

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ ВОЛОКОН НА РОЗПОДІЛ МОДОВОГО ПОЛЯ ТА ВТРАТИ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ В ЇХ З'ЄДНАННЯХ

### Введення

Завдяки постійному вдосконаленню технології виготовлення фотонно-кристалічних волокон (ФКВ), значення втрат при розповсюдженні світла в ФКВ наближуються до втрат, які властиві стандартним одномодовим волокнам (ОВ) [1, 2]. Можна виділити внутрішні фактори втрат, обумовлені фізико-хімічними явищами в оптичних волокнах, а також викликані відхиленнями конструктивно-технологічних параметрів волокна, і зовнішні, які мають місце при виконанні монтажу. В даній статті розглянуто фактори втрат у з'єднаннях волокон, розроблено декілька моделей ФКВ з різною структурою поперечного перетину, шляхом програмного моделювання отримано їх розподіли поля основної моди, а також вираховано втрати при оптико-геометричних відхиленнях, що виникають під час з'єднання волокон, та досліджено залежність затухання оптичного сигналу від величини зсувів.

### Загальна характеристика проблеми

Під час застосування та монтажу елементів функціональної електроніки на ФКВ виникає необхідність виконання їх з'єднання одне з одним або, найчастіше, зі стандартним оптичним волокном. Як і у випадку з'єднання стандартних оптичних волокон, з'єднання ФКВ може бути роз'ємним або нероз'ємним. При цьому неминуче виникають зсуви оптичних волокон одне відносно іншого, а при зварюванні волокон, крім того, відбувається руйнування повітряних отворів в оболонці ФКВ та порушується їх порядок розташування, що впливає на розподіл модового поля. На рис. 1 представлено фактори, які впливають на втрати оптичного сигналу для випадків роз'ємного та зварного з'єднань ФКВ.

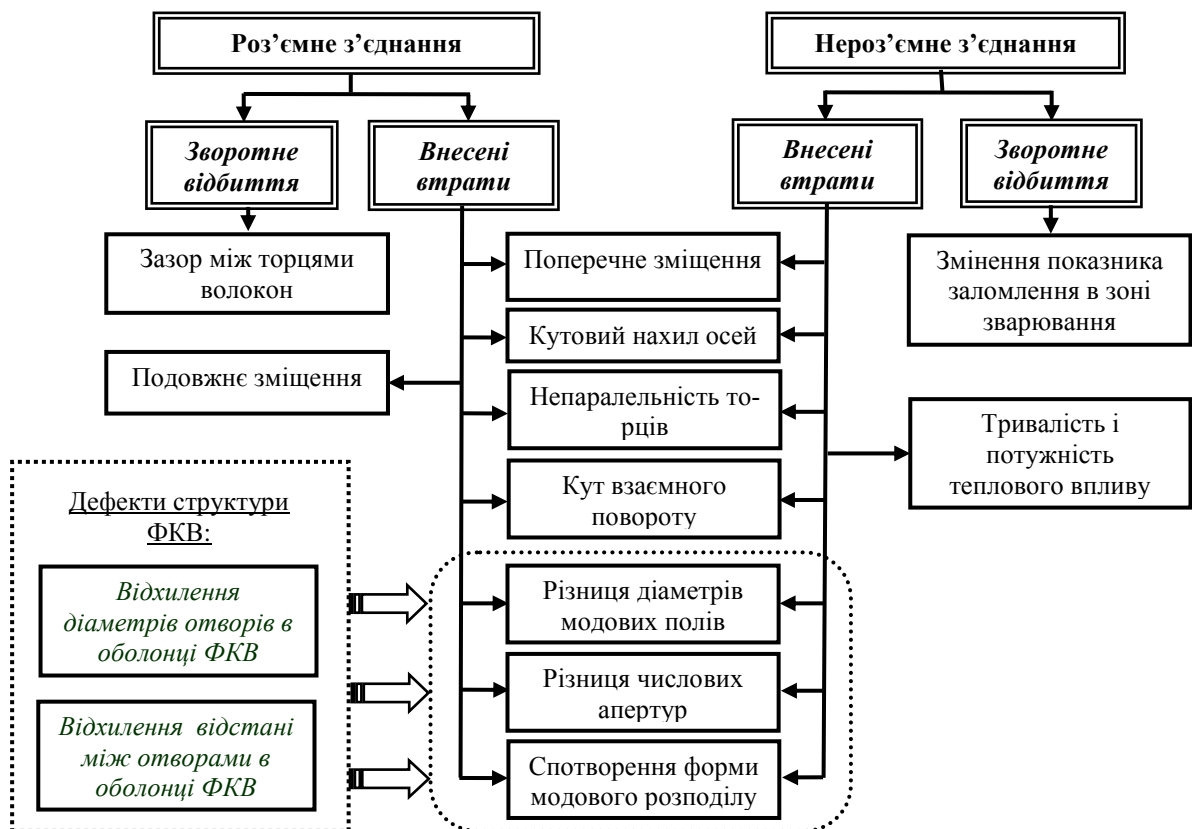


Рис. 1

Найсуттєвішими по внесеним втратам можна виділити поперечне, кутове та подовжнє зміщення. Основною вимогою для якісного з'єднання волокон є низькі втрати на стику. Але внаслідок своєї складної періодичної структури поперечного перетину ФКВ цей процес виявляється набагато трудомістким та потребує більшої точності виконання та контролю, ніж у випадку з'єднання стандартних ОВ. Тому важливою задачею являється контроль оптико-геометричних параметрів з'єднань ФКВ під час виконання монтажу.

### Постановка завдань дослідження

Метою даного дослідження є визначення залежності втрат сигналу від оптико-геометричних відхилень волокон, що з'єднуються. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити залежність розподілу модового поля від структури ФКВ (розміру отворів в оболонці, відстані між ними, діаметру сердцевини);
- знайти залежність втрат оптичного сигналу від різниці модових полів волокон;
- розрахувати втрати потужності сигналу в з'єднаннях оптичних волокон різного типу при поперечному, подовжньому та кутовому зсуві.

### Аналіз впливу структури поперечного перетину ФКВ на розподіл модового поля

Структура ФКВ відрізняється від структури звичайного оптичного волокна. В ОВ є стандартний діаметр сердцевини, тоді як діаметр сердцевини ФКВ може змінюватися, залежно від його області застосування. На рис. 2 показано змодельовані поперечні перетини ФКВ (а – в) та стандартного оптичного волокна з радіусом сердцевини  $r = 5 \text{ мкм}$  (г). На рис. 3 представлено відповідні до них розподіли поля основної моди на довжині хвилі  $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$ .

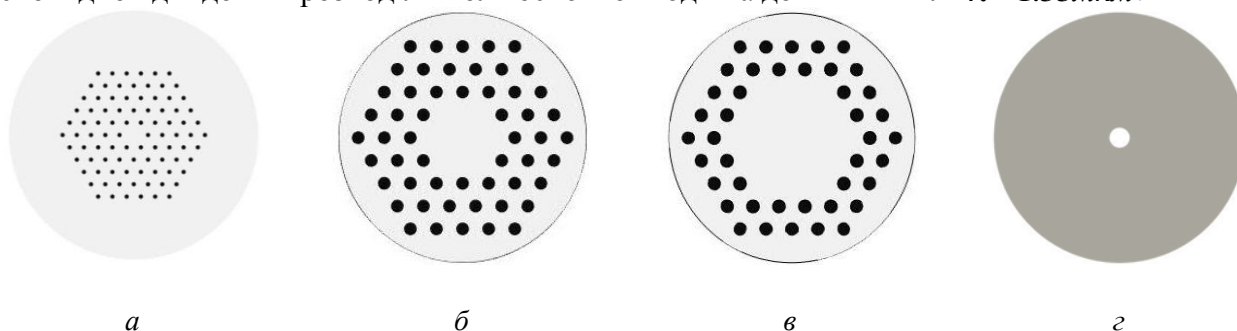


Рис. 2

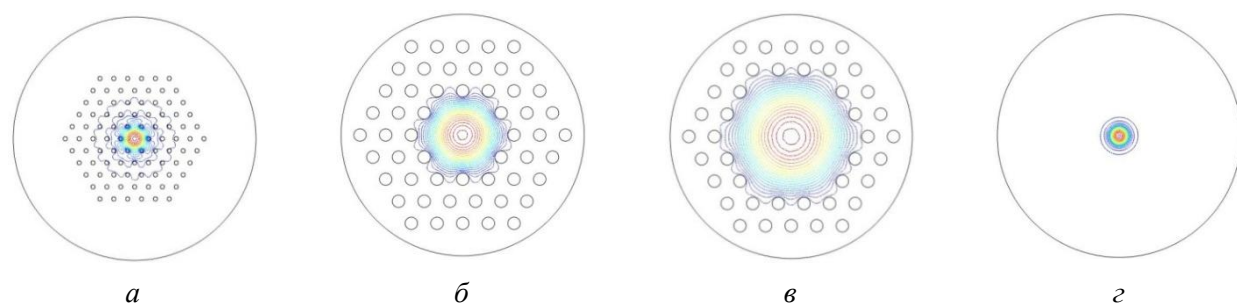


Рис. 3

В табл.1 представлено характеристики використаних в моделюванні оптичних волокон.

Таблиця 1

Зображення (позначення)	Діаметр сердцевини, мкм	Діаметр отворів в оболонці ФКВ, мкм	Відстань між отворами, мкм	Показник заломлення оболонки	Показник заломлення сердцевини	Радіус модового поля, мкм
а (PCF-10)	10	2.142	7.14	1.46	-	23
б (PCF-40)	39.4	6.402	13.2	1.4457	-	32.5
в (PCF-60)	63.0	6.402	13.2	1.4457	-	48.5
г (SMF)	10	-	-	1.4378	1.4457	12.5

### Втрати оптичного сигналу при з'єднанні ФКВ з різними розподілами модового поля

Показником якості з'єднання являється коефіцієнт передачі оптичного сигналу з одного волокна в інше. В випадках відсутності зміщень в з'єднанні, він може бути визначений приблизно таким чином [3, 4]:

$$T \approx \frac{4A_{eff1} \cdot A_{eff2}}{(A_{eff1} + A_{eff2})^2}, \quad (1)$$

де  $A_{eff1}, A_{eff2}$  – ефективні площі модових полів волокон, що з'єднуються:

$$A_{eff} = \frac{\left( \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^4 dx dy}, \quad (2)$$

де  $E(x, y)$  – амплітуда електричного поля.

Втрати в цьому випадку можна визначити по формулі

$$\alpha = -10 \lg(T). \quad (3)$$

Якщо з'єднуються два ідентичних волокна з однаковим розподілом модового поля, коефіцієнт передачі в ідеальному випадку буде дорівнювати одиниці, а втрати, відповідно, нулю. Однак на практиці такі значення недосяжні внаслідок різних факторів, які впливають на якість з'єднання (див. рис. 1).

### Визначення втрат сигналу в з'єднаннях ФКВ з урахуванням величини зсувів

Втрати при поперечному зсуві волокон можна вирахувати по формулі

$$\alpha_t = -10 \lg \left( \frac{4w_1^2 w_2^2}{(w_1^2 + w_2^2)^2} \exp \left( - \frac{2r_d^2}{w_1^2 + w_2^2} \right) \right), \quad (4)$$

де  $r_d = (d_x^2 + d_y^2)^{1/2}$  – поперечне зміщення двох волокон;  $w_1, w_2$  – їх радіуси модових полів.

Втрати при подовжньому зміщенні волокон можна визначити

$$\alpha_l = -10 \lg \left( \frac{4w_1^2 w_2^2}{\frac{l^2}{k_0^2} + (w_1^2 + w_2^2)^2} \right), \quad (5)$$

де  $l$  – подовжнє зміщення волокон;  $k_0 = 2\pi/\lambda$ .

Втрати при кутовому зміщенні визначаються по формулі

$$\alpha_\theta = -10 \lg \left( \frac{4w_1^2 w_2^2}{(w_1^2 + w_2^2)^2} \exp \left( - \frac{k^2 \theta^2 w_1^2 w_2^2}{2(w_1^2 + w_2^2)} \right) \right), \quad (6)$$

де  $\theta$  – кутове зміщення волокон [5].

Результати розрахунків по формулам (4) – (6) для різних типів з'єднань оптичних волокон представлено в табл.2.

За результатами розрахунків було побудовано графіки залежностей втрат оптичного сигналу від поперечного зсуву (рис. 4), подовжнього (рис. 5) та кутового (рис. 6) зміщення.

№	Тип з'єднання	$r_d$ , мкм	$\alpha_t$ , дБ	$l$ , мкм	$\alpha_l$ , дБ	$\theta$ , град.	$\alpha_\theta$ , дБ
1	PCF-10/SMF	0.5	3.516	0.5	3.508	0.2	3.513
		2.5	3.691	2.5	3.508	0.6	3.551
		4.5	4.099	4.5	3.508	0.8	3.585
2	PCF-10/PCF-10	0.5	0.005	0.5	$0.014 \cdot 10^{-5}$	0.4	0.012
		2.5	0.118	2.5	$0.340 \cdot 10^{-5}$	0.6	0.028
		4.5	0.383	4.5	$1.101 \cdot 10^{-5}$	0.8	0.050
3	PCF-40/PCF-40	0.5	0.005	0.5	$0.034 \cdot 10^{-6}$	0.4	0.006
		2.5	0.059	2.5	$0.852 \cdot 10^{-6}$	0.6	0.014
		4.5	0.192	4.5	$2.761 \cdot 10^{-6}$	0.8	0.025
4	PCF-60/PCF-60	0.5	0.001	0.5	$0.007 \cdot 10^{-6}$	0.4	0.003
		2.5	0.027	2.5	$0.172 \cdot 10^{-6}$	0.6	0.006
		4.5	0.086	4.5	$0.557 \cdot 10^{-6}$	0.8	0.011
5	PCF-40/PCF-60	0.5	1.563	0.5	1.562	0.4	1.565
		2.5	1.598	2.5	1.562	0.6	1.570
		4.5	1.680	4.5	1.562	0.8	1.577
6	PCF-40/SMF	0.5	8.011	0.5	8.007	0.4	8.017
		2.5	8.110	2.5	8.007	0.6	8.031
		4.5	8.340	4.5	8.007	0.8	8.050
7	PCF-60/SMF	0.5	14.540	0.5	14.540	0.4	14.55
		2.5	14.590	2.5	14.540	0.6	14.55
		4.5	14.700	4.5	14.540	0.8	14.56

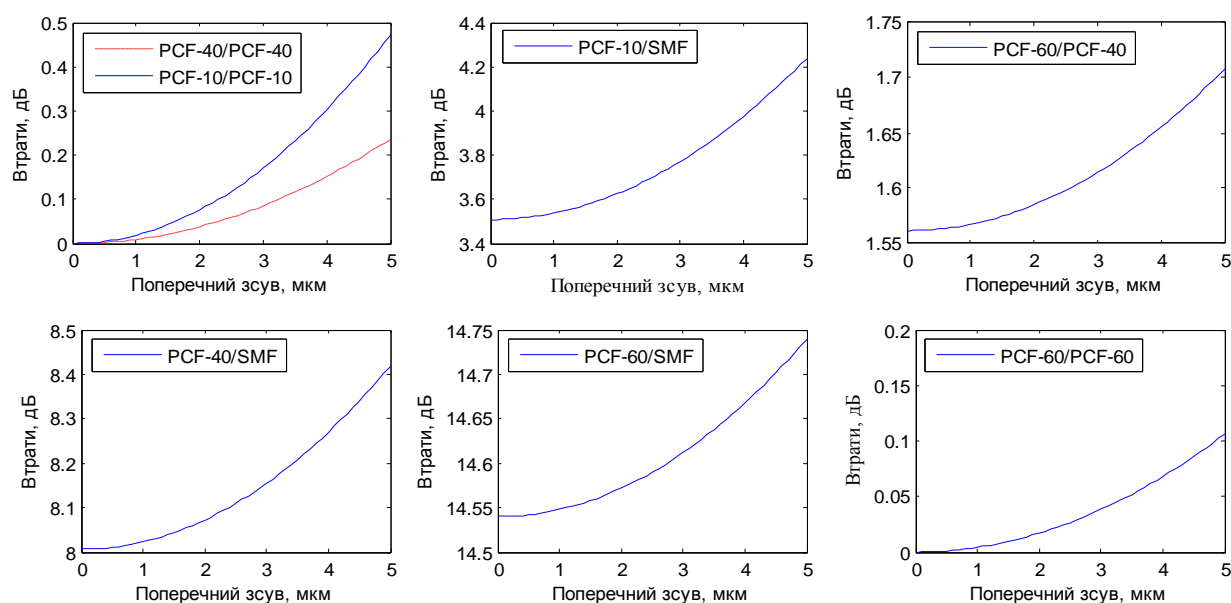


Рис. 4

Проаналізувавши отриманні результати проведених досліджень можна заключити, що при поперечному зміщенні двох ідентичних ФКВ втрати будуть більші для волокон з меншим діаметром модового поля, але не досягають  $0.5$  дБ при зсувах до  $5$  мкм. Тоді як на з'єднаннях ФКВ та стандартного ОВ або двох ФКВ з різними розмірами модових полів втрати збільшуються та досягають значень до  $14.5$  дБ (для випадку з'єднання ФКВ з радіусом модового поля  $48.5$  мкм та стандартного ОВ). Втрати при подовжньому зміщенні двох ФКВ з однаковою структурою ще більш незначущі, а при з'єднанні волокон з різними діаметрами модового поля затухання приблизно таке, як і для поперечного зсуву – до  $14.5$  дБ для величини зазору до  $5$  мкм. Така ж сама картина спостерігається і для кутового зміщення.

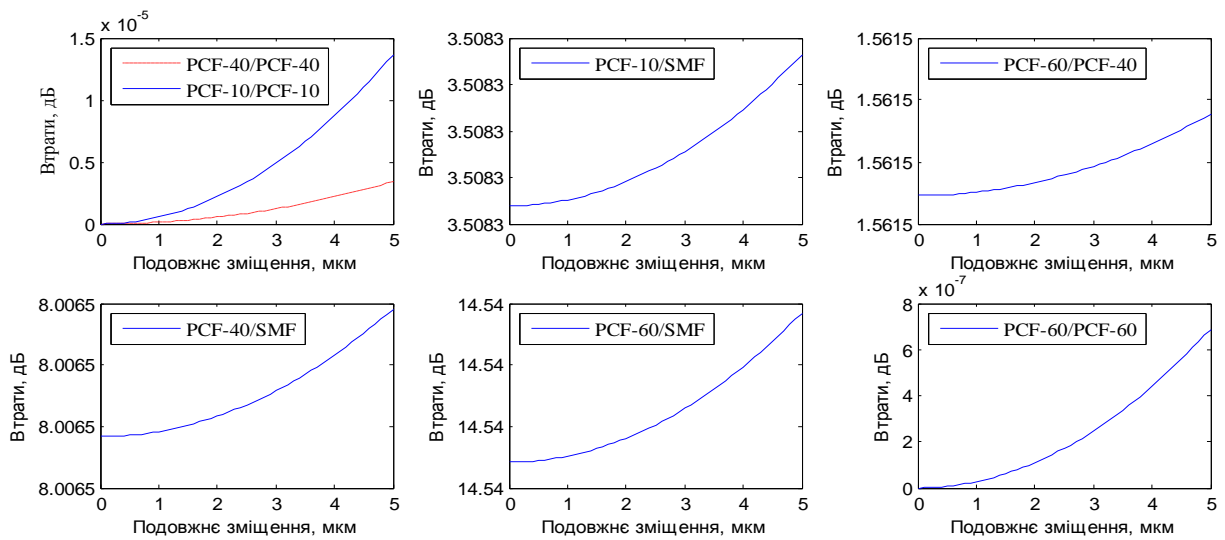


Рис. 5

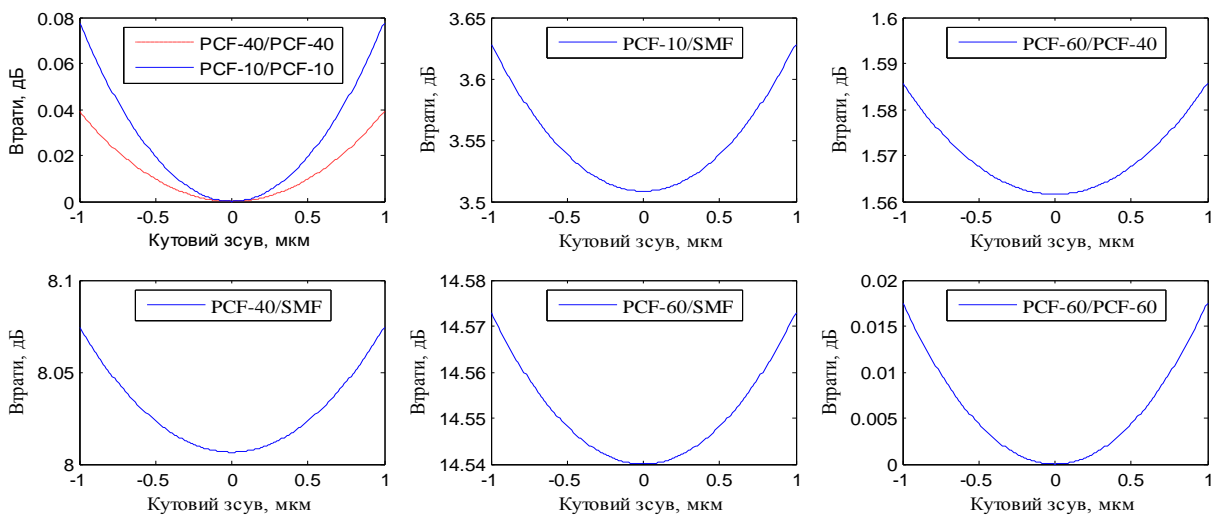


Рис. 6

## Висновки

В статті проаналізовано фактори втрат оптичного сигналу в з'єднаннях ФКВ, зазначено, що найбільший вплив на згасання мають поперечне, подовжнє та кутове зміщення. За допомогою комп'ютерного моделювання побудовано поперечні перетини оптичних волокон чотирьох різних типів та отримано їх розподіли полів основної моди. З отриманих зображень видно, що структура волокна (розмір отворів в оболонці, відстань між ними, діаметр сердцевини) впливає на розподіл модового поля. Для декількох варіантів з'єднань оптичних волокон розраховано втрати потужності сигналу та побудовано графіки залежності згасання від зміщень з урахуванням розмірів модових полів волокон. Подальші дослідження в цій області направлені на вивчення впливу інших оптико-геометричних параметрів з'єднань ФКВ на передачу сигналу (таких як кут взаємного повороту, непаралельність та шорсткість торців волокон, різниця числових апертур).

**Список літератури:** 1. Naniy, O. E., Pavlova, E. G. Photonic crystal fibers // Lightwave Russian Edition. – 2004. – №3. – P.47-53. 2. Pavlova, E. G. Mechanisms of losses in photonic crystal fibers // Lightwave Russian Edition. – 2005. – №3. – P.54-56. 3. W. Zhi, R. Guobin, L. Shuqin, J. Shuisheng. Supercell lattice method for photonic crystal fibers // OPTICS EXPRESS, 5 May 2003, Vol.11, No9, pp.980-991. 4. Mortensen, N. A. Effective area of photonic crystal fibers // OPTICS EXPRESS, 8 April 2002, Vol.10, No7, pp.341-348. 5. Kliros, G.S. Konstantantinidis, J., Thraskias, C. Prediction of Macrobending and splice losses for photonic crystal fibers based on the effective index method // Wseas transactions on communications. – 2006. – Vol.5, Issue 8. – P.1314-1321.

Харківський національний  
університет радіоелектроніки

Надійшла до редколегії 15.09.2012