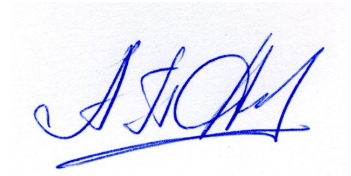


На правах рукописи



ФРОЛОВ АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ

СТРУКТУРЫ С ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ И ИХ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ-МИКРОСКОПИИ

01.04.03 – Радиофизика

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
на кафедре физики твердого тела

Научные руководители:

заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор

Усанов Дмитрий Александрович

доктор физико-математических наук,
профессор

Скрипаль Александр Владимирович

Официальные оппоненты:

Неганов Вячеслав Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой основ конструирования и технологий радиотехнических систем ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ)».

Сивяков Борис Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электроника» ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Ведущая организация: Саратовский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН».

Защита диссертации состоится 29 декабря 2014 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 в Саратовском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корп., ауд. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич Саратовского государственного университета (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан « 10 » ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В последние десятилетия интенсивно проводятся исследования свойств, так называемых, фотонных кристаллов, которые характеризуются наличием частотных зон разрешенных состояний (полос пропускания) и запрещенных зон (полос запираания) [1]. Аналогично ситуации, характерной для электронов, находящихся в поле периодически расположенных атомов, энергетические состояния которых образуют для электронов зоны разрешенных и запрещенных значений энергии, свойства фотонных кристаллов могут быть связаны с периодическим расположением образующих их элементов. Это открывает новые возможности создания различного типа устройств, в которых используются свойства, характерные для фотонных кристаллов в различных частотных диапазонах. Нарушение периодичности в фотонном кристалле, например, вследствие наличия в нем одного из элементов с отличающимися от других свойствами приводит к появлению в полосе запираания частоты, на которой возможно прохождение волны со сравнительно низким затуханием [2]. Такого типа фотонные кристаллы с использованием элементов на основе различных типов линий передачи созданы, в том числе, и для СВЧ диапазона [3]. СВЧ фотонные кристаллы были использованы для создания высоконаправленных антенн, СВЧ-фильтров, улучшения характеристик СВЧ-детекторов, усилителей и т.д. [4]. Возможность рассчитывать характеристики фотонных кристаллов с точностью, позволяющей обеспечить хорошее совпадение с экспериментом, была использована для неразрушающего контроля структур с нанометровыми полупроводниковыми слоями [5]. При этом контролируемые структуры являлись элементами, нарушающими периодичность фотонного кристалла. Высокая чувствительность СВЧ фотонного кристалла к характеристикам структуры была обусловлена тем, что нарушающая периодичность неоднородность приводила к появлению высокоселективного резонансного прохождения излучения через кристалл, сильно зависящего от параметров структуры. Высокоселективный резонанс можно было обеспечить также использованием в измерительной системе низкоразмерного резонатора [6].

Недостатком измерительной системы с фотонным кристаллом является низкая локальность измерений, определяемая площадью поперечного сечения волновода. Этот недостаток отсутствует, если измерения проводить с использованием ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа. Такого рода измерительная система позволяет обеспечить высокую локальность, определяемую примерно удвоенной площадью кончика зонда, для повышения чувствительности соединенного с резонатором. Стоит отметить, что возможность использования в ближнеполевым сканирующем СВЧ-микроскопе в качестве высокоселективной системы СВЧ фотонного кристалла ранее не рассматривалась. Можно прогнозировать, что создание такого микроскопа, наряду с высокой локальностью измерений, позволит повысить его чувствительность при измерении слоев с толщинами в единицы нанометров и с малыми значениями диэлектрической проницаемости.

Совокупность исследований, позволяющих решить такого рода задачу, актуально как для науки, так и для практики в связи с тем, что открывает возможность расширить круг нанообъектов, свойства которых могут быть изучены с использованием экспериментальных методов.

Другой актуальной проблемой, относящейся к физике СВЧ фотонных структур с полосой запираания, является поиск решений, использование которых может позволить уменьшить число элементов, необходимых для формирования полосовых свойств, и, как следствие, уменьшить габариты фотонных структур. Примером такого рода решений является использование схемы, в которой волна проходит через один элемент, но многократно. Конструктивно такая фотонная структура выполнена на элементе,

представляющем собой микрополосковую линию, замкнутую в круг с зазором [7]. Представляет несомненный интерес поиск других решений, реализующих эту идею.

Цель диссертационной работы:

теоретическое и экспериментальное исследование возможности создания регулируемых, высокоселективных, малогабаритных СВЧ фотонных структур и их использования в качестве элементов ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов для повышения их чувствительности к изменению параметров материалов и структур микро- и наноэлектроники.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

С использованием методов математического моделирования и результатов экспериментальных исследований обоснование возможности получения высокоселективных резонансов при использовании фотонных структур с различным числом составляющих их элементов.

Проведение расчета эффективной удельной электропроводности $n-i-p-i-n$ структуры при различных уровнях инжекции неравновесных носителей заряда, с целью использования её в качестве управляющего элемента волноводных структур, обладающих как запрещенной, так и разрешенной зоной пропускания.

Теоретическое и экспериментальное исследование нового типа СВЧ-устройства, характеризующегося наличием запрещенной и разрешенной зон, в СВЧ-диапазоне частот. Исследование возможности электрического управления характеристиками высокоселективных резонансов в запрещенных и разрешенных зонах СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов и его использования для управления выходной мощностью генератора на диоде Ганна.

Исследование характеристик ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна с использованием микроаксиально-волноводного перехода, центральный проводник которого выступает за пределы внешнего проводника микрокоаксиала, в качестве ближнеполевого зонда с целью возможности визуализации с высоким пространственным разрешением рельефа и электрофизических свойств поверхности керамической пластины с нанесенным нанометровым слоем металла, как в режиме прямого доступа к объекту сканирования, так и в режиме подповерхностного зондирования.

Теоретическое и экспериментальное исследование возможности применения одномерного волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности в качестве перестраиваемого резонатора ближнеполевого СВЧ-микроскопа для повышения чувствительности измерительной системы к изменению электрофизических параметров исследуемых объектов.

Новизна исследований, проведенных в ходе диссертационной работы, состоит в следующем:

Установлено, что при увеличении количества слоёв N фотонного кристалла, представляющего собой одномерную структуру, с малым числом входящих в его состав элементов, симметричную относительно центрального слоя с фиксированным значением диэлектрической проницаемости, ширина запрещенной зоны монотонно уменьшается, а её глубина монотонно увеличивается, если количество слоёв N фотонного кристалла удовлетворяет только одной из последовательностей чисел $N = 4n - 1$, например, 3, 7, 11, 15 и т.д. или $N = 4n + 1$, например, 5, 9, 13, 17 и т.д., где n – целые числа.

Теоретически обосновано и экспериментально показано, что волноводное СВЧ-устройство на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, помещенных в волноводную секцию, может обладать фотонной запрещенной зоной с высоко-

селективным резонансом пропускания и фотонной разрешённой зоной с резонансом запираения.

Экспериментально показано, что регулировка коэффициента пропускания в резонансной особенности для «симметричной» конструкции в диапазоне 23.5 дБ при уровне потерь пропускания от 1.5 дБ и для «несимметричной» конструкции – в диапазоне 66 дБ при уровне потерь пропускания от 3 дБ обеспечивается с помощью $n-i-p-i-n$ -структуры, помещённой в зазоре между штырем и рамочным элементом.

Теоретически обоснована возможность использования одномерного волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности в качестве резонатора в составе зонда на основе микрооаксиально-волноводного перехода ближнеполевого СВЧ-микроскопа для повышения чувствительности коэффициента отражения S_{11} к изменению удельной электропроводности σ полупроводниковых пластин. При этом в случае исследований сильнолегированных полупроводниковых структур зависимости S_{11} в режиме ближнего поля от величины σ имеют как монотонный, так и немонотонный характер, что может быть обусловлено изменением структуры ближнего поля, определяемой как характеристическими размерами апертуры ближнеполевого зонда, так и глубиной проникновения ближнего поля в полупроводниковый образец, зависящей от его удельной электропроводности.

Экспериментально установлено, что использование в ближнеполевом СВЧ-микроскопе с регулируемым рамочным элементом связи высокоселективной резонансной системы в виде фотонной структуры с неоднородностью обеспечивает достижение чувствительности коэффициента отражения $\partial S_{11}/\partial \varepsilon$ к изменению диэлектрической проницаемости ε более 39.5 дБ/ ε и разрешающей способности $\Delta \varepsilon/\varepsilon$ порядка 10^{-4} . Чувствительность коэффициента отражения $\partial S_{11}/\partial d$ к изменению толщины металлического слоя (Cr) d в диапазоне значений d от 1 нм до 3 нм составляет 4 дБ/нм, а разрешающая способность $\Delta d/d \sim 10^{-3}$.

Проведено теоретическое описание эффекта автодинного детектирования в многоконтурном генераторе на диоде Ганна в случае, когда нагрузкой СВЧ-генератора служит отрезок передающей линии, содержащей фотонный кристалл.

Разработан ближнеполевой СВЧ-микроскоп на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна, позволяющий визуализировать с высоким пространственным разрешением рельеф и электрофизические свойства поверхности керамической пластины с нанесённым нанометровым слоем металла.

Впервые экспериментально доказано, что использование ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна позволяет решать задачи подповерхностного зондирования проводящих и непроводящих включений при наличии на поверхности высокопроводящего покрытия.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается качественным и количественным соответствием результатов теоретического анализа и компьютерного моделирования, с использованием численных методов, результатам, полученным экспериментально, строгостью используемых математических моделей, корректностью упрощающих допущений, сходимостью вычислительных процессов к искомым решениям, выполнимостью предельных переходов к известным решениям. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением современной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных результатов с использованием стандартных методов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Предложена конструкция ближнеполевого СВЧ-микроскопа с зондом в виде цилиндрического резонатора с регулируемым рамочным элементом связи и высокоселективной резонансной системой в виде фотонной структуры с неоднородностью, обеспечивающая высокую чувствительность измерительной системы к изменению толщины металлических слоев в нанометровом диапазоне и диэлектрической проницаемости.

Предложен новый тип волноводного устройства на основе диафрагмы и системы рамочных элементов, характеризующийся наличием запрещенной и разрешенной зон в СВЧ-диапазоне частот. Показано, что введение в конструкцию неоднородностей типа «штырь с зазором» с электрически управляемым элементом в виде $n-i-p-i-n$ -структуры обеспечивает возможность создания СВЧ-устройства для управления выходной мощностью генератора на диоде Ганна.

Создана модернизированная конструкция ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна и показана возможность его использования для визуализации с высоким пространственным разрешением рельефа и электрофизических свойств поверхности керамической пластины с нанесенным нанометровым слоем металла.

Обеспечена реализация методов неразрушающего контроля элементов СВЧ-микросхем на основе возможности подповерхностного зондирования с использованием ближнеполевого СВЧ-микроскопа.

Основные положения, выносимые на защиту:

С ростом количества слоев N фотонного кристалла, представляющего собой одномерную структуру, с малым числом входящих в его состав элементов, симметричную относительно центрального слоя с фиксированным значением диэлектрической проницаемости, ширина запрещенной зоны монотонно уменьшается, а её глубина монотонно увеличивается, если количество слоев N фотонного кристалла удовлетворяет только одной из последовательностей чисел $N = 4n - 1$ или $N = 4n + 1$, где n – целые числа.

Волноводное СВЧ-устройство на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, помещенных в волноведущую секцию, обладает как запрещенной, так и разрешенной зоной пропускания. Введение в рамочные элементы неоднородностей типа «штырь с зазором» обеспечивает создание в запрещенной частотной зоне резонансной особенности типа «окна прозрачности», а в разрешенной зоне резонансной особенности типа «пика заграждения». Введение в неоднородность электрически управляемого элемента в виде $n-i-p-i-n$ -структуры обеспечивает регулировку коэффициента пропускания в резонансной особенности и возможность создания СВЧ-устройства для управления выходной мощностью генератора на диоде Ганна.

Использование в ближнеполевым СВЧ-микроскопе с регулируемым рамочным элементом связи высокоселективной резонансной системы в виде фотонной структуры с неоднородностью обеспечивает достижение разрешающей способности к изменению диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon/\epsilon$ порядка 10^{-4} и разрешающей способности к изменению толщины металлических слоев в нанометровом диапазоне $\Delta d/d$ порядка 10^{-3} .

Ближнеполевой СВЧ-микроскоп на основе полупроводникового генератора на диоде Ганна, работающего в режиме автодинного детектирования, позволяет визуализировать с высоким пространственным разрешением рельеф и электрофизические свойства поверхности керамической пластины с нанесенным нанометровым слоем металла, как в режиме прямого доступа к объекту сканирования, так и в режиме подповерхностного зондирования.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы доложены на:

- 21-ой Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2011). Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.
- 41th European Microwave Conference (EuMA). 9-14 October 2011. Manchester, UK
- II-ой Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, 3-6 июня 2013г.
- 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics -Metamaterials 2013; Bordeaux, France; September 16-19, 2013.
- Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», г. Саратов, 14-15 мая 2014 года
- 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON-2014, Gdansk, Poland, June 16-18, 2014.
- 24-ой Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7—13 сентября 2014 г.
- XII-ой Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Нижний Новгород, 22 – 26 сентября 2014г.

Исследования выполнялись в рамках НИР «Разработка технологии формирования нанокompозитов на основе диэлектрических матриц с включениями в виде углеродных нанотрубок с управляемыми характеристиками в СВЧ-диапазоне и создание сканирующего зондового ближнеполевого СВЧ-микроскопа, обеспечивающего локальное измерение СВЧ-характеристик нанокompозитов», ГК № 16.740.11.0512, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, НИР «Метаматериалы на основе фотонных, фононных, плазмонных и магнотонных кристаллов и их применение в СВЧ радиоэлектронике и фотонике», грант Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования ГК № 11.G34.31.0030, НИР «Разработка ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе фотонного кристалла» по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») № 1487ГУ1/2014, НИР «Разработка на основе фотонных кристаллов СВЧ-методов контроля высокого разрешения параметров наноструктур и нанокompозитов» на 2012–2014 годы. Номер НИР: 8.425.2011. Шифр "Нанокompлекс", НИР «Исследование эффектов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов с неоднородными микро- и наноструктурами и композитами». Шифр: «Наноскоп-2» 2014–2016 годы № госрегистрации 114092340095, ОКР «Математическое моделирование процессов распространения электромагнитных волн в слоистых резистивно-диэлектрических пленочных структурах и разработка технологии их формирования» на 2014 – 2016 годы, Шифр «Феррит-19 Н/СГУ».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано работ 13, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК; 7 работ опубликованы в трудах международных и Всероссийских конференций, получены 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 патент РФ на полезную модель.

Личный вклад автора выразился в проведении всего объема экспериментальных работ, в предложении теоретических моделей, описывающих результаты экспериментов, в проведении компьютерного эксперимента и анализе полученных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 147 страницах, содержит 72 рисунка и список литературы из 142 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, описана структура и объем работы.

В первом разделе проведен критический анализ современного состояния исследования фотонных структур с запрещенной зоной, их характеристик и возможностей применения в ближнеполевой СВЧ-микроскопии.

Во втором разделе представлена теоретическая модель, описывающая взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими нарушения пространственной периодичности параметров структур, и позволяющая рассчитывать коэффициенты отражения и прохождения СВЧ-излучения. Представлены результаты компьютерного моделирования спектров отражения и прохождения одномерных волноводных фотонных кристаллов различной конфигурации при изменении длин и электрофизических параметров входящих в его элементов.

Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при её нормальном падении на многослойную структуру с плоскостями слоёв, перпендикулярными направлению распространения излучения и полностью заполняющими волновод по поперечному сечению используется матрица передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны γ_j и γ_{j+1} :

$$\mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N[1,1] & \mathbf{T}_N[1,2] \\ \mathbf{T}_N[2,1] & \mathbf{T}_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1}), \quad (1)$$

где N – число слоёв.

Коэффициенты отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с многослойной структурой, выражаются через элементы матрицы передачи \mathbf{T}_N :

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}, \quad D = \frac{\mathbf{T}_N[1,1] \cdot \mathbf{T}_N[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2] \cdot \mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]} \quad (2)$$

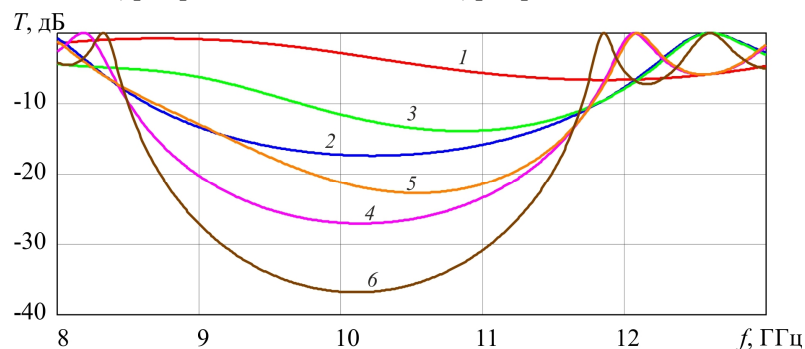


Рис. 1 Расчетные частотные зависимости коэффициентов прохождения T фотонного кристалла «поликор–фторопласт» без нарушения периодичности для нечетного количества слоёв: 1– количество слоёв равно пяти, 2–семи, 3–деяти, 4–одиннадцати, 5– тринадцати, 6– пятнадцати

Проводилось компьютерное моделирование одномерного фотонного кристалла с симметричной и несимметричной относительно центрального слоя структурой. Было установлено (см рис. 1), что при увеличении количества слоёв N фотонного кристалла, представляющего собой одномерную структуру, с малым числом входящих в его состав элементов, симметричную относительно центрального слоя с фиксированным значением диэлектрической проницаемости, ширина запрещенной зоны монотонно уменьшается, а её глубина монотонно увеличивается, если количество слоёв N фотон-

ного кристалла удовлетворяет только одной из последовательностей чисел $N = 4n - 1$, например, 3, 7, 11, 15 и т.д. или $N = 4n + 1$, например, 5, 9, 13, 17 и т.д., где n – целые числа.

Показано теоретически и экспериментально, что при увеличении толщины и диэлектрической проницаемости слоёв, обладающих большей диэлектрической проницаемостью приводит к увеличению ширины и глубины фотонной запрещенной зоны, в то время как увеличение толщины и диэлектрической проницаемости слоев одномерного СВЧ фотонного кристалла с меньшей диэлектрической проницаемостью приводит к уменьшению ширины фотонной запрещенной зоны.

При исследовании фотонных кристаллов с неоднородностью установлено, что выбором толщины нарушенного слоя в фотонном кристалле может быть получена высокоселективная резонансная особенность со значением коэффициента отражения в её минимуме равным -56 дБ.

В третьем разделе приведены результаты исследований создания волноводных структур, обладающих как запрещенной, так и разрешенной зоной пропускания, на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, помещенных в волноводную секцию. Проведен расчет эффективной удельной электропроводности $n-i-p-i-n$ структуры при различных уровнях инжекции неравновесных носителей заряда, с целью использования её в качестве управляющего элемента волноводных структур, обладающих как запрещенной, так и разрешенной зоной пропускания. Разработана модель такого устройства, на основе численного моделирования с использованием метода конечных элементов в САПР HFSS Ansoft и экспериментально проведено исследование СВЧ-характеристик созданного устройства.

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) коэффициента отражения $|S_{11}|^2$ и коэффициента прохождения $|S_{12}|^2$ СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов были рассчитаны для различных значений длины рамочных элементов l . Установлено, что при длине рамки $l = 21$ мм и высоте 7 мм в диапазоне частот от 8,8 ГГц до 10,2 ГГц реализуется режим полного отражения электромагнитного излучения, то есть образуется запрещенная зона (см. рис. 2, а). Для создания в запрещенной зоне исследуемой системы резонансной особенности в виде окна прозрачности (см. рис. 2, б) вводятся неоднородности типа «штырь с зазором» (позиции 1–3 на рис. 3), выполненные из медной проволоки диаметром 1 мм.

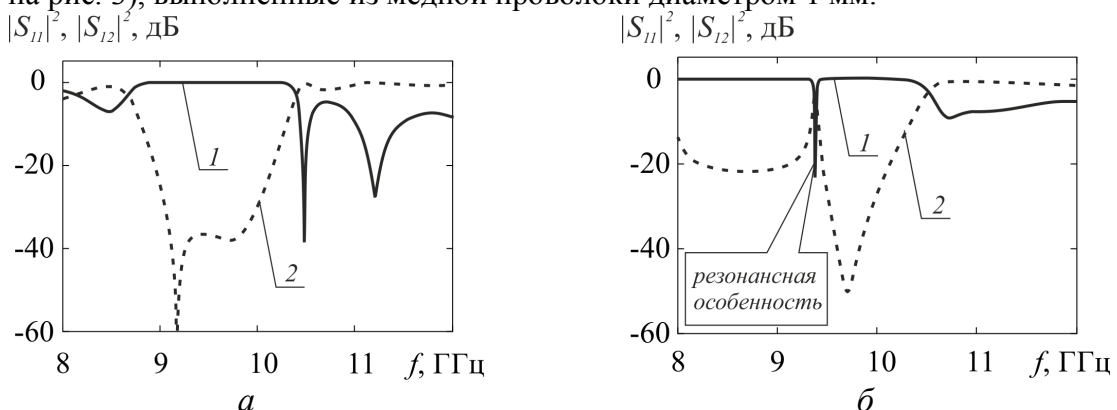


Рис. 2 Расчётные АЧХ $|S_{11}|^2$ (кривые 1) и $|S_{12}|^2$ (кривые 2) СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов: а– не содержит неоднородности, б– содержит неоднородности типа «штырь с зазором»

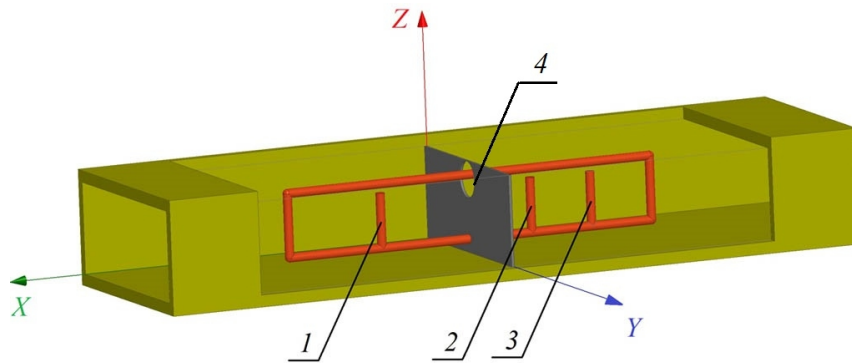


Рис. 3 СВЧ-устройство на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, содержащей неоднородность в виде конструкций типа «штырь с зазором»: 1, 2, 3 – неоднородности типа «штырь с зазором», 4 – диафрагма

Для применения в СВЧ-технике представляют интерес СВЧ-устройства с характеристиками, демонстрирующими наличие как запрещённых, так и разрешённых для распространения электромагнитного излучения частотных областей. Было проведено компьютерное моделирование при длинах рамочных элементов равных 30 мм (см. рис. 4). Как следует из результатов расчёта, представленных на рис. 5, при длине рамочных элементов 30 мм возможна реализация в диапазоне частот 8–12 ГГц разрешённой зоны. При наличии неоднородности в конструкции в виде структуры типа «штырь с зазором» в разрешённой зоне возникает пик запираения.

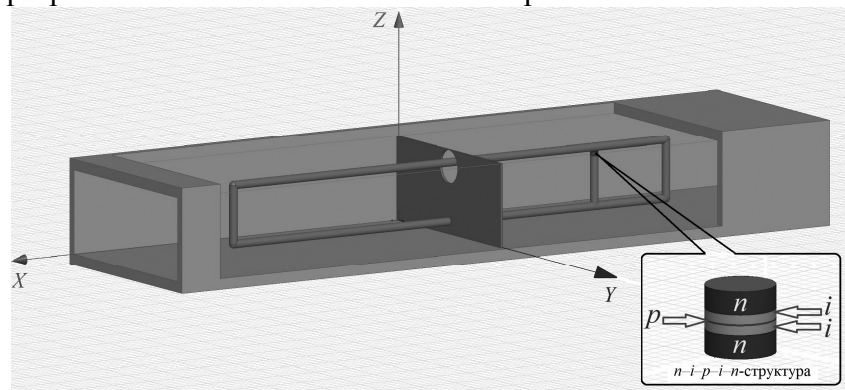


Рис. 4 «Симметричная» конструкция СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, с полупроводниковой $n-i-p-i-n$ -структурой, расположенный в зазоре между штырем и рамочным элементом

Для реализации возможности управления характеристиками СВЧ-излучения в рассматриваемых системах в качестве электрически управляемого элемента может быть использована $n-i-p-i-n$ -структура, которая размещалась в зазоре между рамочным элементом и штырем.

С учетом зависимости удельной эффективной электропроводности $n-i-p-i-n$ -структуры σ от величины тока инжекции j были рассчитаны АЧХ $|S_{12}|^2$ (см. рис. 5):

$$\sigma = q \left(\mu_n n_0 + \mu_p p_0 + \mu_p \frac{b+1}{l_i} \frac{jL^2}{2qD_p} \left[\frac{b+1}{b} - \frac{n_0 - p_0}{2} \times \frac{bp l_i - p_0 + (b+1)N}{b(p l_i + N) \times (p_0 + N)} \right] \right).$$

Здесь μ_n, μ_p, D_p, L – подвижность электронов и дырок, коэффициент диффузии и диффузионная длина дырок, l_i – длина i -области, $N = (bn_n + p_n)/(b+1)$, $b = \mu_n/\mu_p$.

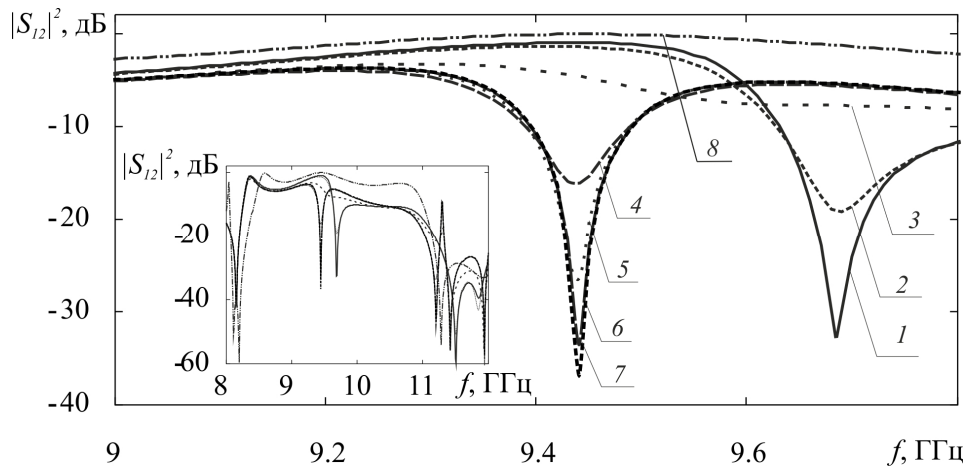


Рис. 5 Расчётные АЧХ $|S_{12}|^2$ вблизи пика запирания разрешённой зоны СВЧ-устройства с неоднородностью типа «штырь с зазором» и $n-i-p-i-n$ -структурой: 1– $\sigma = 10^{-3}$ См/м, 2– $\sigma = 1,0$ См/м, 3– $\sigma = 10,0$ См/м, 4– $\sigma = 10^2$ См/м, 5– $\sigma = 10^3$ См/м, 6– $\sigma = 10^4$ См/м, 7– $\sigma = 10^5$ См/м, 8 – случай отсутствия штыря и управляющего элемента

Как следует из результатов расчета, изменение величины удельной электропроводности управляющего элемента от 10^{-3} См/м до 10^5 См/м приводит к изменению коэффициента пропускания на частоте 9.44 ГГц, соответствующей пику запирания, в диапазоне значений от -36.79 дБ до $-1,01$ дБ, при этом положение пика запирания изменяется от 9.69 ГГц до 9.44 ГГц.

Экспериментально была реализована «симметричная» конструкция (рамочные элементы одинаковой длины), основанная на результатах численного моделирования и обеспечивающая возникновение разрешённой зоны в диапазоне частот 8.67–11.12 ГГц.

Неоднородность типа «штырь с зазором» с электрически управляемым элементом в виде $n-i-p-i-n$ -структуры, размещенном в зазоре между рамочным элементом и штырем, располагалась на расстоянии 20 мм справа от плоскости диафрагмы (см. рис. 4).

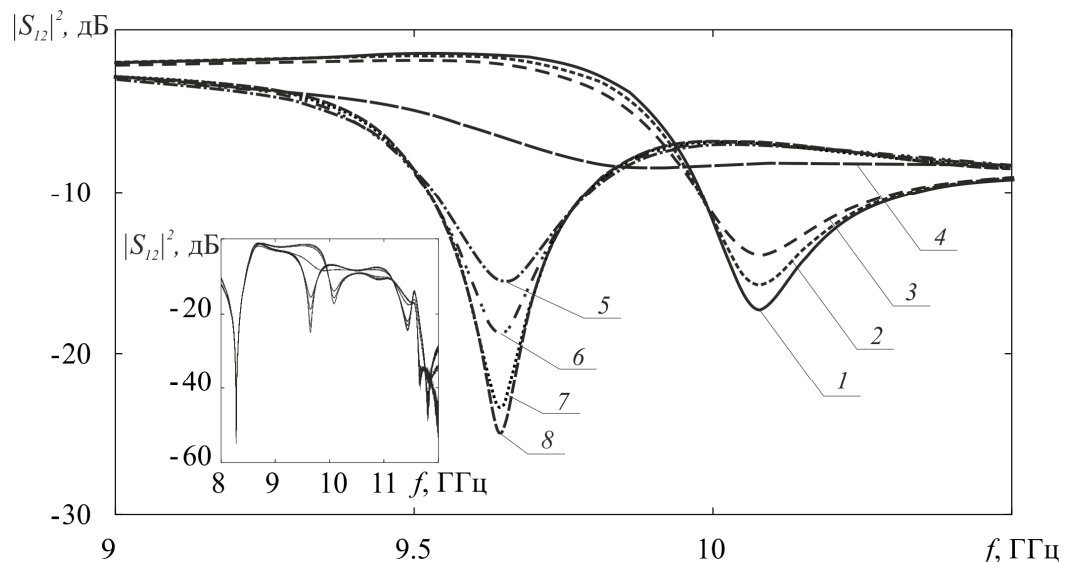


Рис. 6 Экспериментальные АЧХ $|S_{12}|^2$ прохождения вблизи пика запирания разрешенной зоны СВЧ-устройства с неоднородностью типа «штырь с зазором», и полупроводниковой $n-i-p-i-n$ -структурой, для различных значения протекающего через неё тока: 1– $I = 0$ мА; 2– $I = 1$ мА; 3– $I = 3$ мА; 4– $I = 10$ мА; 5– $I = 40$ мА; 6– $I = 60$ мА; 7– $I = 190$ мА; 8– $I = 300$ мА.

Как следует из результатов измерения АЧХ $|S_{12}|^2$ (см рис. 6) вблизи пика записания разрешенной зоны исследуемого СВЧ-устройства динамический диапазон изменения коэффициента пропускания на резонансной частоте составляет 23.5 дБ, что хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования динамического диапазона, составляющего 26.0 дБ, при изменении удельной электропроводности i -слоёв $n-i-p-i-n$ -структуры в диапазоне значений от 10^{-2} См/м до 10^3 См/м. Рассматриваемый диапазон изменения удельной электропроводности соответствует электрическим характеристикам $n-i-p-i-n$ -структуры (типа 2A505), используемой в эксперименте.

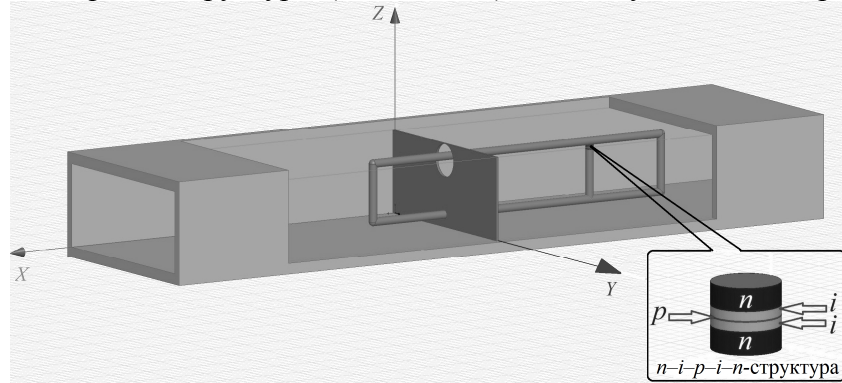


Рис. 7 «Несимметричная» конструкция СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, с неоднородностью типа «штырь с зазором» и полупроводниковой $n-i-p-i-n$ -структурой

Экспериментально была реализована «несимметричная» конструкция СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов с отличной друг от друга длиной (см. рис. 7).

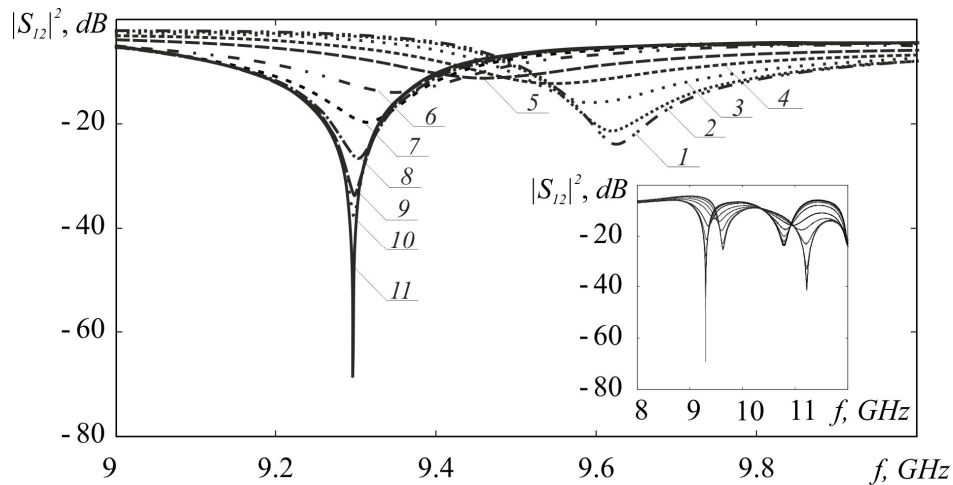


Рисунок 8 Экспериментальные АЧХ $|S_{12}|^2$ вблизи пика записания разрешенной зоны «несимметричной» конструкции СВЧ-устройства для различных значений тока, протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру: 1- $I=0$ мА; 2- $I=1$ мА; 3- $I=2$ мА; 4- $I=3$ мА; 5- $I=10$ мА; 6- $I=20$ мА; 7- $I=50$ мА; 8- $I=100$ мА; 9- $I=170$ мА; 10- $I=200$ мА; 11- $I=290$ мА.

Для «несимметричной» конструкции величина динамического диапазона регулировки коэффициента пропускания в резонансной особенности, с помощью $n-i-p-i-n$ -структуры, помещённой в зазор между штырем и рамочным элементом, составляет 66 дБ при уровне потерь пропускания от 3 дБ.

Экспериментально исследовался СВЧ-генератор на основе короткозамкнутого отрезка волновода (сечение канала 23×10 мм²). В качестве активного элемента генера-

тора использовался диод Ганна типа 3A703, помещенный в зазор стержневого держателя. Частота и мощность СВЧ-генератора составляли $\sim 9,3$ ГГц и ~ 5 мВт соответственно. К выходу СВЧ-генератора было присоединено волноводное устройство (см. рис. 7) на основе диафрагмы и системы рамочных элементов с $n-i-p-i-n$ -структурой для управления выходной мощностью генератора на диоде Ганна.

Величина динамического диапазона регулировки мощности выходного сигнала СВЧ-генератора на диоде Ганна при изменении тока протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру от 0 до 193 мА составила 18.3 дБ (см. рис. 9).

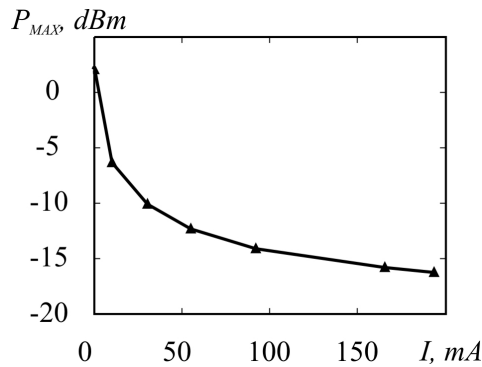


Рис. 9 Зависимость мощности выходного сигнала генератора на диоде Ганна от величины тока, протекающего через $n-i-p-i-n$ -структуру

В четвертом разделе приведены результаты исследований АЧХ зондов ближнеполевого СВЧ-микроскопа. С использованием метода конечных элементов в САПР HFSS Ansoft выполнено компьютерное моделирование АЧХ зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе микрокоаксиально-волноводного перехода с резонатором в виде отрезка волновода. Описана конструкция и принцип действия ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна и результаты его использования для визуализации электрофизических характеристик микро- и наноструктур. Приведены результаты численного моделирования АЧХ зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе микрокоаксиально-волноводного перехода с резонатором в виде фотонного кристалла с нарушением периодичности структуры. Экспериментально исследованы характеристики ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе фотонного кристалла и микрокоаксиальным зондом с регулируемым рамочным элементом связи.

Результаты исследований АЧХ зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе микрокоаксиально-волноводного перехода с резонатором в виде отрезка волновода, используемого для измерения удельной электропроводности сильнолегированной пластины кремния, представлены на рис. 10.

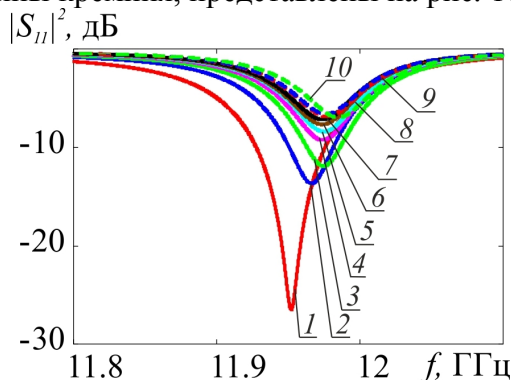


Рис. 10 Расчётные АЧХ $|S_{11}|^2$ для различных значений удельной электропроводности пластины высоколегированного кремния: 1- $\sigma = 100$ См/м, 2- $\sigma = 200$ См/м, 3- $\sigma = 300$ См/м, 4- $\sigma = 400$ См/м, 5- $\sigma = 500$ См/м, 6- $\sigma = 600$ См/м, 7- $\sigma = 700$ См/м, 8- $\sigma = 800$ См/м, 9- $\sigma = 900$ См/м, 10- $\sigma = 1000$ См/м.

На основе решения системы уравнений, описывающих эквивалентную схему генератора на диоде Ганна, параметры элементов которой зависят от величины входной проводимости нагрузки, с использованием выражения $\Delta I = (1/T) \int_0^T I(t) dt$, проведен ана-

лиз чувствительности автодинного сигнала ΔI генератора на диоде Ганна к изменению удельной электропроводности нанометровых слоев металлических пленок на поликоровых подложках, величина которой в этом случае может достигать $0,304 \text{ дБ/ (См}\cdot\text{м}^{-1})$.

Полупроводниковый автодин *1* выполнен в виде СВЧ-генератора (X-диапазон), в качестве активного элемента использовался диод Ганна типа 3A723. Частота и мощность СВЧ-генератора $\sim 12,0 \text{ ГГц}$ и $\sim 10 \text{ мВт}$, соответственно, могли перестраиваться в результате перемещения поршня и изменения питающего напряжения *4* на диоде Ганна *2*. Сигнал автодинного генератора контролировался с помощью детекторного диода *3* типа 2A203. Продетектированный сигнал через АЦП *5* передавался в компьютер *6* и обрабатывался при помощи специального программного обеспечения (см. рис. 11).

СВЧ-зонд *7* был выполнен на основе микрокоаксиально-волноводного перехода с отрезком микрокоаксиала *8*, центральный проводник *9* которого выступает за пределы внешнего проводника микрокоаксиала на величину $\sim 560 \text{ мкм}$. Внутренняя (невыступающая) часть центрального проводника помещалась в диэлектрический конус *10*. При проведении измерений образец располагался на подвижной измерительной площадке вблизи заостренного конца микрокоаксиального зонда на расстоянии 20 мкм .

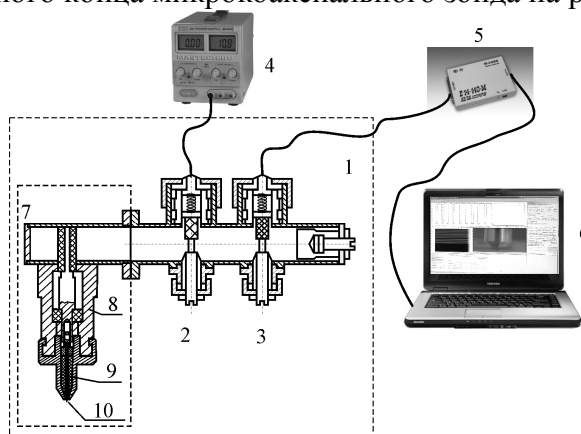


Рис.11 Схема ближнеполевого СВЧ-микроскопа

В качестве объекта исследований использовалась структура, представляющая собой керамическую (Al_2O_3) пластину толщиной $0,5 \text{ мм}$ и относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 9,6$ с нанесенным методом термического испарения в вакууме нанометровым металлическим (танталовым) слоем. Методами фотолитографии и химического травления на поверхности пластины сформирована топология в виде металлических полосок, ширина которых монотонно изменялась от 90 до 12 мкм , а величина зазора – от 107 мкм до 28 мкм . Толщина металлических полосок составляла 70 нм и определялась с использованием атомно-силового микроскопа Agilent 5600LS. Фотография пластины с металлическими полосками изменяющейся ширины, нанесенными на поликоровую подложку, приведена на рис. 12, *а*. Результаты визуализации фрагмента поверхности керамической пластины с нанесенными нанометровыми металлическими (танталовыми) полосками с использованием сигнала $V_{\text{дет}}$, формируемого детекторным диодом ближнеполевого СВЧ-микроскопа, представлены на рис. 13, *а* и *б*.

Для демонстрации возможности применения ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна к задачам подповерхностного зондирования была использована керамическая пластины с изображением юбилейного знака Саратовского государственного университета, покрытым слоем графита толщиной $0,8 \text{ мкм}$ и удельной электропроводностью $103 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$. Фотография пластины с юбилейным знаком Саратовского государственного университета, фрагмент которого покрыт слоем графита, приведена на рис. 14.

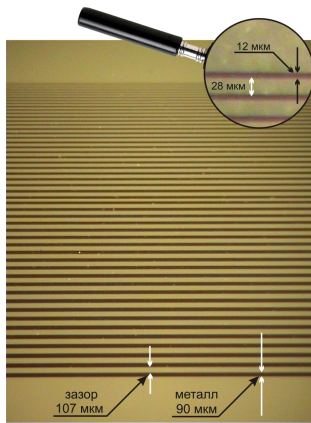
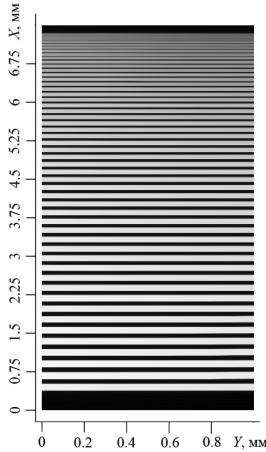
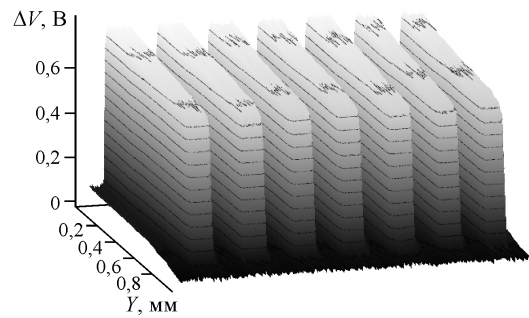


Рис. 12 Фотография пластины с металлическими полосками изменяющейся ширины



a – вид сверху



в – профиль

Рис.13 Результаты визуализации фрагмента поверхности керамической пластины с нанесёнными нанометровыми металлическими полосками

На рис. 15 приведены результаты визуализации фрагмента юбилейного знака, покрытого слоем графита, с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа. Шаг сканирования составлял 2,0 мкм по обоим направлениям в плоскости образца.



Рис. 14 Фотография пластины с юбилейным знаком СГУ, фрагмент которого покрыт слоем графита

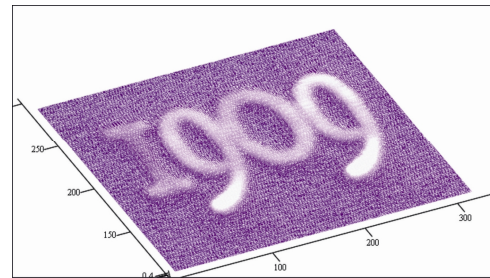


Рис. 15. Результаты визуализации фрагмента юбилейного знака, покрытого слоем графита

Результаты исследований АЧХ зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе микроаксиально-волноводного перехода с резонатором в виде фотонного кристалла с нарушением периодичности структуры (см. рис.16), используемого для измерения удельной электропроводности сильнолегированной пластины кремния, представлены на рис. 17.

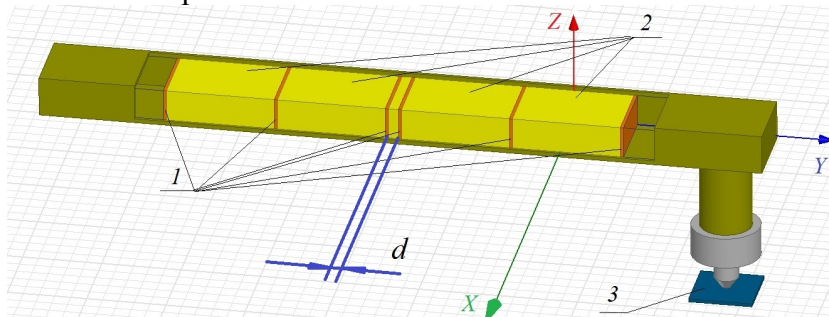


Рис. 16 Конструкция зонда с резонатором в виде фотонного кристалла с нарушением периодичности: 1 – пластины поликора, 2 – пластины фторопласта, 3 – пластина высоколегированного кремния, *d* – толщина нарушения

Из приведенных результатов следует, что использование волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности позволяет реализовать в спектре отражения ближнеполевого СВЧ-микроскопа резонансную особенность, характеризующуюся величиной модуля коэффициента отражения равной -58.9 дБ, что обеспечивает значительное повышение чувствительность измерительной системы к изменению электрофизических характеристик исследуемых образцов. При изменении величины σ от 90 См/м

до 100 См/м наблюдается максимальная чувствительность $\partial S_{11}/\partial\sigma$, величина которой составляет ~ 3 дБ/(См*м⁻¹).

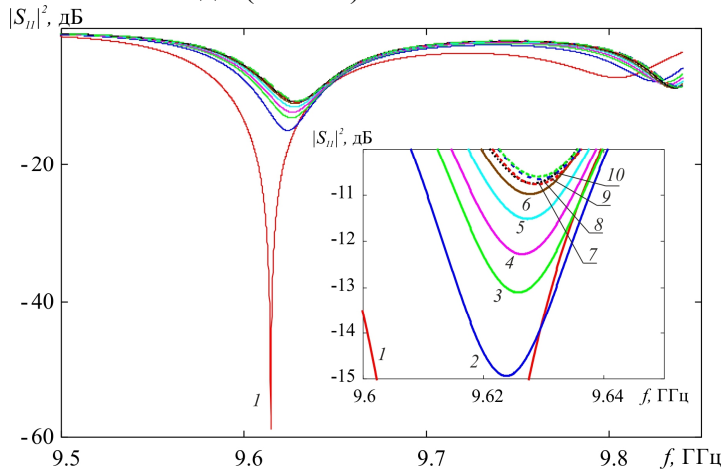


Рис. 17 Расчетные АЧХ $|S_{11}|^2$ микрокоаксиально-волноводного перехода для различных значений удельной электропроводности пластины высоколегированного кремния: 1 – $\sigma = 100$ См/м, 2 – $\sigma = 200$ См/м, 3 – $\sigma = 300$ См/м, 4 – $\sigma = 400$ См/м, 5 – $\sigma = 500$ См/м, 6 – $\sigma = 600$ См/м, 7 – $\sigma = 700$ См/м, 8 – $\sigma = 800$ См/м, 9 – $\sigma = 900$ См/м, 10 – $\sigma = 1000$ См/м.

Экспериментальное исследование ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе фотонного кристалла и регулируемым элементом связи в качестве зонда (см. рис. 18) позволило достичь чувствительности коэффициента отражения к изменению диэлектрической проницаемости $\partial S_{11}/\partial\epsilon$ в диапазоне значений ϵ от 1 до 2 равной. При этом в диапазоне значений $\epsilon = 1 \div 2$ величина $\partial S_{11}/\partial\epsilon$ составляет $\sim 29,7$ дБ/ε, а разрешающая способность $\Delta\epsilon/\epsilon$ достигает значения $\sim 10^{-4}$ (см. рис. 19).

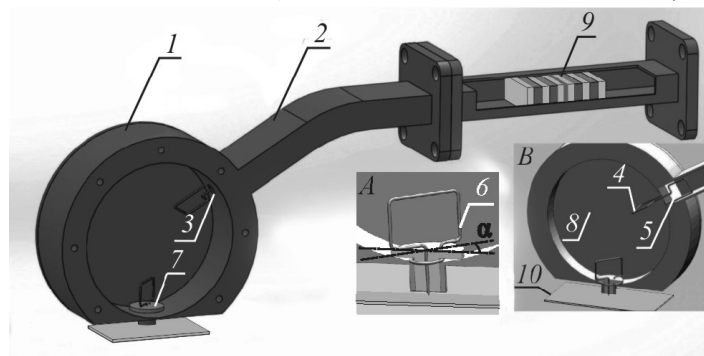


Рис. 18 Зонд ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе цилиндрического СВЧ-резонатора с рамочным элементом связи и одномерным фотонным кристаллом. Вставка А. Рамочный элемент связи. Вставка В. Цилиндрический СВЧ-резонатор с рамочным элементом связи и измеряемым образцом 10.

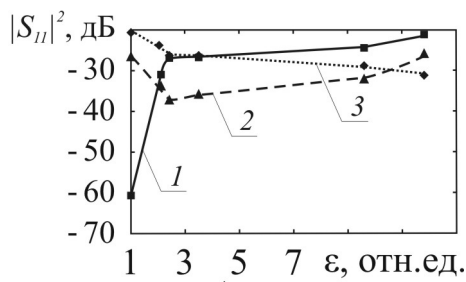


Рис. 19 Экспериментальные зависимости $|S_{11}|^2$ от величины ϵ образцов

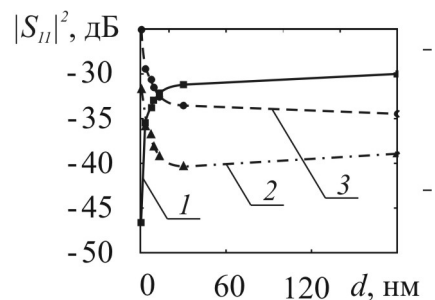


Рис. 20 Экспериментальные зависимости $|S_{11}|^2$ от толщины d наноплёнки

Исследуемая резонансная система была использована для измерения образцов в виде диэлектрических (поликоровых) пластин с нанесёнными нанометровыми металлическими слоями различной толщины d (см. рис. 20). При этом в диапазоне значений d от 0,1 до 3 нм величина $\partial S_{11}/\partial d$ составляет $\sim 4,0$ дБ/нм, а разрешающая способность $\Delta d/d$ достигает значения $\sim 10^{-3}$.

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Таким образом, в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Установлено, что при увеличении количества слоёв N фотонного кристалла, представляющего собой одномерную структуру, с малым числом входящих в его состав элементов, симметричную относительно центрального слоя с фиксированным значением диэлектрической проницаемости, ширина запрещенной зоны монотонно уменьшается, а её глубина монотонно увеличивается, если количество слоёв N фотонного кристалла удовлетворяет только одной из последовательностей чисел $N = 4n - 1$, например, 3, 7, 11, 15 и т.д. или $N = 4n + 1$, например, 5, 9, 13, 17 и т.д., где n – целые числа.

2. Показано, что для фотонного кристалла, представляющего собой одномерную структуру, с малым числом входящих в его состав элементов, несимметричную относительно центрального слоя увеличению количества слоёв N приводит к уменьшению фотонной запрещенной зоны, сопровождающееся монотонным увеличением ее глубины, независимо от значения диэлектрической проницаемости первого и последнего слоев.

3. Установлено, что увеличение толщины слоев одномерного СВЧ фотонного кристалла с большей диэлектрической проницаемостью приводит к увеличению ширины и глубины фотонной запрещенной зоны, сопровождающееся низкочастотным сдвигом ее границ, в то время как увеличение толщины слоев одномерного СВЧ фотонного кристалла с меньшей диэлектрической проницаемостью приводит к уменьшению ширины фотонной запрещенной зоны при практически неизменной её глубине, что также сопровождается низкочастотным сдвигом ее границ.

4. Установлено, что увеличение диэлектрической проницаемости слоев одномерного СВЧ фотонного кристалла с большей диэлектрической проницаемостью приводит к увеличению ширины и глубины фотонной запрещенной зоны, сопровождающееся низкочастотным сдвигом ее границ, в то время как увеличение диэлектрической проницаемости слоев одномерного СВЧ фотонного кристалла с меньшей диэлектрической проницаемостью приводит к уменьшению ширины и глубины фотонной запрещенной зоны, что также сопровождается низкочастотным сдвигом ее границ.

5. Показана возможность создания волноводных структур, обладающих как запрещенной, так и разрешенной зоной пропускания, на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, помещенных в волноводную секцию. Показано, что введение в конструкцию неоднородностей типа «штырь с зазором» обеспечивает создание в запрещенной частотной зоне резонансной особенности типа окна прозрачности, а в разрешенной зоне резонансной особенности типа пика заграждения.

6. Проведен расчет эффективной удельной электропроводности $n-i-p-i-n$ структуры при различных уровнях инжекции неравновесных носителей заряда, с целью использования её в качестве управляющего элемента волноводных структур, обладающих как запрещенной, так и разрешенной зоной пропускания.

7. Установлено, что величина динамического диапазона регулировки коэффициента пропускания в резонансной особенности, с помощью $n-i-p-i-n$ структуры, помещенной в зазор между штырем и рамочным элементом, для «симметричной» конструкции (длины рамочных элементов равны 30 мм) достигает 23.5 дБ при уровне потерь пропускания от 1.5 дБ. Для «несимметричной» конструкции величина динамического диапазона регулировки коэффициента пропускания в резонансной особенности, с по-

мощью $n-i-p-i-n$ -структуры, помещённой в зазоре между штырем и рамочным элементом, составляет 66 дБ при уровне потерь пропускания от 3 дБ.

8. Показано, что введение в конструкцию неоднородностей типа «штырь с зазором» с электрически управляемым элементом в виде $n-i-p-i-n$ -структуры обеспечивает возможность создания СВЧ-устройства для управления выходной мощностью генератора на диоде Ганна.

9. Предложена конструкция ближнеполевого СВЧ-микроскопа с зондом в виде цилиндрического резонатора с регулируемым рамочным элементом связи и высокоселективной резонансной системой в виде фотонной структуры с неоднородностью, обеспечивающая высокую чувствительность измерительной системы к изменению толщины металлических слоев в нанометровом диапазоне с разрешающей способностью $\Delta d/d \sim 10^{-3}$ и диэлектрической проницаемости с разрешающей способностью $\Delta \epsilon/\epsilon \sim 10^{-4}$.

10. Создана модифицированная конструкция ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна, отличающаяся повышенной чувствительностью к изменению проводимости зондируемого материала.

11. Показана возможность использования ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна для визуализации с высоким пространственным разрешением рельефа и электрофизических свойств поверхности керамической пластины с нанесённым нанометровым слоем металла.

12. Установлено экспериментально и обосновано теоретически использование одномерного волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности в качестве резонатора в составе зонда на основе микроаксиально-волноводного перехода ближнеполевого СВЧ-микроскопа, центральный проводник микроаксиала которого выступает за пределы внешнего проводника, для повышения чувствительности коэффициента отражения S_{11} к изменению электрофизических характеристик исследуемых образцов. При этом в случае исследований сильнолегированных полупроводниковых структур зависимости S_{11} в режиме ближнего поля от величины удельной электропроводности σ имеют как монотонный, так и немонотонный характер, что может быть обусловлено изменением структуры ближнего поля, определяемой как характеристическими размерами апертуры ближнеполевого зонда, так и глубиной проникновения ближнего поля в полупроводниковый образец, зависящей от его удельной электропроводности.

13. Продемонстрирована возможность применения ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна к задачам подповерхностного зондирования, в частности, при наличии на поверхности исследуемой структуры высокопроводящего покрытия слоя графита толщиной 0.8 мкм и удельной электропроводностью $10^3 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Коротин Б.Н., Феклистов В.Б., Пономарев Д.В., Фролов А.П. Ближнеполевая СВЧ-микроскопия нанометровых слоев металла на диэлектрических подложках// Известия вузов. Электроника. 2011. №5(91). С. 83–90.
2. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Горбатов С.С., Пономарев Д.В., Фролов А.П., Кваско В.Ю. Ближнеполевая СВЧ-микроскопия наноструктур металл-диэлектрик// Электронная техника. Серия 1 «СВЧ-техника», 2012, вып. 3 (512), с. 71–81.

3. Усанов Д.А., Никитов С.А. Скрипаль А.В., Фролов А.П. Ближнеполевой сверхвысокочастотный микроскоп на основе фотонного кристалла с резонатором и регулируемым элементом связи в качестве зонда// Радиотехника и электроника. 2013, том. 58. № 12. С. 1071–1078

В других изданиях

4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Коротин Б.Н., Феклистов В.Б., Пономарев Д.В., Фролов А.П. Ближнеполевой сканирующий СВЧ-микроскоп для измерения наноструктур и нанокompозитов// Труды Шестого Саратовского салона изобретений, инноваций и инвестиций: Часть 1. Саратов: Саратовский ГАУ, 23–25 марта 2011 г. Саратов, 2011. С. 11–12.
5. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Абрамов А. В., Боголюбов А. С., Коротин Б. Н., Феклистов В. Б., Пономарев Д. В., Фролов А. П. Ближнеполевая СВЧ-микроскопия нанометровых слоев металла// Материалы 21-ой Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2011). Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.: Материалы конференции. Севастополь: «Вебер», 2011, Т. 1, С. 667-668.
6. Dmitry A. Usanov, Sergey A. Nikitov, Alexander V. Skripal, Anton V. Abramov, Anton S. Bogolubov, Boris N. Korotin, Vladimir B. Feklistov, Denis V. Ponomarev, Alexander P. Frolov Microwave Imaging of the Ceramic Plate Surface with the Nanometer Metal Layer by Means of the Near-Field Microscope Based on the Gunn-Diode Oscillator// Proceedings of the 41th European Microwave Conference. 9-14 October 2011. Manchester, UK. P. 210–213. 978-2-87487-022-4 © 2011 EuMA
7. D. Usanov, S. Nikitov, A. Skripal, A. Frolov "The Near-Field Microwave Microscope with Photonic Crystal as Resonator and Adjustable Coupling Element"// Proc. of 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics -Metamaterials 2013; Bordeaux, France; September 16-19, 2013. Skripal-IEEEExplore-20130407-083303.TheNearFieldMicrowaveMicro.pdf
8. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Фролов А.П., Орлов В.Е. Электрически управляемая волноводная структура с разрешенными и запрещенными зонами/ Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: материалы Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. – Саратов: Изд-во Саратовский источник, 2014, с.21–24.
9. D. Usanov, A. Skripal, A. Frolov, S. Nikitov. Waveguide structure with electrically controlled characteristics of Allowed and Forbidden Bands// Proc. of 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON-2014, , Gdansk, Poland, June 16-18, 2014. V.2. P. 449–452.
10. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Фролов А. П. СВЧ-устройство на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов и его использование для управления мощностью генератора на диоде Ганна// Материалы 24-ой Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7—13 сентября 2014 г.: Материалы конференции. в 2 т. Севастополь: «Вебер», 2014, Т. 2, С. 647—648. 2014 24nd Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2014). 7—13 September, Sevastopol, Crimea, Russia 2014: CriMiCo'2014 Organizing Committee; CrSTC. ISBN: 978-966-335-412-5. IEEE Catalog Number: CFP14788
11. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Фролов А.П., Григорьев Д.В. Фотонные структуры СВЧ-диапазона и их применение// Материалы XII Межд. н.-т. конф. Физика и технические приложения волновых процессов 22 – 26 сентября 2014г., Нижний Новгород, Изд-во Самарское книжное изд-во, 2014. С. 95–97.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660603. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Абрамов А.В., Пономарев Д.В., Коротин Б.Н., Фролов А.П. Исследование характеристик ближнеполевого взаимодействия «NFMM». Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Черны-

шевского». Заявка № 2012618139. Поступила на регистрацию 27.09.2012. Дата регистрации 23 ноября 2012 г.

Патенты

13. Патент РФ на полезную модель 144 869 U1 МПК G01N 22/00 B82B 1/00 Устройство для определения диэлектрической проницаемости пластин и толщин нанометровых проводящих пленок / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, В.Е. Орлов, А.П. Фролов. Бюл. 25. Оpubл. 10.09.2014. Заявка: 2013125178/07 от 30.05.2013

Цитируемая литература

1. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics// Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, no. 20. pp. 2059—2062.
2. Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. Donor and acceptor modes in photonic band structure// Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67, no. 24. pp. 3380—3383.
3. Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// Радиотехника. 2003. №8. С. 26–30.
4. Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals// Progress In Electromagnetics Research, 2003. Vol. 41, pp. 185–209.
5. Никитов С.А., Гуляев Ю.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов// Доклады Академии Наук. Т. 448, № 1, Январь 2013. С. 35-37.
6. Усанов Д. А., Горбатов С. С., Кваско В. Ю. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с низкоразмерным резонатором типа «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма»// Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2010. №6. С. 66–69.
7. Sung-II Kim, Mi-Young Jang, Chul-Sik Kee, Ikmo Park, H. Lim, Characteristics of microwave filters based on microstrip photonic bandgap ring structures // Current Applied Physics, 2005, N. 5, pp. 619—624

Фролов Александр Павлович

СТРУКТУРЫ С ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ-МИКРОСКОПИИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Подписано в печать 27.10.2014г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.

Усл. – печ. л. 1.0

Тираж 100 экз. Заказ № 22

Отпечатано в полиграфии ООО «Скайрей».

410054, Саратов, Политехническая 122.

Тел.8 (8452) 520 992