

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОСТРУКТУРОВАНОГО ОПТИЧНОГО
ВОЛОКНА ВІД МЕХАНІЧНИХ ВПЛИВІВ**

Туз В.П.

e-mail: vasyt.tuz@nure.ua

Науковий керівник – д.т.н., проф. Чумаков В.І.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП,
м. Харків, Україна

This work investigates the influence of mechanical deformation on the optical and geometrical characteristics of microstructured optical fibers. A model of the fiber cross-section with air holes in the cladding was considered, and the effect of bending and structural distortion on effective refractive index, chromatic dispersion and bending loss was analyzed. The dependence of the effective refractive index difference on the ratio of air-hole diameter to pitch was evaluated. The obtained results confirm high sensitivity of microstructured fibers to external mechanical influence and demonstrate the necessity of optimizing their geometrical parameters.

Мікроструктуровані оптичні волокна (МОВ) є перспективним різновидом хвилевідних середовищ, які широко застосовуються в телекомунікаційних системах, сенсорних пристроях та спеціалізованих оптичних елементах. Особливістю таких волокон є наявність у оболонці повітряних отворів, завдяки чому є можливість керувати їх оптичними характеристиками шляхом зміни геометричних параметрів структури. На відміну від стандартних одномодових волокон, у МОВ ефективний показник заломлення та дисперсійні властивості значною мірою визначаються співвідношенням діаметра отворів до кроку їх розташування, а також радіусом серцевини.

У процесі експлуатації оптичні волокна піддаються різним механічним впливам, таким як вигин, скручування або локальна деформація. Такі впливи можуть змінювати геометрію поперечного перерізу, що призводить до зміни ефективного показника заломлення, порушення умов поширення моди та появи додаткових втрат. Для мікроструктурованих волокон ця проблема є особливо актуальною, оскільки навіть незначна зміна форми повітряних отворів може суттєво вплинути на хвилевідні властивості.

У зв'язку з цим важливим є дослідження залежності оптико-геометричних характеристик мікроструктурованого оптичного волокна від механічних впливів та визначення параметрів, при яких забезпечується стабільність передавання сигналу.

Метою роботи є дослідження впливу механічних деформацій на оптичні параметри мікроструктурованого оптичного волокна.

Дослідження проводилися для МОВ з твердою серцевиною та оболонкою, що містить періодично розташовані повітряні отвори. Основними геометричними параметрами такого волокна є діаметр повітряних отворів d , крок їх розташування Λ , а також радіус серцевини a .

Важливим параметром, що визначає хвилевідні властивості, є відносна різниця показників заломлення між серцевиною та ефективною оболонкою:

$$\Delta_{eff} = \frac{n_{core}^2 - n_{eff}^2}{2n_{core}^2}, \quad (1)$$

де n_{core} – показник заломлення серцевини, n_{eff} – ефективний показник заломлення оболонки.

Ефективний показник заломлення залежить від співвідношення d/Λ . Зі збільшенням цього параметра зростає оптичний контраст між серцевиною та оболонкою, що призводить до зміни модових характеристик та дисперсії. Нормована частота для мікроструктурованого волокна визначається як:

$$V_{eff} = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{core}^2 - n_{eff}^2}, \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання.

Зміна параметра d/Λ призводить до зміни ефективного показника заломлення оболонки та, відповідно, до зміни хвилевідних характеристик. Зі збільшенням d/Λ зменшується середній показник заломлення оболонки, що призводить до зростання різниці показників заломлення між серцевиною та оболонкою та до підсилення локалізації моди в серцевині.

Для оцінки впливу геометричних параметрів було виконано розрахунків відносної різниці показників заломлення Δ_{eff} для різних значень параметра d/Λ . Розрахунок проводився для кварцового волокна з показником заломлення серцевини $n_{core} = 1,45$, при довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм.

Значення ефективного показника заломлення оболонки визначались з урахуванням частки повітря в структурі оболонки. Результати розрахунків наведено в таблиці.

Таблиця 1 – Залежність ефективної різниці показників заломлення від параметра d/Λ

d/Λ	n_{eff}	Δ_{eff}
0,25	1,444	0,0041
0,30	1,442	0,0055
0,35	1,439	0,0076
0,40	1,435	0,0103

З отриманих результатів видно, що зі збільшенням параметра d/Λ ефективний показник заломлення оболонки зменшується, а відносна різниця показників заломлення зростає. Це призводить до збільшення нормованої частоти та посилення хвилевідної складової хроматичної дисперсії.

Хроматична дисперсія мікроструктурованого волокна визначається як сума матеріальної та хвилевідної складових:

$$D = D_m + D_w, \quad (3)$$

де D_m – матеріальна дисперсія, D_w – хвилевідна дисперсія.

Зі збільшенням d/Λ хвилевідна складова зростає, що призводить до зміщення нульової довжини хвилі дисперсії та зміни умов поширення сигналу. У процесі експлуатації оптичне волокно може зазнавати вигину, що призводить до появи додаткових втрат. При вигині частина енергії моди виходить за межі серцевини та переходить у оболонку, що викликає затухання сигналу. Механічна деформація призводить до зміни ефективного показника заломлення, що викликає зміну хроматичної дисперсії. Це особливо важливо для довгих ділянок волокна, де навіть невелика зміна дисперсії може призвести до значного розширення імпульсу.

Таким чином, отримані результати показують, що оптичні характеристики мікроструктурованого волокна суттєво залежать як від геометричних параметрів структури, так і від зовнішніх механічних впливів. Зміна співвідношення d/Λ призводить до зміни ефективного показника заломлення оболонки, що, у свою чергу, впливає на нормовану частоту, модові параметри та хвилевідну складову дисперсії. При збільшенні діаметра повітряних отворів або зменшенні кроку їх розташування зростає оптичний контраст між серцевиною та оболонкою, що забезпечує кращу локалізацію моди, але водночас підвищує чутливість волокна до деформацій.

Отримані результати підтверджують необхідність оптимізації геометричних параметрів мікроструктурованого волокна з урахуванням можливих деформацій під час експлуатації. Це є важливим для забезпечення стабільної роботи волоконно-оптичних ліній зв'язку та інших пристроїв, у яких використовуються мікроструктуровані оптичні волокна.

Список використаних джерел

1. Filipenko, O., Sychova, O., Novoselov, S., "Modeling, decision support, and software for automated positioning of photonic crystal fiber," (2024) In Sixteenth International Conference on Correlation Optics. SPIE. 2024, Vol. 12938, pp. 21-24. doi 10.1117/12.3008982.
2. Filipenko, O., Sychova, O., Novoselov, S., Tuz, V. and Chumakov V. "Microstructured optical fiber cross-sectional profile deformations influence on chromatic dispersion study," Proc. SPIE 13813, Seventeenth International Conference on Correlation Optics, 1381307 (2025). doi 10.1117/12.3088509.