

ПРИНЦИПИ ПІДВИЩЕННЯ РОЗДІЛЮВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРІВ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ РОЗСІЯННЯ СВІТЛА

Манько О. О. Принципи підвищення розділювальної здатності елементів демультиплексорів на основі ефекту розсіяння світла. В роботі розглянуто шляхи підвищення дисперсійних характеристик спектрально-селективних оптичних елементів за рахунок розміщення їх в оптичному середовищі з іншим показником заломлення. Рівень покращення дисперсійних характеристик визначається параметрами оптичного середовища.

Ключові слова: ОПТИЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ДИСПЕРСІЙНА ХАРАКТЕРИСТИКА, РОЗСПОВАННЯ СВІТЛА, ДЕМУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ

Манько А. А. Принципы повышения разделительной способности элементов демультиплексоров на основе эффекта рассеяния света. В работе рассмотрены пути повышения дисперсионных характеристик спектрально-селективных оптических элементов за счет размещения их в оптической среде с другим показателем преломления. Уровень улучшения дисперсионных характеристик определяется параметрами оптической среды.

Ключевые слова: ОПТИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ, ДИСПЕРСИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, РАССЕИВАНИЕ СВЕТА, ДЕМУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ

Manko O. O. Principles of improving separation ability of demultiplexing elements based on the effect of light scattering. The paper discusses ways to improve the dispersion characteristics of spectrally selective optical elements by placing them in an optical medium with a different refractive index. The level of improvement of dispersion characteristics is determined by the optical environment.

Key words: OPTICAL ELEMENT, DISPERSION CHARACTERISTICS, LIGHT SCATTERING, DEMULTIPLEXING

Вступ. На сучасному етапі розвитку телекомунікаційних мереж має місце інтенсивне впровадження технологій спектрального розділення каналів [1]. В залежності від відстані між сусідніми каналами технології підрозділяються на два типи – технології щільного та розрідженого спектрального розділення [2, 3]. Відстань між сусідніми каналами в технологіях щільного мультиплексування складає 0,8 нм та менше. При демультиплексуванні групового сигналу в цих випадках застосовуються досить складні за конструктивним виконанням і технологією виготовлення оптичні пристрої, а саме – дифракційні ґратки та фільтри на тонких плівках [1]. При цьому відстань між сусідніми каналами в технології розрідженого (грубого) спектрального розділення складає 20 нм. В цьому випадку для вирішення завдань демультиплексування доцільно та достатньо використовувати порівняно прості конструкції демультиплексорів, таких, наприклад, як спектрально-селективні елементи, що використовують ефект розсіяння світла [4].

При вирішенні завдань демультиплексування за допомогою цих оптичних елементів важливим показником такого елемента, є дисперсійні характеристики $\varphi(\lambda)$, які визначаються залежністю кутового положення піку індикатриси розсіяння від довжини хвилі сигналу. Швидкість зміни кутового положення піку з довжиною хвилі – $\partial\varphi/\partial\lambda$ визначає властивості елемента щодо розділення спектральних каналів, тобто його розділювальну здатність. Зі збільшенням цього параметру розділювальна (демультиплексує) здатність оптичного елемента зростає, оскільки збільшується кутова відстань між сусідніми каналами. В свою чергу похідну $\partial\varphi/\partial\lambda$, як похідну складної функції можна представити у вигляді $\frac{\partial\varphi}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial\lambda}$. Тут прийнято до уваги той факт, що величина показника заломлення матеріалу оптичного елемента залежить від довжини хвилі: $n = n(\lambda)$.

Певним недоліком таких елементів є порівняно невелике значення кутової дисперсії за показником заломлення n , що визначається похідною $\partial\varphi/\partial n$, де φ – кутове положення піку індикатриси розсіяння [5]. При цьому значення похідної та її хід з довжиною хвилі

визначається побудовою оптичного елемента та величиною його показника заломлення. З метою підвищення цього параметру в роботі [5] було запропоновано принципи вибору матеріалу для спектрально-селективних елементів за рахунок аналізу його дисперсійних характеристик. Проте, оскільки розділювальна здатність є найважливішим параметром елементів, призначених для демультимплексування групового сигналу систем зі спектральним розділенням каналів (СРК), є доцільним пошук шляхів подальшого її підвищення. З цією метою в роботі було проведено дослідження впливу на кутові дисперсійні характеристики параметрів середовища, в якому розташовані оптичні циліндричні елементи, що використовують ефект розсіяння світла.

Дисперсійні характеристики границі розділу оптичних середовищ. Враховуючи той факт, що кутові дисперсійні явища мають місце на границі розділу двох оптичних середовищ, є доцільним розглянути дисперсійні характеристики, визначені наявністю границі розділу. Типовий приклад проходження світлового променя через границю розділу двох оптичних середовищ з показниками заломлення n_1 та n_2 наведено на рис. 1.

Тут кути φ та α є кутами падіння та заломлення відповідно. Співвідношення між ними визначається згідно з законом Снеліуса:

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

звідки випливає:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \varphi\right). \quad (2)$$

При постійному куті падіння φ кутова дисперсія заломленого променя визначається залежністю показників заломлення n_1 та n_2 від довжини хвилі оптичного сигналу:

$$\frac{d\alpha}{d\lambda} = \frac{\partial \alpha}{\partial n_1} \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial \alpha}{\partial n_2} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda}, \quad \text{де } \lambda - \text{довжина хвилі.} \quad (3)$$

Тут $\partial \alpha / \partial n_1$ та $\partial \alpha / \partial n_2$ визначаються згідно з (2) виразами:

$$\partial \alpha / \partial n_1 = (1/n_2) \times (\sin \varphi / \sqrt{1 - \sin^2 \varphi \times (n_1/n_2)^2});$$

$$\partial \alpha / \partial n_2 = -(n_1/n_2^2) \times (\sin \varphi / \sqrt{1 - \sin^2 \varphi \times (n_1/n_2)^2}).$$

$$\text{Звідки} \quad : \quad \frac{\partial \alpha}{\partial \lambda} = \left(\frac{1}{n_2} \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} - \frac{n_1}{n_2^2} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda}\right) (\sin \varphi / \sqrt{1 - \sin^2 \varphi \times (n_1/n_2)^2}). \quad (4)$$

Якщо $n_2 = 1 = \text{const}$ (повітря), то $\frac{\partial \alpha}{\partial \lambda} = \left(\frac{\partial n_1}{\partial \lambda}\right) (\sin \varphi / \sqrt{1 - \sin^2 \varphi \times (n_1)^2})$, і значення першого співмножника в (4) зменшується на величину другого доданку.

Для підвищення дисперсійної здатності границі розділу необхідно збільшити значення виразу (4). З цією метою, для збільшення першого співмножника, необхідно вибрати оптичні матеріали з різними знаками похідної показника заломлення за довжиною хвилі, а також визначити величину самих показників. Збільшення значення другого співмножника можливе за рахунок вибору кута φ . При цьому мінімальне значення цього співмножника досягається при φ , що прямує до нуля, а при збільшенні кута φ до критичного значення воно зростає.

Таким чином, границя розділу оптичних середовищ має яскраво виражені дисперсійні характеристики щодо довжини хвилі оптичного сигналу. При цьому покращення цих

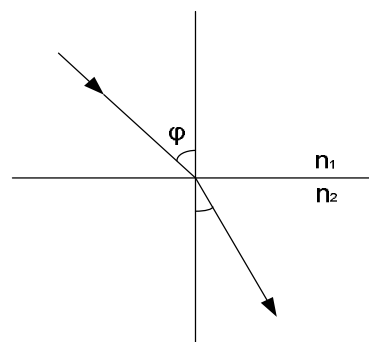


Рис. 1. Проходження променя через границю двох середовищ

характеристик може бути досягнуто за рахунок вибору як кута падіння, так і параметрів другого оптичного середовища. Отриманий результат може бути використаний для покращення дисперсійних характеристик оптичних спектрально-селективних елементів на ефекті розсіяння світла. З цією метою оптичні елементи (показник заломлення n_1) мають бути розміщені в оптичному середовищі з показником заломлення n_2 . Зміна параметрів цього середовища повинна впливати на дисперсійні характеристики елементів.

Таким чином, дана робота спрямована на вирішення питань вибору параметрів оптичного середовища для розміщення спектрально-селективних оптичних елементів циліндричної форми з метою покращення їх дисперсійних характеристик.

Підвищення дисперсійних характеристик спектрально-селективних оптичних елементів на ефекті розсіяння світла. Як було занотовано вище, розміщення оптичних елементів, призначених для демультимплексування групового оптичного сигналу, в оптичному середовищі з певними параметрами може покращити їх кутові дисперсійні характеристики, а отже розділювальну здатність. При цьому кутлова дисперсійна характеристика елемента, розміщеного у повітряному середовищі, визначається як залежністю кутового положення φ піку на індикатрисі розсіяння від показника заломлення самого елемента, так і залежністю показника заломлення елемента від довжини хвилі [5]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial \lambda}, \quad (5)$$

де φ – кутове положення піку індикатрисі розсіяння.

При наявності певного оптичного середовища з показником заломлення n_2 , в якому розміщені оптичні елементи з показником заломлення n_1 , кутове положення φ піку на індикатрисі буде визначатись функцією двох змінних – n_1 та n_2 : $\varphi = \varphi(n_1, n_2)$, тобто зміна цього кута $\Delta\varphi$ при зміні n_1 та n_2 буде визначатись виразом:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial n_1} \Delta n_1 + \frac{\partial \varphi}{\partial n_2} \Delta n_2. \quad (6)$$

При зміні кута за рахунок матеріальної дисперсії (залежності показника заломлення від довжини хвилі λ) цей вираз буде мати вигляд:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial n_1} \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} \Delta\lambda + \frac{\partial \varphi}{\partial n_2} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} \Delta\lambda. \quad (7)$$

З виразу видно, що за рахунок дисперсійного оптичного середовища (показник заломлення n_2), що оточує оптичний елемент (показник заломлення n_1), величина кутового відхилення $\Delta\varphi$ за рахунок зміни довжини світлової хвилі $\Delta\lambda$ може бути значно збільшена.

При цьому похідні $\frac{\partial \varphi}{\partial n_1}$ та $\frac{\partial \varphi}{\partial n_2}$ визначаються тільки конструктивними особливостями елемента (наприклад, елемент циліндричної форми).

Для визначення цих параметрів в роботі було змодельовано поведінку індикатрисі розсіяння циліндричних оптичних елементів, розміщених в оптичних середовищах з різними показниками заломлення. При цьому було застосовано метод, запропонований в [5].

На рис. 2 наведено індикатрису розсіяння циліндричного оптичного елемента з показником заломлення n_1 , що дорівнює 1,46, розміщеного в середовищі з показником заломлення n_2 , що дорівнює 1,05. В роботі було проведено дослідження кутового положення головних максимумів (піків) індикатрисі в залежності від значення показника заломлення оточуючого середовища n_2 .

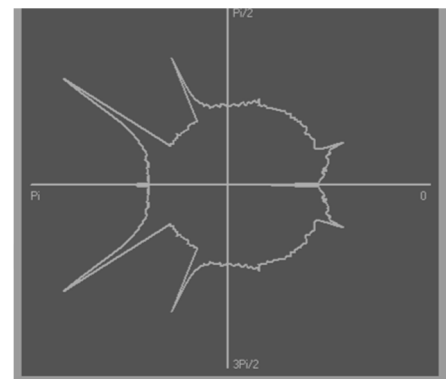


Рис. 2. Індикатриса розсіяння

На рис. 3 наведено залежність кутового положення головного піку, що знаходиться в другому квадранті індикатриси, від величини показника заломлення n_2 . З графіку видно, що зміна показника заломлення оточуючого середовища призводить до зміни кутового положення максимуму, тобто $\frac{\partial \varphi}{\partial n_2} \neq 0$. Таким чином, згідно з (6), наявність оптичного середовища може підвищити дисперсійні характеристики спектрально-селективного елементу при умові співпадання знаків $\frac{\partial \varphi}{\partial n_1}$ та $\frac{\partial \varphi}{\partial n_2}$.

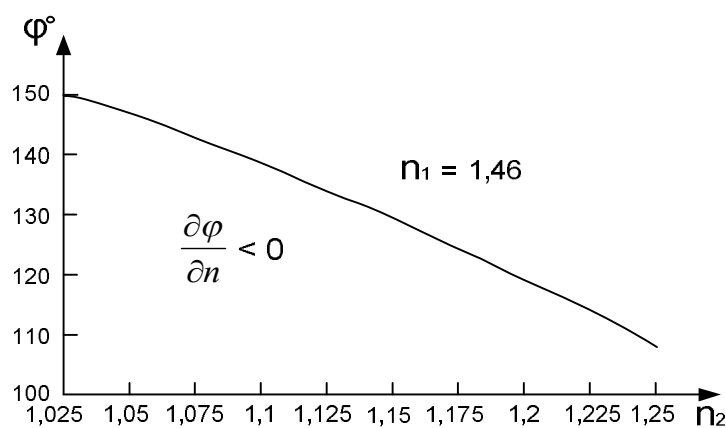


Рис. 3. Залежність кутового положення піку від показника заломлення середовища для $n_1 = 1,46$

В попередніх авторських роботах було наведено залежність $\frac{\partial \varphi}{\partial n_1}$ від показника заломлення n_1 при розміщенні оптичного елементу в повітряному просторі ($n_2 = 1 = \text{const}$). Для показника заломлення n_1 , що дорівнює 1,46, значення $\frac{\partial \varphi}{\partial n_1}$ складає 100° [5]. Як впливає з розрахунків, при розміщенні елемента в оптичному середовищі з показником заломлення $n_2 = 1,05$ та $1,2$ значення $\frac{\partial \varphi}{\partial n_1}$ підвищується до 120° та до 220° відповідно. Величина $\frac{\partial \varphi}{\partial n_2}$ складає при цих умовах 160° та 200° відповідно. Тобто наявність оптичного середовища може призвести до покращення дисперсійних характеристик спектрально-селективного елемента.

Аналогічні розрахунки були проведені для випадків, коли $n_1 = 2,5$, а n_2 змінюється в межах від 1,025 до 1,3 та від 1,5 до 2,2. Відповідні графіки наведено на рис. 4 та рис. 5.

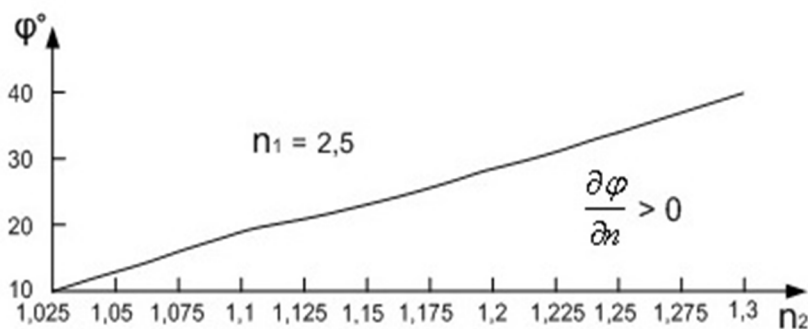


Рис. 4. Залежність кутового положення піку від показника заломлення середовища для позитивних значень $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$

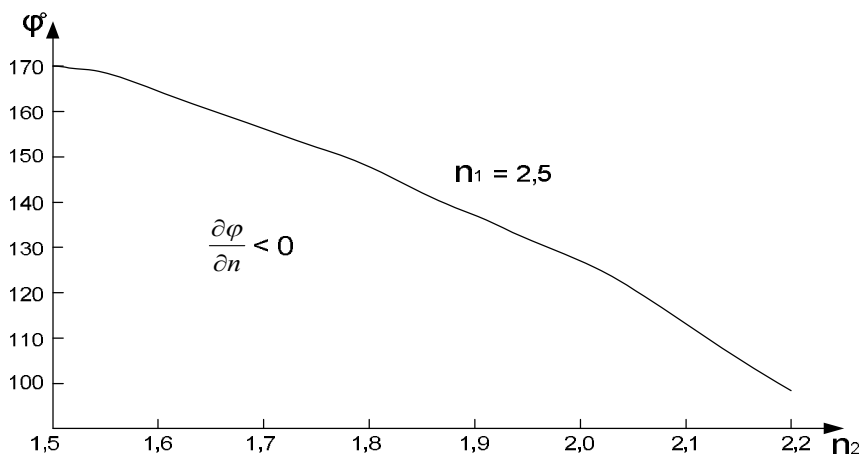


Рис. 5. Залежність кутового положення піку від показника заломлення середовища для негативних значень $\partial\phi/\partial n$

Індикатриси розсіяння циліндричного оптичного елемента для двох випадків: коли $n_1 = 2,5$ та $n_2 = 1,05$, а також $n_1 = 2,5$ та $n_2 = 1,7$ наведені на рис. 6 та рис. 7, відповідно.

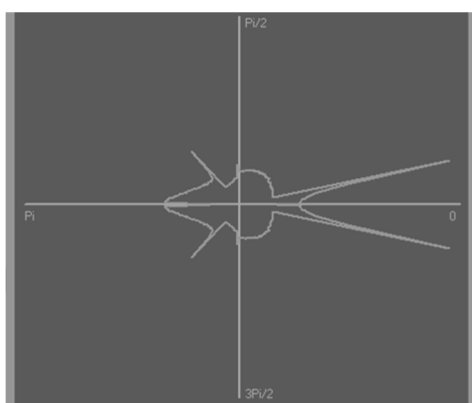


Рис. 6. Індикатриса розсіяння: $n_1 = 2,5$; $n_2 = 1,05$

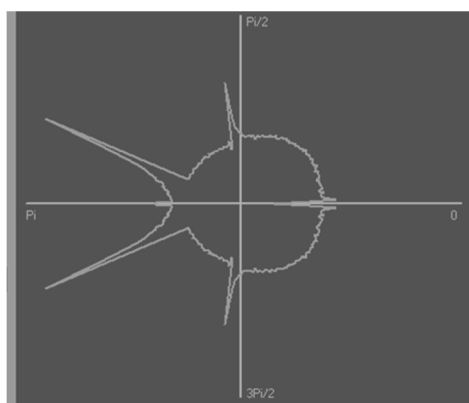


Рис. 7. Індикатриса розсіяння: $n_1 = 2,5$; $n_2 = 1,7$

Результати аналізу проведених вище розрахунків представлені в табл.1.

Як видно з таблиці, розміщення спектрально-селективного елемента в оптичному середовищі з показником заломлення, що відрізняється від одиниці, дає можливість значно покращити його розділювальну здатність. Так, наприклад, розміщення елемента з показником заломлення $n_1 = 2,5$ в оптичному середовищі з показником заломлення $n_2 = 1,05$ збільшує абсолютне значення $\partial\phi/\partial n_1$ з 30° до 40° та при подальшому збільшенні n_2 до $1,2$ – до 50° . При цьому у виразі (6) $\partial\phi/\partial n_2$ приймає значення, відмінне від нульового – таке, що дорівнює 80° при $n_2 = 1,05$ та 100° при $n_2 = 1,2$.

Табл. 1

n_1	1,46	1,46	1,46	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
n_2	1,0	1,05	1,2	1,0	1,05	1,2	1,5	1,8	2,1
$\partial\phi/\partial n_1$	100°	120°	220°	-30°	-40°	-50°	40°	70°	120°
$\partial\phi/\partial n_2$	-	-160°	-200°	-	80°	100°	-70°	-100°	-140°

Аналогічно, згідно з табл.1, виграш досягається і при розміщенні цього ж елемента в більш щільному оптичному середовищі з більшим значенням показника заломлення

$n_2 = 1,5 \div 2,1$. Використання оптичних матеріалів з малими показниками заломлення на цей час можливе завдяки досягненням фотоніки з напрямку створення фотонних кристалів.

Таким чином, швидкість зміни кута φ за довжиною хвилі, а отже і розділювальна здатність буде визначатись за виразом:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{\partial\varphi}{\partial n_1} \frac{\partial n_1}{\partial\lambda} + \frac{\partial\varphi}{\partial n_2} \frac{\partial n_2}{\partial\lambda}. \quad (8)$$

Як видно з виразу, при розміщенні селективних оптичних елементів в іншому оптичному середовищі розділювальна здатність збільшується на величину доданку $\frac{\partial\varphi}{\partial n_2} \frac{\partial n_2}{\partial\lambda}$.

Враховуючи той факт, що в розглянутих випадках похідні $\partial\varphi/\partial n_1$ та $\partial\varphi/\partial n_2$ мають різні знаки при побудові спектрально-розділювального пристрою для оптичного середовища з показником заломлення n_2 необхідно вибрати тип скла, знак похідної $\partial n_2/\partial\lambda$ якого забезпечує однаковість знаків доданків у співвідношенні (8) у потрібному діапазоні довжин хвиль. Щодо вибору оптичного матеріалу з показником заломлення, близьким до одиниці, то сучасні досягнення в області фотоніки дозволяють створити такі матеріали шляхом побудови фотонних кристалів [6]. Подальшого збільшення розділювальної здатності оптичного елемента можна досягти за рахунок вибору оптичного матеріалу для створення оптичного середовища з показником заломлення n_2 з покращеними дисперсійними характеристиками – високим значенням похідної $\partial n_2/\partial\lambda$ [7].

Висновки. Таким чином, розміщення оптичного елемента в середовищі, показник заломлення якого n_2 відрізняється від одиниці, а похідна $\partial n_2/\partial\lambda$ має знак протилежний до знаку похідної $\partial n_1/\partial\lambda$, дозволяє покращити його дисперсійні характеристики, а отже збільшити розділювальну здатність в режимі демультимплексування групового оптичного сигналу системи зі спектральним розділенням каналів. При цьому рівень збільшення визначається як величиною n_2 , так і значенням похідної $\partial n_2/\partial\lambda$. З точки зору підвищення розділювальної здатності похідна має бути якомога більшою. З іншого боку потреба у підвищенні розділювальної здатності також вимагає використання оптичних матеріалів з великим значенням $\partial n_1/\partial\lambda$.

Література

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М.: Техносфера, 2003. – 440 с.
2. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid // ITU-T Recommendation G.694.1 (06/02).
3. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid // ITU-T Recommendation G.694.2 (12/03).
4. Манько О. О. Оптичні селективні елементи, що використовують ефект розсіювання світла / О. О. Манько, С. Ю. Марков // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології. V Міжнародна науково-технічна конференція COMINFO'2009-Livadia, 5 – 9 жовтня 2009 року, Збірник тез. – С.101-102.
5. Сукач Г.О. Дослідження спектрально-селективних елементів, що використовують ефект розсіювання світла / Г. О. Сукач, О. О. Манько, В. О. Манько // Зв'язок. – 2008. – №7-8. – С. 33-35.
6. Склярів К. Волоконно-оптические сети и системы связи / К. Склярів. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 272 с.
7. Справочник технолога-оптика / И. Я. Бубис, В. А. Вейденбах, И. И. Духопел и др.; под общ. ред. С. М. Кузнецова. – Л.: Машиностроение. – 1983. – 414 с.