

УДК 621.38.049.77, 778.38; 621.373.826.038.823

Гнатенко О.С.¹, Моргун І.В.², Левченко О.О.³

¹ зав.каф.ФОЕТ Харківського національного університету радіоелектроніки

² зав.лаб. каф. ФОЕТ Харківського національного університету
радіоелектроніки

³ асист. каф.ФОЕТ Харківського національного університету
радіоелектроніки

НОВІ ПОКОЛІННЯ ОПТОВОЛОКОННИХ ГІРОСКОПІВ: ВІД ФОТОННИХ КРИСТАЛІЧНИХ ВОЛОКОН ДО КВАНТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Робота представляє дослідження щодо роботи оптичного гіроскопа на основі волоконно-оптичних технологій. Основними компонентами цього гіроскопа є суперлюмінесцентний лазерний діод (довжина хвилі 1550 нм), циркулятор, розподільник, фазовий модулятор та 500-метрова котушка оптоволокна (тип волокна: Panda). Математично, фазова зміна, яка виникає при проходженні світла через волокно, можна описати рівнянням:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} n_{\text{eff}} \Delta\theta, \quad (1)$$

де $\Delta\phi$ – зміна фази, L – довжина волокна, λ – довжина хвилі, n_{eff} – ефективний показник заломлення волокна, а $\Delta\theta$ – кутова зміна, що відображає зміну орієнтації гіроскопа.

Рисунок 1 ілюструє роботу цього гіроскопа [1], який відповідає середнім показникам точності існуючих аналогів.

Однак наразі активно розробляються та впроваджуються фотонні кристалічні волокна (PCF) та волокна, що підтримують поляризацію (PANDA), які мають ряд привабливих властивостей для використання в оптоволоконних гіроскопах: повністю інтегровану конструкцію, довжину волокна близько одного метра, відсутність необхідності намотувати волокно на котушку та компактність пристрою.

Фотонні кристалічні волокна (PCF) мають складну структуру, яка впливає на їхні електромагнітні властивості як фотонних кристалів (PC). Для опису фотонної забороненої області (bandgap) у PCF використовується модель, що включає хвильові рівняння для електромагнітних хвиль:

$$(\nabla^2 + \frac{\varepsilon(r)}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2})E(r, t) = 0, \quad (2)$$

де $E(r, t)$ – електричне поле, $\varepsilon(r)$ – діелектрична проникність, c – швидкість світла у вакуумі, ∇^2 – оператор Лапласа.

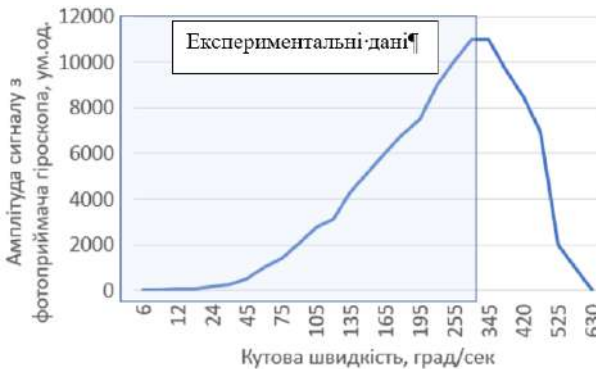


Рисунок 1

Залежно від ширини фотонної забороненої області, PCF можна класифікувати як провідники, ізолятори, напівпровідники або суперпровідники для електромагнітних хвиль. Для провідників маємо широкі дозволені діапазони для поширення світла з мінімальним поглинанням. Ізолятори мають широкі заборонені діапазони, що забезпечують ефективне відбиття світла, що можна описати рівнянням для коефіцієнта відбиття R:

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2, \quad (3)$$

де n_1 та n_2 – показники заломлення двох середовищ.

Напівпровідники, з іншого боку, мають можливість вибірково відбивати фотони певних довжин хвиль, що дає можливість контролювати спектральну характеристику волокна. Формула для пропускну здатності $\alpha(\lambda)$ напівпровідникового волокна з урахуванням дисперсії може бути записана як:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A}{\lambda^2 + B}, \quad (4)$$

де A та B – коефіцієнти, що визначають характеристики дисперсії матеріалу.

Порожнистий сердечник фотонних кристалічних волокон та волокон типу PANDA мають переваги перед стандартними оптоволоконками, оскільки вони здатні працювати в одномодовому режимі на широкому діапазоні довжин хвиль. Відповідно, модова структура таких волокон описується рівнянням для розподілу мод:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}), \quad (5)$$

де $\Delta\beta$ – різниця між коефіцієнтами хвильового числа для ядра та оболонки, n_{core} – показник заломлення ядра, n_{clad} – показник заломлення оболонки.

Ці волокна мають такі переваги, як здатність витримувати інтенсивне випромінювання, більшу площу моду, низьку оптичну нелінійність, точний контроль дисперсії, а також аномальну дисперсію хвилеводу з високою крутістю через розсіювання Релея. Таку аномальну дисперсію можна описати рівнянням для групової швидкості:

$$v_g = d\omega/d\beta, \quad (6)$$

де β – коефіцієнт хвильового числа, ω – частота, v_g – групова швидкість.

Крім того, використання фотонних кристалічних волокон дає можливість реалізувати оптоволоконний гіроскоп на основі генерації суперконтинууму [2]. Математичне описання цього процесу можна здійснити за допомогою рівняння для інтенсивності суперконтинууму $I(\omega)$:

$$I(\omega) = I_0 \exp\left(-\frac{\omega - \omega_0}{2\sigma^2}\right)^2, \quad (7)$$

де I_0 – початкова інтенсивність, ω_0 – центральна частота, σ – ширина спектра.

Ці дослідження проводяться командою, представленою в цій роботі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hnatenko, O.S., Machekhin, Y.P., Bilichenko, V., Zarytskyi, V.I., Yaroslavsky, Y., Klimek, J., Mussabekov, K., Yeraliyeva, B., Ormanbekova, A. FIBER-OPTIC SYSTEM FOR CONTROL OF THE ORIENTATION OF OBJECTS IN SPACE (2023) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 12985, art. no.1298508. DOI: 10.1117/12.3023026.
2. Kurskoy, Y.S., Hnatenko, O.S., Afanasieva, O.V. Application of Supercontinuum in Optical Gyroscopy (2023) Journal of Nano- and Electronic Physics, 15 (6), art. no. 06023. DOI: 10.21272/jnep.15(6).06023.4.