

## МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЕ ПРОВОЛОЧНЫЕ СРЕДЫ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

### Введение

В девяностые годы XX века произошли значительные изменения в концепции создания компонентов для сверхвысокочастотных и оптических приборов и систем, в частности, оптических компьютеров [1]. В основном это обусловлено формированием схем таких устройств с применением перспективных искусственных материалов с кардинально новыми (и заранее прогнозируемыми) электромагнитными свойствами, которые известны под названием метаматериалы [2]. В настоящее время метаматериалы широко применяются для различных приложений микроволнового диапазона, а также в терагерцовом и оптическом диапазонах [3, 4]. С точки зрения структуры, метаматериал представляет собой упорядоченный композит. Одной из наиболее распространенных разновидностей таких материалов является искусственный диэлектрик, представляющий собой композит диэлектрик-металл или диэлектрик-диэлектрик, т.е. некую диэлектрическую среду (матрицу) с периодически распределенными в ней включениями (металл или диэлектрик) различной формы.

Основы теории искусственных диэлектриков в СВЧ диапазоне были заложены еще в 50-е годы прошлого века [5, 6]. В частности, Хижняк Н.А. разработал модель искусственного диэлектрика, образованного регулярной решеткой рассеивающих металлических элементов при условии  $d \ll \lambda$  ( $d$  – постоянная решетки) [5]. В электродинамическом отношении такой искусственный диэлектрик эквивалентен однородной среде с эффективными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей. Позднее Дж. Пендри предложил теоретическую модель двумерной проволочной среды как одной из разновидностей искусственного диэлектрика [7]. Структура представляла собой массив тонких идеально проводящих металлических проволочек. Такая система характеризуется отрицательной эффективной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{eff}$  на частотах СВЧ диапазона. Было показано, что, в случае параллельной поляризации излучения (вектор электрической напряженности параллелен осям проволочек), выражение для плазменной частоты структуры выглядит следующим образом:

$$(2\pi f_p)^2 = \omega_p^2 = \frac{2\pi c^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right)}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $a$  – период структуры,  $r$  – радиус проволочки.

В соответствии с известным законом Друде эффективную диэлектрическую проницаемость проволочной среды  $\varepsilon_{eff}$  можно записать в виде

$$\varepsilon_{eff} = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}, \quad (2)$$

где  $f_p$  – плазменная частота;  $f$  – частота падающего излучения.

Из (2) видно, что для волн с частотой ниже плазменной частоты  $f_p$  эффективная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_{eff}$  принимает отрицательные значения. Волновое число становится мнимым и электромагнитная волна не может распространяться в структуре. Если же частота падающей электромагнитной волны больше плазменной, то  $\varepsilon_{eff}$  положительна и падающая электромагнитная волна проходит сквозь структуру.

Очевидно, что расположение и геометрические размеры металлических включений, размещенных в диэлектрической матрице, определяют физические свойства искусственной среды, выполненной на основе двумерной проволочной решетки. Кроме того, изменение эффективного показателя преломления такой среды зависит от ориентации и поляризации распространяющейся в ней волны. Это позволяет разрабатывать наноструктурированные метаматериалы с уникальными электродинамическими свойствами для создания новых современных оптических приборов и устройств, например – для создания логических ячеек памяти оптического компьютера [8]. Поэтому исследование анизотропных метаматериалов, выполненных из немагнитных и магнитных элементов является актуальным для ряда направлений на стыке физики твердого тела, классической электродинамики и оптики [9 – 12]. Кроме того, практический интерес представляют возможности применения таких структур в нанoeлектронике и антенной технике. Например, для передачи изображений со «сверхразрешением» в СВЧ, терагерцовом и оптическом диапазонах [13].

В данной работе выполнены экспериментальные и теоретические исследования электродинамических свойств метаматериала на основе проволочной структуры с различными геометрическими размерами. Рассмотрены две различные ориентации волнового вектора падающего излучения относительно исследуемой структуры.

### Анизотропная проволочная структура

Исследуемая проволочная структура представляет собой решетку из тонких медных проволочек толщиной  $d_w = 0.2$  мм, намотанных на рамки из стеклотекстолита (рис. 1, а).

Проволочки размещены на рамке с периодом  $a$ . Рамки (5 шт.) выполняют роль каркаса и закреплены последовательно друг за другом на расстоянии  $b$  (рис. 1, б). Толщина стеклотекстолитовых рамок составляет 1,5 мм.

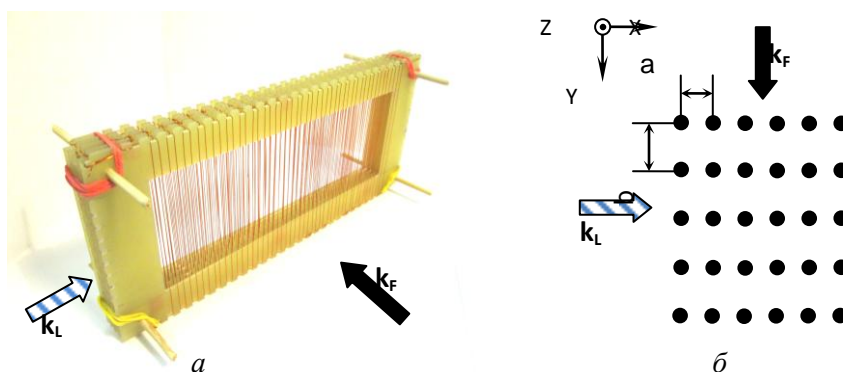


Рис. 1. а – внешний вид проволочной структуры; б – схематическое изображение проволочной структуры

На первом этапе исследований теоретически рассчитана частотная зависимость коэффициента прохождения для проволочной структуры, образованной квадратной решеткой проволочек при условии  $a = b = 3$  мм (рис. 2, а). Коэффициент прохождения при нормальном падении электромагнитной волны на проволочную структуру можно рассчитать на основе Френелевских формул [14]. Из рисунка видно, что в данном случае проволочная структура представляет собой фильтр высоких частот с частотой отсечки (плазменной частотой)  $f_p = 25$  ГГц, которая разделяет области частот с различными знаками эффективной диэлектрической проницаемости исследуемого метаматериала и, соответственно, с разными значениями коэффициента прохождения структуры.

С целью оценки достоверности результатов моделирования были экспериментально измерены спектральные характеристики проволочной структуры с теми же геометрическими размерами в частотном диапазоне от 22 до 40 ГГц. Результаты измерений представлены на рис. 2, б. Здесь также выделяется две области, которые соответствуют различным знакам эффективной диэлектрической проницаемости. Частота отсечки равна 28,5 ГГц.

Из рис. 2 видно, что полученная в ходе измерений частотная характеристика качественно согласуется с теоретическим расчетом. Отличие в расчетных и экспериментальных данных для плазменной частоты вызвано тем, что в теоретической модели не учитываются конечные размеры проволочной среды, а также наличие диэлектрического каркаса.

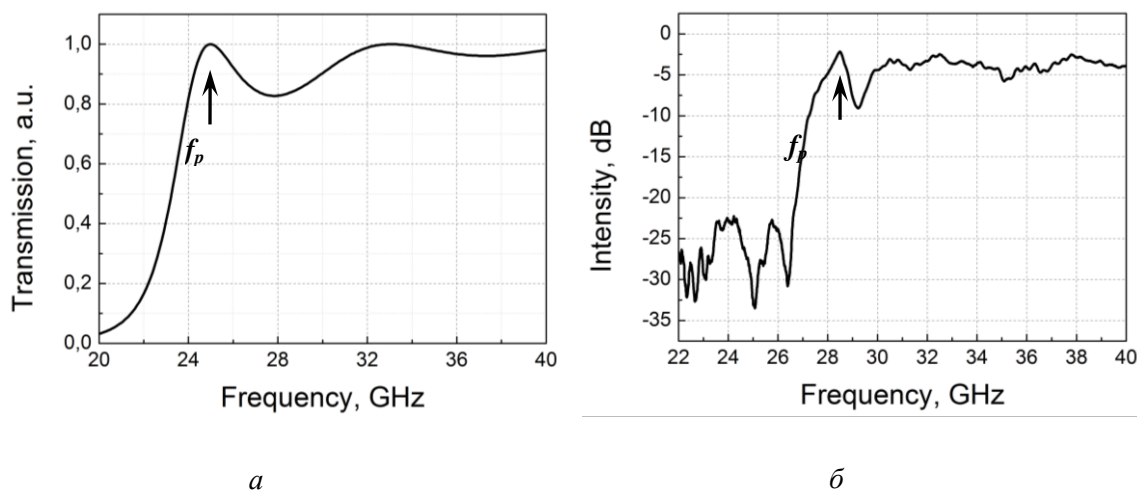


Рис. 2. *а* – Расчетная частотная зависимость коэффициента прохождения для проволочной структуры,  $f_p = 25$  ГГц; *б* – экспериментальная частотная зависимость коэффициента прохождения для проволочной структуры,  $f_p = 28.5$  ГГц

На следующем этапе исследований рассматривались свойства проволочной структуры для двух ортогональных ориентаций волнового вектора  $\mathbf{k}$  падающего излучения относительно структуры (рис. 1, б). Случай, когда волновой вектор падающей волны направлен перпендикулярно к текстолитовым пластинкам с намотанными на них медными проволочками, назовем «фронтальной» ориентацией волнового вектора и обозначим  $\mathbf{k}_F$  (черная сплошная стрелка на рис. 1, б).

Волновой вектор для случая «боковой» ориентации ( $\mathbf{k}_L$ ) обозначен на рис. 1, б заштрихованной стрелкой. Исследуемая структура расположена между двумя рупорными антеннами, которые являются источником и приемником электромагнитных волн.

На рис. 3, *а* представлены результаты численного моделирования (сплошная линия) и экспериментальных измерений (точки), зависимости плазменной частоты  $f_p$  от значения периода  $b$  при  $a = 2$  мм для случая боковой ориентации волнового вектора. Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей NA5230 в диапазоне частот 22 – 40 ГГц. На рис. 3, *б* представлена зависимость плазменной частоты от величины периодов проволочной структуры для случая фронтальной ориентации волнового вектора. Из рис. 3 видно, что с увеличением периодов исследуемой структуры значение  $f_p$  смещается в область более низких частот. Данное явление объясняется тем, что с увеличением значений параметров  $a$  и  $b$  снижается плотность металлического заполнения структуры. В результате происходит снижение плотности носителей заряда и соответствующее смещение плазменной частоты в низкочастотную область спектра.

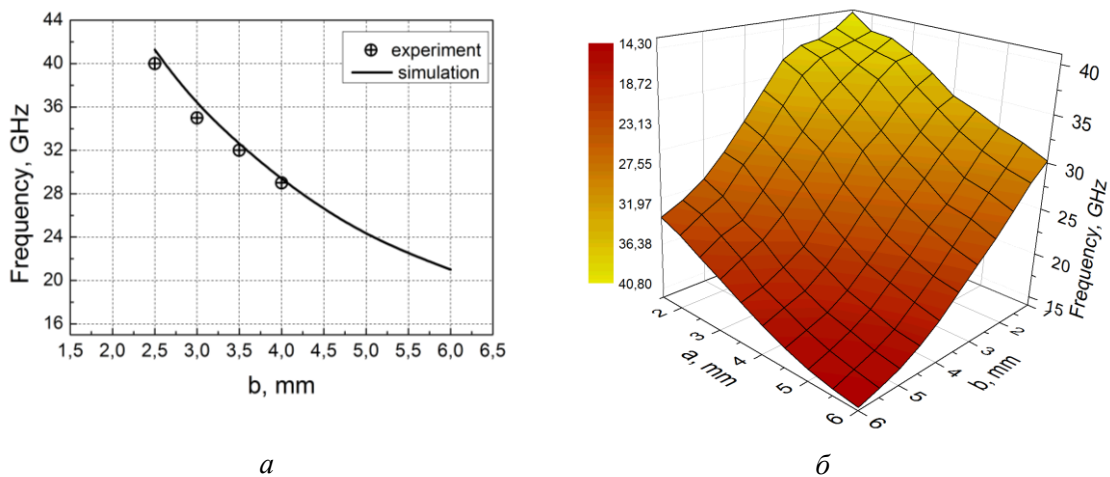


Рис. 3. Зависимости плазменной частоты  $f_p$  от периодов проволочной структуры

Важной особенностью проволочных метаматериалов как перспективных электронно-управляемых элементов СВЧ цепей является возможность обратимым образом управлять их спектральными характеристиками. Для исследования этих свойств было проведено моделирование прохождения электромагнитной волны через проволочный метаматериал с магнитными элементами в условиях изменения внешнего магнитного поля вблизи электронного магнитного резонанса. Характер зависимости величины магнитной проницаемости магнетика от внешнего магнитного поля в настоящее время известен достаточно хорошо. Это позволяет варьировать эффективные материальные параметры проволочной структуры с магнитными элементами и влиять на характеристики распространения волн в искусственной среде.

На рис. 4, *a* представлено схематическое изображение исследуемой структуры, которая представляет собой массив проволочек диаметром  $d = 0.2$  мм, расположенных в узлах сетки с одинаковыми периодами  $a = b = 3$  мм. Проволочки размещены на тонких слоях (толщина  $d_p = 0.2$  мм) материала, у которого наблюдается сильная резонансная зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  от внешнего магнитного поля. На рис. 4, *б* представлены результаты расчета частотной зависимости коэффициента прохождения проволочного метаматериала для различных значений параметра  $\mu$ . Численное моделирование выполнялось с помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD).

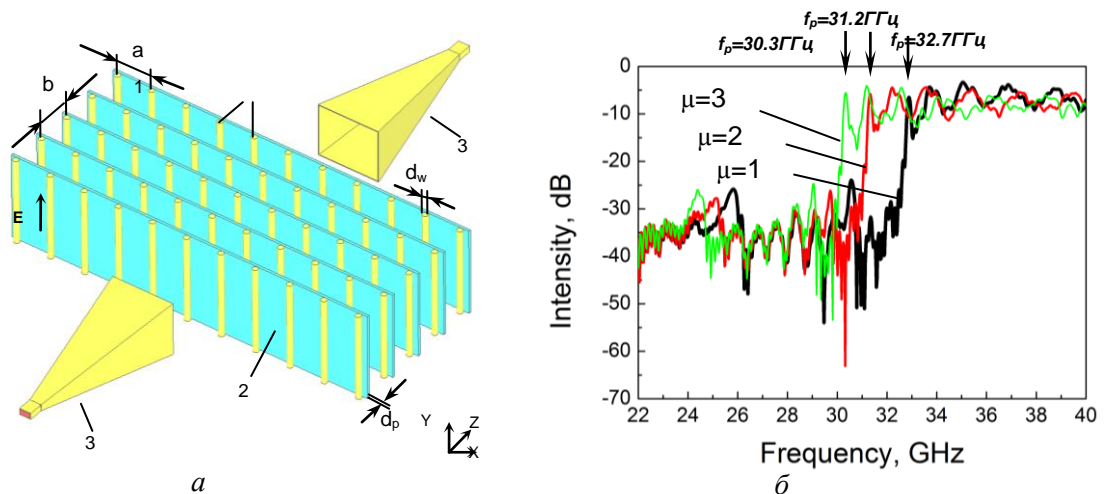


Рис. 4. *a* – Общий вид проволочной структуры: 1 – медные проволочки; 2 – магнитная подложка; 3 – рупоры; *б* – спектральные характеристики структуры для различных значений параметра  $\mu$

Из рис. 4, б следует, что изменение индукции внешнего магнитного поля сопровождается смещением частоты отсечки на спектральной характеристике проволочной структуры. Причем значения коэффициента прохождения метаматериала в областях пропускания и запираания остаются практически неизменными. В данном случае наблюдается смещение плазменной частоты более чем на 2 ГГц.

Следовательно, исследуемая структура характеризуется управляемыми спектральными характеристиками и представляет практический интерес в плане разработки перестраиваемых частотно-селективных устройств мм и субмм диапазонов.

### Заключение

Таким образом, в рамках исследования физических закономерностей распространения электромагнитных волн миллиметрового диапазона в анизотропных структурах, выполненных из массива металлических проволочек и магнитоуправляемых элементов, были получены следующие результаты:

- теоретически и экспериментально получены спектры прохождения структуры, на которых частота отсечки разделяет области с разными знаками эффективной диэлектрической проницаемости;
- увеличение периодов структуры как для случая фронтальной ориентации волнового вектора, так и для боковой ориентации, приводит к уменьшению эффективной плазменной частоты из-за снижения удельного содержания металла в проволочном метаматериале;
- показана возможность эффективного управления спектральными характеристиками проволочной структуры с магнитными элементами посредством изменения внешнего магнитного поля вблизи электронного магнитного резонанса.

**Список литературы:** 1. *Guilfoyle, P.S., McCallum, D.S.* High-speed low-energy digital optical processors // *Optical Engineering*. – 1996. – Vol. 35. – pp. A3–A9. 2. *Metamaterials. Physics and Engineering Explorations* / Edited by N. Engheta, R. Ziolkowski // IEEE Press, 2006. 414 p. 3. *Denz, C., Flach, S., Kivshar, Yu. S.* Nonlinearities in Periodic Structures and Metamaterials. Springer-Verlag, 2009. – 292 p. 4. *Drachev, V., Podolskiy, V. A., Kildishev, A. V.* Hyperbolic Metamaterials: new physics behind a classical problem // *Opt. Express*. – 2013. – Vol. 21, No.12. – pp. 15048–15064. 5. *Хижняк, Н.А.* Искусственные анизотропные диэлектрики // *ЖТФ*. – 1957. – Т. 27, №9. – С. 2006–2038. 6. *Brown, J.* Artificial dielectrics // *Progress in dielectrics*. – 1960. – Vol. 2. – pp. 195–225. 7. *Pendry, J. B.* Negative refraction makes a perfect lens // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – Vol. 85, No.18. – pp. 3966–3969. 8. *Mingaleev, S., Kivshar, Y.* Nonlinear photonic crystals toward all-optical technologies // *Optics and Photonics News*. – 2013. – Vol. 13, Issue 7. pp. 48–51. 9. *Belov, P.A., Hao, Y., Sudhakaran, S.* Subwavelength microwave imaging using an array of parallel conducting wires as a lens // *Phys. Rev. B*. – 2006. – Vol. 73. 033108. 10. *Yildiz, F., Rameev, B.Z., Tarapov, S.I., Tagirov, L.R., Aktaş, B.* High-Frequency Magnetoresonance Absorption in Amorphous Magnetic Microwires // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2002. – Vol. 247. – pp. 222–229. 11. *Kozhara, L. I., Damaschin, V. A., Tarapov, S. I.* Anisotropic properties of wire medium formed by various conductors // *3d International Workshop on THz Radiation: Basic Research & Applications*. – 2011. – pp. (014)1-3. 12. *Kozhara, L.I., Polevoy, S.Y., Popov, I.V.* Technique for analysis of the spatial field distribution in tapered wire medium // *Solid State Phenomena*. – 2014. – Vol. 214. – p. 75–82. 13. *Belov, P.A., Simovski, C.R., Ikonen, P., Silveirinha, M.G., Hao Y.* Image transmission with the subwavelength resolution in microwave, terahertz and optical frequency bands // *J. Commun. Technol. Electron*. – 2007. – Vol.52. – 1009. 14. *Wu, D., Fang, N., Sun, C., Zhang, X.* Terahertz plasmonic high pass filter // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 83. – pp. 201–203.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редакцию 12.10.2015