

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

Влияние частотной дисперсии слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью на туннелирование электромагнитных волн через трехслойную структуру

***Предмет и цель работы.** Эффект полного туннелирования электромагнитных волн через трехслойную структуру, содержащую плазмopodobный слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, имеет важное значение как для исследования высокочастотных свойств слоистых твердых тел, так и для создания новых типов высокочастотных радиофизических устройств. Целью работы является исследование влияния частотной дисперсии слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью на туннелирование электромагнитных волн через трехслойную структуру с несимметричным диэлектрическим окружением.*

***Методы и методология работы.** Использован новый универсальный подход, основанный на введении безразмерных частот и толщин слоев трехслойной структуры. Он позволил исследовать частотно-зависимые условия возникновения эффекта полного туннелирования электромагнитных волн в различных частотных диапазонах при различных значениях параметров трехслойной структуры.*

***Результаты работы.** Показано, что благодаря учету частотной дисперсии слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью, полное туннелирование электромагнитных волн становится возможным на различных частотах при соответствующем выборе параметров трехслойной структуры. Предсказан эффект двухчастотного полного туннелирования электромагнитных волн в различных частотных интервалах.*

***Заключение.** Наличие частотной дисперсии слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью приводит к существенному смягчению и изменению условий полного туннелирования электромагнитных волн через трехслойную структуру. При этом возникают уникальные явления, которые могут быть использованы для создания принципиально новых высокочастотных устройств оптики, радиофизики и электроники. Ил. 5. Библиогр.: 7 назв.*

Ключевые слова: полное туннелирование, частотная дисперсия, трехслойная структура, отрицательная диэлектрическая проницаемость.

Полное туннелирование электромагнитных волн через трехслойные структуры, содержащие слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, в последнее время привлекает к себе большое внимание [1–7]. Интерес к этому явлению связан с возможностью его использования для создания принципиально новых высокочастотных твердотельных устройств.

В работах [1–4] эффект полного туннелирования электромагнитных волн изучался при фиксированных значениях частоты, диэлектри-

ческой проницаемости и толщины трехслойной структуры.

В работах [5, 6] для исследования эффекта полного туннелирования электромагнитных волн был использован универсальный подход, основанный на использовании безразмерных длин волн и толщин трехслойной структуры. Это позволило исследовать эффект полного туннелирования электромагнитных волн независимо к каким-то конкретным значениям параметров трехслойной структуры.

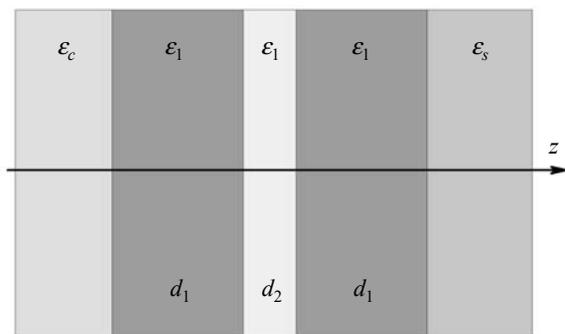


Рис. 1. Геометрия задачи

Отметим, что в работе [5] рассматривалось симметричное диэлектрическое окружение трехслойной структуры, а в работе [6] диэлектрическое окружение трехслойной структуры считалось несимметричным. В работе [6] не учитывалась частотная дисперсия слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью, хотя величина отрицательной диэлектрической проницаемости плазмоподобного слоя существенно зависит от частоты электромагнитных волн. Она может изменяться по абсолютной величине в широком интервале значений. На частотах, существенно отличающихся от плазменной частоты электронов, абсолютное значение диэлектрической проницаемости плазмоподобного слоя может быть намного больше величины проницаемости граничащих с ним диэлектрических слоев. Однако, по мере приближения частоты электромагнитной волны к плазменной частоте электронов, абсолютное значение диэлектрической проницаемости плазмоподобного слоя становится меньше, чем величины диэлектрической проницаемости окружающих его диэлектрических слоев. Таким образом, на разных частотах имеют место различные соотношения между абсолютным значением диэлектрической проницаемости плазмоподобного слоя и проницаемостью граничащих с ним диэлектрических слоев. Это обстоятельство существенно влияет на эффект полного туннелирования электромагнитных волн на различных частотах.

В настоящей работе исследовано влияние частотной дисперсии слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью на туннелирование электромагнитных волн через трехслойную структуру с несимметричным диэлектрическим окружением. Все результаты получены

с использованием безразмерных частот и толщин трехслойной структуры.

Изучено влияние параметров трехслойной структуры на частотно-зависимые условия возникновения эффекта полного туннелирования электромагнитных волн.

Показано, что благодаря учету частотной дисперсии слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью, полное туннелирование электромагнитных волн становится возможным на различных частотах при соответствующем выборе параметров трехслойной структуры. Предсказан эффект двухчастотного полного туннелирования электромагнитных волн в различных частотных интервалах.

1. Постановка задачи. Геометрия рассматриваемой задачи приведена в [6]. В настоящей работе мы приводим рисунок этой геометрии еще раз для удобства читателей.

Предполагается, что плоская симметричная трехслойная структура расположена на подложке с диэлектрической проницаемостью ϵ_s и имеет диэлектрическое покрытие с проницаемостью ϵ_c (рис. 1). Считаем, что $\epsilon_c \neq \epsilon_s$. Слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_2 < 0$ толщиной d_2 расположен в центре структуры между двумя одинаковыми слоями с диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1 > 0$ и толщинами d_1 (рис. 1). Предполагаем, что плоская монохроматическая электромагнитная волна с частотой ω падает по нормали к трехслойной структуре.

Будем считать, что слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью имеет электронный тип проводимости и выражение для ϵ_2 имеет следующий вид:

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

где ω_p – электронная плазменная частота.

Введем следующие величины: $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$, $n_2 = \sqrt{-\epsilon_2}$. Если слой с $\epsilon_2 < 0$ отсутствует ($d_2 = 0$), то полное туннелирование электромагнитных волн через однослойную структуру толщиной $2n_1d_1$ с показателем преломления n_1 будет происходить при одновременном выполнении двух условий [6]:

$$n_1 = n_2; \tag{2}$$

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

Здесь $n_z = \sqrt{n_c n_s}$, λ – длина электромагнитной волны в свободном пространстве.

Наличие в трехслойной структуре слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью приводит к существенному изменению условий полного туннелирования электромагнитных волн.

Так, например, величина n_1 для полного туннелирования электромагнитных волн может быть как больше, так и меньше, чем n_z [6]. Кроме того, отрицательная диэлектрическая проницаемость дополнительного среднего слоя зависит от частоты. В результате процесс туннелирования электромагнитных волн через рассматриваемую структуру будет иметь различный характер в различных частотных диапазонах длин волн.

2. Условия полного туннелирования электромагнитных волн через трехслойную структуру. Коэффициент отражения электромагнитных волн R от исследуемой структуры приведен в работе [6, 7]. Из условия $R = 0$ следует, что полное туннелирование электромагнитных волн через трехслойную структуру будет иметь место, если одновременно будут выполнены два условия:

$$\cos(2\delta_1 n_1 \xi) = \frac{p_-^2 s_-^2}{p_+^2 s_+^2}; \quad (4)$$

$$\text{th}(\delta_2 n_2 \xi) = \frac{2n_1 n_2}{p_-^2} \text{ctg}(2\delta_1 n_1 \xi). \quad (5)$$

Здесь $\xi = \omega / \omega_p$, $\delta_{1,2} = \omega_p d_{1,2} / c$, $p_{\pm}^2 = n_1^2 \pm n_2^2$, $s_{\pm}^2 = n_1^2 \pm n_2^2$; c – скорость света в вакууме.

Систему уравнений (4), (5) будем численно анализировать, считая, что величины ε_s и ε_c являются фиксированными. Считаем, что $n_c = 1,0$ и $n_s = 2,14$ (слой кварца). Тогда $n_z \approx 1,46$. Предполагаем, что $n_1 = n_z + \Delta n_1$. Величина Δn_1 характеризует степень отличия n_1 от n_z . В дальнейшем ограничимся случаем $\Delta n_1 > 0$.

Для заданных значений величин ε_s , ε_c и ε_1 система уравнений (4), (5), определяющая условия полного туннелирования электромагнитных волн через рассматриваемую структуру, содержит три независимых параметра: безразмерную частоту ξ , безразмерные толщины слоев δ_1 и δ_2 . Определим безразмерную час-

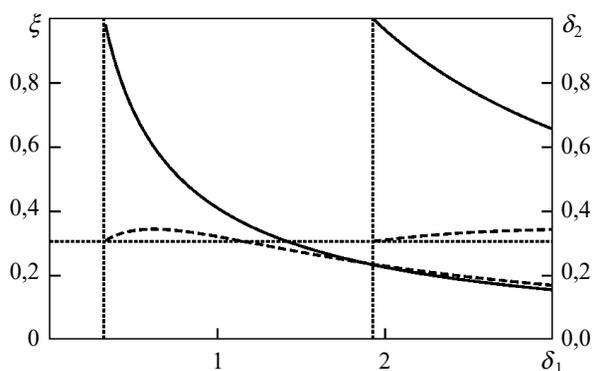


Рис. 2. Графики зависимостей $\xi(\delta_1)$ (левая ось ординат, сплошные линии) и $\delta_2(\delta_1)$ (правая ось ординат, штриховые линии) при $\Delta n_1 = 0,5$

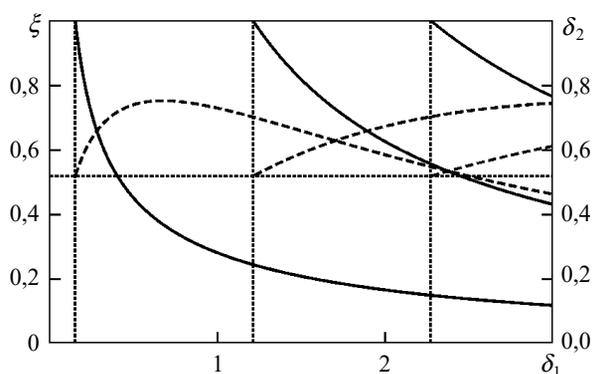


Рис. 3. Графики зависимостей $\xi(\delta_1)$ (левая ось ординат, сплошные линии) и $\delta_2(\delta_1)$ (правая ось ординат, штриховые линии) при $\Delta n_1 = 1,5$

тоту ξ и безразмерную толщину δ_2 как функцию безразмерной толщины δ_1 . При этом будем строить зависимости $\xi(\delta_1)$ и $\delta_2(\delta_1)$ для двух значений Δn_1 : $\Delta n_1 = 0,5$ и $\Delta n_1 = 1,5$. Эти зависимости изображены на рис. 2 и 3. По левой оси ординат сплошными линиями изображена зависимость $\xi(\delta_1)$, а по правой оси ординат штриховыми линиями изображена зависимость $\delta_2(\delta_1)$.

На рис. 2, 3 показано несколько ветвей зависимости $\xi(\delta_1)$. Каждая из них начинается на линии $\xi = 1$ ($n_2 = 0$) в критических точках, в которых δ_1 -координаты удовлетворяют уравнению

$$\cos(2\delta_1 n_1) = \frac{s_-^2}{s_+^2}. \quad (6)$$

Положение вертикальных штриховых прямых на рис. 2, 3 соответствует критическим точкам, определяемым из уравнения (6). Первая критическая точка определяет минималь-

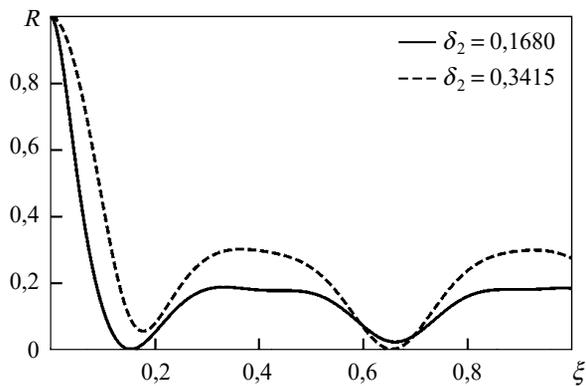


Рис. 4. График зависимости $R(\xi)$ при $\delta_1 = 3, 0$, $\Delta n_1 = 0, 5$

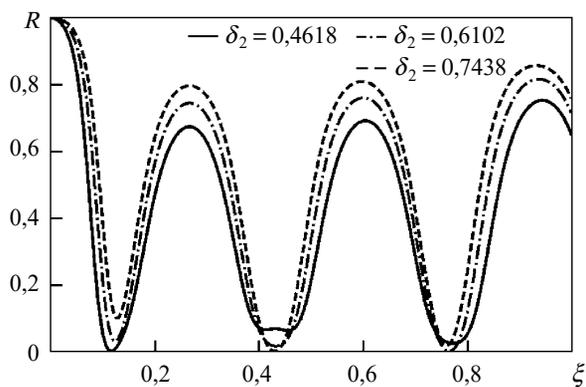


Рис. 5. График зависимости $R(\xi)$ при $\delta_1 = 3, 0$, $\Delta n_1 = 1, 5$

но возможное значение δ_1 , при котором наблюдается полное туннелирование электромагнитных волн. Из рис. 2, 3 видно, что все критические точки смещаются в сторону меньших значений δ_1 при увеличении Δn_1 . При этом расстояние между критическими точками уменьшается.

Первая, наиболее низкочастотная ветвь зависимости $\xi(\delta_1)$ характеризуется наименьшим значением δ_1 , необходимым для возникновения полного туннелирования электромагнитных волн. С увеличением δ_1 число ветвей зависимости $\xi(\delta_1)$ возрастает. Всякий раз, когда δ_1 превышает критическое значение, определяемое уравнением (6), число ветвей увеличивается на единицу. Каждая последующая ветвь зависимости $\xi(\delta_1)$ является более высокочастотной, чем предыдущая.

Существенно, что для полного туннелирования электромагнитных волн через рассматриваемую структуру при заданном значении δ_1 необходимо, чтобы не только частота, но и толщина δ_2 имели определенное значение.

Из рис. 2, 3 видно, что ветви зависимости $\delta_2(\delta_1)$ начинаются в критических точках δ_1 при одном и том же критическом значении δ_2 , величина которого определяется из следующего уравнения:

$$\delta_2 = \frac{2}{n_1} \text{ctg}(2\delta_1 n_1). \quad (7)$$

Это критическое значение δ_2 зависит только от величины Δn_1 . С увеличением Δn_1 число ветвей зависимости $\delta_2(\delta_1)$ в исследуемом нами интервале значений δ_1 возрастает. При этом первая ветвь зависимости $\delta_2(\delta_1)$ является немонотонной: величина δ_2 сначала возрастает, а затем уменьшается с ростом δ_1 .

Таким образом, в зависимости от величины δ_1 , полное туннелирование электромагнитных волн через рассматриваемую структуру может происходить как на одной, так и на нескольких частотах. Величины этих частот зависят от степени отличия n_1 от n_2 : чем больше это отличие, тем при более низких частотах наблюдается полное туннелирование электромагнитных волн. Однако при заданном значении δ_1 полное туннелирование электромагнитных волн на разных частотах будет происходить при различных значениях δ_2 .

Следует отметить, что существуют такие значения δ_1 и Δn_1 , при которых при одном и том же значении δ_2 полное туннелирование электромагнитных волн может происходить на двух частотах. На рис. 3 видно, что при $\Delta n_1 = 1, 5$ ветви $\delta_2(\delta_1)$ могут пересекаться. Точкам пересечения двух ветвей $\delta_2(\delta_1)$ соответствует двухчастотное полное туннелирование электромагнитных волн через рассматриваемую структуру. Отметим, что различие между этими двумя частотами увеличивается с ростом δ_1 .

3. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитных волн. Представим теперь частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитных волн при выполнении условий полного их туннелирования через рассматриваемую трехслойную структуру. Пусть параметры этой структуры таковы, что $\delta_1 = 3, 0$, а $\Delta n_1 = 0, 5$. Тогда из рис. 2 следует, что полное туннелирование электромагнитных волн происходит для двух различных значений δ_2 . При этом нулевым значениям коэффициен-

та отражения соответствуют различные значения безразмерной частоты ξ . График зависимости $R(\xi)$ для двух значений δ_2 , соответствующих полному туннелированию электромагнитных волн через рассматриваемую структуру, изображен на рис. 4. Конкретные значения δ_2 указаны там же.

С увеличением Δn_1 число значений величины δ_2 , при которых будет наблюдаться полное туннелирование электромагнитных волн, возрастает. Так, например, при $\delta_1 = 3,0$ и $\Delta n_1 = 3,0$ полное туннелирование электромагнитных волн возникает при трех различных значениях величины δ_2 . Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитных волн $R(\xi)$ для этих трех значений величины δ_2 изображены на рис. 5. Из рисунка следует, что для каждого из приведенных значений величины δ_2 величина R имеет нулевое значение при определенном значении частоты ξ . Таким образом, при $\Delta n_1 > 0$ существует как минимум одна пара значений (δ_2, ξ) , при которой имеется полное туннелирование электромагнитных волн через рассматриваемую структуру. Чем больше величина Δn_1 , тем больше имеется та-

ких пар, удовлетворяющих условию полного туннелирования электромагнитных волн.

Выводы. Наличие частотной дисперсии слоя с отрицательной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 < 0$ приводит к смягчению условий полного туннелирования электромагнитных волн через трехслойную структуру.

Установлено, что при $n_1 > n_2$ полное туннелирование электромагнитных волн может осуществляться на различных частотах электромагнитных волн при соответствующем выборе безразмерных толщин трехслойной структуры δ_1 и δ_2 . Число таких частот возрастает с увеличением различия между n_1 и n_2 .

Показано, что параметры трехслойной структуры могут быть выбраны таким образом, что полное туннельное прохождение электромагнитных волн будет иметь место одновременно на двух частотах. Величины этих частот можно изменять выбором соответствующих параметров структуры.

Полученные результаты открывают новые возможности для создания принципиально новых высокочастотных устройств оптики, радиофизики и электроники.

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(4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.243905.
2. Cojcaru E. Electromagnetic tunneling in lossless trilayer 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, 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. Белецкий Н.Н., Борисенко С.А. Туннелирование электромагнитных волн через трехслойную структуру, содержащую слой с отрицательной диэлектрической проницаемостью. *Радиофизика и электроника*. 2018. Т. 23, № 2. С. 54–60.
7. Шварцбург А.Б. Туннелирование электромагнитных волн – парадоксы и перспективы. *Успехи физ. наук*. 2007. Т. 177, № 1. С. 43–58. DOI: 10.3367/UFNr.0177.200701b.0043.

Стаття надійшла 12.09.2019

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. (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., 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. Shvartsburg, A., 2007. Tunneling of electromagnetic waves: paradoxes and prospects. *Phys. Usp.*, **50**(1), pp. 37–52. DOI: 10.1070/PU2007v050n01ABEH006148.

Received 12.09.2019

N.N. Beletskii, S.A. Borysenko

O.Ya. Usikov IRE of NASU
12, Acad. Proskury St., Kharkov, 61085, Ukraine

INFLUENCE OF FREQUENCY DISPERSION OF A NEGATIVE-PERMITTIVITY LAYER ON ELECTROMAGNETIC WAVE TUNNELING THROUGH A THREE-LAYER STRUCTURE

Subject and purpose. The effect of total electromagnetic wave tunneling through a three-layer structure containing a plasma-like negative-permittivity layer is important for both gaining a better insight into the high-frequency properties of layered solids and, hence, creating new types of high-frequency radio-physical devices. The main purpose is to study the influence the frequency dispersion of the negative-permittivity layer exerts on the electromagnetic wave tunneling through a three-layer structure with an asymmetric dielectric medium.

Methods and methodology. A new universal approach is used, based on introducing dimensionless frequencies and dimensionless layer thicknesses of a three-layer structure. It allows the frequency-dependent conditions of the effect of total electromagnetic wave tunneling to be examined for different frequency ranges and various three-layer structure parameters.

Results. It has been shown that taking into account the frequency dispersion of the negative-permittivity layer makes it possible to observe the total tunneling of electromagnetic waves at different frequencies with an appropriate choice of the three-layer structure parameters. In various frequency ranges, the effect of two-frequency total tunneling of electromagnetic waves has been predicted.

Conclusion. In the presence of a frequency dispersion of a negative-permittivity layer as part of a three-layer structure, the total electromagnetic wave tunneling conditions of this structure are softened and modified significantly. In this case, unique phenomena arise that can be used to create fundamentally new high-frequency devices in optics, radiophysics, and electronics.

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

М.М. Білецький, С.А. Борисенко

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

ВПЛИВ ЧАСТОТНОЇ ДИСПЕРСІЇ ШАРУ З НЕГАТИВНОЮ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОНИКНІСТЮ НА ТУНЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ТРИШАРОВУ СТРУКТУРУ

Предмет і мета роботи. Ефект повного тунелювання електромагнітних хвиль через тришарову структуру, яка містить плазмоподібний шар з негативною діелектричною проникністю, має важливе значення як для дослідження високочастотних властивостей шаруватих твердих тіл, так і для створення нових типів високочастотних радіофізичних пристроїв. Метою роботи є дослідження впливу частотної дисперсії шару з негативною діелектричною проникністю на тунелювання електромагнітних хвиль через тришарову структуру з несиметричним діелектричним оточенням.

Методи і методологія роботи. Використано новий універсальний підхід, заснований на введенні безрозмірних частот і товщин шарів тришарової структури. Він дозволив дослідити частотно-залежні умови виникнення ефекту повного тунелювання електромагнітних хвиль у різних частотних діапазонах при різних значеннях параметрів тришарової структури.

Результати роботи. Показано, що завдяки врахуванню частотної дисперсії шару з негативною діелектричною проникністю повне тунелювання електромагнітних хвиль стає можливим на різних частотах за умови відповідного вибору параметрів тришарової структури. Передбачено ефект двочастотного повного тунелювання електромагнітних хвиль у різних частотних інтервалах.

Висновок. Наявність частотної дисперсії шару з негативною діелектричною проникністю призводить до істотного пом'якшення і зміни умов повного тунелювання електромагнітних хвиль через тришарову структуру. За таких умов виникають унікальні явища, які можуть бути використані для створення принципово нових високочастотних пристроїв оптики, радіофізики і електроніки.

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