

05;09

Невзаимность спектра пропускания мета-сэндвичей „ферритовая пластина—решетка резонансных элементов“ с расщеплением резонанса

© В.С. Бутылкин, Г.А. Крафтмахер

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

Поступило в Редакцию 10 ноября 2008 г.

Обнаружено, что при распространении микроволн вдоль структуры из ферритовой пластины и расположенной на ней или вблизи нее решетки проводящих резонансных элементов наряду с невзаимностью прохождения происходит невзаимное расщепление микроволнового резонанса на частотах решетки и расширение полосы при наложении поперечного постоянного магнитного поля, на порядок меньшего поля, возбуждающего ферромагнитный резонанс. Знак невзаимности изменяется при перемещении феррита на другую сторону от решетки, а также при достижении постоянным магнитным полем значений, при которых меняется знак разности между частотами ферромагнитного резонанса и резонанса решетки.

PACS: 04.30.Nk

В [1] обнаружено увеличение невзаимности прохождения электромагнитных волн более чем на два порядка на частоте ферромагнитного резонанса (ФМР). Эффект наблюдался в волноводе с поперечно-намагниченной ферритовой пластиной, расположенной параллельно боковой стенке на расстоянии $a/2$ ($2a$ — размер широкой стенки) при внедрении вдоль осевой плоскости волновода решетки двойных разомкнутых колец (расстояние до феррита 12 mm). В [2,3] невзаимность наблюдалась при помещении параллельного решетке феррита по оси прямоугольного волновода и в свободном пространстве, что не имеет места в отсутствие решетки. Исследовались разные решетки, расположенные на некотором расстоянии (2–10 mm) от ферритовой пластины: на основе как киральных элементов (двойные разомкнутые

кольца), так и электродипольных (многоугольные петли и Г-образные диполи).

Было высказано предположение о том, что невязанность обусловлена формированием решеткой микроволн с вращающимся магнитным полем и различным поглощением ферритом волн с направлением вращения магнитного поля, совпадающим с направлением прецессии спинов в феррите, и волн с противоположным направлением вращения магнитного поля. Наибольшая невязанность наблюдалась на частоте ФМР при магнитостатическом поле H определенной величины, зависящей от расстояния между ферритом и решеткой, что объясняется [1,3] установлением режима связанных резонансов — ФМР и резонанса в элементах решетки (РЭР) — при приближении ФМР к РЭР.

Известно, что в невязанных устройствах, содержащих слои феррита и диэлектрика, взаимодействие волны и феррита максимально при расположении феррита в области наибольшего потока энергии, при условии, что поляризация магнитного поля в этой области близка к круговой [4]. Моделируя поля микроволн в волноводе с решеткой полями, создаваемыми в нем слоем метаматериала, характеризуемого диагональными тензорами диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей и тензором киральности κ , можно показать, что в воздушных промежутках поляризации магнитного поля волны является в общем случае эллиптической. При этом направлении вращения магнитного поля с разных сторон от слоя противоположны. Волна может быть медленной (эффективный показатель преломления $n > 1$) или быстрой ($n < 1$). Из выражений для вектора Пойнтинга следует, что у медленных волн поток энергии максимален на границах воздух–метаматериал. У быстрых волн это имеет место в низших модах, с которыми обычно имеют дело в экспериментах. Тем не менее размещение решетки на поверхности ферритовой пластины не позволило достичь гигантской невязанности в частотной области ФМР. Видимо, такая конфигурация не оптимальна из-за того, что связь между ферритом и решеткой максимальна и режим связанных резонансов достигается тогда, когда ФМР находится еще не очень близко к частоте РЭР и поляризация магнитного поля микроволны в области ФМР отличается от круговой. Можно показать, что в середине волновода поляризация магнитного поля медленных волн близка к круговой при $n \gg 1$. Круговая магнитная поляризация быстрых волн в центре волновода получается при $n \ll 1$. В области РЭР дисперсионные изменения показателя

преломления наиболее значительны, и в ней могут достигаться и малые, и очень большие значения показателя преломления. Поэтому именно в области РЭР невзаимность пропускания может быть максимальной.

В связи с этим представляет интерес изучение невзаимных свойств в области РЭР в мета-сэндвичах „ферритовая пластина—решетка резонансных элементов“ с расположением резонансных элементов на ферритовой пластине или вблизи нее. Изложенное относится и к случаю решеток из дипольных элементов с тем упрощающим отличием, что при этом тензор магнитной проницаемости — единичный, а тензор киральности — нулевой.

В настоящей работе исследовались дипольные (зигзагообразные) и киральные (двойные разомкнутые кольца) элементы размером много меньше длины волны, как одиночные, так и их цепочки и решетки при помещении мета-сэндвичей с ферритовой пластиной $3\text{Y}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$ ($30 \times 20 \times 1 \text{ mm}$) вдоль оси стандартного прямоугольного волновода ($48 \times 24 \text{ mm}$) параллельно боковой стенке и в запредельной прямоугольной секции ($16 \times 24 \text{ mm}$), как показано на рис. 1. Исследуемые мета-сэндвичи отличаются от структур [1–3] тем, что решетка и феррит расположены практически вплотную, что позволило благодаря сильной связи феррита с элементами решетки обнаружить новые невзаимные эффекты и эффективное управление резонансными свойствами на частоте решетки. Ширина проводящего слоя в элементах была равна 0.8 mm . Решетки изготовлены методами фотолитографии и компьютерной печати на гибких фольгированных пленках, толщина проводящего (медного) слоя составляла 0.018 mm , толщина диэлектрической пленки — 0.12 mm . Измерялись частотные зависимости коэффициентов прохождения T при наложении поперечного магнитного поля H , направленного параллельно ферритовой пластине и перпендикулярно широкой стенке волновода по аналогии с [1–3]. Приведенные рисунки демонстрируют эволюцию резонансного отклика в области РЭР (I). Область проявления РЭР при $H = 0$ будем называть РЭР-0, соответствующую область при наложении $H = 100 \text{ Oe}$ назовем РЭР-100 и т.д. С увеличением поля H происходит изменение интенсивности РЭР и колебание его частоты в ограниченной области около соответствующего отсутствию намагничения положения РЭР-0, в то время как частота ФМР с увеличением поля H растет.

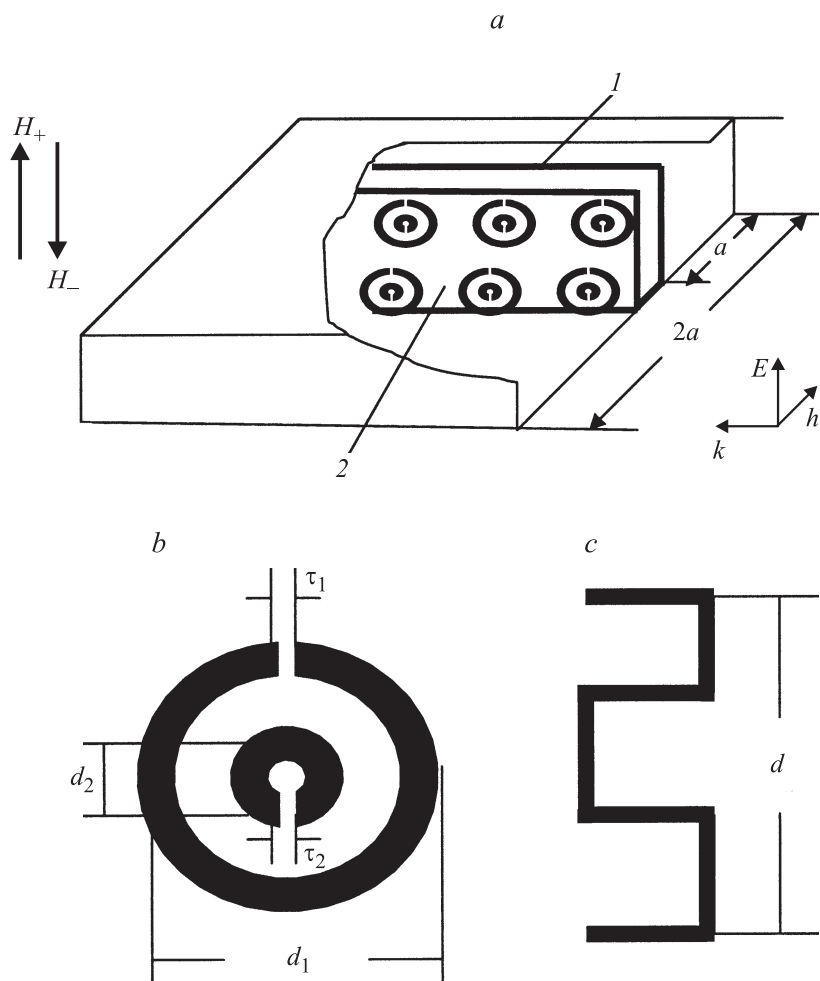


Рис. 1. Мета-сэндвич „ферритовая пластина 1–решетка резонансных элементов 2“ в прямоугольном волноводе, H_+ и H_- указывают противоположные направления внешнего поперечного магнитного поля (a); двойное разомкнутое кольцо: $d_1 = 6.6$ mm, $d_2 = 4.6$ mm, $\tau_1 = 0.2$ mm, $\tau_2 = 0.4$ mm (b); зигзагообразный диполь $d = 8$ mm (c).

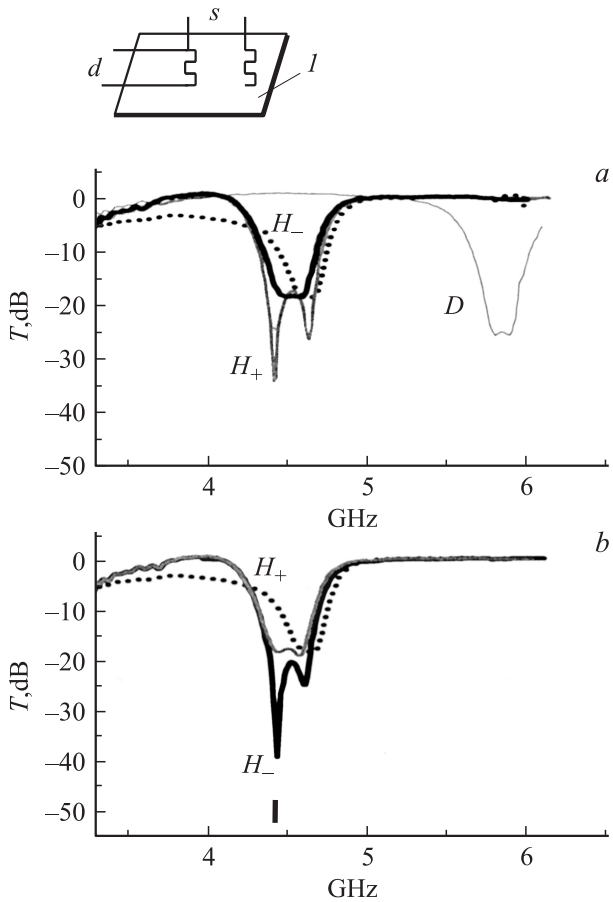


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента прохождения T в прямоугольном волноводе с мета-сэндвичем „поперечно-намагниченная ферритовая пластина и два зигзагообразных дипольных элемента“, расстояние между ними $s = 10$ mm, $H = 50$ Oe; ферритовая пластина l слева от элементов (*a*); ферритовая пластина справа от элементов (*b*); мета-сэндвич в запердельном волноводе (*c*). Кривые для H_+ (нежирные) и H_- (жирные) соответствуют разным направлениям намагничивания, т. е. разным направлениям прецессии спинов; пунктирные кривые соответствуют T в отсутствие намагничивания. Кривая D — резонанс в отсутствие феррита, T_0 — зависимость в запердельном волноводе в отсутствие мета-сэндвича.

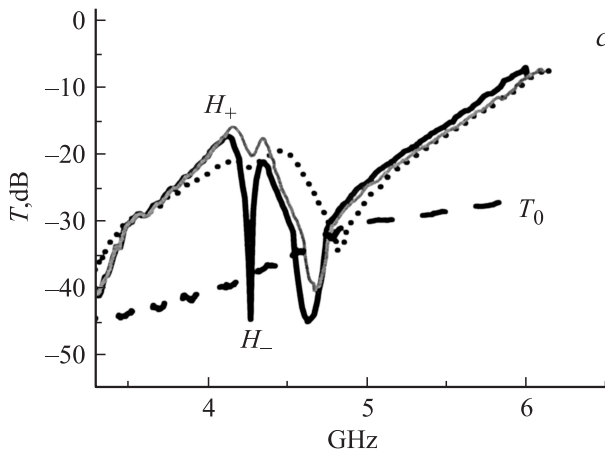


Рис. 2 (продолжение).

На рис. 2, *a, b* приведены частотные зависимости T в области РЭР для мета-сэндвича с двумя зигзагообразными дипольными элементами при наложении $H = 50$ Ое. Рис. 2, *a* соответствует расположению ферритовой пластины слева от цепочки. На рис. 2, *b* приведены частотные зависимости T при расположении феррита справа от цепочки диполей. При наложении поля H резонансная кривая смещается. При этом наблюдается увеличение интенсивности и раздвоение резонанса в поле H_+ , когда ферритовая пластина расположена слева от цепочки. При расположении феррита справа от решетки раздвоение и усиление резонанса происходят в поле H_- . Рис. 2, *c* демонстрирует невзаимное раздвоение резонанса в запердельном волноводе. Отметим, что обсуждаемые невзаимные эффекты наблюдаются в области частот РЭР (4.6 GHz) в магнитном поле, существенно меньшем, чем поле, необходимое для возбуждения ФМР (≈ 1000 Ое) на этой частоте.

С цепочкой из нескольких зигзагообразных дипольных элементов (рис. 3, *a, b*) наблюдается невзаимное расщепление РЭР на несколько пиков. Величина T в области пиков изменяется на 15–20 dB, резонансная область расширяется, и происходит смена знака невзаимности как при перемещении ферритовой пластины на другую сторону от решетки,

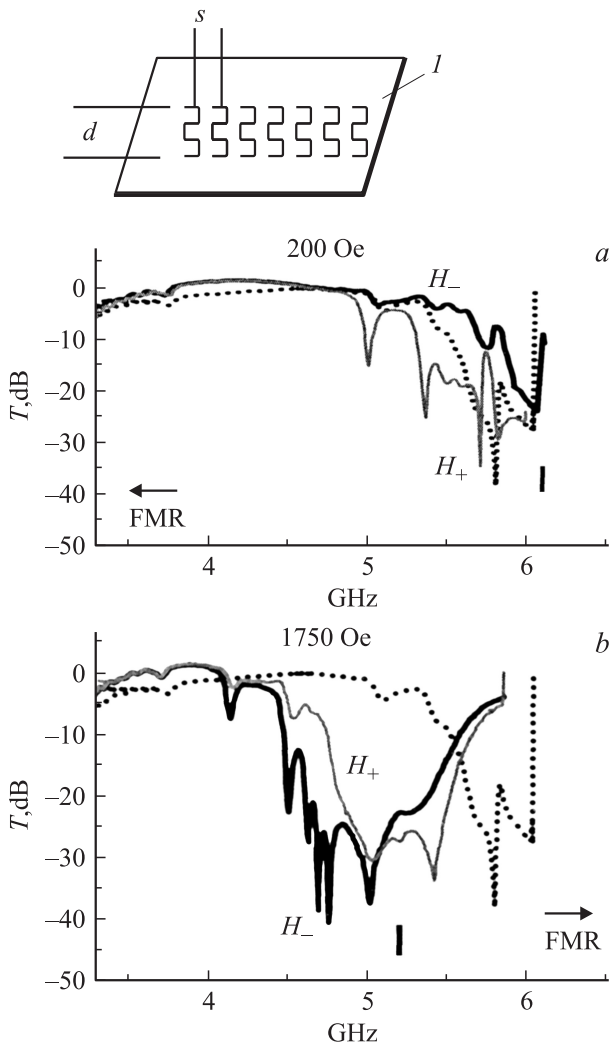


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента прохождения T в прямоугольном волноводе с мета-сэндвичем „поперечно-намагниченная ферритовая пластина l и 7 зигзагообразных дипольных элементов“, $s = 1$ мм; $H = 200$ Ое (а); $H = 1750$ Ое (б). Кривые для H_+ (нежирные) и H_- (жирные) соответствуют разным направлениям намагничивания, т.е. разным направлениям прецессии спинов; пунктирные кривые соответствуют T в отсутствие намагничивания.

так и при наложении определенной величины H . Так, на рис. 3, *a* видно, что когда ФМР возбуждается ниже РЭР-0 (при $H = 200$ Ое), расщепление РЭР происходит в поле H_+ и отсутствует в поле H_- . Когда частота ФМР становится выше частоты РЭР-0 при наложении $H = 1750$ Ое (рис. 3, *b*), расщепление резонанса наблюдается в поле H_- .

При расположении решетки элементов на небольшом расстоянии ($t = 2$ mm) от ферритовой пластины, когда ослабляется связь феррита с элементами решетки, наблюдается уменьшение колебаний частоты РЭР около положения РЭР-0 и уменьшение глубины модуляции пропускания T в области расщепленных пиков, как показано, например, на рис. 4 для структуры с решеткой двойных разомкнутых колец. Режим связанных резонансов в этом случае наблюдается при большем сближении частот ФМР и РЭР, чем при $t = 0$. Невзаимность прохождения на частоте ФМР достигает 40 dB при наложении поля $H = 1000$ Ое. Об этом невзаимном гигантском эффекте, наблюдаемом в более узкой частотной полосе, чем полоса невзаимности T при расщеплении РЭР, и сообщалось ранее в [1,2].

Таким образом, в данной работе при расположении элементов решетки вблизи ферритовой пластины или непосредственно на ней и при сильной связи их резонансов наблюдаются невзаимные эффекты на частотах решетки (помимо невзаимного прохождения на частоте ФМР [1–3]). Эти эффекты наблюдались в постоянных магнитных полях, на порядок меньших поля, необходимого для возбуждения ФМР. С ростом внешнего магнитного поля H изменяется интенсивность РЭР, его частота колеблется в ограниченной области около положения РЭР-0, соответствующего отсутствию намагничивания, в то время как частота ФМР повышается. При этом обнаруживаются невзаимность частотно-амплитудного спектра с расщеплением РЭР на множество пиков и его уширением, а также смена знака невзаимности при перемещении ферритовой пластины на другую сторону от решетки и при наложении поля H , при котором изменяется знак разности между частотами ФМР и РЭР-0. Можно предположить, что расщепление спектра является результатом взаимодействия между резонансами в элементах решетки, усиленного вследствие влияния вплотную расположенного феррита на величины действующих на каждый элемент локальных микроволновых полей.

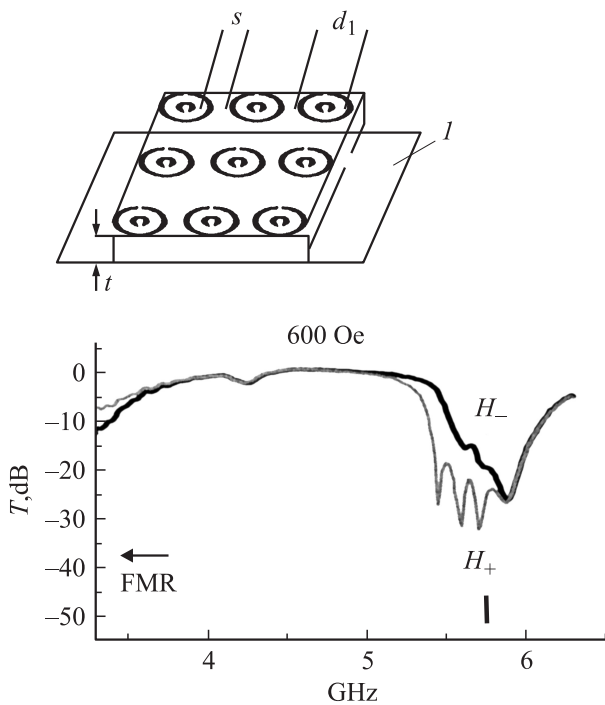


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента прохождения T в прямоугольном волноводе со структурой „поперечно-намагниченная ферритовая пластина I и решетка из 9 двойных разомкнутых колец“ (3×3), $s = 1$ mm, расстояние между ферритовой пластиной и решеткой $t = 2$ mm, $H=600$ Oe. Кривые для H_+ (нежирные) и H_- (жирные) соответствуют разным направлениям намагничивания, т. е. разным направлениям прецессии спинов.

Обсуждаемые эффекты представляют интерес для разработки новых невзаимных систем. Поскольку вид спектра (один пик или несколько) зависит от направления магнитного поля, а также от направления распространения волны, то это свойство можно использовать при передаче информации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 08-02-90418 Укр-а, 08-08-90006 Бел-а.

Список литературы

- [1] *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 17. С. 88–94.
- [2] *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 20. С. 11–20.
- [3] *Kraftmakher G.A., Butylkin V.S.* // Proceedings of Metamaterials'2007. Rome, Italy, 22–24 October 2007. P. 268–271.
- [4] *Микаэлян А.Л.* Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 664 с.