Хроматична дисперсія.

Матеріальна дисперсія інформаційного сигналу.

При відсутності міжмодової дисперсії основний вплив на уширення інформаційного сигналу створює матеріальна дисперсія. Це добре відомий в оптиці фундаментальний тип хроматичної дисперсії, пов'язаний з залежністю показника заломлення матеріалу від довжини хвилі. Якщо вплив міжмодової дисперсії на швидкість передачі інформації можна звести до нуля, то матеріальну дисперсію усунути принципово неможливо – це фундаментальний параметр конкретного діелектрика. Єдиний шлях боротьби з цим типом дисперсії – вивчити її поведінку в матеріалі оптичного інформаційного каналу.

В основу теорії дисперсії діелектриків покладена поведінка пружньо-зв′язаного заряду матеріалу в зовнішньому високочастотному електричному полі. Важливий висновок цієї теорі - залежність реальної та уявної частини покажчика заломлення ідеального ізотропного діелектрика від частоти (Рис.1) .

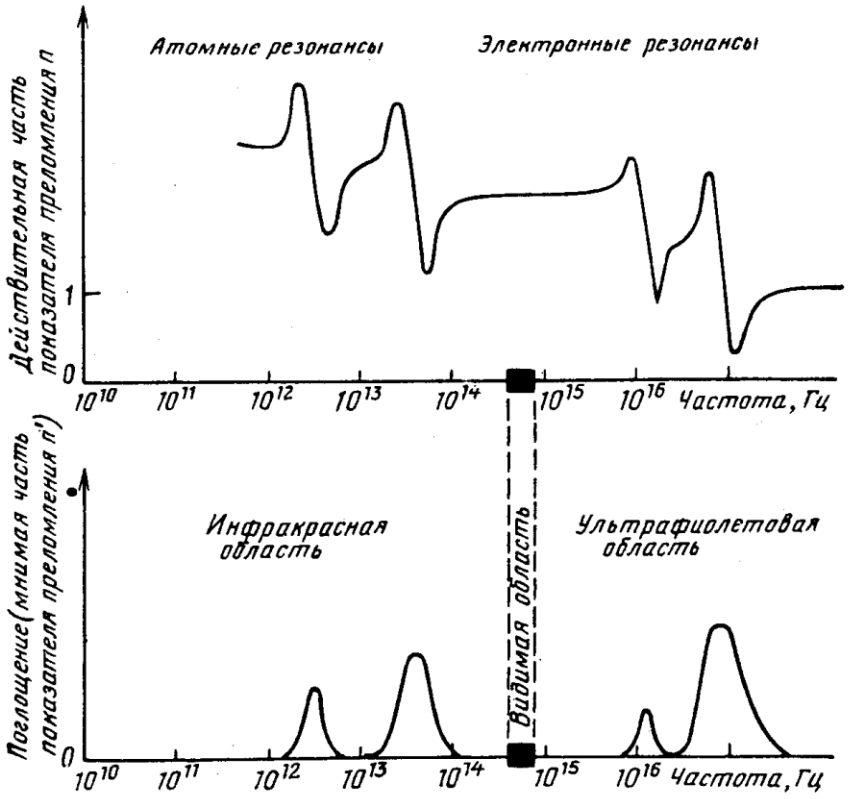


Рис.1 Схематичне зображення залежностей від частоти дійсної та уявної частин показника заломлення діелектричного матеріалу.

Теоретичні залежності від частоти реальної та уявної частин показника заломлення ідеального діелектрика добре співпадають з експериментальними вимірами дисперсії та поглинання реального діелектрика в широкому діапазоні частот. В "оптичній" частині спектральної залежності, далекій від атомних та електронних резонансів, Re n повільно збільшується з ростом частоти електричного поля і, таким чином, повільно зменшується з ростом довжини хвилі. Така спектральна поведінка показника заломлення характерна для більшості діелектриків. Таким чином, в оптичному діапазоні частот похідна $dn/d\lambda$ для більшості діелектриків буде малою величиною і від'ємною за знаком. З спектральних залежностей (Рис.1) добре видно, що має місце дуже тісний зв'язок між дисперсією та поглинанням .

Цей зв'язок, як відомо, носить фундаментальний характер. У будь-якій лінійний, стаціонарній, фізично реалізуємій системі, в якій лімітована по величині вхідна дія породжує такий же лімітований по величині вихідний відгук, уявна частина передаточної функції може бути однозначно визначена по відомій реальній частині передаточної функції і навпаки. В фізиці ці співвідношення відомі як співвідношення Крамерса-Кроніга.

В волоконній оптиці базовим матеріалом як для серцевини так і для оболонки являється плавлений кварць. Тому всі подальші оцінки матеріальної дисперсії будуть стосуватися виключно цього матеріалу.

На сьогодняшній день, використовуючи чистий кварць як матрицю, розроблено потужню технологію виготовлення оптичних волокон самого різного призначення.

Покажемо далі як впливає матеріальна дисперсія на уширення інформаційного сигналу. В оптиці явище дисперсії пов'язують з величиною $dn/d\lambda$. Покажемо, що за уширення інформаційного бітового імпульсу відповідає не величина $dn/d\lambda$, а $\lambda^2 \cdot (d^2n/d\lambda^2)$.

Як відомо, фазова швидкість гармонійного сигналу в необмеженому середовищі є $V_ф = c/n = \varpi/k$, де $k = \frac{\varpi}{c} n$ - хвилевий вектор оптичної хвилі в необмеженому середовищі. Групова швидкість , з якою пов'язують швидкість руху максимуму огинаючої сигналу, визначається виразом

$$V_{гр.} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{dk/d\omega} = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}} \qquad (1)$$

Оскільки показник заломлення (фазовий, або звичайний) визначається як $n = c/V_Ф$, аналогічно можна ввести поняття групового показника заломлення

$$n_{гр} = c/V_{гр} = n + \varpi \cdot \frac{dn}{d\varpi} \qquad (2)$$

Надалі при аналізі впливу матеріальних параметрів середовища на дисперсійні властивості сигналу більш коректно користуватися груповим показником заломлення. В оптиці для аналізу дисперсійних властивостей сигналу зручно користуватися не частотою, а довжиною хвилі. Використовуючи очевидний вираз $\frac{dn}{d\varpi} = \frac{dn}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{d\varpi}$, отримаємо вираз для групового показника заломлення в залежності від довжини хвилі:

$$n_{гр} = n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \qquad (2')$$

На Рис.2 наведені дисперсійні залежності звичайного (фазового) і групового показників заломлення в кварцевому склі.

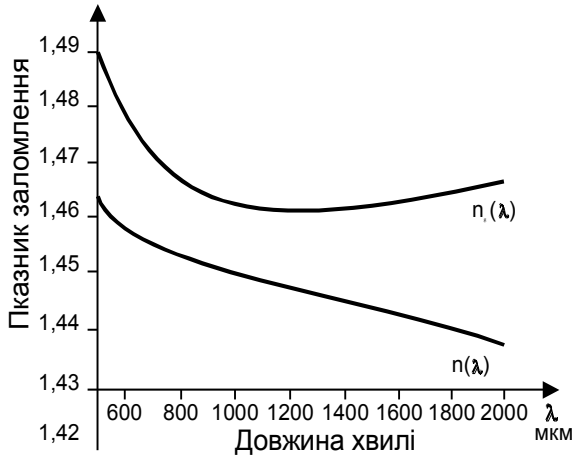


Рис.2. Дисперсійна залежність показників заломлення в кварці.

Суттєво, що залежності від довжини хвилі звичайного і групового показників заломлення різні. Показник заломлення в околиці довжини хвилі 1300 нм має особливу точку – ***точку перегину!***

Дамо оцінку часу проходження t світловим імпульсом деякої відстані l в дисперсійному матеріалі з показником заломлення $n(\lambda)$

$$t = \frac{l}{V_{гр}} = \frac{n_{гр} \cdot l}{c} = \left[n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right] \cdot \frac{l}{c} \qquad (3)$$

Якщо джерело оптичного випромінювання має ширину спектру $\Delta\lambda$ відносно λ і, якщо середовище дисперсійне, то світловий імпульс уширюється в процесі розповсюдження і реєструється на виході на протязі інтервалу часу $\Delta t = t_{dis}^{mat}$, що визначається співвідношенням:

$$\Delta t = t_{dis}^{mat} = \frac{dt}{d\lambda}\cdot\Delta\lambda = \frac{l}{c}\cdot\frac{dn_{гр}}{d\lambda}\cdot\Delta\lambda = \frac{l}{c}\left[\frac{dn}{\lambda} - \frac{dn}{d\lambda} - \lambda\frac{d^2n}{d\lambda^2}\right].$$

Таким чином уширення інформаційного імпульсу внаслідок матеріальної дисперсії визначається виразом:

$$\tau_{dis}^{mat} = -\frac{l}{c}\lambda\frac{d^2n}{d\lambda^2}\Delta\lambda \qquad (4)$$

На практиці ширину спектру $\Delta\lambda$ джерела випромінювання визначають як діапазон довжин хвиль в рамках якого потужність випромінювання перевищує 50 % від максимального значення. Зручно використовувати відносну ширину спектру випромінювання, яку позначають як γ.

$$\gamma = \left|\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right| = \left|\frac{\Delta\omega}{\omega}\right|$$

Таким чином, після проходження світловим імпульсом відстані l в дисперсійному середовищі імпульс розширюється, причому його тривалість на рівні половинної потужності:

$$\tau_{dis}^{mat} = \frac{l}{c}\cdot\gamma\cdot\left|\lambda^2\cdot\frac{d^2n}{d\lambda^2}\right| = \frac{l}{c}\cdot\gamma\cdot Y_{mat} \qquad (5)$$

В виразі (5) $Y_{mat} = \lambda^2\frac{d^2n}{d\lambda^2}$ - коефіцієнт матеріальної дисперсії речовини.

На практиці замість безрозмірного коефіцієнта дисперсії часто використовують аналогічний за спектральною залежністю параметр речовини – матеріальна дисперсія $D_{mat} = \frac{\lambda}{c}\cdot\frac{d^2n}{d\lambda^2}[\frac{псек}{нм\cdot км}]$.

На Рис.3 (а,б,в) показані залежності матеріальної дисперсії D_{mat} чистого кварцю від довжини хвилі для різних типів волокон. Характерно, що криві для всих типів волокон проходить через нуль при $\lambda = 1300нм$. Ця довжина хвилі в волоконній оптиці носить назву **хвилі нульової дисперсії.** На спектральній залежності показника заломлення (Рис.2) вона відповідає точці перегину.

Визначимо тепер ширину смуги пропускання W, яку може забезпечити інформаційний канал з матеріальною дисперсією Y_{mat} або з коефіцієнтом дисперсії D_{mat}.

$$W = \frac{0.5}{\tau_{dis}^{mat}} = \frac{c}{2\gamma Y_{mat}}[Мгц\cdot км]. \qquad (6)$$

З виразу (6) випливає, що ширина смуги пропускання обернено пропорційна відносній ширині джерела випромінювання та величині коефіцієнта матеріальної дисперсії.

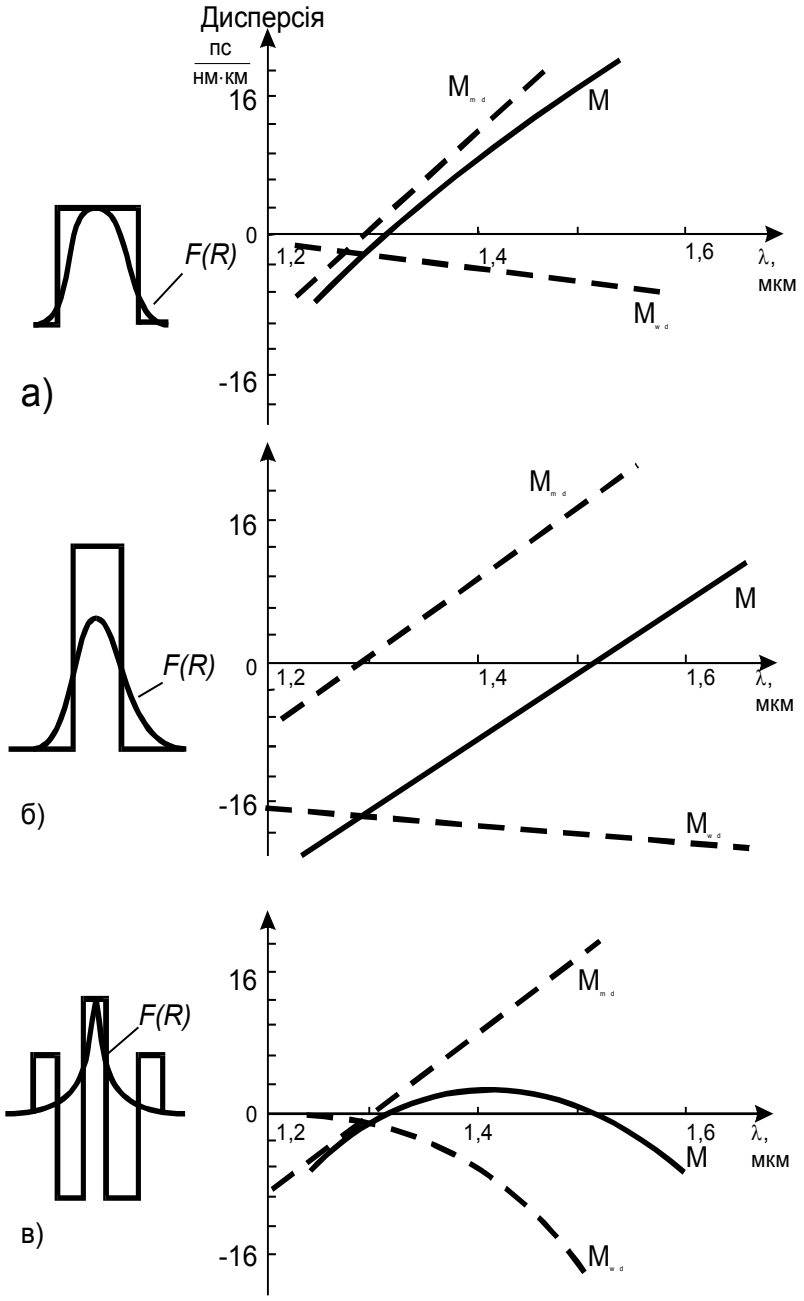


Рис.3. Залежність хроматичної дисперсії від форми профілю показника заломлення.

Зробимо оцінку впливу матеріальної дисперсії на інформаційні можливості оптичного каналу зв'язку, побудованому на одномодовому волокні, і в якому використовуються два випромінювачі на довжині хвилі $\lambda = 850 нм$: світлодіод ($\Delta\lambda = 30 нм$) і напівповідниковий лазер ($\Delta\lambda = 3 нм$). Коефіцієнт матеріальної дисперсії на цій довжині хвилі $Y_{mat} = 0.021$ [1]. При використанні світлодіода інформаційний імпульс уширюється на довжині лінії в один кілометр на час

$(\tau_{dis}^{mat}/l)_{світ.діод} = \frac{\gamma_{світ.діод}}{c} \cdot Y_{mat} = 2.45[\frac{нсек}{км}]$. Для лазера цей час на порядок менший $(\tau_{dis}^{mat}/l)_{лазер} = \frac{\gamma_{лазер}}{c} \cdot Y_{mat} = 0.245[\frac{нсек}{км}]$. Максимальні частоти модуляції , які можна реалізувати в каналах зв'язку з такими параметрами згідно формули (6) є: $W_{світ.діод} \approx 200[Мгц \cdot км]$, $W_{лазер} \approx 2000[Мгц \cdot км]$.

Хвилеводна та профільна дисперсії.

Наступним по величині впливу на уширення інформаційного сигналу дисперсійним чинником є хвилеводна дисперсія. Цей вид хроматичної дисперсії є наслідком залежності ефективного показника заломлення від довжини хвилі, власне від $\Delta\lambda$ випромінювача для конкретної лінії зв'язку. Для чисельної оцінки цього виду хроматичної дисперсії необхідно в виразі (5) для матеріальної дисперсії (5) взяти другу похідну не від показника заломлення, а від ефективного показника заломлення хвилеводної моди HE_{11}. Таким чином, цей вид дисперсії враховується виразом $\tau_{dis}^{wave} = \frac{l}{c} \cdot \gamma \cdot \left| \lambda^2 \cdot \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \right|$. Процедура знаходження другої похідної від дисперсійного рівняння є доволі громіздкою операцією [2], тому , посилаючись на розрахунки , що зроблені в [2], наведемо спектральну залежність хвилеводної дисперсії (Рис.3а) в одномодовому волокні з ступінчатим профілем показника заломлення. Як видно з залежності, хвилеводна дисперсія у всьому спектральному діапазоні , що використовується в оптоелектроніці, має від'ємну величину. Хвилеводна та матеріальна дисперсії визначають разом хроматичну дисперсію (суцільні криві на Рис.3 а,б,в) того чи іншого типу волокна. Матеріальна дисперсія не пов'язана з хвилеводним характером світла і тому для всіх типів волокон її спектральна залежність ідентична. Хвилеводна дисперсія суттєво залежить від профілю показника заломлення і може суттєво впливати на результуючу хроматичну дисперсію. Власне технологія штучного створення необхідного профілю показника заломлення в волокні дає можливість синтезувати волокна з необхідними параметрами (дивись розділ "Типи оптичних волокон")

Поляризаційна дисперсія

Цей вид дисперсії не відноситься до хроматичної дисперсії, а пов'язаний з особливостям формування власних мод в хвилеводних структурах. В одномодовому волокні поширюються дві циркулярно поляризовані власні моди (ліва і права) з ортогональними поляризаціями. Поляризаційна модова дисперсія τ_{dis}^{pol} - виникає внаслідок різної швидкості поширення цих двох взаємно ортогональних власних поляризацій основної моди. Коефіцієнт питомої

поляризаційної дисперсії Т нормується в розрахунку на 1 км і має розмірність (пс/(км)$^{1/2}$), і τ_{dis}^{pol} росте з ростом відстані за законом:

$$\tau_{pmd} = T\sqrt{L} \quad . \qquad (7)$$

Через невелику величину цей тип дисперсії може проявлятися винятково в одномодовому волокні, причому саме в тих випадках, коли використовується передавання широкосмугового сигналу (смуга пропускання 2,4 Гбіт/с і вище) з вузькою спектральною смугою випромінювання 0,1 нм і менше. У цьому випадку матеріальна дисперсія стає одного порядку з поляризаційною модовою дисперсією. Це найбільш неконтрольований тип дисперсії, може виникати при різних зовнішніх впливах на оптичне волокно : пружні навантаження, землетруси, великі градієнти температур, зміна атмосферного тиску і т.ін.

Література

1. Гауєр. Волоконная оптика
2. Коток В.Б. Основи волоконної оптики.