

Министерство образования и науки Украины
Национальная Академия наук Украины
Институт радиофизики и электроники НАН Украины им. А.Я. Усикова
Институт физики полупроводников НАН Украины им. В.Е. Лашкарева
Институт физики НАН Украины
Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины
Национальный технический университет Украины «КПИ»
Национальный технический университет «Львовская политехника»
Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Сборник научных трудов VIII Международной научной конференции ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БАЗА НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Магнитные наноструктуры для спиновой (и нано-) электроники ГГц и ТГц диапазонов

Метаматериалы и их применение в наноэлектронике ТГц и ГГц диапазонов

Методы формирования, диагностики и исследования наноструктур

Электродинамика и наноэлектроника ТГц диапазона

Математическое моделирование в наноэлектронике

Физические основы наноструктур для электроники

Наноэлектронные сенсоры и интеллектуальные системы на их основе. Наноэлектронные сенсоры для биомедицины

Нелинейные процессы в искусственных средах/метаматериалах и приборы на их основе (Солитоны. Многочастотные процессы)

Элементы альтернативной энергетики, включая солнечные батареи, термопреобразователи и накопители энергии

Нанопотоника. Процессы, структуры и устройства

МЭМС и НЭМС в электронике



Харьков – Одесса
2015

МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЕ ПРОВОЛОЧНЫЕ СРЕДЫ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

Ивженко Л.И.¹, Одаренко Е.Н.², Тарапов С.И.^{1,2}

¹Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова (ИРЭ НАНУ)

61085, г. Харьков, ул. Акад. Проскуры, 12

²Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ)

61166, г. Харьков, пр. Ленина, 14

тел. (057)720-34-63

E-mail: ivzhenko@ire.kharkov.ua

Аннотация: The paper is devoted to experimental and theoretical investigation of the spectral characteristics of anisotropic wire metamaterials. The wire metamaterial is a two-dimensional array consisting of thin copper wires, having wire diameter of 0.2 mm. Transmission spectrums with clearly expressed plasma frequency are obtained. Microwave range with a negative effective permittivity is located below than plasma frequency. The measured spectrums have a good agreement with the theoretical simulations in the millimeter waveband. Investigations were carried out in the frequency range 22-40 GHz. Theoretically shown possibility of effective management of the transmission spectrum of a wire medium with a magnetic filling by changing the external magnetic field near the electron magnetic resonance.

Вступление

В девяностые годы XX века произошли значительные изменения в концепции создания компонентов для сверхвысокочастотных и оптических приборов и систем, в том числе оптических компьютеров [1]. В настоящее время в области разработки элементов для формирования электронных схем таких устройств перспективными представляются искусственные материалы с кардинально новыми (и заранее прогнозированными) электромагнитными свойствами, известные под названием метаматериалы. Метаматериалы применяются для различных приложений микроволнового диапазона, а также в терагерцовом и оптическом диапазонах [2-4]. С точки зрения технологии, метаматериалы представляют собой композит из различных природных компонент разной формы. Одним из интересных видов таких материалов является искусственный диэлектрик, представляющий собой, например, композит металл-металл, диэлектрик-металл, или диэлектрик-диэлектрик, т.е. некую диэлектрическую среду (матрицу) с распределенными в ней включениями (металл/диэлектрик) различной формы.

Основы теории искусственных диэлектриков в СВЧ области были заложены еще в 50-е годы прошлого века [5,6]. Например, в своей работе [5] Хижняк Н.А. дал описание модели искусственного диэлектрика, образованного регулярной решеткой рассеивающих металлических элементов при условии $d \ll \lambda$ (d -постоянная решетки). В электродинамическом отношении такой искусственный диэлектрик представляет собой анизотропную среду и эквивалентен однородной среде с эффективными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей. Позднее Дж. Пендри предложил строгую теорию свойств проволочной среды как одной из разновидностей искусственного диэлектрика [7]. Предложенная им структура имеет отрицательную эффективную диэлектрическую проницаемость ϵ_{eff} на частотах СВЧ диапазона. Структура представляла собой массив тонких идеально проводящих металлических проволочек. Если электрическое поле параллельно осям проволочек, то в них возбуждается ток, создающий эквивалентные электрические дипольные моменты. Усреднение дипольных моментов приводит к получению диэлектрической проницаемости структуры с частотной зависимостью плазмонного типа:

$$(2\pi f)_p^2 = \omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/r)} \quad (1)$$

где c_0 - скорость света в вакууме, a - постоянная решетки 2D проволочной структуры, r - радиус проволочки.

В соответствии с известным законом ДрUDE эффективную диэлектрическую проницаемость проволочной среды ϵ_{eff} можно записать в виде:

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

где f_p - плазменная частота; f - частота падающего излучения.

Из (2) видно, для волн с частотой ниже плазменной частоты f_p эффективная диэлектрическая проницаемость проволочной структуры ϵ_{eff} принимает отрицательное значение, соответственно электромагнитная волна не может распространяться в структуре. Если же частота падающей электромагнитной волны $f > f_p$, тогда ϵ_{eff} структуры положительна и падающая электромагнитная волна проходит сквозь структуру.

Легко видеть, что металлические включения, размещенные в диэлектрической матрице, их расположение и геометрические параметры определяют дисперсионные свойства искусственной среды, выполненной на основе 2D проволочной решетки. Изменение эффективного показателя преломления такой среды однозначно зависит от ориентации и поляризации распространяющейся в ней волны. Это имеет определяющее значение для разработки наноструктурированных СВЧ/оптических метаматериалов с нетривиальными электродинамическими свойствами для создания новых современных оптических приборов и устройств, например – для создания логических ячеек памяти для оптического компьютера [8]. Поэтому использование анизотропного метаматериала, выполненного из немагнитных и магнитных проволочек является перспективным для ряда направлений, лежащих на границе физики твердого тела и классической электродинамики [9-12]. Кроме того, интересными являются возможности применения таких структур в нанoeлектронике, антенной технике, например, для передачи изображений со сверхразрешением, т.е. с разрешением меньшим $\lambda/2$ в СВЧ, ТГц и видимом диапазонах [13].

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое исследование анизотропных свойств проволочной структуры в случае изменения ее геометрических размеров как для «фронтальной» так и для «боковой» ориентаций волнового вектора проходящей электромагнитной волны СВЧ диапазона.

Анизотропная проволочная структура

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

Проволочки разнесены на рамке с периодом a . Рамки (5 шт.) выполняют роль каркаса и закреплены последовательно друг за другом на расстоянии b . Таким образом, металлические проволочки направлены вертикально и расположены строго друг за другом. Толщина стеклотекстолитовых рамок составляет 1.5 мм.

(1)

лочной

ческую

(2)

тивная

ельное

гся в

да ϵ_{eff}

сквозь

ческой

онные

шетки.

сит от

яющее

алов с

енных

ти для

риала,

им для

ческой

енения

редачи

ТГц и

ование

ческих

ектора

онких

ки из

г роль

разом,

руг за

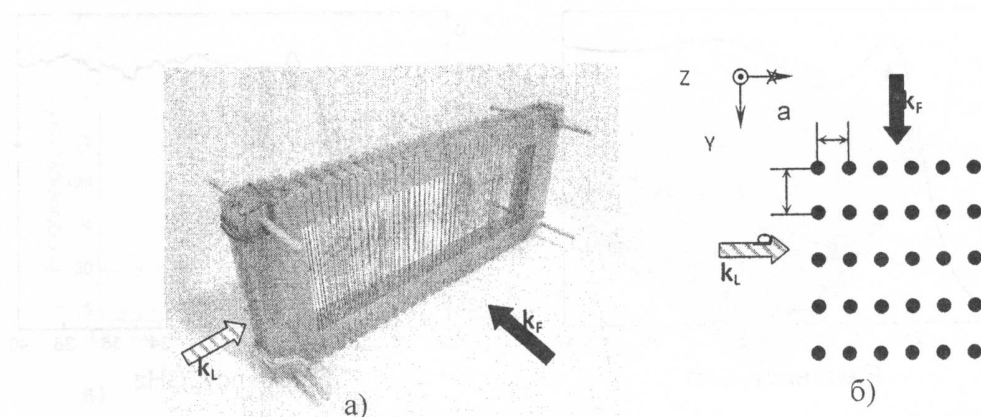


Рис. 1 – а) Внешний вид проволочной структуры, выполненной из медных проволочек;
б) Схематическое изображение 2D проволочной структуры

Геометрические размеры исследуемой структуры рассчитывались аналогично работе [14].

Как видно из формулы (1), эффективная плазменная частота f_p сильно зависит от постоянной решетки и радиуса проволочек.

На первом этапе исследований теоретически рассчитана частотная зависимость коэффициента прохождения для проволочной структуры образованной правильной решеткой проволочек при условии $a = b = 3$ мм (рис. 2а). Коэффициент прохождения при нормальном падении электромагнитной волны на проволочную структуру удобно рассчитать из уравнения Френеля (см. напр. [14]). В [14] рассматривается только случай взаимодействия ТМ-волны с исследуемой проволочной структурой, т.е. когда вектор $\mathbf{E}$ направлен вдоль проволочек. Именно для такой ориентации вектора $\mathbf{E}$ исследуемая структура имеет «плазменный характер», т.е. в частотном спектре прохождения имеется диапазон с критически низким коэффициентом прохождения и область, где волна в структуре распространяется с малым уровнем затухания. Согласно формуле (1) для данной 2D проволочной структуры плазменная частота составляет $f_p = 2\pi / \omega_p = 25$ ГГц.

С целью оценки справедливости теоретических предпосылок нами были экспериментально измерены спектральные характеристики проволочной структуры с этими же геометрическими параметрами в частотном диапазоне от 22 до 40 ГГц. В ходе анализа спектра (рис. 2б) были обнаружена частотная область с высоким уровнем прохождения при $f_p = 28.5$ ГГц, соответствующая, очевидно, области положительных значений эффективной диэлектрической проницаемости.

Из рис. 2б видно, что, полученная в ходе эксперимента частотная характеристика хорошо согласуется с теоретическим расчетом. Отличие в расчетных и экспериментальных данных для плазменной частоты вызвано тем, что теоретическая модель не учитывает наличие диэлектрического каркаса проволочной среды в эксперименте.

Следующим этапом было исследование дисперсионных свойств 2D проволочной структуры с различным периодом проволочек для случая двух ориентаций волнового вектора $\mathbf{k}$ падающего излучения. В данной работе рассмотрены два вида ориентации $\mathbf{k}$ вектора относительно исследуемой проволочной структуры. Случай, когда волновой вектор падающей волны направлен ортогонально к текстолитовым пластинкам с намотанными на них медными проволочками, назовем «фронтальная ориентация» волнового вектора и обозначим как $\bar{k}_F$ (черная сплошная стрелка на рис. 1).

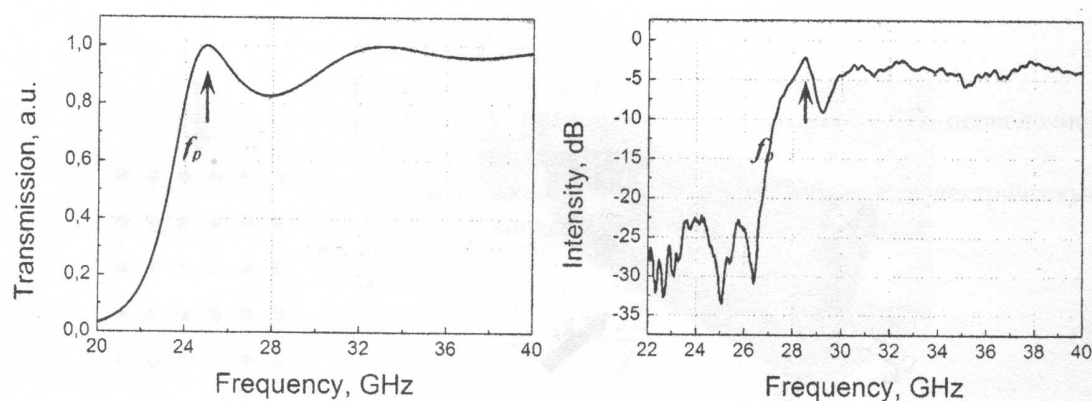


Рис. 2 – а) Частотная зависимость коэффициента прохождения для проволочной структуры при $a=b=3\text{ мм}$, $f_p = 25\text{ ГГц}$ (рассчитанная по аналогии с [14]); б) – частотная зависимость коэффициента прохождения для проволочной структуры при $a = b = 3\text{ мм}$, $f_p = 28.5\text{ ГГц}$ (эксперимент)

«Боковой ориентацией» волнового вектора ($\bar{k}_l$) будем считать случай, обозначенный на рис. 1 синей заштрихованной стрелкой. Исследуемая структура расположена между двумя рупорными антеннами, которые являются источником и приемником электромагнитных волн с плоским волновым фронтом.

Измерения проводились с помощью векторного анализатора NA5230 в диапазоне частот 22-40 ГГц. На рис. 3а представлены результаты численного моделирования (сплошная линия) и экспериментальных измерений (точки), зависимости плазменной частоты f_p от значения периода b при $a=2\text{ мм}$ для случая боковой ориентации волнового вектора ($\bar{k}_l$). На рис. 3б представлена пространственная дисперсионная зависимость плазменной частоты при изменении периодов проволочной структуры как для случая фронтальной ориентации волнового вектора, так и для боковой ориентации. Из рис. 3а и 3б видно, что с увеличением периодов исследуемой структуры для обоих вариантов ориентации волнового вектора значение f_p смещается в область более низких частот. Данное явление объясняется тем, что с увеличением периодов a и b снижается плотность металлического заполнения структуры. В результате чего наблюдается снижение плотности носителей заряда и отражательная способность структуры уменьшается, что приводит к наблюдаемому нами смещению f_p в низкочастотную область спектра.

Очень важным свойством проволочных метаматериалов, как перспективных электронноуправляемых элементов СВЧ цепей является возможность обратимым образом управлять их спектральными свойствами. Для этого мы провели теоретическую оценку изменения спектра (а именно, плазменной частоты) проволочного метаматериала с магнитным заполнением посредством 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, очевидно, позволит варьировать эффективные материальные параметры всего метаматериала, сформированного проволочной структурой и магнитным заполнением, и тем самым влиять на характеристики распространения волн в среде.

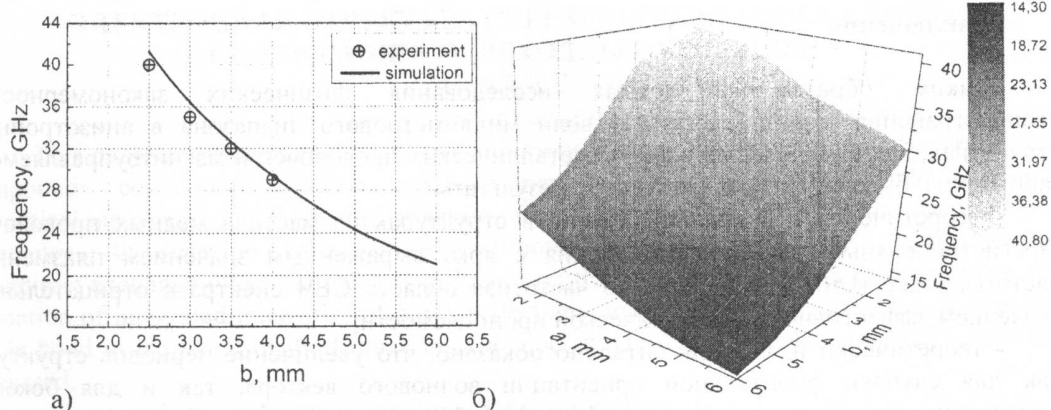


Рис. 3 – а) Частотная зависимость плазменной частоты f_p от периода b ($a = 2$) проволочной структуры для случая боковой ориентации.

Это означает, что можно также изменять значения f_p данного метаматериала путем изменения внешнего магнитного поля.

На рис. 4а представлен общий вид исследуемой структуры, которая представляет собой массив проволочек диаметром $d = 0.2$ мм, расположенных с периодом $a = b = 3$ мм. Проволочки размещены на тонком слое $d_p = 0.2$ мм магнито-зависимого материала, у которого наблюдается сильная резонансная зависимость магнитной проницаемости μ от внешнего магнитного поля. Численное моделирование выполнялось с помощью метода конечных разностей во временной области FDTD (рис. 4б).

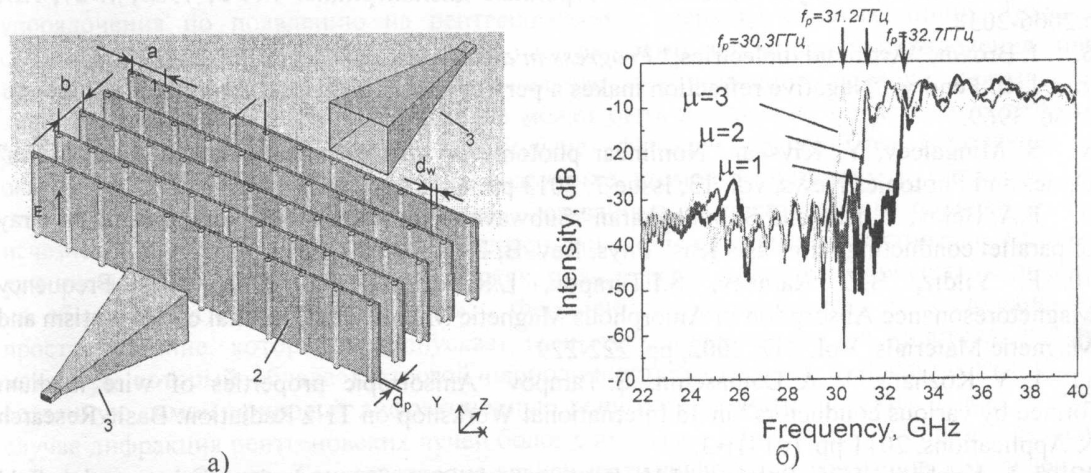


Рис. 4 – а) Общий вид проволочной структуры (численный расчет): 1 – медные проволочки; 2 – магнитное заполнение; 3 – рупора; б) Частотная зависимость (численный расчет) плазменной частоты f_p от μ для случая фронтальной ориентации

Очевидно, что существует возможность эффективного управления спектром пропускания такой проволочной структуры с магнитным заполнением посредством изменения внешнего магнитного поля вблизи электронного магнитного резонанса. Видно, что относительно небольшое изменение магнитной проницаемости (вблизи магнитного резонанса) приводит к сдвигу плазменной частоты на величину более 3 ГГц.

Заключение

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

- теоретически и экспериментально в структурах из массива медных проволочек зарегистрированы спектры прохождения с ярко выраженным значением плазменной частоты, ниже которой имеет место частотная область СВЧ спектра с отрицательным значением эффективной диэлектрической проницаемости;
- теоретически и экспериментально показано, что увеличение периодов структуры как для случаев фронтальной ориентации волнового вектора, так и для боковой ориентации, приводит к понижению эффективной плазменной частоты;
- теоретически показана возможность эффективного управления спектром пропускания такой проволочной структуры с магнитным заполнением посредством изменения внешнего магнитного поля вблизи электронного магнитного резонанса.

Список литературы:

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