

В.П. Маслов, В.О. Мороженко, Н.В. Качур

ДОСЛІДЖЕННЯ КУТОВИХ ТА ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ОДНОМІРНИХ ФОТОННИХ СТРУКТУР НА СКІНЧЕННІЙ ПІДКЛАДИНЦІ

Одномірні фотонні структури (ФС) являють собою шаруваті метаматеріали, оптичні властивості яких обумовлені інтерференційними ефектами всередині структури. Завдяки взаємодії електромагнітних хвиль з періодичною структурою, теплове випромінювання (ТВ) таких ФС має особливості когерентного: має селективний спектр та пелюсткову діаграму спрямованості. Актуальність досліджень ТВ ФС обумовлена пошуком нових матеріалів для створення джерел інфрачервоного (ІЧ) випромінювання на середній та дальній ІЧ-діапазони (з довжиною хвилі $\lambda > 5$ мкм). Другим важливим напрямком застосування випромінювальних властивостей ФС є створення невипромінюючих покриттів для усунення небажаного ТВ від нагрітих поверхонь ІЧ-приладів. Незважаючи на те, що випромінювальні властивості ФС досліджені досить добре, в літературі приділено недостатню увагу на вплив скінченної підкладки на параметри ТВ структур. В роботі досліджено вплив скінченної некогерентної підкладки на кутові та поляризаційні характеристики теплового випромінювання системи (фотонна структура)/підкладка. В експериментальних дослідженнях були використані системи, що склались із плоскопаралельних пластин Ge або p-Si у якості ФС та некогерентних підкладок BaF_2 , BaF_2/Al та Al. Встановлено, що контраст та амплітуда пелюстків діаграми спрямованості ТВ системи залежать від співвідношення оптичних характеристик фотонної структури та підкладки. Було зафіксовано тепловізійну картину кутового розподілу ТВ системи Si/Al та експериментально доведено, що ТВ фотонних систем має кругову діаграму спрямованості. Результати роботи можуть знайти застосування при розробці вузькосмугових випромінювачів на середній та дальній інфрачервоному діапазоні, покриттів для підвищення радіаційного теплообміну та покриттів з мінімальною випромінювальною здатністю, що невидимі в тепловому діапазоні.

Ключові слова: одномірні фотонні структури; теплове випромінювання; інфрачервоні пристрої.

1. ВСТУП

Останніми роками значна увага привернута до досліджень теплового випромінювання (ТВ) одномірних одношарових та багатшарових фотонних структур (ФС). Їхні оптичні властивості обумовлені не стільки властивостями складових елементів, скільки інтерференційними ефектами всередині структури. Завдяки взаємодії електромагнітних хвиль з періодичною структурою, ТВ таких структур має особливості когерентного: має селективний спектр та пелюсткову діаграму спрямованості.

Актуальність досліджень ТВ ФС обумовлена пошуком нових матеріалів для створення джерел інфрачервоного (ІЧ) випромінювання на середній та дальній ІЧ-діапазони (з довжиною хвилі $\lambda > 5$ мкм) [1-8]. Другим важливим напрямком застосування випромінювальних властивостей ФС є створення невипромінюючих покриттів [9-12] для усунення небажаного ТВ від нагрітих поверхонь ІЧ-приладів. В цьому випадку конструкція ФС передбачає відсутність випромінювання в робочому діапазоні довжин хвиль. В оглядових роботах [2,4] широко представлено види ФС, технології їхнього отримання, спектральні особливості їхніх ТВ, а також області їхнього застосування.

Незважаючи на те, що випромінювальні властивості ФС досліджені досить добре, в літературі приділено недостатню увагу на вплив скінченної підкладки на параметри ТВ структур. В [13] було досліджено залежність контрасту та амплітуди ліній ТВ напівпровідникових систем (фотонна структура)/підкладка (ФС/П) від оптичних характеристик фотонної структури та підкладки при реєстрації ТВ поблизу нормалі до випромінювальної поверхні. Було встановлено, що ці залежності мають немонотонний вигляд і характеристики

ТВ системи можуть як збільшуватись, так і зменшуватись в залежності від співвідношення окремих оптичних параметрів складових системи.

Дана робота є продовженням досліджень впливу некогерентної скінченної підкладки на характеристики ТВ системи ФС/П. Вона спрямована дослідити кутові та поляризаційні характеристики ТВ фотонних структур, розміщених на некогерентній скінченній підкладці та встановити вплив підкладки на вигляд діаграми спрямованості ТВ та ступінь поляризації випромінювання системи ФС/П.

2. ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗГЛЯД

Відповідно до закону Кірхгофа, інтенсивність теплового випромінювання, що випромінює нагріта система, становить:

$$P = P_{bb}(1 - R - T), \quad (1)$$

де T та R є відповідно пропускання та відбивання системи, P_{bb} інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла при тих же умовах.

Розглянемо випромінювальні властивості системи, зображеної на рис.1, що складається із одновірної фотонної структури та скінченної некогерентної підкладки. ФС вміщує в себе один шар з ненульовим поглинанням, розміщений між двома непоглинаючими дзеркалами R_1 та R_2 . Шар характеризується товщиною d_1 , коефіцієнтом заломлення n_1 і коефіцієнтом поглинання k_1 . Підкладка характеризується коефіцієнтом заломлення n_2 і коефіцієнтом поглинання k_2 . Дзеркала R_1 та R_2 можуть бути як непоглинаючими Брегівськими структурами, так і границями розділу середовищ повітря-шар і шар-підкладка відповідно.

Нехай зовнішнє світло із довжиною хвилі λ падає на систему під кутом θ зі сторони ФС, як показано на рис.1. Використовуючи матричний метод [14,15], неважко отримати аналітичні вирази для R і T системи. Вони є подібними до тих, що були отримані в [16] та використані в [13]:

$$R^v = R_\phi^v + \frac{(T_\phi^v \eta_2)^2 R_3^v}{1 - \eta_2^2 R_\phi^v R_3^v}, \quad T^v = \frac{T_\phi^v \eta_2 (1 - R_3^v)}{1 - \eta_2^2 R_\phi^v R_3^v}. \quad (2)$$

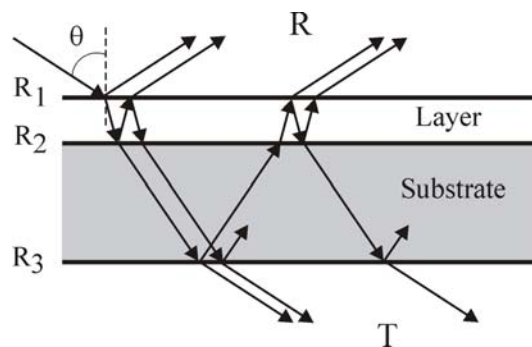


Рис. 1. Схематичне зображення розповсюдження світла в системі когерентна структура – підкладка.

Тут верхній індекс ($\nu = s, p$) визначає тип лінійно поляризованої компоненти ТВ: s – поляризованої перпендикулярно до площини падіння, p -поляризованої паралельно до площини падіння,

$$T_{\Phi}^{\nu} = \frac{(1 - R_1^{\nu})(1 - R_2^{\nu})\eta_1}{1 - 2G^{\nu} \cos 2\delta + (G^{\nu})^2} \quad (3)$$

$$\text{та } R_{\Phi}^{\nu} = \frac{R_1^{\nu} - 2G^{\nu} \cos 2\delta + R_2^{\nu}\eta_1^2}{1 - 2G^{\nu} \cos 2\delta + (G^{\nu})^2} \quad (4)$$

є відповідно пропускання та відбивання фотонної структури, $\eta_1 = \exp(-k_1 d_1 / \cos(\theta_1))$, $\eta_2 = \exp(-k_2 d_2 / \cos(\theta_2))$, $\delta = 2n_1 d_1 \cos(\theta_1) / \lambda$, $\sin(\theta_{1,2}) = n_{1,2} \sin(\theta)$, $G^{\nu} = \eta_1 \left| \frac{r_1^{\nu}}{r_2^{\nu}} \right|$, $r_{1,2}^{\nu}$ є амплітуди відбивання від дзеркал R_1 та R_2 .

Підставляючи (2)-(4) в (1), можна розрахувати інтенсивність як повного ТВ системи, так і лінійно поляризованих s - та p - компонент при відмінному від нормалі куті спостереження θ .

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В дослідженнях в якості фотонної структури використовували плоскопаралельні пластини p -Ge товщиною $d_1 = 0.1$ мм та Si (КДБ-0.1) товщиною $d_1 = 0.35$ мм. Вимірювали характеристики ТВ чистої пластини, пластини, розташованої на товстій некогерентній підкладці BaF_2 (система Ge/BaF_2) та BaF_2 із шаром алюмінію на тильній стороні (система $\text{Ge}/\text{BaF}_2/\text{Al}$), а також пластини із нанесеним шаром алюмінію на тильній стороні (система Ge/Al).

Експериментальна установка для дослідження характеристик ТВ під різними кутами нахилу схематично показана на рис. 2. Зразок закріплювався на поворотному тримачі, який включав в себе і нагрівальний елемент. Температура зразка підтримувалася на рівні 375 К. Небажане ТВ від нагрівача екранувалось діафрагмою, що мала температуру, близьку до фоновій (кімнатній) та малу випромінювальну здатність (високий коефіцієнт відбивання). Необхідна лінійно поляризована компонента ТВ виділялась поляризатором-граткою та фокусувалась на вхідному отворі Фур'є-спектрометра. Спектри ТВ вимірювалися з роздільною здатністю 2 см^{-1} . Для подальшого аналізу характеристик ТВ із спектрів виділялась ділянка із певною довжиною хвилі.

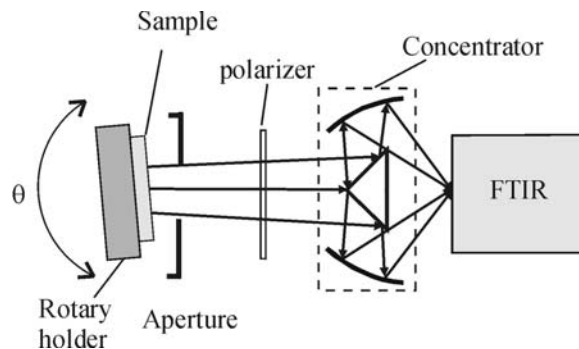


Рис.2. Експериментальна установка для дослідження спектрів ТВ під різними кутами нахилу.

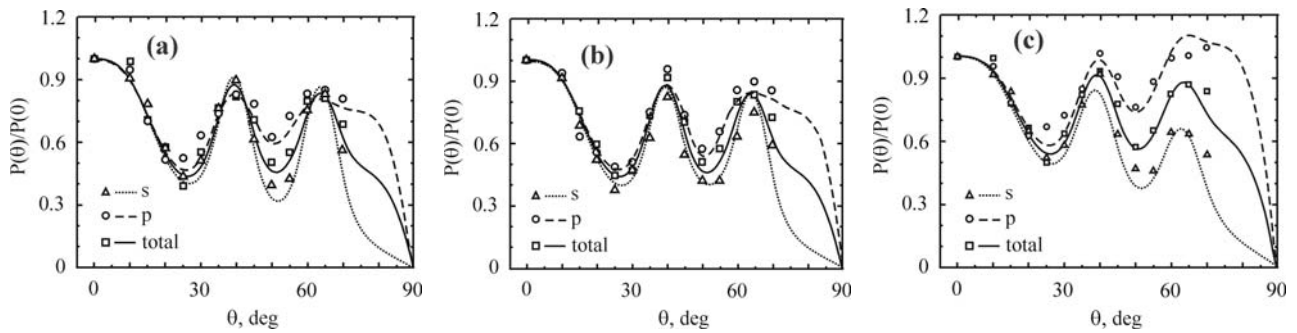


Рис.3. Кутові залежності інтенсивності ТВ: а – чистої плоско-паралельної пластини Ge; б – системи Ge/Al; с – системи Ge/BaF₂/Al. $\lambda = 10.27$ мкм. $d_1 = 0.1$ мм. Точки – експериментальні дані; лінії – результати розрахунків.

На рис.3 показані експериментальні (точки) і розрахункові (лінії) кутові залежності інтенсивності як повного ТВ, так і його лінійно поляризованих компонент вільної пластини Ge (Рис.3 а) та систем Ge/Al (Рис.3 б) і Ge/BaF₂/Al (рис.3 с). Кутові залежності побудовані для довжини хвилі $\lambda = 10.27$ мкм, яка відповідає інтерференційному максимуму при нормальному падінні. Для більш коректного порівняння залежності нормовані на інтенсивність ТВ при нормалі.

Як видно, кутові залежності являють собою низку досить контрастних максимумів та мінімумів (мають пелюстковий вигляд). У чистої пластини найбільш контрастною є залежність $P^S(\theta)$, а найменш контрастною – $P^P(\theta)$. Це пов'язано із тим, що коефіцієнти відбивання граней пластини, а отже, і добротність резонатора, більші для s-поляризованої компоненти.

Для системи Ge/Al подібна відмінність амплітуд пелюстків для лінійно поляризованих компонент та повного ТВ зберігається. Але різниця між ними набагато менша. Це пояснюється тим, що відмінність добротностей резонатора обумовлюється лише коефіцієнтом відбивання передньої грані.

У системи Ge/BaF₂/Al розподіл залежностей $P^S(\theta)$ та $P^P(\theta)$ за амплітудою суттєво відрізняється від попередніх: якщо на рис. а, б домінує s-поляризована компонента ТВ, то тут вона мінімальна, а більша частина випромінювання припадає на р-поляризовану компоненту. Причому амплітуда пелюсток р-поляризованої компоненти ТВ структури збільшується із збільшенням кута падіння, а s-поляризованого відповідно зменшується. Особливо різниця між залежностями $P^P(\theta)$ та $P^S(\theta)$ спостерігається в області кутів спостереження $\theta > 50^\circ$.

Зазначимо, що кутові розподіли ТВ систем Ge/BaF₂/Al та Ge/BaF₂ відрізняються інтенсивністю ТВ, що обумовлено відбиванням ТВ задньою стороною підкладки в сторону випромінювальної поверхні. Але в нормованому вигляді вони практично ідентичні. З цієї причини залежності $P^V(\theta)$ ТВ системи Ge/BaF₂ тут не розглядаються.

На рис.4 показані тепловізійні зображення кутового розподілу ТВ системи Si/Al. Для реєстрації кутового розподілу ТВ застосовувався тепловізор ТВ-3, що відрізняється великим діаметром об'єктива 160 мм та значною світлосилою. Він облаштований фотодіодним ІЧ-приймачем InSb, чутливим в області 2-5.3 мкм. Нагрітий зразок встановлювався на відстані 70-100 см від вхідної лінзи. Об'єктив був налаштований на нескінченність, щоб паралельні промені ТВ фокусувались на приймачі. Різка спектральна залежність чутливості InSb ФД в комбінації із близькою до експоненціальної спектральною залежністю функції Планка забезпечили достатню селективність ТВ в області максимуму чутливості InSb ФД – $\lambda \approx 5.3$ мкм.

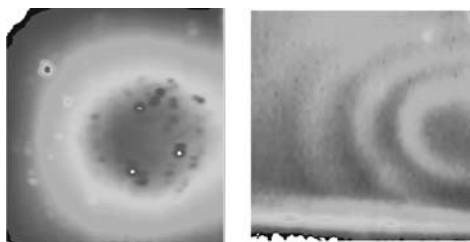


Рис.4. Тепловізійні зображення кутового розподілу ТВ пластин Si товщиною 0.35 мм з шаром алюмінію на тильній стороні.

Видно, що тепловізійні зображення мають вигляд кілець із загальним центром. Це експериментально підтверджує теоретичне припущення [17,18], що когерентне теплове випромінювання одномірних фотонних структур має кругову діаграму спрямованості. Відхилення резонансних ліній від форми правильних кілець на представлених термограмах може пояснюватись неідеальною паралельністю широких сторін зразка, похибками в юстуванні тощо.

5. ВИСНОВКИ

В роботі досліджено вплив скінченної некогерентної підкладки на кутові та поляризаційні характеристики теплового випромінювання системи (фотонна структура)/підкладка. В експериментальних дослідженнях були використані системи, що склались із плоскопаралельних пластин Ge або Si у якості ФС та некогерентних підкладок BaF_2 , BaF_2/Al та Al. Для порівняння було проведено дослідження кутового розподілу чистої пластини Ge.

Встановлено, що контраст та амплітуда пелюстків діаграми спрямованості ТВ системи залежать від співвідношення оптичних характеристик фотонної структури та підкладки. Наявність сильновідбиваючої підкладки нівелює різницю між кутовими залежностями s- та p-поляризованої компонент ТВ. В разі, коли ФС розміщена на прозорій некогерентній підкладці із меншим показником заломлення, спостерігається збільшення p-поляризованої компоненти ТВ та придушення s- поляризованої.

В результаті аналізу отриманої тепловізійної картини кутового розподілу ТВ системи Si/Al було експериментально доведено, що когерентне теплове випромінювання одномірних фотонних структур має кругову діаграму спрямованості.

Результати роботи можуть знайти застосування при розробці вузькосмугових випромінювачів на середній та дальній ІЧ- діапазони для потреб ІЧ -спектроскопії, систем моніторингу навколишнього середовища, оптичних приладів газового аналізу та аналізу складу речовини тощо. Також отримані результати можуть бути корисними при розробці покриттів для підвищення радіаційного теплообміну та покриттів з мінімальною випромінювальною здатністю, невидимих в тепловому діапазоні.

V.P.Maslov, V.O.Morozhenko, N.V.Kachur

INVESTIGATION OF THERMAL RADIATION ANGULAR AND POLARIZATION CHARACTERISTICS OF ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC STRUCTURES ON A FINITE SUBSTRATE

One-dimensional photonic structures (PS) are the layered metamaterials, which optical properties are due to interference effects within the structure. Due to the interaction of electromagnetic waves with the periodic structure, the thermal radiation (TR) of such PS has the features of coherent: it has a selective spectrum and a petal pattern. The relevance of TR PS research is due to the search for new materials to create sources of infrared (IR) radiation in the middle and far IR range (with a wavelength $\lambda > 5 \mu\text{m}$). The second important area of application of the radiating properties of the PS is the creation of non-radiating coatings to remove unwanted TR from the heated surfaces

of the IR devices. Despite the fact that the irradiative properties of PS have been studied quite well, in the literature insufficient attention is paid to the influence of the finite substrate on the parameters of TR structures. The influence of a finite incoherent substrate on the angular and polarization characteristics of the thermal radiation of the system (photonic structure)/substrate has been investigated. Systems consisting of plane-parallel Ge or Si plates as PS and incoherent BaF₂, BaF₂/Al and Al substrates were used in experimental studies. It has been established, the contrast and amplitude of the directional diagram petals of the TR system depend on the ratio of the optical characteristics of the photonic structure and the substrate. The presence of a strongly reflective substrate eliminates the difference between the angular dependences of the s- and p-polarized components of the TR. In the case when the PS is placed on a transparent incoherent substrate with a lower refractive index, there is an increase in the p-polarized component of the TR and the suppression of the s-polarized. The thermal imaging picture of the TR angular distribution of the Si/Al system has been recorded and it was experimentally proved that the TR of photonic systems exhibits circular patterns. The results of the work can be used in the development of narrowband emitters in the middle and far infrared range, coatings to increase radiation energy exchange and coatings with minimal emissivity that are invisible in the thermal range.

Keywords: one-dimensional photonic structures; thermal radiation; infrared devices.

1. Vasiljević D., Pavlović D., Lazović V., Kolarić B., Salatić B., Zhan W., Zhang D., Pantelić D. Thermal radiation management by natural photonic structures: *Morimus asper funereus* case. *J. Therm. Biol.* 2021. **98**. P. 102932.
2. Li W., Fan S. Nanophotonic control of thermal radiation for energy applications, *Opt. Express*. 2018. **26**. P.15995-16021.
3. Xu C., Qu S., Pang Y., Wang J., Yan M., Zhang J., Wang Z., Wang W. Metamaterial absorber for frequency selective thermal radiation, *Infrared Phys. Technol.* 2018. **88**. P. 133-138.
4. Fan S. Thermal Photonics and Energy Applications. *Joule*. 2017. **1**. P. 264-273
5. Liu J., Guler U., Lagutchev A., Malis O., Boltasseva A., Shalaev V. M. Quasicoherent thermal emitter based on refractory plasmonic materials. *Opt. Mater. Express*. 2015. **5**. P. 2721-2728.
6. Zhang Z. M., Wang L. P., Measurements and Modeling of the Spectral and Directional Radiative Properties of Micro/Nanostructured Materials, *Int. J. Thermophys.* 2013. **34**. P.2209-2242.
7. Wang L.P., Basu S., Zhang Z.M. Direct Measurement of Thermal Emission From a Fabry-Perot Cavity Resonator, *J. Heat Transfer*. 2012. **134**. P. 072701
8. Drévillon J., Joulain K., Ben-Abdallah P. Coherent thermal emission in midinfrared from a bilayer structure, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2011. **112**. P. 1156-1161.
9. Liu B., Shi J. M., Zhang J. K., Li Z. G., Z. Chen Sh., Deng X. S. Infrared stealth performance analysis of photonic crystal with high heat dissipation. *Opt. Mater.* 2021. **111**. P. 110689.
10. Zhang W., Lv D. Preparation and characterization of Ge/TiO₂ one-dimensional photonic crystal with low infrared-emissivity in the 8–14 μm band. *Mater. Res. Bull.* 2020. **124**. P. 110747-1-110747-4.
11. Xu C., Wang B., Yan M., Pang Y., Meng Y., Wang W., Wang J., Fan Q., Qu S. An optically transparent sandwich structure for radar-infrared bi-stealth. *Infrared Phys. Technol.* 2020. **105**. P. 103108.
12. Zhang Ji-Kui, Shi Jia-Ming, Zhao Da-Peng, Wang Qi-Chao, Wang Cheng-Ming. Realization of compatible stealth material for infrared, laser and radar based on one-dimensional doping-structure photonic crystals. *Infrared Phys. Technol.* 2017. **85**. P. 62–65.
13. Maslov V.P., Morozhenko V., Kachur N.V. Features of thermal radiation of one-dimensional photonic structures on an absorbing substrate. *SPQEO*, 2021 (у друку).
14. Harbecke B. Coherent and Incoherent Reflection and Transmission of Multilayer Structures. *Appl. Phys. B*. 1986. **39**. P. 165-170.
15. Charalambos C., Siapkias K. I., Siapkias D. I. General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference. *Appl. Opt.* 2002. **41**. P. 3978-3987.
16. Morozhenko V.O., Maslov V.P., Bariakhtar I.V., Kachur N.V. Determination of the parameters of coherent magneto-optical layers on a finite absorbing substrate from thermal radiation spectra. *SPQEO*. 2020. **23**. P. 400-407.
17. Kollyukh O.G., Morozhenko V. Angular and spectral peculiarities of coherent thermal radiation of the magneto-optical Fabry-Perot resonator in magnetic field. *J. of Optics A*. 2009. **11**. P. 085503.
1. Lee B.J., Fu C.J., Zhang Z.M. Coherent thermal emission from one-dimensional photonic crystals. *Appl. Phys. Lett.* 2005. **87**. P. 071904.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
41, проспект Науки,
03680 Київ, Україна
E-mail: morozh@meta.ua

Отримано 31.08.2021