

05

## Резонанс магнитного типа в немагнитном линейном проводе, возбуждаемый поверхностными плазмонами в микроволновом диапазоне

© 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 21 июля 2010 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2010 г.

Обнаружен и идентифицирован магнитный резонансный микроволновый отклик структуры параллельных немагнитных проводов или одиночного линейного провода, перпендикулярных электрическому полю плоской электромагнитной волны, в случае расположения провода вдоль направления распространения волны вблизи решетки резонансных элементов, формирующей поверхностные плазмоны. Наблюдается гигантский резонансный эффект в определенном частотном диапазоне, соответствующем области существования плазмонов (вблизи резонанса решетки, формирующей плазмоны, с низкочастотной стороны) при определенной (резонансной) длине провода. Предполагается, что магнитный отклик провода обусловлен возбуждением резонансных токов магнитным полем плазмонов. Обнаруженные эффекты позволяют, используя простую технологию линейных проводов, реализовать перестраиваемые в широком диапазоне длин волн новые магнитные, в том числе обладающие одновременно отрицательными эффективными параметрами, метаматериалы.

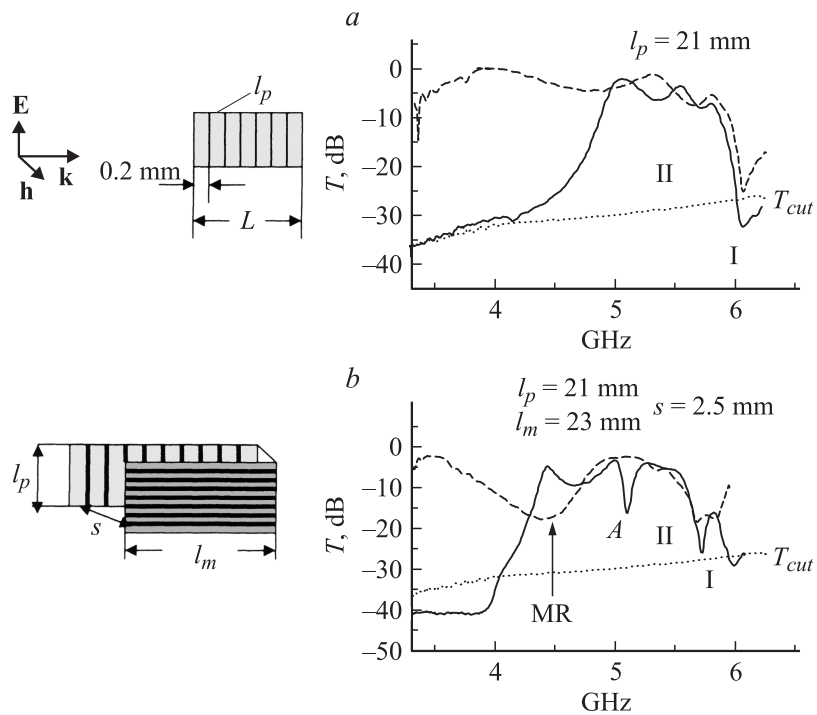
Известно, что метаматериалы, содержащие киральные включения, например в виде проводящих спиралей или разомкнутых колец, могут обладать эффективной резонансной магнитной проницаемостью в микроволновом диапазоне в зависимости от ориентации включений относительно магнитного поля  $\mathbf{h}$  падающей электромагнитной волны. Резонансные эффекты, обусловленные возбуждением резонансных токов полем  $\mathbf{h}$  (магнитное возбуждение), дают вклад в эффективную магнитную проницаемость. Эффективная диэлектрическая проницаемость обусловлена наведением токов электрическим полем  $\mathbf{E}$  (электрическое

возбуждение). В настоящее время многие исследования направлены на изучение возможности создания магнитных метаматериалов, содержащих не киральные, а простые в технологическом отношении линейные провода. Основное внимание уделяется паре проводов конечной длины, обладающей не только электрическим, но и магнитным откликом благодаря возможности наведения параллельных токов электрическим полем и антипараллельных токов магнитным полем [1]. Однако, поскольку резонансный магнитный и электрический отклики проявляются на одной и той же частоте, практически довольно трудно их разделить и оценить вклад магнитного отклика.

В связи с этим является актуальным изучение новых возможностей и подходов. В данной работе показана возможность возбуждения магнитного резонанса в одиночном линейном проводе конечной длины в ситуации, когда ориентация провода такова, что электрический резонансный отклик невозможен. Нами было обнаружено, что линейный провод (длина  $l_m$ ), будучи расположен вдоль направления распространения электромагнитной волны и перпендикулярно полю  $\mathbf{E}$  вблизи формирующей поверхности плазмоны решетки резонансных элементов, может обладать резонансным откликом, и показано, что этот отклик является магнитным. Результаты подтверждались при использовании разных резонансных решеток, выполненных на основе как киральных, так и электродипольных элементов. Взаимодействие плазмонов с разными средами активно изучается: например, в [2] предсказаны новые применения при взаимодействии с активными средами, новые не взаимные эффекты обнаружены при взаимодействии с ферритом [3,4].

Приведем результаты, полученные при применении для возбуждения плазмонов решетки параллельных проводов (длина  $l_p$ ), параллельных полю  $\mathbf{E}$ . Длины  $l_m$  и  $l_p$  можно легко менять и соответственно легко перестраивать электромагнитные параметры по частоте, что весьма привлекательно для практики. Использовались медные провода диаметром 0.1 или 0.3 mm, впрессованные в диэлектрическую пленку толщиной 0.25 mm.

Измерялись частотные зависимости коэффициентов прохождения  $T$  метаструктур, помещенных вдоль оси стандартного волновода ( $48 \times 24$  mm) параллельно боковой стенке, а также в запердельной прямоугольной секции ( $16 \times 24$  mm) в диапазоне 3–6 GHz. Система проводов или одиночный провод  $l_m$ , ортогональные полю  $\mathbf{E}$ , не проявляют электромагнитного отклика: коэффициенты прохождения волновода с



**Рис. 1.** Частотные зависимости коэффициентов прохождения  $T$  в волноводе (пунктирные кривые) и в запердельной секции (сплошные кривые): с формирующей плазмонами решеткой проводов  $l_p = 21$  мм (а), с мета-сэндвичем из двух решеток на основе проводов  $l_m = 23$  мм и  $l_p = 21$  мм (б).  $T_{cut}$  — коэффициент прохождения в заперщенной полосе пустой запердельной секции. Слева — используемые решетки проводов и их ориентация относительно электрического  $\mathbf{E}$  и магнитного  $\mathbf{h}$  векторов падающей волны.  $s$  — расстояние между решетками.

проводами  $l_m$  и пустого волновода не отличаются. Решетка проводов  $l_p$ , параллельных полю  $\mathbf{E}$ , обладает резонансным откликом, наблюдается резонанс I электрического типа, характеризующийся резонансной зависимостью коэффициента прохождения с минимумом прохождения на определенной частоте, зависящей от длины проводов. Такая решетка возбуждается микроволновым полем  $\mathbf{E}$  и формирует поверхностные волны (плазмоны) вблизи резонанса I ниже по частоте. На рис. 1, а

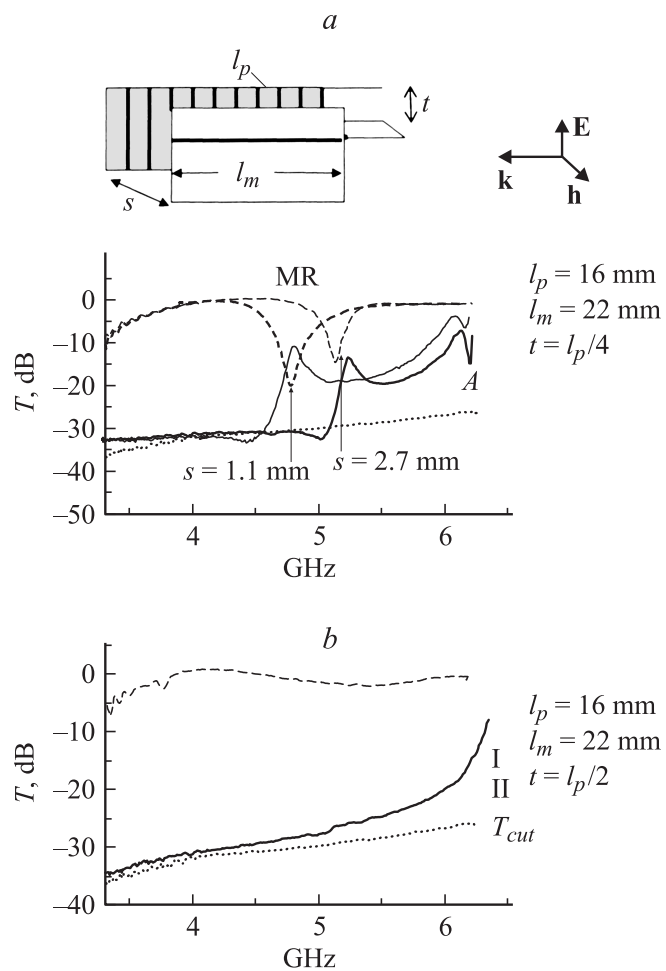
приведены частотные зависимости  $T$  для решетки проводов  $l_p = 21$  mm: на частоте 6 GHz в волноводе наблюдается резонанс I и в запердельной секции на более низких частотах полоса прозрачности II. Взаиморасположение полосы прозрачности в запердельном волноводе относительно резонанса в традиционном волноводе зависит от типа возбуждаемого резонанса [5,6]. Так, при магнитном возбуждении (магнитный резонанс MR), например с использованием киральных включений, полоса прозрачности находится выше MR. Для магнитного возбуждения характерна также полоса сверхзапрета, расположенная ниже MR. При электрическом возбуждении (электрический резонанс ER) полоса прозрачности находится ниже ER. Поэтому сравнительный анализ спектров прохождения в традиционном и запердельном волноводе является важным методологическим приемом для идентификации типа возбуждаемого резонанса.

Поместим в волноводе параллельно друг другу две решетки: одну, формирующую плазмоны, с проводами  $l_p$ , другую — с проводами  $l_m$ . Длина  $L$  (25–30 mm) решетки проводов  $l_p$  немного превышает длину  $l_m$ . Оказывается, что в этом случае помимо резонанса I решетки, формирующей плазмоны, появляется магнитный резонанс MR, обусловленный решеткой  $l_m$  и связанный с резонансом I (рис. 1, *b*). Этот резонансный эффект наблюдается, если провод  $l_m$  близок к полуволновому в частотной области, примыкающей к резонансу I со стороны низких частот, — области существования плазмонов, формируемых решеткой проводов  $l_p$ . Так, на рис. 1, *b* видно, что для сэндвича с решеткой проводов  $l_p = 21$  mm и решеткой проводов  $l_m = 23$  mm MR существует на частоте 4.5 GHz при расстоянии между решетками  $s = 2.5$  mm. При этом в запердельной секции помимо полосы прозрачности II появляется полоса прозрачности, простирающаяся от MR в высоко-частотную область. Эта полоса прозрачности разделяется с полосой прозрачности II в точке A. Наблюдается также полоса сверхзапрета около 4 GHz, в которой коэффициент прохождения меньше, чем в пустой запердельной секции. Положение MR зависит от длины  $l_m$  и расстояния  $s$  между решетками. С уменьшением длины  $l_m$  MR смещается к высоким частотам, а с уменьшением расстояния  $s$  резонанс смещается к низким частотам, удаляясь от резонанса I. При этом полоса прозрачности в запердельной секции смещается соответственно. Можно идентифицировать магнитное возбуждение резонанса MR, поскольку наблюдаются закономерное для такого возбуждения взаиморасполо-

жение резонансного минимума прохождения в волноводе и полосы прозрачности в запердельном волноводе, а также полоса сверхзапрета в ситуации, когда электрическое возбуждение невозможно вследствие ортогональной ориентации проводов  $l_m$  относительно поля  $E$ . Магнитное возбуждение возможно благодаря наведению резонансных токов магнитным полем плазмонов.

Резонанс магнитного типа обнаружен и при использовании одиночного провода  $l_m$  в сочетании с формирующей плазмону решеткой проводов  $l_p$ . на рис. 2, *a* приведены результаты для провода  $l_m = 22$  mm и решетки проводов  $l_p = 16$  mm. Длина  $l_p$  выбрана так, чтобы резонанс I и соответствующая полоса прозрачности II сместились на высокочастотный край диапазона измерений и не накладывались на MR, обусловленный проводом  $l_m$ . При расстоянии  $s = 2.7$  mm MR возбуждается на частоте 5.1 GHz. При уменьшении  $s$  до 1.1 mm MR смещается к низким частотам (4.7 GHz). В запердельной секции наблюдаются соответствующие полосы прозрачности (выше частоты MR) и полосы сверхзапрета (ниже MR около 5 и 4.4 GHz), которые следуют за смещающимся MR. При этом сильный MR наблюдается при асимметричном расположении провода  $l_m$  относительно решетки проводов  $l_p$  на расстоянии  $t = l_p/4$  от провода до верхней границы решетки. С изменением  $t$  интенсивность резонанса уменьшается и при  $t = l_p/2$  (симметричное расположение) MR пропадает, наблюдаются только резонансные эффекты, обусловленные решеткой проводов  $l_p$  (рис. 2, *b*). Таким образом, в асимметрично расположенном проводе  $l_m$  наблюдается магнитное возбуждение резонанса (магнитный резонанс MR), который легко можно перестраивать, изменяя  $l_m$  и  $s$ . Этот резонанс возбуждается вблизи резонанса I (на более низких частотах), когда длина  $l_m$  несколько превышает длину  $l_p$ . Если мы применяем два провода  $l_{m1}$  и  $l_{m2}$  разной длины, то возбуждаются два магнитных резонанса на разных частотах, которым соответствуют две полосы прозрачности, характерные для магнитного возбуждения.

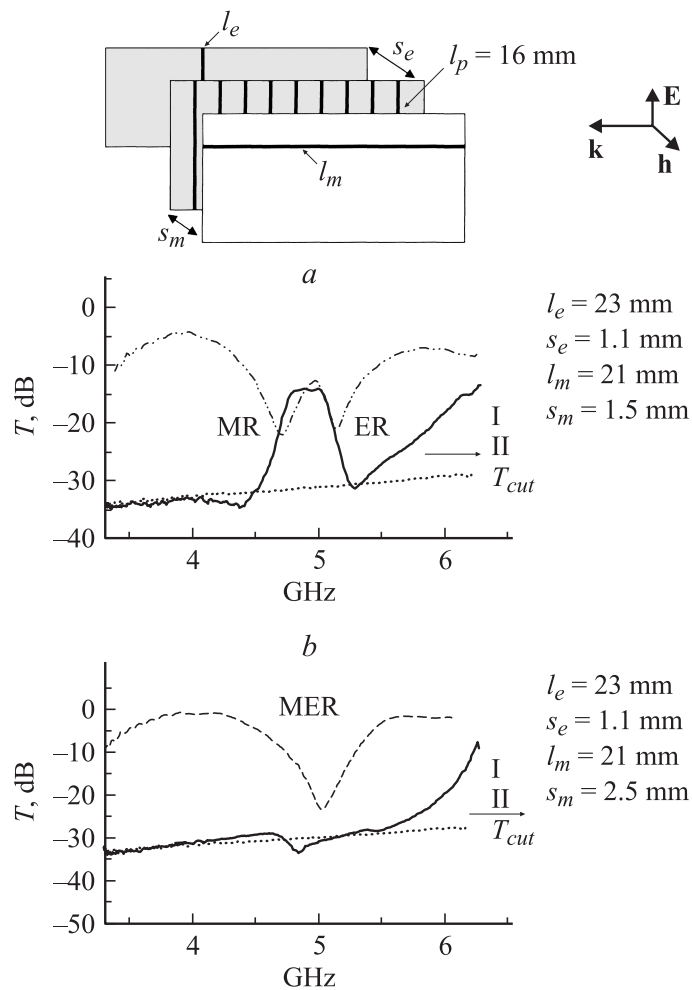
Если одиночный провод расположить параллельно проводам  $l_p$ , то возбуждается электрический резонанс (ER) диполя, который зависит от длины провода (обозначим  $l_e$ ) и может наблюдаться как с решеткой проводов  $l_p$ , так и без нее. При этом в запердельном режиме наблюдается характерная для электрического возбуждения полоса прозрачности, расположенная ниже частоты ER. Если мы применяем два провода  $l_{e1}$  и  $l_{e2}$  разной длины, то возбуждаются два электрических резонанса



**Рис. 2.** Частотные зависимости коэффициента прохождения  $T$  в прямоугольном волноводе (пунктирные кривые) и в запердельной секции (сплошные кривые): с мета-сэндвичем, содержащим решетку проводов  $l_p = 16$  мм и одиночный провод  $l_m = 22$  мм при разных расстояниях провода  $s$  до решетки и расстоянии от провода до верхней границы решетки  $t = l_p/4$  (a), с таким же мета-сэндвичем при расстоянии  $t = l_p/2$  (b).

$ER_1$  и  $ER_2$  на разных частотах, которым соответствуют две полосы прозрачности, характерные для электрического возбуждения.

Представляет особый интерес сэндвич, содержащий три слоя: средний слой — формирующая плазмы решетка проводов  $l_p$ , слой с проводом  $l_m$ , расположенный на расстоянии  $s_m$ , и с противоположной стороны — слой с проводом  $l_e$ , расположенный на расстоянии  $s_e$ , как показано на рис. 3. В этом случае в зависимости от размеров проводов и соответствующих расстояний до формирующей плазмы решетки наблюдаются три резонансных эффекта: резонанс I решетки проводов  $l_p$ , формирующей плазмы, и соответствующая полоса прозрачности II, лежащие вне области измерений, выше 6 GHz; магнитный резонанс (MR) в проводе  $l_m$ , возбуждаемый магнитным полем плазмонов; электрический резонанс (ER) в проводе  $l_e$ . При этом MR и ER могут возбуждаться независимо на разных частотах и независимо перестраиваться по частоте, удаляясь или приближаясь друг к другу, вплоть до совмещения в зависимости от геометрических размеров. На рис. 3, *a* приведены частотные зависимости  $T$  для параметров  $l_p = 16$  mm,  $l_e = 23$  mm и  $s_e = 1.1$  mm,  $l_m = 21$  mm и  $s_m = 1.5$  mm. Наблюдаются два резонанса в волноводе (пунктирная кривая). Один из них — на частоте 4.7 GHz, это магнитный резонанс в проводе  $l_m$  (MR), поскольку соответствующая полоса прозрачности в запердельной секции (сплошная кривая) расположена выше MR, и наблюдается характерная для магнитного возбуждения полоса сверхзапрета около 4.3 GHz. Второй резонанс наблюдается на частоте 5.1 GHz. Это электрический резонанс в проводе  $l_e$  (ER), которому соответствует характерная для электрического возбуждения полоса прозрачности, расположенная ниже его частоты. Поскольку MR и ER возбуждены на близких частотах, их полосы прозрачности в запердельном режиме наезжают друг на друга и объединяются. Меняя расстояние  $s_m$ , можно удалять или приближать MR к резонансу I, приближая или удаляя тем самым от ER (резонанса в проводе  $l_e$ ). При определенном значении  $s_m$  MR и ER можно совместить, как показано на рис. 3, *b*, где на одной и той же частоте 5 GHz наблюдаются два резонанса вместе — объединенный магнитоэлектрический резонанс (MER). В запердельном режиме такой резонанс отличается отсутствием полосы прозрачности. Это связано с тем, что полосы прозрачности и сверхзапрета, обусловленные разными типами резонансов, накладываются друг на друга. Такие трехслойные метасэндвичи позволяют реализовать одновременно



**Рис. 3.** Частотные зависимости коэффициентов прохождения  $T$  в прямоугольном волноводе (пунктирные кривые) и в запердельной секции (сплошные кривые) с трехслойным мета-сэндвичем. Средний слой с решеткой проводов  $l_p = 16 \text{ mm}$  и боковые слои с одиночными проводами  $l_e = 23 \text{ mm}$  и  $l_m = 21 \text{ mm}$ ,  $t = l_p/4$ ; расстояние между проводом и решеткой  $s_e = 1.1 \text{ mm}$ ,  $s_m = 1.5 \text{ mm}$  (a),  $s_e = 1.1 \text{ mm}$ ,  $s_m = 2.5 \text{ mm}$  (b).



отрицательные диэлектрическую и магнитную проницаемости в области MER, который можно легко возбуждать в широком диапазоне частот, меняя геометрические параметры системы.

Таким образом, в работе впервые найден путь для возбуждения перестраиваемого по частоте резонанса магнитного типа в немагнитном линейном проводе, основанный на возбуждении резонансных токов магнитным полем поверхностных плазмонов, формируемых резонансной решеткой близко расположенных параллельных проводов. Предложен трехслойный метасэндвич, содержащий линейные провода с разной ориентацией и разной (определенной) длиной, позволяющий возбуждать раздельно магнитный и электрический резонансы, а также совмещать эти резонансы в зависимости от геометрических размеров.

В заключение благодарим РФФИ за поддержку (гранты № 10-02-00053, 10-08-00018).

## Список литературы

- [1] *Shalaev V.M., Satoshi Kawata.* Advances in Nano-optics and Nano-photonics. Nanophotonics with surface plasmons. 2007. P. 277.
- [2] *David J., Bergman and Mark I. Stockman.* // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. P. 027402.
- [3] *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П.* // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 10. С. 1184–1195.
- [4] *Kraftmakher G.A., Butylkin V.S.* // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2010. V. 49. P. 33004.
- [5] *Kraftmakher G.* // Int. J. Applied Electromagn. Mech. 2004. V. 19. P. 57–61.
- [6] *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А.* // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 1. С. 5–19.