

# ФІЗИКА, ТЕХНОЛОГІЯ ТА ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕМЕНТІВ, ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

УДК 539.293

**В.В. Гоблик, І.В. Ничай**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронних засобів інформаційно-комп’ютерних технологій

## ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЕРІОДИЧНО-НЕОДНОРІДНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПЛАСТИНИ

© Гоблик В.В., Ничай І.В., 2008

**V.V. Hoblyk, I.V. Nychai**

## INFOCOMMUNICATIONAL PROPERTIES OF PERIODICALLY NONUNIFORM DIELECTRIC PLATE

© Hoblyk V.V., Nychai I.V., 2008

Наведені математична модель та результати дослідження інфокомунікаційних властивостей періодично-неоднорідної діелектричної пластини, проаналізовані особливості формування спектра просторових гармонік електромагнітного поля пластини для різних параметрів модуляції її діелектричної проникливості, вивчені потенційні можливості керування параметрами випромінювання пластини для завдань створення нових засобів інфокомунікаційних систем у нанометровому діапазоні.

A mathematical model and results of research of infocommunicational properties of periodically nonuniform dielectric plate are represented. The features of forming of spectrum of spatial harmonic components of the electromagnetic field of plate for the different parameters of modulation of its dielectric conductivity are analysed. Potential possibilities of management by the parameters of radiation of plate for the tasks of creation of new facilities of the infocommunicational systems of nano-meter range are studied.

### Вступ

Пошук нових ідей та методів створення нанорозмірних структур (НРС) з новими властивостями для елементної бази інфокомунікаційних систем – надзвичайно актуальна і важлива наукова проблема, якій присвячена значна кількість публікацій [1–9]. Серед множини нових властивостей НРС, важливих для практичного застосування, доцільно виділити інфокомунікаційні властивості (ІКВ), які відображають різні аспекти інформаційних процесів, що відбуваються в НРС. В якості ІКВ, які описуються комплексом інфокомунікаційних параметрів, можуть бути, наприклад, просторово-часова фільтрація та комутація інформаційних каналів, властивість відображати та зберігати процеси інформаційної взаємодії в фіксованих станах НРС протягом заданого часу, властивість покривати інформаційним полем заданого розподілу необхідні просторові об’єми тощо. В арсенал таких властивостей занесені і властивості “штучного фотонного кристала”, “придуманого” в 1987 році американським спеціалістом Е. Яблоновичем [1] для фізико-технічного моделювання та промислового тиражування властивостей фотонно-електронних взаємодій в атомній системі. Такі взаємодії за своєю суттю є також інформаційними. Поглинання, або

випускання фотона електроном атомної системи – елементарні інформаційні процеси. Ідея по-новому подивитись на інформаційні процеси в природі, зокрема на атомному рівні, і змодельовати їх на нанорозмірному рівні (більш великорозмірному порівняно з атомним рівнем), спричинила в останні 20 років лавину публікацій, в яких спеціалісти переосмислюють універсальність дії фундаментальних законів природи в макро- та мікросвіті. Сьогодні визнано, що інфокомунікаційними властивостями “фотонних кристалів” і не тільки фотонних кристалів, володіє широке коло фізичних систем (антенні решітки, частотно-просторові та частотно-часові фільтри, періодично-неоднорідні структури тощо) [5]. З огляду на те, що в попередні роки створено значний доробок досконалих і відкаліброваних практикою строгих математичних моделей (ММ) таких систем, актуальним залишається завданням модифікувати існуючі моделі для дослідження особливостей побудови засобів інфокомунікаційних систем на основі нанорозмірних структур.

### Мета та задачі дослідження

Одним із представників широкого класу періодично-неоднорідних структур та систем, які володіють властивостями фотонних кристалів, є періодично-неоднорідна діелектрична пластина (ПНДП), діелектрична проникливість (ДП) якої модульована накладеними одна на одну кратними періодичними послідовностями прямокутних функцій (ПППФ). Незважаючи на простоту конструкції ПНДП, що може скласти хибне враження про простий набір її інфокомунікаційних та електродинамічних властивостей, існування строгого розв’язку задачі її збудження [10] та розробленої ММ на основі гіллястих ланцюгових дробів [11], потенційні властивості такої електродинамічної системи для створення засобів інфокомунікаційних систем на базі модульованих НРС сьогодні повною мірою не вивчені. Саме цей факт визначив *мету* дослідження, а саме, розробити числові моделі та виконувати всебічний аналіз ІКВ ПНДП для задач створення засобів інфокомунікаційних систем на основі модульованих НРС. Виконання дослідження з використанням макроскопічних аналогів і макроскопічних рівнянь Максвелла є коректним для нанооб’єктів та довжин хвиль нанометрового діапазону аж до величини 100 нм, що відповідає частоті електромагнітних коливань не більше 300 ТГц [12, 13]. Тому можливість отримати необхідні знання про властивості НРС з невеликими матеріальними затратами, використовуючи їх аналоги, які працюють на частотах, значно нижчих порівняно з терагерцовими частотами, є цілком раціональна.

*Об’єктом* дослідження в цій роботі вибрана тонка ПНДП, в якій ДП модульована в одному із напрямків поширення електромагнітного поля ПППФ. *Предметом* дослідження виділені ІКВ структури, а саме: *властивості* ПНДП формувати інформаційне поле в заданих просторових областях та забезпечувати просторову фільтрацію електромагнітних коливань; *властивість* забезпечувати комутацію інформаційних потоків джерела інформації та повідомлення зміною положення в просторі променя випромінювання шляхом зміни частоти джерела випромінювання та керування величиною діелектричної проникливості ПНДП за допомогою поля сторонніх джерел електричних струмів та зарядів. У роботі розглянуті такі задачі: 1) дослідити вплив параметрів конструкції ПНДП на закономірності формування спектра просторових гармонік поля, що поширюються над ПНДП; 2) виконувати попереднє дослідження з використанням ММ потенційних можливостей ПНДП для реалізації методу частотного сканування електромагнітним променем у задачах розробки засобів комутації інформаційних каналів у нанометровому діапазоні.

### Математична модель

У роботі [14] запропонована в узагальненому вигляді одновимірна ММ, що описує ІКВ фотонних кристалів на базі плоскої діелектричної пластини завтовшки  $b \ll \lambda$  ( $\lambda$  – довжина хвилі) (рис. 1). У ММ не враховується закон розподілу поляризаційних струмів вздовж осі  $z$  в межах величини  $b$ . Розміри пластини безмежні вздовж осі  $x$  та осі  $y$ . Діелектрична проникливість пластини

(в загальному випадку комплексна величина), модульована вздовж осі  $y$  довільною кількістю кратних накладених одна на одну ППДФ. Структура збуджується ниткою магнітного струму  $I_x^M(y, z) = I_{x0}^M d(y-0)d(z-0)$ , синфазного вздовж осі  $x$ , де  $\dot{I}_x^M = [\dot{n} \times \dot{E}_y]$ ,  $\dot{E}_y$  – напруженість електричного поля,  $\dot{n}$  – одиничний вектор нормалі до поверхні ПНДП. Модель [14] допускає також збудження пластини стороннім джерелом поля з довільним розподілом струму в площині  $z=0$  та в точці  $M$  з довільними координатами  $z'0y'$ , дає змогу враховувати втрати електромагнітного поля в середовищі пластини та в середовищі, що оточує пластину. Параметри пластини вздовж осі  $x$  залишаються незмінними. У випадку модуляції ДП однією ППДФ (рис. 1), тобто послідовністю, яка описується таким виразом [15]:

$$e'_1(y) = e'_{a0} + e'_{aM} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \text{rect}\left(\frac{y-nd_1}{\Delta}\right), \text{ де } (\Delta \ll l),$$

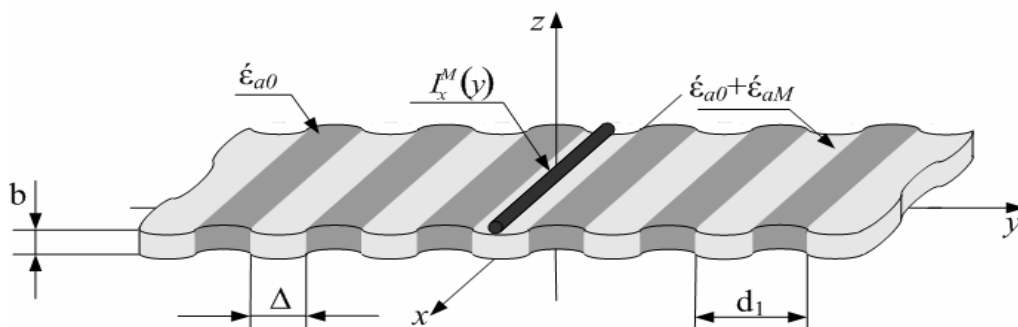


Рис. 1. Узагальнений вигляд одновимірної ММ, що описує ІКВ фотонних кристалів на базі плоскої діелектричної пластини завтовшки  $b \ll l$

математична модель матиме вигляд

$$F(c') = -2i \frac{x_0(c')}{x_0(c') - Z_0} / (1 - Z_M \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{\sin cP_n}{x(c' - nT) - Z_0}), \quad (1)$$

де  $F(c')$  – описує спектральну густину тангенціальної складової електричного поля пластини, яка складається як із неперервного, так і дискретного спектрів хвиль, що поширюються вздовж осі  $\pm y$ ;

$$x_0(c') = \sqrt{c'^2 - 1}; \quad x(c' - nT) = \sqrt{(c' - nT)^2 - 1}; \quad T = l_0/d_1; \quad Z_M = e'_{aM} b \Delta / l_0 d_1;$$

$$Z_0 = b e'_{a0} / l_0; \quad P_n = n p \Delta / d_1; \quad e'_{a0} = e_{a0} / e_0; \quad e_0 = 10^{-9} / 36\pi \text{ [Ф/м]}; \quad c' = c/k; \quad c -$$

узагальнене просторове число;  $k = 2\pi/l_0$ ;  $l_0$  – довжина хвилі у вакуумі.

### Задачі аналізу та конструктивного синтезу

Запропонована ММ (1) зв'язує характеристики спектра просторових гармонік електромагнітних хвиль з її конструктивними параметрами. Такий спектр просторових гармонік поширюється як вздовж пластини у вигляді поверхневих “сповільнених” хвиль, так і у вигляді “швидких” хвиль, що випромінюються під “дійсними” просторовими кутами  $\theta^0$  до пластини ( $-1 \leq \sin\theta \leq 1$ ). Тому модель (1) ефективна для розв'язання низки задач аналізу інфокомунікаційних властивостей періодично-неоднорідних нанорозмірних структур та задач синтезу їх конструкції за заданими інфокомунікаційними властивостями (задачі конструктивного синтезу). З огляду на те, що задача конструктивного синтезу будується на основі розв'язку задачі аналізу, нижче усебічно досліджується задача аналізу ПНДП.

*Задачі аналізу.* Математична модель (1) дає змогу ефективно розв'язувати задачу аналізу інфокомунікаційних властивостей ПНДП, яка полягає в розрахунку закономірностей просторового розподілу поля для множини її конструктивних параметрів. Такими конструктивними параметрами

виступають період модуляції діелектричної проникливості  $d_1$ , ширина неоднорідності  $\Delta$ , товщина діелектричної пластини  $b$ , діелектричні проникливості пластини та її неоднорідностей  $e'_{a0}$  та  $e'_{a0} + e'_{aM}$  відповідно. Саме на такій множині конструктивних параметрів нижче досліджуються інфокомунікаційні властивості ПНДП. Розрахунок просторового розподілу електромагнітного поля у області дійсних кутів  $\theta^0$  як у верхній ( $z>0$ ), так і нижній ( $z<0$ ) областях ПНДП здійснюється з використанням розробленої числової моделі, в основу якої покладено модель (1), в якій здійснена така заміна:  $c' = \sin q^0$ . Кут  $\theta^0$  відраховується від нормалі (вісь  $z$ ) до періодично-неоднорідної пластини (рис. 1).

Окремий інтерес для оптоволоконної та лазерної техніки становлять дослідження дисперсійних властивостей ПНДП, а також її потенційних можливостей для керування інфокомунікаційними властивостями. Для дослідження дисперсійних властивостей ПНДП з варіаціями її конструктивних параметрів, наводиться характеристичне рівняння (2)

$$(X_0(c') - Z_0) \left( 1 - Z_M \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{n=\infty} \frac{\sin cR_n}{X(c' - nT) - Z_0} \right) - Z_M = 0, \quad (2)$$

яке отримуємо прирівнявши до нуля знаменник співвідношення (1) та скоротивши далі нульовий член функціонального ряду цього співвідношення.

### **Результати комп'ютерного симулювання інфокомунікаційних властивостей періодично-неоднорідної діелектричної пластини**

*Фільтруючі та комутаційні властивості.* На рис. 2,  $a-i$  показані в полярній системі координат характерні нормовані графіки функції  $F(\sin\theta^0)$ , які описують просторові фільтруючі та комутаційні властивості періодично-неоднорідної діелектричної пластини з такими конструктивними параметрами:  $\lambda=760$  нм,  $b=120$  нм,  $\Delta=120$  нм,  $e'_{a0}=6.6$ ,  $e'_{aM}=-5.6$ . Ці властивості визначаються потенційними можливостями ПНДП формування розподілів напруженості електромагнітного поля на нескінченності для випадків, коли конструкція пластини відрізняється величиною періоду  $d_1$ , що визначає розташування вздовж осі у неоднорідностей з відносною діелектричною проникливістю  $e'_{a0} + e'_{aM} = 1$ , (матеріал з діелектричною проникливістю повітря).

### **Аналіз результатів дослідження**

Із великої серії виконаних числових досліджень у цій роботі на рис. 2 показано декілька прикладів розподілів поля, які складають уявлення про характер інфокомунікаційних властивостей періодично-неоднорідної діелектричної пластини для можливого застосування в задачах розробки засобів інфокомунікаційних систем на базі нанорозмірних структур. Поступова зміна величини періоду  $d_1$  слідування діелектричних неоднорідностей, одного із найвпливовіших конструктивних параметрів, за умови незмінності величин решти параметрів конструкції пластини, породжує потужну множину оригінальних розподілів поля в дальній зоні. За поданими графіками проявляються фундаментальні закони структурної трансформації електромагнітного поля джерела збудження пластини в поле, яке далі у формі дискретного спектра поверхневих хвиль зі сповільненою фазовою швидкістю поширюється вздовж пластини і збуджує струми поляризації в неоднорідностях діелектрика, а інша група швидких (випромінюючих) просторових гармонік поля переносить енергію джерела в обмеженому просторовими кутами просторі в нескінченність. Пояснення закономірностей формування поля, показаного на графіках рис. 2, вимагає фундаментального аналізу закономірностей формування спектра просторових гармонік поля ПНДП, а також усебічного дослідження характеристичного рівняння (2). Проте, строге числове дослідження згаданого трансцендентного рівняння (2) є не простою задачею, вимагає залучення "тонких" математичних методів аналізу функції комплексної змінної і виходить за межі сформульованих

задач дослідження цієї роботи. Тому далі дослідження обмежено якісним аналізом особливостей формування спектра просторових гармонік поля ПНДП.

Якісний аналіз результатів дослідження спектра просторових гармонік поля. Розподіли поля, відображені на графіках, є результатом суперпозиції неперервного спектра стороннього джерела електромагнітного випромінювання та “швидких” (випромінюючих) гармонік поля [16], які поширюються під просторовими кутами  $\theta^0$  до пластини. Крім “швидких” гармонік поля вздовж осі  $\pm z$  поширюється дискретний спектр невідпромінюючих гармонік поля у вигляді поверхневих хвиль з постійними поширеннями  $c_n^{\prime M} \cong c_0' + nT$  ( $n = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ , індекс  $M$  означає наявність модуляції ПНДП).

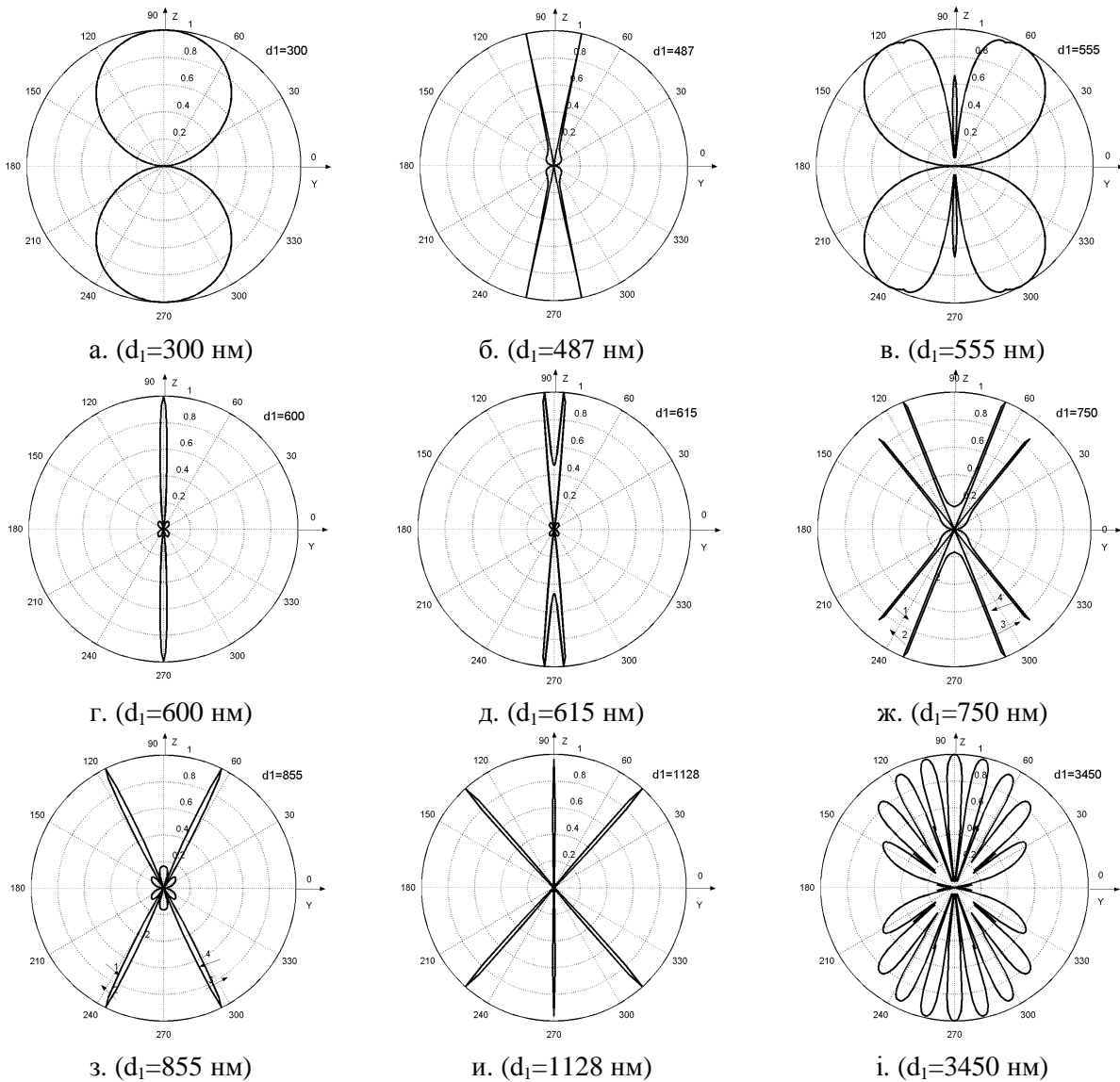


Рис. 2. Просторовий розподіл нормованої величини напруженості електричної складової електромагнітного поля на нескінченності

Постійні поширення  $c_n^{\prime M}$  є розв’язком трансцендентного рівняння (2), коли  $Z_M \neq 0$ . Серед множини значень  $c_n^{\prime M}$  доцільно вибрати те значення кореня рівняння (2) (позначимо його  $c_0^{\prime M}$ ), яке переходить при  $e'_{aM} \rightarrow 0$  у величину  $c_0' = \sqrt{1+z_0^2}$  – постійну поширення поверхневої хвилі

вдovж пластини з немодульованою діелектричною проникливістю. Числове значення  $c'_0$ , яке в даному випадку є дійсною величиною, доцільно брати як початкове наближене значення під час розв'язання рівняння (2) одним із ітераційних методів. Аналізуючи далі рівняння (2), необхідно відмітити, що члени функціонального ряду цього рівняння прийматимуть комплексні значення для всіх  $-\infty \leq c' \leq \infty$  за умови, що  $T < 2$ , ( $d > I_0/2$ ), де  $I = I_0/c'_0$ , ( $\lambda$  – довжина поверхневої хвилі). Останнє означає, що на квазіперіоді  $T$  в загальному випадку корінь рівняння (2) буде комплексною величиною. За відсутності поглинання в діелектричній структурі комплексний характер хвильового числа  $c'_0{}^M$  може бути обумовлений тільки втратами поверхневої хвилі на випромінювання. Застосуємо якісний аналіз для пояснення закономірностей формування поля, показаного на рис. 2 на двох конкретних прикладах. Розглянемо розподіли поля, зображені на графіках 2а та 2г.

*Аналіз розподілу поля, зображеного на графіку рис. 2, а.* Форма розподілу поля, зображеного на графіку 2а, збігається з полем нитки синфазного магнітного струму, що лежить на немодульованій діелектричній пластині. Вздовж пластини в напрямку осі  $\pm z$  поширюється у вигляді поверхневої хвилі з постійною поширення  $c'_0 = \pm\sqrt{1+z_0^2} = \pm\sqrt{1+be'_{a0}/I_0} = \pm 1.444$  дві просторові гармоніки поля. Їх постійна поширення  $c'_0$  не попадає в інтервал дійсних кутів  $|c'_0| \geq 1$ . Модуляція діелектричної проникливості пластини з періодом  $d_1=300$  нм приводить в цьому випадку до виникнення нескінченного дискретного спектра гармонік вищого порядку з постійними поширення  $c'_n{}^M \cong c'_0 + nT$ , де період  $T$  відповідно до формули (1) матиме таку величину:  $T=I_0/d_1=760/300=2.533$ . Кількісна оцінка величини постійної поширення найближчої до нульової гармоніки поля, а саме “мінус” першої гармоніки, дає числове значення:  $c'_{\pm 1}{}^M \cong \pm c'_0 \mp T = \pm 1.089$ . Останнє означає, що постійна поширення першої просторової гармоніки  $c'_{\pm 1}$  не попадає в область дійсних кутів:  $|c'_{\pm 1}| \cong 1.089 > 1.0$ . Як наслідок, в зоні дійсних кутів у цьому разі відсутнє напрямлене випромінювання поля, що підтверджує числовий експеримент (рис. 2, а).

*Аналіз розподілу поля, зображено на графіку рис. 2, г.* На графіку рис. 2, г спостерігається напрямлене випромінювання ПНДП в напрямку нормалі до ПНДП, що збігається з напрямом осі  $z$  (див. рис. 1). Останнє означає, що постійна поширення першої просторової гармоніки попадає в область дійсних кутів  $-1 \leq c'_{\pm 1}{}^M \leq 1$ . Справді, для випадку рис. 2, г період  $T$  відповідно до (2) матиме величину  $T=I_0/d_1=760/600=1.2666$ ; тоді  $c'_{\pm 1}{}^M \cong \pm c'_0 \mp T = \pm 0.178$ , що означає перебування в області дійсних кутів поблизу нормалі до структури двох накладених один на другий променів синфазного випромінювання електромагнітного поля, що підтверджується рис. 2, г. Весь набір числових значень постійних поширення просторових гармонік  $c'_{\pm 1}{}^M = c(I, d_1, \Delta, b, e'_{a0}, e'_{am})$ , які можуть приймати також комплексні значення, можна отримати в результаті розв'язання рівняння (2), що матиме важливе практичне значення для конструктивного синтезу модульованих нанорозмірних структур з заданими інфокомунікаційними властивостями.

*Дослідження впливу на формування поля параметрів конструкції ПНДП.* На рис. 3–5 зображені результати числового дослідження ММ (1) для оцінки впливу ширини неоднорідності –  $\Delta$ , величини діелектричної проникливості –  $e'_{am}$  та зміни частоти стороннього джерела збудження ПНДП на особливості формування поля в нескінченності. Розрахунок поля, враховуючи закони симетрії, наведено у верхній півплощині ( $z > 0$ ). На рис. 3 в одному графічному “вікні” зображено, для порівняння, розподіли двох ідентичних конструкцій ПНДП, які відрізняються лише шириною неоднорідностей ( $\Delta_1=0.05\lambda_0$ ,  $\Delta_2=0.15\lambda_0$ ). У результаті досліджень виявлено, що у разі збільшення  $\Delta$  від  $0.05\lambda_0$  до  $0.15\lambda_0$  ПНДП втрачає властивості двонапрявленого випромінювання і набуває властивості однонапрявленого випромінювання поля у просторі ( $z > 0$ ). На якісному рівні цей ефект можна пояснити зміною величини постійної поширення нульової просторової гармоніки поля  $c'_0{}^M$ ,

що зумовлено зміною усередненої діелектричної проникливості ПНДП завдяки зменшенню або збільшенню об'єму неоднорідностей в структурі.

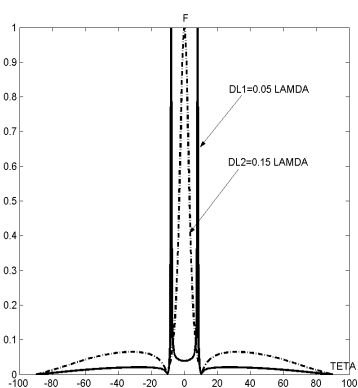


Рис. 3. Розподіли двох ідентичних конструкцій ПНДП

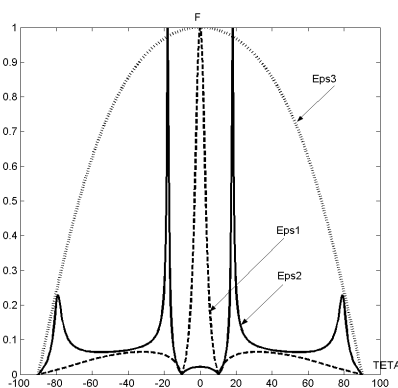


Рис. 4. Вплив величини  $\epsilon'_{ам}$  на характер розподілу поля ПНДП

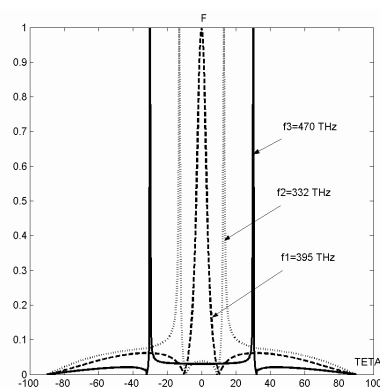


Рис. 5. Потенційні можливості ПНДП

У рівнянні (1) за даними ефектами “стоять” параметри  $Z_M$  та  $P_n$ . На рис. 4 продемонстровано вплив величини  $\epsilon'_{ам}$  на характер розподілу поля ПНДП. Графік Eps3 на рис. 4 відповідає випадку випромінювання нитки синфазного магнітного струму, що лежить на однорідній нескінченній тонкій ( $b \ll \lambda_0$ ) діелектричній пластині без втрат. З появою періодичної модуляції діелектричної проникливості прямокутними функціями, амплітуда яких наростає, можна отримати потужнішу множину розподілів поля, ніж у випадку зміни величини  $\Delta$ . Здійснюючи зміну величини  $\epsilon'_{ам}$ , можна від двонапрявленого випромінювання (графік Eps2) перейти до однонапрявленого (графік Eps1). Рис. 5 демонструє значні потенційні можливості ПНДП для частотного методу керування розподілом поля. Графіки на рис. 5 є проміжними результатами серії числових досліджень особливостей формування сумарного поля, яке є результатом накладання поля джерела та поля наведених в середовищі ПНДП поляризаційних струмів, як функції частоти  $f$ . Дослідження ПНДП з параметрами:  $b=120$  нм,  $\Delta=120$  нм,  $d_1=600$  нм,  $\epsilon'_{a0}=6.6$ ,  $\epsilon'_{ам} = -5.6$  виявило *режими* випромінювання: 1) *режим ненапрявленого* випромінювання ( $f_1=0 \div 253.3$  THz); 2) *режим направленого випромінювання* зі скануванням двох променів з ростом  $f$  в напрямку від осі  $(\pm y)$  до осі  $z$  ( $f_2=235.3 \div 390.0$  THz); 3) *режим випромінювання вздовж “нормалі”* в околі частоти  $f_3=395.0$  THz; 4) *режим направленого випромінювання* зі скануванням в околі дискретних частот з ростом  $f$  в напрямку від осі  $z$  до осі  $\pm y$  ( $f_4=410.0 \div 415.0$ ; 470 THz).

## Висновки

1. Це дослідження показало, що ПНДП – складна електродинамічна система і приховує значні потенційні можливості для розв'язку широкого кола актуальних прикладних задач. Вона наділена властивостями, які дозволяють зарахувати її до класу одновимірних фотонних кристалів. Водночас ПНДП володіє широким колом інших властивостей, необхідних для побудови нових засобів інфокомунікаційних систем з покращеними характеристиками. Дослідження інфокомунікаційних властивостей ПНДП в повному обсязі для реалізації засобів інфокомунікаційних систем в нанорозмірному діапазоні засобами математичного моделювання залишається актуальною проблемою.

2. Внаслідок математичного моделювання та комп'ютерного симулювання досліджено особливості впливу параметрів конструкції ПНДП на закономірності формування спектра просторових гармонік поля такої структури. Аналіз та узагальнення серії результатів числових

експериментів виявив неперіодичний характер спектра просторових гармонік поля. Найбільший вплив на характер розподілу поля ПНДП спричиняють такі її конструктивні параметри: частота збудження джерела стороннього поля; період слідування неоднорідностей діелектричної пластини; величина діелектричної проникливості неоднорідностей та товщина діелектричної пластини; ширина неоднорідностей діелектрика (останній фактор має найменший вплив).

3. ПНДП має значні потенційні можливості для створення нових засобів інфокомунікаційних систем в нанорозмірній сфері та модернізації існуючих засобів у міліметровому, субміліметровому та оптичному діапазонах хвиль, зокрема: лазерів з покращеними спектральними характеристиками випромінювання, зокрема з керованим спектральним складом лазерного випромінювання, просторових фільтрів та одновимірних фотонних кристалів з розширеними функціональними властивостями.

1. *Yablonovich E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58. – P. 2059–2061.* 2. *John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58. – P. 2486–2488.* 3. *Joannopoulos J.D., Meade R.D. and Winn J.N. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995.* 4. *Photonic Band Gap Materials / edited by C.M. Soukoulis. – Kluwer, Dordrecht. – 1996.* 5. *Кособужин В.А. Фотонные кристаллы // Окно в микромир. – 2002. – № 4. – С. 4–9.* 6. *Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.* 7. *Жувикин Г. Лабиринты фотонных кристаллов // Компьютерра. – 2001. – № 30. – 407 с. Доступно з <http://www.computerra.ru/offline/2001/407/11869/>.* 8. *Мартинес-Дуарт Дж.М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Мартинес-Дуарт Дж.М., Мартин-Палма Р.Дж., Агулло-Рueda Ф.; Пер. с англ. А.В. Хачояна; Под ред. Е.Б. Якимова. – М.: Техносфера, 2007. – 367 с.* 9. *Кособужин В.А. Фотонные кристаллы // ФТТ. – 1992. – 34 – С. 3107.* 10. *Чаплин А.Ф. Синтез плоской диэлектрической антенны // Тр. Москов. энергетического ин-та. – 1975. – Вып. 237. – С. 52–58.* 11. *Гоблик В.В. Возбуждение модулированной диэлектрической пластины // Вестн. Львов. Политехн. ин-та. – 1990. – № 245. – С. 20–23.* 12. *Гухман А.А. Введение в теорию подобия: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Высш. шк., 1973. – 296 с.* 13. *Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1971. – 667 с.* 14. *Гоблик В.В., Гоблик Н.М. Гіллясті ланцюгові дроби в задачах дифракції хвиль // Вісн. Держ. універ. “Львівська політехніка”. – 1998. – № 352. – С. 150–153.* 15. *Гоблик В.В., Павлиш В.А., Ничай І.В. Моделювання фотонних кристалів гіллястими ланцюговими дроби // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2007. – № 595. – С. 78–86.* 16. *Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – 2-е изд. – М., 1983. – 179 с.*