

05.2;06.3

Электрически управляемые частотные полосы невзаимного прохождения микроволн в метаструктурах

© 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 15 ноября 2012 г.

При измерениях в прямоугольном волноводе коэффициентов прохождения линейно-поляризованных микроволн вдоль метаструктуры из поперечно-намагниченной ферритовой пластины и дважды разомкнутого кольца с варакторами обнаружены наряду с ферромагнитным резонансом резонансные области невзаимного прохождения, управляемые в отличие от ферромагнитного резонанса электрическим полем. Эффект проявляется в магнитных полях, существенно меньших поля, возбуждающего на этих частотах ферромагнитный резонанс.

Электрически управляемого невзаимного прохождения микроволн нельзя добиться с помощью известных природных материалов или традиционных ферромагнетиков.

В настоящее время интерес к метаматериалам не ослабевает благодаря новым подходам к созданию метаструктур, обладающих свойствами, которые не существуют в природе. Ранее широкий отклик получили метаматериалы, содержащие проводящие немагнитные резонансные элементы, но тем не менее обладающие на микроволнах и в оптике искусственным магнетизмом и отрицательным преломлением. В последнее время особый интерес вызывают метаматериалы, содержащие различные комбинации включений и обладающие свойствами, которые не являются результатом простого наложения свойств этих включений. Так, неаддитивные невзаимные эффекты наблюдались с метаструктурами „поперечно-намагниченная ферритовая пластина—решетка резонансных элементов“. При расположении метаструктуры по оси волновода или в свободном пространстве наблюдалось невзаимное прохождение микроволн на частоте ферромагнитного резонанса (FMR), тогда как в случае свободного феррита оно отсутствовало [1]. В [2] наблюдалось

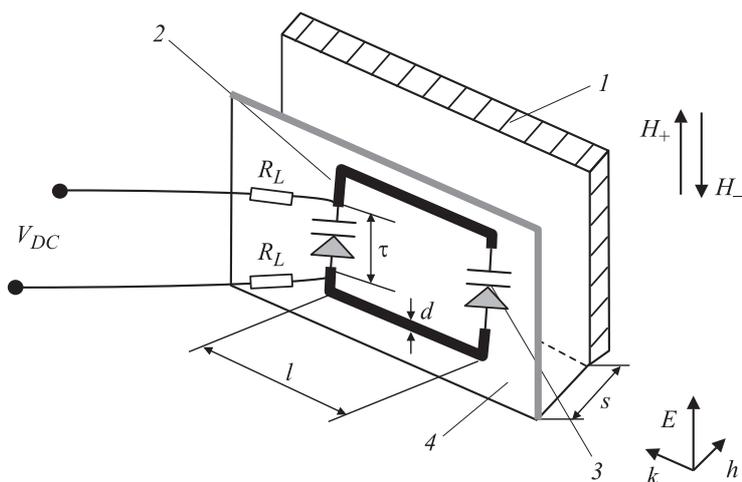


Рис. 1. Планарная метаструктура „ферритовая пластина l – дважды разомкнутое кольцо 2 , нагруженное двумя варакторами ВВ857 3^x , подложка из гетинакса 4 , резисторы $R_L = 100 \text{ k}\Omega$, $l = 18 \text{ mm}$, $\tau = 1.5 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ mm}$.

независимое расщепление резонанса на множество пиков на частотах решетки. В [3] показано, что при использовании спиралей с внедренным нелинейным элементом (варактором) достигается нелинейная оптическая активность, а в [4] демонстрируется нелинейная магнитоэлектрическая связь на микроволнах. В этом случае метаматериал приобретает новые свойства, которых нет в естественных материалах.

В данной работе предлагается метаструктура, которая позволяет достичь управляемого не только магнитным, но и электрическим постоянным полем независимого прохождения микроволн. До сих пор способы управления независимостью в известных материалах, включая метаматериалы, ограничивались лишь магнитным полем. С другой стороны, в последние годы успешно развивается электрическое управление резонансным откликом с помощью варакторов, встраиваемых в разрывы резонансных элементов, предложенное в [5] для двойного разомкнутого кольца. Емкость варакторов и соответственно частоту резонансного отклика можно менять, изменяя величину постоянного напряжения обратного смещения, подаваемого на контакты варактора.

Исследуемая метаструктура изображена на рис. 1. Она содержит пластину железо-иттриевого гранта $3\text{Y}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$ ($30 \times 20 \times 1.4 \text{ mm}$),

рядом с которой параллельно на расстоянии s располагается на подложке из гетинакса толщиной 0.5 mm дважды разомкнутое кольцо, выполненное на основе фольгированной медью полиамидной пленки. В разрывы кольца τ симметрично впаяны навстречу друг другу два варактора ВВ857, емкость которых меняется от 6.5 до 0.65 pF при подаче постоянного напряжения обратного смещения V_{DC} от 0 до 30 V. Размеры кольца выбраны так, чтобы резонансный отклик в отсутствие магнитного поля наблюдался в заданном диапазоне 3–6 GHz панорамного измерителя КСВН. К подводящим от источника постоянного напряжения проводам подключены резисторы $R_L = 100 \text{ k}\Omega$, чтобы уменьшить СВЧ-наводки и исключить возможность возбуждения паразитных резонансов. Метаструктура помещается в прямоугольный волновод ($48 \times 24 \text{ mm}$) параллельно боковой стенке так, чтобы ферритовая пластина была расположена по оси волновода. Поле E параллельно линии, соединяющей разрыв кольца. Измеряются частотные зависимости коэффициентов прохождения T при разных величинах поперечного магнитного поля, параллельного ферритовой пластине, H_+ и H_- соответствуют разным направлениям намагничивания. Исследуется эволюция T с изменением величины постоянного напряжения обратного смещения V_{DC} .

На рис. 2, a , b приведены частотные зависимости T с метаструктурой при $s = 3 \text{ mm}$, $H = 500 \text{ Oe}$ (a), $H = 900 \text{ Oe}$ (b). Из рис. 2, a видно, что в отсутствие магнитного поля ($H = 0$) и при отсутствии напряжения обратного смещения ($V_{DC} = 0$) на частоте 4.2 GHz наблюдается резонансный минимум $I_{0,0V}$, зависящий от геометрии кольца. Кривую $I_{0,0V}$ можно эффективно смещать в положение $I_{H,DC}$ в ограниченном частотном интервале с наложением поля H и (или) подавая напряжение V_{DC} . Так, с наложением поля $H = 500 \text{ Oe}$ (рис. 2, a) резонансный минимум T (кривая $I_{H,0V}$) наблюдается на частоте 4.6 GHz, смещение частоты резонансного минимума T относительно первоначального положения $I_{0,0V}$ составляет $\Delta f_H = f(I_{H,0V}) - f(I_{0,0V}) = 0.4 \text{ GHz}$. При этом прохождение микроволн в области резонанса $I_{H,0V}$ становится невязимым. В области $I_{H,0V}$ параметр невязимости $\delta = T_{H^+} - T_{H^-}$, определяемый как разница в прохождении при противоположных направлениях намагничивания или при смене направления распространения микроволн, достигает 15.5 dB. С подачей напряжения обратного смещения область невязимого прохождения смещается, при $V_{DC} = 20 \text{ V}$, резонансный минимум $T(I_{H,20V})$ наблюдается на частоте 5.25 GHz, смещение $\Delta f_{DC} = f(I_{H,20V}) - f(I_{H,0V}) = 0.65 \text{ GHz}$, и параметр δ практически сохраняется ($\delta_{DC} = 12.8 \text{ dB}$). При этом невязимый резонансный

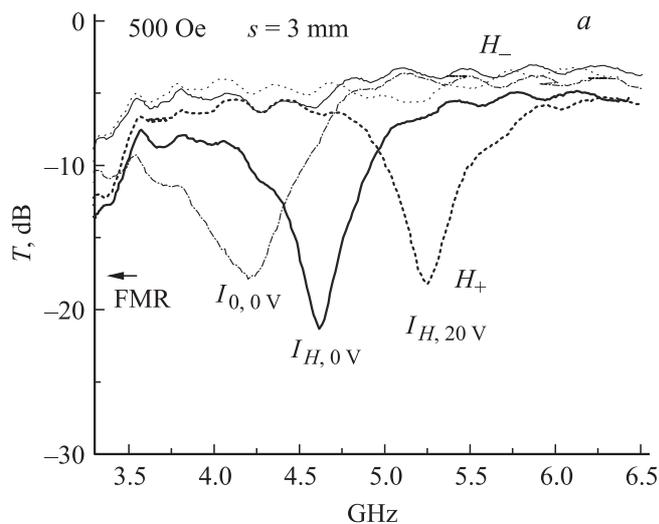


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента прохождения T в прямоугольном волноводе с метаструктурой, расстояние между ферритовой пластиной и кольцом $s = 3$ мм (a, b), $s = 0$ (c, d, e), $H = 500$ Ое (a, c); $H = 900$ Ое (b), $H = 800$ Ое (d), $H = 1600$ Ое (e). Кривые для H_+ (жирные) и H_- (нежирные) соответствуют разным направлениям намагничивания, т.е. разным направлениям прецессии спинов; сплошные кривые соответствуют отсутствию напряжения обратного смещения, пунктирные кривые соответствуют $V_{DC} = 20$ В, штрихпунктирная кривая соответствует $H = 0$ и $V_{DC} = 0$.

отклик $I_{H,DC}$ наблюдается в магнитном поле, существенно меньшем, чем в случае возбуждения FMR на этой частоте. Кроме этого, отклик $I_{H,DC}$ управляется в ограниченном частотном диапазоне, что позволяет его легко распознать и отличить от отклика FMR. При $H = 500$ Ое FMR возбуждается на более низких частотах (вблизи 3 GHz) и в отличие от свободного феррита в области FMR на определенных частотах наблюдается зависимость от направления поля H .

С увеличением поля H FMR движется в сторону высоких частот, приближаясь к области резонанса $I_{H,DC}$. При этом возникает бифуркационный эффект: наряду с резонансом $I_{H,DC}$ возбуждается резонанс $I'_{H,DC}$ ниже $I_{0,0V}$. Рис. 2, b демонстрирует электрически управляемое невзаимное прохождение в условиях бифуркации при

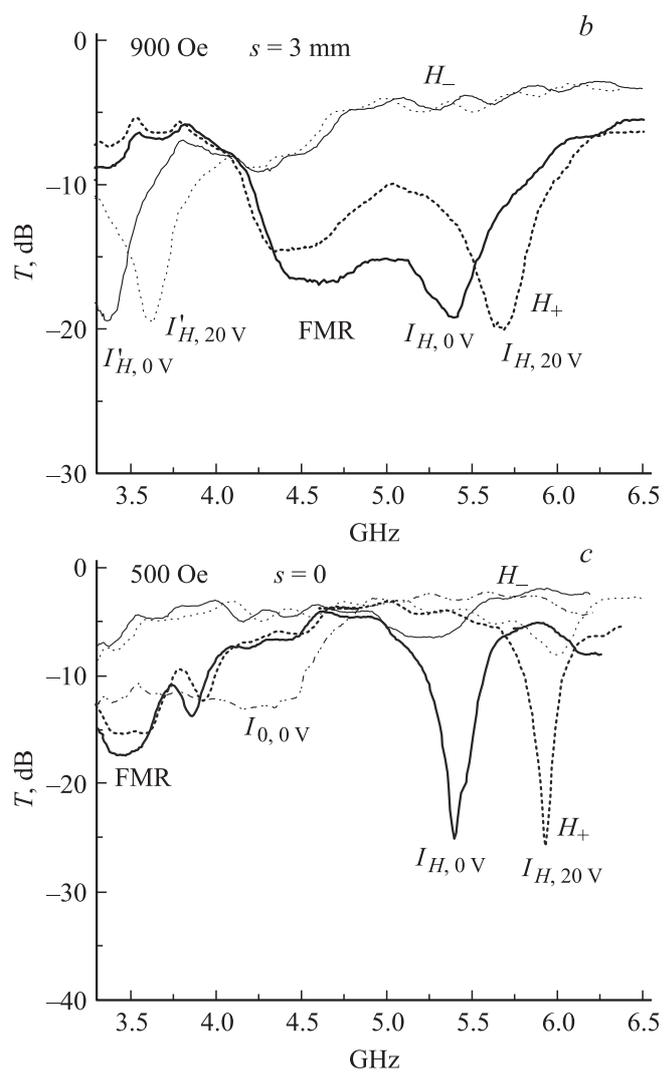


Рис. 2 (продолжение).

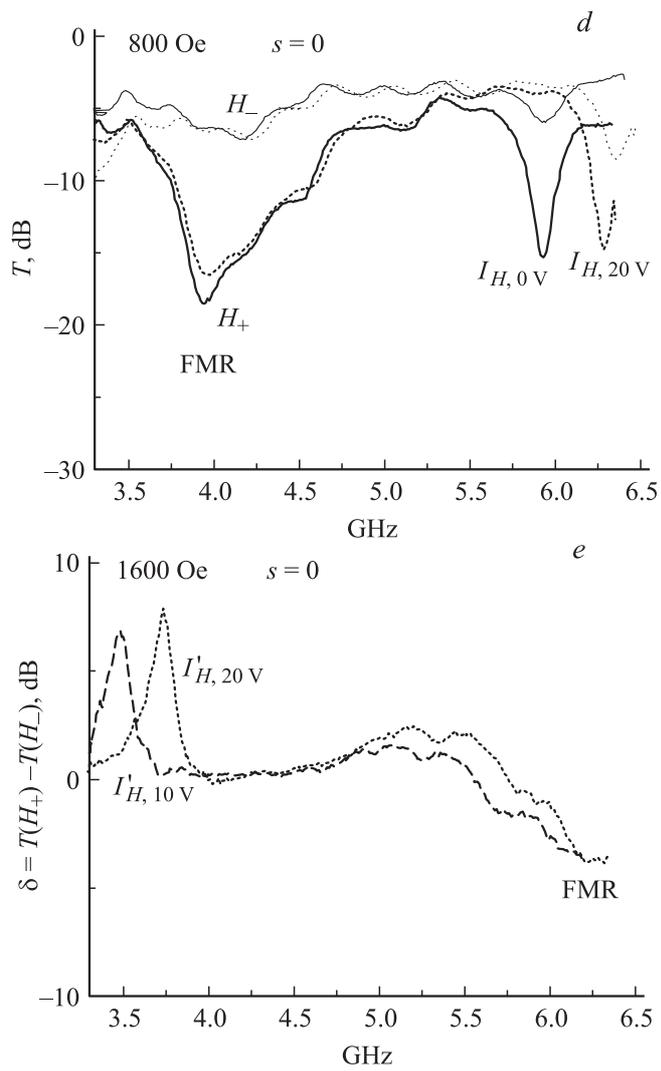


Рис. 2 (продолжение).

наложении поля $H = 900$ Ое, когда FMR достигает первоначального положения $I_{0,0V}$. В этом случае резонансная область $I_{H,0V}$ находится на частотах 5.4 GHz, сместившись от первоначального положения (4.2 GHz) на $\Delta f_H = 1.2$ GHz, а область $I'_{H,0V}$ проявляется с другим знаком невязности δ на частотах 3.36 GHz. Обе резонансные области $I_{H,0V}$ и $I'_{H,0V}$ электрически управляются и сохраняют параметр невязности, смещаясь при $V_{DC} = 20$ V в положение $I_{H,20V}$ и $I'_{H,20V}$ соответственно на $\Delta f_{DC} = 0.29$ GHz и $\Delta f'_{DC} = 0.27$ GHz к частотам 5.69 и 3.63 GHz. В свою очередь прохождение в области FMR является невязным, при этом при подаче напряжения обратного смещения $V_{DC} = 20$ V меняется величина невязности, а частотная полоса FMR практически не сдвигается в отличие от областей I и I' .

Уменьшая расстояние s и тем самым усиливая связь между ферритом и кольцом, можно увеличить диапазон перестройки резонанса I с помощью магнитного поля. На рис. 2, *c–e* представлены результаты исследований в случае $s = 0$. Как видно из рис. 2, *c* при наложении поля $H = 500$ Ое резонанс $I_{0,0V}$ смещается на $\Delta f_H = 1.1$ GHz от первоначального положения 4.3 GHz к частоте 5.4 GHz, что существенно превышает соответствующее смещение в случае $s = 3$ mm. При этом увеличивается также параметр невязности ($\delta = 19$ dB), который сохраняется с изменением V_{DC} от 0 до 20 V, когда область невязного прохождения $I_{H,DC}$ дополнительно смещается на $\Delta f_{DC} = 0.53$ GHz. С дальнейшим увеличением магнитного поля ($H = 800$ Ое, рис. 2, *d*) и приближением FMR наряду с продолжающимся частотным смещением наблюдается ослабление резонансного минимума $I_{H,DC}$ коэффициента прохождения T и уменьшение параметра невязности ($\delta = 9.4$ dB). При этом с изменением V_{DC} от 0 до 20 V область невязного прохождения $I_{H,DC}$ смещается на $\Delta f_{DC} = 0.35$ GHz, тогда как частотная полоса невязного прохождения в области FMR практически не сдвигается. Здесь резонанс $I'_{H,DC}$ проявляется на частотах ниже диапазона панорамного измерителя КСВ. В пределах измеряемого диапазона нельзя непосредственно измерить расстояние между пиками I и I' , поскольку с увеличением поля H и проявлением резонанса I' в данном диапазоне резонанс I становится ненаблюдаемым, смещаясь в сторону высоких частот за пределы измеряемого диапазона. Таким образом, в случае $s = 0$ расстояние $\Delta f_{II'}$ между пиками $I_{H,DC}$ и $I'_{H,DC}$ больше предела диапазона измерений (3–6 GHz), что существенно превышает $\Delta f_{II'} = 2$ GHz для $s = 3$ mm (рис. 2, *b*). С последующим увеличением поля FMR приближается к резонансу $I_{H,DC}$ и, сливаясь

с ним, удаляется в сторону высоких частот. Резонанс $I'_{H,DC}$ приближается к первоначальному положению, при этом невзаимность прохождения микроволн в области $I'_{H,DC}$ падает (рис. 2, *e*). В больших магнитных полях, когда FMR находится далеко от резонанса $I'_{H,DC}$, свойства FMR приближаются к FMR свободного феррита, а свойства резонанса $I'_{H,DC}$ приближаются к свободному кольцу, для которого ферритовая пластина играет роль диэлектрической подложки. При этом невзаимность прохождения микроволн как в области FMR, так и в области резонанса $I'_{H,DC}$ исчезает совсем.

Таким образом, обнаружено, что связанный с кольцом резонансный отклик I в присутствии магнитного поля H является невзаимным, а его частота и интенсивность меняются с изменением величины H . Это обусловлено взаимодействием прецессирующих спинов феррита с магнитным полем поверхностной волны, формируемой кольцом. Обнаружено также, что при изменении напряжения V_{DC} на варакторе от 0 до 20 В вместе с перестройкой частоты I перестраивается и полоса невзаимного прохождения. Перестройка с сохранением параметра невзаимности, равного 19 dB, достигает 10%.

Исследуемые метаструктуры представляют несомненный интерес для разработки быстроуправляемых невзаимных устройств.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 11-02-90403, 10-08-00018).

Список литературы

- [1] Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 20. С. 11–20.
- [2] Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 9. С. 15–24.
- [3] Iya V. Shadrivov // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 041911.
- [4] Alec Rose, Da Huang, David R. Smith // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 051103.
- [5] Gil I., Garcia-Garcia J., Bonache J., Martin F., Sorolla M., Marques R. // Electronics Lett. 2004. V. 40. N 21. P. 1347–1348.