

09

Невзаимное прохождение микроволн в метаструктурах с поперечно-намагниченной ферритовой пластиной и решеткой резонансных элементов

© В.С. Бутылкин, Г.А. Крафтмахер

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

E-mail: gkraft@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 2 марта 2007 г.

В метаструктуре из поперечно-намагниченной ферритовой пластины и решетки резонансных элементов обнаружено невзаимное прохождение линейно-поляризованной волны на частотах ферромагнитного резонанса (ФМР). Невзаимность наблюдалась и при расположении феррита по оси прямоугольного волновода и в свободном пространстве, чего нет в отсутствие решетки. Эффект объясняется формированием решеткой поверхностной волны с эллиптической или круговой поляризацией. Невзаимность прохождения достигала максимума (> 35 dB) в условиях взаимовлияния ФМР и резонанса элементов решетки на определенной частоте и в определенном магнитном поле, зависящих от расстояния между ферритом и решеткой. Эти эффекты получены с разомкнутыми кольцами, многоугольными петлями и диполями. Результаты представляют интерес для разработки новых невзаимных устройств и многофункциональных метаструктур, включая развязки для квазиоптических систем и двухчастотный фильтр-развязку встречных волн GHz и TGz диапазонов.

PACS: 04.30.Nk

В микроволновой технике широко используется эффект невзаимности прохождения излучения в волноводе с поперечно намагниченной ферритовой пластиной, в которой возбуждается ферромагнитный резонанс (ФМР) [1]. Эта пластина располагается в прямоугольном волноводе параллельно узкой стенке волновода на расстоянии, равном приблизительно $a/4$ (a — размер широкой стенки). Недавно при таком расположении феррита нами было обнаружено увеличение невзаимности прохождения электромагнитных волн более чем в 100 раз в

результате внедрения решетки бианизотропных элементов в форме планарных двойных разомкнутых колец (ПДРК), много меньших длины волны [2].

Невзаимные эффекты в прямоугольном волноводе с асимметрично расположенной поперечно-намагниченной ферритовой пластиной (в отсутствие решетки) обусловлены тем, что мощность волны типа H_{01} , имеющей круговую поляризацию высокочастотного магнитного поля в плоскостях, отстоящих от стенок волновода на расстояние $a/4$, поглощается ферритом при наложении постоянного магнитного поля H_0 , необходимого для возбуждения ФМР, если высокочастотное поле — правополяризованное, и не поглощается, если оно левополяризованное [1]. Вблизи этих плоскостей поляризация магнитного поля эллиптическая, и невзаимность пропускания проявляется в меньшей степени. В центре волновода и непосредственно у стенок поляризация линейная, невзаимный эффект отсутствует. Очевидно, что его не может быть и в отсутствие волновода.

Можно предположить, однако, что в случаях, когда рядом с ферритовой пластиной помещена решетка из проводящих резонансных элементов, ситуация существенно иная. В [3] теоретически показано, что вблизи помещенного в волноводе или в свободном пространстве плоского слоя из одноосной магнитной среды (его предельным случаем является решетка из ПДРК) формируется поверхностная волна со сдвинутыми по фазе продольной и поперечной компонентами магнитного поля (следовательно, с эллиптической его поляризацией). Если это так, то вышеописанный механизм формирования невзаимности должен привести к тому, что положение феррита в плоскостях $\pm a/4$ оказывается неоптимальным, а величина невзаимности должна зависеть от взаимного расположения феррита и решетки. Более того, невзаимность пропускания микроволн должна наблюдаться и в отсутствие волновода, т.е. при расположении метаструктуры феррит-решетка в свободном пространстве.

Данная работа посвящена исследованию эффекта невзаимного прохождения микроволн в метаструктурах из ферритовой пластины и решеток резонансных проводящих элементов и в свободном пространстве.

На рис. 1, а приведены частотные зависимости коэффициента прохождения T при помещении поперечно-намагниченной ферритовой пластины ($30 \times 20 \times 1$ mm) в середине волновода сечением 48×24 mm параллельно боковой стенке. Здесь T_{H+} и T_{H-} соответствует разным

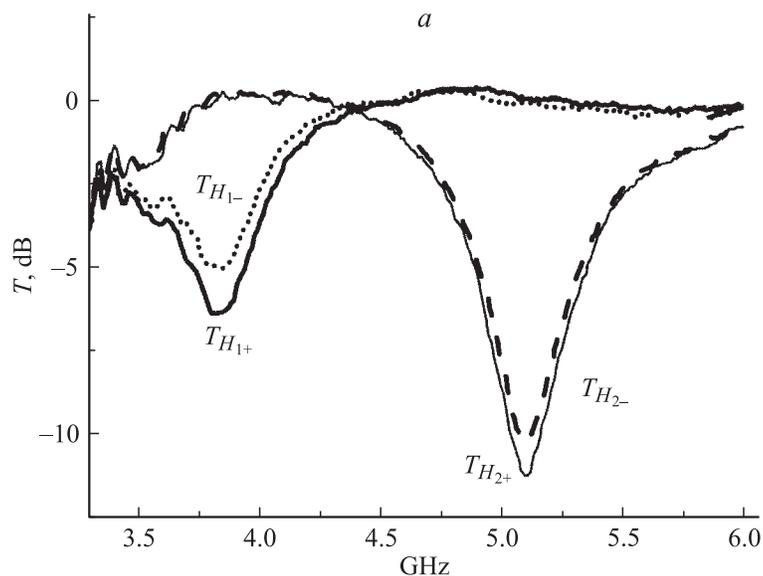


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента прохождения T в прямоугольном волноводе с поперечно-намагниченной ферритовой пластиной, расположенной вдоль оси волновода (а) $H_1 = 700$ Ое, $H_2 = 1100$ Ое; с ферритовой пластиной и решеткой двойных разомкнутых колец ПДРК на расстоянии $t \approx 5$ мм (b, c); $t \approx -10$ мм (d). T_0 соответствует $H_0 = 0$, T_{H_+} и T_{H_-} соответствуют разным направлениям намагничивания.

направлениям намагничивания или разным направлениям распространения. Наблюдается ФМР, смещающийся к высоким частотам при увеличении H_0 . Невзаимность прохождения практически отсутствует (параметр невзаимности $\delta = T_{H_+} - T_{H_-}$ крайне мал).

На рис. 1, b, c приведены частотные зависимости T при помещении решетки из 15 медных ПДРК параллельно ферритовой пластине на расстоянии $t \approx 5$ мм. Подчеркнем: ферритовая пластина остается в середине волновода. В отсутствие H_0 вблизи 5.5 GHz наблюдается резонанс в элементах решетки — „резонанс решетки“ (РР), возбуждаемый в соответствии с указанной геометрией эксперимента микроволновым магнитным полем. С наложением H_0 возбуждается ФМР (П) и, в отличие от свободного феррита, наблюдается зависимость от направ-

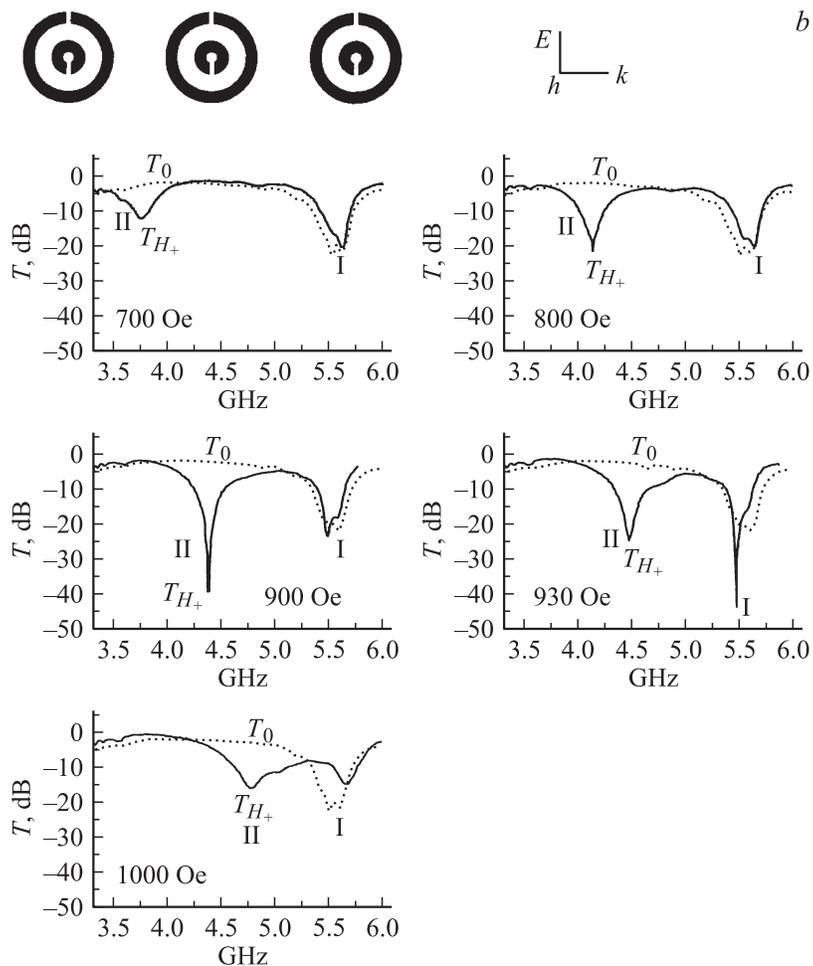


Рис. 1 (продолжение).

ления H_0 . Так, в поле H_+ мы наблюдаем два резонанса: ФМР (II), который смещается с ростом H_0 , и резонанс решетки РР (I) (рис.1, *b*). В поле H_- ФМР практически не возбуждается (рис. 1, *c*) и мы видим только пики РР (I) при разных величинах H_- (сплошная жирная линия — $H_0 = 0$, пунктирная — 700 Oe, сплошная тонкая — 800 Oe,

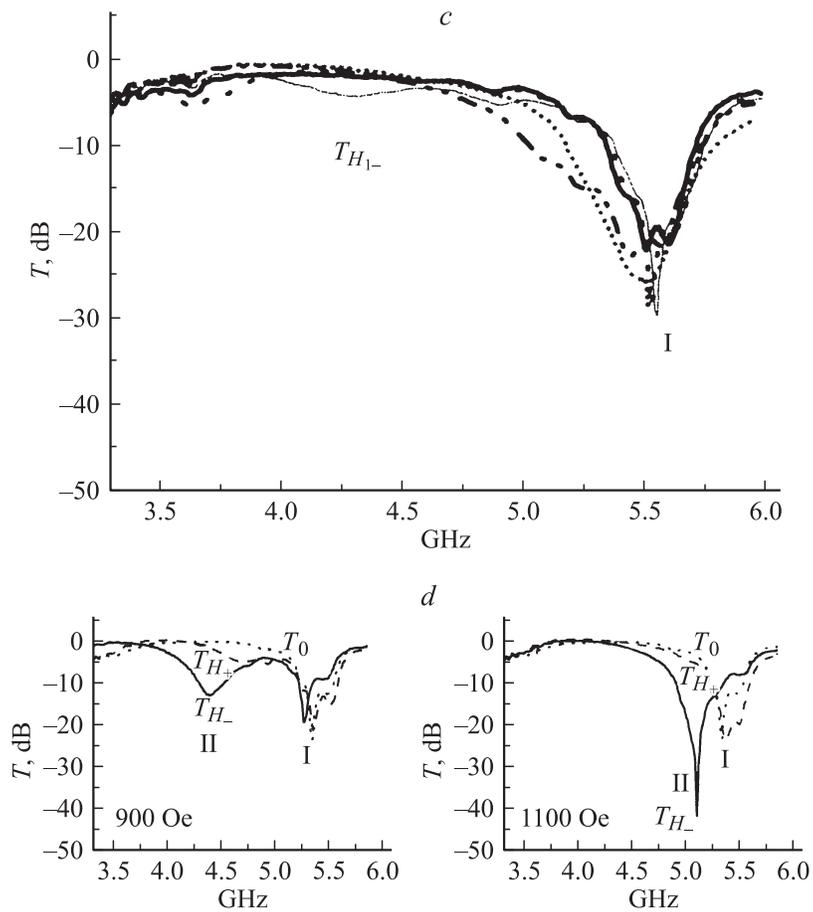


Рис. 1 (продолжение).

штрихпунктирная — 930 Oe, частопунктирная — 1000 Oe). При этом при определенной величине H_+ (900 Oe) с приближением ФМР к РР, на частоте 4.4 GHz достигается режим связанных резонансов с перекачкой энергии. Наблюдаются существенное увеличение интенсивности ФМР (II) и максимальная величина δ , превышающая 35 dB.

При изменении расстояния t (феррит по-прежнему расположен в середине волновода) оптимальное значение δ наблюдается при другом

значении H и на другой частоте, а при расположении решетки с другой стороны феррита пики ФМР наблюдаются в поле H_- , знак невязимности меняется, о чем свидетельствуют приведенные на рис. 1, d зависимости для $t \approx -10$ mm. В этом случае с увеличением $|t|$ режим связанных резонансов достигается в других условиях, и максимальная величина δ наблюдается в больших полях ($H = 1100$ Oe) и на более высоких частотах ФМР (5.1 GHz), почти рядом с РР (I). Эффект проявляется независимо от ориентации ПДРК в решетке. Отметим, что максимальный параметр невязимности в обоих случаях (при $t = 5$ mm и $t = -10$ mm) остается на уровне, достигнутом в [2].

При помещении метаструктуры в свободное пространство в разрыве (100 mm) между приемным и передающим волноводами обнаружено возникновение эффекта невязимности. На рис. 2, a, b приведены частотные зависимости T для ферритовой пластины (рис. 2, a) и комбинации с решеткой ПДРК (рис. 2, b). В случае свободной ферритовой пластины с наложением H_0 возбуждается ФМР, смещающийся к высоким частотам с увеличением постоянного поля при отсутствии невязимного эффекта. В комбинации с решеткой резонансных элементов ФМР усиливается, и в области пика II наблюдается невязимность.

Выполнены также исследования с решетками на основе других резонансных элементов и поперечно-намагниченной ферритовой пластиной, расположенной по оси волновода. Частотные зависимости T для метаструктур с решеткой из замкнутых элементов в виде многоугольной невыпуклой петли (МП) приведены на рис. 3, a ; с решеткой из Г-образных диполей (ГД) на рис. 3, b . С разными решетками максимальная величина δ наблюдается на разных частотах ФМР (II) и при разных величинах полей H , поскольку у разных решеток частоты РР (I) различаются и режим связанных резонансов наблюдается в разных полях. Расстояния между ферритовой пластиной и решетками составляли $t \approx 5$ mm.

Располагая две решетки с разными частотами РР по обе стороны от феррита и подбирая t_1 и t_2 , можно обеспечить гигантские невязимные эффекты с разными знаками невязимности на разных частотах при одной и той же величине поля H_0 . Так, на рис. 3, c приведены частотные зависимости T и продемонстрировано невязимное прохождение для метаструктуры, содержащей 2 решетки: МП ($t_1 \approx 2$ mm) и ГД ($t_2 \approx 4$ mm) по разные стороны от ферритовой пластины. Параметр невязимности имеет противоположные знаки на различающихся частотах: $\delta \approx 35$ dB на частоте 4.25 GHz и $\delta \approx -35$ dB на частоте 4.8 GHz.

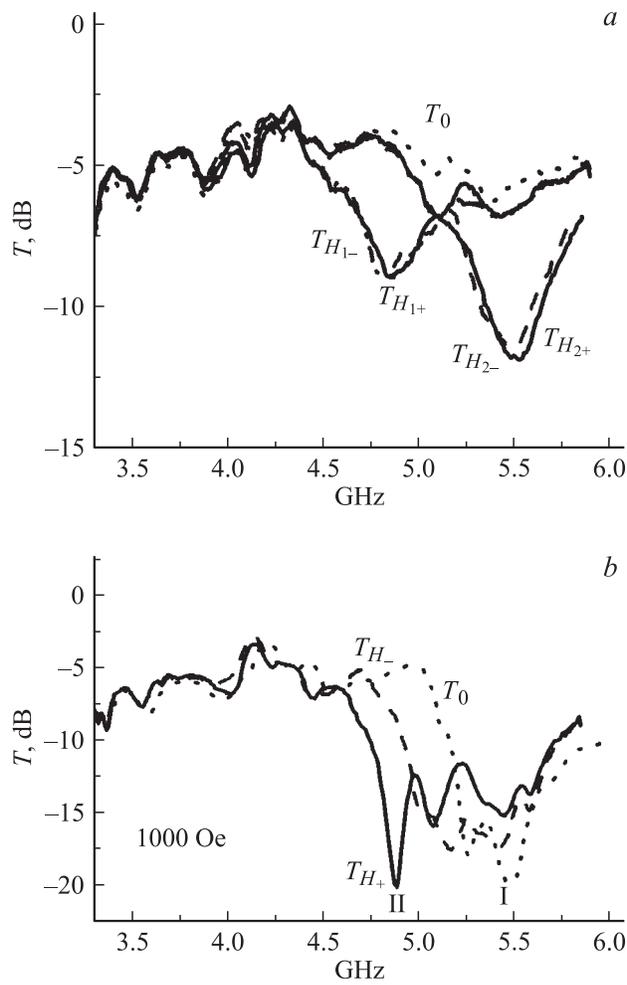


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента прохождения T в свободном пространстве в разрыве между передающим и приемным волноводными трактами с поперечно-намагниченной ферритовой пластиной, $H_1 = 1000$ Oe, $H_2 = 1200$ Oe (a); с ферритовой пластиной и решеткой ПДРК (b).

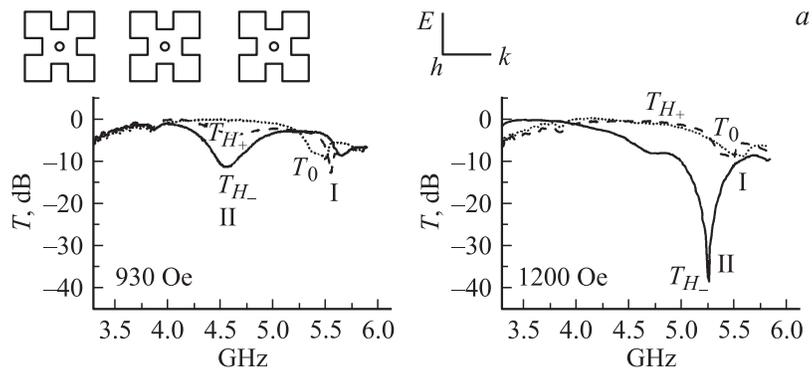


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента прохождения T в прямоугольном волноводе с поперечно-намагниченной ферритовой пластиной, расположенной вдоль оси волновода, и решеткой замкнутых резонансных элементов в виде многоугольной петли МП (*a*); с ферритовой пластиной и решеткой Г-образных диполей ГД (*b*); с ферритовой пластиной и двумя решетками — МП и ГД, расположенными с разных сторон (*c*).

Сформулируем основные результаты работы.

1. Обнаружено, что в волноводе с поперечно-намагниченной ферритовой пластиной (постоянное магнитное поле направлено параллельно пластине и перпендикулярно направлению распространения и высокочастотному магнитному полю), расположенной по оси волновода, возникает невязимость прохождения микроволн при размещении решетки из резонансных проводящих элементов параллельно ферритовой пластине.

2. Обнаружено невязимое прохождение на частотах ФМР в ферритовой пластине в присутствии решетки резонансных элементов в свободном пространстве, тогда как в случае свободного феррита оно отсутствует.

3. Показано, что эффект наблюдается в присутствии решеток на основе резонансных элементов разных типов: как разомкнутых колец, возбуждаемых магнитной и электрической компонентами микроволнового поля, так и многоугольных невыпуклых петель и дипольных элементов, возбуждаемых электрическим полем.

4. При приближении частоты ФМР к резонансным частотам решеток достигнута гигантская (превышающая 35 dB) невязимость прохо-

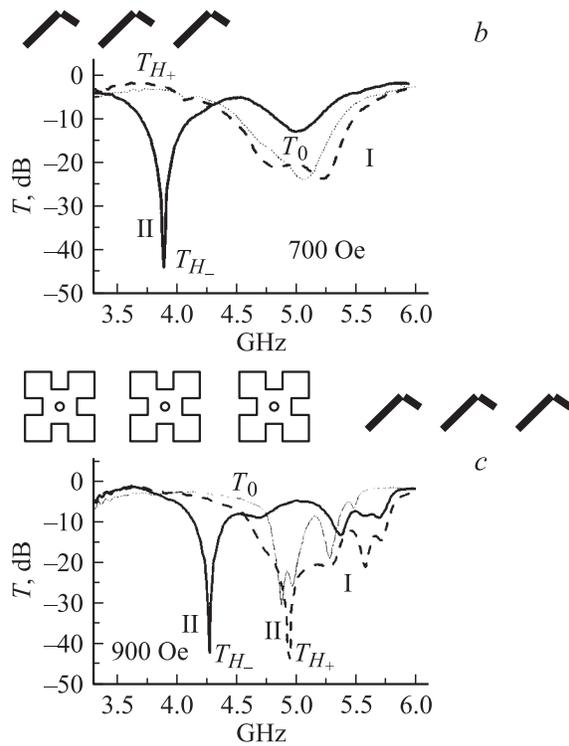


Рис. 3 (продолжение).

ждения излучения на определенных частотах, зависящих от расстояния между решеткой и ферритом.

5. При использовании двух решеток продемонстрирована возможность построения метаструктур, проявляющих частотно-селективную невзаимность прохождения излучения с разным знаком невзаимности на разных частотах.

Наблюдаемые эффекты свидетельствуют о том, что решетка резонансных элементов действительно является структурой, формирующей поверхностные волны, у которых высокочастотное магнитное поле имеет круговую или эллиптическую поляризацию с противоположными направлениями вращения по обе стороны от решетки. Как и в вол-

новоде [1], в условиях ФМР ферритом поглощается волна, у которой направления вращения высокочастотного магнитного поля, формируемого решеткой, и прецессии магнитного момента вокруг постоянного магнитного поля совпадают. Волна с противоположным направлением вращения поля не поглощается. Поэтому структура феррит-решетка оказывается невязанной для волн, распространяющихся навстречу друг другу, и для одной и той же волны по отношению к переключению направления поля H_0 или по отношению к расположению феррита по ту или иную сторону решетки.

Волноведущие свойства цепочек и других структур из резонансных магнито- и электродипольных элементов в последнее время привлекают заметное внимание (см., например, теоретические работы [4,5]). Наблюдение ФМР в окрестности таких структур может давать информацию о структуре их полей, получение которой прямым методом затруднительно.

Эти результаты открывают перспективу создания многофункциональных метаструктур и невязанных устройств нового типа, таких, например, как фильтр-развязка или двухчастотный фильтр-развязка встречных волн, применительно к разным способам передачи излучения. Особый интерес они могут представить в разработках квазиоптических систем миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. Трудности, связанные с необходимостью больших постоянных магнитных полей для возбуждения ФМР, можно преодолеть, используя гексаферриты с большими внутренними полями анизотропии [6].

В заключение благодарим РФФИ за поддержку (грант № 06-08-001).

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.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 17. С. 88–94.
- [3] *Кондратьев И.Г., Смирнов А.И., Ильин Н.В.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 7. С. 618–625.
- [4] *Shamonina E., Kalinin V.A., Ringhofer K.H.* et al. // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. N 10. P. 6252–6261.
- [5] *Tretyakov S.A., Viitanen A.J.* // Electr. Eng. 2000. V. 82. N 6. P. 353–361.
- [6] *Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Петрова И.И.* // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1984. В. 4 (189). С. 8–13.