

ISSN 1028-821X. Radiofiz. Electron. 2021. Vol. 26, No. 2: 3–9

DOI: <http://doi.org/10.15407/rej2021.02.003>

УДК 537.811:539.2

**М.М. Білецький, С.А. Борисенко**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

E-mail: beletski@ire.kharkov.ua

## **Тунелювання електромагнітних хвиль через несиметричну тришарову структуру, що містить провідний шар з негативною діелектричною проникністю**

***Предмет і мета роботи.** Дослідження повного тунелювання електромагнітних хвиль через несиметричну тришарову структуру, що містить провідний шар з негативною діелектричною проникністю, становить великий інтерес з точки зору створення принципово нових оптичних і радіофізичних пристроїв. Метою роботи є вивчення впливу несиметричності тришарової структури на ефект повного тунелювання хвиль з урахуванням частотної дисперсії провідного шару з негативною діелектричною проникністю.*

***Методи і методологія роботи.** Для визначення частотно залежних умов виникнення ефекту повного тунелювання електромагнітних хвиль через несиметричну тришарову структуру використовувалося чисельне моделювання. Застосовано універсальний підхід, заснований на введенні безрозмірних частот і товщин шарів несиметричної тришарової структури. Він дозволив чисельно досліджувати умови виникнення ефекту повного тунелювання електромагнітних хвиль незалежно від будь-яких значень частот і геометричних параметрів несиметричної тришарової структури.*

***Результати роботи.** Показано, що несиметричність тришарової структури може призвести до істотної зміни умов повного тунелювання електромагнітних хвиль. Встановлено, що параметри несиметричної тришарової структури можуть бути обрані таким чином, щоб змінити умови повного тунелювання електромагнітних хвиль у бажаному для практичних застосувань напрямку. Виявлено, що існує можливість добирати параметри таким чином, щоб максимально зменшити вплив несиметричності тришарової структури на ефект тунелювання електромагнітних хвиль.*

***Висновки.** Несиметричні тришарові структури можуть бути використані для ефективною зміни умов повного тунелювання електромагнітних хвиль з метою отримання необхідних характеристик створюваних технічних пристроїв. Лл. 6. Бібліогр.: 7 назв.*

***Ключові слова:** повне тунелювання, частотна дисперсія, несиметрична тришарова структура, негативна діелектрична проникність.*

Проходження електромагнітних хвиль через тришарові структури, що містять провідний шар з негативною діелектричною проникністю, становить великий інтерес з точки зору створення принципово нових оптичних і радіофізичних пристроїв [1–7]. В основу роботи таких пристроїв може бути покладено ефект повного тунелювання електромагнітних хвиль через тришарові структури, що мають у своєму складі провідний плазмоподібний шар. Наявність такого шару призводить до істотного пом'як-

шення вимог і зміни умов повного тунелювання електромагнітних хвиль через тришарову структуру.

У перших роботах за досліджуваною тематикою [1–4] ефект повного тунелювання електромагнітних хвиль був передбачений лише для деяких частот та товщин шарів тришарової структури. У роботах [5, 6] дослідження тунелювання електромагнітних хвиль проводилося з використанням безрозмірних довжин хвиль та товщин тришарової структури. Вважалося,

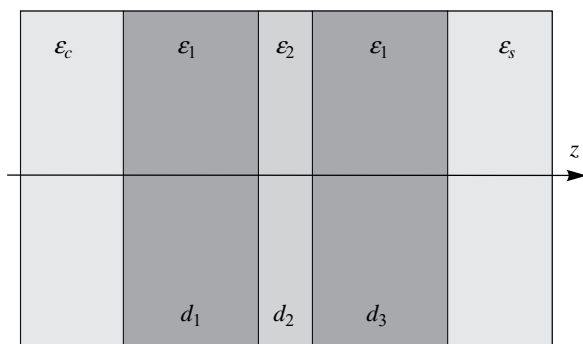


Рис. 1. Геометрія задачі

що провідний плазмподібний шар з негативною діелектричною проникністю знаходиться між двома однаковими діелектричними шарами. При цьому були розглянуті два випадки, коли тришарова структура мала симетричне [5] та несиметричне [6] діелектричне оточення. Зазначимо, що в роботах [5, 6] не враховувалась частотна дисперсія провідного шару з негативною діелектричною проникністю. Разом з тим, як було показано в роботі [7], врахування частотної дисперсії провідного шару з негативною діелектричною проникністю приводить до появи нового фізичного ефекту. Виявилося, що повне тунелювання електромагнітних хвиль через тришарову структуру стає можливим на двох різних частотах за певного вибору її параметрів.

Двочастотний ефект повного тунелювання електромагнітних хвиль розглядався в роботі [7] в припущенні, що тришарова структура є симетричною.

У цій роботі досліджено тунелювання електромагнітних хвиль через несиметричну тришарову структуру. Передбачалося, що провідний шар з негативною діелектричною проникністю знаходиться між двома діелектричними шарами різної товщини. Враховувалась частотна дисперсія шару з негативною діелектричною проникністю. У розрахунках використовувалися безрозмірні частоти та товщини тришарової структури. Такий підхід дозволив провести розрахунки незалежно від будь-яких значень частот і геометричних параметрів несиметричної тришарової структури.

Показано, що в несиметричній тришаровій структурі ефект повного проходження електромагнітних хвиль має низку особливостей. Виявлено, що несиметричність тришарової струк-

тури може призвести до істотної зміни умов повного тунелювання електромагнітних хвиль. При цьому параметри несиметричної тришарової структури можуть бути обрані таким чином, щоб змінити умови повного тунелювання електромагнітних хвиль у бажаному для практичних застосувань напрямку. Більш того, існує можливість підібрати параметри таким чином, щоб максимально зменшити вплив несиметричності тришарової структури на тунелювання електромагнітних хвиль.

**1. Постановка задачі.** Геометрію розглянутої задачі наведено на рис. 1.

Плоска несиметрична тришарова структура розташована на підкладці з діелектричною проникністю  $\epsilon_s$  та має діелектричне покриття  $\epsilon_c$  з проникністю ( $\epsilon_c \neq \epsilon_s$ ). Шар з негативною діелектричною проникністю  $\epsilon_2 < 0$  товщиною  $d_2$  розташований у центрі структури між двома шарами з діелектричною проникністю  $\epsilon_1 > 0$  та різними товщинами  $d_1$  і  $d_3$ . Плоска монохроматична електромагнітна хвиля з частотою  $\omega$  прямує по нормалі до тришарової несиметричної структури.

Як і в роботі [7], вважаємо, що шар з негативною діелектричною проникністю має електронний тип провідності і вираз для  $\epsilon_2$  має такий вигляд:

$$\epsilon_2 = 1 - \omega_p^2 / \omega^2, \tag{1}$$

де  $\omega_p$  – електронна плазмова частота.

Введемо безрозмірні величини:  $\xi = \omega / \omega_p$ ,  $\delta_{1,2,3} = \omega_p d_{1,2,3} / c$ ,  $c$  – швидкість світла у вакуумі. Крім того, введемо параметри  $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$ ,  $n_2 = \sqrt{-\epsilon_2}$ ,  $n_s = \sqrt{\epsilon_s}$ ,  $n_c = \sqrt{\epsilon_c}$ ,  $n_z = \sqrt{n_c n_s}$ .

**2. Умови повного тунелювання електромагнітних хвиль через несиметричну тришарову структуру.** Для визначення коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль  $R$  від досліджуваної структури можна скористатися таким виразом [6, 7]:

$$R = \left| \frac{a_- - ib_-}{a_+ - ib_+} \right|^2. \tag{2}$$

Для розглянутого нами випадку несиметричної тришарової структури маємо:

$$a_{\pm} = n_s M_{11}^t \pm n_c M_{22}^t; \tag{3}$$

$$b_{\pm} = M_{12}^t \pm n_z^2 M_{21}^t. \tag{4}$$

Тут  $M_{11}^t, M_{12}^t, M_{21}^t, M_{22}^t$  – компоненти матриці поширення  $\mathbf{M}^t$  для несиметричної тришарової структури. Вона визначається шляхом множення матриць поширення для кожного з шарів несиметричної тришарової структури:

$$\mathbf{M}^t = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_3. \quad (5)$$

Вирази для цих матриць мають такий вигляд:

$$\mathbf{M}_{1,3} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_{1,3} & -in_1 \sin \varphi_{1,3} \\ -i \sin \varphi_{1,3} / n_1 & \cos \varphi_{1,3} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} \operatorname{ch} \varphi_2 & in_2 \operatorname{sh} \varphi_2 \\ -i \operatorname{sh} \varphi_2 / n_2 & \operatorname{ch} \varphi_2 \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$\varphi_1 = \xi n_{1,3} \delta_{1,3}, \quad \varphi_2 = \xi n_2 \delta_2. \quad (8)$$

Ефект безвідбивного проходження електромагнітних хвиль через розглянуту несиметричну тришарову структуру матиме місце, якщо одночасно будуть виконані дві умови:

$$a_- = 0; \quad (9)$$

$$b_- = 0. \quad (10)$$

Систему рівнянь (9), (10) ми розв'язували чисельно у припущенні, що діелектричні проникності  $\varepsilon_s$  і  $\varepsilon_c$  фіксованими і що  $n_c = 1,0$  (повітря) та  $n_s = 2,14$  (кварц). При цьому  $n_z \approx 1,46$ . Як і в роботі [7], ми вважаємо, що  $n_1 = n_z + \Delta n_1$ . Така форма запису  $n_1$  пов'язана з тим, що рівність  $n_1 = n_z$  є необхідною умовою повного тунелювання через розглянуту структуру у випадку, коли шар з негативною діелектричною проникністю відсутній ( $d_2 = 0$ ). Наявність всередині структури шару з негативною діелектричною проникністю дає можливість спостерігати ефект повного тунелювання електромагнітних хвиль за умови  $n_1 \neq n_z$  [5–7]. Величина  $\Delta n_1$  характеризує ступінь відмінності  $n_1$  від  $n_z$  за наявності ефекту повного тунелювання електромагнітних хвиль у розглянутій структурі. У цій роботі ми вважали, що  $\Delta n_1 > 0$ , а ступінь несиметричності даної структури описується параметром  $\eta = d_3/d_1$ .

Із системи рівнянь (9), (10), яка визначає умови повного тунелювання електромагнітних хвиль через розглянуту структуру, знаходимо залежності  $\delta_1(\xi)$  і  $\delta_2(\xi)$  при фіксованому значенні  $\Delta n_1$ . Встановлено, що ці залежності є багатозначними. Це означає, що графіки за-

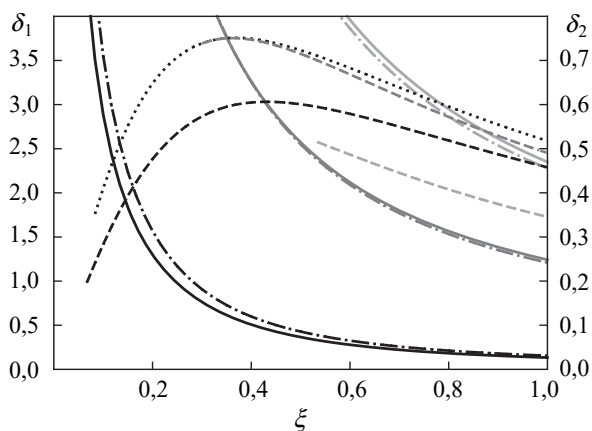


Рис. 2. Графіки залежностей  $\delta_1(\xi)$  (ліва вісь ординат, суцільні лінії) і  $\delta_2(\xi)$  (права вісь ординат, штрихові лінії) ( $\Delta n_1 = 1,5$ ,  $\eta = 0,2$ )

лежностей  $\delta_1(\xi)$  і  $\delta_2(\xi)$  матимуть кілька гілок. Число цих гілок може бути великим, тому ми обмежилися розглядом тільки тих гілок, для яких  $\delta_1 \leq 4,0$ . Для порівняння ми визначили залежності  $\delta_1(\xi)$  і  $\delta_2(\xi)$  для симетричної тришарової структури. Щоб відмінність між несиметричною і симетричною тришаровими кривими виглядала більш наочно, ми вважали, що товщини  $d_1$  і  $d_3$  дуже різняться.

На рис. 2 подано графіки залежностей  $\delta_1(\xi)$  і  $\delta_2(\xi)$ , отримані з чисельного розв'язання системи рівнянь (9), (10) у випадку, коли  $\Delta n_1 = 1,5$  і  $\eta = 0,2$ . Відносно лівої осі ординат побудовано залежність  $\delta_1(\xi)$  (суцільні лінії), а відносно правої осі ординат побудовано залежність  $\delta_2(\xi)$  (штрихові лінії). На цьому ж рисунку наведені графіки залежностей  $\delta_1(\xi)$  (штрих-пунктирні лінії) і  $\delta_2(\xi)$  (пунктирні лінії) для симетричної тришарової структури ( $\eta = 1,0$ ) для того ж значення  $\Delta n_1 = 1,5$ .

На рис. 2 показано, що існують три гілки залежності  $\delta_1(\xi)$ . Кожна з них характеризується мінімально можливим критичним значенням  $\delta_1$ , за якого ще спостерігається повне тунелювання електромагнітних хвиль. Величина  $\delta_1$  має мінімальне значення при  $\xi = 1$  і різко зростає зі зменшенням  $\xi$ . Перша гілка залежності  $\delta_1(\xi)$ , яка має найменше критичне значення  $\delta_1$ , існує в максимально можливому діапазоні значень  $\xi$ . Зі збільшенням номера гілки  $\delta_1(\xi)$  мінімальне критичне значення  $\delta_1$  зростає, а частотний діапазон її існування звужується.

З рис. 2 випливає, що несиметричність тришарової структури по-різному впливає на гілки

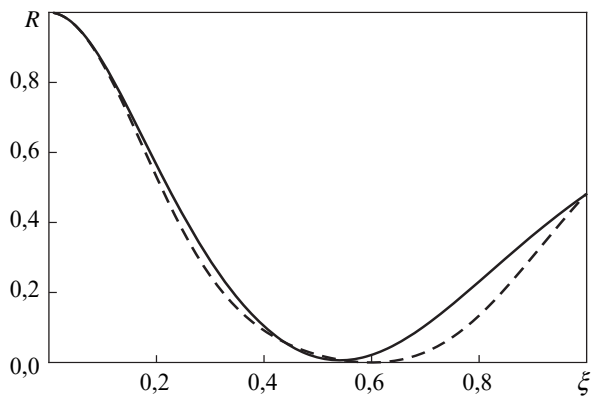


Рис. 3. Графіки залежностей  $R(\xi)$  для  $\delta_1 = 0,325$ ,  $\delta_2 = 0,683$ ,  $\Delta n_1 = 1,5$ ,  $\eta = 1,0$  (штрихова лінія) та  $\eta = 0,2$  (суцільна лінія)

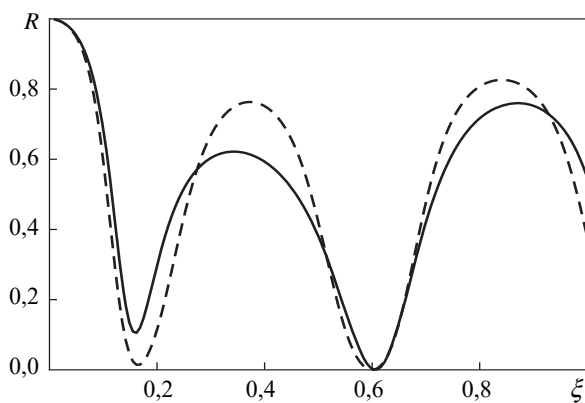


Рис. 4. Графіки залежностей  $R(\xi)$  при  $\delta_1 = 2,093$ ,  $\delta_2 = 0,683$ ,  $\Delta n_1 = 1,5$ ,  $\eta = 1,0$  (штрихова лінія) і  $\eta = 0,2$  (суцільна лінія)

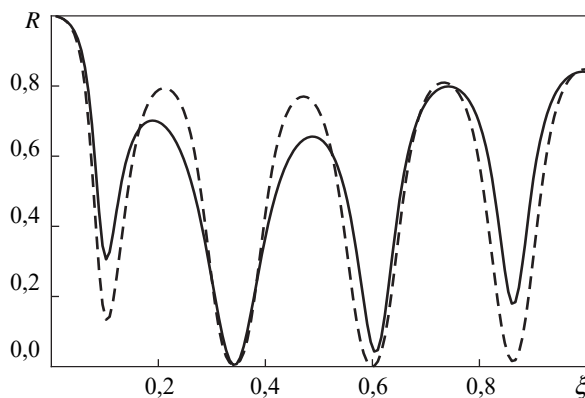


Рис. 5. Графіки залежностей  $R(\xi)$  для  $\delta_1 = 3,861$ ,  $\delta_2 = 0,683$ ,  $\Delta n_1 = 1,5$ ,  $\eta = 1,0$  (штрихова лінія) і  $\eta = 0,2$  (суцільна лінія)

залежності  $\delta_1(\xi)$ . Так, наприклад, перша гілка  $\delta_1(\xi)$  для несиметричної тришарової структури проходить нижче відповідної гілки для симетричної тришарової структури. У той же час третя гілка  $\delta_1(\xi)$  для несиметричної тришарової структури проходить вище відповідної гілки

ки для симетричної тришарової структури. На другу ж гілку залежності  $\delta_1(\xi)$  несиметричність тришарової структури має слабкий вплив.

Залежності  $\delta_2(\xi)$  для несиметричної тришарової структури також мають три гілки. Найнижча гілка, яка характеризується найменшим значенням  $\delta_2$  при  $\xi = 1$ , відповідає третій гілці залежності  $\delta_1(\xi)$ . Немонотонна залежність  $\delta_2(\xi)$ , що розміщена вище, відповідає першій гілці залежності  $\delta_1(\xi)$ . Нарешті, найвища крива  $\delta_2(\xi)$  відноситься до другої гілки залежності  $\delta_1(\xi)$ . Ця крива дещо відхиляється від відповідної кривої для симетричної тришарової структури. Це пов'язано з тим, що при обраних параметрах несиметричність тришарової структури має слабкий вплив на другу гілку залежності  $\delta_1(\xi)$ . Зазначимо, що для симетричної тришарової структури залежність  $\delta_2(\xi)$  має однаковий вигляд для всіх трьох гілок залежності  $\delta_1(\xi)$ .

Отримані результати свідчать про те, що несиметричні тришарові структури можуть бути використані для ефективного зміни умов повного тунелювання електромагнітних хвиль з метою отримання необхідних характеристик створюваних технічних пристроїв.

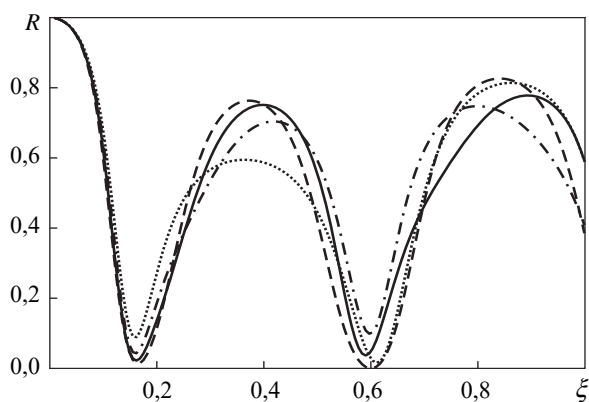
**3. Коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від несиметричної тришарової структури.** Розглянемо вплив несиметричності тришарової структури на частотні залежності коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль. Припустимо, що коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від симетричної тришарової структури ( $\eta = 1,0$ ) з  $\Delta n_1 = 1,5$  обертається в нуль при  $\xi = 0,6$ . Ця ситуація, як впливає з рис. 2, має місце для трьох різних значень  $\delta_1$ . Графіки залежностей  $R(\xi)$  для цих трьох значень  $\delta_1$  зображені на рис. 3–5 штриховими лініями. Зазначимо, що на цих рисунках  $R(0,6) = 0$  при одному і тому ж значенні  $\delta_2$ . Конкретні значення  $\delta_1$  і  $\delta_2$ , при яких спостерігається повне тунелювання електромагнітних хвиль через симетричну тришарову структуру на безрозмірній частоті  $\xi = 0,6$ , наведені в підписах до рис. 3–5. Зазначимо, що зі збільшенням величини  $\delta_1$  зростає число мінімумів на залежностях  $R(\xi)$ . Наявність таких мінімумів свідчить про існування зон низького відбиття електромагнітних хвиль від симетричної тришарової структури в різних частотних діапазонах.

Розглянемо ситуацію, коли товщина третього шару структури відрізняється від товщини її першого шару ( $d_3 \neq d_1$ ). Покладемо, що всі інші параметри структури є незмінними,  $d_3 < d_1$  та  $\eta = 0,2$ . Відповідні графіки залежностей  $R(\xi)$  зображені на рис. 3–5 суцільними лініями. З цих рисунків видно, що ефект повного тунелювання електромагнітних хвиль зникає і відбувається зміщення мінімумів  $R$  за безрозмірною частотою  $\xi$ . Зазначимо, що ступінь і напрямок зміщення мінімумів  $R$  залежать від величини  $\delta_1$ . Найменша відмінність у графіках залежностей  $R(\xi)$  для симетричних і несиметричних тришарових структур (рис. 4) спостерігається для значень  $\delta_1$ , що відповідають другій гілці залежності  $\delta_1(\xi)$  на рис. 2. Для значень  $\delta_1$ , що відповідають першій гілці залежності  $\delta_1(\xi)$ , зсув мінімуму  $R$  відбувається в бік менших значень  $\xi$  (рис. 3). Для значень  $\delta_1$ , що відповідають першій гілці залежності  $\delta_1(\xi)$ , зсув мінімуму  $R$  відбувається в протилежний бік до більших значень  $\xi$  (рис. 5).

Як видно з рис. 3–5, мінімальні значення  $R$  в несиметричній тришаровій структурі малі навіть при великих відмінностях в товщинах її першого та третього шарів. Таким чином, при конструюванні різного роду технічних пристроїв не варто накладати жорсткі умови на товщину третього шару такої структури.

**4. Вплив ступеня несиметричності тришарової структури на коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль.** Дослідимо, як впливає величина  $\eta$  на тунелювання електромагнітних хвиль через несиметричну тришарову структуру. З цією метою ми вивчали залежності  $R(\xi)$ , коли  $\eta$  змінюється від одиниці до нуля. Параметри тришарової структури вважались рівними значенням, наведеним у підписах до рис. 3–5. Ці параметри були обрані із умови повного тунелювання електромагнітних хвиль через симетричну тришарову структуру для  $\Delta n_1 = 1,5$ ,  $\xi = 0,6$ .

Нами було встановлено, що для найменшого значення  $\delta_1 = 0,325$ , яке відповідає першій гілці на залежності  $\delta_1(\xi)$  (рис. 2), мінімум  $R$  монотонно зростає при зменшенні  $\eta$  і цей мінімум зміщується в бік менших значень  $\xi$ . Це свідчить про те, що зі зростанням несиметрії тришарової структури амплітуда електромагнітної хвилі, що пройшла, на частоті  $\xi = 0,6$  зменшується.



**Рис. 6.** Графіки залежностей  $R(\xi)$  при  $\delta_1 = 2,093$ ,  $\delta_2 = 0,683$ ,  $\Delta n_1 = 1,5$  для  $\eta = 1,0$  (штрихова лінія),  $\eta = 0,8$  (суцільна лінія),  $\eta = 0,6$  (штрих-пунктирна лінія),  $\eta = 0,3$  (пунктирна лінія)

Інша ситуація спостерігається для  $\delta_1 = 2,093$  (це значення відповідає другій гілці залежності  $\delta_1(\xi)$  на рис. 2). У цьому випадку зі зменшенням  $\eta$  мінімальне значення  $R$  спочатку збільшується, а потім зменшується.

На рис. 6 зображені графіки залежностей  $R(\xi)$  для кількох значень  $\eta$ . З цих графіків видно, що мінімальне значення  $R$  збільшується зі зменшенням  $\eta$  від 1,0 до 0,6. При подальшому зменшенні  $\eta$  мінімальне значення  $R$  починає зменшуватися. Коли  $\eta = 0,2$ , мінімум  $R$  розташовується максимально близько до нульового значення, яке відповідає випадку симетричної тришарової структури. При зменшенні  $\eta$  від 0,2 до нуля мінімальне значення  $R$  знову зростає. Таким чином, для другої гілки залежності  $\delta_1(\xi)$  величина мінімуму  $R$  є немонотонною функцією  $\eta$ . За деякого значення  $\eta$  мінімальні значення  $R$  для симетричної та несиметричної тришарових структур дещо відрізняються один від одного.

Для величини  $\delta_1 = 3,861$ , що належить до третьої гілки залежності  $\delta_1(\xi)$ , величина мінімуму  $R$  також є немонотонною функцією  $\eta$ . Залежність має два локальних мінімуми  $R$  при  $\eta = 0,1$  та  $\eta = 0,5$ . У цих локальних мінімумах величина  $R$  приблизно дорівнює нулю, що відповідає майже повному тунелюванню електромагнітних хвиль через несиметричну тришарову структуру.

**Висновки.** Залежності  $\delta_1(\xi)$  і  $\delta_2(\xi)$ , що визначають умови повного тунелювання електромагнітних хвиль через несиметричну тришарову структуру, є багатозначними функціями.

Несиметрія тришарової структури по-різному впливає на різні гілки залежності  $\delta_1(\xi)$ . Для першої гілки з найменшим значенням  $\delta_1$  збільшення несиметричності тришарової структури приводить до монотонного зменшення амплітуди хвилі, що пройшла. Для другої і третьої гілок залежності  $\delta_1(\xi)$  амплітуда хвилі, що пройшла, є немонотонною функцією параметра несиметричності  $\eta$ .

Для цих двох гілок величина  $\eta$  може бути обрана таким чином, що коефіцієнти відбит-

тя електромагнітних хвиль від несиметричної і симетричної тришарових структур будуть приблизно однакові.

Таким чином, вплив несиметричності тришарової структури на ефект повного проходження електромагнітних хвиль можна мінімізувати оптимальним вибором величин  $\delta_1$  та  $\eta$ .

Отримані результати мають важливе практичне значення і можуть бути використані для створення нових пристроїв оптики, радіофізики та електроніки.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Zhou L., Wen W., Chan C.T., Sheng P. Electromagnetic-Wave Tunneling Through Negative-Permittivity Media with High Magnetic Fields. *Phys. Rev. Lett.* 2005. Vol. 94, Iss. 24. P. 243905 (4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.243905.
2. Cojcaru E. Electromagnetic tunneling in lossless trilayer stacks containing single-negative metamaterials. *Prog. Electromagn. Res.* 2011. Vol. 113. P. 227–249. DOI: 10.2528/PIER11010707.
3. Chao Y., Zhao H. Electromagnetic tunneling through a three-layer asymmetric medium containing epsilon-negative slabs. *Cent. Eur. J. Phys.* 2013. Vol. 11, Iss. 5. P. 594–600. DOI: 10.2478/s11534-013-0251-z.
4. Wei L. Resonant tunneling condition and transmission periodic characteristics for a metal barrier in the Fabry–Perot cavity. *Mater. Res. Express.* 2016. Vol. 3, Iss. 12. P. 126201(7 p.). DOI: 10.1088/2053-1591/3/12/126201.
5. Beletskii N.N., Borysenko S.A. Reflectionless Transit of Electromagnetic Waves at the Normal Incidence on the Symmetric Three-Layered Structure Containing a Negative-Permittivity Layer. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2017. Vol. 76, Iss. 18. P. 1613–1621. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i18.30.
6. Білецький Н.Н., Борисенко С.А. Туннелювання електромагнітних волн через трешарову структуру, що містить шар з негативною діелектричною проникністю. *Радиофизика и электроника.* 2018. Т. 23, № 2. С. 54–60. DOI: 10.15407/rej2018.02.054.
7. Білецький Н.Н., Борисенко С.А. Влияние частотной дисперсии слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью на туннелирование электромагнитных волн через трешаровую структуру. *Радиофизика и электроника.* 2020. Т. 25, № 2. С. 3–8. DOI: 10.15407/rej2020.02.003.

Стаття надійшла 05.02.2021

#### REFERENCES

1. Zhou, L., Wen, W., Chan, C.T., Sheng, P., 2005. Electromagnetic-Wave Tunneling Through Negative-Permittivity Media with High Magnetic Fields. *Phys. Rev. Lett.*, **94**(24), pp. 243905(4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.243905.
2. Cojcaru, E., 2011. Electromagnetic tunneling in lossless trilayer stacks containing single-negative metamaterials. *Prog. Electromagn. Res.*, **113**, pp. 227–249. DOI: 10.2528/PIER11010707.
3. Chao, Y., Zhao, H., 2013. Electromagnetic tunneling through a three-layer asymmetric medium containing epsilon-negative slabs. *Cent. Eur. J. Phys.*, **11**(5), pp. 594–600. DOI: 10.2478/s11534-013-0251-z.
4. Wei, L., 2016. Resonant tunneling condition and transmission periodic characteristics for a metal barrier in the Fabry–Perot cavity. *Mater. Res. Express*, **3**(12), pp. 126201(7 p.). DOI: 10.1088/2053-1591/3/12/126201.
5. Beletskii, N.N., Borysenko, S.A., 2017. Reflectionless Transit of Electromagnetic Waves at the Normal Incidence on the Symmetric Three-Layered Structure Containing a Negative-Permittivity Layer. *Telecommunications and Radio Engineering*, **76**(18), pp. 1613–1621. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i18.30.
6. Beletskii, N.N., Borysenko, S.A., 2018. Tunneling of electromagnetic waves through the three-layered structure containing a negative-permittivity layer. *Radiofiz. Elektron.*, **23**(2), pp. 54–60 (in Russian). DOI: 10.15407/rej2018.02.054.
7. Beletskii, N.N., Borysenko, S.A., 2020. Influence of frequency dispersion of a negative-permittivity layer on electromagnetic wave tunneling through a three-layered structure. *Radiofiz. Elektron.*, **25**(2), pp. 3–8 (in Russian). DOI: 10.15407/rej2020.02.003.

Received 05.02.2021

N.N. Beletskii, S.A. Borysenko

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU  
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

ELECTROMAGNETIC WAVE TUNNELING THROUGH  
AN ASYMMETRIC THREE-LAYER STRUCTURE CONTAINING  
A CONDUCTIVE NEGATIVE-PERMITTIVITY LAYER

**Subject and Purpose.** In the context of growing anticipation of fundamentally new optical and radiophysical devices, the present study is concerned with the total electromagnetic wave tunneling through an asymmetric three-layer structure such that contains a conductive negative-permittivity layer. The aim of this work is to recognize how the asymmetry property of this three-layer structure acts on the effect of total wave tunneling with the frequency dispersion of the conductive negative-permittivity layer taken into account.

**Methods and Methodology.** The frequency-dependent conditions of the total electromagnetic wave tunneling through an asymmetric three-layer structure are sought by numerical simulations. A universal approach based on the introduction of dimensionless frequencies and dimensionless layer thicknesses allows us to numerically investigate conditions of the total electromagnetic wave tunneling for any desired frequencies and geometric parameters of the asymmetric three-layer structure.

**Results.** It has been shown that the asymmetry property of the three-layer structure can significantly change the total electromagnetic wave tunneling conditions. It has been demonstrated that parameters of the asymmetric three-layer structure can be selected in such a way as to modify the total electromagnetic wave tunneling conditions toward a desired practical application of the structure. It has been found that a proper choice of the parameters can minimize the action of the three-layer structure asymmetry on the electromagnetic wave tunneling effect.

**Conclusion.** Asymmetric three-layer structures can be of use to effectively change conditions of the total electromagnetic wave tunneling in an effort to provide devices under development with desired characteristics.

**Key words:** *total tunneling, frequency dispersion, asymmetric three-layer structure, negative permittivity.*