

## РЕЗОНАНСНІ ЕФЕКТИ В ПЛАНАРНИХ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ СТРУКТУРАХ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У СЕНСОРИЦІ, МЕТРОЛОГІЇ ТА ЛОГІЧНИХ ПРИСТРОЯХ

Д. ф.-м. н. Є. Я. Глушко

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України  
Україна, м. Київ  
scientist.com\_eugene.glushko@mail.com

*Розглянуто природу та механізми надзвичайно гострих резонансів у спектрах проходження та відбиття поляризованого ТГц-випромінювання в планарних металізованих або дефектних фотонних кристалах. Обговорюється можливість створення коліматорів, фільтрів терагерцового випромінювання та сенсорів на основі ефекту електромагнітного пробою в металізованих/дефектних резонаторах.*

*Ключові слова: фотонні кристали; металізовані фотонні резонатори; спектри проходження/відбиття; терагерцові коліматори, сенсори; фільтри.*

Терагерцова фотоніка — область з широким спектром застосувань, яка дуже швидко розвивається останні десятиліття, концентрує в собі різноманітні технології та методи досліджень [1 – 3]. В цьому аспекті фотонно-кристалічні (ФК) структури представляють великий інтерес завдяки технологічним зручностям при створенні ідеально відбиваючих дзеркал, ефективних оптичних фільтрів, а також у багатьох інших застосуваннях. Слід зазначити, що їхньою домінуючою застосовуваною властивістю є відомий ефект «omnidirectional reflection», на якому базуються фотонні хвильоводні інтегральні структури у 2D- та 1D-ФК. Ще одне перспективне застосування може базуватись на властивостях резонаторних мод в області повного внутрішнього відбивання (ПВВ), і крім того — на голкоподібному пропусканню типу резонансів Фано та плазмонних поляритонних резонансів в металізованих ФК [4 – 6]. В представленій роботі досліджується фізична природа та механізми недавно знайдених резонансних терагерцових спайків пропускання в металізованих та дефектних ФК на фоні ідеального відбиття в області вікон відбиття резонатору. Обговорюється перспективи створення надійного і компактного колімувального пристрою та інших фільтрувальних пристроїв на основі «piercing effect» у металізованому резонаторі [5] або екстремальних резонансів пропускання у дефектному ФК.

Розглядається  $s$ - та  $p$ -поляризовані електромагнітні хвилі у шаруватій  $N$ -періодичній поліпропіленовій/кремнієвій структурі як в області ПВВ, так і для геометрії зовнішнього падіння. Товщина поліпропіленових прошарків (PP)  $d_1$  та повітряних проміжків  $d_2$  підбираються такими, щоб розглядати прояви екстраординарного резонансного проходження в ТГц-області частот. На рис. 1 наведено конструкцію ФК-резонатора (PP/air ФК) з дефектним  $D$ -прошарком. Для такої структури перший вузький резонанс пропускання знаходиться при 61 ГГц для нормального падіння пучка. Зі зростанням кута падіння резонансна частота зростає, також стає більшою ширина піка.



Рис. 1. Планарний 10-періодний ФК-резонатор з дефектним прошарком (стрілка) (поліпропіленовий прошарок  $d_1 = 1000$  мкм, повітряний проміжок  $d_2 = 1000$  мкм, дефектний прошарок  $d_d = 1000$  мкм)

На рис. 2 (верхня панель) наведено структуру мод резонатора, що існують в області кутів ПВВ. Слід відмітити, що збудження власних станів резонатора можливе лише через спеціальні призми входу (геометрія внутрішнього падіння). Прошарки Si в цьому ФК-резонаторі товщиною  $d_1 = 300$  мкм чергуються з шарами PP товщиною  $d_2 = 1000$  мкм. Обрана товщина дефектного прошарку Si  $d_d$  складає 300 мкм. Якщо  $d_d \rightarrow 0$ , то при частотах менших 110 ГГц залишаються існувати лише поверхневі локальні стани в кутовому проміжку від  $\theta_1 = 17,0^\circ$  до  $\theta_1 = 17,6^\circ$ , для більших кутів вони вливаються у зонні стани (рис. 2, верхня панель, вертикальна стрілка). Внутрішній, пов'язаний з дефектом, локальний стан  $\nu_d \approx 75,8$  ГГц виникає при товщині  $d_d \approx 84$  мкм, він характеризується концентрацією густини поля біля D-прошарку. Коли товщина дефектного прошарку сягає 300 мкм, то частота локального стану кута падіння  $17^\circ$  зсувається з 75,8 до 73,8 ГГц. Наші оцінки показують досить складну залежність положення локальної моди від геометрії резонатора.

На рис. 2 (нижня панель) показано відповідну до знайденої модової структури мапу відбиття резонатора тепер в геометрії зовнішнього падіння для того ж частотного інтервалу 50 — 110 ГГц. Наявність дефектного прошарку генерує досить вузьку продовжену лінію підвищеного проходження в області вікна відбивання, яка починається з кута нормального падіння і закінчується при кутах близьких до  $\theta_1 = 90^\circ$  контактом з недоступною для зовнішнього падіння локальною модою (горизонтальна стрілка на верхній панелі).

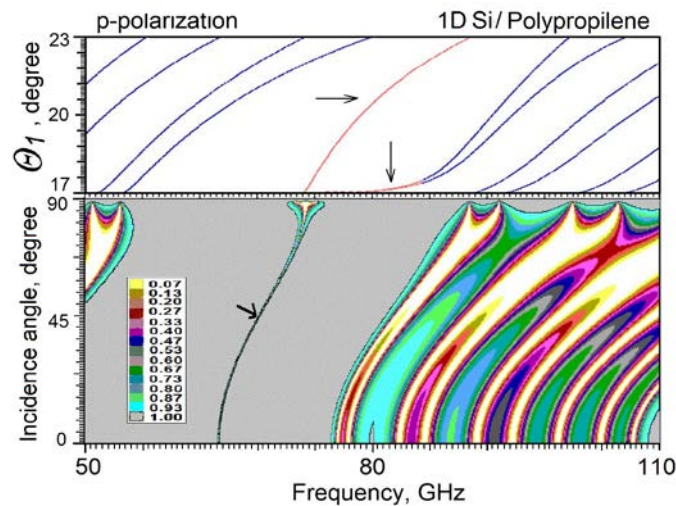


Рис. 2. Спектр  $p$ -поляризованих мод і мапа відбиття  $(\text{Si}/\text{PP})_5\text{Si}(\text{Si}/\text{PP})_5$  ФК-резонатора з дефектним прошарком Si товщиною  $d_d = 300$  мкм. В елементарній комірниці Si-прошарок  $d_1 = 300$  мкм, PP-прошарок  $d_2 = 1000$  мкм.

*Верхня панель* — розрахована зонна структура в інтервалі значень кутів  $\theta_1 \in (17^\circ, 23^\circ)$  області ПВВ.

Локальний стан дефекту знаходиться близько до центра енергетичної щілини.

Два поверхневих локальних стани відщеплюються від другої зони при  $\theta_1 < 17,6^\circ$  і приєднуються до зони при  $\theta_1 > 24,1^\circ$ .

*Нижня панель* — мапа відбиття (стрілка — спайк пропускання).

*Вставка* — 16-кольорова шкала відбиття, біле,  $R < 0,01$

Металізовані резонатори були розглянуті в [4 – 6] для різних значень товщини нанесеної на резонатор металевої плівки. Було знайдено, що PP/air ФК в контакті з товстою плівкою золота ( $d_m > 30$  нм) генерує добре виражену стабільну систему гострих піків проходження, пов'язаних з сильним резонансним тушінням  $p$ - та  $s$ -поляризованих хвиль на металевій плівці. У випадку  $p$ -поляризації кожна резонансна частота  $\nu_s$  попадає у відповідне їй вікно відбиття для даного кута падіння, для кутів  $\theta_1 \approx 90^\circ$  спайки проходження починають відповідати віртуальному початку власних  $p$ -мод області ПВВ. Для  $s$ -поляризованих хвиль, резонансна частота спайків  $\nu_s$  відповідає вікну відбиття лише у нижній частині мапи для кутів, менших кута Брюстера, тоді як у верхній її частині для кутів  $\theta_1 \approx 90^\circ$  спайки проходження починають відповідати віртуальному початку власних  $s$ -мод області повного внутрішнього відбивання. Форма, та інтенсивність піків немонотонно залежать від числа періодів.

Знайдені властивості металізованих/дефектних резонаторів формувати надзвичайно різкі піки проходження мають перспективи застосування для управління дивергенцією випромінювання ТГц-джерел. Розглянутий коліматор монохроматичного дивергентного пучка частотою  $\nu_1 = 68$  ТГц (рис. 2, нижня панель, стрілка) формує колінеарний пучок з дивергентністю близько  $0,1^\circ$  у напрямку  $45^\circ$ . Очевидно, що для таких пристроїв перспективним може бути застосування в денситометрії, метрології, сенсоріці та логічних пристроях.

#### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Dragoman D., Dragoman M. Terahertz fields and applications. *Prog. Quant. Electron.*, 2004, vol. 28, 1–66.
2. Dhillon S.S., Vitiello M.S., Linfield E.H. et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, vol. 50, 043001.
3. Sizov F.F. Infrared and terahertz in biomedicine. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2017, vol. 20, N 3, p. 273–283.
4. Glushko E.Ya. Mixed Fano-SP resonant absorption of THz electromagnetic waves in a photonic resonator contacting with a metal film. *Physics Letters A*, 2020, 384(23):126564.
5. Glushko E.Ya. Induced resonant electromagnetic piercing in metalized photonic crystal structures. *Optik*, 2021, 166502. In press. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166502>
6. Glushko E.Ya. THz transmission resonances in metalized and defect photonic structures for precise optical monitoring. *International Journal of Biosensors & Bioelectronics*, 2021, vol. 7, p. 1–3.

---

E. Ya. Glushko

#### **Resonant effects in planar photonic crystal structures and their application in sensing, metrology and logic devices**

*The nature and mechanisms of extremely sharp resonant transmission of polarized terahertz radiation in planar metalized or defect containing photonic crystals are analyzed. A possibility to create collimation devices, filters and sensors based on the effect of electromagnetic piercing in metalized/defected resonators is discussed.*

*Keywords: photonic crystals; metalized photonic resonators; transmission/reflection spectra; THz collimators, sensors; filters.*

---