц 30-1,5 (68,5% Cu; 30%Ni; 1,5% Mn). Головним чином цей сплав використовують для виготовлення пускових і регулювальних реостатів.

Нейзільбер.

МНЦ 15-20 (65%Cu, 15%Ni, 20%Zn). Заміна нікелю дешевшим цинком приводить до істотного зменшення вартості сплаву. Разом з тим сплав володіє достатньо високим питомим опором ($\rho=0,3$ мкОм·м). Такий високий питомий опір викликаний тим, що у розмір іона цинку менше розміру іона міді, а розмір іона нікелю більше розміру іона міді. Тому сумарні спотворення кристалічної решітки великі, що утрудняє просування електронної хвилі. Після наклепання нейзільбер володіє достатньою пружністю, що дозволяє використовувати його для виготовлення пружних елементів (пружин, мембран, сільфонів). Константан не рекомендується застосовувати при роботі в області температур $300 - 400^\circ\text{C}$. При цих температурах, активна дифузія цинку до границь зерен приводить до утворення уздовж границь інтерметалідної плівки, що веде до окрихчування сплаву.

Сплави на основі заліза

Ці сплави застосовуються для електронагрівальних елементів. Висока нагрівостійкість досягається введенням у склад сплаву елементів металів, які мають високе значення об'ємного коефіцієнту оксидації і тому на повітрі сплави можуть утворювати практично суцільну оксидну плівку.

Типовим представником цієї групи сплавів є сплав *фехраль* 0X27Ю5 (23%Cr, 5%Al, решта залізо). Сплав відрізняється високим питомим опором ($\rho=1,1\text{ мкОм}\cdot\text{м}$). Заміна нікелю на залізо приводить до істотного здешевлення сплаву, а наявність хрому і алюмінію забезпечують високу стійкість до окислення. Недоліками сплавів такого типу є низька пластичність, викликана утворенням інтерметалідних з'єднань. Таким чином, не дивлячись на дешевизну сплави мають обмежене застосування із-за низької технологічності (трудність паяння і мала пластичність). Крім того в тому ж значенні використовуються сплави хромаль, фероніхром, ніхром.

Нікель-хромові сплави (ніхром).

Класичним нікель-хромовим сплавом є сплав X20H80 (20%Cr, 80%Ni). При кімнатній температурі в нікелі розчиняється 20% хрому. При цьому хоча і зберігається ГЦК грати нікелю, але вона сильно спотворюється іонами хрому. Ця обставина у поєднанні з тим, що і нікель і хром є перехідними металами приводить до високого питомого опору сплаву ($\rho=1,1\text{ мкОм}\cdot\text{м}$). Поверхня ніхрому покрита хімічно стійкими оксидами, які утрудняють паяння ніхрому і захищають його від окислення при високих температурах. Стійкість ніхромових сплавів при високій температурі і повітряному середовищі пояснюється майже однаковими значеннями коефіцієнтів температурного розширення основного сплаву і оксидних плівок. Тому при зміні температур (короткочасних вимиканнях) може відбуватися розтріскування плівок і окислення сплаву. Це з часом веде до перегорання, тому ніхроми краще працюють при тривалому використанні.

Для підвищення механічної міцності в ніхром вводять титан, молібден, кремній.

Сплави на основі благородних металів.

У ряді випадків потрібна висока стійкість до окислення матеріалу. В цьому випадку використовують матеріали високого опору на основі благородних металів: срібла, платини, паладію.

Типовим представником таких матеріалів є срібний манганін (Ag 10%, Sn 10%, залишок нікель і мідь). Дріт такого сплаву є дуже пластичним і витягається до діаметру 0,2мкм, з нього виготовляють мініатюрні потенціометри і резистори.

11.4. Матеріали електричних контактів

У електричних машинах і апаратах можуть зустрічатися тільки дві несправності: пробій ізоляції (наявність небажаних контактів) і відсутність контакту в потрібному місці. В зв'язку з цим надійність електричних контактів є надзвичайно важливим завданням. Для того, щоб правильно вибрати матеріал для контактів, перш за все розглянемо види контактів і умови їх роботи.

Всі контакти можна розділити на нерухомі і рухомі. Нерухомі контакти використовуються для тривалого з'єднання і можуть бути затискними і суцільнометалевими. Рухомі контакти можуть бути розривними і такими, що ковзають.

Затискні контакти

У затискних контактах («клеми», болтові з'єднання і так далі) дійсна поверхня контакту помітна менше поверхні провідників, що накладаються один на одного. Це пов'язано з наявністю на поверхні деталей нерівностей і шару оксидів, що сполучаються. Тому чим м'якше матеріал контактів і чим вище його корозійна стійкість, тим менше опір контакту. В зв'язку з цим контакти зазвичай лудять – покривають шаром олова. Для особливо надійних контактів застосовують сріблення або золочення.

Важливо також мати на увазі, що при контакті різнорідних матеріалів (наприклад, міді і сталі) відбувається активна корозія хімічно активнішого елемента. Так при контакті сталі з міддю, відбуватиметься інтенсивна корозія сталі, і поява оксидів заліза приведе до зростання опору контакту. Тому в тих випадках, коли необхідний контакт сталевих деталей з мідною, обидві деталі лудять.

Суцільнометалеві контакти

Суцільнометалевими є зварні або паяні з'єднання. Основними матеріалами, що створюють суцільнометалеві контакти є *припої* і *зварювальні присадки*.

Припої повинні володіти наступними властивостями:

- низька температура плавлення (нижче, ніж у матеріалу паяних деталей);
- низький питомий електричний опір
- хороша змочуваність паяних деталей;
- достатньо висока механічна міцність
- висока корозійна стійкість
- низька вартість.

Прийнято припої ділити на м'які (з температурою плавлення нижче 300°C і межею міцності 16-100МПа) і тверді з температурою плавлення, що перевищує 300°C і межею міцності 100-500 МПа.

Як м'які припої зазвичай використовують сплави свинцю з оловом. Такі припої маркують буквами ПОС з цифрами що показують вміст олова в припої, *наприклад* ПОС-62.

Вибір як компонентів припою свинцю і олова обумовлений тим, що свинець і олово добре розчиняються один в одному в рідкому стані і погано розчиняються в твердому стані. Тому у рідкого розчину компонентів вище ентропія, чим у суміші майже чистих металів в кристалічному стані. Отже, у суміші компонентів температура плавлення буде нижча, ніж у чистих металів. При вмісті олова 61,5% сплав є евтектичним, тобто має мінімальну температуру плавлення (183°C). Олов'яно-свинцеві припої з марками від ПОС-10 до ПОС-90 мають вищу температуру плавлення. Їх застосування визначається

економічними міркуваннями (свинець дешевший за олово) і в тих випадках, коли потрібна висока корозійна стійкість (корозійна стійкість свинцю нижча за корозійну стійкість олова).

У тих випадках, коли температура плавлення припою ПОС-62 дуже велика застосовують більш складно леговані сплави: сплав Розі (50%Ві, 25% Рb, 25% Sn) з температурою плавлення 94°C, сплав Вуда (50% Ві, 25%Рb, 12,5% Sn, 12,5%Сd) з температурою плавлення 68°C. Збільшення кількості компонентів що розчиняються один в одному в рідкому стані і нерозчинних в твердому стані веде до зростання ентропії системи і зниження температури плавлення.

В деяких випадках (паяння тонких золотих і срібних проводів) як м'який припій використовують сплав 25% вісмуту, 42% олова, 33% талія. Вибір цього припою пояснюється тим, що в ньому золото і срібло не розчиняються, тому в ході експлуатації не відбувається стоншування провідника.

Як тверді припої використовують чисту мідь, сплави міді з цинком (ПМЦ), сплави міді з фосфором і сплави на основі срібла (ПСр). Цифри в марках мідно цинкових припоях показують зміст міді, а в марках срібних припоїв показують зміст срібла (*наприклад*: ПМЦ-36, ПМЦ-54 (Cu 36 – 54%, Zn залишок); ПСр-25 до ПСр-70 (26 – 40% Cu, 25 – 70% Ag, 4 – 35% Zn).

В ході паяння твердими припоями відбувається дифузія матеріалу припою в матеріал паяних виробів, тому тверді припої забезпечують високу міцність з'єднань.

Крім припоїв, при паянні використовують флюси – речовини, що видаляють оксиди з поверхні паяних виробів і захищають поверхню розплавленого припою від окислення.

При паянні виробів із сплавів міді м'якими припоями як флюс використовують каніфоль або її розчин в спирті або ацетоні. Каніфоль – це суміш органічних кислот, які добре розчиняють оксиди міді.

При паянні сталевих деталей м'якими припоями як флюс використовують водний розчин хлориду цинку («труєна соляна кислота») або нашатир – хлористий амоній.

При паянні твердими припоями як флюс використовують буру, борну кислоту, розплави хлоридів металів.

Після паяння рекомендується видаляти будь-які флюси, для того, щоб підвищити опір корозії паяного шва.

Матеріали розривних контактів.

Розривні контакти періодично замикаються і розмикаються. При цьому між контактними площинками утворюється електрична дуга. Виникнення дуги веде до зростання температури, а отже, до зниження механічної міцності, окислення матеріалу контактів, з'являється вірогідність їх зварювання, а також можлива ерозія матеріалу.

Для того, щоб матеріал розривних контактів надійно працював, він повинен задовольняти наступним вимогам:

- мати високу електропровідність;

- мати високу температуру плавлення;
- мати високу теплоту випаровування;
- володіти високою теплопровідністю.
- бути стійким до корозії;
- бути твердим;

Крім того, матеріал повинен бути дешевим і недефіцитним.

Задовольнити всім ці вимоги одночасно неможливо, тому у кожному конкретному випадку вибір матеріалу розривних контактів є достатньо складним завданням. Розглянемо приклади вибору матеріалів розривних контактів для деяких випадків.

Для мало відповідальних розривних контактів (побутові вимикачі) як матеріал зазвичай вибирають латунь – сплав міді з цинком. Наявність в сплаві цинку приводить до підвищення механічної міцності і зростання корозійної стійкості

Для відповідальних контактів тих, що працюють при малій напрузі і комутують малі струми (контакти малопотужних реле) використовують срібло.

У тих випадках, коли робоча напруга на контактах велика, на струми не великі використовують метали платинової групи (платину, паладій, іридій, осмій, рутеній і родій). При комутації великих струмів, коли нагрів контактів великий, використовують композиційні матеріали (пороша вольфраму або молібдену просочена рідкою міддю або сріблом). Для могутніх контактів також використовують металокерамічні композиції – срібло і окисел кадмію (СІК). При розробці останнього матеріалу врахований той факт, що при нагріві вище 900°З окисел кадмію дисоціює на пари кадмію і кисень. Тиск в дузі зростає, довжина пробігу іонів скорочується і дуга гасне. При зниженні температури пари кадмію взаємодіють з киснем, і окисел кадмію конденсується на контакті. Таким чином, час роботи контакту різко збільшується.

Матеріали ковзальних контактів.

В основному, до матеріалів контактів, що ковзають, пред'являються ті ж вимоги, що і до матеріалів розривних контактів. Проте особливо гостро ставиться питання про зменшення зносу при терті. Для зниження зносу тертя можна підвищити твердість матеріалу контактуючих пар і використовувати мастило. Природно, що мастило повинне бути електропровідним.

Для колекторів електричних моторів використовують холоднодеформовану мідь, а для щіток використовують графіт. Для важконавантажених машин для виготовлення щіток використовують метало-графітні щітки – мідно-графітові і бронзо-графітні.

РОЗДІЛ 4

НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

ЛЕКЦІЯ 15

Тема 12. Явище напівпровідності. Основні характеристики напівпровідників.

- 12.1. Загальні відомості про напівпровідники.
- 12.2. Електропровідність напівпровідників.
- 12.3. Вплив зовнішніх факторів на електропровідність напівпровідника.

12.1. Явище напівпровідності. Загальна характеристика.

Напівпровідниками прийнято називати речовини, електропровідність яких обумовлена переміщенням електронів, збуджених зовнішніми енергетичними діями (нагріванням, опромінюванням світлом, накладенням сильного електричного поля і так далі).

Керування електропровідність напівпровідників осередком температури, світла, електричного поля, механічного зусилля покладена в основу принципу дії термо-, фоторезисторів, нелінійних резисторів та інш.

При розгляді зонної теорії твердих тіл ми відзначали, що у напівпровідників зона провідності відокремлена від валентної зони зоною заборонених значень енергії. При поглинанні валентним електроном кванта енергії більшого і рівного ширині забороненої енергетичної зони, електрон переходить у вільну енергетичну зону і дістає можливості переміщатися – міняти свою енергію.

Після відходу електрона з валентної зони в ній залишається незайняте місце – дірка. Таким чином, при збудженні атома в нім з'являються два носії заряду протилежних знаків: *електрон* і *дірка*. Наявність у напівпровідників двох типів електропровідності – електронної (**n**) та електронно-діркової (**p**) дозволяє отримати напівпровідні вироби з **p – n** –переходом. Це різні типи випрямлювачів, підсилювачів, генераторів. Напівпровідні системи можна використовувати для перетворення різних видів енергії в електричну енергію (*наприклад* сонячні батареї, прилади сигнальних джерел світла, пристроїв виводу інформації електронних приладів). Напівпровідники можуть служити нагрівальними елементами, індикаторами радіоактивності, магнітного поля.

Напівпровідникові матеріали, що використовуються в практиці, можуть бути підрозділені на:

- прості напівпровідники (елементи)
- напівпровідникові хімічні сполуки
- напівпровідникові комплекси (наприклад, керамічні напівпровідники).

В даний час вивчаються також *скловидні* і *рідкі напівпровідники*. У сучасній техніці особливе значення придбали елементи кремній, германій і частково селен.

Напівпровідниковими хімічними сполуками є з'єднання елементів різних груп таблиці Менделєєва, відповідні загальним формулам $A^{IV}B^{IV}$ (наприклад, SiC), $A^{III}B^{V}$ (InSb, GaAs, GaP і т. д.), $A^{II}B^{VI}$ (CdS, ZnSe і ін.), деякі оксиди (наприклад, Cu_2O) і речовини складного складу.

До напівпровідникових комплексів можна віднести матеріали з напівпровідною або провідною фазою з карбиду кремнію, графіту, зчеплених керамічною або іншою зв'язкою. Найбільш поширеними з них є тирит, силіт.

Виготовлені з напівпровідникових матеріалів прилади мають поряд переваг, до них відносяться:

- довгий термін служби;
- малі габарити, і маса;
- простота і надійність конструкції, велика механічна міцність (не бояться трясіння і ударів);
- відсутність ланцюгів напруження при заміні напівпровідниковими приладами електронних ламп, споживання малої потужності і мала інерційність;
- економічність при масовому виробництві.

Подальший розвиток електроніки твердого тіла дозволив перейти від дискретних напівпровідникових приладів до створення і освоєння виробництвом вузлів електронної апаратури і схем пристроїв і приладів в цілому. Цей напрям техніки отримав назва *мікроелектроніки*. Науковим завданням, що вирішується за допомогою мікроелектроніки, є створення складних кібернетичних систем для використання в народному господарстві, для освоєння космосу, для досліджень в області біології і медицини. Технічне завдання мікроелектроніки зводиться до подальшого скорочення розмірів і маси електронної апаратури, збільшення щільності монтажу при одночасному підвищенні її довговічності і надійності. Здійснити це можливо тільки на основі різкого скорочення витрат потужності в електронних схемах на напівпровідникових елементах. Економічне завдання мікроелектроніки полягає в істотному скороченні потреби в матеріалах, трудомісткості і капітальних вкладень у виробництво електронної апаратури і приладів.

12.2. Електропровідність напівпровідників.

Для напівпровідникових матеріалів характерна на широка заборонена енергетична зона. Для більшості напівпровідників вона складає $W = 0,5 - 2,5$ еВ.

Для більшості напівпровідникових приладів використовуються домішкові напівпровідники, тобто напівпровідники, що містять невелику кількість домішок. Роль домішок можуть грати також дефекти кристалічної решітки – вакансії, дислокації, границі зерен, пори, тріщини.

Якщо валентність атома домішки і атомів основного матеріалу відрізняються, то атоми домішок будуть джерелами вільних електронів або дірок. Надлишок електронів на валентній оболонці атома домішки приведе до появи додаткових електронів, а недолік електронів на валентних електронних

оболонках атомів приведе до появи дірок. Атоми домішок, що поставляють у вільну зону вільні електрони, прийнято називати *донорами*, а атоми – що поставляють дірки – *акцепторами*. Вплив домішок на енергетичні зони напівпровідників показаний на рис. 12.1.

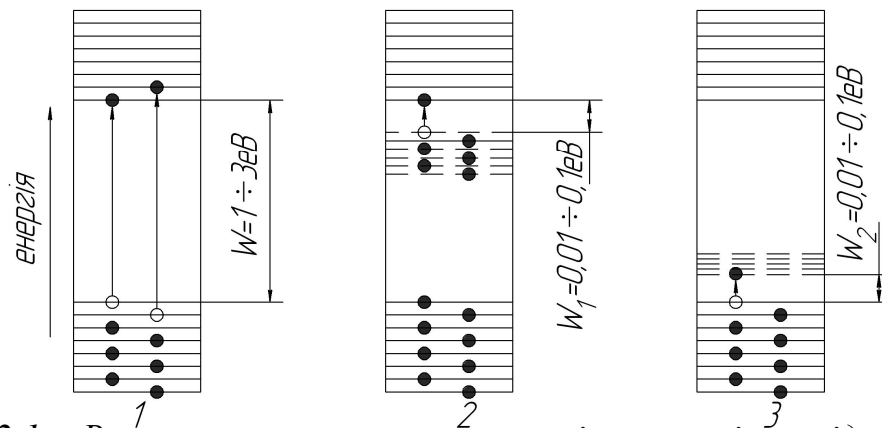


Рисунок 12.1. - Вплив легування на енергетичні зони напівпровідників:
 1 - власний напівпровідник, 2 - напівпровідник, що містить донорні домішки, 3 - напівпровідник, що містить акцепторні домішки.

Власні напівпровідники.

Для власного напівпровідника розподіл електронів по рівням енергії (рис. 12.1. – 1) відповідає деякій температурі T , при якій в зону провідності перейшло кілька електронів, залишивши у валентній зоні відповідну кількість дірок. Таким чином у власному напівпровіднику одночасно утворюються два протилежних заряди електрон " – " та дірка "+".

Позначимо концентрацію електронів n_{oi} , а концентрацію дірок p_{oi} . Індекс i (від слова *intrinsic* – власний, властивий) у концентрації електронів і дірок означає, що це власні носії заряду. Спільна кількість носіїв зарядів буде:

$$n_{oi} = p_{oi}, \quad n_{oi} + p_{oi} = 2n_{oi} \quad (12.1)$$

В результаті процесів збудження і рекомбінації при будь-якій температурі встановлюється рівноважна концентрація носіїв заряду:

– електронів

$$n_{oi} = 2N_0 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right) \quad (12.2)$$

– дірок

$$p_{oi} = 2N_0 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right) \quad (12.3)$$

де n_{oi} – концентрація електронів,

p_{oi} – концентрація дірок,

W – ширина забороненої зони.

Коефіцієнт 2 показує, що на кожному енергетичному рівні можуть бути два електрони.

Електропровідність напівпровідників буде дорівнювати:

$$\gamma = n_{oi} e \mu_n = p_{oi} e \mu_p \quad (12.4)$$

де: μ_n – рухливість електронів,

μ_p – рухливість дірок.

Очевидно, що для того, щоб електрон покинув валентну зону і перейшов у вільну зону потрібне підвищення його енергії. Чим вище температура напівпровідника, тим більше вірогідна флуктуація енергії і перескок електрона з валентної зони у вільну.

Рухливість електронів і рухливість дірок неоднакові. Хоча за своєю суттю, переміщення дірки є переміщенням електрона, але рух дірки - це переміщення валентного електрона від одного атома до іншого. Валентний електрон сильніше взаємодіє з ядрами атомів, чим вільний електрон, що відірвався від атома. Тому рухливість дірок при власній електропровідності напівпровідників нижча, ніж рухливість електронів, і власна провідність власних напівпровідником носить слабо виражений електронний характер.

Ті носії заряду, концентрація яких в даному напівпровідниковому матеріалі вища, називають основними, а ті, концентрація яких нижча, - неосновними. За наявності в напівпровіднику атомів домішок – донорів, основними носіями заряду будуть електрони, і такі матеріали називають напівпровідниками **n**-типа. Напівпровідниковий матеріал, легований атомами акцепторів, називають напівпровідником **p**-типа. При контакті напівпровідників **p**-типа і **n**-типа з'являються **p-n** переходи – основа всіх напівпровідникових приладів.

Домішкові напівпровідники

Для більшості напівпровідникових приладів використовуються домішкові напівпровідники. Тому в практиці важливе значення мають такі напівпровідникові матеріали, у яких відчутна концентрація власних носіїв заряду з'являється при можливо вищій температурі, тобто напівпровідники з достатньо широкою забороненою зоною. У робочому інтервалі температур постачальниками вільних носіїв заряду є домішки. Домішками в простих напівпровідниках служать чужорідні атоми. Під домішками в напівпровідникових хімічних сполуках розуміють не тільки включення атомів сторонніх елементів, але і надмірні по стехіометричному складу атоми тих самих елементів, які входять в хімічну формулу самого з'єднання. Крім того, роль домішок грають всілякі дефекти кристалічної решітки: порожні вузли, атоми або іони, що опинилися в міжвузлах решіток, дислокації або зрушення, що виникають при пластичній деформації кристала, мікротріщини. Якщо домішкові атоми знаходяться у вузлах кристалічної решітки, то вони називаються домішками заміщення, якщо в міжвузлах — домішками впровадження.

Донори і акцептори. Розглянемо роль тих домішок, атоми яких створюють дискретні енергетичні рівні в межах забороненої зони напівпровідника. При невеликій концентрації домішок їх атоми розташовані в решітках напівпровідника на таких великих відстанях один від одного, що вони не взаємодіють, а тому енергетичні рівні їх майже такі ж, як в окремому вільному атомі. Вірогідність безпосереднього переходу електронів з одного домішкового атома на іншій нікчемно мала. Проте домішки можуть або поставляти електрони в зону провідності напівпровідника, або приймати їх з рівнів його валентної зони.

Донори. Заповнені за відсутності зовнішніх енергетичних дій (тепло, світло) домішкові рівні розташовані в забороненій зоні біля «дна» зони провідності (рис. 12.1–2). При цьому енергія активації домішкових атомів менша, ніж ширина забороненої зони основного напівпровідника, а тому при нагріві тіла перекидання електронів домішки випереджатиме збудження, електронів ґраток. Позитивні заряди, що виникли у віддалених один від одного домішкових атомів (на рис. 12.1.–2 енергетичні рівні домішок показані з розривами), залишаються локалізованими, тобто не можуть блукати по кристалу і брати участь в електропровідності. Напівпровідник з такою домішкою має концентрацію, електронів, більшу, ніж концентрація дірок, що з'явилися за рахунок переходу електронів з валентної зони в зону провідності, і його називають напівпровідником *n-типу*, а домішки, що поставляють електрони в зону провідності – *донорами*.

Акцептори. Інші домішки можуть, внести незаповнені рівні, розташовані в забороненій зоні основного напівпровідника поблизу «стелі» валентної зони. Теплове збудження в першу чергу закидатиме електрони з валентної зони на ці вільні домішкові рівні. Зважаючи на роз'єднаність атомів домішок електрони, покинуті на домішкові рівні, не беруть участь в електричному струмі. Такий напівпровідник буде, мати концентрацію дірок, більшу, ніж концентрація електронів, що перейшли з валентної зони в зону провідності, і його відносять до *p-типу*. Домішки, захоплюючи електрони, з валентної зони напівпровідника, називають *акцепторами* (рис. 12.1.–3).

Основні і неосновні носії заряду. Ті носії, концентрація яких в даному напівпровіднику більша, носять назву основних, а ті, концентрація яких менша – неосновних. Так, в напівпровіднику *n-типу* електрони є основними носіями, а дірки – неосновними. У напівпровіднику *p-типу* основні носії – дірки, а неосновні – електрони.

Домішкова електропровідність для своєї появи вимагає менших енергетичних дій (соті або десяті долі електронвольта), чим власна, тому вона виявляється, при нижчій температурі, ніж власна електропровідність напівпровідника.

12.3. Вплив зовнішніх факторів на електропровідність напівпровідника.

Вплив теплової енергії

В широкому діапазоні температур і для різної вмісту домішок мають місце температурні залежності концентрації носіїв зарядів в напівпровіднику. Зі збільшенням температури число носіїв зарядів, які постачаються домішками, зростає доки не вичерпаються електронні ресурси домішкових атомів.

В напівпровіднику ефективна маса носіїв зарядів може бути як меншою так і більшою за масу вільного електрона. Час релаксації, що характеризує спад струму після зняття поля, обумовлюється процесами розсіювання електронів, які рухаються в напівпровіднику. Чим більше частота зштовхування та чим воно інтенсивніше, тим коротший час релаксації, і як наслідок, рухливість електронів.

Причинами розсіювання носіїв зарядів в напівпровідниках, що впливають на температурну залежність їх рухливості, є:

- 1) теплові коливання атомів чи іонів кристалічних ґраток;
- 2) домішки в іонізованому чи нейтральному стані;
- 3) всілякі дефекти ґраток (вільні вузли, викривлення від атомів вкорінення, дислокацій, тріщин, границі зерен тощо).

З'ясувавши вплив температури на концентрацію і рухливість носіїв зарядів, можна представити характер зміни питомої електропровідності при зміні температури.

В напівпровідниках при зростанні температури рухливість змінюється порівняно слабо, а концентрація – дуже сильно. Тому температурна залежність провідності подібна залежності концентрації. В області вичерпання (концентрація постійна) зміна питомої електропровідності обумовлена температурною залежністю розсіювання.

Рисунок 12.2. пояснює температурну залежність питомої провідності напівпровідника, як результат зміни концентрації і рухливості зарядів.

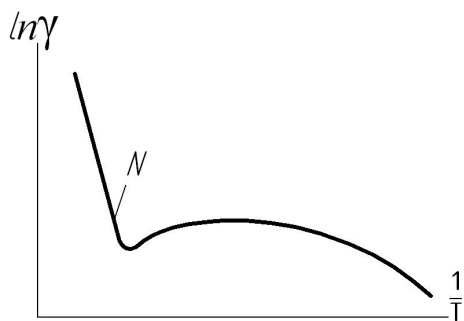


Рисунок 12.2. – Температурна залежність питомої провідності напівпровідника, як результат зміни концентрації і рухливості зарядів.

Питому електропровідність напівпровідників в залежності від температури можна обчислити по формулі:

$$\gamma = A \exp\left(-\frac{W}{2k \cdot T}\right) \quad (12.5)$$

де A – множник, що залежить від величини розсіювання зарядів, для більшості напівпровідників $A = 1 \div 2$;

W – енергія активації;

k – постійна Больцмана.

Або перетворивши формулу (12.5) можна записати для питомого електроопору напівпровідника:

$$\rho = A \exp\left(\frac{W}{2k \cdot T}\right) \quad (12.6)$$

Температурний коефіцієнт питомого електроопору напівпровідників буде:

$$\text{TK}\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} = -\frac{W}{2k \cdot T^2} \quad (12.7)$$

Вплив деформації на електропровідність провідників

Електропровідність твердих напівпровідників змінюється від деформації внаслідок збільшення чи зменшення міжатомних відстаней, що призводить до зміни концентрації і рухливості носіїв. Концентрація може стати більшою чи меншою за рахунок зміни ширини енергетичних зон, що призводить до зміни енергії активації. Рухливість носіїв зарядів змінюється за рахунок зміни амплітуди коливань атомів при їх зміщенні.

Величиною, що чисельно характеризує зміну питомої провідності (питомого електроопору) напівпровідника є *тензочутливість*

$$d\rho = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l} \quad (12.8)$$

яка є відношенням відносної зміни електроопору до відносної деформації в заданому напрямку.

Вплив світла на електропровідність напівпровідників.

Світлова енергія, що поглинається напівпровідником, викликає появу в ньому надлишкової кількості носіїв зарядів, які призводять до зростання електропровідності. При впливі світла окремі електрони можуть опинитися під впливом енергії фотонів і енергії теплових коливань кристалічних ґраток. Такі електрони переходять в зону провідності. Також під дією світла змінюється ширина забороненої зони, тому що, теплові коливання ґраток призводять до миттєвої локальної щільності в малих об'ємах, а значить до зміни міжатомних відстаней, від яких залежить ширина забороненої зони.

Зміну електропровідності під впливом світла чи електромагнітного випромінювання називають *фотопровідністю*.

Вплив потужних електричних полів на електропровідність напівпровідників.

Електропровідність напівпровідників залежить від напруженості електричного поля. При низьких значеннях напруженості поля виконується закон Ома і питома електропровідність не залежить від напруженості поля (рис.12.3).

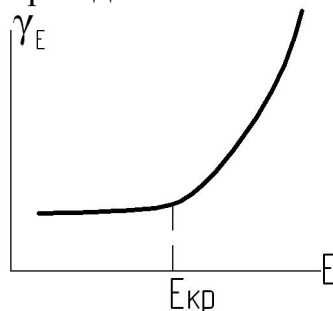


Рисунок 12.3. – Залежність питомої електропровідності від напруженості поля.

При більш високих значеннях напруженості починається інтенсивне зростання питомої електропровідності по експоненціальному закону, що може призвести до руйнування структури напівпровідника (рис.12.3).

Зростання провідності обумовлено ростом числа носіїв зарядів, тому що при впливі напруженості поля вони звільняються тепловим збудженням. При

значному зростання напруженості поля може з'явитися ударна іонізація, що руйнує структуру напівпровідника.

ЛЕКЦІЯ 16

Тема 13. Характеристика напівпровідникових матеріалів.

13.1. Елементарні напівпровідники.

13.2. Напівпровідникові хімічні сполуки.

13.1. Елементарні напівпровідники.

Властивостями напівпровідності володіють десять хімічних елементів таблиці Менделєєва. Їх приведено в таблиці 13.1.

Таблиця 13.1. –

Хімічні елементи напівпровідники

| Елемент | Група в таблиці Менделєєва | Ширина забороненої зони, eV |
|-------------|----------------------------|-----------------------------|
| Бор B | III | 1,1 |
| Кремній Si | IV | 1,12 |
| Германій Ge | IV | 0,72 |
| Фосфор P | V | 1,5 |
| Миш'як As | V | 1,2 |
| Сірка S | VI | 2,5 |
| Селен Se | VI | 1,7 |
| Телур Te | VI | 0,36 |
| Йод I | VII | 1,25 |

Примітка: В деяких модифікаціях властивості напівпровідника мають олово (сіре), сурма, вуглець (алмаз)

Серед елементів напівпровідників найбільше технічне застосування знайшли кремній і германій. Розглянемо деякі їх властивості.

Кремній і германій відносяться до елементів 4 групи, також як вуглець і олово. Порядковий номер германію – 32, а порядковий номер кремнію 14. Ін-акше кажучи, у германію повністю заповнені 3 електронних оболонки, а у кремнію – 2 електронних оболонки. Отже, енергія зв'язку валентних електронів з ядром атома у германію нижче, ніж у кремнію. Ця обставина приводить до того, що температура плавлення германію нижча, ніж у кремнію, крім того, діелектрична проникність германію вища, ніж у кремнію.

Крім того, порівняно слабкий зв'язок валентного електрона з ядром приводить до того, що ширина забороненої зони германію менше ширини забороненої зони кремнію (табл. 13.1.) Нарешті, слабкіша взаємодія електрона з ядром приводить до того, що рухливість електронів в германії вища, ніж в кремнію. Германій зазвичай використовують для виготовлення високочастотних приладів і приладів, що комутують великі струми. Легований кремній використовують для виготовлення приладів що працюють в полях високої напруженості. Важливо відзначити, що максимальна робоча температура

кремнієвих приладів (до 125°C) вище за максимальну робочу температуру германієвих приладів (до 75°C).

Для того, щоб кремній і германій можна було використовувати для виготовлення напівпровідникових приладів їх необхідно ретельно очистити від домішок. На першому етапі очищення їх перетворюють на хлориди і потім, отримані хлориди, піддають розгону на колоні ректифікації. Отримані хлориди розкладають водою, очищеною за допомогою іонообмінних смол. В результаті виходять оксиди германію або кремнію. Потім оксиди відновлюють ретельно очищеним воднем. На завершальному етапі очищення проводять зонну плавку. При зонній плавці домішки захоплюються зоною розплавлення і несуться в кінець злитка. Після декількох проходів злиток напівпровідника стає чистим. Тоді хвостову частину злитка, забруднену атомами домішок, відрізують. Для контролю повноти очищення вимірюють опір напівпровідника.

Германій використовують у виробництві напівпровідних приладів, випрямлювачів перемінного струму, транзисторів, перетворювачів Холла. Оптичні властивості германію дозволяють застосовувати його фото транзисторів і фото резисторів, оптичних лінз і фільтрів, модуляторів світла.

Кремній є основним матеріалом для виготовлення діодів, фотоелементів, тензоперетворювачів і твердих схем мікроелектроніки.

Селен – елемент шостої групи. Він є алотропним, тобто існують аморфні і різнокольорові кристалічні модифікації селену. Селен зазвичай є дірковим напівпровідником. За основними властивостями селен уступає кремнію та германію. Він використовується для виготовлення випрямлювачів і фотоелементів. В даний час застосування селену істотно скоротилося.

В принципі для виготовлення напівпровідникових елементів придатний і вуглець в модифікації алмазу. Проте очищення матеріалу від домішок ускладнене високою температурою плавлення при високому тиску, при атмосферному тиску вуглець не плавиться, а перегоняється з твердої фази (сублімує) при температурі 3700°C. Така висока температура не дає технічної можливості проводити глибоке очищення вуглецю від домішок. Хоча в літературі описано використання напівпровідникових приладів з алмазу, їх застосування обмежено із-за труднощів глибокого очищення і високій вартості.

13.2. Напівпровідникові хімічні сполуки.

Напівпровідниковими властивостями володіють багато хімічних сполук. У хімії напівпровідникових з'єднань прийняті позначення, *наприклад*: типу $A^{III}B^V$, де A^{III} – елемент третьої групи, а B^V – елемент п'ятої групи.

З'єднання типу $A^{IV}B^{IV}$.

Одним з найважливіших для техніки з'єднань типу $A^{IV}B^{IV}$ є *карбід кремнію* (SiC_x , $x \approx 1$). Промисловий карбід кремнію містить 70,045%Si і 29,995%C (по масі). Чисті кристали SiC – прозорі. Карбід кремнію є одночасно напівпровідником *n – p*-типу. Електропровідність кристалів SiC при нормальних температурах – домішкова і коливається в широких межах і залежить від

субструктури, ступеню обтискання, умов виготовлення напруженості електричного поля і температури..

Взаємодія кремнію з вуглецем приводить до посилення ковалентного зв'язку, отже, температура плавлення карбіду кремнію буде вища, ніж у чистого кремнію. Крім того, у карбїду кремнію підвищується величина забороненої зони. Тому з карбіду кремнію можна виготовляти прилади, що працюють при вищій температурі, ніж кремнієві прилади. В техніці карбїд кремнію знайшов застосування у резисторах вертикальних розрядників, що захищають високовольтні лінії електропередач, у виробництві низьковольтних варисторів автоматики та мікроелектроніки, в приладах отримання високих температур тощо.

Напівпровідникові з'єднання типу $A^{III}B^V$.

З'єднання такого типу є перспективними, вони обумовлюють широкі можливості вибору параметрів вихідного матеріалів для створення напівпровідників.

Ці з'єднання утворюються в результаті взаємодії елементів III-ї підгрупи періодичної таблиці (бору, алюмінію, галію, індію) з елементами V-ї підгрупи (азотом, фосфором, миш'яком і сурмою). Наприклад: фосфіди – AlP, GaP, InP; арсенїди – AlAs, GaAs; антимонїди – AlSn, InSn.

Для з'єднань такого типу характерний донорно-акцепторний тип хімічного зв'язку. Особливістю цього типом зв'язку є перехід від ковалентного зв'язку до іонного. Фізичні властивості таких матеріалів визначаються енергією зв'язку, який зменшується у міру зростання порядкового номера елементів, що входять до складу матеріалу. Рухливість носіїв заряду в напівпровідниках такого типу обмежується в основному розсіянням електронів на оптичних теплових коливаннях ґрати, під якими розуміють зсув протифази сусідніх атомів. Оскільки атоми A^{III} і B^V володіють деяким іонним зарядом, то їх зсув протифази приводить до появи дипольного моменту, що є ефективним центром розсіяння носіїв заряду. Чим більше різниця електровідємності елементів що створюють з'єднання, тим сильніше виражена іонна складова хімічного зв'язку. Відповідно зростає розсіяння електронів і дірок на оптичних коливаннях і зменшується рухливість носіїв заряду.

Різноманіття властивостей напівпровідників типу $A^{III}B^V$ привело до їх широкого застосування в різних технічних пристроях. На їх основі виготовляють інжекційні лазери і світлодіоди.

Наприклад у арсенїду галію ширина забороненої зони близька до ширини забороненої зони кремнію, а рухливість носіїв заряду близька до рухливості носіїв заряду германію. Тому даний матеріал є перспективним для виготовлення інтегральних мікросхем з високою швидкодїєю, тунельних діодів, напівпровідних лазерів, рентгенівських та радіоактивних дозиметрів.

Антимонїд індію застосовується для виготовлення фотоелементів високої чутливості, перетворювачів Холла, оптичних фільтрів.

Напівпровідникові з'єднання типу $A^{II}B^{VI}$

До з'єднань типу $A^{II}B^{VI}$ відносять сульфід та халькогеніди цинку, кадмію і ртуті.

Хімічний зв'язок носить змішаний ковалентно-іонний характер. Із зростанням середньої атомної маси атомної маси з'єднань зменшується ширина забороненої зони і знижується температура плавлення, одночасно підвищується рухливість носіїв заряду.

З'єднання типу $A^{II}B^{VI}$ застосовуються для виготовлення фоторезисторів, що володіють високою чутливістю у видимій області спектру, а також для виготовлення люмінофорів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Барановский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника (свойства материалов). Справочник. - Киев: Наукова думка, 1975. – 704 с.
2. Богородицкий Н.П., Пасынков И.И., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр.отд-ние, 1985. – 304 с.
3. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1984. – 208 с.
4. Воробьев Г.А., Диэлектрические свойства электроизоляционных материалов. – Томск.: Изд-во Томского университета, 1984. – 126 с.
5. Губкин А.Н. Электреты. – М.: Наука, 1981. – 191 с.
6. Желудев И.С. Основы сегнетоэлектричества.–М.: Атомиздат, 1973.– 472 с.
7. Каганов М.И., Цукерник В.М. Природа магнетизма М.:Наука, 1982.–192 с.
8. Кайбышев О.А., Валиев Р.З. Границы зерен и свойства металлов. М.: Металлургия, 1987. – 214 с.
9. Курносков А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. М.: Высшая школа, 1975.- 342 с.
10. Материаловедение/. Под ред.Арзамасова Б.Н. М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
11. Металлические стекла /Под ред. Дж. Дж. Гилмана и Х. Дж Лими. – М.: Металлургия, 1984. – 263 с.
12. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высш.шк.,1986. – 367 с.
13. Пихтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники. – М.: Высшая школа, 1983. – 367 с.
14. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия. 1982. – 584 с.
15. Преображенский А. А., Бишард Е. Г., Магнитные материалы и элементы. – М.: Высш.шк.,1986. – 352 с.
16. Смажеская Е.Г., Фельдман Н.Б. Пьезоэлектрическая керамика. – М.: Сов. радио, 1971. – 199 с.
17. Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Корицкого Ю.В., Пасынкова В.В. Тареева Б.М. – Т 1-3. Л.: Энергоатомиздат. – 1988.
18. Угай Я.А. Введение в химию полупроводников. – М.: Высшая школа, 1975. – 302 с.
19. Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н. Новые пьезокерамические материалы. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1983. – 160 с.
20. Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лифшиц и др.; Под ред. Б.Г. Лифшица. – М. Металлургия, 1980. – 320 с.