

05

Электрически управляемая инверсия невозвратности распространения микроволн в метаструктуре феррит/нагруженный варактором диполь

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

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
Московский физико-технический институт, Долгопрудный
E-mail: gkraft@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 4 декабря 2014 г.

Показана возможность электрического управления инверсией невозвратного распространения микроволн при использовании метаструктуры, содержащей ферритовую пластину и нагруженный варактором диполь. В отличие от традиционных методов инверсия происходит без перемещения феррита и достигается изменением постоянного электрического напряжения на варакторе, обеспечивающем переход частоты резонанса диполя через частоту ферромагнитного резонанса. Эффект проявляется благодаря тому, что вблизи диполя в результате суперпозиции падающей и рассеянной волн формируется эллиптически поляризованное магнитное поле, вращающееся в одном направлении ниже и в противоположном направлении выше частоты резонанса диполя.

В последнее время обнаружено, что эффект невозвратного поглощения электромагнитного излучения поперечно-намагниченным ферритом при возбуждении ферромагнитного резонанса (FMR), являющийся физической основой многих невозвратных устройств [1], по-новому проявляется в метаструктуре при сочетании феррита с решетками резонансных проводящих элементов или отдельными элементами. Отметим появление и усиление невозвратности для линейно поляризованной волны в метаструктуре, расположенной вдоль оси прямоугольного волновода или в свободном пространстве [2,3], в то время как в случае свободного феррита без решетки невозвратность вообще отсутствует (напомним, что невозвратность наблюдается в прямоугольном волноводе при расположении ферритовой пластины в области, где магнитное поле

является циркулярно поляризованным, на расстоянии $\lambda/8$ от боковой стенки [1]).

В метаструктуре необходимое вращающееся магнитное поле формирует сама решетка резонансных элементов. Обычно при рассмотрении поверхностных волн, формируемых цепочкой диполей, основное внимание уделялось электрическому полю. Однако с наблюдением невязимных эффектов, обусловленных взаимодействием прецессирующих спинов феррита с магнитным полем поверхностной волны, появилась потребность в изучении свойств магнитного поля, формируемого диполями разной формы. В [2,3] на примере бианизотропного слоя, моделирующего решетку киральных (или дипольных) элементов, теоретически было показано, что магнитное поле является эллиптически (циркулярно) поляризованным на частотах вблизи резонанса эффективных параметров. На этих частотах в метаструктуре с ферритом существуют 2 полосы невязимного прохождения микроволн: первая в области FMR, вторая связана с резонансом дипольных элементов (DR). Обе полосы могут управляться внешним статическим магнитным полем H , а при использовании варакторов в разрывах элемента удалось наблюдать не только магнито-, но и электрически управляемые частотные полосы невязимного прохождения [4].

Такие метаструктуры, подобно магнитоэлектрическим кристаллам, обладают в микроволновом диапазоне магнитоэлектрическими свойствами, которые обнаруживают себя в виде зависимостей магнитных свойств (невязимных характеристик распространения микроволн) от статического электрического поля и в виде зависимостей электрических свойств (резонансных характеристик электрических диполей) от магнитного поля. Известно, что магнитоэлектрические свойства проявляются в мультиферроиках и гетероструктурах на основе слоев сегнетоэлектрика и ферромагнетика [5], повышенный интерес к которым наблюдается в последнее время. Это, в частности, связано с возможностью электрического (более быстрого) управления характеристиками FMR по сравнению с управлением магнитным полем, скоростные характеристики которого ограничивают сложные процессы намагничивания и перемагничивания. Электрическое управление осуществляется благодаря изменению диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика с наложением электрического поля [6].

Следует отметить, что в последние годы появились публикации, в которых высказываются идеи создания [7,8] невзаимных метаматериалов на искусственном эффекте Фарадея без феррита, не требующих приложения внешнего магнитного поля; в [9] предлагаются реализации ферритов и их альтернатива в печатной технологии по результатам измерений S -параметров на уровне 50–70 dB.

Данная работа посвящена невзаимности на основе FMR в метаструктуре феррит/нагруженный варактором диполь в условиях сосуществования и влияния FMR и DR. Предлагается и реализуется метод электрического управления знаком невзаимности распространения микроволн. Метод основан на результатах теоретического анализа поля вблизи диполя, на зависимости знака невзаимности от взаимоположения FMR относительно DR, а также на возможности изменения этого взаимоположения путем перестройки частоты DR с изменением постоянного электрического напряжения V_{DC} , подаваемого на контакты варактора. Эффект наблюдался с разными диполями — „бабочка“, „змеяка“, „кольцо“, киральными двойными разомкнутыми кольцами. Важным является выбор типа варактора. Варактор MA46H120 оказался предпочтительнее по сравнению с SMV и BB857. Для апробации используются измеритель коэффициента стоячей волны по напряжению панорамный P2-58 и одноканальный метод измерений при помещении метаструктуры (рис. 1) вдоль оси волновода (48×24 mm).

Теоретически показано, что даже вблизи одиночного диполя, возбуждаемого плоской волной, на частотах, примыкающих к DR, в результате суперпозиции падающего поля и рассеянного диполем формируется эллиптически поляризованное переменное магнитное поле. При этом вектор магнитного поля вращается в одном направлении ниже и в противоположном направлении выше частоты DR. Учет суперпозиции полей ранее не рассматривался, исследования ограничивались только рассеянным линейно поляризованным электрическим полем. По-видимому, это было связано с основным применением диполя в качестве излучающей антенны, и внимание было направлено на его излучающие свойства.

Моделируя диполь эквивалентным осциллятором с индуктивностью, сопротивлением и перестраиваемой емкостью, можно показать, что взаимно перпендикулярные проекции комплексных амплитуд полного магнитного микроволнового поля имеют различные величины и фазы,

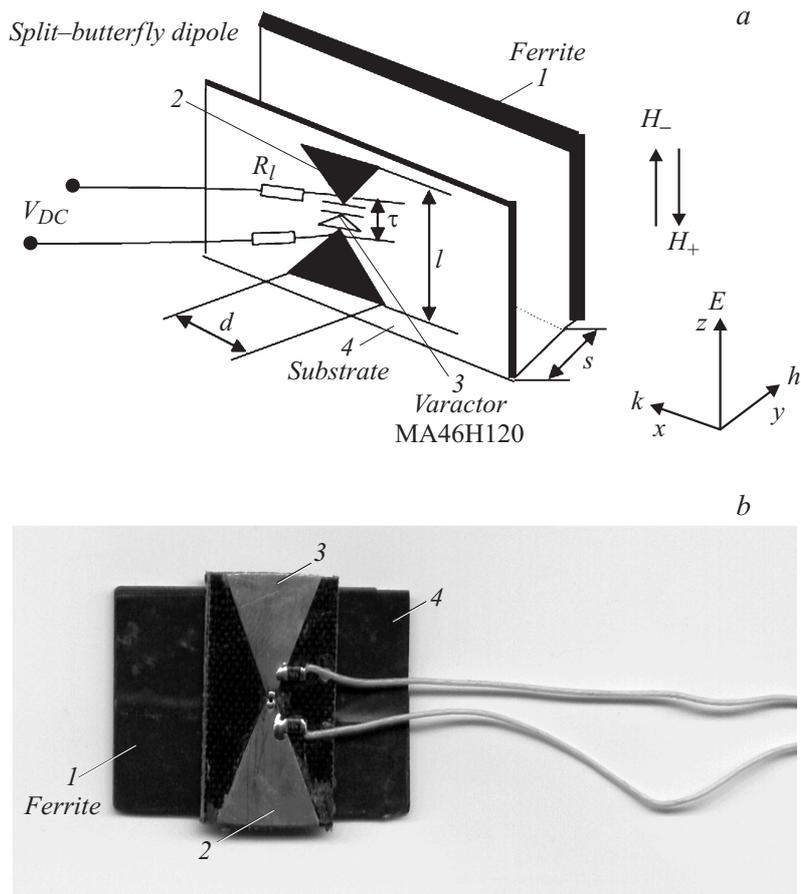


Рис. 1. Планарная метаструктура, содержащая ферритовую пластину 1 ($30 \times 20 \times 1.4$ mm) и разомкнутый диполь „бабочка“ 2 , нагруженный варактором МА46Н120 3 . Подложка из гетинакса 4 , резисторы $R_L = 100$ k Ω , $\tau = 0.5$ mm, $d = 10$ mm, $s = 6.5$ mm: схема (a), фото (b).

поэтому конец вектора полного магнитного поля движется по эллиптическим траекториям, причем направление его вращения зависит от соотношения между фазами проекций. Поведение нормированного

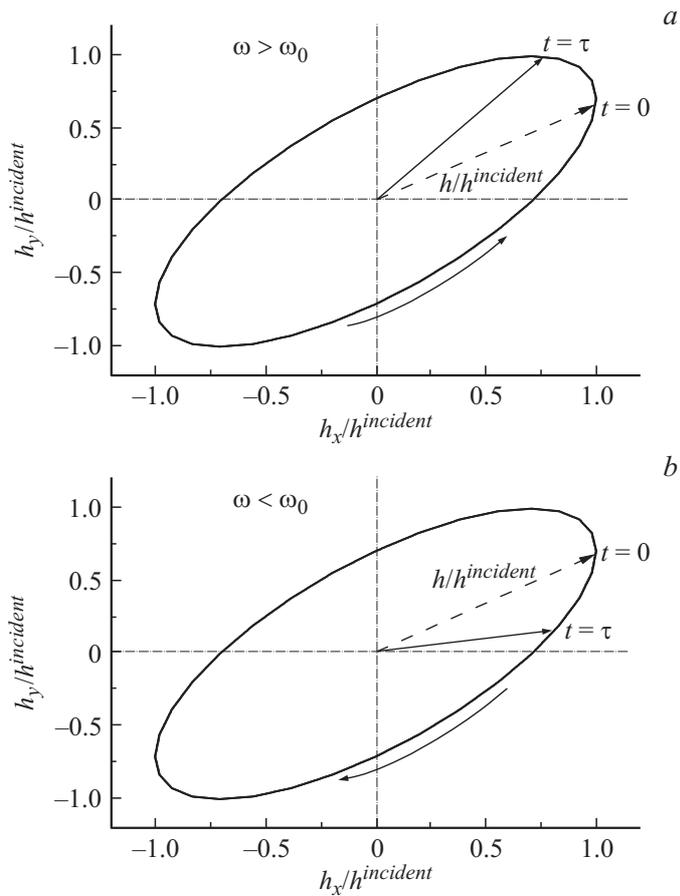


Рис. 2. Поведение полного нормированного магнитного поля волны вблизи диполя в некоторой точке \mathcal{M} . Штриховые стрелки изображают поле в момент времени $t = 0$, сплошные — $t < \pi/2\omega$. *a* — $\omega > \omega_0$, *b* — $\omega < \omega_0$, ω_0 — частота DR. Эллипсы изображают траектории, описываемые концом вектора магнитного поля.

магнитного поля для точки \mathcal{M} (справа от диполя) представлено на рис. 2. Вектор магнитного поля вращается против часовой стрелки на

частотах выше резонансной частоты диполя ω_0 (рис. 2, *a*) и по часовой стрелке на частотах ниже этой частоты (рис. 2, *b*). При переходе в точку \mathcal{M} (слева от диполя) направление вращения магнитного поля меняется. В ферритовом образце, помещенном около диполя (например, вблизи точки \mathcal{M}), возникает эллиптически поляризованное магнитное поле, направление вращения которого меняется: 1) при перестройке частоты диполя (например, с помощью варактора) и 2) при перемене взаимного расположения диполя и феррита (переносе его в точку \mathcal{M}'). В случае неизменного направления внешнего магнитостатического поля $H(\uparrow z)$ это приведет к перемене знака невязимности прохождения микроволн через такую структуру. Приведем результаты измерений для метаструктуры с диполем „бабочка“ и варактором МА46Н120 (рис. 1). Измеряя частотные зависимости коэффициентов прохождения T , определяем параметр невязимности $\delta = T(H_-) - T(H_+)$ как разницу в прохождении при противоположных направлениях намагничивания, что соответствует смене направления распространения микроволн.

В отсутствие статического магнитного поля наблюдаем резонансный минимум, обусловленный резонансом диполя (DR), который может управляться напряжением обратного смещения V_{DC} , подаваемого на варактор (рис. 3, *a*). Так, при $H = 0$ и $V_{DC} = 0$ резонансный отклик $DR_{0,0}$ наблюдается на частоте 3.6 GHz, с увеличением напряжения V_{DC} резонанс смещается и при $V_D = 20$ V наблюдается на частоте 4.85 GHz.

В присутствии поперечного поля H возбуждается FMR и при увеличении H движется в сторону высоких частот. В этом случае метаструктура характеризуется двумя резонансными откликами, обусловленными DR и FMR. С приближением FMR к DR наступает режим связанных резонансов, и резонансные отклики приобретают невязимные свойства с противоположными знаками невязимности, при этом с изменением H смещается не только FMR, но и частота DR. Ферромагнитный и дипольный резонансы легко распознаются по отклику на управляющие поле H и напряжение V_{DC} . Знак невязимности в области FMR зависит от положения DR. С изменением позиции „DR выше FMR“ к позиции „DR ниже FMR“ меняется направление вращения микроволнового магнитного поля и соответственно знак невязимности. Допустим, при наложении поля H_+ FMR возбуждается на частоте 4 GHz, выше $DR_{0,0}$ и при этом направления прецессии спинов и вращения магнитного микроволнового поля являются левыми и совпадают, феррит поглощает энергию электромагнитного поля (знак

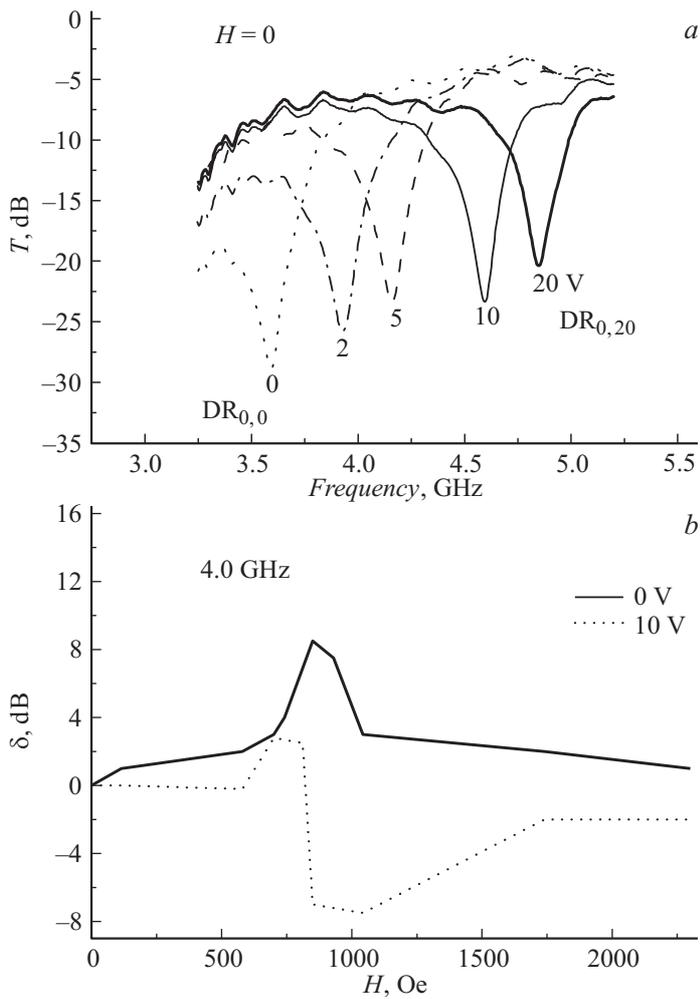


Рис. 3. *a* — частотные зависимости коэффициентов прохождения T в прямоугольном волноводе с метаструктурой в области резонанса диполя DR при $H = 0$ и разных напряжениях смещения V_{DC} . $DR_{0,0}$ соответствует $H = 0$ и $V_{DC} = 0$, $DR_{0,20}$ соответствует $H = 0$ и $V_{DC} = 20 \text{ V}$. *b* — параметр невязимости $\delta = T(H_-) - T(H_+)$, измеренный на частоте $f = 4 \text{ GHz}$ в зависимости от величины магнитного поля H при $V_{DC} = 0 \text{ V}$ (сплошная кривая) и $V_{DC} = 10 \text{ V}$ (пунктирная кривая).

невязимности прохождения микроволн является положительным). С изменением напряжения V_{DC} положение FMR меняется незначительно, в отличие от DR, и при некотором значении V_{DC} может оказаться ниже DR. В этом случае на частотах FMR направление вращения микроволнового магнитного поля меняется на правое, а направление прецессии спинов сохраняется левым, феррит не поглощает энергии электромагнитного поля (знак невязимности прохождения микроволн становится отрицательным).

Убедительной проверкой является измерение зависимостей δ от величины магнитного поля на фиксированной частоте при разных напряжениях смещения (рис. 3, *b*). На рис. 3, *b* представлены результаты измерений, проведенные на частоте 4 GHz, из которых видно, что при определенных величинах поля $H = 850\text{--}1000$ Oe положительный параметр δ при $V_{DC} = 0$ V становится отрицательным при $V_{DC} = 10$ V.

Таким образом, с помощью простейшей метаструктуры, содержащей ферритовую пластину и одиночный диполь, нагруженный варактором, продемонстрирована возможность электрического переключения невязимного распространения микроволн подачей постоянного напряжения на варактор, в результате чего меняется направление вращения эллиптически поляризованного микроволнового магнитного поля. Обычно инверсия невязимного распространения осуществлялась переключением направления внешнего магнитного поля, результатом чего являлось изменение направления спиновой прецессии в феррите. Возможность электрически управлять инверсией знака невязимности без изменения направления намагничивания может на порядки повысить быстродействие управления по сравнению с управлением магнитным полем. При этом для возбуждения FMR электромагнит можно заменить постоянным магнитом. Это обеспечит отсутствие расхода энергии на протекание постоянных электрических токов и облегчит переход к более высоким частотам. Кроме этого, трудности, обусловленные необходимостью больших постоянных магнитных полей для возбуждения FMR в коротковолновых диапазонах, можно преодолеть, используя гексаферриты с большими внутренними полями анизотропии.

Предлагаемые метаструктуры и методы управления могут быть востребованы в информационных и энергосберегающих технологиях для разработки быстро управляемых невязимных систем.

Список литературы

- [1] *Микаэлян А.Л.* Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 664 с.
- [2] *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П.* // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 10. С. 1184–1195.
- [3] *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П.* // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 6. С. 600–607.
- [4] *Крафтмахер Г.А., Бутылкин В.С., Казанцев Ю.Н.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 11. С. 21–28.
- [5] *Пятаков А.П., Звездин А.К.* // УФН. 2012. Т. 182. № 6. С. 593–620.
- [6] *Young-Yeal Song, Jaydip Das, Pavol Krivosik, Nan Mo, Carl E. Patton* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 182 505.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3131042>
- [7] *Davoyan A., Engheta N.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 047 401.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.111.047401>.
- [8] *Sounas D.L., Caloz C., Alu A.* // Nature Communications. 2013. V. 4. N 2407.
- [9] *Kodera T., Sounas D.L., Caloz C.* // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. 2012. V. 11. P. 1454–1457.