

РОЗРАХУНОК ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТНОГО КВАРЦОВОГО СКЛА

У виробництві оптичних компонентів волоконно-оптичних систем передачі інформації застосовують скло із кварцу, леговане домішками певних речовин. Вибором типу домішки і величини її концентрації досягають потрібного значення показника заломлення скла на базі кварцу. Для розробки волоконно-оптичних компонентів з покращеними оптичними характеристиками потрібно знати спектральні залежності показника заломлення в кварцовому склі за довільної концентрації домішок. Пропонуються методи розрахунку показника заломлення в компонентному кварцовому склі. Коректність розрахункових алгоритмів підтверджено відомими з публікацій експериментальними результатами.

Ключові слова: кварцове скло, показник заломлення, групова швидкість, дисперсія, оптичний діапазон хвиль, коефіцієнти Селмейєра.

Вступ

Для виробництва оптичних компонентів волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) використовують високоякісні стекла на базі плавленого кварцу (хімічна формула SiO_2), леговані різними речовинами, наприклад окису бору (B_2O_3), окису германію (GeO_2), фосфорного ангідриду (P_2O_5), фтору (F) тощо. Германій та фосфор підвищують величину n показника заломлення скла на основі кварцу, а фтор та бор – знижують.

Для конструювання волоконно-оптичних компонентів ВОСП з покращеними оптичними характеристиками потрібно знати спектральні залежності $n=n(\omega)$ показника заломлення (ПЗ) в компонентному кварцовому склі. Експериментальні результати з вимірювання ПЗ такого скла отримано лише для окремих значень концентрації відповідних домішок до кварцу. Тому актуальним є створення математичної моделі розрахунку спектральних залежностей ПЗ в компонентному кварцовому склі при довільній величині концентрацій легуючих домішок. Зокрема, застосування такої моделі може бути ефективним при розробці конструктивних параметрів оптичного волокна для волоконно-оптичного лінійного тракту (ВОЛТ) з підвищеною пропускною спроможністю, а також і при розробці волокон для пристроїв компенсації хроматичної дисперсії, що накопичується у ВОЛТ.

1. Опис дисперсії об'ємного діелектрика тричленною формулою Селмейєра

Отримані на базі електронної теорії дисперсії теоретичні результати щодо дисперсійних властивостей діелектричного середовища – спектральної залежності його ПЗ, добре узгоджуються із експериментальними результатами з вивчення дисперсії в матеріалах, які використовуються для виготовлення оптичних компонентів ВОСП.

В основу класичної теорії дисперсії покладена дія електромагнітних хвиль (ЕМ-хвиль) оптичного діапазону на зв'язані електрони атомів з урахуванням їхнього гальмування (дисипації енергії). Кожна молекула діелектрика розглядається як система загасаючих гармонічних осциляторів з різними частотами власних коливань. Іони значно масивніші електронів і здійснюють коливання лише під дією низькочастотного (інфрачервоного) випромінювання. Електрична складова поширюваної в діелектрику ЕМ-хвилі поляризує його молекули, внаслідок чого їхні електронні структури починають коливатися з частотою ω хвилі. В результаті коливання випромінюються хвилі тієї самої частоти, котрі інтерферують із первинною хвилею. Через інерційність коливань електронних структур вторинне випромінювання має накопичуване з пройденою відстанню запізнення за фазою, тому результуюча хвиля отримує сумарний фазовий зсув відносно первинної хвилі, і її фазова швидкість $v_\phi=c/n$ залежатиме від частоти ω – середовище матиме дисперсію. Отже, величина ПЗ середовища з дисперсією залежатиме від частоти хвилі, $n=n(\omega)$.

Всі реальні середовища мають малу чи велику дисперсію, яка безпосередньо пов'язана з поглинанням енергії ЕМ-хвилі при її поширенні. Діапазону оптичної прозорості

кварцового скла (мале поглинання енергії ЕМ-хвиль) належить частина оптичного спектра – частотний діапазон $\sim 1,82 \cdot 10^{14} \dots 3,66 \cdot 10^{14}$ Гц (відповідний діапазон довжин хвиль у вакуумі $\lambda \sim 0,82 \dots 1,65$ мкм). Саме цей діапазон і використовується волоконно-оптичним зв'язком. Експериментальні результати з вимірювання спектральної залежності $n(\lambda)$ показника заломлення в об'ємних зразках компонентного кварцового скла з високою точністю апроксимуються у діапазоні довжин хвиль оптичної прозорості скла тричленною формулою Селмейєра, в якій враховано два електронні резонанси в ультрафіолетовій частині спектра та один атомний резонанс – в інфрачервоній, [1, 2]:

$$n^2 - 1 = \sum_{j=1}^3 \frac{A_j \lambda^2}{\lambda^2 - l_j^2}, \quad (1)$$

де $\lambda = 2\pi c/\omega$ – довжина електромагнітної хвилі у вакуумі; A_j та l_j – постійні для даного діелектрика коефіцієнти Селмейєра, які знаходяться підгонкою заміряних значень ПЗ в об'ємному зразку скла.

Табл. 1 містить значення коефіцієнтів Селмейєра, знайдені Малітсоном в результаті вимірювання ПЗ в об'ємних зразках із чистого плавленого кварцу (SiO_2). Ці значення взято із монографії Адамса, [2]. Зауважимо, що, наприклад, значення 9,0 мкм резонансної довжини хвилі, яке відповідає характерному періоду коливань в міжатомному зв'язку окису Si–O, не узгоджується зі значенням $l_3 \approx 9,9$ мкм, використовуваним у формулі Селмейєра. Це можна пояснити двома причинами. По-перше, формула (1) дає найкращу відповідність з результатами експерименту в обмеженій ділянці спектра, досить далекій від резонансів. По-друге, апроксимація містить лише три резонансні складові, натомість реально існує деяка повніша множина резонансів, вплив яких потрібно підсумувати. Тому величини l_j є усередненими значеннями резонансних довжин хвиль.

Легування кварцу різними домішками веде до появи додаткових резонансів, в результаті чого змінюються коефіцієнти Селмейєра. Їх величини, отримані експериментально Кобаяші та Флемінгом, приведено в монографії [2] і для окремих значень концентрацій певних домішок відображено в табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів Селмейєра в залежності від концентрації легувальної домішки до кварцу SiO_2 , визначені вимірюванням ПЗ в об'ємних зразках компонентного скла

№ пп	Склад компонентного скла, в молярних %	A_1	A_2	A_3	l_1 , мкм	l_2 , мкм	l_3 , мкм
1	100% SiO_2 (за Малітсоном, [2])	0,6961663	0,4079426	0,8974794	0,0684043	0,1162414	9,896161
2	3,1% GeO_2 ; 96,9% SiO_2 (за Кобаяші, [2])	0,7028554	0,4146307	0,8974540	0,0727723	0,1143085	9,8961615
3	5,8% GeO_2 ; 94,2% SiO_2 (за Кобаяші, [2])	0,7088876	0,4206803	0,8956551	0,0609053	0,1254514	9,8961619
4	7,9% GeO_2 ; 92,1% SiO_2 (за Кобаяші, [2])	0,7136824	0,4254807	0,8964226	0,0617167	0,1270814	9,896161
5	13,5% GeO_2 ; 86,5% SiO_2 (за Флемінгом 1978р, [2])	0,711040	0,451885	0,704048	0,064270	0,129408	9,425478
6	1% F; 99% SiO_2 (за Флемінгом, [2])	0,691116	0,399166	0,890423	0,068227	0,116460	9,993707
7	13,3% B_2O_3 ; 86,7% SiO_2 (за Флемінгом, [2])	0,690618	0,401996	0,898817	0,061900	0,123662	9,098960

Після двократного диференціювання по λ обох частин формули (1) отримуємо вираз:

$$M = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_{gp}(\lambda)} \right) = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{N}{c} \right) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} = \frac{1}{\lambda c} \left\{ -\frac{4\lambda^4}{n} \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^3} + N \left(\frac{N}{n} - 1 \right) \right\}, \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км}), \quad (2)$$

де M – питома хроматична дисперсія однорідного діелектрика (величина середньоквадратичного значення в пікосекундах розширення імпульсу (у вигляді хвильового пакету на однорідних плоских хвилях) за його руху в діелектричному середовищі, яка припадає на одиницю середньоквадратичного значення ширини спектра імпульсу та на одиницю шляху його пробігу в середовищі); $v_{gp}(\lambda)$ та $1/v_{gp}(\lambda)$ – групова швидкість хвильового пакету на центральній довжині хвилі λ (швидкість перенесення енергії ЕМ-хвилі) та відповідно тривалість її погонного групового пробігу в об’ємному середовищі; N – груповий показник заломлення діелектрика

$$N = \frac{v_{gp}(\lambda)}{c} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} = n + \frac{\lambda^2}{n} \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2}. \quad (3)$$

Після диференціювання спектральної залежності (2) хроматичної дисперсії одержимо вираз для дисперсії другого порядку (крутизни або нахилу дисперсії), який з урахуванням формули (3) можна записати у такий спосіб:

$$S_M = \frac{dM}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda^2 c} \left\{ \frac{8\lambda^4}{n} \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2 (l_i^2 + 2\lambda^2)}{(\lambda^2 - l_i^2)^4} - \left(\frac{N}{n} - 1 \right) \left(2 - \frac{N}{n} N \right) \right\} + 2 \frac{N}{n} \frac{M}{\lambda}, \text{ пс}/(\text{нм}^2 \cdot \text{км}). \quad (4)$$

Для скла на основі кварцу (SiO_2), легованого різними домішками, розраховані за формулами (1) і (3) спектральні залежності показника заломлення n і групового ПЗ n_{gp} зображено на рис. 1 у вигляді графіків.

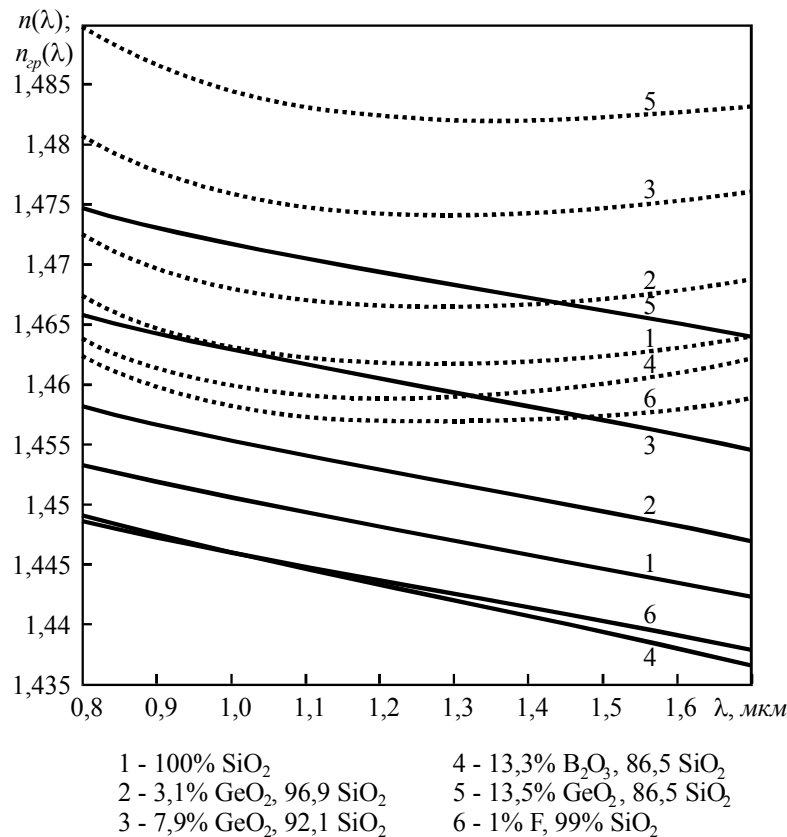


Рис. 1. Спектральна залежність ПЗ n (суцільні лінії) та групового ПЗ n_{gp} (пунктир) для скла на основі кварцу (SiO_2) за різних концентрацій легувальних домішок (в молях)

На рис. 2 показано залежність ПЗ кварцового скла від концентрації легувальної домішки, германію чи фтору. В розрахунках використано визначені з експериментів величини коефіцієнтів Селмейера, табл.1. Через більшу концентрацію домішки V_2O_5 , порівняно з випадком домішки F (графіки 4 та 6 на рис. 1), значно підвищуються втрати енергії ЕМ-хвилі при її поширенні на поглинання та Релеєві розсіяння, що є однією з причин застосування переважно домішки фтору для зниження ПЗ кварцу SiO_2 .

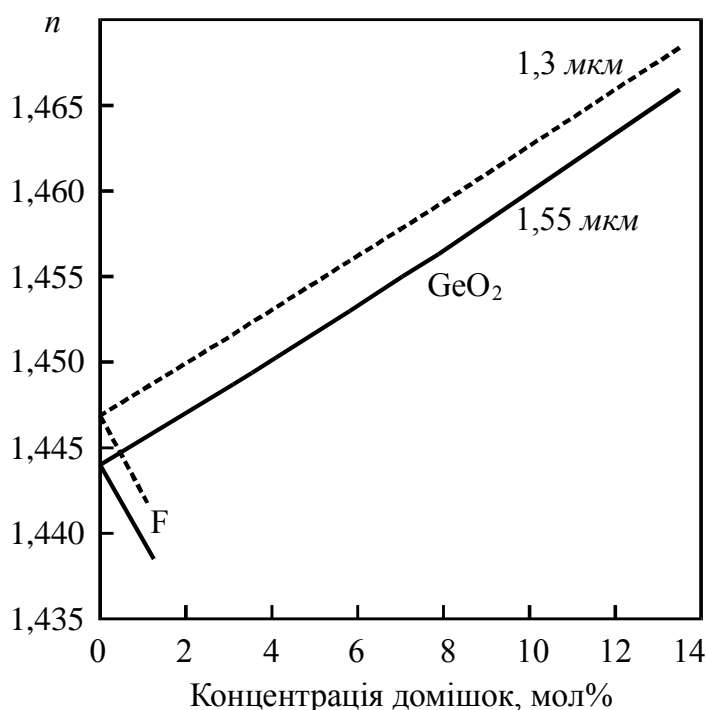


Рис. 2. Залежність показника заломлення скла на основі плавленого кварцу (SiO_2) від концентрацій домішок GeO_2 та F (в молях), на довжині хвилі 1,3 та 1,55 мкм

2. Методи розрахунку дисперсійних характеристик скла на основі кварцу за довільної концентрації легуючих домішок

Для розрахунку за формулою (1) спектральних залежностей ПЗ в кварцовому склі, потрібно знати коефіцієнти Селмейера за довільної концентрації легуючих домішок.

Одним із способів знаходження наближених значень коефіцієнтів Селмейера як функцій величини C концентрації домішки, $A_j(C)$, $I_j(C)$, може бути використання інтерполяційних многочленів. За вузлові точки інтерполяції беруться визначені вимірюванням ПЗ в об'ємних зразках компонентного скла значення коефіцієнтів за окремих концентрацій обраної домішки, [2]. Проведений числовий аналіз показав, що інтерполяція коефіцієнтів Селмейера за їхніми відомими величинами для трьох окремих значень концентрацій домішки GeO_2 (три вузлові точки для кожного з 6-ти коефіцієнтів, з урахуванням чистого плавленого кварцу, а саме: 0% GeO_2 , 3,1% GeO_2 та 7,9% GeO_2 , – див. табл. 1), уможливорює достатню точність розрахунку за формулами (1), (2), (3), (4) дисперсійних характеристик компонентного скла на базі плавленого кварцу, легованого домішкою окислу германію. У діапазоні довжин хвиль $\sim 0,82 \dots 1,65$ мкм вірними виявились: 4-та – 5-та значуща цифра показника заломлення; 4-та – 5-та значуща цифра групового показника заломлення; 2-га значуща цифра питомої хроматичної дисперсії; 2-га значуща цифра величини нахилу спектральної залежності дисперсії.

При виборі більшої кількості вузлових точок мають місце локальні сплески в поведінці розрахованих характеристик компонентного скла (відхилення від поведінки зображених на рис. 1 і на рис. 2 графічних залежностей, розрахованих за експериментальними даними).

Аналіз результатів розрахунків приводить до висновку: інтерполяція є коректною при виборі вузлових точок, що відповідають експериментальним даним Кобаяші, див. табл. 1.

Здобуті в результаті вказаної інтерполяції формули для розрахунку коефіцієнтів Селмейєра в залежності від величини C концентрації (в молях) легувальної домішки GeO_2 :

$$A_1(C) \approx 0,6961663 + 0,002119377 \cdot C + 0,0000123862 \cdot C^2; \quad (5)$$

$$A_2(C) \approx 0,4079426 + 0,002117048 \cdot C + 0,0000130336 \cdot C^2; \quad (6)$$

$$A_3(C) \approx 0,8974794 + 0,0000729093 \cdot C - 0,0000261622 \cdot C^2; \quad (7)$$

$$I_1(C) \approx 0,0684043 + 0,0028657506 \cdot C - 0,000469909 \cdot C^2; \quad (8)$$

$$I_2(C) \approx 0,1162414 - 0,001912385 \cdot C + 0,0004157623 \cdot C^2; \quad (9)$$

$$I_3(C) \approx 9,896161 + 0,000000265 \cdot C - 0,0000000336 \cdot C^2. \quad (10)$$

Що стосується кварцового скла з домішкою фтору, то коректною є лінійна інтерполяція коефіцієнтів Селмейєра, з використанням їхніх значень, отриманих експериментально у випадках (див. табл. 1): 1% мольної концентрації домішки F; 0% F (чистий кварц).

В інший спосіб, за малих значень концентрації легувальних домішок, може бути коректним застосування лінійної залежності діелектричної проникності (ДП) компонентного скла від величин концентрації легувальних домішок.

Припустимо, що величина $\varepsilon = n^2$ діелектричної проникності компонентного кварцового скла залежить лінійно від мольної частки кожної компоненти суміші. Певною мірою це припущення обґрунтовується тим, що дисперсію можна розглядати як наслідок залежності діелектричної сприйнятливості середовища, $\chi = \varepsilon - 1$, від частоти змінного зовнішнього електромагнітного поля, яке викликає електронну поляризацію середовища – в діапазонах частот видимого та ультрафіолетового випромінення, і молекулярну (іонну) поляризацію – під дією низькочастотного (інфрачервоного) випромінення. При цьому в діелектрику збуджуються і домінують вимушені коливання зовнішніх, найбільш слабо зв'язаних електронів молекул і атомів (оптичних електронів), кількість яких визначається концентрацією атомів (молекул) кожної компоненти скла.

Розглянемо окремих випадок компонентного скла з використанням суміші лише двох компонентів (у найпоширеніших випадках це $\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$ чи $\text{SiO}_2 + \text{F}$). Для величини $\varepsilon = n^2$ діелектричної проникності такого скла застосуємо вираз [3]:

$$n^2 = \varepsilon = c_\delta \cdot n_\delta^2 + c_s \cdot n_s^2, \quad (11)$$

де c_s , c_δ – відносне значення концентрації в молях відповідно базового плавненого кварцу і домішки до нього іншої компоненти, причому

$$c_\delta + c_s = 1; \quad (12)$$

n_s , n_δ – показники заломлення кожної із компонентних речовин окремо.

Перетворимо формулу (11) так, щоб скористатися експериментальними даними.

Для основної компоненти (SiO_2) спектральна залежність ПЗ, $n_s(\lambda)$, задається тричленною формулою Селмейєра, для якої коефіцієнти Селмейєра відомі (табл. 1). Нехай для двокомпонентної суміші ці коефіцієнти відомі принаймні у випадку одного значення концентрації домішки, $c_{\delta 0}$; отже, буде відомою також і спектральна залежність ПЗ, $n_{\delta 0}(\lambda)$. Тоді, записавши рівність (11) у вигляді співвідношення між спектральними залежностями: $n_{\delta 0}(\lambda)$ показника заломлення суміші, $n_s(\lambda)$ показника заломлення чистого кварцу та невідомої величини $n_\delta(\lambda)$ показника заломлення компонентної домішки (окремо від кварцу), дістанемо:

$$n_{\delta}^2(\lambda) = \frac{n_{\delta 0}^2(\lambda) - (1 - c_{\delta}) \cdot n_s^2(\lambda)}{c_{\delta}}, \quad (13)$$

де використано умову (12).

Підставивши величину $n_{\delta}(\lambda)$ в рівність (11), записану у вигляді співвідношення між спектральними залежностями ПЗ $n(\lambda, c_{\delta})$ суміші за довільного значення c_{δ} концентрації домішки, ПЗ $n_s(\lambda)$ чистого кварцу та ПЗ $n_{\delta}(\lambda)$ компонентної домішки, дістанемо:

$$n^2(\lambda, c_{\delta}) = \frac{c_{\delta}}{c_{\delta 0}} n_{\delta 0}^2(\lambda) + \left(1 - \frac{c_{\delta}}{c_{\delta 0}}\right) n_s^2(\lambda) = n_s^2(\lambda) + \frac{c_{\delta}}{c_{\delta 0}} (n_{\delta 0}^2(\lambda) - n_s^2(\lambda)). \quad (14)$$

Звідси, за умови малих концентрацій домішки, маємо наближену величину для ПЗ 2-х-компонентного скла, яка лінійно залежить від значення c_{δ} концентрації домішки:

$$n(\lambda, c_{\delta}) = \sqrt{\varepsilon(\lambda, c_{\delta})} = n_s(\lambda) \sqrt{1 \pm \frac{c_{\delta}}{c_{\delta 0}} \left(\frac{n_{\delta 0}^2(\lambda)}{n_s^2(\lambda)} - 1\right)} \approx n_s(\lambda) \left(1 \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{c_{\delta}}{c_{\delta 0}} \left(\frac{n_{\delta 0}^2(\lambda)}{n_s^2(\lambda)} - 1\right)\right). \quad (15)$$

Здобута формула з достатньою точністю описує спектральну залежність показника заломлення компонентного скла, принаймні для невисоких значень мольних часток домішки до кварцового скла, коли величини $n_s(\lambda)$ і $n_{\delta 0}(\lambda)$ достатньо близькі між собою. Зокрема, це підтверджується поведінкою приведених на рис. 2 графіків залежності ПЗ кварцового скла від концентрацій домішки GeO_2 (або F), при фіксованому значенні довжини хвилі. Графіки побудовано за результатами експериментальних вимірювань показника заломлення в об'ємних зразках двокомпонентного кварцового скла. Як видно з рисунка, при достатньо малих значеннях концентрацій домішки відповідні залежності наближаються до лінійних. Лінійна залежність ПЗ суміші від концентрації домішки фтору в межах її значень до 3% підтверджується експериментальними даними [3-5].

В наближенні (15), також і величина приросту показника заломлення 2-х-компонентного скла лінійно залежить від приросту концентрації домішки:

$$\Delta n = n(\lambda, c_{\delta 1}) - n(\lambda, c_{\delta 2}) \approx \pm \frac{c_{\delta 1} - c_{\delta 2}}{2c_{\delta 0}} \cdot n_s(\lambda) \left(\frac{n_{\delta 0}^2(\lambda)}{n_s^2(\lambda)} - 1\right). \quad (16)$$

Згідно з формулою (3) для величини N групового показника заломлення та наближеним виразом (15), за умови малих концентрацій домішки (в молях), величина групового показника заломлення 2-х-компонентного скла лінійно залежить від значення c_{δ} концентрації домішки, і для приросту її значення (на фіксованій довжині хвилі) маємо:

$$\Delta N = \Delta \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) = \Delta n - \lambda \cdot \Delta \left(\frac{dn}{d\lambda} \right) \approx \Delta n, \quad (17)$$

де наближення є коректним за умови $\Delta \left(\frac{dn}{d\lambda} \right) \ll \Delta n$, (приріст величини нахилу спектральної залежності $n(\lambda, c_{\delta})$ суміші є значно меншим від приросту $\Delta n(\lambda, c_{\delta})$).

Отримані за формулами (16), (17) результати узгоджуються з поведінкою побудованих за експериментальними даними і приведеними на рис. 1 графіків 1, 2, 3, 6 спектральних залежностей показника заломлення n , а також і групового показника заломлення n_{gp} , для кварцового скла за різних значень концентрацій домішки GeO_2 чи F (див. відстані між відповідними графіками на фіксованій довжині хвилі, а також і їхній нахил).

Висновки

Розроблені на основі запропонованих методів формули розрахунку спектральних залежностей показника заломлення в компонентному кварцовому склі можуть бути впроваджені при розробці волоконно-оптичних компонентів ВОСП з покращеними оптичними характеристиками (оптичне волокно лінійного тракту, волоконні компенсатори хроматичної дисперсії, оптичні підсилювачі тощо).

Зокрема, при розробці одномодового оптичного волокна (ООВ) – волоконного світловоду, призначеного для високошвидкісного передавання інформаційного сигналу на велику відстань, та розробці спеціальних типів волокна для волоконних компенсаторів хроматичної дисперсії, постає задача оптимізації передавальних характеристик проєктованого волокна. Ці характеристики залежать від профілю показника заломлення (ППЗ) – радіального розподілу ПЗ в поперечному перерізі волокна, а також і від спектральної залежності ППЗ в робочому діапазоні довжин хвиль. Але ППЗ та його спектральна залежність визначаються дисперсією матеріалу, з якого виготовляється волокно. Якщо ППЗ є відомим на певній довжині хвилі (наприклад, виміряно), то запропоновані інтерполяційні многочлени для коефіцієнтів Селмейєра, як функцій мольної концентрації домішки до базового кварцу SiO_2 , дозволяють однозначно відновити радіальний розподіл концентрації домішки, принаймні у випадку найпоширенішої у виробництві ООВ домішки GeO_2 чи F. Тим самим стане відомою спектральна залежність ППЗ за тричленною формулою Селмейєра.

Література

1. John Gowaar. Optical Communication Systems. – Prentice Hal, 1993. – 501 p.
2. Adams M.J. An Introduction to Optical Waveguides. – Chichester, John Wiley, 1981. – 507 p.
3. Unger H. -G. Planar optical waveguides and fibres. – Oxford University Press, 1977. – 646 p.
4. Розорінов Г.М., Соловійов Д.О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб./Г.М. Розорінов, Д.О. Соловійов. – 2-е вид., перероб. і допов. – К.: Кафедра. 2012. – 344 с.
5. Манько А.А. Методы улучшения дисперсионных характеристик спектрально-селективных оптических элементов на основе рассеяния света // Зв'язок. – 2012. – №4. – С. 32 – 35

Надійшла 24.04.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Розорінов Г.М.