

1. Оцінити інформаційні можливості багатомодового ступінчатого волокна з параметрами: $n_c=1.55$, $n_{ob}=1.45$.

Тут можна визначити ширину смуги пропускання: $W = \frac{l}{2\tau_{dis}^{MMF}}$. де враховуємо міжродову

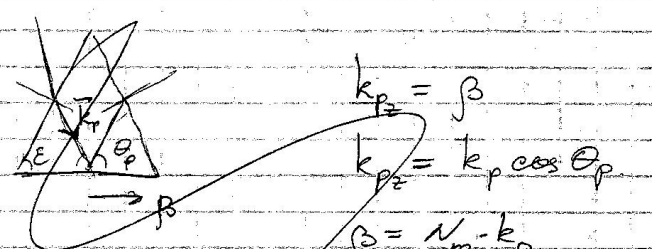
дисперсію: $\tau_{dis}^{MMF} = \frac{\Delta n}{c} l = \frac{n_c - n_{ob}}{c} l$, тоді ширина смуги пропускання:

$$W = \frac{lc}{2(n_c - n_{ob})l} = \frac{c}{2(n_c - n_{ob})} = \frac{3 \times 10^8}{2(1.55 - 1.45)} = 1.5 \frac{\text{Å}}{\text{нм}}.$$

2. Розрахувати призменний елемент збудження всього спектру хвильоводних мод в асиметричному планарному хвилеводі з параметрами: $n_f=2.2$, $n_s=1.9$, $n_c=1.0$, $\lambda=1.3$ мкм.

N2.

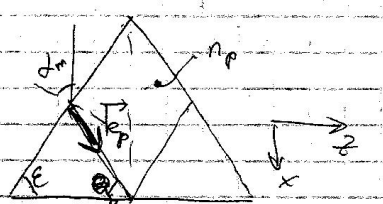
$n_f=2.2, n_s=1.9, n_c=1.0, \lambda=1.3 \text{ мкм.}$



$$N_m = \sin \alpha \sin \epsilon + \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \alpha} \sin \epsilon$$

$$\sin \alpha = n_f \sin(\arccos \frac{n_s}{n_f}), \quad n_c < N_m < n_s$$

Треба знайти $\theta_p \in [0, \pi/2]$, або перевернути графік



$$N_m = \frac{k_{pz}}{k_0} = \sin \alpha \sin \epsilon + \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \alpha} \sin \epsilon.$$

Знаємо, що $n_s < N_m < n_f, \alpha \in [0, \frac{\pi}{2}]$

$$\Rightarrow N_m^{\min} = n_s = \sin 0 \cdot \cos \epsilon + \sqrt{n_p^2 - \sin^2 0} \sin \epsilon \equiv$$

$$\equiv n_p \sin \epsilon$$

$$N_m^{\max} = n_f = \sin \frac{\pi}{2} \cos \epsilon + \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \frac{\pi}{2}} \sin \epsilon \equiv$$

$$\equiv \cos \epsilon + \sin \epsilon \cdot \sqrt{n_p^2 - 1}$$

$$\begin{cases} n_s = n_p \sin \varepsilon \\ n_f = \sin \varepsilon \sqrt{n_p^2 - 1} + \cos \varepsilon \end{cases}$$

$$\sin \varepsilon = \frac{n_s}{n_p} \quad \cos \varepsilon = \sqrt{1 - \frac{n_s^2}{n_p^2}}$$

$$n_f = \sqrt{n_s^2 - \frac{n_s^2}{n_p^2}} + \sqrt{1 - \frac{n_s^2}{n_p^2}}$$

$$n_f = \sqrt{n_s^2 - x} + \sqrt{1 - x}$$

$$1 - x = (n_s^2 - x) = (n_f - \sqrt{1 - x})^2 =$$

$$= n_f^2 + 1 - x - 2n_f\sqrt{1 - x}$$

$$2n_f\sqrt{1 - x} = 1 + n_f^2 - n_s^2$$

$$4n_f^2(1 - x) = (1 + n_f^2 - n_s^2)^2$$

$$x = \frac{n_s^2}{n_p^2} = 1 - \frac{(1 + n_f^2 - n_s^2)^2}{4n_f^2} = \frac{4n_s^2 - (1 + n_f^2 - n_s^2)^2}{4n_f^2}$$

$$n_p = \frac{2n_s n_f}{\sqrt{4n_f^2 - (1 + n_f^2 - n_s^2)^2}} = 2,204$$

$$\sin \varepsilon = 0,8621 \Rightarrow \varepsilon = 59,55^\circ$$

3. На яку глибину занурюється оптична мода в планарному хвилеводі ($n_f=2.2$, $n_s=1.9$, $n_c=1.0$, $\lambda=1.3$ мкм.) при повному внутрішньому відбитті на границі плівка – підкладка. Ефективний показник заломлення моди $n_{ef}=2.0$.

Для TE моди:

$$\begin{aligned} & \sqrt{3} \\ & n_f = 2.2, \quad n_s = 1.9, \quad n_c = 1.0, \quad \lambda = 1.3 \text{ мкм.} \\ & N_m = 2.0 \\ & x_e = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_f^2 \cos^2 \theta_m - n_s^2}} \\ & n_f \cos \theta_m = N_m \\ & \Rightarrow x_e = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{N_m^2 - n_s^2}} = 0.33 \text{ мкм.} \end{aligned}$$

Для ТМ моди: $x_e = \frac{n_f^2}{n_s^2} \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{N_m^2 - n_s^2}} = \frac{2.2^2}{1.9^2} \times 0.33 \times 10^{-6} = 0.44 \text{ мкм.}$

4. Оцінити інформаційні можливості (МГц км) одномодового волокна SF на оптичній несучій $\lambda=850$ нм, що генерується лазерним діодом з шириною лінії $\Delta\lambda = 3$ нм. Коефіцієнт матеріальної дисперсії в цьому спектральному діапазоні $Y_{0.85} = 0.021$.

$$\begin{aligned} & \sqrt{4} \\ & W \text{ [МГц км]}? \quad \lambda = 850 \text{ нм}, \quad \Delta\lambda = 3 \text{ нм.} \\ & Y_{0.85} = Y = 0.021. \\ & W = f \cdot 1 \text{ км} = \frac{1 \text{ км}}{2 \tau_{dis}}, \quad \text{де } \tau_{dis} \text{ — час дисперсії} \\ & \tau_{dis} = \frac{1 \text{ км}}{c} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot Y \\ & \Rightarrow W = \frac{2c}{2\Delta\lambda Y} = 2024 \text{ МГц км} \end{aligned}$$

8. Довести, що при повному внутрішньому відбитті в області перетину хвильових фронтів падаючого і відбитого випромінювання встановлюється стояча оптична хвиля.

№8

Нехай на границю падає пучок світла, в якому $\delta k \neq 0$. Цього в найпростішому випадку можна розглядати як суперпозицію двох плоских хвиль однакової амплітуди, що мають різні кути поширення $\theta_1 = \theta - \frac{\Delta\theta}{2}$, $\theta_2 = \theta + \frac{\Delta\theta}{2}$, $\Delta\theta \ll \theta$. Тоді в напрямку θ хвильові вектори обох хвиль матимуть однакові складові, рівні $k_0 \cos \frac{\Delta\theta}{2}$, а в \perp -му напрямку рівні за модулем і протилежні за знаком

$$k_{1\perp} = -k_{2\perp} = k_0 \sin \frac{\Delta\theta}{2}$$

Їх суперпозиція, очевидно, створить стоячу хвилю в напрямку, \perp -му до θ . Її довжина буде рівна

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{\pi}{k_0 \sin \frac{\Delta\theta}{2}}$$

9. Знайти миттєве і середнє за період значення густини потоку енергії оптичного випромінювання в планарному хвилеводі в напрямку сталої розповсюдження.

Розглянемо випадок ТЕ хвиль, для яких компоненти полів рівні:

$$E_y = A_y(x)e^{i(\omega t - \beta z)}, H_x = -\frac{\beta c}{\omega} E_y = -\frac{\beta c}{\omega} A_y(x)e^{i(\omega t - \beta z)}; H_z = \frac{ic}{\omega} \frac{\partial A_y}{\partial x} e^{i(\omega t - \beta z)} = \frac{c}{\omega} \frac{\partial A_y}{\partial x} e^{i(\omega t - \beta z + \pi/2)}.$$

На цікавитимуть дійсні величини, тому знайдемо їх:

$$\text{Re } E_y = A_y(x) \cos(\omega t - \beta z), \text{Re } H_x = -\frac{\beta c}{\omega} A_y(x) \cos(\omega t - \beta z); \text{Re } H_z = \frac{c}{\omega} \frac{\partial A_y}{\partial x} \sin(\omega t - \beta z). \text{ Знайдемо тепер}$$

$$\text{миттєве значення вектору Умова-Пойтінга: } \Pi = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ 0 & E_y & 0 \\ H_x & 0 & H_z \end{vmatrix} = E_y H_z \vec{e}_x - E_y H_x \vec{e}_z, \text{ а в напрямку}$$

$$\text{сталого розповсюдження: } \Pi_z = -\text{Re } E_y \text{Re } H_x = \frac{\beta c A_y^2(x)}{\omega} \cos^2(\omega t - \beta z). \text{ Тепер знайдемо середнє}$$

$$\langle \Pi_z \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\beta c A_y^2(x)}{\omega} \cos^2(\omega t - \beta z) dt = \left| \omega = \frac{2\pi}{T}, x = \omega t - \beta z \right| =$$

$$\text{за період значення: } = \frac{1}{T} \frac{T}{2\pi} \frac{\beta c A_y^2(x)}{\omega} \int_0^{2\pi} \cos^2 x dx = \frac{\beta c A_y^2(x)}{2\pi\omega} \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (1 + \cos 2x) dx =$$

$$\frac{\beta c A_y^2(x)}{4\pi\omega} \left(2\pi + \frac{1}{2} \sin 2(2\pi - 0) \right) = \frac{\beta c A_y^2(x)}{2\omega}$$

10. Знайти миттєве і середнє за період значення густини потоку енергії оптичного випромінювання в планарному хвилеводі в напрямку ортогональному до сталої розповсюдження.

Розглянемо випадок ТЕ хвиль, для яких компоненти полів рівні:

$$E_y = A_y(x)e^{i(\omega t - \beta z)}, H_x = -\frac{\beta c}{\omega} E_y = -\frac{\beta c}{\omega} A_y(x)e^{i(\omega t - \beta z)}; H_z = \frac{ic}{\omega} \frac{\partial A_y}{\partial x} e^{i(\omega t - \beta z)} = \frac{c}{\omega} \frac{\partial A_y}{\partial x} e^{i(\omega t - \beta z + \pi/2)}.$$

На цікавитимуть дійсні величини, тому знайдемо їх:

$$\text{Re } E_y = A_y(x) \cos(\omega t - \beta z), \text{Re } H_x = -\frac{\beta c}{\omega} A_y(x) \cos(\omega t - \beta z); \text{Re } H_z = \frac{c}{\omega} \frac{\partial A_y}{\partial x} \sin(\omega t - \beta z). \text{ Знайдемо тепер}$$

$$\text{миттєве значення вектору Умова-Пойтінга: } \Pi = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ 0 & E_y & 0 \\ H_x & 0 & H_z \end{vmatrix} = E_y H_z \vec{e}_x - E_y H_x \vec{e}_z, \text{ а в напрямку}$$

ортогональному до сталої розповсюдження:

$$\Pi_x = \text{Re } E_y \text{Re } H_z = \frac{c A_y(x)}{\omega} \frac{\partial A_y}{\partial x} \cos(\omega t - \beta z) \sin(\omega t - \beta z). \text{ Тепер знайдемо середнє за період}$$

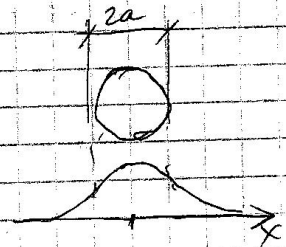
$$\langle \Pi_x \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{c A_y(x)}{\omega} \frac{\partial A_y}{\partial x} \cos(\omega t - \beta z) \sin(\omega t - \beta z) dt = \left| \omega = \frac{2\pi}{T}, x = \omega t - \beta z \right| =$$

$$\text{значення: } \frac{c A_y(x)}{2\pi\omega} \frac{\partial A_y}{\partial x} \frac{T}{T} \int_0^{2\pi} \cos x \sin x dx = \frac{c A_y(x)}{2\pi\omega} \frac{\partial A_y}{\partial x} \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \sin 2x dx = 0$$

11. Розрахувати ефективний діаметр модового поля хвильоводної моди на довжині хвилі $\lambda = 1.5 \text{ мкм}$ в одномодовому кварцевому волокні з параметрами: $n_c = 1.55$, $n_0 = 1.5$, $2a = 8 \text{ мкм}$. Ефективний показник заломлення хвильоводної моди $N_{\text{ef}} = 1.52$.

N11

$\lambda = 1.5 \text{ мкм}; \quad n_c = 1.55; \quad n_0 = 1.5;$
 $2a = 8 \text{ мкм}. \quad N_m = 1.52$



$D_{\text{eff}} = 2a + \frac{\lambda}{q}$

де q :

$$A_y(x) = \begin{cases} A e^{-qx}, & x > a \\ B \cos tx + C \sin tx, & |x| \leq a \\ D e^{qx}, & x < -a \end{cases}$$

Р-на Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(x) - \beta^2 \right) E_y = 0.$$

$$\epsilon(x) = \begin{cases} n_c, & |x| \leq a \\ n_0, & |x| > a \end{cases}; \quad \beta = k_0 N_m$$

Відемо $E_y = A_y(x) \cos(\omega t - \beta z)$

$$q^2 + k_0^2 n_0^2 - k_0^2 N_m^2 = 0$$

$$q^2 = k_0^2 (N_m^2 - n_0^2), \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

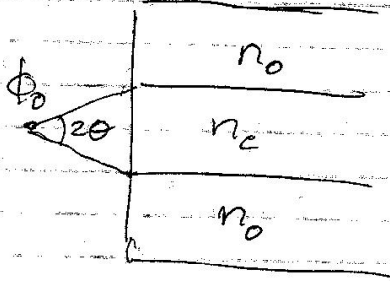
$$\Rightarrow D_{\text{eff}} = 2 \left(a + \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{N_m^2 - n_0^2}} \right) \approx 18 \text{ мкм.}$$

$\sqrt{12}$

12. Яка частина потужності точкового оптичного джерела Φ_0 , розмір якого менше діаметра серцевини волокна, може бути введена в це волокно. Оптичні параметри волокна: $n_c=1.55$, $n_o=1.5$. Знайти Φ/Φ_0 .

$\sqrt{12}$

Φ_0 $n_c=1.55$, $n_o=1.5$ $\frac{\Phi}{\Phi_0} ?$



$$\sin \theta_{\max} = \sqrt{n_c^2 - n_o^2}$$

Φ_0 розсіюється на
 4π ср. Φ хвильовод

потрапляє лише конус в межах
 півкільця θ_{\max} це кут

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta_{\max}) =$$

13. Знайти зсув фаз між власними оптичними хвилями $\Delta\varphi_E$ оптичного випромінювання, що розповсюджується ортогонально до оптичної вісі кристала LiNbO_3 з довільною лінійною поляризацією. Електричне поле прикладене вздовж оптичної вісі.

N13.

Для LiNbO_3 $n_o = 2,3$, $n_e = 2,2$ в оптич. діапазоні. Якщо поле прикладено вздовж оптичної вісі, то маємо

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11}^0 + \Gamma_{13} E_3 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22}^0 + \Gamma_{13} E_3 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33}^0 + \Gamma_{33} E_3 \end{pmatrix}$$

де $a_{11}^0 = a_{22}^0 = \frac{1}{n_o^2}$, $a_{33}^0 = \frac{1}{n_e^2}$.

Очевидно, наві показники заломлення рівні

$$n_o' = \frac{1}{\sqrt{a_{11}}} = \frac{1}{\sqrt{a_{11}^0 + \Gamma_{13} E_3}} \approx n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \Gamma_{13} E_3$$

$$n_e' = \frac{1}{\sqrt{a_{33}}} = \frac{1}{\sqrt{a_{33}^0 + \Gamma_{33} E_3}} \approx n_e - \frac{1}{2} n_e^3 \Gamma_{33} E_3$$

Отже зсув фаз рівний

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e' - n_o') l = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e^0 - n_o^0) l - \frac{\pi}{\lambda} (n_o^3 \Gamma_{13} - n_e^3 \Gamma_{33}) E_3 l$$

14. В якому діапазоні товщин планарний хвильовід з параметрами $n_f=2.2$, $n_s=1.9$, $n_c=1.0$ буде підтримувати одну ортогональну моду на довжині хвилі $\lambda=1.3$ мкм.

№ 14

$n_s=1.9$, $n_c=1.0$, $n_f=2.2$, $\lambda=1.3$ мкм.

Треба знайти товщини відсічків TE_0, TM_0 і TE_1, TM_1 . Оскільки $h_B^{TE} \approx h_B^{TM}$, то досить знайти лише h_B^{TE} :

$$h_{Bm}^{TE} = \frac{1}{k_0 \sqrt{n_c^2 - n_s^2}} \left(\arctan \sqrt{\frac{n_f^2 - n_c^2}{n_c^2 - n_s^2}} + m\pi \right).$$

~~$k_m = n_f \cos \theta_m$~~ , $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Нам треба h_{B0} і h_{B1} .

$$h_{B0} = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \arctan \sqrt{\frac{n_f^2 - n_c^2}{n_c^2 - n_s^2}} = 0,181 \text{ мкм}$$

$$h_{B1} = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left(\arctan \sqrt{\frac{n_f^2 - n_c^2}{n_c^2 - n_s^2}} + \pi \right) = 0,77 \text{ мкм}$$

15. Знайти товщину відсічки TE_3 оптичної моди що розповсюджується в планарному хвильоводі з параметрами: $n_f=2.2$, $n_s=1.9$, $n_c=1.0$, $\lambda=1.3$ мкм.

№ 15

Аналогічно попередній задачі

$$h_{B3} = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left(\arctan \sqrt{\frac{n_f^2 - n_c^2}{n_c^2 - n_s^2}} + 3\pi \right) = 1,94 \text{ мкм}$$

16. Скільки оптичних мод може розповсюджуватись в хвилеводі з параметрами: $n_f=2.2$, $n_s=1.9$, $n_c=1.0$, $\lambda=1.3$ мкм, $h=9$ мкм.

$$\text{З дисперсійного тривіання} \Rightarrow kh\sqrt{n_f^2 - n_s^2} = \arctg \frac{\sqrt{n_f^2 - n_c^2}}{\sqrt{n_f^2 - n_s^2}} + m\pi \Rightarrow m \approx \frac{2h}{\lambda} \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \approx 15,36,$$

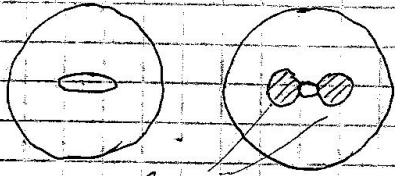
також при $m=0$ - існує нульова мода яку також треба врахувати, тоді в даному хвилеводі може розповсюджуватись 16 оптичних мод.

17. Які причини виникнення поляризаційної модової дисперсії в оптичному волокні і які шляхи боротьби з цим видом дисперсії інформаційного сигналу.

№17.

У випадку ідеальної геометричної кругової волокна, моди з ортогонал. поляризацією в одномод. волокні мають однак. сталі поширення і не розрізн. Реальні волокна мають малу асиметрію \Rightarrow мала різниця сталей розповсюдження. Є неконтрольовані. Взаємні перетворення мод виник. при пружних навантаженнях, температурі тощо. Сталаризація стає існують у волокнах «зі світл. поляризацією хвилі» (із двоприменізаціон. мод). Двоприменізаціон. мод — це зв'язок між ними, м-д через функції радіуса серцевини з просторовою частотою, яка відповідає різниці сталей розповсюдження $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$. Боротьба з поляризац. модовою дисперсією полягає в тому, аби створити настіль-

ми сильніше збільшує зворотне заломлення
або природні дисфункції. Їх не
перуємо. Цього можна досягти
зробивши серцевану еліптичного або



несиметрично розподі-
лени показник

виплики

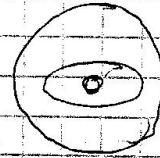
заломлення.

Менше складно створити механіч-
ні напруження в

волокно (PANDA)



PANDA



додавши додаткові

елементи у волокно (PANDA) або
зробивши еліптичну додаткову об-
ложку.

18. Які параметри необхідно забезпечити оптичному випромінювачу, що працює в режимі щільного мультиплексування інформаційного сигналу?

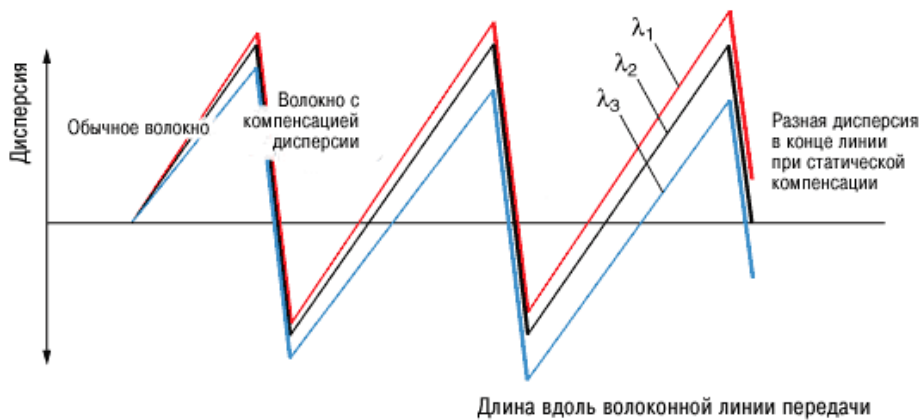
DWDM – щільне хвильове мультиплексування: маємо розділення в вузькій спектральній області 40 нм., відстань між несучими $\Delta\lambda = 0,8 \text{ нм.}$, тобто реалізується 50 каналів передачі, сумарна швидкість по одному каналу: $50 \frac{Gbt}{c}$. В даному волокні не використовуються

суміщення мінімум дисперсії і поглинання, оскільки тут всі канали еквідистатні. Його переваги: використання лише одного вікна прозорості волокна в межах області довжин хвиль 1525 - 1565 нм; малий інтервал по довжині хвилі між мультиплексуючими оптичними каналами, переважно рівний 3,2 / 1,6 / 0,8 або 0,4 нм. Для реалізації щільного мультиплексування потрібна дуже сильна стабілізація частоти, через малу відстань між каналами.

19. Які існують (або запропонуйте) шляхи компенсації матеріальної дисперсії оптичного інформаційного сигналу?

Матеріальна дисперсія – залежність показника заломлення (фазової швидкості) світла в речовині від довжини хвилі ($n = f(\lambda)$), яка виникає внаслідок хвостів електронних та атомних резонансів в оптичному діапазоні. Для характеристики матеріальної дисперсії вводиться коефіцієнт матеріальної дисперсії $Y_m = \lambda^2 \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$. Для кварцу цей коефіцієнт мінімальний при довжині хвилі світла $\approx 1,3$ мкм. Отже, для компенсації матеріальної дисперсії оптичного інформаційного каналу, довжину хвилі оптичної несучої обирають в інтервалі 1250-1620 нм (для кварцу).

Волокно з компенсацією дисперсії є основним компонентом при статичному придушенні хроматичної дисперсії. Його негативна хроматична дисперсія у кілька разів перевищує позитивну хроматичну дисперсію одномодового волокна. Додавання ділянки волокна з компенсацією дисперсії певної довжини компенсує дисперсію лінії передачі, звертаючи її в нуль. Для систем передачі з хвильовим мультиплексуванням (WDM) необхідно також компенсувати і різні нахили дисперсійних характеристик для різних довжин хвиль передачі. Так як нахили в основному і скомпенсованому волокні не збігаються точно, то і не відбувається ідеального занулення дисперсії. У підсумку, накопичена дисперсія системи передачі змінюється з довжиною хвилі (див. Рис.)



Одна з найбільш розвинених методик з перебудовуванням дисперсії заснована на властивостях волоконних брегівських ґраток, розроблених раніше для статичної компенсації дисперсії. Фазовий зсув в компенсаторах на волоконних ґратах залежить від модуляції

інтервалів між зонами з підвищеним показником заломлення в ґратці. Якщо ці інтервали зростають вздовж волоконної ґратки, то довгохвильова частина сигналу проникне глибше в ґратку, перш ніж повністю відбитися. Це призводить до затримки довгохвильових складових щодо коротких. Якщо відстань між короткохвильовою і довгохвильовою частинами ґратки становить 1 мм, то довгі довжини хвиль будуть затримані приблизно на 10 пс.

Додаткова складність полягає в тому, що лінійний вплив вздовж ґратки не забезпечує різний фазовий зсув, необхідний для корекції хроматичної дисперсії. Цей вплив має бути нелінійним по довжині ґратки. Необхідну неоднорідність (нелінійність) можна отримати або відразу використовуючи волоконну ґратку з нелінійними інтервалами, або докладаючи до неї неоднорідні напруження (напруги). Зазвичай механічні напруги однорідні вздовж волокна в силу його поздовжньої геометричній однорідності. Однак можна створити необхідний нелінійний температурний профіль уздовж ґратки, регулюючи температуру джерел тепла.

Розглянемо віртуальну фазову ґратку. У цьому методі світло надходить в еталон під невеликим кутом до нормалі. Пучок світла коливається між дзеркалами еталона і частково виходить при кожному коливанні. Ці окремі пучки взаємодіють також як, якби вони вийшли з масиву хвильоводів або штрихів дифракційні ґратки, викликаючи фазові затримки, які можна налаштувати за допомогою оптики.

20. Чому на швидкостях передачі інформації (5-6) Гбіт/сек і більше принципово не використовується пряма модуляція оптичної несучої?

При великих швидкостях передачі інформації ($\geq 5-6$ Гбіт/сек) – починає проявляти себе фундаментальна властивість напівпровідникового переходу, а саме те, що рекомбінація носіїв відбувається не миттєво, а має перехідний процес. В результат прямокутний імпульс стає модульованим по частоті (чирк рис. 1).

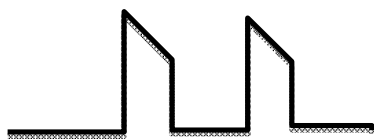


Рис. 1

Це уширення не дає змогу використовувати пряму модуляцію оптичної несучої.

21. Які переваги і недоліки застосування лазерних підсилювачів оптичного інформаційного сигналу у порівнянні з проміжними регенераторами?

Якщо максимально допустима довжина між приймачем і передавачем перевищена, то необхідно в проміжних точках лінії зв'язку додавати один або декілька повторювачів і оптичних підсилювачів. По методу підсилення оптичного сигналу повторювачі підрозділяються на дві категорії: регенератори і оптичні підсилювачі.

Регенератор (електронно-оптичний повторювач) спочатку перетворить оптичний сигнал в електричну форму, підсилює, коректує, а потім перетворює назад в оптичний рис. 1



Рис. 1

Повторювач можна представити як послідовно сполучені приймальних і передавальних оптичних модулів. Блок регенерації відновлює прямокутну форму імпульсів, усуває шум.

Оптичний підсилювач (ОП), на відміну від повторювача, не здійснює оптоелектронного перетворення, а відразу проводить підсилення оптичного сигналу рис. 2:



Рис. 2

повторювач, що особливо важливе для ретрансляторів ВОЛЗ, що пролягають під водними перешкодами.

Оптичний підсилювач **не прив'язаний** до швидкості передачі, тоді як повторювач зазвичай призначений для роботи на певній швидкості.

Повторювачі працюють з однохвильовим сигналом, а ОП можуть одночасно підсилювати **декілька** оптичних сигналів з різними довжинами хвиль в межах певного хвилювального інтервалу, який називається зоною підсилення. Це дозволяє нарощувати пропускну можливість лінії зв'язку, на якій встановлені ОП, без додавання нових волокон.

В даний час найбільш перспективними для ВОЛЗ вважаються напівпровідникові підсилювачі і підсилювачі на домішковому ОВ.

Також можна додати, що оптичний підсилювач не залежить і від типу передаваного сигналу – йому все одно: дискретний цифровий сигнал передавати або аналоговий. Саме тому оптичний підсилювач широко застосовується, наприклад, в мережах кабельного телебачення, де до потужності сигналу і його якості пред'являються підвищені вимоги. Тому на сьогоднішній день оптичний підсилювач – один з ключових елементів DWDM-систем, у тому числі і оптичних мереж з великою кількістю абонентів. Оптичний підсилювач влаштований дуже просто: він складається з легованого ербієм оптичного волокна (20-100 м.) і лазера накачування для збільшення амплітуди оптичного сигналу. Оптичне волокно може мати як кварцеву, так і фторидну основу. Оптичний підсилювач з волокном на фторидній основі забезпечує більш рівномірний розподіл сигналів – незалежно від довжини хвиль. Проте оптичний підсилювач з волокном на кварцевій основі володіє меншим рівнем шуму.

Принцип роботи, виходячи з якого функціонує оптичний підсилювач, ґрунтується на здатності волокна підсилювати сигнали за рахунок зовнішнього випромінювання, що формується лазерами накачування. Слабкий вхідний оптичний сигнал проходить через оптичний ізолятор, через блок фільтрів, потрапляє в котушку з волокном, легованим ербієм. Ця ділянка волокна піддається сильному безперервному випромінюванню лазера накачування. За наявності слабого сигналу відбувається індукований перехід атомів домішок із збудженого стану в основний, а далі розгалуджувач направляє посилений корисний сигнал у вихідне волокно. А довжини хвиль, оптичні сигнали яких збільшує оптичний підсилювач, коливаються якраз в діапазоні від 1525 до 1565 нм.

ОП в рівній мірі підсилюють як вхідний сигнал, так і шум. Крім того, вони вносять власні шуми до вихідного оптичного каналу. Одним з основних достоїнств ОП є простота конструкції, в якій переважають пасивні компоненти, що мають **низьку ціну**, і **менше число** компонентів чим у повторювача. ОП має **вищу надійність**, ніж

22. В чому перевага оптоволоконних ліній передачі над іншими?

Потреба у оптичних волокнах у порівнянні з атмосферними оптичними лініями зв'язку перш за все ґрунтується на захищеності від неконтрольованих завад. У порівнянні з дротовими мережами та радіозв'язком це також забезпечує високу надійність передачі інформації та захист від підслуховування. Перші спроби зробити оптичні лінії зв'язку, подібні до сучасних, були ще у 19 ст. (Тендаль: дугова лампа, дзеркала — освітлення підвалу). Чекальов у 1901 р. застосував порожнисті труби і дзеркала як хвилевід. У 60-і рр. з'явився термін «інтегральна оптика», що сьогодні є галуззю фізики на стику звич. оптики та квантової електроніки. На відміну від інтегральної електроніки в якості носія інформації тут виступає потік фотонів, а не електронів. В радіотехнічних колах шум зростає при збільшенні кількості підсилювачів, у оптичних лініях зв'язку та інтегральних схемах — навпаки, бо підсилюються лише когерентні (інформаційні) фотони. Наразі рекорд для оптичної лінії зв'язку без підсилювачів — 11 тис. км. В електронних лініях зв'язку та приладах важко отримати шум менше 3 дБ, в оптичних одразу маємо 0,5 дБ. Вони також забезпечують вищу швидкість та широкосмуговість, нечутливі до зовнішніх електричних полів. ВОЛЗ давно дозволяють досягати швидкостей більших 10 Гбіт/сек (є стандарт на 40, що суттєво переважає швидкість електричних мереж) із енергією на біт порядку 10^{-8} Дж. Серед інших переваг ВОЛЗ — дешевизна та надійність, що призводить до поступового витіснення коаксіалу.

Отже можна виділити такі переваги оптоволоконних ліній передачі над іншими:

- Завдяки високій несучій частоті і можливості мультиплексування, пропускна здатність (швидкість передачі) оптоволоконного каналу перевищує всі інші типи ліній передачі;
- Оптоволоконна лінія – вільна від електромагнітних завад;
- Через мале згасання світла у волокні його можна використовувати на значних відстанях без додаткового підсилення;
- Можливість непомітного перехвату інформації з оптоволоконної лінії практично неможлива.

23. З якою швидкістю (біт/сек) необхідно оцифровувати стандартний аналоговий телевізійний сигнал?

Повний телевізійний сигнал при 625 строках черезстрокової розгортки займає смугу частот $\Delta f = 6.0$ МГц- покажемо це. Маємо 625 ходів променя по екрану за 1 кадр тривалість якого $1/50$ с. Тоді тривалість одного проходу: $\tau = \frac{1}{50} / 625 = 32 \text{ mks}$. Тепер введемо поняття ширини електронного променя. По вертикал вкладається 625 ширин, а по вертикалі 800. Нам треба записати тривалість однієї плями: $\frac{32}{800} = 0,04 \text{ mks}$, тоді період $T = 0.04 \times 2 = 0,08 \text{ mks}$ звідки знаходимо, що черезстрокова розгортка займає смугу частот $\Delta f = 12.0$ МГц, але чим вище частота тим складніше працювати, тому інженери запропонували замість проходження за $1/50$ с 625 кадрів проходити лише всі непарні, а за наступні $1/50$ с всі парні, що призвело до зменшення смуги через строкової розгортки до $\Delta f = 6.0$ МГц. Вираз для швидкості оцифровки стандартного телевізійного аналогового сигналу впливає з теореми Котельникова:

$$B[\text{біт/сек}] = 2\Delta f \log_2 \left(1 + \left(\frac{A_s}{A_n} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \Delta f \log_2 \left[1 + \left(\frac{A_s}{A_n} \right)^2 \right]; \quad (1)$$

На практиці зручно користуватися інженерним варіантом цієї формули.

$$B[\text{біт/сек}] = 0,332 X[\text{дБ}] \cdot \Delta f[\text{Гц}]. \quad (2)$$

Формули (1) та (2) необхідно розуміти так: для передачі без втрати інформації аналогового сигналу, що займає смугу частот Δf та має динамічний діапазон $X[\text{дБ}]$ в цифровій формі, треба забезпечити швидкість передачі бітових імпульсів $B[\text{біт/сек}]$.

Для реалізації нормального зображення необхідно реалізувати динамічний діапазон TV сигналу $X[\text{дБ}]$ не менше 50 дБ, тоді

$$B_{TV} = 0,332 \cdot 50 \cdot 6 \cdot 10^6 = 99,6 \text{ Мбіт/сек}$$

Телевізійний стандарт швидкості передачі TV сигналу значно менший $B_{TV} = 68 \text{ Мбіт/сек}$. Чому? При створенні цифрового формату TV сигналу використовується той факт, що суміжні TV кадри часто майже не відрізняються один від одного. Немає сенсу повністю оцифровувати кожний кадр телевізійного сигналу. Таким чином теорема Котельнікова має суто рекомендаційний, якісний характер. У кожному конкретному випадку швидкість B вибирається з практичних, реальних міркувань.

24. Чому коефіцієнти відбиття оптичного випромінювання різної поляризації (ТЕ, ТМ) на границі двох прозорих діелектриків різні?

Причиною цього є різні граничні умови на границі двох діелектриків для ТЕ та ТМ хвиль, які мають ортогональні поляризації (площини коливань вектора електричного поля ортогональні), також результатом різних коефіцієнтів відбиття для цих хвиль є різні набіги фаз при їх відбитті і як результат при створенні планарного хвилеводу з ізотропних прозорих діелектриків виникнення ефекту природного двозаломлення, тобто різник коефіцієнтів заломлення для власних ТЕ і ТМ хвиль цього хвилеводу.

25. Чому точки падіння і відбиття оптичного випромінювання на границі двох прозорих діелектриків при повному внутрішньому відбитті не співпадають?

Це відбувається за рахунок явища яке називається як зміщення Госа-Хенхена. На границі повного внутрішнього відбиття стала поперечного згасання α_x прямує до нуля і тому зсув необмежено зростає, вказуючи на те, що пучок в цьому випадку проходить все далі і далі від границі розділу перш ніж повертається в перше середовище. Завдяки зсуву Госа-Хенхена відбитий пучок відбивається як би не від справжньої границі, а від еквівалентного фіктивного відбивача, який в середовищі з меншим показником заломлення дещо віддалений від границі. Як показано на рис.1 поверхня фіктивного відбивача зсунута на відстань $d = z \tan \theta / 2$ від фактичної границі.

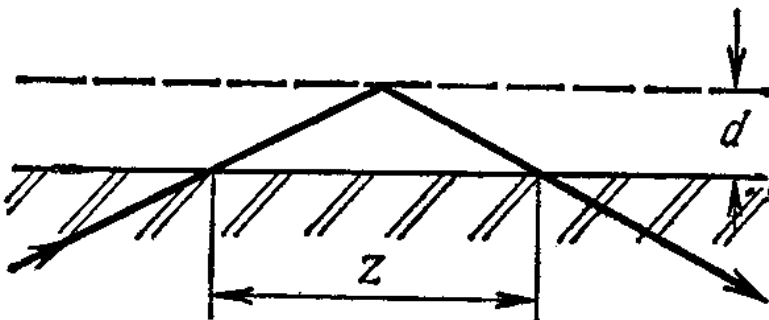


Рис. 1

При чому ця відстань різна для ТЕ та ТМ мод: Біля критичного значення кута повного внутрішнього відбиття маємо $d_{TM} > d_{TE}$, а при кожному падінні, для якого $\theta \rightarrow 0$, маємо $d_{TM} < d_{TE}$. Отже за рахунок ефекту Госа-Хенкена частина випромінювання при повному внутрішньому відбитті потрапляє в друге середовище збуджуючи в

ньому коливання атомів, що в результаті веде до утворення ближнього експоненційно затухаючого поля і не співпадіння точки падіння відбиття оптичного випромінювання.

26. Чому оптичне волокно, виготовлене з ізотропного діелектрика, стає анізотропним середовищем для світла, що в ньому розповсюджується?

Тому, що при утворенні трьох шарової структури волокна з трьох анізотропних шарів (покрівельний шар, хвилеводний шар, підкладка) виникає ефект природного двозаломлення між ТЕ та ТМ власними модами, що проявляється у різниці між ефективними коефіцієнтами заломлення $\Delta N_m = N_{mTE} - N_{mTM}$, де $N_m = n_f \cos \theta_m$. Причиною появи цього ефекту є різні граничні умови для даних мод, що викликають різні коефіцієнти відбиття від границі і відповідно різні фазові зсуви при відбитті.

27. В яких межах може змінюватись фазова швидкість хвилеводних мод в оптичному волокні?

Оскільки ефективний коефіцієнт заломлення власних ТЕ і ТМ мод хвилеводу $N_m = n_f \cos \theta_m$ лежить в межах: $n_s \leq N_m \leq n_f$, а зв'язок між фазовою швидкістю і коефіцієнтом заломлення:

$$V_{ph} = \frac{c}{n}, \text{ тоді межі зміни фазової швидкості оптичних мод в волокні: } \frac{c}{n_f} \leq V_{ph} = \frac{c}{N_m} \leq \frac{c}{n_s}.$$

28. Які фактори обмежують максимальну швидкість передачі інформації в багатомодовому і одномодовому волокнах?

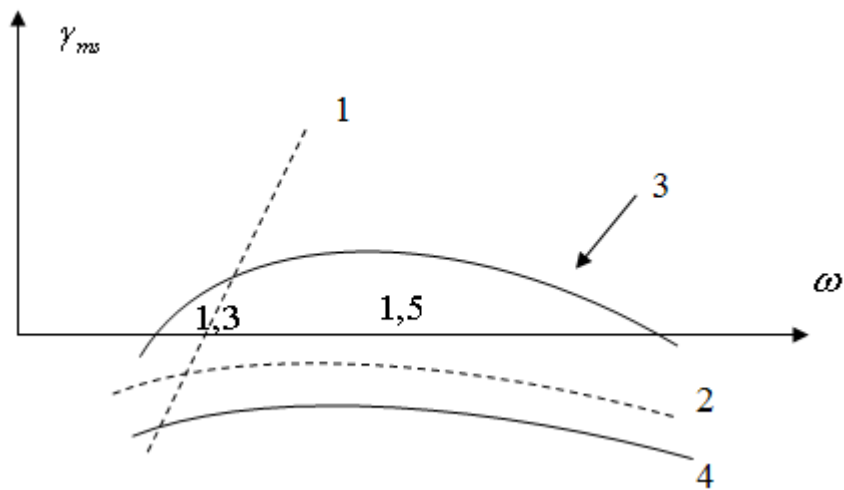
В багатомодовому волокні тами факторами є: міжмодова (різні коефіцієнти відбиття, а отже і фазові швидкості для мод різного порядку), поляризаційна (різні коефіцієнти відбиття і фазові швидкості для ТЕ і ТМ мод одного порядку), хвилеводна (різні довжини хвиль у різних мод) і матеріальна (залежність $n(\lambda)$) дисперсія. Для одномодового волокна це матеріальна і поляризаційна дисперсія (інші зникають бо маємо лише одну моду).

29. Чому оптичне волокно з мінімальним згасанням світла і мінімальним коефіцієнтом дисперсії (DSF) на довжині хвилі $\lambda = 1.5$ мкм не знайшло широкого застосування для передачі інформації?

Даний тип волокна не використовується бо тут ідеальний випадок коли несуча одна, але насправді по волокну зараз женуть кілька десятків несучих хвиль, а оскільки в даному типі волокна відсутнє поглинання для різних мод і не майже немає різниці в їх фазових швидкостях і це є ідеальними умовами для виникнення нелінійних ефектів, що на практиці унеможливорює передачу інформацію на далекі відстані.

30. Які шляхи зменшення порогу нелінійних явищ при розповсюдженні в одномодовому волокні мультиплексованого оптичного сигналу?

Основним шляхом зменшення порогу нелінійних явищ в оптичному волокні є застосування NZDSF (Non Zero Dispersions shifted fiber) - волокна з використанням техніки створення штучного профіля за рахунок створення матеріальної дисперсії рис. 1



Саме матеріальна дисперсія тут дозволяє розсунути моди зменшивши їх взаємодії і як результат запобігти виникненню нелінійних явищ.

Рис.1 Залежність коефіцієнту матеріальної дисперсії від частоти для NZDSF волокна: 1 – крива матеріальної дисперсії, 2 - крива хвильової дисперсії, 3 – рузультуюча хроматична дисперсія, 4 - рузультуюча крива

31. Що таке чотирьоххвильове змішування і його вплив на інформаційний сигнал?

Пі дією зовнішнього електричного поля середовище поляризується: $P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \dots$ - для ізотропного середовища. В кристалах, що мають цент симетрії враховують непарні доданки і головну роль серед нелінійних доданків грає кубічний $\epsilon_0 \chi^{(3)} E^3$. За рахунок кубічної не лінійності маємо чотирьох хвильовий процес (взаємодія 3-х хвиль дає 4-ту результуючу) – цей процес також називають чотирьох хвильовим змішуванням. Це найрунівніший процес оскільки крім мод на основних частотах маємо моди на комбінаційних частотах: $\omega_4 = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3$ - ці нові несучи можуть накладатись на основні несучи і розташовуватись між ними, що веде до руйнування самої ідеї мультиплексування.

32. Причини виникнення нелінійних процесів в оптичному волокні?

Пі дією зовнішнього електричного поля середовище поляризується: $P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \dots$ - для ізотропного середовища. В нецентросиметричних кристалах непарні доданки зникають, а в центросиметричних вони відіграють головну роль. Основними причинами виникнення не лінійності є нелінійний відгук середовища на дію випромінювання, при чому для того, щоб цей процес не був нехтовно малим потрібні великі потужності випромінювання. Також не лінійність починає себе проявляти в багато модових волокна DSF де відсутнє поглинання мод і відбувається їх нелінійна взаємодія, а також нелінійні ефекти проявляються при збільшенні довжини волокна. Основними чинниками, що викликають нелінійні явища в волокні є : 1) Висока швидкість передвачі оптичного цифрового потоку, 2) Використання хвиле водного мультиплексування (особливого щільного), 3) Використання спектрального діапазону де маємо мінімум дисперсії і поглинання в результаті несучі розповсюджуються майже з однаковими фазовими швидкостями і взаємодіють між собою, що може привести до ефекту фазового синхронізму, 4) Використання одномодового волокна з малою апертурою серцевини і великою питомою потужністю сигналу.

33. **Рохрахувати числову апертуру стандартного одномодового волокна.**

Для зменшення ефекту природного двозаломлення в одномодовому волокні оболонку і сердцевину роблять з досить близькими коефіцієнтами заломлення. Наприклад для кварцового волкна це (кварц і кварц з домішками): $n_f = 1,51, n_s = 1,5$, тоді числова апертура:

$$N_A = \sqrt{n_f^2 - n_s^2} = \sqrt{1,51^2 - 1,5^2} \approx 0,17.$$

