

**Н. Н. Белецкий, С. А. Борисенко***Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: beletski@ire.kharkov.ua

**БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОЕ ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН  
ПРИ НОРМАЛЬНОМ ПАДЕНИИ НА СИММЕТРИЧНУЮ ТРЕХСЛОЙНУЮ СТРУКТУРУ,  
СОДЕРЖАЩУЮ СЛОЙ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ**

Эффект безотражательного нормального прохождения электромагнитных волн через симметричные трехслойные структуры, содержащие слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, вызывает большой интерес. Это обусловлено как необычным характером этого эффекта, так и его уникальными техническими приложениями. Вместе с тем эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн исследован еще недостаточно хорошо и не все его особенности найдены и описаны. К настоящему времени эффект безотражательного прохождения рассмотрен лишь для некоторых конкретных значений диэлектрических проницаемостей и толщин симметричной трехслойной структуры. В данной работе использован общий подход, основанный на введении безразмерных толщин слоев структуры. Он позволяет исследовать эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн безотносительно к какому-то конкретному диапазону длин волн. Показано, что наличие в трехслойной структуре слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью приводит к существенному изменению спектра отражения электромагнитных волн. Найдено, что в спектре отражения электромагнитных волн существуют широкие области слабого отражения. Шириной этих областей можно эффективно управлять, изменяя величину отрицательной диэлектрической проницаемости среднего слоя трехслойной структуры. Изучено влияние потерь энергии в среднем слое трехслойной структуры на спектр отражения электромагнитных волн. Полученные результаты имеют важное прикладное значение для создания новых устройств электроники, фотоники и фотovoltaики. Ил. 6. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** безотражательное прохождение, трехслойная структура, среда с отрицательной проницаемостью.

Безотражательное прохождение электромагнитных волн при их нормальном падении на слоистые диэлектрические структуры, содержащие слои с отрицательной диэлектрической проницаемостью, представляет большой интерес для физиков [1–5]. Исследование этого эффекта имеет большое значение как для понимания физического механизма безотражательного прохождения электромагнитных волн через непрозрачные среды, так и для создания новых высокочастотных устройств с уникальными характеристиками.

В работах [1, 2] рассмотрены два случая безотражательного прохождения электромагнитных волн через симметричную трехслойную диэлектрическую структуру, содержащую слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью. В них было показано, что при увеличении толщины слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью происходит исчезновение эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн. Физической причиной возникновения эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн через симметричную трехслойную диэлектрическую структуру, содержащую слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, является интерференция электромагнитных волн, отраженных от границ слоев трехслойной структуры [2]. Этот вывод был подтвержден в работе [3], в которой была установлена периодичность эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн при изменении толщин диэлектрических слоев, примыкающих к слою с отрицательной диэлектрической

проницаемостью. Отметим, что в работах [4, 5] рассматривался эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн через различные типы симметричных и несимметричных трехслойных структур, содержащих слои с отрицательной диэлектрической проницаемостью. При этом эффект безотражательного прохождения был рассмотрен лишь в определенном частотном интервале для некоторых значений диэлектрических проницаемостей слоев и их толщин.

В настоящей работе приведены новые данные об особенностях эффекта безотражательного нормального прохождения электромагнитных волн через симметричные трехслойные структуры, содержащие слои с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Все результаты получены с использованием безразмерных толщин трехслойной структуры. Использование этих безразмерных величин позволило нам исследовать эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн безотносительно к какому-либо конкретному диапазону длин волн.

Изучено влияние параметров слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью на условия возникновения эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн. Показано, что наличие в трехслойной структуре слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью приводит к существенному изменению спектра отражения электромагнитных волн. Прежде всего это проявляется в появлении широких областей слабого отражения электромаг-

нитных волн от трехслойной структуры. Шириной этих областей можно эффективно управлять, подбирая значение отрицательной диэлектрической проницаемости среднего слоя трехслойной структуры.

Изучено влияние потерь энергии в среднем слое трехслойной структуры на спектр отражения электромагнитных волн. Указаны области возможного практического применения эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн через симметричные трехслойные структуры со слоем с отрицательной диэлектрической проницаемостью.

**1. Постановка задачи.** Пусть плоская симметричная трехслойная структура, изображенная на рис. 1, расположена в свободном пространстве (среде с единичной диэлектрической проницаемостью). Плоская электромагнитная волна распространяется вдоль оси  $z$  по нормали к рассматриваемой структуре. Слой с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2 < 0$  толщины  $d_2$  расположен между двумя одинаковыми диэлектрическими средами с проницаемостями  $\varepsilon_1 > 0$  и толщинами  $d_1$ .

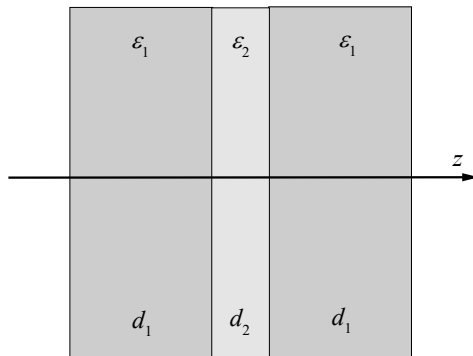


Рис. 1. Геометрия задачи

При нормальном падении электромагнитных волн на рассматриваемую структуру векторы напряженностей электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  поля направлены вдоль границ раздела сред. Зависимость электромагнитных полей от координаты  $z$  и времени  $t$  будем описывать экспоненциальным множителем  $\exp[i(k_{zi}z - \omega t)]$ . Здесь  $i = 1$  для сред с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1 > 0$  и  $i = 2$  для среды с  $\varepsilon_2 < 0$ . Величины  $\omega$  и  $k_{zi} = k_0 \sqrt{\varepsilon_i}$  – частота и волновое число электромагнитных волн ( $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина электромагнитной волны в свободном пространстве).

**2. Исследование коэффициента отражения электромагнитных волн.** Введем следующие обозначения:  $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$ ,  $n_2 = \sqrt{-\varepsilon_2}$ . Тогда

$k_{z1} = k_0 n_1$ ,  $k_{z2} = i k_0 n_2$ . Очевидно, что величина  $k_{z2}$  является чисто мнимой величиной и через одиночный слой с  $\varepsilon_2 < 0$  безотражательного прохождения электромагнитных волн быть не может. Тем не менее, как будет показано ниже, электромагнитная волна при определенных условиях может проходить без отражения через слоистую симметричную структуру, содержащую слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью.

Используя метод матрицы распространения [6, 7], для коэффициента отражения электромагнитных волн  $R$  от исследуемой структуры находим следующее выражение:

$$R = \left| \frac{b_-}{a_+ + b_+} \right|^2, \quad (1)$$

где

$$a_+ = 2in_1 \left[ 2n_1 n_2 \cos 2\varphi_1 \cosh \varphi_2 - \left( n_1^2 - n_2^2 \right) \sin 2\varphi_1 \sinh \varphi_2 \right]; \quad (2)$$

$$b_{\pm} = 2n_1 n_2 (n_1^2 \pm 1) \sin 2\varphi_1 \cosh \varphi_2 + \left[ (n_1^2 \pm 1)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\varphi_1 \right] \sinh \varphi_2; \quad (3)$$

$$\varphi_1 = k_0 n_1 d_1, \quad \varphi_2 = k_0 n_2 d_2. \quad (4)$$

Очевидно, что эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн через рассматриваемую структуру будет иметь место, если  $b_- = 0$ .

Рассмотрим вначале случай, когда слой с  $\varepsilon_2 < 0$  отсутствует, т. е.  $d_2 = 0$ . При этом  $\varphi_2 = 0$  и условие  $b_- = 0$  выполняется, если  $\sin 2\varphi_1 = 0$ . Это означает, что эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн имеет место всякий раз, когда на оптической толщине структуры  $2n_1 d_1$  укладывается целое число полувольт, то есть когда  $2n_1 d_1 = m\lambda/2$ , где  $m \in \mathbb{N}$ .

Введем безразмерные толщины слоев рассматриваемой структуры  $x = n_1 d_1 / \lambda$  и  $y = n_2 d_2 / \lambda$ . С учетом введенных величин  $\varphi_1 = 2\pi x$ ,  $\varphi_2 = 2\pi y$ . Если  $d_2 = 0$  ( $\varphi_2 = y = 0$ ), то эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн будет иметь место при  $x = m/4$ , где  $m \in \mathbb{N}$ .

На рис. 2 изображены зависимости  $R(x)$  для  $n_1 = 2,14$  (кварц),  $n_2 = 4,0$  при различных значениях величины  $y$ . Из этого рисунка видно, что при  $y = 0$  точки безотражательного прохождения электромагнитных волн расположены периодически на оси  $x$  на расстоянии 0,25 друг от друга. С увеличением  $y$  вид зависимостей  $R(x)$

существенным образом изменяется. Точки безотражательного прохождения на зависимости  $R(x)$  уже располагаются неравномерно. Они начинают попарно смещаться друг к другу, формируя широкие области слабого отражения от рассматриваемой структуры (кривые  $y = 0,05$  и  $y = 0,1$ ). Области слабого отражения периодически расположены по оси  $x$  с периодом  $0,5$ . Отметим, что существуют такие значения  $y$ , при которых  $R \approx 0$  в широкой области значений  $x$  (кривая  $y = 0,1$  на рис. 2).

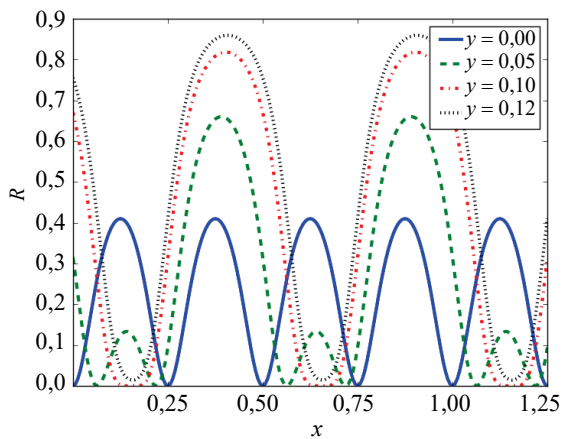


Рис. 2. Графики зависимости  $R(x)$  при различных значениях величины  $y$

При некотором значении  $y = y_{\max}$  точки безотражательного прохождения электромагнитных волн в каждой области слабого отражения совпадают. При этом зависимости  $R(x)$  представляют собой ряд нулевых минимумов. Каждый последующий минимум соответствует изменению оптической длины двух слоев с  $\varepsilon_1 > 0$  на величину, равную длине волны  $\lambda$ . При дальнейшем увеличении  $y$  эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн исчезает. На рис. 2 этому случаю соответствует кривая  $y = 0,12$ . Видно, что для этого случая минимальное значение коэффициента отражения уже отлично от нуля. Отметим, что как следует из рис. 2, наличие слоя с  $\varepsilon_2 < 0$  приводит к появлению областей, характеризующихся большими значениями коэффициента отражения.

Таким образом, для симметричной трехслойной структуры, содержащей слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, существует максимальное значение параметра  $y = y_{\max}$ , больше которого эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн при их нормальном падении на структуру отсутствует. При фиксированных значениях  $n_1$ ,  $n_2$  и  $\lambda$  величина  $y_{\max}$  определяет максимальное значение  $d_2$ ,

при котором еще может наблюдаться эффект безотражательного прохождения через симметричную трехслойную структуру со слоем с отрицательной диэлектрической проницаемостью.

Покажем теперь, как смещаются точки безотражательного прохождения электромагнитных волн при изменении величины  $y$ . При этом мы ограничимся лишь первой областью слабого отражения электромагнитных волн, соответствующей наименьшим значениям параметра  $x$ . На рис. 3 изображена зависимость  $x(y)$ , соответствующая безотражательному прохождению электромагнитных волн в случае, когда  $n_1 = 2,14$ ,  $n_2 = 4,0$ . Эта зависимость состоит из двух ветвей, которые при увеличении  $y$  сближаются и соприкасаются в точке с координатами  $y_{\max}, x_{\text{con}}$ . Область между двумя ветвями соответствует малым значениям коэффициента отражения электромагнитных волн. При  $y > y_{\max}$  эффект безотражательного прохождения через рассматриваемую симметричную трехслойную структуру отсутствует.

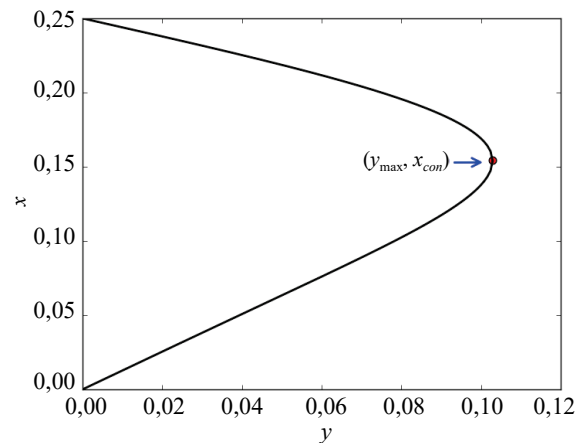


Рис. 3. Графики зависимости  $x(y)$ , при которых наблюдается эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн

Рассмотрим теперь, как зависят предельные величины  $y_{\max}$  и  $x_{\text{con}}$  от величины  $n_2$ . На рис. 4 представлены зависимости  $y_{\max}(n_2)$  и  $x_{\text{con}}(n_2)$  при  $n_1 = 2,14$ . Из него видно, что с увеличением  $n_2$  величина  $y_{\max}$  уменьшается. В то же время величина  $x_{\text{con}}$  растет. Это означает, что для существования эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн при увеличении абсолютной величины диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_2$  необходимо или уменьшать  $d_2$  или увеличивать  $\lambda$ . При этом, как следует из зависимости  $x_{\text{con}}(n_2)$ , необходимо увеличивать величину  $d_1$ .

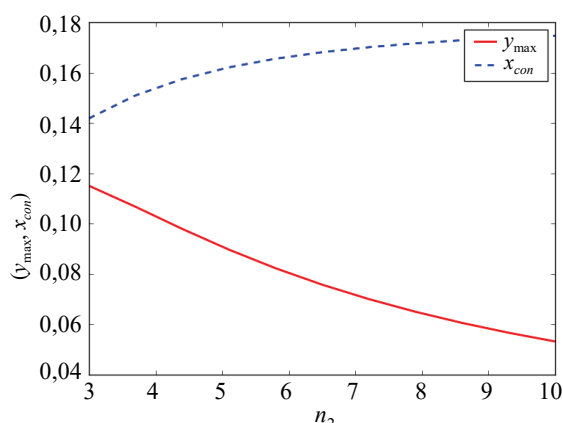


Рис. 4. Графики зависимости  $y_{\max}(n_2)$  и  $x_{\text{con}}(n_2)$ , соответствующие исчезновению эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн

Следует отметить, что величина  $y_{\max}$  зависит не только от  $n_2$ , но и от  $n_1$ . При фиксированном значении  $n_2$  величина  $y_{\max}$  растет с увеличением  $n_1$ . Таким образом, мы можем осуществлять безотражательное прохождение электромагнитных волн через рассматриваемую структуру в заданном диапазоне длин волн, подбирая не только геометрические размеры слоев, но и величины их диэлектрических проницаемостей.

### 3. Учет диссипации энергии в структуре.

В заключение рассмотрим, как влияет диссипация энергии в слое с отрицательной диэлектрической проницаемостью на эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн через симметричную структуру, изображенную на рис. 1. С этой целью мы будем считать, что величина  $n_2$  описывается следующим выражением:

$$n_2 = n_{2r}(1 - i\delta), \quad (5)$$

где  $n_{2r}$  – вещественная часть  $n_2$ ;  $\delta$  – параметр, связанный с диссипацией энергии в слое с  $\varepsilon_2 < 0$ .

Предположим, что потери энергии в рассматриваемой структуре малы, т. е.  $\delta < 1$ . В качестве безразмерной толщины слоя с  $\varepsilon_2 < 0$  будем использовать параметр  $y_r = n_{2r}d_2 / \lambda$ .

На рис. 5 изображена зависимость  $R(x)$  при  $n_1 = 2,14$ ,  $n_{2r} = 4,0$ ,  $\delta = 0,1$  для различных значений величины  $y_r$ .

Видно, что для малых значений  $y_r$  эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн через рассматриваемую структуру сохраняется ( $y_r = 0,05$ ). При этом области слабого отражения становятся несимметричными в силу того, что два минимальных значения  $R$  в этих областях уже не равны друг другу. Первый минимум  $R$  в областях пониженного отражения является ненулевым, а второй равен нулю

( $y_r = 0,05$ ). С увеличением  $y_r$  расстояние между минимумами  $R$  уменьшается, причем первый минимум исчезает, а второй минимум становится ненулевым ( $y_r = 0,1$ ). Таким образом, наличие потерь энергии в слое с  $\varepsilon_2 < 0$  сужает диапазон значений  $y_r$ , при которых может наблюдаться эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн. При  $y_r = 0,12$ , как следует из графиков рис. 5, на зависимостях  $R(x)$  существуют периодические одиночные минимумы, соответствующие областям слабого отражения электромагнитных волн.

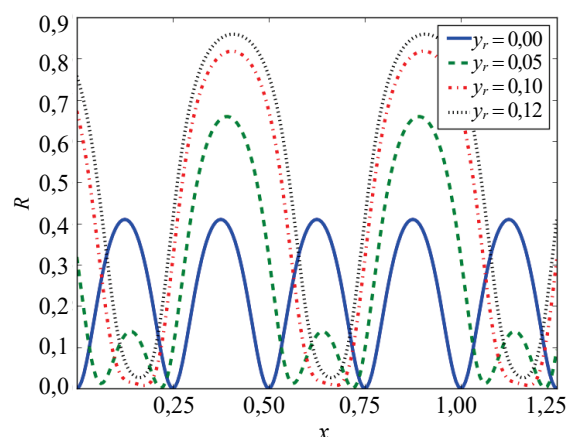


Рис. 5. Графики зависимости  $R(x)$  для различных значений величины  $y_r$  при  $n_1 = 2,14$ ,  $n_{2r} = 4,0$ ,  $\delta = 0,1$

Увеличение потерь энергии в рассматриваемой структуре приводит к уменьшению верхней границы диапазона значений параметра  $y_r$ , в котором существует эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн, что иллюстрирует рис. 6. Из него видно, что уже начиная с  $y_r = 0,05$  величина  $R$  не равна нулю, т. е. эффект безотражательного прохождения через рассматриваемую структуру отсутствует.

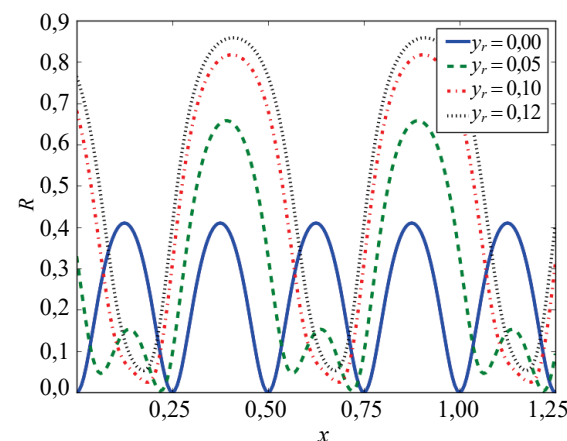


Рис. 6. Графики зависимости  $R(x)$  для различных значений величины  $y_r$  при  $n_1 = 2,14$ ,  $n_{2r} = 4,0$ ,  $\delta = 0,2$

Увеличение величины  $\delta$  приводит также к сужению областей слабого отражения электромагнитных волн и увеличению минимального значения  $R$  в этих областях.

**Выводы.** Введение безразмерных толщин  $x$  и  $y$  симметричной трехслойной структуры, содержащей слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, позволяет исследовать эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн безотносительно к рабочему диапазону длин волн. Эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн существует в том случае, когда безразмерная толщина непрозрачного слоя  $y$  не превосходит некоторого критического значения  $y_{\max}$ . При  $y < y_{\max}$  зависимость  $R(x)$  представляет собой периодическую последовательность областей слабого отражения, которые расположены между двумя нулевыми значениями коэффициента отражения  $R$ . При этом между областями слабого отражения располагаются области сильного отражения от рассматриваемой структуры. Наличие потерь энергии в слое с отрицательной диэлектрической проницаемостью приводит к уменьшению величины  $y_{\max}$  и сужению областей слабого отражения электромагнитных волн.

Симметричные трехслойные структуры, содержащие слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, могут применяться для создания слабоотражающих устройств в различных диапазонах длин волн. Изменяя параметры слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью, можно изменять величину области слабого отражения электромагнитных волн. Это обстоятельство может быть использовано для увеличения поглощения электромагнитных волн солнечными элементами и, следовательно, увеличения их производительности.

#### Библиографический список

1. Zhou Lei, Wen Weijia, Chan C. T., Sheng Ping. Electromagnetic-Wave Tunneling Through Negative-Permittivity Media with High Magnetic Fields. *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 94, N 24. P. 243905 (4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.243905
2. Hooper I. R., Preist T. W., Sambles J. R. Making Tunnel Barriers (Including Metals) Transparent. *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 97, N 5, P. 053902 (4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.053902
3. Wei Li. Resonant tunneling condition and transmission periodic characteristics for a metal barrier in the Fabry–Perot cavity. *Mater. Res. Express.* 2016. Vol. 3, N 12. P. 126201 (7 p.). DOI: 10.1088/2053-1591/3/12/126201
4. 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
5. Yang Chao, Zhao Hui. Electromagnetic tunneling through a three-layer asymmetric medium containing epsilon-negative slabs. *Cent. Eur. J. Phys.* 2013. Vol. 11, N 5. P. 594–600. DOI: 10.2478/s11534-013-0251-z

6. Beletskii N. N., Borysenko S. A., Gvozdev N. I. Interaction of plasma and defective modes in one-dimensional layered periodic dielectric structures bordering upon plasma-like media. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2015. Vol. 74, N 13. P. 1175–1191. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i13.50
7. Beletskii N. N., Borysenko S. A. On The Spectrum Of Electromagnetic Waves In The One-Dimensional Defective Photon Crystal Bordering On Conducting Medium. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2016. Vol. 75, N 16. P. 1457–1465. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i16.40

#### REFERENCES

1. ZHOU, LEI, WEN, WEIJIA, CHAN, C. T., SHENG, PING, 2006. Electromagnetic-Wave Tunneling Through Negative-Permittivity Media with High Magnetic Fields. *Phys. Rev. Lett.* June, vol. 94, no. 24, pp. 243905 (4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.243905
2. HOOPER, I. R., PREIST, T. W., SAMBLES, J. R., 2006. Making Tunnel Barriers (Including Metals) Transparent. *Phys. Rev. Lett.* Aug., vol. 97, no. 5, pp. 053902 (4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.053902
3. WEI, LI, 2016. Resonant tunneling condition and transmission periodic characteristics for a metal barrier in the Fabry–Perot cavity. *Mater. Res. Express.* Dec., vol. 3, no. 12, pp. 126201 (7 p.). DOI: 10.1088/2053-1591/3/12/126201
4. COJCARU, E., 2011. Electromagnetic tunneling in lossless trilayer stacks containing single-negative metamaterials. *Prog. Electromagn. Res.* Vol. 113. P. 227–249. DOI: 10.2528/PIER11010707
5. YANG, CHAO, ZHAO, HUI, 2013. Electromagnetic tunneling through a three-layer asymmetric medium containing epsilon-negative slabs. *Cent. Eur. J. Phys.* May, vol. 11, no. 5, pp. 594–600. DOI: 10.2478/s11534-013-0251-z
6. BELETSKII, N. N., BORYSENKO, S. A., GVOZDEV, N. I., 2015. Interaction of plasma and defective modes in one-dimensional layered periodic dielectric structures bordering upon plasma-like media. *Telecommunications and Radio Engineering.* Vol. 74, no. 13, pp. 1175–1191. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i13.50
7. BELETSKII, N. N., BORYSENKO, S. A., 2016. On the spectrum of electromagnetic waves in the one-dimensional defective photon crystal bordering on conducting medium. *Telecommunications and Radio Engineering.* Vol. 75, no. 16, pp. 1457–1465. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i16.40

Рукопись поступила 13.03.2017.

N. N. Beletskii, S. A. Borysenko

#### REFLECTIONLESS TRANSIT OF ELECTROMAGNETIC WAVES AT THE NORMAL INCIDENCE ON THE SYMMETRIC THREE-LAYERED STRUCTURE CONTAINING A NEGATIVE-PERMITTIVITY LAYER

The effect of reflectionless normal transit of electromagnetic waves through symmetric three-layered structures containing negative-permittivity layers excites considerable interest. It is stipulated by both an unusual nature of the effect and its unique technical applications. Moreover the electromagnetic-wave reflectionless transit effect has been investigated not enough and not all the peculiarities of the effect have been found and described yet. By now the reflectionless transit effect has been considered only for some concrete values of the permittivity and thickness of a symmetric three-layered structure. In this paper a more general approach based on entering dimensionless values of the thickness of the structure layers is used. This approach makes it possible to study the reflectionless transit effect irrelatively to some concrete

wave band. It is shown that the presence of a negative-permittivity layer in a three-layered structure leads to a considerable change in the reflection spectrum of electromagnetic waves. It has been found that in the reflection spectrum of the electromagnetic waves there are wide regions of a weak reflection. The width of these regions can be controlled efficiently by matching a value of the negative permittivity of the middle layer in the three-layered structure. The influence of the energy losses in the middle layer of the three-layered structure on the reflection spectrum of the electromagnetic waves is studied. The obtained results are of great practical importance for developing new devices of electronics, photonics, and photovoltaics.

**Key words:** reflectionless transit, three-layered structure, negative-permittivity medium.

М. М. Білецький, С. А. Борисенко

БЕЗВІДБИВНЕ ПРОХОДЖЕННЯ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ  
ПРИ НОРМАЛЬНОМУ ПАДІННІ  
НА СИМЕТРИЧНУ ТРИШАРОВУ СТРУКТУРУ,  
ЩО МІСТИТЬ ШАР З ВІД'ЄМНОЮ  
ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОНИКНІСТЮ

Ефект безвідбивного нормального проходження електромагнітних хвиль крізь симетричні тришарові структу-

ри, що містять шари з від'ємною діелектричною проникністю, викликає велику зацікавленість. Це зумовлено як незвичайним характером цього ефекту, так і його унікальними технічними застосуваннями. Разом з цим ефект безвідбивного проходження електромагнітних хвиль досліджений ще недостатньо добре і не всі його особливості знайдені та описані. До теперішнього часу ефект безвідбивного проходження розглянутий лише для деяких конкретних значень діелектричної проникності та товщини симетричної тришарової структури. У цій роботі використовується більш загальний підхід, що базується на введенні безрозмірних значень товщини шарів структури. Цей підхід дозволяє досліджувати ефект безвідбивного проходження електромагнітних хвиль безвідносно до якогось конкретного діапазону довжин хвиль. Показано, що наявність у тришаровій структурі шару з від'ємною діелектричною проникністю викликає істотну зміну спектру відображення електромагнітних хвиль. Знайдено, що в спектрі відображення електромагнітних хвиль існують широкі області слабого відображення. Шириною цих областей можна ефективно керувати, обираючи значення від'ємної діелектричної проникності середнього шару тришарової структури. Вивчено вплив втрати енергії в середньому шарі тришарової структури на спектр відображення електромагнітних хвиль. Отримані результати мають важливе прикладне значення для створення нових приладів електроніки, фотоніки та фотовольтаїки.

**Ключові слова:** шарувато-періодична структура, плазмоподібне середовище, поверхневі електромагнітні хвилі, резонансна взаємодія.