

І.М. Хоменко, асист.
В.А. Рудніцький, к.ф.-м.н., доц.
Житомирський державний технологічний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ КОЕФІЦІЄНТІВ ВІДБИТТЯ І ПРОХОДЖЕННЯ НВЧ-ВИПРОМІНЮВАННЯ У НАНОМЕТРОВИХ ПРОВІДНИХ ВКЛЮЧЕННЯХ

Проведено аналіз сучасного стану досліджень електродинамічних властивостей одномірних хвилеводних фотонних кристалів. Досліджено особливості взаємодії цих кристалів з електромагнітним випромінюванням надвисокочастотного діапазону у зв'язку з необхідністю визначення параметрів нанометрових металевих плівок, діелектричних і напівпровідникових структур, що використовуються при виготовленні компактних надвисокочастотних схем для сучасних систем зв'язку та телекомунікації, при створенні антен, радарної техніки, виміральнового обладнання та різного роду датчиків. Розроблено теоретичну модель цієї взаємодії, в тому числі з фотонними кристалами, що містять діелектричні та провідні нанометрові шари, що дозволяє розраховувати коефіцієнти відбиття і проходження випромінювання надвисокої частоти для таких структур. Експериментально досліджено особливості взаємодії надвисокочастотного випромінювання з одномірними хвилеводними фотонними кристалами, що мають різні діелектричні властивості, структуру і товщину. Отримано відповідні спектри відбиття цих структур.

Ключові слова: коефіцієнт відбиття; коефіцієнт проходження; надвисокочастотне випромінювання; нанометрові структури; фотонний кристал.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Інтенсивний розвиток нанотехнологій стимулював розробку і створення нового класу періодичних структур, що отримали назву фотонних кристалів. Фотонні кристали – це структури, що складаються з періодично розташованих шарів, розміри яких є порівняними з довжиною хвилі електромагнітного випромінювання, що поширюється в них.

Одномірні фотонні кристали становлять особливий інтерес для дослідження, оскільки мають порівняну простоту в аналітичному описі взаємодії електромагнітної хвилі з періодичною структурою і технологічністю створення періодичної електродинамічної системи.

У зв'язку з перспективою використання при створенні різних пристроїв, матеріалів і композитів, від початку призначених для роботи в надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні, дослідження періодичних НВЧ фотонних кристалів також викликає особливий інтерес.

У НВЧ діапазоні одномірний фотонний кристал може бути реалізований за допомогою як хвилеводів, так і планарних ліній передачі. У першому випадку фотонний кристал розміщується всередині хвилеводного тракту, де він опромінюється НВЧ випромінюванням. До другого типу належать фотонні кристали, що виконані у вигляді смужкових ліній передачі різних типів з періодичною зміною топології, геометричних розмірів ліній передачі й діелектричної проникності підкладки, що підключаються до зовнішнього НВЧ-кола. Також можливе створення періодичної структури, що є незалежною від хвилеводного тракту або лінії передачі, дослідження якої проводиться за допомогою хвиль, що поширюються у вільному просторі.

На основі НВЧ-фотонних кристалів можуть бути реалізовані компактні НВЧ-схеми, такі як смугові фільтри, вимикачі і перемикачі, мініатюрні антени тощо.

Постановка завдання. Фотонні кристали належать до класу мета-матеріалів і являють собою штучно створені періодичні структури з періодом, що можна порівняти з довжиною хвилі електромагнітного випромінювання, що поширюється в них [1, 2]. Для цих структур властива періодична зміна як діелектричної проникності шарів, так й їх геометричних розмірів. При взаємодії електромагнітного випромінювання з такого роду структурами в спектрах відбиття і проходження спостерігається чергування дозволених і заборонених для поширення електромагнітного випромінювання частотних діапазонів [3, 4]. За аналогією з реальними кристалами, частотна область, що заборонена для розповсюдження електромагнітної хвилі, отримала назву фотонної забороненої зони. При внесенні порушення («неоднорідності») в періодичність структури фотонного кристала, яке може бути представлено у вигляді зміни геометричних розмірів та/або електрофізичних параметрів одного або декількох шарів, в забороненій зоні фотонного кристала виникає резонансна особливість – вузьке «вікно прозорості». Положення та форма «вікна прозорості» визначається геометрією та електрофізичними параметрами внесеного порушення періодичності.

Завдяки властивостям фотонних кристалів, а саме наявності заборонених та дозволених зон в спектрах проходження і відбиття даних структур, на їх основі можливе виготовлення різних типів

фільтрів із керованими характеристиками [5–11]. Управління можна здійснюватися як на стадії виробництва структур [12–14], так й за допомогою зовнішніх впливів на вже створену періодичну структуру та окремі її складові частини [15, 16].

Висока чутливість частотного положення «вікна прозорості» до параметрів порушення періодичності фотонного кристала є однією з найважливіших властивостей фотонних кристалів. Зміна електрофізичних параметрів і геометрії порушення періодичності призводить до частотного зсуву і зміни форми «вікна прозорості» у фотонній забороненій зоні фотонного кристала. Дана особливість є надзвичайно перспективною при використанні фотонних кристалів для створення резонаторів на їх основі.

Створення періодичних фотонних структур НВЧ-діапазону та дослідження їх властивостей мають важливе практичне значення у зв'язку з можливістю їх використання в сучасних системах зв'язку і телекомунікації, при створенні антен, радарної техніки, вимірювального обладнання та різного роду датчиків [17–21].

Актуальність роботи. Необхідність вимірювання параметрів нанометрових металевих плівок, діелектричних і напівпровідникових структур, що використовуються при виготовленні компактних НВЧ-схе, таких як смугові фільтри, вимикачі і перемикачі, мініатюрні антени тощо. Можливість визначення параметрів діелектричних і напівпровідникових матеріалів і структур, нанометрових металевих плівок за спектрами відбиття і проходження НВЧ-випромінювання, що взаємодіє з ними. Використання фотонних кристалів для розширення діапазону вимірюваних товщин та класу досліджуваних матеріалів, а також для проведення вимірювань в обраному частотному діапазоні.

Формулювання мети. Дослідження особливостей взаємодії електромагнітного випромінювання надвисокочастотного діапазону з одномірними хвилеводними фотонними кристалами, що містять неоднорідності у вигляді нанометрових металевих плівок, шарів діелектричних і напівпровідникових матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботі [18] представлені результати теоретичного та експериментального дослідження одномірних хвилеводних фотонних кристалів, утворених періодичним чергуванням комірок з шарів двох та трьох різних матеріалів. Експериментально виявлено фотонні заборонені зони в спектрах проходження одномірних фотонних кристалів, які складаються з шарів двох різних матеріалів, що підтверджує проведені теоретичні розрахунки. Зазначено, що при зміні геометричних розмірів окремих шарів в забороненій зоні відбувається утворення домішкової моди. Для одномірних фотонних кристалів, які складаються з шарів трьох різних матеріалів, була показана можливість зменшення ширини фотонної забороненої зони за допомогою введення тонкого діелектричного шару з високою діелектричною проникністю як третього шару, що було альтернативою збільшенню періоду шаруватої структури фотонного кристала.

У [22] проводилося моделювання та експериментальне дослідження амплітудно-частотних характеристик коефіцієнта пропускання електромагнітного випромінювання НВЧ-діапазону, що взаємодіє з фотонним кристалом, який складається з шарів кераміки (Al_2O_3) з великою кількістю повітряних включень і пінопласту, що періодично чергуються, за наявності і відсутності порушення періодичності фотонної структури. Була розглянута можливість дослідження впливу об'ємної частки повітряних включень на характеристики фотонного кристала як єдиного цілого в результаті використання поняття ефективної діелектричної проникності для характеристики керамічних шарів з повітряними включеннями. Досліджувався хвилеводний фотонний кристал, що складається з одинадцяти шарів в діапазоні частот 8–12 ГГц. Непарні шари були виконані з полікору (Al_2O_3), парні – з пінопласту. Шари повністю заповнювали поперечний переріз хвилеводу. У керамічних шарах була створена велика кількість повітряних включень у вигляді квадратних наскрізних отворів, що утворюють в площині шару періодичну структуру. Було встановлено, що збільшення об'ємної частки повітряних включень в шарах кераміки (в разі відсутності порушення періодичності в фотонній структурі) призводить до зменшення глибини забороненої зони фотонного кристала та до її зміщення в бік більш коротких довжин хвиль.

Низку робіт [23–27] присвячено створенню мікросмужкових фотонних кристалів для реалізації різних типів НВЧ-фільтрів, що мають поліпшені характеристики.

Згідно з [24], мікросмужкові фотонні кристали є перспективною модельною системою для вивчення властивостей одномірних фотонних кристалів для переходу в більш високочастотні діапазони і одночасно можуть незалежно використовуватися як складові компоненти різних НВЧ-схем. Виділено велику схожість мікросмужкових фотонних кристалів з реальними шаруватими структурами, порівняно з хвилеводними фотонними кристалами, через поширення в мікросмужковій лінії передачі квазі-ТЕМ хвилі, близької за своєю структурою до поперечних хвиль, що взаємодіють з одномірними фотонними кристалами оптичного діапазону. Також зазначено, що у мікросмужкових фотонних кристалах, на відміну від шаруватої структури, створюється періодична зміна ширини верхнього смужкового провідника: широкі відрізки – аналог високого коефіцієнта заломлення, вузькі – низького коефіцієнта заломлення; таким чином, формуються стрибки хвильового опору вздовж структури. З аналізу мікросмужкової моделі, як системи пов'язаних резонаторів, слід, що в структурі одномірного фотонного

кристалу необхідно створити як періодичну зміну діелектричної проникності шарів, так й їх товщини. Іншими словами, підґратки, що входять до складу одномірного фотонного кристала, не повинні збігатися за геометричними розмірами (товщиною) та за електрофізичними параметрами (діелектричною проникністю) для отримання фільтрів з високими характеристиками.

Робота [28] присвячена планарним фотонним кристалів. В ній описується мікросмужкова лінія передачі з витравленими з діелектричної підкладки комірками, що заповнені повітрям. Було встановлено, що збільшення кількості відрізків мікросмужкової лінії передачі (і, відповідно, кількості повітряних комірок) призводить до збільшення глибини фотонної забороненої зони. Зазначено, що зміна довжини мікросмужкових секцій не призводить до зміни глибини і нормованої ширини забороненої зони, але викликає її частотний зсув.

Необхідно підкреслити, що фотонні кристали можуть використовуватися не лише як незалежні системи (фільтри, перемикачі тощо), але й як елементи і складові частини різних пристроїв, що поліпшують їх характеристики або надають їм нових властивостей [29–34].

Розробка нових та вдосконалення існуючих пристроїв НВЧ-електроніки пов'язана зі створенням методів електричного управління характеристиками таких пристроїв, як смугові або селективні фільтри, антени з апертурою, що перестроюється, генератори, що перестроюються, тощо [35–37].

Як зазначалося в [38], в сучасних телекомунікаційних системах використовуються фільтри, що перестроюються, за допомогою яких можна здійснювати селекцію різних частот в результаті зовнішнього впливу.

Викладення основного матеріалу

Математична модель взаємодії НВЧ-випромінювання з одномірними хвилеводними фотонними структурами. Для розрахунку коефіцієнтів відбиття і проходження електромагнітної хвилі при її нормальному падінні на одномірний фотонний хвилеводний кристал використовувалася матриця передачі хвилі між областями з різними значеннями постійної поширення електромагнітної хвилі γ_j та γ_{j+1} , що пов'язує коефіцієнти A_j , B_j , A_{j+1} , B_{j+1} , що визначають амплітуди падаючих і відбитих хвиль по обидва боки від межі $Z_{j,j+1}$:

$$\mathbf{T}(Z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1}-\gamma_j)Z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1}+\gamma_j)Z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1}+\gamma_j)Z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1}-\gamma_j)Z_{j,j+1}} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Коефіцієнти A_{N+1} і B_0 , що визначають амплітуди хвилі, яка пройшла через багат шарову структуру, і хвилі, відбитої від неї, пов'язані з коефіцієнтом A_0 , що визначає амплітуду падаючої хвилі таким співвідношенням:

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_N \cdot \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де \mathbf{T}_N – матриця передачі шаруватої структури, що складається з N шарів:

$$\mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N[1,1] & \mathbf{T}_N[1,2] \\ \mathbf{T}_N[2,1] & \mathbf{T}_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(Z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(Z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(Z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(Z_{0,1}). \quad (3)$$

Постійні поширення електромагнітної хвилі в порожньому хвилеводі, хвилеводі, що заповнений діелектриком, нанометровою металевією плівкою і напівпровідником відповідно описуються наступними виразами:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0}; \quad \gamma_{i,i} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_{i,i}^* \epsilon_0 \mu_{i,i} \mu_0}; \quad \gamma_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_{\bar{a}} \epsilon_0 \mu_0}, \quad (4)$$

де $\epsilon_{i,i}^* = \epsilon'_{i,i} - j\epsilon''_{i,i}$; $\epsilon'_{i,i} = \epsilon_{i,i} - \frac{\sigma_{i,i}^2 m_{i,i}^*}{\epsilon_0 e^2 n_{i,i}}$; $\epsilon''_{i,i} = \sigma_{i,i} / \epsilon_0 \omega$.

Коефіцієнти відбиття R і проходження T електромагнітної хвилі, яка взаємодіє з шаруватою структурою, визначаються через елементи матриці передачі \mathbf{T}_N за допомогою співвідношень:

$$R = \frac{B_0}{A_0} = -\frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}, \quad (5)$$

$$T = \frac{A_{N+1}}{A_0} = \frac{\mathbf{T}_N[1,1] \cdot \mathbf{T}_N[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2] \cdot \mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}. \quad (6)$$

Результати моделювання взаємодії НВЧ-випромінювання з односторонніми хвильовими фотонними структурами. На рисунку 1 наведено частотні залежності квадрата модуля відбиття $|R|^2$ фотонного кристалу «полікор-пінопласт», що складається з одинадцяти шарів для різних значень товщини d_6 порушеного 6-го шару (шар пінопласту). Крива 1 на рисунку 1 відповідає фотонному кристалу без порушень.

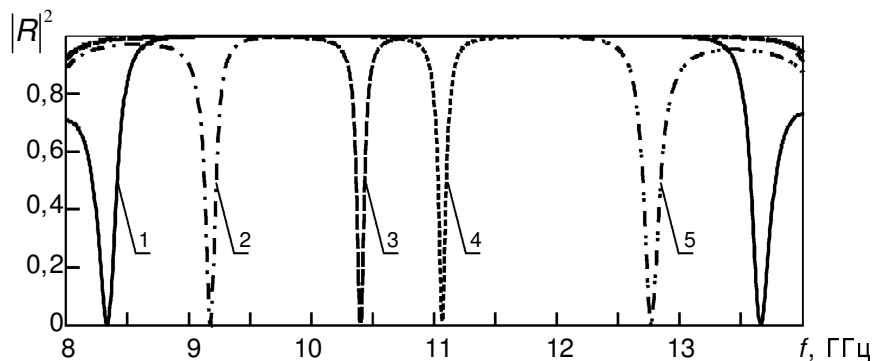


Рис. 1. Частотні залежності $|R|^2$ за різних значеннях d_6 , мм:
2 – 7,0; 3 – 4,0; 4 – 3,0; 5 – 1,0

На рисунку 2 наведено спектри відбиття фотонного кристалу для різних значень товщини h металевого шару при розміщенні фотонного кристалу перед вимірюваною структурою. Крива 1 на рисунку 2 – без вимірюваної структури.

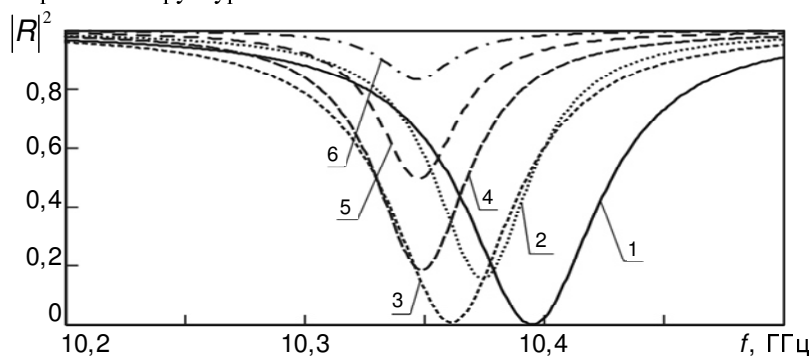


Рис. 2. Спектри відбиття фотонного кристалу при різних значеннях h , нм:
2 – 0; 3 – 4; 4 – 20; 5 – 50, 6 – 200

На рисунку 3 наведено виміряні частотні залежності квадрата модуля коефіцієнта відбиття $|R|^2$ фотонного кристалу для різних значень товщини d_6 порушеного 6-го шару (шар пінопласту). Крива 1 відповідають фотонному кристалу без порушень.

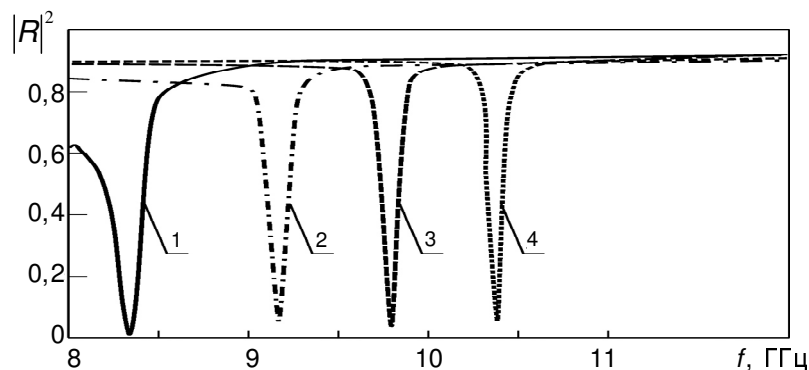


Рис. 3. Виміряні частотні залежності $|R|^2$ при різних значеннях d_6 , мм:
2 – 7,0; 3 – 5,0; 4 – 4,0

На рисунку 4 наведено виміряні частотні залежності квадрата модуля коефіцієнта відбиття $|R|^2$ фотонного кристала, структура якого складається з одинадцяти шарів для різних значень діелектричної проникності ε 7-го шару при товщині порушеного 6-го шару $d_6 = 4$ мм.

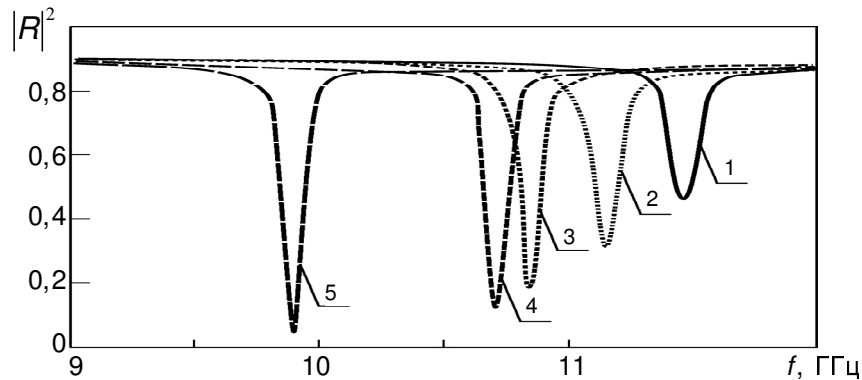


Рис. 4. Виміряні частотні залежності $|R|^2$ при різних значеннях ε , відн. од.:
1 – 1; 2 – 3; 3 – 4,3; 4 – 4,7; 5 – 9,6

На рисунку 5 наведено виміряні частотні залежності квадрата модуля коефіцієнта відбиття $|R|^2$ фотонного кристала з порушенням у вигляді 6-го шару меншої товщини (4 мм) для різних значень товщини h нанометрового металевого шару при розміщенні зразка після фотонного кристала. Крива 1 відповідає фотонному кристалу без досліджуваного зразка.

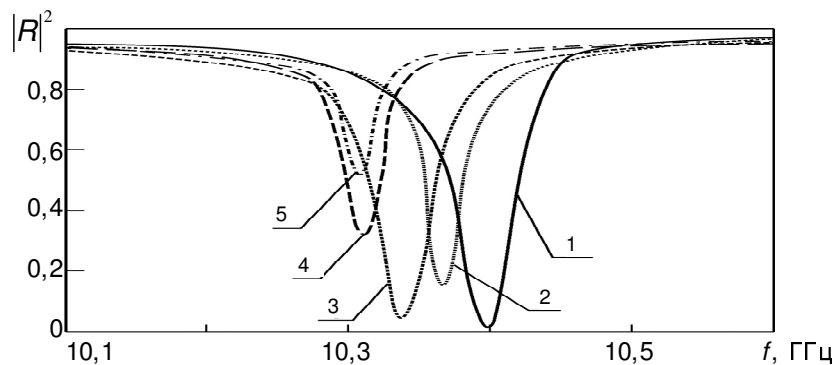


Рис. 5. Виміряні частотні залежності $|R|^2$ за різних значень h , нм:
2 – 0; 3 – 21; 4 – 76; 5 – 144

Висновки з даного дослідження. Проведено аналіз сучасного стану досліджень електродинамічних властивостей НВЧ-фотонних кристалів з включеннями у вигляді наноструктур і нанокомпозитів та їх застосування для створення функціональних пристроїв НВЧ-електроніки. Наведено опис моделі, методика і результати експериментальних досліджень частотних залежностей коефіцієнтів відбиття і проходження НВЧ-випромінювання, що взаємодіє з хвилеводними фотонними кристалами, які містять нанометрові провідні включення. Експериментально досліджено особливості взаємодії НВЧ-випромінювання з одномірними хвилеводними фотонними структурами у трисантиметровому діапазоні довжин хвиль. Експериментально досліджено спектри відбиття електромагнітного випромінювання НВЧ-діапазону одномірних хвилеводних фотонних структур, що містять порушення у вигляді зміненої товщини і діелектричної проникності окремих шарів, а також одномірних хвилеводних фотонних структур, розміщених перед структурою типу «нанометрова металева плівка–напівпровідникова або діелектрична підкладка».

Список використаної літератури:

1. *Yablonovitch E.* Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics / *E.Yablonovitch* // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 58, № 20. – Pp. 2059–2062.
2. *Yablonovitch E.* Photonic Crystals: Semiconductors of Light / *E.Yablonovitch* // *Scientific American*, 2001. – Vol. 285, № 6. – Pp. 47–55.
3. *Yablonovitch E.* Photonic band-gap structures / *E.Yablonovitch* // *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics.* – 1993. – Vol. 10, № 2. – Pp. 283–295.
4. *Yablonovitch E.* Photonic band-gap crystals / *E.Yablonovitch* // *Journal of Physics-Condensed Matter.* – 1993. – Vol. 5, № 16. – Pp. 2443–2460.
5. Spatial filtering using dielectric photonic crystals at beam-type excitation / *E.Colak, A.O. Cakmak, A.E. Serebryannikov, E.Ozbay* // *J. Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 108, № 11. – Pp. 113106–113108.
6. *Bulgakov S.A.* Defect-enhanced resonances in photonic lattices / *S.A. Bulgakov, M.Nieto-Vesperinas* // *Waves in Random Media.* – 2000. – Vol. 10, № 3. – Pp. 359–366.
7. *Padjen R.* Analysis of the Filling Pattern Dependence of the Photonic Bandgap for Two-dimensional Systems / *R.Padjen, J.M. Gerard, J.Y. Marzin* // *Journal of Modern Optics.* – 1994. – Vol. 41, № 2. – Pp. 295–310.
8. *Karathanos V.* Inactive frequency bands in photonic crystals / *V.Karathanos* // *Journal of Modern Optics.* – 1998. – Vol. 45, № 8. – Pp. 1751–1758.
9. Переключение фотонной запрещенной зоны в трехмерных пленочных фотонных кристаллах на основе композитов опал-VO₂ в спектральной области 1.3–1.6 мкм / *А.Б. Певцов, С.А. Грудинкин, А.Н. Поддубный* и др. // *ФТП.* – 2010. – Т. 44, № 12. – С. 1585–1590.
10. *Kuriazidou C.A.* Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials / *C.A. Kuriazidou, H.F. Contopanagos, N.G. Alexopolos* // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques.* – 2001. – Vol. 49, № 2. – Pp. 297–306.
11. *Karmakar N.C.* Investigations Into Nonuniform Photonic-Bandgap Microstripline Low-Pass Filters / *N.C. Karmakar, M.N. Mollah* // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques.* – 2003. – Vol. 51, № 2. – Pp. 564–572.
12. Многокомпонентные фотонные кристаллы: селективное управление световыми потоками и резонансные стоп-зоны / *М.Ф. Лимонов, А.В. Барышев, М. Inoue* и др. // *Российские нанотехнологии.* – 2008. – Т. 3, № 1–2. – С. 142–145.
13. *Самусев А.К.* Селективное переключение стоп-зон в двумерных многокомпонентных фотонных кристаллах / *А.К. Самусев, М.В. Рыбин, М.Ф. Лимонов* // *ФТТ.* – 2009. – Т. 51, № 3. – С. 487–492.
14. *Ветров С.Я.* Прохождение света через плоскопараллельную пластинку двумерного резонансного фотонного кристалла / *С.Я. Ветров, И.В. Тимофеев, Н.В. Рудакова* // *ФТТ.* – 2011. – Т. 53, № 1. – С. 133–138.
15. Увеличение интенсивности фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света в одномерных фотонных кристаллах на основе пористого кремния / *К.А. Гончар, Г.К. Мусабек, Т.И. Таурбаев, В.Ю. Тимошенко* // *ФТП.* – 2011. – Т. 45, № 5. – С. 625–628.
16. Хиральные фотонные кристаллы с электрически управляемым анизотропным дефектом. Эксперимент и теория / *Р.Б. Алавердян, К.Р. Аллахвердян, А.А. Геворгян* и др. // *ЖТФ.* – 2010. – Т. 80, № 9. – С. 85–90.
17. *Kuriazidou C.A.* Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials / *C.A. Kuriazidou, H.F. Contopanagos, N.G. Alexopolos* // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques.* – 2001. – Vol. 49, № 2. – Pp. 297–306.
18. On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies / *A.Gomez, A.Vegas, M.A. Solano, A.Lakhtakia* // *Electromagnetics.* – 2005. – Vol. 25, № 5. – Pp. 437–460.
19. High Aspect-Ratio Coplanar Waveguide Wideband Bandpass Filter With Compact Unit Cells / *D.M. Klymyshyn, H.C. Jayatilaka, M.Barner, J.Mohr* // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2009. – Vol. 57, № 11. – Pp. 2753–2760.
20. Photonic Crystal at Millimeter Waves Applications / *H.C.C. Fernandes, J.L.G. Medeiros, I.M.A. Junior, D.B. Brito* // *PIERS Online.* – 2007. – Vol. 3, № 5. – Pp. 689–694.
21. Microwave Propagation in a Square Lattice Using Different Dielectric Materials for Device Applications / *E.D.V. Nagesh, V.Subramanian, V.Sivasubramanian, V.R.K. Murthy* // *Ferroelectrics.* – 2005. – Vol. 327, № 1. – Pp. 11–17.
22. Исследование амплитудно-частотных характеристик волноводного фотонного кристалла, состоящего из периодически чередующихся слоев, выполненных в виде матриц с большим числом воздушных включений / *Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, В.О. Горлицкий* // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : матер. XXIII Междунар. Крымской конф.*

- (КрыМиКо'2013), г. Севастополь, 9–13 сент. 2013 г. – Севастополь : «Вебер», 2013. – Т. 2. – С. 740–741.
23. *Беляев Б.А.* Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах / *Б.А. Беляев, А.С. Волошин, В.Ф. Шабанов* // Доклады Академии Наук. – 2005. – Т. 400. – № 2. – С. 181–185.
 24. *Беляев Б.А.* Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах / *Б.А. Беляев, А.С. Волошин, В.Ф. Шабанов* // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 6. – С. 694–701.
 25. *Беляев Б.А.* Исследование добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели одномерного фотонного кристалла / *Б.А. Беляев, А.С. Волошин, В.Ф. Шабанов* // Доклады Академии Наук. – 2005. – Т. 403, № 3. – С. 319–324.
 26. *Беляев Б.А.* Исследование полосно-пропускающих фильтров на одномерных диэлектрических фотонных кристаллах / *Б.А. Беляев, С.А. Ходенков, В.Ф. Шабанов* // Известия высш. учеб. заведений. Физика. – 2008. – Т. 51. – С. 150–153.
 27. *Беляев Б.А.* Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на сверхрешетках / *Б.А. Беляев, А.С. Волошин, В.Ф. Шабанов* // Доклады Академии Наук. – 2004. – Т. 395, № 6. – С. 756–760.
 28. *Saib A.* Periodic Metamaterials Combining Ferromagnetic Nanowires and Dielectric Structures for Planar Circuits Applications / *A.Saib, I.Huynen* // *Electromagnetics*. – 2006. – Vol. 26, № 3–4. – Pp. 261–277.
 29. *Gonzalo R., Nagore G.* Simulated and Measured Performance of a Patch Antenna on a 2-Dimensional Photonic Crystals Substrate // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2002. – Vol. 37. – pp. 257–269.
 30. *Brown E.R.* Photonic-Crystal Antenna Substrates / *E.R. Brown, O.B. McMahon, C.D. Parker* // *MIT Lincoln Laboratory Journal*. – 1998. – Vol. 11, № 2. – Pp. 159–174.
 31. *Huie K.C.* Microstrip Antennas: Broadband Radiation Patterns Using Photonic Crystal Substrates / *K.C. Huie* // *Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA*. – 2002. – 64 p.
 32. The Effect of Photonic Crystals on Dipole Antennas / *M.M. Sigalas, R. Biswas, K.-M.Ho* at oll. // *Electromagnetics*. – 1999. – Vol. 19, № 3. – Pp. 291–303.
 33. Integration of a Microstrip Patch Antenna with a Two-Dimensional Photonic Crystal Substrate / *K.Agi, K.J. Malloy, E.Schamiloglu* at oll. // *Electromagnetics*. – 1999. – Vol. 19, № 3. – Pp. 277–290.
 34. Resonant cavity enhanced detectors embedded in photonic crystals / *B.Temelkuran, E.Ozbay, J.P. Kavanaugh* at oll. // *Appl. Phys. Lett.* – 1998. – Vol. 72, № 19. – Pp. 2376–2378.
 35. *Munir A.* Tunable Frequency Selective Surfaces Characterisation / *A.Munir, V.Fusco, O.Malyuskin* // *Proc of the 38-th European Microwave Conf. Amsterdam, Netherlands. 27–31st October 2008*. – 2008. – Pp. 813–816.
 36. *Chang T.K.* Active frequency selective surfaces / *T.K. Chang, R.J. Langley, E.A. Parker* // *IEE Proc. H*. – 1996. – Vol. 143. – Pp. 62–66.
 37. *Yashchyshyn Y.* Extending functionalities of waveguide slot antennas by means of reconfigurable aperture / *Y.Yashchyshyn, K.Derzakowski, J.Modelski* // *Proc. of the 38-th European Microwave Conf. Amsterdam, Netherlands. 27–31st October 2008*. – 2008. – Pp. 258–261.
 38. *Куликов М.Ю.* Микрополосковые фотонные структуры СВЧ-диапазона и их использование для измерения параметров диэлектриков : дисс. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.03; 05.27.01 / *Куликов Максим Юрьевич*. – Саратов, 2011. – 150 с.

References:

1. Yablonovitch, E. (1987), "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 58, No. 20, pp. 2059–2062.
2. Yablonovitch, E. (2001), "Photonic crystals: semiconductors of light", *Scientific American*, Vol. 285, No. 6, pp. 47–55.
3. Yablonovitch, E. (1993), "Photonic band-gap structures", *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, Vol. 10, No. 2, pp. 283–295.
4. Yablonovitch, E. (1993), "Photonic band-gap crystals", *Journal of Physics-Condensed Matter*, Vol. 5, No. 16, pp. 2443–2460.
5. Colak, E., Cakmak, A.O., Serebryannikov, A.E. and Ozbay, E. (2010), "Spatial filtering using dielectric photonic crystals at beam-type excitation", *J. Appl. Phys.*, Vol. 108, No. 11, pp. 113106–113106-8.
6. Bulgakov, S.A. and Nieto-Vesperinas, M. (2000), "Defect-enhanced resonances in photonic lattices", *Waves in Random Media*, Vol. 10, No. 3, pp. 359–366.

7. Padjen, R., Gerard, J.M. and Marzin, J.Y. (1994), "Analysis of the filling pattern dependence of the photonic bandgap for two-dimensional systems", *Journal of Modern Optics*, Vol. 41, No. 2, pp. 295–310.
8. Karathanos, V. (1998), "Inactive frequency bands in photonic crystals", *Journal of Modern Optics*, Vol. 45, No. 8, pp. 1751–1758.
9. Pevtsov, A.B., Grudinkin, S.A., Poddubnyy, A.N., Kaplan, S.F., Kurdyukov, D.A. and Golubev, V.G. (2010), "Pereklyuchenie fotonnoy zapreshchennoy zony v trekhmernykh plenochnykh fotonnykh kristallakh na osnove kompozitov opal-VO₂ v spektral'noy oblasti 1,3–1,6 μm", *FTP*, Vol. 44, No. 12, pp. 1585–1590.
10. Kuriazidou, C.A., Contopanagos, H.F. and Alexopoulos, N.G. (2001), "Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials", *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, Vol. 49, No. 2, pp. 297–306.
11. Karmakar, N.C. and Mollah, M.N. (2003), "Investigations into nonuniform photonic-bandgap microstripline low-pass filters", *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, Vol. 51, No. 2, pp. 564–572.
12. Limonov, M.F., Baryshev, A.V., Inoue, M., Kaplyanskiy, A.A., Rybin, M.V., Samusev, K.B., Sel'kin, A.V., Khanikaev, A.B. and Yushin, G.N. (2008), "Mnogokomponentnye fotonnye kristally: selektivnoe upralenie svetovymi potokami i rezonansnye stop-zony", *Rossiyskie nanotekhnologii*, Vol. 3, No. 1–2, pp. 142–145.
13. Samusev, A.K., Rybin, M.V. and Limonov, M.F. (2009), "Selektivnoe pereklyuchenie stop-zon v dvumernykh mnogokomponentnykh fotonnykh kristalakh", *FTT*, Vol. 51, No. 3, pp. 487–492.
14. Vetrov, S.Ya., Timofeev, I.V. and Rudakova, N.V. (2011), "Prokhozhdenie sveta cherez ploskoparallel'nuyu plastinku dvumernogo rezonansnogo fotonnogo kristalla", *FTT*, Vol. 53, No. 1, pp. 133–138.
15. Gonchar, K.A., Musabek, G.K., Taurbaev, T.I. and Timoshenko, V.Yu. (2011), "Uvelichenie intensivnosti fotoluminesentsii i kombinatsionnogo rasseyaniya sveta v odnomernykh fotonnykh kristallakh na osnove poristogo kremniya", *FTP*, Vol. 45, No. 5, pp. 625–628.
16. Alaverdyan, R.B., Allakhverdyan, K.R., Gevorgyan, A.A., Chilingaryan, A.D. and Chilingaryan, Yu.S. (2010), "Khiral'nye fotonnye kristally s elektricheskimi upravlyaemym anizotropnym defektom. Eksperiment i teoriya", *ZhTF*, Vol. 80, No. 9, pp. 85–90.
17. Kuriazidou, C.A., Contopanagos, H.F. and Alexopoulos, N.G. (2001), "Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials", *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, Vol. 49, No. 2, pp. 297–306.
18. Gomez, A., Vegas, A., Solano, M.A. and Lakhtakia, A. (2005), "On one- and two-dimensional electromagnetic band gap structures in rectangular waveguides at microwave frequencies", *Electromagnetics*, Vol. 25, No. 5, pp. 437–460.
19. Klymyshyn, D.M., Jayatilaka, H.C., Barner, M. and Mohr, J. (2009), "High aspect-ratio coplanar waveguide wideband bandpass filter with compact unit cells", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 57, No. 11, pp. 2753–2760.
20. Fernandes, H.C.C., Medeiros, J.L.G., Junior, I.M.A. and Brito, D.B. (2007), "Photonic crystal at millimeter waves applications", *PIERS Online*, Vol. 3, No. 5, pp. 689–694.
21. Nagesh, E.D.V., Subramanian, V., Sivasubramanian, V. and Murthy, V.R.K. (2005), "Microwave propagation in a square lattice using different dielectric materials for device applications", *Ferroelectrics*, Vol. 327, No. 1, pp. 11–17.
22. Usanov, D.A., Nikitov, S.A., Skripal', A.V. and Gorlitskiy, V.O. (2013), "Investigation of the amplitude-frequency characteristics of the photonic crystal waveguide, consisting of periodically alternating layers formed in a matrix with a large number of air inclusions", *Materialy 23 Mezhdunarodnoy Krymskoy konferencii "SVCh tehnika i telekommunikacionnye tehnologii"*, [Proceedings of the 23rd Int. Conf. "Microwave equipment and telecommunication technologies"], KryMiKo'2013, Sevastopol', Vol. 2, pp. 740–741.
23. Belyaev, B.A., Voloshin, A.S. and Shabanov, V.F. (2005), "Issledovanie mikropoloskovykh modeley polosno-propuskayushchikh fil'trov na odnomernykh fotonnykh kristallakh", *Doklady Akademii Nauk*, Vol. 400, No. 2, pp. 181–185.
24. Belyaev, B.A., Voloshin, A.S. and Shabanov, V.F. (2006), "Issledovanie mikropoloskovykh analogov polosno-propuskayushchikh fil'trov na odnomernykh fotonnykh kristallakh", *Radiotekhnika i elektronika*, Vol. 51, No. 6, pp. 694–701.
25. Belyaev, B.A., Voloshin, A.S. and Shabanov, V.F. (2005), "Issledovanie dobrotnosti rezonansa primesnoy mody v mikropoloskovoy modeli odnomernogo fotonnogo kristalla", *Doklady Akademii Nauk*, Vol. 403, No. 3, pp. 319–324.

26. Belyaev, B.A., Khodenkov, S.A. and Shabanov, V.F. (2008), "Issledovanie polosno-propuskayushchikh fil'trov na odnomernykh dielektricheskikh fotonnykh kristalakh", *Izvestiya vyssh. ucheb. zavedeniy. Fizika*, Vol. 51, pp. 150–153.
27. Belyaev, B.A., Voloshin, A.S. and Shabanov, V.F. (2004), "Issledovanie mikropoloskovykh modeley polosno-propuskayushchikh fil'trov na sverkhreshetkakh", *Doklady Akademii Nauk*, Vol. 395, No. 6, pp. 756–760.
28. Saib, A. and Huynen, I. (2006), "Periodic metamaterials combining ferromagnetic nanowires and dielectric structures for planar circuits applications", *Electromagnetics*, Vol. 26, No. 3–4, pp. 261–277.
29. Gonzalo, R. and Nagore, G. (2002), "Simulated and measured performance of a patch antenna on a 2-dimensional photonic crystals substrate", *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 37, pp. 257–269.
30. Brown, E.R., McMahon, O.B. and Parker, C.D. (1998), "Photonic-crystal antenna substrates", *MIT Lincoln Laboratory Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 159–174.
31. Huie, K.C. (2002), *Microstrip antennas: broadband radiation patterns using photonic crystal substrates*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA, 64 p.
32. Sigalas, M.M., Biswas, R., Ho, K.M., Leung, W., Tuttle, G. and Crouch, D.D. (1999), "The effect of photonic crystals on dipole antennas", *Electromagnetics*, Vol. 19, No. 3, pp. 291–303.
33. Agi, K., Malloy, K.J., Schamiloglu, E., Mojahedi, M. and Niver, E. (1999), "Integration of a microstrip patch antenna with a two-dimensional photonic crystal substrate", *Electromagnetics*, Vol. 19, No. 3, pp. 277–290.
34. Temelkuran, B., Ozbay, E., Kavanaugh, J.P., Tuttle, G. and Ho, K.M. (1998), "Resonant cavity enhanced detectors embedded in photonic crystals", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, No. 19, pp. 2376–2378.
35. Munir, A., Fusco, V. and Malyskin, O. (2008), "Tunable frequency selective surfaces characterisation", *Proceedings of the 38th European Microwave Conf.*, Amsterdam, Netherlands, pp. 813–816.
36. Chang, T.K., Langley, R.J. and Parker, E.A. (1996) "Active frequency selective surfaces", *IEE Proc. H*, Vol. 143, pp. 62–66.
37. Yashchysyn, Y., Derzakowski, K. and Modelski, J. (2008), "Extending functionalities of waveguide slot antennas by means of reconfigurable aperture", *Proceedings of the 38th European Microwave Conf.*, Amsterdam, Netherlands, pp. 258–261.
38. Kulikov, M.Yu. (2011), *Mikropoloskovye fotonnye struktury SVCh-diapazona i ikh ispol'zovanie dlya izmereniya parametrov dielektrikov: dissertation*, Saratov, 150 p.

ХОМЕНКО Інна Миколаївна – асистент кафедри фізики та вищої математики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– НВЧ та антени, акустика та пристрої.

Тел.: (093) 066-75-61.

E-mail: innesh2007@ukr.net.

РУДНИЦЬКИЙ Валентин Анатолійович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та вищої математики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– вакуумні технології отримання плівок та покриттів;

– термодинаміка процесів синтезу багатокомпонентних фаз.

Стаття надійшла до редакції 06.06.2016