

УДК 621.371; 621.372.832

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ НЕВЗАИМНОСТЬЮ ПРОХОЖДЕНИЯ МИКРОВОЛН В МЕТАСТРУКТУРАХ

В. С. Бутылкин, Г. А. Крафтмахер, Ю. Н. Казанцев

**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский
филиал**

Статья получена 15 декабря 2014 г.

Аннотация. На примере невзаимного протодивайса – простейшего невзаимного устройства, состоящего из нагруженного варактором диполя и расположенного около него феррита – исследована возможность электрического управления невзаимностью распространения микроволн (вплоть до её инверсии). Поскольку в структурах с поперечно намагниченным ферритом эффект невзаимности обусловлен различным поглощением волн, направление вращения магнитного поля которых совпадает с направлением прецессии магнитных моментов в феррите и противоположно ему, рассмотрено поведение микроволнового магнитного поля в окрестности диполя. Показано, что формирующееся вследствие суперпозиции падающей и рассеянной волн магнитное поле оказывается в общем случае эллиптически поляризованным. При перестройке собственной частоты диполя изменяются фазы его тока и рассеянной волны. Вследствие этого может измениться направление вращения микроволнового магнитного поля. Последнее приводит к инверсии невзаимности. В отличие от традиционных методов, переключение невзаимности не нуждается в перемагничивании феррита. Оно достигается изменением постоянного электрического напряжения на варакторе, обеспечивающим переход частоты резонанса диполя через частоту ферромагнитного резонанса. Приведенные результаты экспериментального исследования структуры с нагруженным варактором диполем типа «Butterfly» демонстрируют инверсию невзаимности. Поскольку постоянная времени варакторов на порядки короче времени перемагничивания ферритов,

результаты работы могут быть использованы в разработках быстроуправляемых невзаимных устройств для информационных систем, например, скоростных переключателей каналов «приём - передача».

Ключевые слова: микроволны, невзаимность прохождения, переключение, электрическое управление, феррит, варактор.

Abstract. A possibility of electric control of microwaves passage nonreciprocity (up to its inversion) is under investigation on the sample of a nonreciprocal proto-device consisted of a varactor loaded dipole and ferrite piece. Phenomenon of nonreciprocity in structures with transversely magnetized ferrites is caused by different absorption of waves which have the magnetic field sense of rotation coincident with direction of the ferrite magnetic moments precession and opposite it. That is why microwave magnetic field behaviour in the neighborhood of a dipole is regarded. This magnetic field is a result of the incident and scattered waves superposition. It is shown that whole magnetic field is elliptically polarized in common case. During the dipole own frequency re-tuning the phases of its current and scattered wave are changed. Hereupon the magnetic field sense of rotation can change. This change results in the nonreciprocity inversion. In contrast to traditional methods there is no need to re-magnetize ferrite for switching nonreciprocity. One can get re-tuning of the dipole frequency by alteration of a bias voltage applied to varactor. Experimental investigation of a structure with varactor-loaded dipole “Butterfly” has demonstrated inversion of microwave nonreciprocity. The proposed metastructures open up wide prospects for applications in the field of information technologies. These metastructures may form the basis for manufacturing fast controlled and switchable nonreciprocal microwave systems.

Key words: microwave, nonrecipocal transmission, switching, electrical control, ferrite, varactor.

Введение

Среди устройств, использующих ферриты, своё место уверенно заняли разнообразные переключатели, выключатели и модуляторы [1, 2]. Основной характеристикой этих устройств является время переключения. Традиционный

способ переключения невзаимности в таких устройствах состоит во временной модуляции наложенного на феррит магнитостатического поля. При этом ограничение (снизу) времени переключения происходит не только из-за индуктивности катушки электромагнита, но и из-за инерционности процессов намагничивания и перемагничивания ферритов. По данным производителей микроволновых ферритовых развязок (Oriental Magnetics Co. LTD) это время лежит в пределах от 3 до 15 мкс [3]. При использовании для управления быстропереключающих диодов время включения составляет 1...5 нс (по свидетельству производителя диодов Future Electronics [4]). Производители ферритовых циркуляторов, сравнивая постоянные времена для ферритов и pin-диодов, подтверждают, что диоды обладают лучшими скоростными характеристиками [5]. Недавно интенсивное развитие получили исследования в области гетероструктур «ферромагнетик-сегнетоэлектрик» [6-8] и мультиферроиков, обладающих ферромагнитными и ферроэлектрическими свойствами [9]. Однако, для переключаемых развязок, основанных на невзаимности, обеспеченной гиротропными средами, способа электрического управления в настоящий момент нет.

В представляемой работе рассматривается электрическое управление знаком невзаимности прохождения микроволн в метаструктурах, содержащих наряду с ферритом проводящие резонансные элементы (диполи, разомкнутые кольца и др.), нагруженные варакторами, или решетки и цепочки из них. В последнее время нагруженные варакторами разомкнутые кольца широко стали применяться для электрически перестраиваемых микроволновых фильтров [10, 11] и в исследованиях нелинейных явлений [12-14].

2. ФМР и невзаимность в метаструктурах

Уже первые наблюдения [15] распространения микроволн в структурах с поперечно намагниченным ферритом и цепочкой дважды разомкнутых металлических колец обнаружили, что эффект невзаимного поглощения СВЧ-излучения ферритом при возбуждении ферромагнитного резонанса (ФМР), физической основы многих невзаимных устройств, по-новому проявляет себя

при сочетании феррита с резонансными проводящими элементами. Так, невязанность обнаруживается при размещении ферритовой пластины такой структуры в осевой плоскости волновода, а не на расстоянии $\lambda/8$ от боковой стенки, как это имеет место [1, 2] в случае феррита без резонансных элементов. Микроволновая невязанность наблюдается также в структурах рассматриваемого типа и в отсутствие волноводов [16]. Экспериментами [17-19] выявлены две частотные полосы невязанного прохождения излучения, одна – в области ФМР, другая связана с резонансом элементов (РЭ). Замечено, что при перестройке частоты ФМР (посредством изменения тока в электромагните) через частоту РЭ знак невязанности меняется на противоположный. Пространственная перестановка между собой феррита и решетки (цепочки) резонансных элементов также приводила к инверсии невязанности. В [18-20] выполнены теоретические исследования, где решетка резонансных киральных элементов моделировалась слоем бианизотропной среды. При этом использовались эффективные параметры (тензоры киральности, диэлектрической и магнитной проницаемостей) бианизотропного метаматериала, найденные в [21-23]. В этих работах удалось связать наблюдаемые эффекты с наличием и особенностями поведения микроволнового магнитного поля в зависимости от соотношения между частотами излучения, РЭ и ФМР, от взаимного расположения феррита и решетки, а также от величины и направления внешнего магнитостатического поля. Впоследствии [24, 25], в метаструктурах, содержащих резонансные элементы (диполь типа «баттерфляй», дважды разомкнутое кольцо) с разрывами, в которые впаивались варакторы, была обнаружена зависимость частотных полос невязанного прохождения как от статического магнитного поля, так и от постоянного электрического напряжения. Ниже теоретически исследуется поведение магнитного полч СВЧ-излучения в окрестности диполя, возбуждаемого падающей на него плоской волной, обсуждается его влияние на невязанность поглощения излучения ферритом и электрическое управление невязанностью. Затем приведены результаты экспериментов с невязаным

протодивайсом (“nonreciprocal proto-device”) - простейшим невязимным устройством, содержащим дипольный осциллятор типа «Butterfly» и расположенный рядом с ним феррит.

3. Поведение микроволнового магнитного поля вблизи диполя, возбуждаемого плоской волной

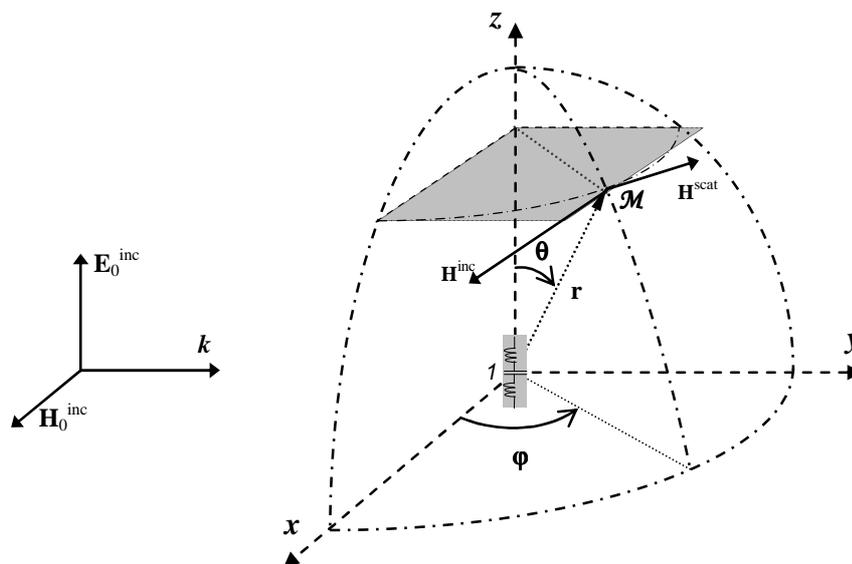


Рис. 1. Расположение эквивалентного осциллятора I в декартовой и сферической системах координат и магнитные поля падающей (\mathbf{H}^{inc}) и рассеянной (\mathbf{H}^{scat}) волн в произвольной точке \mathcal{M} . $\mathbf{E}_0^{\text{inc}}$ и $\mathbf{H}_0^{\text{inc}}$ – электрическое и магнитное поля падающей волны, \mathbf{k} – ее волновой вектор.

Рассмотрим расположенный вдоль оси \vec{z} в начале координат (рис. 1) осциллятор из последовательно соединенных электрической емкости C и полной индуктивности L . Частота осциллятора $\omega_0 = (LC)^{-1/2}$, сопротивление R , длина $l \ll \lambda$. Пусть на него падает вдоль оси \vec{y} электромагнитная волна

$$\vec{E}^{\text{inc}} = \text{Re}\{\vec{e}_z E_z^{\text{inc}} \exp(i\omega t)\}, \quad \vec{H}^{\text{inc}} = \text{Re}\{\vec{e}_x H_x^{\text{inc}} \exp(i\omega t)\}.$$

Комплексные амплитуды электрического и магнитного полей волны пропорциональны $\exp(-iky)$, где $k = 2\pi/\lambda$, \vec{e}_j – орты системы координат. Амплитуда магнитного поля на входе H_{x0}^{inc} , волновое сопротивление $Z_0 = E_z^{\text{inc}}/H_x^{\text{inc}}$. Под действием приложенной к осциллятору разности потенциалов $V = E_{z0}^{\text{inc}} l$ в нем индуцируется ток

$$\vec{I} = \text{Re}\{\vec{e}_z H_{x0}^{\text{inc}} l (Z_0/Z) \exp[i(\omega t + \alpha)]\} = \text{Re}\{\vec{e}_z I_z \exp[i\omega t]\}. \quad (1)$$

Здесь $\alpha = \arctan\left[\left(1 - \omega^2/\omega_0^2\right)/\omega RC\right]$ - отличие фазы комплексной амплитуды тока от фазы падающей волны на осцилляторе, изменяющееся от $\pi/2$ на частотах, меньших частоты ω_0 , до $-\pi/2$ на частотах $\omega \gg \omega_0$; $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ - эффективное сопротивление осциллятора.

Ток (1) возбуждает рассеянную волну с магнитным полем, у которого проекции комплексных амплитуд в сферических координатах есть [26]

$$H_\varphi^{\text{scat}} = \frac{I_z l}{4\pi r^2} (1 + ikr) \exp[-ikr] \sin\theta, \quad H_\theta^{\text{scat}} = H_r^{\text{scat}} = 0. \quad (2)$$

Декартовские проекции комплексных амплитуд полного магнитного СВЧ-поля равны

$$H_x = H_{x0}^{\text{inc}} \exp(-ikr \sin\theta \sin\varphi) - H_{x0}^{\text{inc}} \frac{Z_0 l^2 (1 + ikr)}{4\pi Z r^2} \exp[i(\alpha - kr)] \sin\theta \sin\varphi;$$

$$H_y = H_{x0}^{\text{inc}} \frac{Z_0 l^2 (1 + ikr)}{4\pi Z r^2} \sin\theta \cos\varphi \exp[i(\alpha - kr)]; \quad H_z = 0. \quad (3)$$

Отсюда видно, что, так как взаимно перпендикулярные проекции имеют различные величины и фазы, конец вектора полного H -поля движется по эллиптическим траекториям, причем направление его вращения зависит от соотношения между фазами проекций.

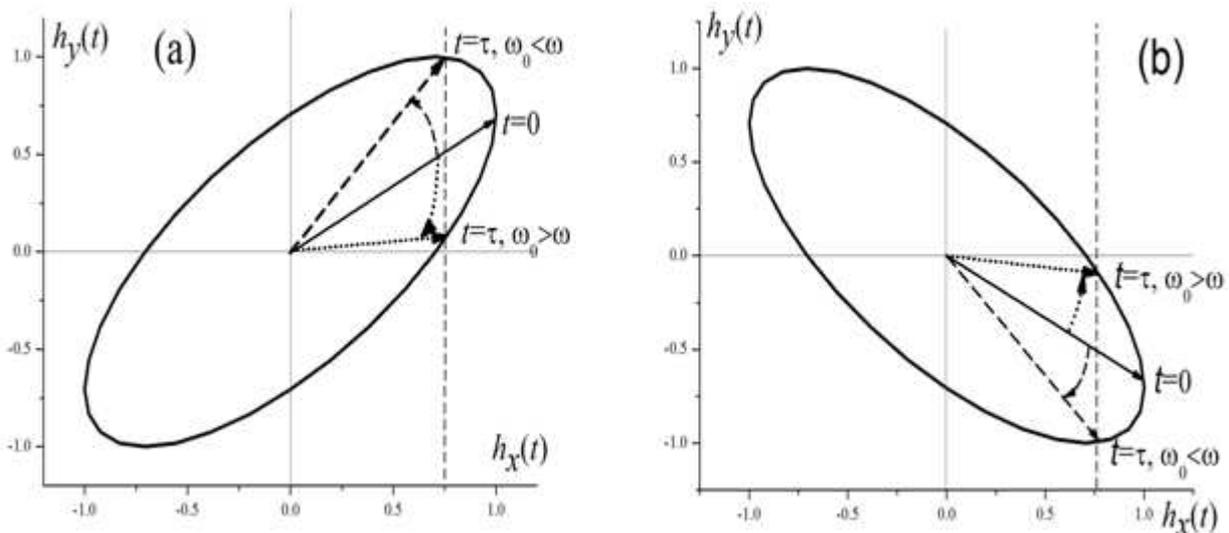


Рис.2. Поляризация нормированного суммарного магнитного поля $\vec{h}(t)$ излучения в точках \mathcal{M} (a) и \mathcal{M}' (b). Прямые стрелки изображают суммарное поле в моменты

времени $t=0$ (сплошные) и $t=\tau < \pi/2\omega$ (штриховые и пунктирные). Изогнутые стрелки указывают направление вращения магнитного поля. Штриховые линии соответствуют случаю $\omega_0 < \omega$, пунктирные – случаю $\omega_0 > \omega$. Эллипсы – траектории, описываемые концами векторов магнитного поля.

Рассмотрим две точки, M и M' , расположенные на пересечении «экваториальной» ($\theta = \pi/2$) и входной ($y=0$) плоскостей симметрично относительно диполя на расстоянии $a \ll \lambda$ от него. В этих точках нормированное магнитное СВЧ-поле имеет вид

$$\vec{h}(t) = \vec{H} / H_{x0}^{\text{inc}} = \vec{e}_x h_x(t) + \vec{e}_y h_y(t) \approx \vec{e}_x h_x \cos \omega t \pm \vec{e}_y h_y \cos(\omega t + \alpha) \quad (4)$$

(«+» относится к точке M с $x=a$, «-» - к точке M' с $x=-a$). Амплитуды проекций равны $h_x=1$, $h_y = \frac{Z_0 l^2}{4\pi Z a^2}$. На рис. 2 представлено поведение магнитного поля

$$\vec{h}(t) \text{ при } h_y=1, \alpha = \pm \frac{\pi}{4}.$$

В точке M (справа от диполя по отношению к k) магнитное поле вращается против часовой стрелки на частотах выше резонансной частоты осциллятора и по часовой стрелке на частотах ниже этой частоты. При переходе в точку M' направление вращения магнитного поля меняется. В ферритовом образце, размещённом около диполя (например, вблизи точки M), возникает эллиптически поляризованное магнитное поле, направление вращения которого меняется 1) при перестройке частоты диполя (например, изменением емкости варактора при изменении приложенного к нему напряжения обратного смещения) и 2) при перемене взаимного расположения диполя и феррита (переносе его к точке M'). Последнему эквивалентно изменение направления движения подаваемого сигнала. В случае неизменного направления внешнего магнитостатического поля ($\uparrow \uparrow \vec{z}$) это должно приводить к перемене знака невзаимности прохождения СВЧ-волн через такую структуру.

4. Экспериментальная реализация электроуправляемого невзаимного протодивайса

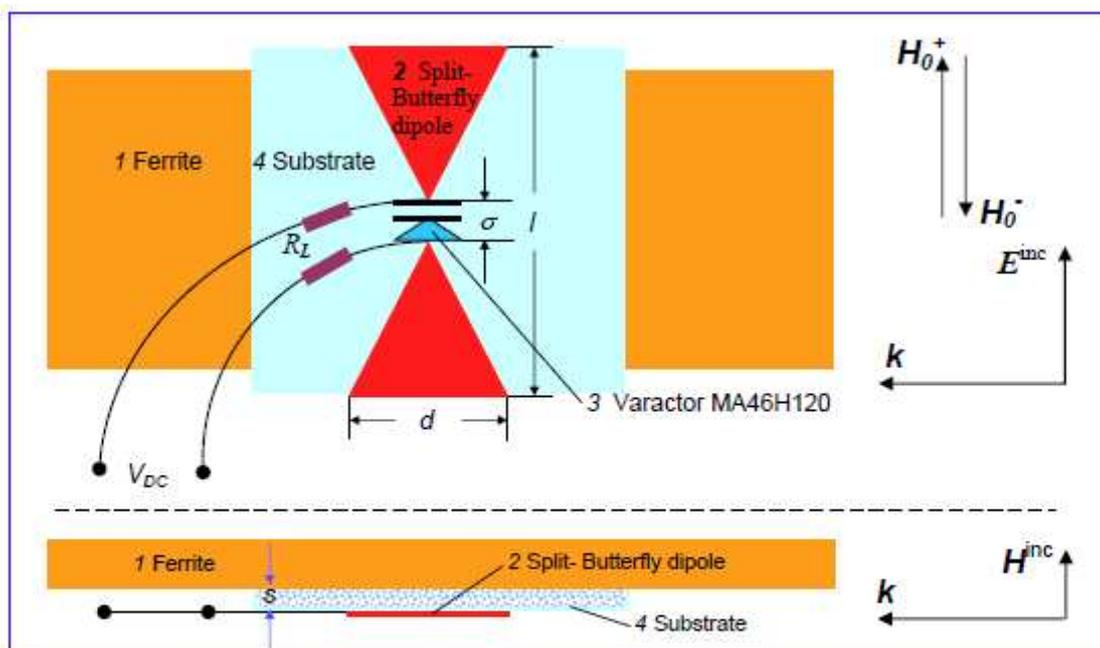


Рис. 3. Схема изучаемой метаструктуры. 1 – ферритовая ($3\text{YO}_3 \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$) пластина $30 \times 20 \times 1.9\text{mm}$, 2 – медный диполь «Баттерфляй» с разрывом, 3 – варактор, 4 – текстолитовая подложка; $l=22\text{mm}$, $\sigma=1\text{mm}$, $d=10\text{mm}$, $s=6.5\text{mm}$. H_0^+ , H_0^- – магнитные статические поля, k , E^{inc} , H^{inc} – волновой, электрический и магнитный векторы падающей волны.

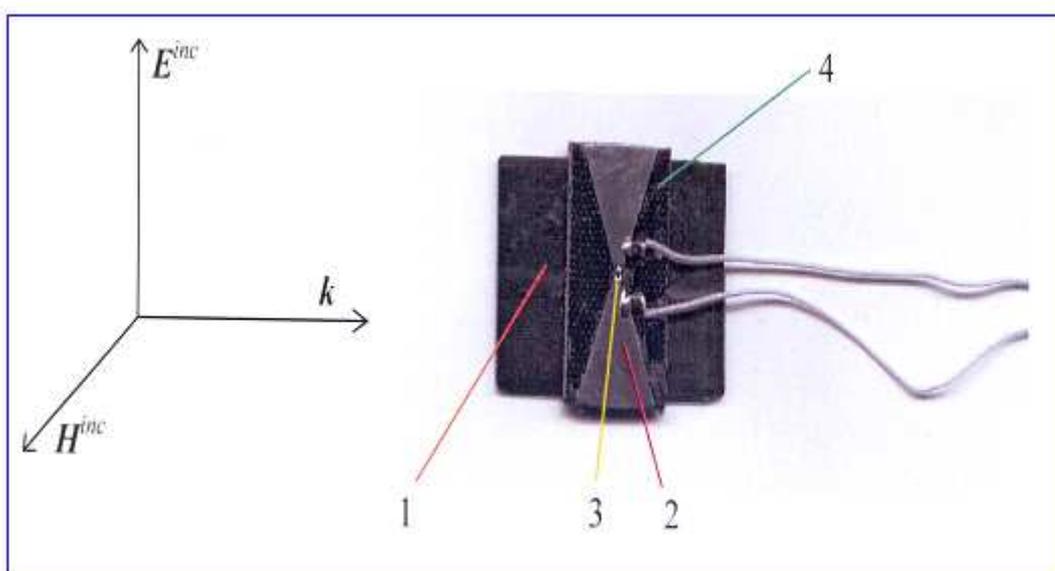


Рис. 4. Скан метаструктуры. Обозначения – те же, что на Рис.3.

Приведём результаты нашего экспериментального исследования структуры, содержащей ферритовую пластину и одиночный диполь типа «Butterfly», в разрыв σ которого был впаян варактор МА46Н120 (см. схему рис. 3 и скан на рис. 4) [27]. Параметры структуры указаны в подписи к рис. 3.

Структура размещалась в прямоугольном волноводе панорамного измерителя КСВН сечением $48 \times 24 \text{ mm}^2$ (диапазон 3...6 GHz) таким образом, что перпендикулярная широкой стенке волновода его осевая плоскость проходила внутри ферритовой пластины. Волновод располагался между полюсами электромагнита так, что магнитостатическое поле H_0 было перпендикулярно широкой стенке волновода и направлению распространения микроволн. Величина и полярность магнитостатического поля определялась величиной и направлением тока в катушке электромагнита. Изменение ёмкости варактора от 1pF до 0.15 pF обеспечивалось изменением подаваемого на него напряжения обратного смещения V_{DC} в диапазоне 0...30 V. С целью уменьшения СВЧ-наводок и исключения возможности возбуждения паразитных резонансов к подводящим от источника постоянного напряжения проводам подключались резисторы $R_L = 100 \text{ K}\Omega$. С помощью панорамного измерителя проведены частотные измерения коэффициентов прохождения $T = |S_{12}|^2$ (S_{ij} - элементы матрицы рассеяния) в зависимости от величины и направления магнитостатического поля при различных значениях напряжения обратного смещения, подаваемого на варактор. Невзаимность прохождения определялась как разность измеренных в децибелах коэффициентов прохождения

$$\delta^{[\text{dB}]} = T^{[\text{dB}]}(H_0^+) - T^{[\text{dB}]}(H_0^-). \quad (5)$$

Результаты представлены на рис. 5 и рис. 6 для амплитуды наложенного на структуру постоянного магнитного поля $H_0 = 850 \text{ Oe}$.

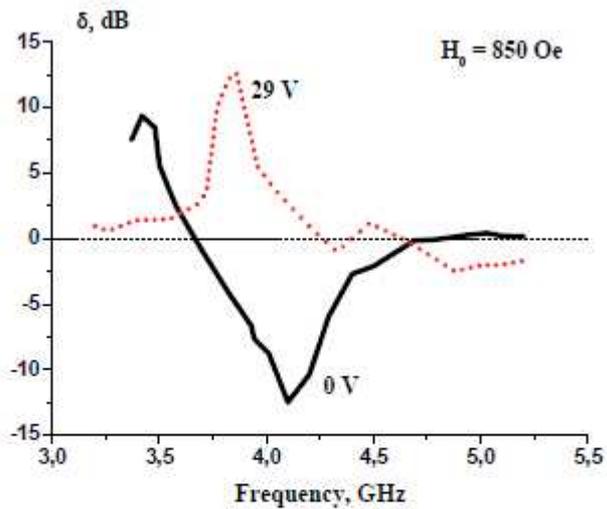


Рис. 5. Частотные зависимости невязимности прохождения микроволн при двух значениях напряжения обратного смещения на варакторе; кривые: сплошная черная при 0V и пунктирная красная при 29V [27].

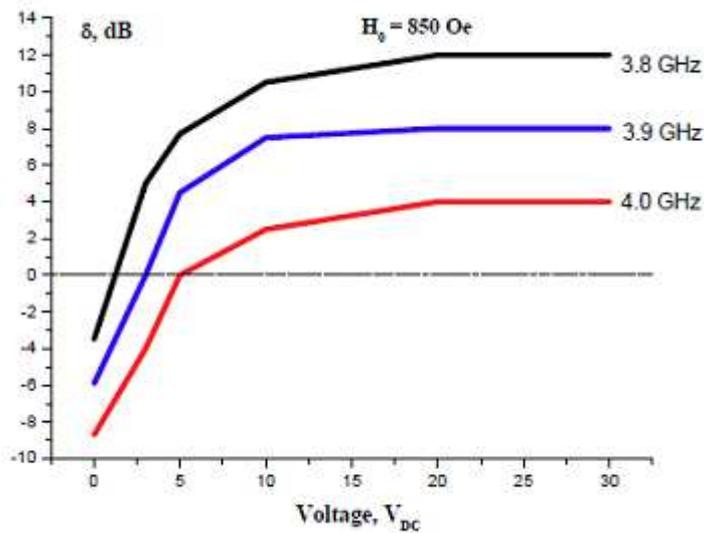


Рис. 6. Зависимости невязимности прохождения микроволн от напряжения обратного смещения на варакторе при трех значениях частоты; частоты указаны цифрами около соответствующих кривых [27].

Заключение

Как видно из приведенных графиков, результаты экспериментов качественно согласуются с вышеизложенными теоретическими выводами: в некотором диапазоне частот изменение напряжения на варакторе приводит к

инверсии невязимности прохождения микроволн с перепадом более 12.5dB. Даже в структуре всего с одним диполем достигается изменение невязимности от -5.9 до +8dB. При этом потери для прямого сигнала в отсутствие мер по согласованию были не хуже 7.5dB.

Можно ожидать, что эффект невязимности прохождения излучения будет накапливаться при построении решётки диполей с варакторами, расположенной в направлении распространения падающей волны (моделируется последовательно расположенными эквивалентными осцилляторами). В таком случае характеристики переключения невязимности будут более контрастными.

Литература

1. Микаэлян А.Л. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1963.
2. Лакс Б., Батон К. Сверхвысокоочастотные ферриты и ферритмагнетики. – М.: «Мир», 1965.
3. Oriental Magnetics Co. LTD. “Microwave Ferrite Products”, URL: http://www.magnet-china.com/microwave-ferrite_products.html (дата обращения: 10.10.2014).
4. Future Electronics. URL: <http://www.futureelectronics.com/en/diodes/switching-diodes.aspx> (дата обращения: 10.10.2014).
5. Bodger Billings, Tony Edridge. Ferrite Circulator Switches and Their Applications. // *Microwave J.*, November 1, 2003.
6. A.B. Ustinov, G. Srinivasan. Subterahertz excitations and magnetoelectric effects in hexaferrite-piezoelectric bilayers. // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, p. 142503, 2008, <http://dx.doi.org>: 10.1063/1.2996585.
7. Young-Yeal Song, Jaydip Das, Pavol Krivosik, Nan Mo, and Carl E. Patton. Electric field tunable 60 GHz ferromagnetic resonance response in barium ferrite-barium strontium titanate multiferroic heterostructures. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol. 94. P. 182505, <http://dx.doi.org>: 10.1063/1.3131042.

8. Y.K. Fetisov, G. Srinivasan. Electric field tuning characteristics of a ferrite-piezoelectric microwave resonator. // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, No 14, p. 143503, 2006.
9. А.П. Пятаков, А.К. Звездин. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики. // *УФН*. 2012. Т. 182. № 6. С. 593 - 620.
10. I. Gil, J. Garcia-Garcia, J. Bonache, F. Martin, M. Sorolla and R. Marques. Varactor-loaded split ring resonators for tunable notch filters at microwave frequencies. // *Electron. Lett.* vol. 40, p. 1347-1348, Oct. 2004.
11. Alper Genc and Reyhan Baktur. A tunable bandpass filter based on varactor loaded split-ring resonators. // *Microwave and Optical Lett.*, vol. 51, No 10, P. 2394-2396, October 2009. <http://dx.doi.org: 10.1002/mop.2464>.
12. Ilya V. Shadrivov. Pure nonlinear optical activity in metamaterials. // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, 041911, 2012, <http://dx.doi.org: 10.1063/1.4739849>.
13. Alec Rose, Da Huang, and David R. Smith. Demonstration of nonlinear magnetoelectric coupling in metamaterials. // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, 051103, 2012, <http://dx.doi.org: 10.1063/1.4738774>.
14. Polina V. Kapitanova, Alexey P. Slobozhnanyuk, Ilya V. Shadrivov, Pavel A. Belov, and Yuri S. Kivshar. Competing nonlinearities with metamaterials. // *Appl. Phys. Lett.* vol. 101, 231904, 2012, <http://dx.doi.org: 10.1063/1.4768945>.
15. Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А. Гигантский невзаимный эффект при взаимовлиянии ферромагнитного и кирального резонансов. // *Письма в ЖТФ*: 2006, Т.32, №17, С. 88-94.
16. Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А. Невзаимное прохождение микроволн в метаструктурах с поперечно намагниченной и решеткой резонансных элементов. // *Письма в ЖТФ*. 2007, Т. 33, вып. 20, С. 11 – 20.
17. В.С. Бутылкин, Г.А. Крафтмахер. Невзаимные эффекты при распространении микроволн в структуре «ферритовая пластина-решетка резонансных элементов» в волноводе. // *Радиотехника и электроника*. Т. 54. № 7. С. 816 – 823. 2009.

18. В.С. Бутылкин, Г.А. Крафтмахер, В.П. Мальцев. Поверхностные волны, направляемые пластиной из бианизотропного резонансного метаматериала. // *Радиотехника и электроника*. Т. 54. № 10. С. 1184 – 1195. 2009.
19. G.A. Kraftmakher and V.S. Butylkin. Nonreciprocal amplitude-frequency resonant response of metasandwiches “ferrite plate – grating of resonant elements. // *European Physical Journal, Applied Physics*, v. 49, 33004, 2010.
20. В.С. Бутылкин, Г.А. Крафтмахер, В.П. Мальцев. Невзаимность прохождения микроволн вдоль бианизотропно-ферритовой метаструктуры. // *Радиотехника и электроника*. Т.58 . №6. С. .600 -607. 2013. DOI: 10.1134/S1064226913060041
21. Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А. «Левая» композиционная среда на основе волноведущих структур с бианизотропным заполнением. *Радиотехника и электроника*, Т.51, №5, С. 518-532, 2006.
22. Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А. Области пропускания бианизотропного и волноводно-бианизотропного метаматериалов на основе планарных двойных разомкнутых колец. // *Радиотехника и электроника*, Т.53, №1, С. 5-1, 2008.
23. Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А. Влияние киральности на существование обратных волн в метаматериалах из резонансных планарных киральных элементов. *Радиотехника и электроника*, Т.53, №7, С. 800 – 808, 2008.
24. Г.А. Крафтмахер, В.С. Бутылкин, Ю.Н.Казанцев. Электрически управляемые частотные полосы невзаимного прохождения микроволн в метаструктурах. // *Письма в ЖТФ*, т. 39, вып.11 , с. 21 -28, 2013.
25. G.A.Kraftmakher, V.S. Butylkin, Yu. N. Kazantsev. Electrically tunable nonreciprocity of microwave transmission through “ferrite – varactor loaded resonant element” planar metastructure. // *Phys. Status Solidi C.*, 11, № 5-6, 1033-10-38, 2014. Doi: 10.1002/pssc.20130056
26. Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. - М.: «Радиотехника», 2007.
27. G.A. Kraftmakher, V.S. Butylkin, Yu.N. Kazantsev. Sign reversal of the nonreciprocity of microwave propagation in a “ferrite + varactor-loaded dipole”

metastructure without reversal of the magnetization direction // Proceedings of META' 2014, 26P-Poster Session-II, №77, P. 1-3; Metamaterials 2014 book of abstracts, p. 58. Copenhagen, Denmark, 25-30 Aug 2014, 8-th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwave and Optics.