

---

## ТЕОРІЯ ТА ЗАСОБИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 691.391.052

### ПРОЕКТУВАННЯ СВІТЛОВОДІВ ІЗ ЗБІЛЬШЕНОЮ ЕФЕКТИВНОЮ ПЛОЩЕЮ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

*Левандовський В.Г., к.т.н., доцент,  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

Розробка ефективної технології високошвидкісних мереж зв'язку із підвищеною інформаційно-пропускнуою здатністю ініціює досить жорсткі вимоги до параметрів волоконних світловодів, зокрема, до ефективної площі поперечного перерізу моди. Змінюючи величину цього параметру, можна значно зменшити негативний вплив нелінійних ефектів, таких як чотирьоххвильове змішування, фазова самомодуляція (в тому числі і перекресна) і підвищити потужність групового оптичного сигналу в лінії зв'язку із спектральним ущільненням, а також, збільшити відстань між підсилювачами [1,2]. Однак технологічний пошук відповідного профілю показника заломлення є досить дорогим процесом. В даній роботі використано методику, розглянуту раніше [3,4,5], для оптимізації ефективної площі моди світловоду.

Розглядувана модель хвилеводу складається із серцевини, яка має градієнтний профіль показника заломлення, який описується неперервною функцією радіальної координати  $R - n = n(R)$  та однорідної, досить протяжної оболонки, відповідає параметрам реальних хвилеводів. Задача розглядається для монохроматичних полів, які змінюються в часі пропорційно  $\exp(i\omega t)$ , де  $\omega$  – циклічна частота. Вважаємо, що в напрямі поширення електромагнітних хвиль, амплітуда яких пропорційна  $\exp(i\beta z)$ , де  $\beta$  – стала поширення, хвилевод є однорідним. Задача розглядається за умов слабкої хвилепровідності, коли різниця функцій, що описують форму профілю показника заломлення серцевини та оболонки хвилеводу, мала. В цьому випадку повздовжні складові електричних та магнітних полів малі в порівнянні з поперечними складовими і поле вважається поперечним для довільного азимутального індексу. Поширення електромагнітних хвиль у такому хвилеводі описується рівняннями Максвелла. Відповідне рівняння для функції  $\Phi(R)$ , пропорційної поперечним складовим поля із стандартними граничними умовами вже було записано раніше [6]. Задача проектування полягає у побудові форми профілю показника заломлення у поперечному перерізі хвилеводу, котрою в даному рівнянні описується певна, по-

ки що невідома, функція  $g_0(R)$ . В основу покладено метод розв'язку зворотної задачі теорії розсіяння, який полягає у відновленні диференційного оператора за спектральною функцією [7]. У відповідності до методу [3,4,5], використаємо значення передаточних характеристик деякого хвилеводу з відомою формою профілю показника заломлення  $g_1(R)$ . Виберемо, як такий, хвилевід із ступінчастим профілем показника заломлення його серцевини [6]. Тоді задачу про знаходження оптимального профілю показника заломлення  $g_0(R)$  можна звести до розв'язку наступної системи рівнянь.

$$g_0(R) = g_1(R) + 2 \frac{d}{dR} K(R, R), \quad (1)$$

де  $K(R, R)$  – розв'язок інтегрального рівняння

$$\begin{aligned} & K(R, t) + B \left( \int_0^R K(R, s) \Phi_1(s, p_0) ds \right) \Phi_1(t, p_0) - \\ & - \sum_{j=1}^N c_j \left( \int_0^R K(R, s) \Phi_1(s, p_j) ds \right) \Phi_1(t, p_j) = \\ & = -B \Phi_1(R, p_0) \Phi_1(t, p_0) + \sum_{j=1}^N c_j \Phi_1(R, p_j) \Phi_1(t, p_j), \quad 0 < t < R. \end{aligned} \quad (2)$$

В цьому виразі  $B$  – коефіцієнт, який визначається з додаткових умов,  $c_j^{-1} = \int_0^{\infty} \Phi_1^2(R, p_j) dR$ , – нормуючі коефіцієнти,  $p_i$  – спектральний параметр, пов'язаний із сталою поширення  $u_i$  співвідношенням  $p_i = u_i^2$ , причому індекс  $i = 0$  відповідає шуканому світловоду, а індекс  $i = j = 1, 2 \dots N$  – світловоду, який в даному методі береться за вихідний, і в якому поширюється  $N$  мод, а функція розподілу поля моди –  $\Phi_j(R, p_j)$ .

Після визначення  $K(R, R)$  функція  $\Phi(R, p_0)$ , пропорційна поперечним складовим електричного поля шуканого світловоду, визначається з виразу:

$$\Phi(R, p_0) = \sum_{i=1}^N \left[ c_i \Phi_1(R, p_0) + \int_0^R K(R, t) \Phi_1(t, p_i) dt \right] \quad (3)$$

Закон зміни показника заломлення в поперечному перерізі шуканого хвилеводу визначиться наступним чином:

$$n^2(R) = n_1^2 [1 - 2\Delta g_0(R)], \quad \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad R < 1 \quad (4)$$

Нормувальний параметр  $B$ , який входить у всі параметри шуканого світловоду через функцію  $K(R, R)$  (2), знаходиться з використанням інтегрального співвідношення, яке пов'язує значення ефективної площі основної моди, поширюваної на заданій частоті в шуканому світловоді з розподілом інтенсивності  $\Phi_1(R, p_0)$  поля цієї моди

$$S_{eff} = 2\pi a^2 \left[ \int_0^\infty [\Phi(R, p_0)]^2 R dR \right]^2 / \int_0^\infty [\Phi(R, p_0)]^4 dR, \quad (5)$$

де  $a$  – радіус сердцевини шуканого світловоду.

Як приклад запропонованої методики оптимізації профілю показника заломлення в поперечному перерізі хвилеводу, побудовані три моделі хвилеводів, що мають збільшену ефективну площу поперечного перерізу поля поширюваної моди. Досліджувався, також, вплив зміни величини фазової швидкості поширюваної моди, заданої на фіксованій частоті, на характеристики світловодів. Вихідні дані систематизовані в таблиці 1.

Таблиця 1.

Параметри оптимізованих волоконних світловодів	Номер моделі одержаного світловода		
	№ 1	№ 2	№ 3
Нормована частота, $\nu$	4,05	4,05	4,05
Нормована фазова швидкість, $V_{ph}/c$	0,688	0,689	0,690
Показник заломлення оболонки, $n_2$	1,444	1,444	1,444
Радіус сердцевини вихідного світловода, $a$ , мкм	7,2	7,2	7,2
Значення ефективної площі, $S_{eff}$ , мкм <sup>2</sup>	75	75	75

Розраховані профілі показника заломлення в поперечному перерізі оптичного хвилеводу з ефективною площею поперечного перерізу  $S_{eff} = 75$  мкм<sup>2</sup> із різними значеннями фазової швидкості основної моди, заданої на фіксованій нормованій частоті  $V = 4,05$ , представлені на рис. 1.

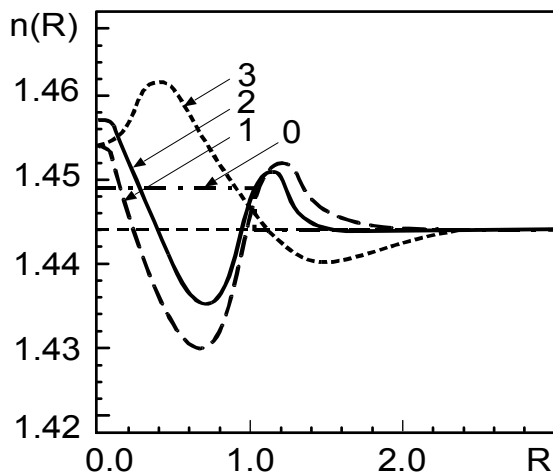


Рис. 1. Профілі показника заломлення в поперечному перерізі світловодів в залежності від радіальної координати

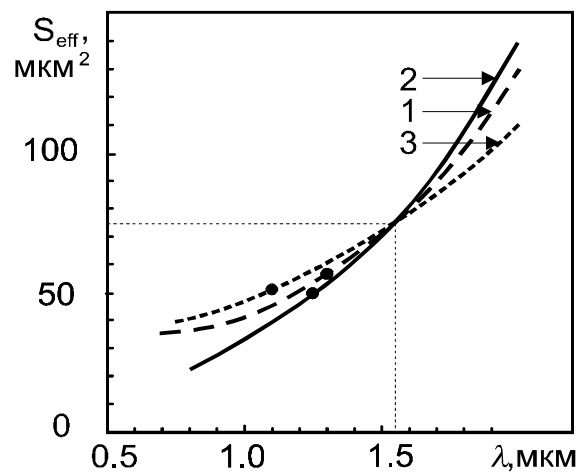


Рис. 2. Залежність  $S_{eff}$  від довжини хвилі для одержаних світловодів

Профіль вихідного одноступінчастого волоконного світловоду (ОВС) представлено штрих-пунктирною лінією і має номер – 0. ОВС №1 і №2 є світловодами W-типу [2]. Зі збільшенням значення фазової швидкості величина западини зменшується (крива профілю ООВ №2), а потім при по-

дальшому збільшенні значення фазової швидкості окрім позаосьової западини з'являється осьова западина (крива профілю №3).

Такі ООВ називають світловодами кільцевого типу. Залежність  $S_{eff}$  від довжини хвилі для одержаних ОВС зображена на рис.2. Прямі розрахунки  $S_{eff}$  для перевірки даного методу показали, що дійсно на довжині хвилі 1,55 мкм величина  $S_{eff}$  для всіх трьох випадків є 75 мкм<sup>2</sup>, що дає можливість перевірити вказаний метод.

Конструктивні параметри одержаних ООВ, наведені в таблиці 2. Для порівняння наводяться конструктивні та електродинамічні параметри оптичних волокон, які використовуються зараз відомою фірмою Fujikura [8]. Запроектвані оптичні волокна мають лінійну залежність хроматичної дисперсії від довжини хвилі. Достатньо велике значення питомої хроматичної дисперсії та збільшена ефективна площа поперечного перерізу основної моди дозволяє суттєво зменшити вплив нелінійного ефекту чотирихвильового перемішування. Окрім того, лінійна залежність хроматичної дисперсії від довжини хвилі дозволяє використовувати такі оптичні волокна в компенсаторах дисперсії з лінійною залежністю дисперсії від довжини хвилі.

Таблиця 2

Параметри волокна	Запроектвані волокна			Волокно фірми Fujikura
	№ 1	№ 2	№ 3	
Максимальне значення профілю серцевини ( $\lambda = 1550$ нм)	1,454	1,457	1,461	1,4668
Значення показника заломлення оболонки ( $\lambda = 1550$ нм)	1,444	1,444	1,444	1,444
Ефективна площа ( $\lambda = 1550$ нм), мкм <sup>2</sup>	75	75	75	72
Діаметр модового поля ( $\lambda = 1550$ нм), мкм	10	9,57	8,78	9,5-9,6

### Висновки

Одержані запропонованим методом волокна мають більш плавну залежність дисперсії від довжини хвилі в діапазонах 1310 нм, 1420 нм, 1665 нм. При цьому мінімальне значення дисперсії виявляється достатнім для подавлення нелінійного ефекту чотирихвильового змішування. Це підвищує пропускну здатність системи передачі і дозволяє мінімізувати витрати на компенсацію дисперсії. Такі волокна можуть застосовуватись у телекомунікаційних мережах з інтенсивним спектральним ущільненням і великим числом каналів (DWDM), що працюють в діапазонах 1310 нм, 1420 нм, 1665 нм. Застосування світловодів із збільшеною ефективною площею моди дозволяє збільшити потужність (а значить і число каналів), що передається по волокну. В свою чергу це призведе до підвищення пропускну здатності оптоволоконних мереж, знизить вплив нелінійних явищ. Збіль-

шення ефективної площі впливає також на якість зрощування волокон, сприяє низьким втратам при зварювання, збільшенню виходу успішних зварювань.

Запроектване оптичне волокно може застосовуватись при створенні сучасних інформаційно телекомунікаційних мереж з високими швидкостями передачі інформації.

#### **Литература**

1. В.Б.Каток, В.Г.Левандовский, Е.Д.Щепкина Оптимизация параметров оптических волокон для применения современных оптических технологий на сетях связи Украины //Матеріали міжнародної конференції “Сучасний стан та перспективи використання ВОЛЗ. Первинні мережі України”, 6-7 грудня 2001 р., Київ
2. ITU-T Recommendation G.655, Characteristics of a non-zero-dispersion shifted single-mode optical fibre cable. – Geneva: ITU-T, 2003 – 20 p.
3. V. Katok, V.Levandovskyy, Y.Shchepkina Single-mode Lightguide with optimized coefficient of optical power localization // LENM-2004 5-th international Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkiv, Ukraine, September, с. 185-187, 2004
4. Левандовський В.Г. Метод проектування профілю показника заломлення у хвилеводі круглого поперечного перерізу // Вісник НТУУ «КПІ», серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2009. – Вип.39. – С.98–103.
5. Левандовський В.Г. Оптимізація профілю показника заломлення хвилеводу за коефіцієнтом локалізації // Вісник НТУУ «КПІ», серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2010. – Вип.41. – С.98–102.
6. Case K.M. On wave propagation in inhomogeneous media // J. Math. Phys. - 1972. - V. 13, № 23. - P. 360-387.
7. Гельфанд И.И., Левитан Б.М. Об определении дифференциального оператора по его спектральной функции // Изв. АН.СССР, серия математическая. - 1951. - № 4. - С. 309.
8. [http://www.fujikura.co.jp/eng/products/tele/tele\\_catalog/data/FutureAccess\\_catalog2010-10-21.pdf](http://www.fujikura.co.jp/eng/products/tele/tele_catalog/data/FutureAccess_catalog2010-10-21.pdf)

*Левандовський В.Г. Проектування світловодів із збільшеною ефективною площею для телекомунікаційних мереж. Представлена методика проектування світловодів з профілем показника заломлення одномодового неоднорідного оптичного волокна, оптимізованого для одержання збільшеної ефективної площі поперечного перерізу поля основної моди. В основу покладено метод розв'язку зворотної задачі теорії розсіювання, який полягає у відновленні диференційного оператора за спектральною функцією. Для перевірки результатів виконано модельний експеримент, який полягає у розв'язку прямої задачі для одержаних світловодів. Одержані параметри волокна відповідають вимогам до сучасних телекомунікаційних ліній зв'язку із спектральним ущільненням.*

**Ключові слова:** профіль показника заломлення, одномодовий світловод, стала поширення, зворотна задача розсіювання, ефективна площа поля основної моди

*Левандовский В.Г. Проектирование световодов с увеличенной эффективной площадью для телекоммуникационных сетей. Представлена методика проектирования световодов с профилем показателя преломления одномодового неоднородного оптического волокна, оптимизированным для получения увеличенной эффективной площади поперечного сечения поля основной моды. В основу положен метод решения*

обратной задачи теории рассеяния, заключающийся в восстановлении дифференциального оператора по спектральной функции. Для проверки результатов выполнен модельный эксперимент, состоящий в решении прямой задачи для полученных световодов. Полученные параметры волокна соответствуют требованиям к современным телекоммуникационным линиям связи со спектральным уплотнением.

**Ключевые слова:** профиль показателя преломления, одномодовый световод, постоянная распространения, обратная задача рассеяния, эффективная площадь поля основной моды

*Levandovskyy V.G. Engineering of lightguide with enlarged effective area for telecommunication lines. The technique of engineering of lightguides with refraction index of singlemode inhomogeneous fibre optimized for inlarge effective area of mode field cross section is presented/ The method of solving of return scattering problem consisting in restoration of differential pperator from its spectral function is based in this technique. For verification of results the model experiment with solving of direct problem for obtaining waveguides is executed. Parameters of singlemode optical fibre that satisfy to the requirements for up to date telecommunication optical lines with spectral multiplexing are obtained.*

**Keywords:** refraction index profile, singlemode lightguide, propagation constant, inverse scattering problem, effective area of main mode field cross section