

УДК 535.3+681.7

ДИСПЕРСІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ТГЦ ВИХРОПОДІБНІ МОДИ ФОТОННОГО КРИСТАЛА АНТИМОНІДУ ІНДІЯ (InSb)

Демиденко Є.Є., Новицький В.В.

e-mail: yevhen.demydenko@nure.ua, vladyslav.novytskyi@nure.ua

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

We consider dispersion characteristics and field distributions of TE modes in the two-dimensional photonic crystal based on the square lattice of InSb rods. Finite element calculations are used for theoretical investigation of eigen modes of the semiconductor photonic crystal. Effect of the rod's radius and external magnetic field on the photonic crystal band diagram has been analyzed. The study of spatial field distributions in the periodic structure made it possible to detect modes with amplitude and phase characteristics inherent to optical vortices.

Фотонні кристали – це штучні наноструктури, ретельно розроблені з періодичною зміною їхнього показника заломлення на масштабі довжини, порівнянному з довжиною хвилі самого світла [1]. Ця періодичність впливає на поширення світла подібно до того, як кристалічна решітка впливає на електрони в напівпровіднику, що призводить до утворення фотонної забороненої зони, яка являє собою діапазон частот (або довжин хвиль), в якому світлу повністю заборонено поширюватися через матеріал у будь-якому напрямку [2, 3].

Гіротропні кристали є унікальними матеріалами, оскільки їхні електромагнітні властивості залежать від напрямку поширення електромагнітної хвилі через них [4]. Дисперсійні властивості матеріалу можна активно змінювати, застосовуючи зовнішні електричні та магнітні поля. У фотонних кристалах з магніточутливими елементами збільшення зовнішнього магнітного поля має глибокий та передбачуваний ефект: фотонна заборонена зона зміщує своє положення в бік вищих частот.

Антимонід індію (InSb) – ключовий бінарний напівпровідник, який вирізняється найменшою шириною забороненої зони (близько $0,17\text{eV}$ при 300K) серед усіх бінарних напівпровідників, а також найвищою рухливістю електронів. Ці унікальні характеристики роблять InSb ідеальним для застосування в середньому інфрачервоному діапазоні.

У цій статті розглядається двовимірний модель взаємодії магнітного поля з фотонним кристалом, виготовленим з InSb. Шляхом моделювання електромагнітної поведінки за допомогою методу скінченних елементів, ця робота досліджує зв'язок між напруженістю зовнішнього магнітного поля та результуючими змінами в структурі частотної смуги магнітофотонічного кристала.

Група циліндрів, виготовлених з InSb, розташованих у періодичному квадратному порядку, що дорівнює a , з радіусом циліндра, що дорівнює $0,3a$. Весь вільний простір навколо циліндрів InSb має властивості повітря, включаючи термоелектричні та магнітоелектричні характеристики.

Коли InSb піддається дії зовнішнього статичного магнітного поля, його діелектрична реакція стає анізотропною та описується тензором діелектричної проникності, а не скалярною величиною. Для зовнішнього магнітного поля B_0 , прикладеного вздовж осі z , тензор набуває вигляду:

$$\varepsilon^{\leftrightarrow} = \varepsilon_{\infty} \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & -i\varepsilon_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ i\varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{vmatrix} \quad (1)$$

Тут $\Sigma = 15,68$ – це гранична діелектрична проникність на високих частотах. Позадіагональні компоненти тензора (1) пропорційні напруженості зовнішнього магнітного поля та відповідають за гіротропну поведінку середовища.

Оскільки InSb має надзвичайно малу ефективну масу електронів, то невелике зовнішнє магнітне поле B_0 призводить до дуже великої циклотронної частоти ω_c . Це забезпечує практичний спосіб активного контролю фотонної забороненої зони магнітофотонічних кристалів на основі InSb.

Для визначення дисперсійних характеристик періодичної структури з гіротропними елементами було побудовано модель на основі методу скінчених елементів. Слід зазначити, що дисперсійні властивості фотонного кристала InSb подібні до властивостей звичайного діелектричного фотонного кристала за певних значень зовнішнього магнітного поля. Але при збільшенні зовнішнього магнітного поля можна отримати інші результати.

Результати числових розрахунків просторового розподілу високочастотного магнітного поля та розподілу фаз для власних мод фотонного кристала InSb показано на рис. 1 (a, b, c) для значення зовнішнього магнітного поля $H_0 = 7.2 \oplus 10^5$ A/m. Просторові розподіли ілюструють типові закономірності для хвиль орбітального кутового моменту. Зокрема, можна побачити три моди фотонного кристала з різними значеннями топологічного заряду. На рис. 1 (d, e, f) показано результати розрахунку для значення зовнішнього магнітного поля $H_0 = 7.5 \oplus 10^5$ A/m. Збільшення зовнішнього магнітного поля призводить до деяких змін у вихровій структурі власних мод напівпровідникового фотонного кристала. Наприклад, вихроподібний фазовий розподіл магнітного поля низькочастотної моди спостерігається лише в межах напівпровідникових стрижнів.

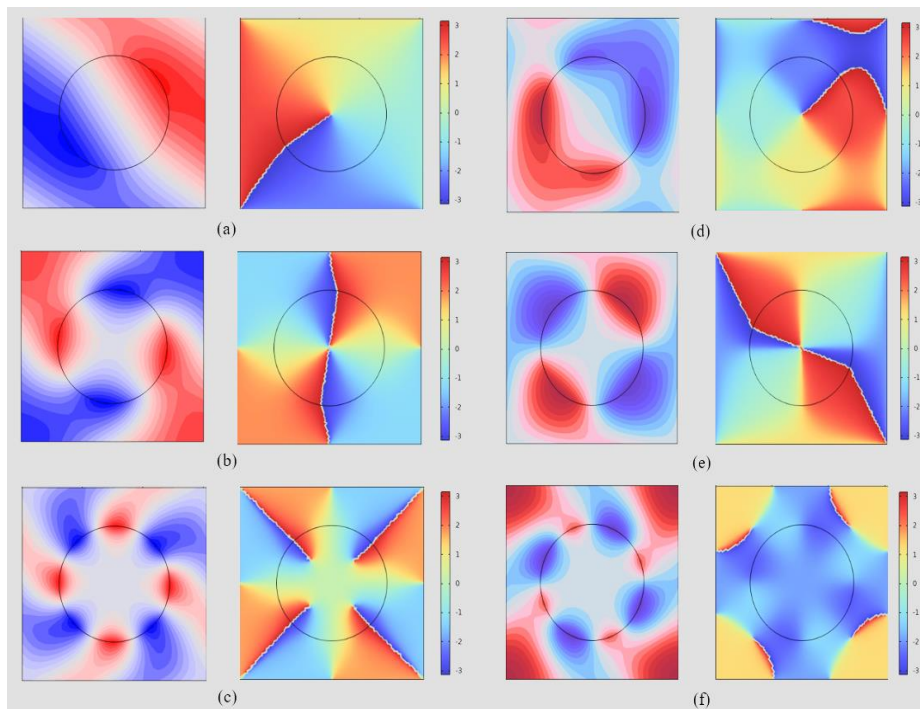


Рисунок 1. Просторові розподіли магнітного поля (ліва колонка) та фази магнітного поля (права колонка) для власних мод фотонного кристала InSb. (a) власна частота 2,78 THz; (b) 3,5 THz; (c) 7,63 THz; (d) 4,89 THz; (e) 5,13 THz; (f) 5,9 THz

Показано можливість реалізації власних мод фотонного кристала з вихровим фазовим розподілом поля. Таким чином, фотонні кристали InSb видаються перспективними структурами для формування та керування вихровими пучками терагерцового діапазону.

Список використаних джерел:

1. Joannopoulos J. D., Johnson S. G., Meade R. D., Winn J. N. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton: Princeton University Press, 2nd edition, 2008. 286 p.
2. Skorobogatiy M., Yang J. Fundamentals of Photonic Crystal Guiding. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 267 p.
3. Shmat'ko A. A., Odarenko E. N., Mizernik V. N., Shevchenko N. G. Tunable angular spatial filter based on 1D magnetophotonic crystal // 15th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2020), Lviv, Ukraine, 2020. P. 207–212.
4. Demydenko Y., Novytskyi V., Odarenko E., Shmat'ko A. Tunable photonic crystal waveguides with gyrotropic elements // 17th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2024), Lviv, Ukraine, 2024. P. 325–328.