ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 58, № 4 ФИЗИКА 2015

УДК 537.876.4+537.86.029.65/.79

М.М. НАЗАРОВ, А.Н. ЗАРУБИН**, С.Ю. САРКИСОВ**, О.П. ТОЛБАНОВ**, А.В. ТЯЖЕВ***

ВЛИЯНИЕ РАЗОРВАННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА ПРОПУСКАНИЕ ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ [1]

Экспериментально исследуются спектры пропускания в терагерцовом диапазоне частот субволновых структур в виде матриц из разорванных кольцевых резонаторов на подложках из керамики. В случае распространения терагерцовой волны вдоль структур, при их использовании в качестве одной из стенок планарного диэлектрического волновода, обнаружено увеличение пропускания на частотах вблизи *LC*-резонанса для отдельных кольцевых резонаторов. Выявлены зависимости частот резонансного поглощения от геометрических характеристик структур в случае прохождения терагерцовой волны по нормали к их поверхностям.

Ключевые слова: *разорванные кольцевые резонаторы, субволновые структуры, терагерцовое излучение, планарный волновод.*

Введение

Наряду с лабораторными применениями, например в спектроскопии, или для исследования быстропротекающих процессов в полупроводниковых структурах перспективным является применение терагерцовых волн для высокоскоростной передачи информации. Такая передача может осуществляться на небольшие расстояния между компонентами устройств оптоэлектроники по волноводам или посредством поверхностных плазмонных волн. Для распространения плазмонов в известных материалах достаточно велико поглощение или мала локализация поля. Для придания материалам необходимых свойств предложено использовать субволновые структуры (СВС) на границах металл – диэлектрик. В настоящее время продолжают разрабатываться различные конфигурации СВС, как планарные, так и трехмерные, для создания метаматериалов, фильтров и абсорберов в терагерцовом диапазоне [1]. Таким образом, актуальными являются работы по исследованию взаимодействия терагерцового излучения с СВС и его распространению в волноводных структурах.

Одним из наиболее распространенных типов СВС являются структуры, сформированные периодически расположенными разорванными кольцевыми резонаторами (РКР) на подложке из полупроводника или диэлектрика. Для терагерцового диапазона частот характерные размеры РКР составляют несколько десятков микрон, т.е. примерно на порядок меньше, чем длина волны излучения. Типичный РКР имеет проводящий контур (кольцо или квадрат из металла) и содержит разрыв. При прохождении терагерцовой волны через такой контур на некоторых частотах возникает резонансное поглощение. Простейшей эквивалентной моделью РКР является обычный колебательный контур. Емкость этого контура сосредоточена в области разрыва РКР (конденсатор), а сам контур представляет собой распределенную индуктивность (катушка с одним витком). В первом приближении резонансное поглощение в структурах из РКР определяется *LC*-резонансом в отдельных контурах. Более детальные подходы предполагают рассмотрение взаимного влияния РКР друг на друга [2]. В целом, СВС из РКР представляет для терагерцовой волны некую среду с эффективной диэлектрической и магнитной проницаемостью. При этом такая среда имеет выраженный анизотропный характер, ее свойства зависят от ориентации РКР относительно направления распространения и поляризации электромагнитного излучения.

Основной целью исследований структур из РКР можно считать создание метаматериалов, обладающих отрицательным показателем преломления [2, 3]. Это требует присутствия составляющей магнитного поля волны, ориентированной поперек плоскости РКР. В наиболее простом случае планарной СВС и прохождения волны по нормали к ее поверхности это, очевидно, не выполняется. Для решения данной проблемы используют скользящее падение или создают многослойные СВС. Возможно создание трехмерных структур, в которых РКР ортогональны поверхности

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-02-00846) и госзадания Минобрнауки РФ (проект № 3.1206.2014).

подложки [4]. Следует отметить, что создание таких структур предполагает применение сложных технологических методов. В особенности это относится к СВС для оптического диапазона частот, требующих размеров РКР всего в несколько десятков нанометров [2].

В настоящей работе исследуются спектры пропускания в терагерцовом диапазоне частот планарных СВС из РКР на подложках из поликора. Для получения составляющей магнитного поля, ориентированной перпендикулярно РКР, эксперименты проведены в конфигурации, когда излучение распространялось вдоль образца, т.е. вдоль плоскостей контуров. Для этого образцы устанавливались в качестве одной из стенок планарного диэлектрического волновода. В качестве второй стенки выступала тонкая диэлектрическая подложка без нанесенных РКР.

Схема эксперимента и исследованные образцы

Конфигурация и размеры исследованных в настоящей работе образцов СВС показаны на рис. 1 и в таблице. Образцы изготавливались на подложке из поликора по технологии, близкой к использованной в [5] для получения дипольных антенн. Фоторезист наносился с помощью контактной фотолитографии на установке MJB 4 («SUSS MicroTec Group», Германия). Далее наносился слой ванадия толщиной 20 нм. После слоя ванадия с помощью магнетронного напыления наносился слой алюминия толщиной 380 нм. После удаления фоторезиста на установке Vectus («ADT», Израиль) вырезались образцы размером 5×5 мм. Всего в работе использовалось три типа образцов (таблица).

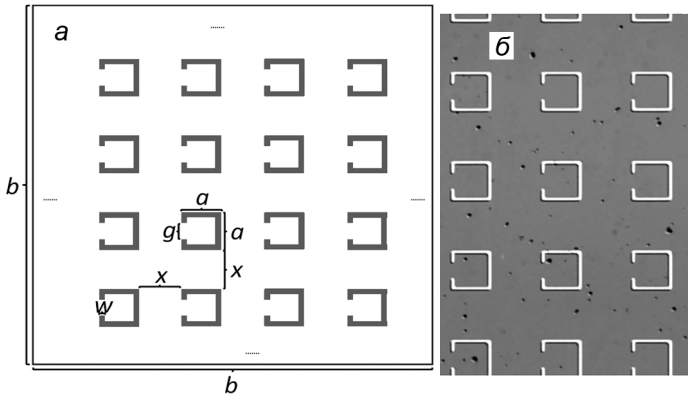

Рис. 1. Схематическое изображение образцов СВС из РКР (*а*) и микрофотография образца *A* (*б*)

Спектры пропускания образцов записывались с помощью стандартного THz-TDS-спектрометра. В качестве генератора применялся кристалл LT-GaAs, поверхность которого возбуждалась фемтосекундными лазерными импульсами ($\tau = 100$ фс, $\lambda = 790$ нм). Электрооптическое детектирование осуществлялось в кристалле ZnTe толщиной 1 мм [6, 7, 9]. Спектры пропускания образцов с РКР нормировались на спектры пропускания подложки из поликора той же толщины, но без нанесенных РКР.

Планарный волновод был сформирован двумя плотно прижатыми пластинами из диэлектрика. Пропускание такого волновода служило опорным сигналом. Для проведения измерений с образцами СВС одна из пластин заменялась на исследуемый образец, устанавливаемый рисунком РКР внутрь. Для ввода терагерцового излучения в волновод кристалл-генератор размещался непосредственно на торце волновода. В качестве эмиттера в данном случае использовался кристалл ZnTe толщиной 1 мм, в котором происходило оптическое выпрямление [6, 7]. Перемещая лазерное пятно по генератору, добивались наилучшего ввода терагерцового излучения в волновод. Для создания оптического контакта в качестве иммерсионной жидкости между ZnTe и волноводом наносилось машинное масло. Прошедшее через волновод терагерцовое излучение фокусировалось с помощью кварцевой линзы на дипольную антенну, которая служила детектором.

Геометрические параметры образцов СВС из РКР и теоретическая частота *LC*-резонанса

Образец СВС	*b*, мкм	*w*, мкм	*x*, мкм	*g*, мкм	*a*, мкм	$f_{рез}$, ТГц
A	5000	5	55	15	45	0.57
B	5000	5	25	10	25	0.84
C	5000	5	155	15	45	0.57

Измерения проводились при двух ориентациях поляризации терагерцовой волны: параллельной и перпендикулярной стенкам волновода. Для каждого из этих случаев измерения проводились при ориентации разрывов РКР параллельно и перпендикулярно направлению распространения

волны. Спектры пропускания нормировались на спектры пропускания волновода без РКР на диэлектрических пластинах (опорный сигнал).

Результаты и их обсуждение

Как было отмечено ранее, в первом приближении спектральное положение минимумов пропускания СВС из РКР определяется частотой *LC*-резонанса отдельного РКР. В случае конфигурации РКР, показанной на рис. 1, *а*, индуктивность РКР определяется площадью контура и может быть рассчитана как

$$L = \mu_0 \frac{a^2}{h}, \tag{1}$$

где μ_0 – магнитная постоянная; h – толщина слоя металла РКР. Емкость плоского конденсатора, сформированного разрывом в РКР, записывается так:

$$C = \frac{\varepsilon_{\text{eff}} \cdot \varepsilon_0 \cdot w \cdot h}{g}. \tag{2}$$

Здесь ε_0 – электрическая постоянная; ε_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость, которую можно записать как среднее между диэлектрической проницаемостью воздуха и поликора ε_n:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{1+\varepsilon_n}{2}. \tag{3}$$

Тогда частоту *LC*-резонанса для РКР можно записать как

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{c\sqrt{g}}{2\pi a\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}} w}}, \tag{4}$$

где c – скорость света; a, g и w – геометрические параметры РКР в соответствии с рис. 1, *а*. Частоты *LC*-резонанса, рассчитанные по формуле (4) для трех типов образцов, исследованных в настоящей работе, представлены в таблице. В расчетах использовано значение ε_n = 10.24, полученное путем измерения комплексного пропускания подложки на том же терагерцовом спектрометре, который использовался для измерения спектров пропускания образцов с РКР.

Экспериментально измеренные спектры пропускания для трех типов образцов СВС при прохождении терагерцовой волны по нормали к поверхности представлены на рис. 2. На графиках отчетливо видны характерные для СВС из РКР провалы в спектрах пропускания. Спектральное положение этих провалов для случая, когда терагерцовая волна поляризована перпендикулярно направлению ориентации разрывов РКР, примерно совпадает со значениями частоты *LC*-резонанса, рассчитанными по формуле (4). К настоящему времени процессы взаимодействия электромагнитного излучения с планарными СВС из РКР при распространения волны по нормали к

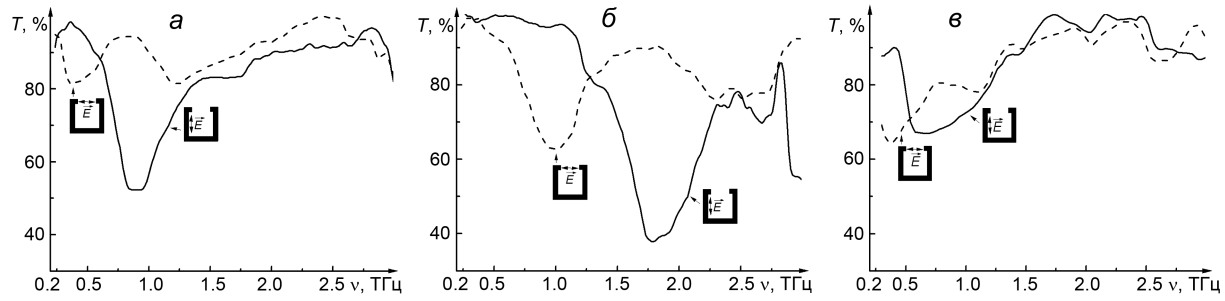

Рис. 2. Спектры пропускания образцов *A* (*а*), *B* (*б*) и *C* (*в*) в случае падения терагерцовой волны по нормали к поверхности при двух вариантах ориентации поляризации относительно РКР. Спектры нормированы на спектры пропускания подложки без РКР

РКР подробно изучены. Наблюдаемые резонансы при прямоугольных РКР интерпретируются следующим образом: при поляризации излучения параллельно стороне РКР, содержащей разрыв, самый низкочастотный пик представляет собой *LC*-резонанс, следующий за ним – плазмонный резонанс в сплошном участке РКР, параллельном разрыву; при ортогональной поляризации максимумы отражения связываются с плазмонными резонансами в боковых участках кольца. Этот подход

хорошо согласуется с экспериментальными результатами, представленными на рис. 2. Следует отметить, что в работе [8] путем численных расчетов показано, что вместо того, чтобы разделять имеющиеся при такой конфигурации эксперимента явления на колебания *LC*-контура и плазмонные резонансы в различных частях кольца, все резонансы можно объяснить плазмонными резонансами РКР как целого. В случае поляризации электромагнитной волны параллельно стороне с разрывом возбуждаются нечетные моды, а в случае ортогональной поляризации – четные. При этом *LC*-резонансу соответствует первая мода.

Положения провалов на спектрах пропускания для образцов *A* и *C*, состоящих из РКР одинаковых размеров, примерно совпадают (рис. 2, *а* и *в*). При наклонном падении терагерцовой волны на образцы (под углами 25–60°) положение спектральных особенностей также не изменялось. Это свидетельствует о преобладающем влиянии на данные резонансы параметров отдельных РКР, а не их взаимного расположения. Особенности спектров пропускания (рис. 2) свидетельствуют, что СВС из РКР имеют свойства полосно-заграждающего фильтра. Исследованные ранее СВС в виде массива прямоугольных отверстий в аналогичной конфигурации эксперимента обладают свойствами полосно-пропускающего фильтра [9]. Различие между этими СВС также заключается в том, что резонансные частоты для СВС из РКР фиксированы и не могут перестраиваться с помощью наклона СВС.

Наиболее эффективное возбуждение *LC*-резонанса в РКР должно возникать, когда магнитное поле волны направлено поперек плоскости кольца. Такая конфигурация, как было отмечено ранее, возможна в случае распространения волны по волноводу, одна из стенок которого представляет собой СВС из РКР на диэлектрической подложке (рис 3, *а*). Результаты проведенных экспериментов показали наличие выраженных максимумов пропускания на частотах, соответствующих частотам *LC*-резонанса РКР-образцов. В районе этих частот пропускание волновода превышало пропускание аналогичного волновода без СВС, нанесенной на поверхность диэлектрической стенки, более чем в 2 раза (рис. 3, *б*). Влияние *LC*-резонанса подтверждается тем, что данный эффект наблюдался только для конфигурации эксперимента (из четырех), когда колебания электрического поля волны происходили в плоскости стенки волновода, а разрывы резонаторов были ориентированы вдоль направления ее распространения. Эта конфигурация соответствует наиболее благоприятным условиям возбуждения *LC*-резонанса. Для остальных трех конфигураций эксперимента резонансов не наблюдалось. Частота резонанса менялась с изменением размеров РКР и слабо зависела от расстояния между ними, что свидетельствует об отсутствии определяющего влияния брэгговского отражения. Наблюдаемый эффект можно объяснить перераспределением поля внутри волновода. Материальное поглощение поликора ослабляет проходящее излучение. Предположительно, наличие РКР перераспределяет моду на частотах *LC*-резонанса так, что часть излучения выходит к наружной поверхности стенки волновода, где меньше поглощение, что уменьшает его ослабление. Для случая нормального падения терагерцовой волны на СВС из РКР, минимумы на спектрах пропускания практически соответствуют частотам максимумов на спектрах волноводного пропускания (рис. 2, *б* и 3, *б*, частота 0.9 ТГц).

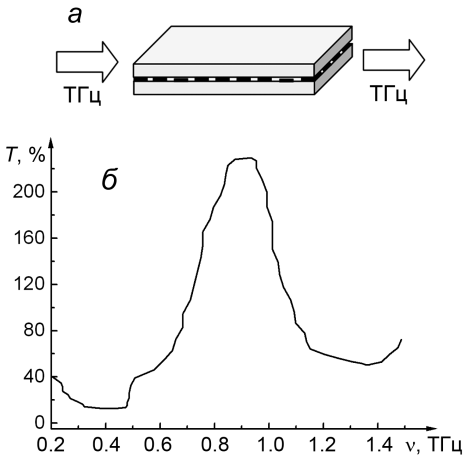

Рис. 3. Конфигурация эксперимента (*а*) и нормированный спектр пропускания волновода с одной из стенок образованной образцом *B* (*б*). Падающая терагерцовая волна поляризована в плоскости волновода, разрывы РКР ориентированы вдоль волнового вектора

Заключение

В работе исследованы спектры пропускания в терагерцовом диапазоне частот планарных СВС из РКР в новой, оригинальной геометрии эксперимента. Установлено, что изготовленные образцы СВС при прохождении через них терагерцовой волны по нормали к поверхности обладают свойствами полосно-заграждающих фильтров, причем спектральные положения полос поглощения определяются в первую очередь размерами отдельных РКР. В случае, когда образцы устанавлива-

лись в качестве одной из стенок планарного диэлектрического волновода, обнаружены выраженные максимумы пропускания волновода на частотах, близких к частотам *LC*-резонанса РКР-образцов. Эффект наблюдался только тогда, когда колебания электрического поля волны происходили в плоскости стенки волновода, а разрывы РКР были ориентированы вдоль направления ее распространения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh R., Lu X., Gu J., et al. // J. Opt. – 2010. – V. 12. – No. 1. – P. 015101-1–5.
2. Liu N. and Giessen H. // Angew. Chem. Int. Ed. – 2010. – V. 49. – No. 51. – P. 9838–9852.
3. Smith D.R., Padila W.J., Vier D.C., et al. // Phys. Rev. Lett. – 2000. – V. 84. – No. 18. – P. 4184–4187.
4. Fan K., Strikwerda A.C., Tao H., et al. // Opt. Express. – 2011. – V. 19. – No. 13. – P. 12619–12627.
5. Sarkisov S.Yu., Safiullin F.D., Skakunov M.S., et al. // Russ. Phys. J. – 2013. – V. 55. – No. 8. – P. 890–898.
6. Nazarov M.M., Makarova S.A., Shkurinov A.P., and Okhotnikov O.G. // Appl. Phys. Lett. – 2008. – V. 92. – No. 2. – P. 021114-1–3.
7. Nazarov M.M., Sarkisov S.Yu., Shkurinov A.P., and Tolbanov O.P. // Appl. Phys. Lett. – 2011. – V. 99. – No. 8. – P. 081105-1–3.
8. Rockstuhl C., Zentgraf T., Guo H., et al. // Appl. Phys. B. – 2006. – V. 84. – No. 1–2. – P. 219–227.
9. Angeluts A.A., Nazarov M.M., Ryabov A.Yu., et al. // Radiophys. Quantum Electron. – 2013. – V. 55. – No. 10–11. – P. 634–647.

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН,
г. Шатура, Россия
**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: sarkisov@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 28.07.14.

Назаров Максим Михайлович, к.ф.-м.н., науч. сотр.;
Зарубин Андрей Николаевич, науч. сотр.;
Саркисов Сергей Юрьевич, к.ф.-м.н., науч. сотр.;
Толбанов Олег Петрович, д.ф.-м.н., зав. лабораторией;
Тяжев Антон Владимирович, науч. сотр.