

05;12

Метод измерений структуры полей поверхностных поляритонов, основанный на возбуждении резонанса в одиночном планарном двойном разомкнутом кольце

© В.С. Бутылкин, Г.А. Крафтмахер, С.Л. Просвирнин

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков, Украина

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

Поступило в Редакцию 8 июня 2011 г.

Предлагается экспериментальный метод определения структуры и локальных поляризационных свойств полей поверхностных поляритонов, основанный на возбуждении резонанса в одиночном планарном двойном разомкнутом кольце, много меньшем длины волны. Метод апробирован в микроволновом диапазоне. В качестве мета-поверхности, формирующей поляритоны, использовалась решетка параллельных проводов конечной длины. Обнаружено более чем десятикратное увеличение интенсивности резонанса при возбуждении кольца поверхностными поляритонами в сравнении с возбуждением плоской волной.

В настоящее время обнаружен ряд новых эффектов, которые инициированы поверхностными плазмон-поляритонами, формируемыми различными мета-поверхностями, например [1,2]. Для объяснения и применения таких эффектов необходимы знания свойств этих волн. Для изучения структуры электрического и магнитного полей поляритонов в основном используются численные методы. Традиционные экспериментальные методы, основанные на использовании одномодовых волноводных приемных устройств, могут дать информацию только о структуре электрического поля, а локальность получаемой информации ограничивается размерами порядка половины длины волны. В данной работе предлагается экспериментальный метод с использованием в качестве зонда двойного разомкнутого кольца (ДРК), много меньшего длины волны. Условия, необходимые для возбуждения в таком кольце магнитного и электрического резонансных эффектов микроволновым

полем, хорошо известны [3,4]. Тип резонанса (электрический или магнитный) зависит от ориентации ДРК относительно электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{h} векторов поля падающей волны и идентифицируется с помощью анализа областей прозрачности в запердельном волноводе [5]. Поэтому, зная тип и характеристики резонанса в ДРК, можно определить свойства возбуждающей волны: однородность, локальные поляризационные характеристики как для \mathbf{E} -, так и \mathbf{h} -полей.

Приведем результаты измерений в волноводе характеристик резонанса в одиночном планарном ДРК, возбуждаемом поверхностными поляритонами, и продемонстрируем возможность определения структуры поля и поляризационных характеристик в диапазоне 3–6 GHz. В качестве мета-поверхности, поддерживающей поляритоны в этом диапазоне, используем решетку проводов (РП), впрессованных в диэлектрическую пленку толщиной 0.25 mm, располагая их параллельно полю \mathbf{E} . Применяем ДРК, позволяющее возбуждать резонанс в частотной области, в которой возбуждаются поверхностные поляритоны. Эта область находится вблизи резонанса РП с низкочастотной стороны, резонансная частота зависит от длины провода.

Измеряем частотные зависимости коэффициентов прохождения T при расположении решетки вдоль оси стандартного волновода ($48 \times 24 \text{ mm}^2$) параллельно боковой стенке, а также в запердельной секции ($16 \times 24 \text{ mm}^2$), помещая ДРК вблизи РП на расстоянии s в разных ориентациях и местоположениях. На рис. 1–3 приведены результаты измерений для случая, когда решетка содержит провода длиной 18 mm, диаметр провода 0.1 mm, расстояние между проводами 0.2 mm, длина решетки 30 mm, внешний диаметр кольца 6.5 mm, $s = 2.5 \text{ mm}$. Резонанс решетки (область I) электрического типа возбуждается электрическим микроволновым полем и наблюдается немного выше частоты 6 GHz. Резонанс в кольце (область II) возбуждается в частотной области существования поляритонов и зависит от ориентации ДРК.

На рис. 1 приведены частотные зависимости Y структуры „РП–ДРК“ при расположении ДРК параллельно решетке (его ось перпендикулярна РП), при этом электрическое поле \mathbf{E} перпендикулярно линии, соединяющей разрыв, а магнитное поле \mathbf{h} направлено вдоль оси ДРК. Для сравнения приведена частотная зависимость в отсутствие РП. Видна резонансная зависимость коэффициента T с минимумом прохождения на частоте 5.3 GHz, причем интенсивность резонанса в присутствии РП более чем на порядок выше. В такой ориентации в отсутствие решетки

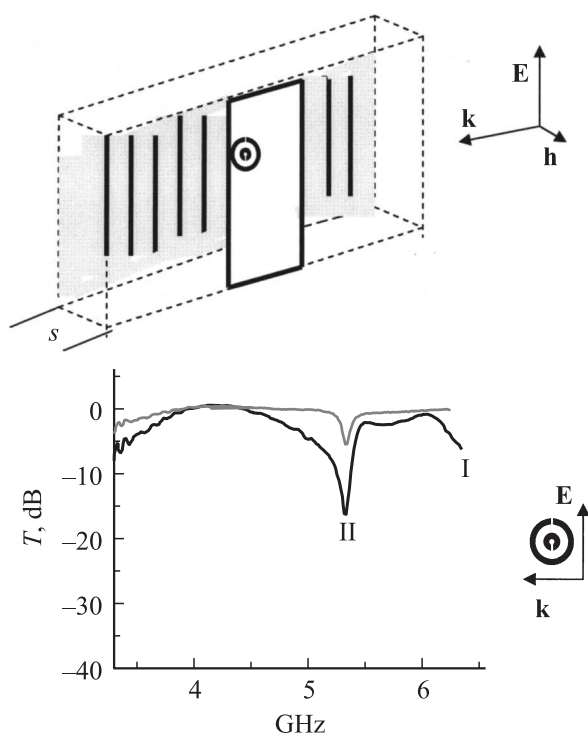


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициентов прохождения T в волноводе со структурой „решетка проводов–разомкнутое кольцо“, кольцо параллельно решетке, вектор электрического поля направлен перпендикулярно линии, соединяющей разрыв кольца (жирная кривая) и с кольцом в отсутствие решетки (нежирная кривая). Сверху — используемая структура, справа — ориентация кольца относительно электрического \mathbf{E} и волнового \mathbf{k} векторов падающей волны. s — расстояние между решеткой и кольцом.

ДРК возбуждается магнитным полем плоской волны и не возбуждается электрическим. При возбуждении поляритами (в присутствии метаповерхности) электрическое возбуждение было бы возможно при наличии продольной составляющей, параллельной линии разрыва кольца, но, как будет показано ниже, поверхностный поляритон для исследуемой РП не имеет продольной составляющей электрического поля. Таким

образом, ДРК возбуждается поперечным магнитным полем поляритона, направленным вдоль оси кольца, при этом наблюдается резонансный отклик, существенно превышающий отклик кольца, возбуждаемого плоской волной.

На рис. 2 приведены частотные зависимости T , измеренные как в волноводе, так и в запредельной секции, в присутствии и отсутствии мета-поверхности при ортогональном расположении ДРК относительно решетки проводов (ось ДРК параллельна РП). Рис. 2, *a* соответствует ориентации, при которой вектор электрического поля \mathbf{E} направлен параллельно линии, соединяющей разрыв. При измерениях в волноводе наблюдается резонансная зависимость коэффициента T с минимумом прохождения на частоте 5.7 GHz, интенсивность резонанса в присутствии мета-поверхности более чем на порядок выше. При измерениях в запредельной секции в отсутствие мета-поверхности наблюдается область прозрачности, простирающаяся влево от минимума T , а в присутствии мета-поверхности видны две области прозрачности — слева и справа от минимума T . При данной ориентации ДРК в отсутствие мета-поверхности может возбуждаться только электрическим полем падающей плоской волны. В этом случае возбуждается резонанс электрического типа, подтверждаемый и идентифицируемый в измерениях в запредельной секции, когда область прозрачности находится ниже частоты резонанса в волноводе. В присутствии РП кольцо может возбуждаться электрическим полем поляритона, поскольку это поле, направленное параллельно проводам решетки, параллельно также линии разрыва ДРК. При этом возможно также возбуждение магнитным полем поляритона при наличии продольной составляющей поля, поскольку такое поле направлено вдоль оси ДРК. Результаты измерений в запредельной секции и анализ областей прозрачности свидетельствуют о том, что кольцо возбуждается как магнитным, так и электрическим полем поляритона, поскольку область прозрачности ниже частоты резонанса в волноводе идентифицирует электрическое возбуждение, а область прозрачности выше частоты резонанса в волноводе идентифицирует магнитное возбуждение [5]. Это свидетельствует о наличии продольного магнитного поля поляритона (в отличие от плоской волны).

Рис. 2, *b* соответствует ориентации, при которой линия, соединяющая разрыв ДРК, перпендикулярна электрическому полю. В этом случае ДРК в отсутствие РП не может возбуждаться ни электрическим,

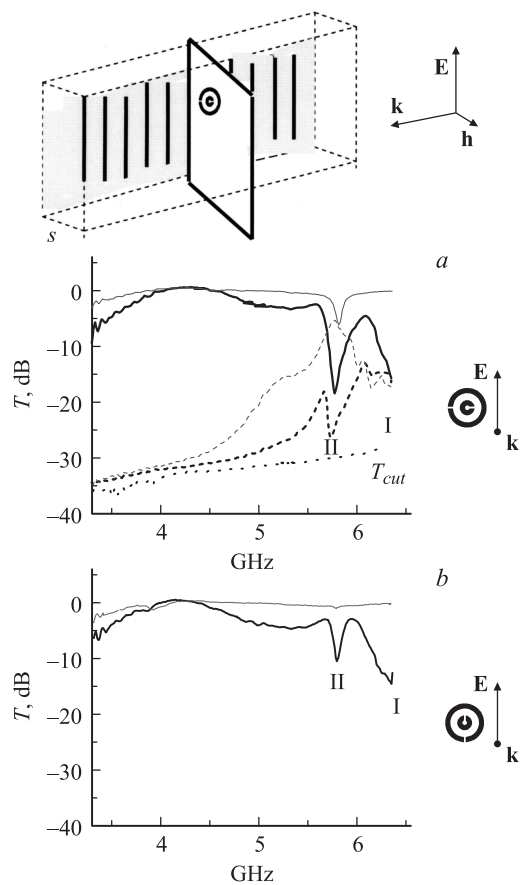


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициентов прохождения T в волноводе (сплошные кривые) и в запердельной секции (штриховые кривые) со структурой „решетка проводов—разомкнутое кольцо„ (жирные кривые) и с кольцом в отсутствие решетки (нежирные кривые), плоскость кольца ортогональна решетке: вектор электрического поля направлен параллельно линии, соединяющей разрыв кольца (*a*), вектор электрического поля направлен перпендикулярно линии, соединяющей разрыв кольца (*b*). Точечная кривая T_{cut} соответствует коэффициенту прохождения в запрещенной полосе пустой запердельной секции. Сверху — используемая структура, справа — ориентация кольца относительно электрического E и волнового k векторов падающей волны. s — расстояние между решеткой и центром кольца.

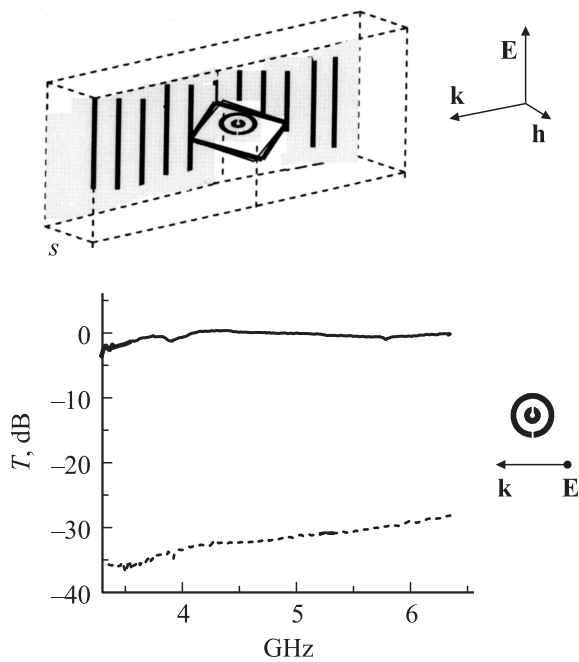


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициентов прохождения T в волноводе со структурой „решетка проводов–разомкнутое кольцо“ (сплошная кривая) и в запредельной секции (штриховая кривая), кольцо ортогонально решетке (ось кольца параллельна проводам решетки), вектор электрического поля направлен перпендикулярно плоскости кольца. Сверху — используемая структура, справа — ориентация кольца относительно электрического E и волнового k векторов падающей волны. s — расстояние между решеткой и центром кольца.

ни магнитным полями падающей плоской волны, что подтверждается отсутствием электромагнитного отклика: частотная зависимость T с кольцом не отличается от аналогичной зависимости пустого волновода. В присутствии же РП на частоте 5.7 GHz возникает резонансный отклик: ДРК возбуждается продольной составляющей магнитного поля поляритона.

На рис. 3 приведены частотные зависимости, измеренные в волноводе и запредельной секции для ориентации, при которой ось ДРК

параллельна проводам решетки, а линия разрыва ДРК параллельна ее плоскости. В отсутствие решетки при такой ориентации кольцо не может возбудиться ни электрическим полем, ортогональным ему, ни магнитным полем, параллельным плоскости ДРК. В присутствии РП кольцо могло бы возбудиться электрическим полем поляритона при наличии продольной составляющей, а также магнитным при наличии составляющей магнитного поля поляритона, параллельной проводам. Как видно из рис. 3, такие составляющие электрического и магнитного поля поляритона отсутствуют, поскольку отсутствует электромагнитный отклик: зависимости T с ДРК в волноводе и в запредельной секции не отличаются от аналогичных зависимостей для пустых волновода и запредельной секции.

Анализируя возбуждение резонанса в одиночном ДРК, можно сделать вывод о полях поверхностных поляритонов, формируемых решеткой проводов конечной длины. Так, электрическое поле направлено вдоль проводов решетки и не имеет продольной составляющей. Магнитное поле имеет поперечную и продольную составляющие и не имеет составляющей, параллельной проводам. Перемещая ДРК, можно изучить локальные поляризационные свойства, а также степень однородности полей. Информация о поляризационных свойствах поляритонов оказалась весьма полезной авторам при изучении нового эффекта, который заключается в том, что одиночный линейный провод может обладать магнитным резонансным откликом в случае расположения провода вблизи решетки проводов резонансной длины [6]. Эта информация позволила исключить предположение об электрическом возбуждении.

Таким образом, экспериментально показано, что исследование резонанса в планарном ДРК может быть эффективным методом изучения полей поверхностных поляритонов. Он применим и в случае объемной волны, но благодаря обнаруженному эффекту десятикратного усиления резонанса при возбуждении поляритонами в сравнении с возбуждением плоской волной предлагаемый метод особенно эффективен для определения свойств электрического и магнитного полей поверхностных поляритонов.

В заключение благодарим за поддержку РФФИ (гранты № 10-02-00053, 10-08-00018, 11-02-90403) и ГФФИ Украины (грант № Ф40.2/037).

Список литературы

- [1] *David J. Bergman, Mark I. Stockman.* // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. P. 027402.
- [2] *Kraftmakher G.A., Butylkin V.S.* // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2010. V. 49. P. 33004.
- [3] *Marques R., Medina F., Rafii-El-Idrissi R.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. P. 144440–1-6.
- [4] *Sauviac B., Simovski C.R., Tretyakov S.A.* // Electromagnetics. 2004. V. 24. P. 317–338.
- [5] *Galina Kraftmakher.* // Int. J. Applied. Electromagn. Mech. 2004. V. 19. P. 57–61.
- [6] *Бутылкин В.С., Крафтмахер Г.А.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 7. С. 38–46.