

УДК 621.315:396

О.М. Стащук, Н.Н. Одинцов, И.П. Лесовой

Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова, г. Одесса

кафедра Телекоммуникационных систем

E-mail: ur5fo@mail.ru**КОМПЕНСАЦИЯ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ С УПОРЯДОЧЕННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ МИКРОСТРУКТУРОЙ СТЕКЛА****Аннотация**

Стащук О.М., Одинцов Н.Н., Лесовой И.П. Компенсация хроматической дисперсии в оптическом волокне с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла. Проведено исследование поляризационной дисперсии, возникающей вследствие двойного лучепреломления в анизотропном фотоупругом оптическом волокне с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла. Выполнен анализ возможности компенсации хроматической дисперсии за счет поляризационной.

Ключевые слова: упорядоченная вращающаяся микроструктура стекла, обыкновенная HE_{11}^o и необыкновенная HE_{11}^e основные волны, внутримодовая дисперсия, поляризационная дисперсия.

Общая постановка проблемы.

Одним из перспективных является способ компенсации хроматической дисперсии, поляризационной, обусловленной разницей группового времени распространения обыкновенной и необыкновенной волн в анизотропной среде.

В работе [1] предложен способ изготовления фотоупругого оптического волокна (ОВ), с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла (УВМС), обладающего свойствами анизотропии. В работе [2] проведено исследование тензора диэлектрической проницаемости данного ОВ, а также зависимость фазовых коэффициентов распространения обыкновенной и необыкновенной основных волн от диэлектрических свойств среды. В работе [3] выполнен анализ особенностей распространения электромагнитной волны в анизотропной среде. В работах [4, 5] определены особенности обмена энергией между обыкновенной и необыкновенной волнами в фотоупругом ОВ скрученном по спирали при комнатной температуре. В работе [6] получена расчетная формула для определения поляризационной дисперсии в ОВ скрученном по спирали.

Постановка задач исследования.

В указанных источниках не получена расчетная формула для поляризационной дисперсии в ОВ с УВМС, не проведено исследование данного вида дисперсии от шага вращения микроструктуры стекла, не определены условия, в которых осуществляется компенсация хроматической дисперсии в ОВ с УВМС за счет поляризационной.

Целью данной работы является исследование всех видов дисперсии в ОВ с УВМС и получение конкретных параметров ОВ, при которых возможна компенсация внутримодовой дисперсии в четвертом окне прозрачности (длина волны 1,565 – 1,625 мкм).

Решение задач и результаты исследований.

В ОВ с УВМС, кроме материальной и волноводной дисперсий, имеет место также и поляризационная дисперсия, причиной возникновения которой является анизотропия оптических свойств ОВ.

На рисунку 1 приєдено вплив різних видів дисперсії сигнала в ОВ с УВМС в четвертому окні прозорості.

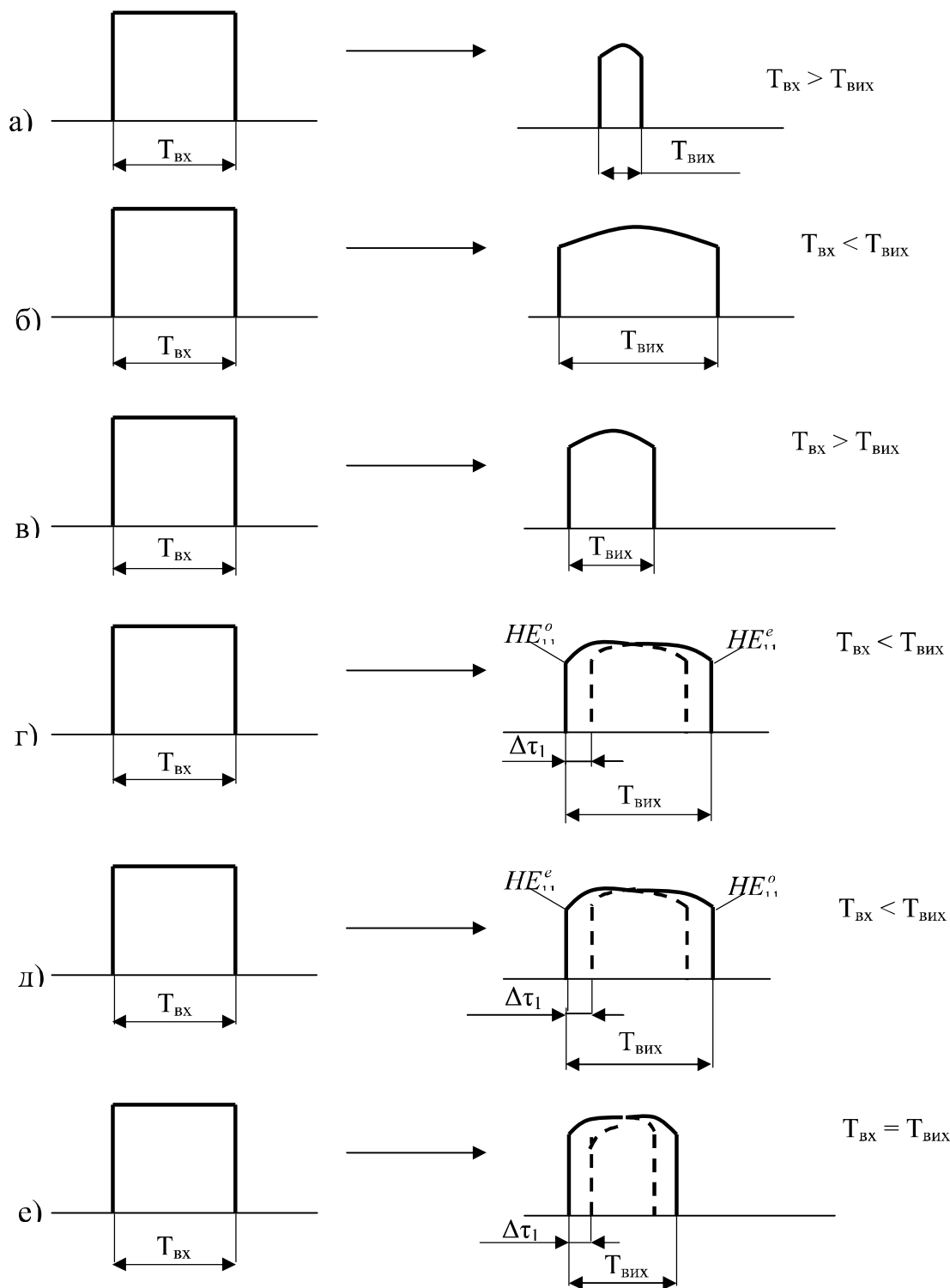


Рисунок 1 – Влияние дисперсии на длительность оптического импульса: а) отрицательной материальной; б) волноводной; в) совместно отрицательной материальной и волноводной; г) отрицательной поляризационной; д) положительной поляризационной; е) совместно отрицательной материальной, волноводной и поляризационной

В результате двойного лучепреломления в ОВ распространяются две волны с взаимортогональными поляризациями: обыкновенная HE_{11}^o и необыкновенная HE_{11}^e . Различие фазовых коэффициентов распространения указанных волн приводит к разнице фазовых скоростей распространения и увеличению длительности импульса на выходе ОВ с УВМС. Материальная дисперсия, возникающая вследствие зависимости диэлектрической проницаемости материала ОВ от длины волны, в четвертом окне прозрачности имеет отрицательный знак. В результате длительность импульса сигнала на выходе ОВ меньше длительности импульса на входе (рис. 1, а).

Причиной возникновения волноводной дисперсии является зависимость фазового коэффициента распространения электромагнитной волны $\beta(\lambda)$ от длины волны, наоборот, имеет положительный знак и приводит к увеличению длительности символа (рис. 2, б)

Хроматическая дисперсия ОВ рассчитывается как сумма материальной и волноводной дисперсий [3]:

$$\Delta\tau = \underbrace{\frac{\lambda}{n_1 c} \left[\sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2 \cdot (3\lambda^2 + l_i^2)}{(\lambda^2 - l_i^2)^3} - \left(-\frac{\lambda}{n_1} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} \right)^2 \right]}_{\text{материальная дисперсия}} + \underbrace{\left[1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2} + \frac{\lambda^2}{n_1} \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} \right] \cdot \frac{\Delta}{\lambda c}}_{\text{волноводная дисперсия}}, \quad (1)$$

где λ – рабочая длина волны, c – скорость света в вакууме; n_1, n_2 – показатели преломления материалов сердцевины и оболочки соответственно; $A_1, A_2, A_3, l_1, l_2, l_3$ – коэффициенты, зависящие от состава стекла [2]; Δ – относительная разница показателей преломления сердцевины и оболочки; $\Phi = V \frac{\partial^2(Vb)}{\partial V^2}$ – функция, которая зависит от профиля диэлектрической проницаемости ОВ [2]; $V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ – нормированная частота, a – радиус сердцевины ОВ.

Если материальная и волноводная дисперсии равны по модулю, но противоположны по знаку осуществляется линейная компенсация дисперсии. Однако, если доминирующей является материальная дисперсия, осуществляется лишь частичная компенсация внутримодовой дисперсии. На рис. 1, в) приведен результат совместного влияния на сигнал отрицательной материальной и волноводной дисперсий для случая, когда большей по модулю является материальная дисперсия.

Поляризационная дисперсия $\Delta\tau_1$, обусловленная различием фазовых скоростей распространения обыкновенной и необыкновенной основных волн в ОВ с УВМС, [2]:

$$\Delta\tau = \tau_1^e - \tau_1^o = \frac{vr_1}{2} (\sin\varphi + \cos\varphi) \frac{\partial}{\partial\omega} \left(\frac{\beta_{10}}{\varepsilon(r)} \right), \quad (2)$$

где τ_1^e и τ_1^o – групповые времена распространения необыкновенной и обыкновенной основных волн соответственно; w – радиус модового поля волны HE_{11} в изотропном ОВ, $\beta_{10} = \frac{2\pi n_1}{\lambda_0}$ – коэффициент распространения моды HE_{11} в прямолинейном изотропном ВС (n_1 – показатель преломления сердцевины ступенчатого изотропного ОВ, λ_0 – длина волны света в вакууме), $\square(r)$ – симметричный профиль диэлектрической проницаемости градиентного ВС без упорядочения вращающейся микроструктуры материала, φ – полярная

координата (отсчитывается от подвижной вращающейся декартовой координаты $\vec{x}(z)$), v – кручение ОВ.

Для ОВ скрученного по спирали при комнатной температуре и радиусе скрутки $R \rightarrow 0$, кручение УВМС v рассчитывается по формуле [2]:

$$v = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{(\rho/2\pi)^2} = \frac{2\pi}{\rho}, \quad (3)$$

где ρ – шаг скрутки УВМС.

Определив $\frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\beta_{10}}{\varepsilon(r)} \right)$, получим конечную формулу для расчета $\Delta\tau_1$:

$$\Delta\tau_1 = -\frac{w \cdot \pi}{\rho} (\sin\varphi + \cos\varphi) \cdot \frac{\lambda^3}{c\lambda_0 \left[1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2} \right]^{\frac{3}{2}}} \cdot \left(\sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} - \frac{A_i}{\lambda^2 - l_i^2} \right), \quad (4)$$

где w - радиус модового поля волны HE_{11} в изотропном ОВ.

Углы поляризации необыкновенной (φ^e) и обыкновенной (φ^o) волн относительно оптической оси, нормально соединяющей ось ОВ со спиральной линией, вдоль которой осуществляется локальная ориентация молекул в УВМС, определяются [2]:

$$\varphi^e = -\arctg \frac{P}{4\pi R} \pm \pi = -\frac{\pi}{2} \pm \pi; \quad \varphi^o = \varphi^e \pm \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Радиус модового поля волны HE_{11} в изотропном ОВ представляется в виде [4, 5]:

$$w = \frac{a}{\sqrt{V-1}}; \quad V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA, \quad (6)$$

где a - радиус сердцевины ОВ, NA - числовая апертура ОВ.

При отрицательном значении $\Delta\tau_1$, необыкновенная волна HE_{11}^e распространяется с большей скоростью, чем обыкновенная волна HE_{11}^o . (см. рис. 1 г), в результате разделения входного импульса длительность импульса на выходе волокна возрастает.

Если $\Delta\tau_1$ положительна обыкновенная волна HE_{11}^o опережает необыкновенную HE_{11}^e (см. рис. 1 д) и длительность импульса на выходе ОВ увеличивается.

Для хроматической дисперсии, как при положительном так и при отрицательном значении $\Delta\tau_1$ происходит увеличение длительности импульса (рис. 1, г и д), поэтому в дальнейшем рассмотрении будем использовать модуль значения $\Delta\tau_1$.

В случае равенства нулю суммы хроматической дисперсии и поляризационной, достигается компенсация хроматической дисперсии и, в результате, длительность импульса

сигнала на выходе равна длительности импульса на входе ОВ с УВМС (рис. 1 е). Уравнение компенсации хроматической дисперсии в ОВ с УВМС имеет вид:

$$\underbrace{\frac{\lambda}{n_1 c} \left[\sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2 \cdot (3\lambda^2 + l_i^2)}{(\lambda^2 - l_i^2)^3} - \left(-\frac{\lambda}{n_1} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} \right)^2 \right]}_{\text{материальная дисперсия}} + \underbrace{\left[1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2} + \frac{\lambda^2}{n_1} \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} \right] \cdot \frac{\Delta}{\lambda c}}_{\text{волноводная дисперсия}} + \underbrace{\left[\frac{w \cdot \pi}{\rho} (\sin \varphi + \cos \varphi) \cdot \frac{\lambda^3}{c \lambda_0 \left[1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} - \frac{A_i}{\lambda^2 - l_i^2} \right)} \right]}_{\text{поляризационная дисперсия}} = 0. \tag{7}$$

На рис. 2 представлен график зависимости суммы рассмотренных трех видов дисперсии в ОВ с УВМС от шага скрутки УВМС ρ для ОВ следующего состава: сердцевина - 13,5% GeO₂, 86,5% SiO₂, оболочка - 1%F, 94,5% SiO₂, диапазон изменений шага скрутки 4,5 мкм – 100 мкм, длина волны – 1,565 мкм, радиус сердцевины – 2,2 мкм

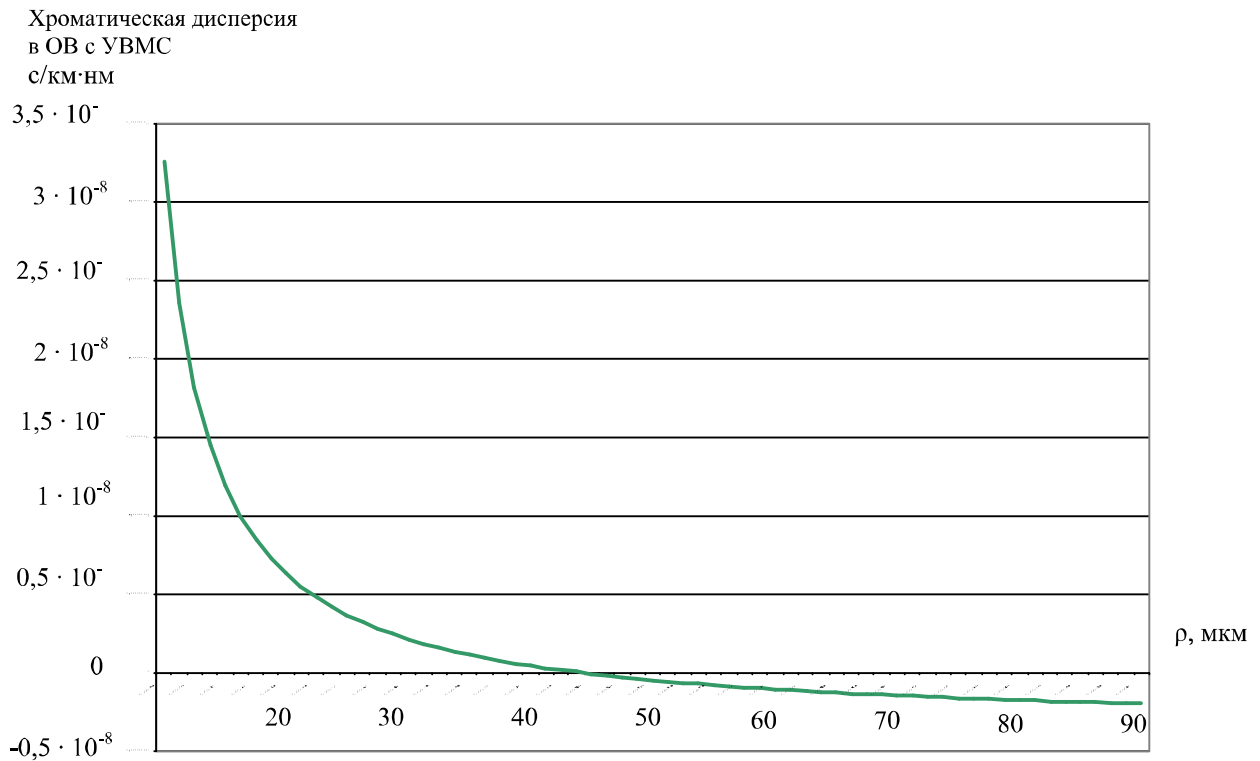


Рисунок 2 – Зависимость хроматической дисперсии в ОВ с УВМС от шага скрутки микроструктуры стекла

Результаты расчетов шагов скрутки УВМС для различных составов ОВ, при которых достигается компенсация хроматической дисперсии для рабочей длины волны 1,565 мкм, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры ОБ с УВМС для компенсации хроматической дисперсии

№ п/п	Состав сердцевины	Состав оболочки	Хроматическая дисперсия, с/км·нм	Поляризационная дисперсия, с/км·нм	Радиус сердцевины ОБ а, мкм	Шаг скрутки ρ, мкм
1	13,5% GeO ₂ , 86,5% SiO ₂	1% F, 94,5% SiO ₂	-3,56646 · 10 ⁻⁹	3,56646 · 10 ⁻⁹	2,2	46,5
2	9,1% GeO ₂ , 7,7% B ₂ O ₃ , 83,2% SiO ₂	2,2% GeO ₂ , 3,3% B ₂ O ₃ , 94,5% SiO ₂	-8,26042 · 10 ⁻⁹	8,26042 · 10 ⁻⁹	2,6	42,4
3	7% GeO ₂ , 93% SiO ₂	3,5% B ₂ O ₃ , 96,5% SiO ₂	-1,20358 · 10 ⁻⁸	1,20358 · 10 ⁻⁸	2,8	19
4	4,1% GeO ₂ , 95,9% SiO ₂	1% F, 94,5% SiO ₂	-5,28066 · 10 ⁻⁹	5,28066 · 10 ⁻⁹	2,5	58,3
5	3,5% GeO ₂ , 96,5% SiO ₂	3% B ₂ O ₃ , 97% SiO ₂	-3,58531 · 10 ⁻⁸	3,58531 · 10 ⁻⁸	2,4	12,7
6	4,03% GeO ₂ , 9,7 % B ₂ O ₃ , 86,27 % Si O ₂	1%F, 94,5% SiO ₂	-5,21523 · 10 ⁻⁸	5,21523 · 10 ⁻⁸	2,4	9
7	5,8 % GeO ₂ , 94,2 % Si O ₂	1% F, 99% SiO ₂	-1,48483 · 10 ⁻⁸	1,48483 · 10 ⁻⁸	2,1	19,8
8	3,3% GeO ₂ , 9,2% B ₂ O ₃ , 87,5% SiO ₂	3,5% B ₂ O ₃ , 96,5% SiO ₂	-9,89739 · 10 ⁻⁹	9,89739 · 10 ⁻⁹	2,1	25,6

Выводы.

Различие фазовых коэффициентов распространения обыкновенной HE_{11}^o и необыкновенной HE_{11}^e волн приводит к разнице фазовых скоростей распространения и увеличению длительности импульса на выходе ОВ с УВМС.

Как видно из графика рис. 2, при значении $\rho = 46,5$ мкм, суммарная дисперсия в ОВ данного состава с УВМС равна нулю, т. е. соблюдается условие полной компенсации хроматической дисперсии (7).

Исследования показали, что возможно создание ОВ с линейной компенсацией хроматической дисперсии на основе УВМС, если сумма материальной и волноводной дисперсий имеет отрицательное значение.

Полученные результаты могут служить основой для разработки ОВ с нулевой дисперсией сигнала в четвертом окне прозрачности.

Литература

1. Макаров Т. В. А. с. Оптическое волокно, обеспечивающее поворот плоскости поляризации, и способ его изготовления / Т. В. Макаров, А. В. Зазулин (СССР). - № 1812541.
2. Макаров Т.В. Волоконный световод с упорядоченной вращающейся микроструктурой стекла / Т. В. Макаров // Праці УНДІРТ. – 1999. - №2(18).
3. Корнейчук В.И. Оптические системы передачи / В. И. Корнейчук, Т.В. Макаров, И.П. Панфилов. – К.: Техніка, 1994. – 388 с.
4. Макаров Т. В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных одномодовых волоконных световодах / Т. В. Макаров // Праці УНДІРТ. – 2004. – Ч. I - Вип. 2 (38). – С. 23-28.
5. Макаров Т. В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных одномодовых волоконных световодах / Т. В. Макаров // Праці УНДІРТ. – 2004. – Ч. II - Вип. 2 (38). – С. 29-34.
6. Макаров Т. В. Передаточные характеристики изогнутых волоконных световодов / Т. В. Макаров // Праці УНДІРТ. – Одеса, 1998. - №1 (13). – С. 13-23.

Надійшла до редакції:
28.01.2011

Рекомендовано до друку:
д-р техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

Abstract

Staschuk O.M., Odintsov N.N., Lesovoy I.P. Compensation modal dispersions optical fiber by rotation ranked glass microstructure. The anisotropic components find in fiber-optic transmission system of the issue wide using. Using characteristic the anisotropic medium for compensation chromatic dispersion of optical fiber (OF) is of considerable interest from theoretical point of view. We want to study this phenomenon in little more detail.

Keywords: rotation ranked glass microstructure, common (HE_{11}^o) and uncommon (HE_{11}^e) of the basic waves, modal dispersion, polarize dispersion.

Анотація

Стащук О.М., Одинцов М.М., Лисовий І.П. Компенсація хроматичної дисперсії в оптичному волокні з упорядкованою микроструктурою скла, що обертається. Проведено дослідження поляризаційної дисперсії, що виникає внаслідок подвійного заломлювання променів в анізотропному фотопружньому оптичному волокні з упорядкованою микроструктурою скла, що обертається. Виконано аналіз можливості компенсації хроматичної дисперсії поляризаційною.

Ключові слова: упорядкована микроструктура скла, що обертається, звичайна (HE_{11}^o) та незвичайна (HE_{11}^e) основні хвилі, внутрішньомодова дисперсія, поляризаційна дисперсія.

© Стащук О.М., Одинцов Н.Н., Лесовой И.П., 2011