

**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

## ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ТРЕХСЛОЙНУЮ СТРУКТУРУ, СОДЕРЖАЩУЮ СЛОЙ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

**Предмет и цель работы.** Эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн через трехслойную структуру, содержащую слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, имеет важное значение как для исследования фундаментальных свойств твердых тел, так и для создания новых типов уникальных технических устройств. Целью работы является исследование эффекта прохождения электромагнитных волн через трехслойную структуру, содержащую слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью в широком диапазоне параметров трехслойной структуры.

**Методы и методология работы.** Использован новый подход, основанный на введении безразмерных толщин слоев трехслойной структуры. Он позволил исследовать эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн для различных длин волн и различных значений параметров трехслойной структуры, имеющей несимметричное диэлектрическое окружение.

**Результаты работы.** Показано, что наличие в трехслойной структуре слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью приводит к существенному смягчению ограничений на параметры слоев с положительной диэлектрической проницаемостью. Так, эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн будет иметь место при любом наперед заданном положительном значении величин диэлектрической проницаемости слоев, симметричным образом окружающих слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью. При этом параметры слоя с отрицательной проницаемостью должны быть выбраны соответствующим образом.

**Заключение.** Результаты исследования расширяют знания о механизмах туннелирования электромагнитных волн через трехслойные структуры, содержащие слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Они могут быть использованы для создания новых типов высокочастотных твердотельных устройств, работающих в различных диапазонах длин волн. Ил. 6. Библиогр.: 7 назв.

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

Эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн через трехслойные структуры, содержащие слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, представляет большой интерес как с научной, так и с практической точек зрения [1–5]. Этот эффект может быть использован для создания новых типов устройств микро- и нано-электроники.

Эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн рассматривался как при симметричном, так и несимметричном расположении слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью в трехслойной структуре. Было установлено, что этот эффект существует, если толщина слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью не превосходит некоторого критического значения.

В работах [1–3] эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн изу-

чался лишь при определенных длинах волн для некоторых фиксированных значений диэлектрических проницаемостей и толщин трехслойной структуры.

В работе [4] исследовано влияние толщин слоев с положительной диэлектрической проницаемостью на эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн через трехслойные структуры. При этом диэлектрические проницаемости слоев и длина волны считались фиксированными.

В работе [5] для исследования эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн были использованы безразмерная длина волны и безразмерные толщины трехслойной структуры. Такой подход позволил исследовать эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн безотносительно к какому-то конкретному диапазону длин волн.

Следует отметить, что проведенные в работе [5] исследования были выполнены при условии, что трехслойная диэлектрическая структура имела симметричное диэлектрическое окружение. Вместе с тем на практике трехслойная диэлектрическая структура располагается на подложке, которая имеет отличную от покрытия структуры диэлектрическую проницаемость. Таким образом, исследование эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн через трехслойные структуры с несимметричным диэлектрическим окружением является актуальной и важной задачей.

В настоящей работе приведены новые данные об особенностях эффекта безотражательного нормального прохождения электромагнитных волн через симметричные трехслойные структуры, содержащие слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Предполагалось, что трехслойная структура имеет несимметричное диэлектрическое окружение. Все результаты получены с использованием безразмерных длин волн и толщин трехслойной структуры.

Показано, что наличие в трехслойной структуре слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью приводит к существенному изменению условий возникновения эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн. Прежде всего, снимается ограничение на величину положительной диэлектрической проницаемости внешних слоев трехслойной структуры. Показано, что величину отрицательной диэлектрической проницаемости внутреннего слоя можно подобрать таким образом, что эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн будет наблюдаться при любом положительном значении диэлектрической проницаемости внешних слоев трехслойной структуры.

**1. Постановка задачи.** Пусть плоская симметричная трехслойная структура, изображенная на рис. 1, расположена на подложке с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_s$ . Покрытие трехслойной структуры имеет диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_c$ . Предполагается, что  $\varepsilon_c \neq \varepsilon_s$ . Внутренний слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2 < 0$  толщины  $d_2$  расположен

между двумя одинаковыми внешними слоями с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1 > 0$  и толщинами  $d_1$ .

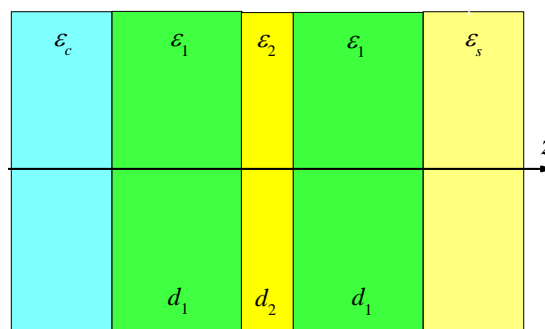


Рис. 1. Геометрия задачи

Плоская монохроматическая электромагнитная волна с частотой  $\omega$  падает по нормали к трехслойной структуре и распространяется в положительном направлении оси  $z$ . Зависимость электромагнитных полей от координаты  $z$  в каждом слое трехслойной структуры определяется волновым числом  $k_{zi} = k_0 \sqrt{\varepsilon_i}$ . Здесь  $k_0 = 2\pi / \lambda$ ,  $\lambda$  – длина электромагнитных волн в свободном пространстве. Индекс  $i=1$  для сред с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$  и  $i=2$  для среды с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2$ .

Пусть  $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$ ,  $n_2 = \sqrt{-\varepsilon_2}$ . Тогда  $k_{z1} = k_0 n_1$ ,  $k_{z2} = ik_0 n_2$ . Величина  $k_{z2}$  является чисто мнимой величиной, что соответствует экспоненциальному прохождению электромагнитной волны через слой с  $\varepsilon_2 < 0$ . Это обстоятельство, как будет показано ниже, при определенных условиях не является препятствием для безотражательного прохождения электромагнитных волн через слоистую симметричную структуру с несимметричным диэлектрическим окружением.

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

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

где

$$a_{\pm} = n_1(n_s \pm n_c) \left[ \frac{2n_1n_2 \cos 2\varphi_1 \cosh \varphi_2 +}{(n_2^2 - n_1^2) \sin 2\varphi_1 \sinh \varphi_2} \right]; \quad (2)$$

$$b_{\pm} = 2n_1n_2(n_1^2 \pm n_cn_s) \sin 2\varphi_1 \cosh \varphi_2 + \left[ \frac{(n_1^2 \pm n_cn_s)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\varphi_1 -}{(n_1^2 \mp n_cn_s)(n_1^2 + n_2^2)} \right] \sinh \varphi_2; \quad (3)$$

$$\varphi_1 = k_0n_1d_1, \quad \varphi_2 = k_0n_2d_2. \quad (4)$$

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

Будем использовать безразмерные толщины слоев рассматриваемой структуры  $x = n_1d_1/\lambda$  и  $y = n_2d_2/\lambda$ . Тогда  $\varphi_1 = 2\pi x$ ,  $\varphi_2 = 2\pi y$ .

Если слой с  $\varepsilon_2 < 0$  отсутствует ( $y = d_2 = 0$ ), то безотражательное прохождение электромагнитных волн через рассматриваемую структуру будет иметь место при одновременном выполнении двух условий [6, 7]:

$$n_1 = n_z = \sqrt{n_cn_s}; \quad (5)$$

$$2\varphi_1 = \frac{4\pi n_1d_1}{\lambda} = (2m-1)\frac{\pi}{2}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

Из последнего уравнения следует, что точкам безотражательного прохождения электромагнитных волн через рассматриваемую структуру соответствуют следующие значения  $x$ :

$$x = \frac{(2m-1)}{8}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

Отметим, что условия (5) и (6) соответствуют случаю, когда просветляющее покрытие (слой толщины  $2d_1$ ) способствует полному пропусканию электромагнитных волн из среды с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_c$  в среду с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_s$ .

На рис. 2 изображена зависимость  $R(x)$  в случае  $y = 0$  для  $n_c = 1,0$ ,  $n_s = 2,14$  (кварц),  $n_1 = n_z \approx 1,46$ . Из этого рисунка видно, что точки безотражательного прохождения электромагнитных волн  $p_m^0$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) расположены периодически на оси  $x$  на расстоянии 0,25 друг от друга.

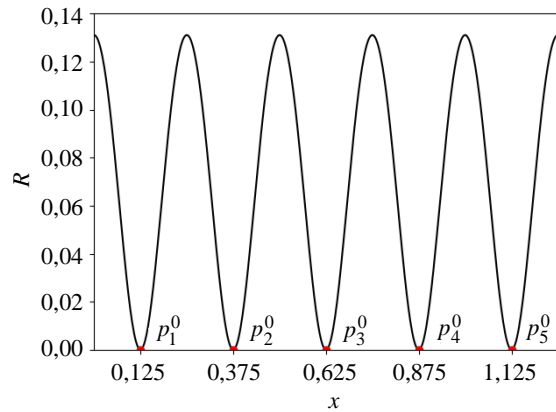


Рис. 2. График зависимости  $R(x)$  при  $y = 0$

**3. Влияние слоя с отрицательной проницаемостью на эффект безотражательного прохождения.** При наличии слоя с  $\varepsilon_2 < 0$  ( $y \neq 0$ ) эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн через рассматриваемую структуру будет иметь место как при  $n_1 > n_z$ , так и при  $n_1 < n_z$ . В обоих этих случаях точки безотражательного прохождения электромагнитных волн на зависимостях  $R(x)$  располагаются более редко, чем в отсутствие слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью, когда  $y = 0$ .

Отметим, что как для случая  $n_1 > n_z$ , так и для случая  $n_1 < n_z$  существует свое максимально возможное значение  $y_{\max}$ , при превышении которого эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн не проявляется.

На рис. 3 изображена зависимость  $R(x)$  в случае  $y = 0,1$  для  $n_c = 1,0$ ,  $n_s = 2,14$ , ( $n_z \approx 1,46$ ),  $n_2 = 4,0$ ,  $n_1 = 2,83$ . Из этого рисунка следует, что в рассматриваемом нами случае  $n_1 > n_z$  эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн существует. В точках безотражательного прохождения электромагнитных волн  $p_m$  ( $m = 1, 3, 5, \dots$ ) коэффициент отражения  $R$  равен нулю. Точки  $p_m$  располагаются вблизи нечетных точек  $p_m^0$ , соответствующих случаю  $y = 0$ . По этой причине для нумерации точек безотражательного прохождения в случае  $n_1 > n_z$  использованы нечетные числа.

Таким образом, в случае  $n_1 > n_z$  зависимость  $R(x)$  характеризуется наличием точек безотражательного прохождения, локализованных вблизи нечетных точек безотражательного прохождения электромагнитных волн через структуру с  $y = d_2 = 0$ .

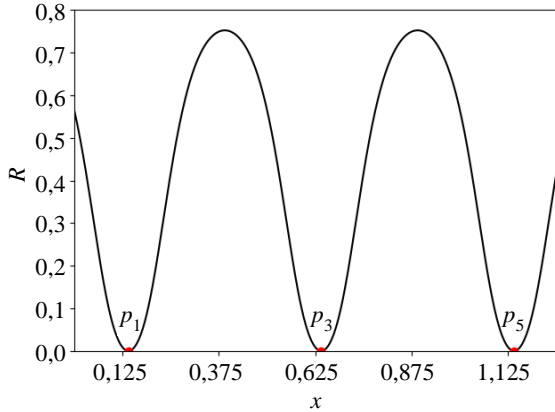


Рис. 3. График зависимости  $R(x)$  при  $y = 0,1$ ,  $n_c = 1,0$ ,  $n_s = 2,14$ ,  $n_1 = 2,83$ ,  $n_2 = 4,0$

На рис. 4 изображена зависимость  $R(x)$  в случае  $y = 0,04$  для  $n_c = 1,0$ ,  $n_s = 2,14$ ,  $n_1 = 0,77$ ,  $n_2 = 4,0$ . Для выбранных нами значений параметров  $n_1 < n_z$ . В этом случае, как видно из рис. 4, точки безотражательного прохождения электромагнитных волн  $p_m$  ( $m = 2, 4, 6, \dots$ ) локализованы вблизи нечетных точек  $p_m^0$ , соответствующих случаю  $y = 0$ .

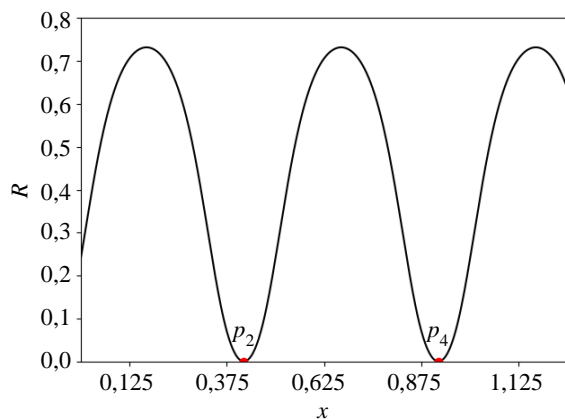


Рис. 4. График зависимости  $R(x)$  при  $y = 0,04$ ,  $n_c = 1,0$ ,  $n_s = 2,14$ ,  $n_1 = 0,77$ ,  $n_2 = 4,0$

Таким образом, наличие слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью в трехслойной структуре приводит к существ-

венному расширению диапазона значений  $n_1$ , в котором возможен эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн. В дальнейшем мы покажем, что для любого наперед заданного значения  $n_1$  эффект безотражательного прохождения будет иметь место при соответствующем выборе параметров слоя с отрицательной проницаемостью.

Рассмотрим теперь, как свойства слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью влияют на эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн через рассматриваемую нами структуру.

Из условий  $a_- = b_- = 0$  следуют два уравнения:

$$\text{cth}(2\pi y) = \frac{2n_1 n_2}{p_-^2} \text{ctg}(4\pi x); \quad (8)$$

$$\text{cth}(2\pi y) = \frac{2n_1 n_2 s_-^2 \sin(4\pi x)}{p_+^2 s_+^2 - p_-^2 s_-^2 \cos(4\pi x)}, \quad (9)$$

где  $p_{\pm}^2 = n_1^2 \pm n_2^2$ ,  $s_{\pm}^2 = n_1^2 \pm n_2^2$ .

Из выражений (8) и (9) находим следующее уравнение:

$$\cos(4\pi x) = \frac{p_-^2 s_-^2}{p_+^2 s_+^2}. \quad (10)$$

Это уравнение при заданном значении  $n_2$  определяет соотношение между  $x$  и  $n_1$ , при котором наблюдается эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн.

Используя уравнение (10), из уравнения (8) находим

$$\text{cth}(2\pi y) = \pm \frac{2n_1 n_2 s_-^2}{\sqrt{p_+^4 s_+^4 - p_-^4 s_-^4}}. \quad (11)$$

При заданном значении  $n_2$  уравнение (11) определяет связь между  $y$  и  $n_1$ . Так как правая часть уравнения (11) должна быть положительна, то знак перед правой частью уравнения (11) должен совпадать со знаком  $s_-^2$ .

Для определения максимальных значений  $y_{\max}^{\pm}$ , при которых исчезает эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн, представим уравнение (11) в следующем виде:

$$\text{cth}(2\pi y) = \pm \frac{n_2 s_-^2}{\sqrt{(n_2^2 + n_z^2)(n_1^4 + n_2^2 n_z^2)}}. \quad (12)$$

Если  $s_-^2 > 0$ , то делая в уравнении (12) предельный переход  $n_1 \rightarrow \infty$ , находим следующее уравнение:

$$\text{cth}(2\pi y_{\max}^+) = \frac{n_2}{\sqrt{n_2^2 + n_z^2}}. \quad (13)$$

В случае, когда  $s_-^2 < 0$ , максимальное значение  $y_{\max}^-$  находим, устремляя в уравнении (12)  $n_1$  к нулю. В результате находим следующее уравнение:

$$\text{cth}(2\pi y_{\max}^-) = \frac{n_z}{\sqrt{n_2^2 + n_z^2}}. \quad (14)$$

В рассматриваемом нами случае  $n_c = 1,0$ ,  $n_s = 2,14$ ,  $n_2 = 4,0$  из уравнений (13) и (14) находим, что  $y_{\max}^+ \approx 0,276$  и  $y_{\max}^- \approx 0,057$ .

Исследуем теперь зависимость условий безотражательного прохождения электромагнитных волн от величины  $y$ . На рис. 5 изображены зависимости  $n_1(y)$  и  $x(y)$ , которые соответствуют наличию эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн через рассматриваемую структуру.

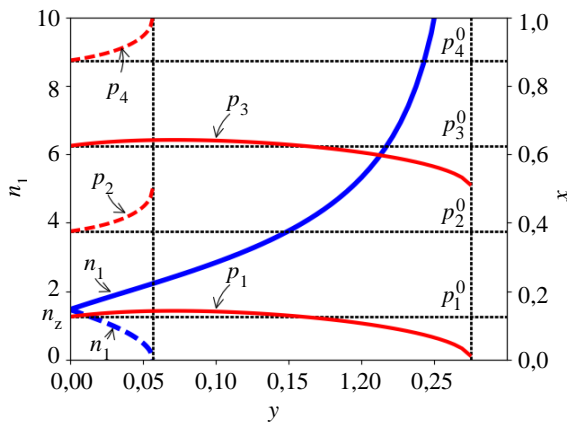


Рис. 5. Графики зависимостей  $n_1(y)$  (левая ось ординат) и  $x(y)$  (правая ось ординат) при  $n_c = 1,0$ ,  $n_s = 2,14$  и  $n_2 = 4,0$

Параметры структуры приведены в подписи к рис. 5. Сплошные линии на этом рисунке относятся к случаю  $s_-^2 > 0$ , а штриховые линии – к случаю  $s_-^2 < 0$ . Первая вертикальная штриховая асимптота на рис. 5 соответствует условию  $y = y_{\max}^-$ , а вторая вертикальная асимптота – условию  $y = y_{\max}^+$ . Горизонталь-

ные штриховые линии соответствуют  $x$ -координатам точек  $p_m^0$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ).

В случае  $s_-^2 > 0$  сплошная кривая  $n_1(y)$  монотонно возрастает с ростом  $y$ . Она начинается в точке  $n_1 = n_z$  и с ростом  $y$  асимптотически приближается к асимптоте  $y = y_{\max}^+$ . Сплошные кривые  $x(y)$ , которые определяют координаты точек  $p_1$  и  $p_3$  на зависимостях  $R(x)$ , сначала возрастают, а потом монотонно убывают с увеличением  $y$ .

Другая картина наблюдается в случае  $s_-^2 < 0$ . Зависимость  $n_1(y)$  (штриховая линия) представляет собой монотонно убывающую функцию. Она начинается в точке  $n_1 = n_z$  и при  $y \rightarrow y_{\max}^-$  заканчивается на линии  $n_1 = 0$ . Штриховые кривые  $x(y)$ , определяющие координаты точек  $p_2$  и  $p_4$  на зависимостях  $R(x)$ , монотонно возрастают с увеличением  $y$ .

Таким образом, в некотором интервале значений  $y$  эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн наблюдается как при  $n_1 > n_z$ , так и при  $n_1 < n_z$ . Этому случаю, для выбранного нами значения  $n_2 = 4,0$ , соответствует интервал  $0 < y < y_{\max}^-$ . В интервале  $y_{\max}^- < y < y_{\max}^+$  эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн наблюдается только при условии  $n_1 > n_z$ .

Отметим, что выражения для  $n_1(y)$  и  $x(y)$ , соответствующие эффекту безотражательного прохождения электромагнитных волн, существенным образом зависят от величины  $n_2$ . Этот вывод проиллюстрирован на рис. 6, на котором изображены графики зависимостей  $n_1(y)$  и  $x(y)$  при  $n_c = 1,0$ ,  $n_s = 2,14$  и  $n_2 = 0,5$ . Для этого значения  $n_2$  из уравнений (13) и (14) находим  $y_{\max}^+ \approx 0,053$  и  $y_{\max}^- \approx 0,285$ . Этим двум асимптотическим значениям отвечают две вертикальные штриховые линии на рис. 6. В отличие от предыдущего случая, теперь уже выполняется условие  $y_{\max}^+ < y_{\max}^-$ . При этом, как видно из рис. 6, эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн наблюдается для произвольных значе-

ний  $n_1$  лишь в области  $y < y_{\max}^+$ . В интервале  $y_{\max}^+ < y < y_{\max}^-$  эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн может наблюдаться лишь для  $n_1 < n_z$ .

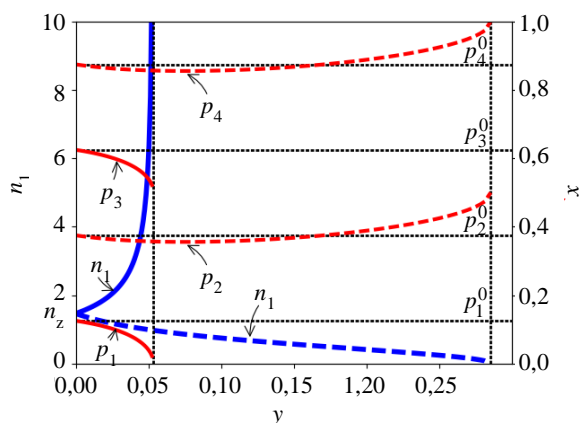


Рис. 6. Графики зависимостей  $n_1(y)$  (левая ось ординат) и  $x(y)$  (правая ось ординат) при  $n_c = 1,0$ ,  $n_s = 2,14$  и  $n_2 = 0,5$

Из уравнений (13) и (14) следует, что при  $n_2 = n_z$  выполняется условие  $y_{\max}^+ = y_{\max}^-$ . Это означает, что эффект безотражательного прохождения может проявляться при любых значениях  $n_1$  в одном и том же диапазоне значений  $y < y_{\max}^+ = y_{\max}^-$ . Для используемых нами параметров структуры ( $n_c = 1,0$ ,  $n_s = 2,14$ ,  $n_z \approx 1,46$ )  $y_{\max}^+ = y_{\max}^- = 0,14$ , если  $n_2 = n_z$ .

**Выводы.** Размещение слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2 < 0$  в центре слоя с положительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1 > 0$  (базового слоя) дает возможность сделать условия безотражательного прохождения электромагнитных волн через такого рода трехслойную структуру менее жесткими. Для этого необходимо, чтобы трехслойная структура имела несимметричное диэлектрическое окружение.

Параметры слоя с  $\varepsilon_2 < 0$  могут быть выбраны таким образом, что эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн будет наблюдаться при произвольных значениях показателя преломления базового слоя  $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$ . Установлено, что существует верхняя граница  $y_{\max}$  для безразмерной

толщины слоя с  $\varepsilon_2 < 0$ . При  $y > y_{\max}$  эффект безотражательного прохождения электромагнитных волн наблюдаться не будет. Существенно, что величина  $y_{\max}$  является различной для случаев  $n_1 > n_z$  и  $n_1 < n_z$ . Величина  $y_{\max}$  является одинаковой для этих случаев лишь при  $n_2 = \sqrt{|\varepsilon_2|} = n_z$ .

Отмеченные особенности эффекта безотражательного прохождения электромагнитных волн через рассмотренные трехслойные структуры с несимметричным диэлектрическим окружением могут быть использованы для создания новых типов твердотельных устройств, работающих в различных диапазонах длин волн.

#### Библиографический 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. DOI:10.1103/PhysRevLett.94.243905
2. Cojcaru E. Electromagnetic tunneling in lossless tri-layer stacks containing single-negative metamaterials. *Prog. Electromagn. Res. (PIER)*. 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, N 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, N 18. P. 1613–1621. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i18.30
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., Gvozdev N. I. 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, 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. DOI:10.1103/PhysRevLett.94.243905
2. Cojcaru, E., 2011. Electromagnetic tunneling in lossless trilayer stacks containing single-negative metamaterials. *Prog. Electromagn. Res. (PIER)*, **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., 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*, **74**(13), pp. 1175–1191. DOI:10.1615/TelecomRadEng.v74.i13.50
  7. Beletskii, N. N., Borysenko, S. A., Gvozdev, N. I., 2016. On The Spectrum Of Electromagnetic Waves In The One-Dimensional Defective Photon Crystal Bordering On Conducting Medium. *Telecommunications and Radio Engineering*, **75**(16), pp. 1457–1465. DOI:10.1615/TelecomRadEng.v75.i16.40

*Рукопись поступила 20.03.2018.*

N. N. Beletskii, S. A. Borysenko

## TUNNELING OF ELECTROMAGNETIC WAVES THROUGH THE THREE-LAYERED STRUCTURE CONTAINING A NEGATIVE-PERMITTIVITY LAYER

**Subject and purpose.** The effect of reflectionless transmission (tunneling) of electromagnetic waves through the three-layer structure containing a negative-permittivity layer is of great importance both for studying the fundamental properties of solids and for developing new types of unique technical devices. There is a need for investigation of the effect of reflectionless transmission of electromagnetic waves through the three-layer structure containing a negative-permittivity layer in a wide range of the three-layer structure parameters.

**Methods and methodology.** A new approach based on the use of dimensionless thicknesses of a three-layer structure is presented. This approach makes it possible to study the effect of reflectionless transmission of electromagnetic waves for different wavelengths and different values of parameters of the three-layer structure with asymmetric dielectric surroundings.

**Results.** It is shown that the presence of a negative-permittivity layer in the three-layer structure leads to a

significant softening of limitations on the parameters of the positive-permittivity layers. Thus, the effect of reflectionless transmission of electromagnetic waves takes place at any preassigned positive value of the permittivity of the layers surrounding symmetrically the negative-permittivity layer. In this case, the parameters of the negative-permittivity layer should be chosen as required.

**Conclusions.** The results of the research extend knowledge on the mechanisms of electromagnetic waves tunneling through the three-layer structures containing negative-permittivity layers. This effect can be used for development of new types of high-frequency solid-state devices operating in different wavelength ranges.

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

М. М. Білецький, С. А. Борисенко

## ТУНЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ТРИШАРОВУ СТРУКТУРУ, ЯКА МІСТИТЬ ШАР З НЕГАТИВНОЮ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОНИКНІСТЮ

**Предмет і мета роботи.** Ефект безвідбивного проходження електромагнітних хвиль через тришарову структуру, що містить шар з негативною діелектричною проникністю, має важливе значення як для дослідження фундаментальних властивостей твердих тіл, так і для створення нових типів унікальних технічних пристроїв. Метою роботи є дослідження ефекту проходження електромагнітних хвиль через тришарову структуру, що містить шар з негативною діелектричною проникністю в широкому діапазоні параметрів тришарової структури.

**Методи і методологія роботи.** Використано новий підхід, заснований на введенні безрозмірних товщин шарів тришарової структури. Він дозволив дослідити ефект безвідбивного проходження електромагнітних хвиль для різних довжин хвиль і різних значень параметрів тришарової структури, яка має несиметричне діелектричне оточення.

**Результати роботи.** Показано, що наявність у тришаровій структурі шару з негативною діелектричною проникністю приводить до суттєвого пом'якшення обмежень на параметри шарів з позитивною діелектричною проникністю. Так, ефект безвідбивного проходження електромагнітних хвиль матиме місце при будь-якому наперед заданому позитивному значенні величин діелектричної проникності шарів, що симетрично оточують шар з негативною діелектричною проникністю. При цьому параметри шару з негативною проникністю мають обиратися відповідним чином.

**Висновок.** Результати дослідження розширюють знання про механізми тунелювання електромагнітних хвиль через тришарову структуру, що містить шар з негативною діелектричною проникністю. Вони можуть бути застосовані для створення нових типів високочастотних твердотільних пристроїв, що працюють у різних діапазонах довжин хвиль.

**Ключові слова:** тунелювання, безвідбивне проходження, тришарова структура, середовище з негативною діелектричною проникністю.