

# ФОТОННІ КРИСТАЛИ ТА МЕТАМАТЕРІАЛИ: КЕРУВАННЯ СВІТЛОМ ПОЗА МЕЖАМИ ПРИРОДНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

У роботі проаналізовано фізичні властивості фотонних кристалів та метаматеріалів як штучних структур, що дозволяють керувати поширенням світла поза межами природних можливостей. Досліджено фізичну природу явища фотонної забороненої зони та ефект негативного показника заломлення, наведено основні рівняння електромагнітної хвилі в періодичних структурах. Показано практичні приклади застосування: оптичні фільтри, суперлінзи, «невидимі» покриття та підвищення ефективності сонячних елементів.

**Ключові слова:** фотонний кристал, метаматеріали, показник заломлення, фотонна зона, електромагнітна хвиля, суперлінза

## Abstract

The article analyzes the physical properties of photonic crystals and metamaterials as artificial structures that enable control over light propagation beyond natural limits. The physical basis of photonic band gaps and the effect of negative refractive index are investigated. Basic equations of electromagnetic waves in periodic structures are presented. Practical applications include optical filters, superlenses, invisibility cloaks, and enhanced solar energy harvesting.

**Keywords:** photonic crystal, metamaterials, refractive index, photonic band gap, electromagnetic wave, superlens

## Вступ

Фотонні кристали та метаматеріали є сучасними напрямками фізики, які вивчають керування світлом поза межами властивостей природних матеріалів. Світло описується як електромагнітна хвиля, яка у вакуумі поширюється зі швидкістю:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

де  $\epsilon_0$  — електрична стала,  $\mu_0$  — магнітна стала.

У звичайних середовищах швидкість світла змінюється через показник заломлення, а його поширення підкоряється закону Снелліуса:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

де  $n_1, n_2$  — показники заломлення першого та другого середовища відповідно;  $\alpha$  — кут падіння,  $\beta$  — кут заломлення світла.

У метаматеріалах з  $n < 0$  заломлений промінь лежить по той самий бік від нормалі, що й падаючий, що суттєво відрізняє їх від звичайних середовищ.

Дослідження цих структур є актуальним завданням сучасної нанофотоніки та радіофізики, оскільки вони дозволяють розробляти оптичні пристрої з властивостями, які неможливі у природних матеріалах.

## Фотонні кристали

Фотонні кристали — це структури з періодичною зміною діелектричної проникності. Завдяки періодичності  $\epsilon(r)$  формуються фотонні заборонені зони — діапазони частот, у яких світло не може поширюватися.

Розповсюдження світла в таких середовищах описується хвильовим рівнянням:

$$\nabla^2 E + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(r) E = 0$$

де  $E$  — електричне поле,  $\omega$  — кутова частота,  $\varepsilon(r)$  — просторово змінна діелектрична проникність.

Фотонні кристали дозволяють формувати високоточні оптичні фільтри та лазери, а також направляти світло в оптоволоконних лініях без втрат. Вони також використовуються для підвищення ефективності сонячних батарей, концентруючи світлову енергію в активному шарі.

### Метаматеріали

Особливістю метаматеріалів є те, що їхні ефективні параметри  $\varepsilon$  та  $\mu$  визначаються не стільки хімічним складом, скільки геометрією штучно створених структурних елементів, розмір яких є значно меншим за довжину хвилі ( $\lambda \gg a$ ). Це ключова відмінність від фотонних кристалів, де період порівнянний з довжиною хвилі.

При одночасному від'ємному значенні діелектричної проникності та магнітної проникності реалізується випадок «лівосторонніх» середовищ, де вектор Пойнтінга спрямований протилежно до хвильового вектора. В таких матеріалах показник заломлення визначається формулою:

$$n = -\sqrt{\varepsilon\mu}$$

Це дозволяє світлу заломлюватися в протилежний бік від звичайного, відкриваючи нові можливості для оптичних пристроїв: суперлінзи, «невидимі» покриття, концентратори світла для підвищення ефективності сонячних батарей.

### Практичне застосування

Фотонні кристали застосовуються для створення високоточних оптичних фільтрів, лазерних систем та оптоволоконних ліній. Вони дозволяють управляти спектром і напрямком світла, забезпечуючи високу точність та мінімальні втрати енергії.

Метаматеріали забезпечують можливість негативного заломлення світла, що використовується у суперлінзах для мікроскопії, в «невидимих» покриттях та інших оптичних пристроях. Крім того, вони підвищують ефективність сонячних батарей, концентруючи світло в активному шарі.

### Порівняння фотонних кристалів і метаматеріалів

Таблиця 1 – Основні характеристики

Характеристика	Фотонні кристали	Метаматеріали
Принцип дії	Періодична зміна діелектричної проникності	Геометрія штучних структурних елементів (мета-атомів)
Основний ефект	Фотонна заборонена зона	Негативний показник заломлення
Контроль світла	Пропускання або блокування певних довжин хвиль	Зміна напрямку і швидкості світла, лівосторонні ефекти
Розмір елементів	Порівнянний з довжиною хвилі	Значно менший за довжину хвилі ( $\lambda \gg a$ )
Складність виготовлення	Відносно прості	Більш складні
Застосування	Оптичні фільтри, лазери, оптоволокно	Суперлінзи, невидимі покриття, мікроскопія, сонячні батареї

### Висновки

У роботі проаналізовано фізичні основи фотонних кристалів і метаматеріалів, показано їх здатність керувати світлом поза межами природних можливостей.

Фотонні кристали формують фотонні заборонені зони, що дозволяє контролювати спектр світла, а метаматеріали з негативним показником заломлення можуть змінювати напрям його поширення.

Практична значущість підтверджується застосуванням у лазерній техніці, оптоволокну, мікроскопії, енергетиці та технологіях маскуванню.

Дослідження фотонних кристалів та метаматеріалів є сучасним і перспективним напрямом фізики, який відкриває нові можливості для розвитку оптичних технологій і науки загалом.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Joannopoulos J. D. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light / Joannopoulos J. D., Johnson S. G., Winn J. N., Meade R. D. — Princeton: Princeton University Press, 2008. — 305 p.
2. Cai W. Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications / Cai W., Shalaev V. — New York: Springer Science & Business Media, 2010. — 200 p.
3. Prather D. W. Photonic Crystals: Theory, Applications, and Fabrication / Prather D. W., Shi S., Murakowski J., Schneider G. J. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. — 405 p.
4. Maier S. A. Plasmonics: Fundamentals and Applications / Maier S. A. — Bath: Springer Science & Business Media, 2007. — 245 p.

**Святкіна Ольга Миколаївна** – студентка групи 4КН-25б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [sviatkinaolya@gmail.com](mailto:sviatkinaolya@gmail.com)

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Olha Mykolaivna Sviatkina** - student of group 4KN-25b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [sviatkinaolya@gmail.com](mailto:sviatkinaolya@gmail.com)

Scientific supervisor: **Volodymyr Valeriyovych Martyniuk** – Candidate of Philology tech. Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia