

На правах рукописи



ФАДЕЕВ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

БЛИЖНЕПОЛЕВАЯ СВЧ – МИКРОСКОПИЯ И ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ СВЧ
ЭЛЕКТРОНИКИ

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах
01.04.03 – Радиофизика

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:

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

Усанов Дмитрий Александрович

доктор физико-математических наук, профессор

Горбатов Сергей Сергеевич

Официальные оппоненты:

Быков Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)», генеральный директор ЗАО «НТ-МДТ»

Коломейцев Вячеслав Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина», профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникации

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 14:00 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 корпус, ауд. 34.

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

Автореферат разослан « 10 » ноября 2014г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Процессы, происходящие в полупроводниковых приборах, в том числе активно использующихся в современной твердотельной СВЧ электронике, считаются известными и хорошо изученными. В то же время следует отметить, что массив экспериментальных данных, собранных в процессе исследования физики работы различных полупроводниковых приборов, был получен на оборудовании, не всегда соответствующим современным требованиям. Характеристики известных, считающихся хорошо изученными, приборов не исследовались с использованием появляющихся новых методов измерений.

Одним из перспективных современных устройств, которое может быть использовано для более точного исследования характеристик приборов при изменении режима питания, уровня воздействующего сигнала, температуры и других факторов, является сканирующий ближнеполевой СВЧ-микроскоп. Основным его достоинством по сравнению с туннельным и атомно-силовым микроскопами является возможность определения параметров материала под поверхностью, достигаемая за счет проникновения СВЧ излучения в толщу измеряемой структуры.

В отличие от оптических микроскопов, ближнеполевые не ограничены дифракционным пределом, их разрешающая способность может на несколько порядков превосходить длину волны используемого излучения. Данная возможность возникает за счет использования эффектов «ближнего поля», обусловленных образованием квазистационарных полей, быстро затухающих с расстоянием и локализуемых в малой (по сравнению с длиной волны основного типа, распространяющейся в электродинамической системе) окрестности излучающей системы. Располагая исследуемый объект в области существования этого поля, можно исследовать распределение его электрофизических свойств с разрешением, намного меньшим, чем длина волны используемого излучения.

К преимуществам данного типа микроскопа можно отнести отсутствие квантовых эффектов поглощения излучения исследуемой средой, прозрачность в СВЧ-диапазоне многих оптически непрозрачных веществ.

В связи с повышением требований к схемам высокоскоростного переключения, необходимо детальное исследование свойств материалов, функционирующих в диапазоне сверхвысоких частот. Наиболее предпочтителен для такого исследования именно ближнеполевой СВЧ-микроскоп, так как параметры материалов и структур определяются на тех же частотах, на которых они будут использованы.

В настоящее время существует большое число различных конструкций ближнеполевых СВЧ микроскопов, которые отличаются по исполнению (волноводные, резонаторные) и назначению (для определения параметров материалов, для выявления подкожных новообразований). В зависимости от решаемой задачи используются микроскопы с различной величиной чувствительности и разрешающей способности.

Одним из важнейших элементов ближнеполевого СВЧ-микроскопа является резонатор с подключенным к нему зондом, именно он определяет основные характеристики микроскопа.

При исследовании параметров материалов наиболее подходящими являются резонаторы типа «штырь с зазором – короткозамыкающий поршень» и «индуктивная диафрагма близко расположенная емкостная диафрагма», названные авторами [1] низкоразмерными, поскольку в них резонансная длина волны в 10 и более раз превосходит, по крайней мере, один из размеров системы. Свойства систем близкорасположенный штырь с зазором – короткозамыкающий поршень исследовались в работе [2], при этом было обнаружено, что в таких системах можно осуществлять эффективное управление параметрами резонансов [3].

В [4] было показано, что наилучшая локализация поля в резонаторе, а, следовательно, и селективность, возникает при использовании выемки в поршне. Это объясняется тем, что фронт E -компоненты поля, возбуждаемого между короткозамыкателем и штырем, не лежит только в поперечной плоскости волновода, как для волны основного типа. Существующее в резонаторе ближнее поле очень чувствительно к малым возмущениям, что показано в работе

[5], столь большая чувствительность позволяет с высокой точностью измерять характеристики структур различной топологии.

Наравне с экспериментальными совершенствуются и теоретические методы исследования, благодаря увеличению вычислительных мощностей современных ЭВМ. Помимо уменьшения времени счета современные ЭВМ дают возможность решать системы дифференциальных уравнений, описывающих физику работы элементов твердотельной СВЧ электроники, в частности таких, как р-і-п диоды и диоды Ганна, без использования различных упрощающих предположений, к которым можно отнести, например, фиксирование значений коэффициента диффузии электронов и дырок, а также их подвижностей.

Можно предположить, что совместное использование современных экспериментальных методов исследования и теоретическое решение задач без использования упрощающих предположений, позволит расширить представления о физических эффектах, нашедших свое практическое применение.

Осуществление такого рода исследований актуально для науки и практики в связи с тем, что установление новых закономерностей, в поведении характеристик р-і-п диодов и диодов Ганна при изменении режима, позволит сформировать рекомендации разработчикам по улучшению основных характеристик приборов, в конструкции которых используются эти диоды.

Цель диссертационной работы:

состояла в поиске путей совершенствования характеристик ближнеполевого СВЧ-микроскопа и его использования для измерения материалов и приборов, применяемых в СВЧ электронике.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование СВЧ резонаторов для ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа.
2. Создание ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа, предназначенного для исследования р-і-п диодов и диодов Ганна.
3. Теоретическое описание распределения концентрации носителей заряда, напряженности электрического поля в р-і-п диоде и диоде Ганна при изменении режима его питания.
4. Экспериментальное исследование нелинейной динамики изменения характеристик р-і-п диодов и диодов Ганна с изменением режима питания, с помощью сканирующего ближнеполевого СВЧ-микроскопа.
5. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов.

Из формулировки задач, которые было необходимо решить для достижения поставленной цели диссертационного исследования, можно сделать вывод о том, что направление исследований находится на стыке научных дисциплин: радиофизики и твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов, микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах. Для успешного решения этих задач возникает необходимость в использовании новых принципов создания СВЧ элементов ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа, совершенствования физической модели, используемой для описания распределения концентрации носителей заряда и электрического поля и установления взаимосвязи этих характеристик с измеряемым с помощью ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа распределением коэффициента отражения СВЧ излучения от р-і-п диода и диода Ганна.

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

1. Предложена методика локального определения концентрации носителей заряда и напряженности электрического поля в р-і-п диодах для различной плотности протекающего через него тока, основанная на использовании результатов измерений зависимости коэффициента отражения от координаты с помощью ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа.

2. Реализован вычислительный алгоритм, позволяющий определить область максимальной локализации поля в низкоразмерном резонаторе, что открывает возможность повышения чувствительности микроскопа путем оптимизации конструкции его зондирующей части.

3. Предложен и реализован резонатор для ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа, включающий емкостную металлическую диафрагму с наложенным на неё плоскопараллельным диэлектриком, на котором размещен металлический зонд с заостренным концом.

4. Показано, что при увеличении плотности тока через p-i-n диод выше некоторого критического значения наблюдается немонотонная зависимость концентрации носителей заряда и напряженности электрического поля от координаты, имеющая для различных значений плотности тока различное число максимумов. Качественное совпадение результатов расчета и эксперимента получается при одновременном учете зависимости от напряженности электрического поля подвижности и коэффициента диффузии электронов и дырок.

5. Предложен новый способ определения анизотропии диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь СВЧ керамики. Достоинством предложенного метода является повышенная локальность измерения диэлектрических характеристик, определяемая расстоянием между зондами и составляющая ~ 1 мкм.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается качественным и количественным соответствием выводов теории основным 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 стандартной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных методов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Предложенная методика определения зависимости стационарного значения концентрации носителей заряда от плотности тока, протекающего через p-i-n диод, дает возможность расширить представления о физике работы p-i-n диодов, и позволяет разработчикам полупроводниковых устройств с использованием p-i-n диодов уточнить условия их эксплуатации.

Предложен новый способ неразрушающего определения анизотропии диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь СВЧ керамики с использованием сканирующего ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе системы «емкостная диафрагма – индуктивная диафрагма».

Предложен новый тип устройства ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа, содержащего СВЧ-генератор с подключенным к нему прямоугольным волноводом, имеющим емкостную металлическую диафрагму с наложенным на неё плоскопараллельным диэлектриком, на котором находится зонд в виде металлической проволоки с заостренным концом, один отрезок зонда расположен на диэлектрической пластине перпендикулярно щели в диафрагме, другой, с заостренным концом, перпендикулярен плоскости образца диэлектрика. На предложенную конструкцию получен патент на изобретение.

Основные положения, выносимые на защиту:

Использование ближнеполевого СВЧ микроскопа на основе системы «емкостная диафрагма – индуктивная диафрагма» позволяет производить неразрушающее определение анизотропии диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь диэлектрических материалов с высокой степенью локальности.

Координатная зависимость коэффициента отражения СВЧ излучения от поверхности полупроводниковой структуры в p-i-n диоде, получаемая с помощью ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа, может быть использована для локального определения напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в p-i-n диодах для различных значений плотности тока.

При увеличении плотности тока через р-і-п диод выше некоторого критического значения наблюдается появление пространственных осцилляций, число которых увеличивается с увеличением плотности тока. Качественное совпадение результатов расчета и эксперимента получается при одновременном учете зависимости от напряженности электрического поля подвижности и коэффициента диффузии горячих электронов.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы доложены на:

- 21-й Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011), г. Севастополь, Украина, 11-16 Сентября 2011г.;
- юбилейной научно-технической конференции, посвященной 55-летию ОАО «НПП «Контакт», г. Саратов, 19 февраля 2014 г.
- Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», г. Саратов, 14-15 мая 2014 г.
- 24-ой Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011), г. Севастополь, 7-13 сентября 2014г.;
- 12-й Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Нижний Новгород, 22-26 сентября 2014 г.;

Исследования выполнялись в рамках НИР «Разработка на основе фотонных кристаллов СВЧ-методов контроля высокого разрешения параметров наноструктур и нанокompозитов» на 2012–2014 годы, НИР «Исследование механизмов резонансного взаимодействия излучения СВЧ и терагерцового диапазона с неоднородными структурами, содержащими включения с управляемыми характеристиками в виде композитов» на 2012–2014 годы, 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», (Государственный контракт № 16.740.11.0512) в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, НИР «Исследование эффектов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов с неоднородными микро- и наноструктурами и композитами».

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано: 8 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК, 4 тезисов докладов на конференциях, получен патент на изобретение.

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

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 106 страницах, содержит 38 рисунков, список литературы включает 104 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований полупроводниковых СВЧ-приборов с использованием ближнеполевой СВЧ-микроскопии.

Во второй главе приведены результаты исследования анизотропии диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в СВЧ керамике с помощью сканирующего ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе системы «емкостная диафрагма –

индуктивная диафрагма» [6]. Схематическое изображение системы «емкостная диафрагма – индуктивная диафрагма» приведено на рисунке 1, на котором 1 – волновод; 2 – индуктивная диафрагма; 3 – емкостная диафрагма; 4 – иглы-зонды; $a=23$ мм, $b=10$ мм – размеры волновода; $a = 23$ мм – размер широкой стенки волновода, $b = 10$ мм – размер его узкой стенки; $h = 0 \div 7$ мм – расстояние от индуктивной диафрагмы до емкостной диафрагмы; $d_1 = 2$ мм и $d_2 = 4$ мм – ширина и длина щели в емкостной диафрагме; $d_3=1$ мм – ширина щели в индуктивной диафрагме. Зонды имели одинаковую длину 2.2 мм и сводились друг к другу на расстояние 1 мкм.

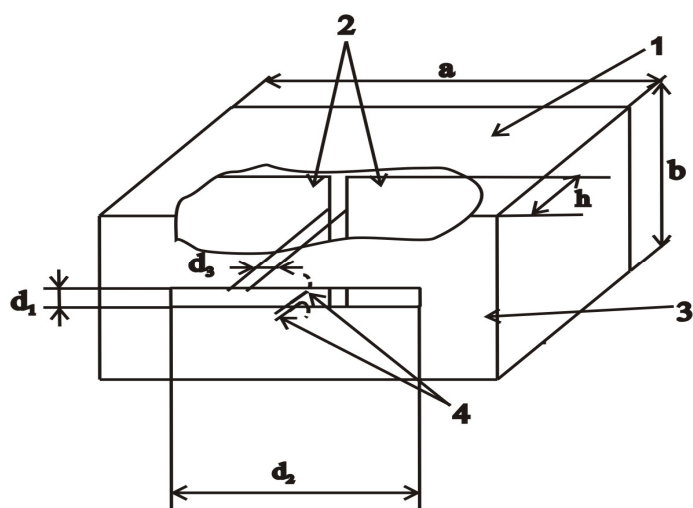


Рисунок 1. Резонатор типа «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма».

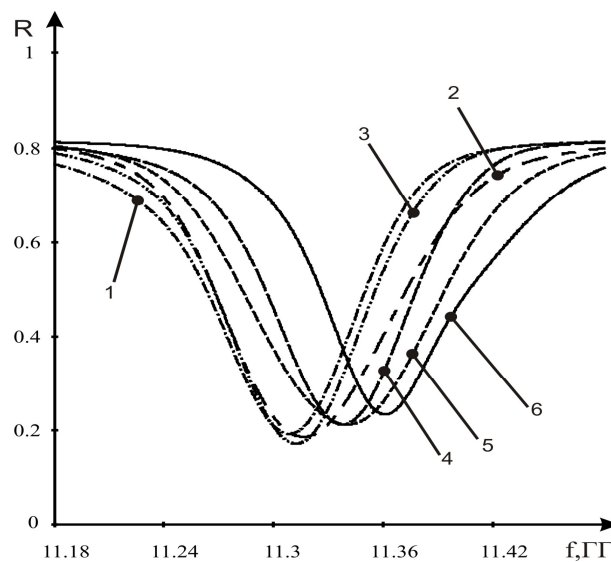


Рисунок 2. Результаты измерения частотных зависимостей коэффициента отражения R исследуемых образцов из ситалла (1, 2), 22ХС (3, 4) и поликора (5, 6), расположенных нормально к рабочей поверхности (1, 3, 5) и параллельно ей (2, 4, 6).

Методика измерений была следующей: исследуемый образец керамики толщиной 1 мм закреплялся на поворотном столике так, чтобы ось вращения столика совпадала с осью зонда. Затем проводилось измерение коэффициента отражения R резонансной измерительной головки в полосе рабочих частот с помощью измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению и ослабления Р2-61 с последующей оцифровкой полученных результатов на персональной ЭВМ.

На рисунке 2 представлены результаты измерений частотных характеристик коэффициента отражения для различных образцов СВЧ керамики, расположенных нормально к рабочей поверхности и параллельно ей. Достоинством предложенного метода является повышенная локальность измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь по сравнению с методами, описанными в известных работах, определяемая расстоянием между зондами и составляющая в нашем случае ~ 1 мкм.

В третьей главе описан предложенный низкоразмерный резонатор, совмещенный с зондом, для ближнеполевого СВЧ - контроля параметров материалов. Использование данного резонатора в микроскопе обеспечивает возможность измерения характеристик объектов с размерами 1 микрометр и менее с чувствительностью, достаточной для измерения диэлектрической проницаемости из диапазона $1.5 \div 400$ и проводимости из диапазона $2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \div 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Схематическое изображение предложенной системы приведено на рисунке 3. СВЧ сигнал от генератора поступает в волновод 1, в котором происходит взаимодействие СВЧ сигнала с металлической диафрагмой 2. В результате вблизи диафрагмы возникает ближнее поле.

Ближнее поле через щель 5 в металлической диафрагме и диэлектрик 3 на резонансной частоте системы взаимодействует с зондом 4. Ближнее поле, локализованное вблизи кончика зонда, в свою очередь взаимодействует с образцом. В измерительное устройство поступает отраженный сигнал, и проводятся измерения частоты резонанса, добротности и коэффициента отражения. Данные измерений сравниваются с калибровочными кривыми, в результате чего делается вывод о величине диэлектрической проницаемости и проводимости исследуемого образца.

Резонансные свойства данной низкоразмерной системы проявляются за счет взаимодействия емкостной щели и зонда, расстояние между которыми много меньше длины волны основного типа, причем вследствие высокой концентрации СВЧ поля в области металлической диафрагмы, диэлектрической пластины и зонда достигается высокая селективность такой системы, а, следовательно, высокая чувствительность к изменению характеристик близко расположенного к зонду образца.

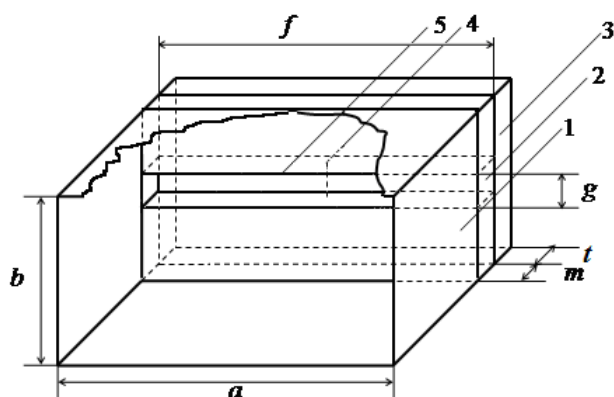


Рисунок 3. Схематическое изображение устройства для измерения параметров материалов

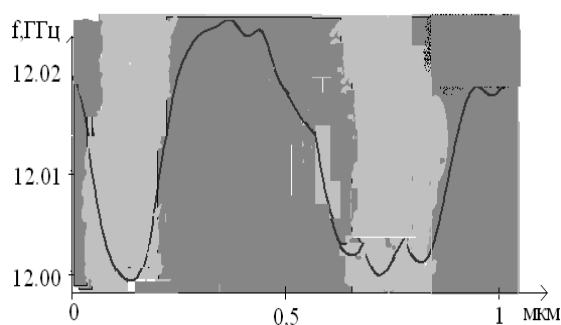


Рисунок 4. Фотография тестовой структуры с приведенной поверх неё экспериментальной зависимостью частоты резонанса системы от смещения измерительного зонда вдоль оси x

На рисунке 4 приведены данные о топологии фрагмента встречно – штыревой структуры (фоновое изображение) с локальностью порядка менее 1 микрометра. В этом случае зонд устанавливался на расстоянии 2 мкм от исследуемой структуры. Установка зонда и контроль его положения при движении осуществлялись при помощи длиннофокусного оптического микрометрического объектива. На рисунке 4 поверх фотоизображения тестовой структуры приведена экспериментальная зависимость частоты резонанса системы от смещения измерительного зонда вдоль оси x.

Приведены результаты перестройки резонанса низкоразмерной системы путем изменения внешнего магнитного поля, приложенного к кристаллу GaAs, вмонтированному в низкоразмерный резонатор типа «два штыря – близко расположенный поршень», изображенный на рисунке 5. Линии магнитной индукции поля были направлены перпендикулярно узкой стенке волновода.

Была получена зависимость изменения резонансной частоты от величины внешнего постоянного магнитного поля, которое изменялось в пределах от 0 до 200 Гс (рисунок 6). Данные, приведенные на рисунке 6, свидетельствуют о хорошей степени линейности перестройки от магнитного поля.

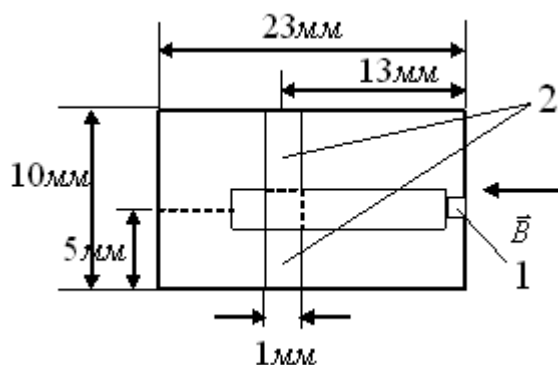


Рисунок 5. Резонатор типа «два штыря – близко расположенный поршень».

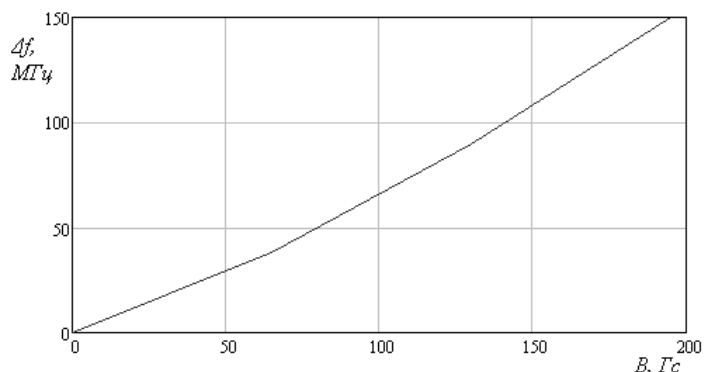


Рисунок 6. Зависимость изменения частоты резонанса от величины внешнего магнитного поля

В четвертой главе приведены результаты исследований распределения поля в резонаторе типа «металлический штырь с зазором – короткозамыкающий поршень с выемкой» (рисунок 7), используемом в качестве резонансной системы для ближнеполевого СВЧ микроскопа [4]. Расчет распределения поля по методу импедансного аналога электромагнитного пространства [7] был реализован в программной среде Delphi 7. На рисунке 8 приведены результаты расчета для следующих параметров системы: $a=10.5$ мм; $b=3$ мм; $e=7$ мм; $c=2$ мм; $d=2$ мм.

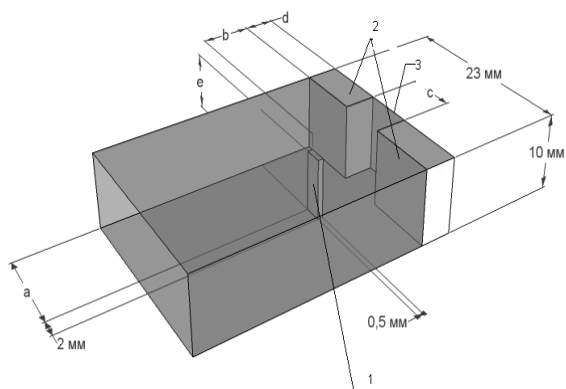


Рисунок 7. Схема низкоразмерной системы из штыря и близко расположенного короткозамыкателя с выемкой прямоугольной формы. 1 – штырь с зазором, 2 – короткозамыкатель, 3 – выемка прямоугольной формы.

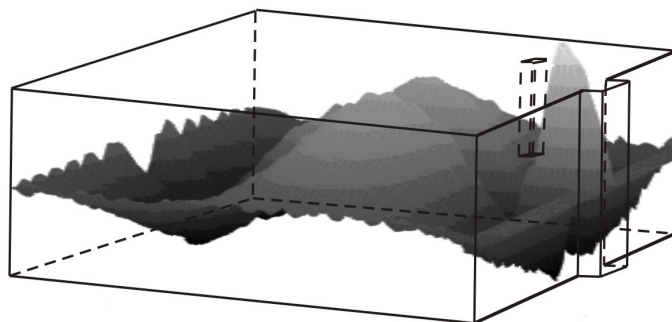


Рисунок 8. Распределения поля в волноводе

Проведено экспериментальное определение распределения поля в поперечном сечении волновода. Измерения проводились на установке, схема которой изображена на рисунке 9. Источником СВЧ-сигнала служил генератор качающейся частоты типа ГКЧ-61 (3). Сигнал от генератора поступал в волноводный тракт (1), содержащий в качестве оконечного устройства рассмотренный выше низкоразмерный резонатор. Широкая стенка волновода была выполнена с пазом шириной 23 мм и длиной 50 мм, который закрывался сверху металлической пластиной, способной перемещаться с помощью микрометрического винта от одной узкой стенки волновода к другой. В пластине выполнено технологическое отверстие, через которое в волновод вводился заостренный зонд на глубину 0.2 мм, связанный через петлю связи с детекторной головкой (2), закрепленной на внешней стороне пластины. Полученный сигнал, несущий информацию о величине напряженности СВЧ поля, через аналогово-цифровой преобразователь типа L-Card E14-140 (4) поступал в компьютер (5) для последующей обработки с использованием программной среды MathCAD.

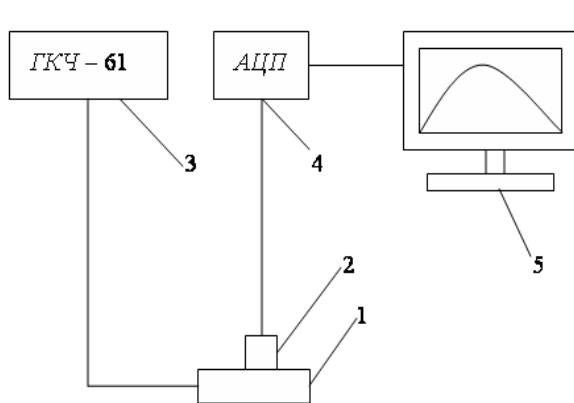


Рисунок 9. Схема установки для определения распределения поля в волноводе

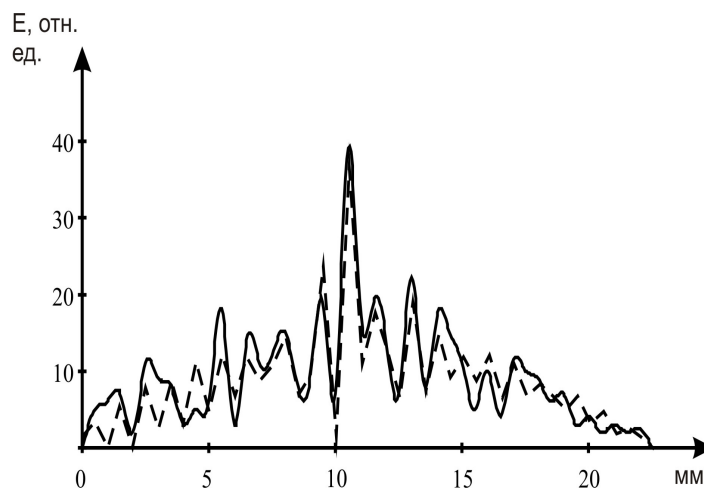


Рисунок 10. Распределение СВЧ поля в поперечном сечении волновода (штриховая кривая – расчет, сплошная кривая эксперимент)

На рисунке 10 приведены результаты теоретического расчета (штриховая кривая) и экспериментальные значения (сплошная кривая) для распределения СВЧ поля в поперечном сечении волновода на расстоянии 2 мм от короткозамыкателя при наличии штыря и выемки. Размещение элемента связи с зондом ближнеполевого микроскопа в окрестности локализации поля в резонаторе открывает возможность повышения его чувствительности к возмущающему воздействию, вносимому измеряемым объектом.

В пятой главе приведены результаты исследования локальной напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в объеме арсенид-галлиевого диода Ганна с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа. Показана возможность наблюдения многодоменной структуры в более широком диапазоне плотностей тока через диод, чем это было получено ранее.

Ранее было показано, что с повышением плотности тока через диод эти распределения принимают вид пространственных осцилляций. Выше 6 В распределение поля становилось неустойчивым и экспериментальные измерения становились невозможными. Для срыва генерации, возникающей на падающем участке ВАХ, нами параллельно диоду Ганна был подключен фильтр низких частот.

Экспериментально были получены распределения коэффициента отражения от бескорпусного диода Ганна типа АА735А-6 с помощью созданного нами ближнеполевого сканирующего СВЧ – микроскопа (рисунок 11). Резонатор в эксперименте использовался с размерами: $h=6.5\text{мм}$, $g=1\text{мм}$, $d=0.9\text{мм}$; выемка: $s=7\text{мм}$; $w=2.15\text{мм}$. Расстояние k между штырем и короткозамыкателем не превышало $\lambda/10$, диаметр кончика зонда составлял 1 мкм.

Сканирование проводилось вдоль одной из открытых граней диода, от его анода к катоду с шагом 5 мкм при различных значениях внешнего напряжения смещения. Расстояние между зондом и гранью кристалла составляло 1 мкм. Диаметр иглы - зонда составлял 0.25 мкм. Внешнее напряжение смещения изменялось в диапазоне от 0 до 7 В с шагом 1 В. Зондирование диодной структуры производилось на области протяженностью 90 мкм.

В результате сканирования были получены профили распределения СВЧ отклика (модуля коэффициента отражения СВЧ излучения $R(x)$, соответствующего резонансному пику резонатора с зондом) от координаты при различных значениях напряжения внешнего электрического смещения, поданного на диод Ганна (рисунок 12).

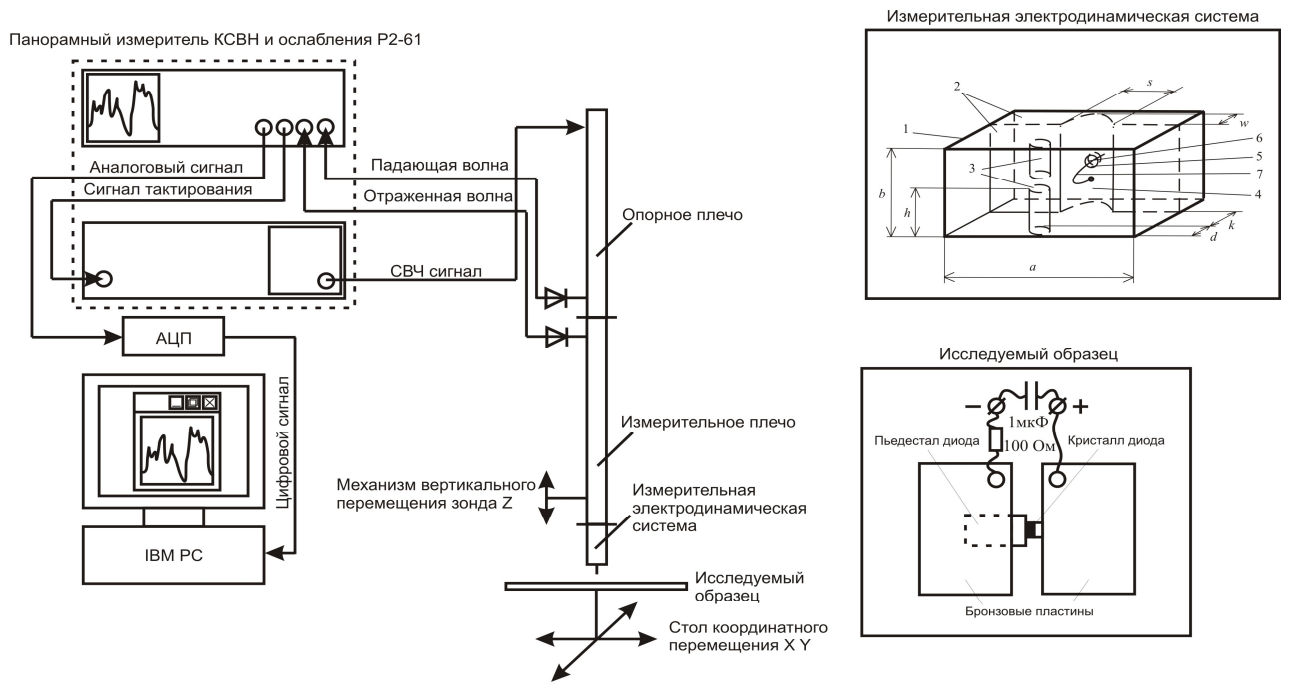


Рисунок 11. Ближнеполевой СВЧ микроскоп. Вставка справа сверху – измерительная электродинамическая система. Вставка справа внизу – диод AA735A-6, установленный в специальную оправку

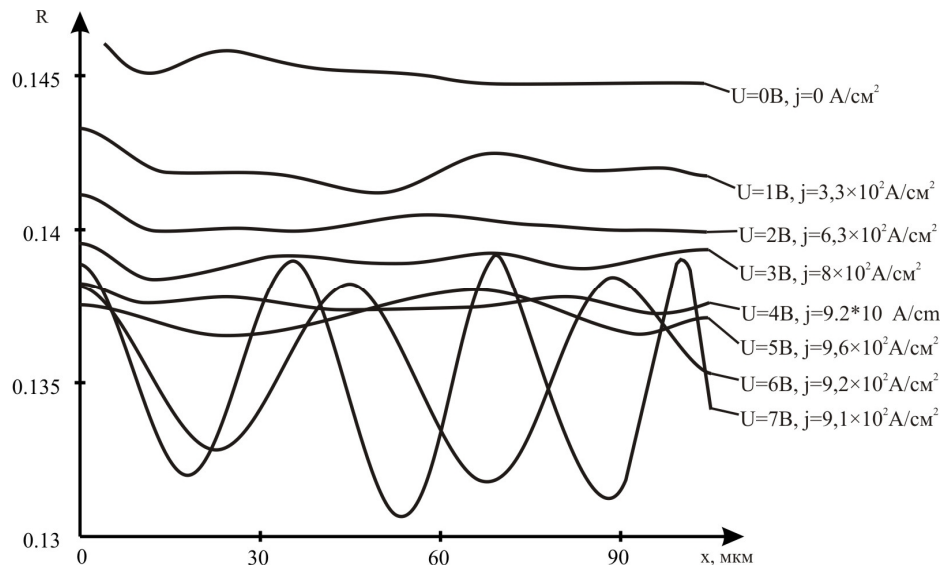


Рисунок 12. Зависимость коэффициента отражения от координаты сканирования при различных значениях напряжения на диоде

В качестве объекта численного моделирования использовалось уравнение Пуассона:

$$\varepsilon\varepsilon_0 \frac{dE}{dx} = -(n - n_0)e, \quad (1)$$

и уравнение полного тока в диоде, которое в одномерном случае выглядит следующим образом:

$$j = en\mu_n(E)E + eD_n(E) \frac{dn}{dx}, \quad (2)$$

где j – плотность тока, протекающего через диод Ганна, e – заряд электрона, E – напряженность электрического поля, $\mu_n(E)$ – зависимость подвижности электронов от напряженности электрического поля в арсениде галлия, $D_n(E)$ – зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля, ε – диэлектрическая проницаемость арсенида галлия n -типа, ε_0 – диэлектрическая постоянная, n – концентрация

носителей заряда (электронов проводимости), n_0 – равновесная концентрация носителей заряда.

Решение системы уравнений (1) и (2) позволяет определить распределение электрического поля $E(x)$ вдоль диода. Результаты численного моделирования приведены на рисунке 13. Распределение концентрации неравновесных носителей заряда вдоль активной n -области диода можно получить, подставляя полученное решение для $E(x)$ в (1). Данное распределение (рисунок 14) представляет собой отклонение концентрации Δn от равновесного положения.

Из приведенных на рисунке 13 графиков видно, что при увеличении плотности тока выше некоторого критического значения до достижения порога генерации в кристалле наблюдается последовательное увеличение числа пространственных осцилляций распределения электрического поля вдоль диода от одной до четырех.

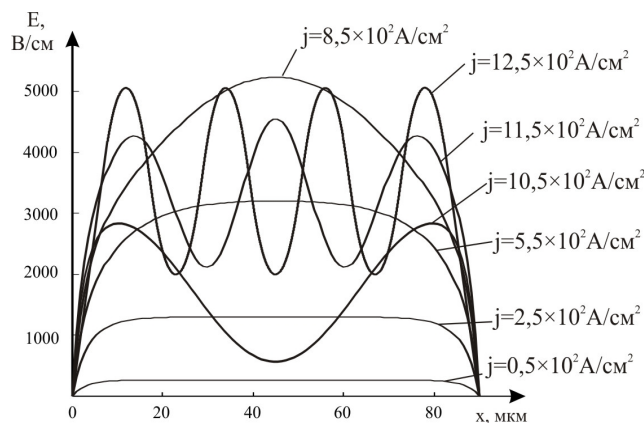


Рисунок 13. Зависимость распределения поля от координаты при различных значениях плотности тока

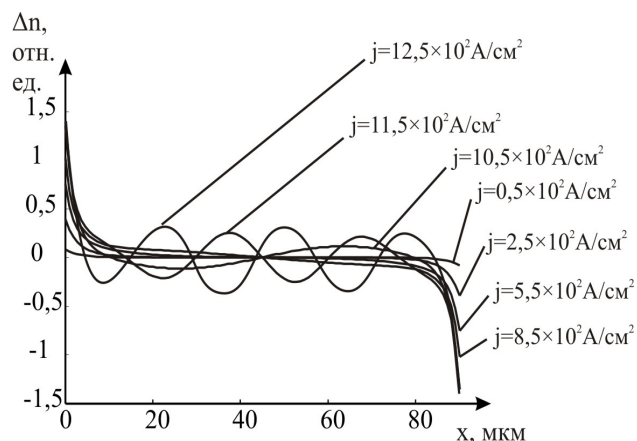


Рисунок 14. Зависимость распределения концентрации носителей заряда от координаты при различных значениях плотности тока

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований с помощью ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа стационарных распределений напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в r - i - n диоде и расчета этих величин численными методами с учетом зависимости подвижности и коэффициента диффузии электронов и дырок от напряженности электрического поля.

Согласно большинству опубликованных работ, усредненное распределение напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в r - i - n диоде при прямом смещении не имеет пространственных осцилляций вблизи контактов. В то же время из результатов измерений контактными методами следует, что вблизи r - i и i - n - переходов эти распределения могут носить характер чередующихся максимумов и минимумов. Однако результаты такого рода измерений можно связывать, например, с неоднородностями на поверхности диода, с изменением режима работы измерительных зондов при пропускании тока через r - i - n диод и другими факторами. В отличие от контактных методов ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия дает возможность проводить измерения бесконтактно и измерять подповерхностные свойства материалов, что позволяет избежать погрешностей, связанных с дефектами на сканируемой поверхности.

Теоретическое описание возможности возникновения пространственных осцилляций электрического поля и концентрации носителей заряда при биполярном дрейфе в r - i - n диоде было приведено в работе З.С. Грибникова [8]. Однако в этой работе прямых сопоставлений с результатами экспериментальных исследований не проводилось. Кроме этого, при теоретическом описании для объяснения экспериментов уравнения Пуассона и полного тока записывались с учетом предположения о наличии малых осцилляций подвижности электронов и дырок в диоде.

Нами были проведены исследования бескорпусного диода типа 2A513A-1 с помощью созданного нами ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа (рисунок 6.1).

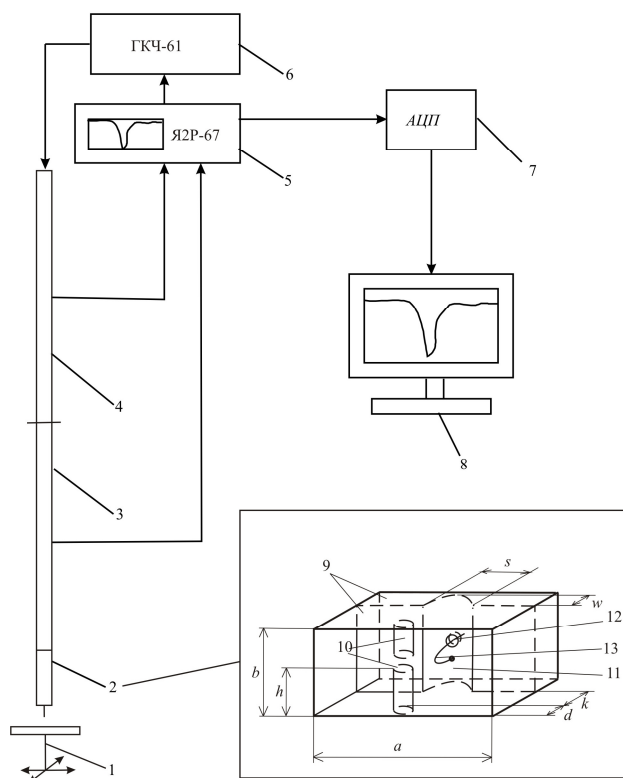


Рисунок 15. Ближнеполевой СВЧ микроскоп. Вставка – измерительная электродинамическая система.

Сканирование свойств р-і-n диода проводилось путем перемещения площадки, на которой был расположен р-і-n диод, относительно зонда с шагом 2 мкм при различных значениях плотности тока, протекающего через р-і-n диод, схематическое изображение которого приведено на вставке к рисунку 6.2. Расстояние между зондом и гранью кристалла составляло 1 мкм. Диаметр иглы - зонда составлял 0.25 мкм. Плотность тока изменялась в интервале от 0 до $5.04 \cdot 10^2$ А/см². Зондирование диодной структуры производилось на области протяженностью 260 мкм. В результате сканирования были получены профили распределения СВЧ отклика (определяемого, как модуль коэффициента отражения СВЧ излучения $R(x)$, на частоте 11.45 ГГц, соответствующей резонансному пику резонатора с зондом) по координате при различных значениях плотности тока, поданного на диод, (рисунок 16).

Нами были выполнены численные расчеты стационарного распределения электрического поля и концентрации носителей заряда в р-і-n диоде с использованием ЭВМ с учетом зависимости подвижности и коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля. Данная краевая задача решалась с использованием функции `bvp4c` математического пакета Matlab 2009.

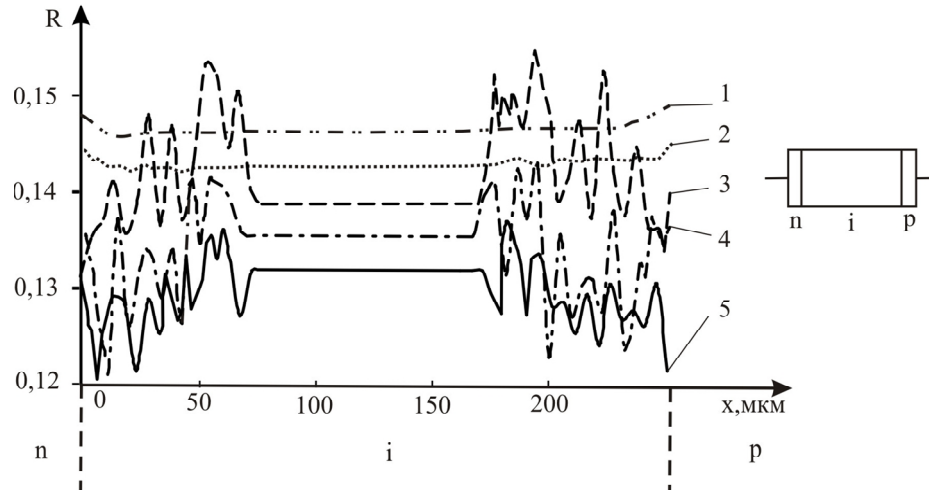


Рисунок 16. Зависимость коэффициента отражения от координаты сканирования при различных плотностях тока. 1 – $j=0$ А/см², 2 – $j=0.63 \cdot 10^2$ А/см², 3 – $j=1.89 \cdot 10^2$ А/см², 4 – $j=3.15 \cdot 10^2$ А/см², 5 – $j=5.04 \cdot 10^2$ А/см².

Расчеты в рамках одномерной задачи основывались на численном решении уравнения Пуассона:

$$\varepsilon \varepsilon_0 \frac{dE}{dx} = e((p - p_0) - (n - n_0)), \quad (3)$$

совместно с уравнением полного тока в диоде:

$$j = e(n\mu_n(E) + p\mu_p(E))E + eD_n(E) \frac{dn}{dx} - eD_p(E) \frac{dp}{dx}, \quad (4)$$

где j – плотность тока, протекающего через р-і-п диод, e – заряд электрона, E – напряженность электрического поля, $\mu_n(E)$ – зависимость подвижности электронов от напряженности электрического поля в кремнии, $\mu_p(E)$ – зависимость подвижности дырок от напряженности электрического поля в кремнии, $D_n(E)$ – зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля, $D_p(E)$ – зависимость коэффициента диффузии дырок от напряженности электрического поля, ε – диэлектрическая проницаемость кремния, ε_0 – диэлектрическая постоянная, n – концентрация электронов проводимости, $n_0=3.7 \cdot 10^{10}$ см⁻³ – равновесная концентрация электронов проводимости в і – области, p – концентрация дырок, $p_0=3.7 \cdot 10^{10}$ см⁻³ – равновесная концентрация дырок в і – области.

Для зависимости подвижности в кремнии от напряженности электрического поля использовалось соотношение, приведенное в [9]:

$$\mu(E) = \mu_{0p,n}(1 - \beta_{p,n}E^2), \quad (5)$$

где $\mu_{0p}=600$ см²/(В·с), $\mu_{0n}=1500$ см²/(В·с), $\beta_p=1.8 \cdot 10^{-8}$ см²/В², $\beta_n=4.9 \cdot 10^{-8}$ см²/В².

В качестве зависимости $D_n(E)$ и $D_p(E)$ мы использовали предложенные нами выражения, аппроксимирующие известные для Si экспериментальные зависимости, в виде:

$$D_n(E) = ae \frac{(E-b)^2}{c} + d, \quad D_p(E) = ke \frac{(E-b)^2}{m} + d, \quad (6)$$

где для Si $a = 29$ см²/с, $b = 2 \cdot 10^3$ В/см, $c = 1.73 \cdot 10^7$ В²/см², $d=7$ см²/с, $k = 9$ см²/с, $m = 0.99 \cdot 10^7$ В²/см².

В качестве граничных условий использовались:

$$\begin{cases} E(0) = 0, \\ E(l) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где l – длина i -области р-і-п диода. Физически использование данных граничных условий означает преобладание диффузионной компоненты плотности полного тока над дрейфовой при $x=0, l$.

Решение уравнения (3) с граничными условиями (7) позволяет найти распределение электрического поля $E(x)$ вдоль диода. Результаты численного моделирования приведены на рисунке 17. Распределение концентрации неравновесных носителей заряда вдоль i -области диода можно получить, подставляя полученное решение для $E(x)$ в (3). Приведенное на рисунке 18 распределение содержит пространственные осцилляции концентрации носителей заряда.

В результате численного решения уравнения (3) с граничными условиями (7) мы получаем массив значений напряженности поля вдоль i области р-і-п диода и массив значений производной от напряженности поля вдоль i области р-і-п диода. Эти два массива позволяют нам изобразить поведение траекторий на фазовой плоскости ($E, dE/dx$).

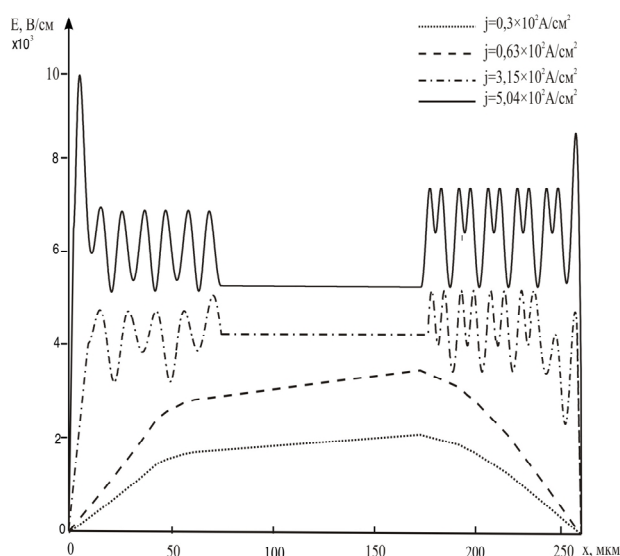


Рисунок 17. Профили распределения напряженности электрического поля вдоль кристалла р-і-п диода при различных плотностях тока, протекающего через диод

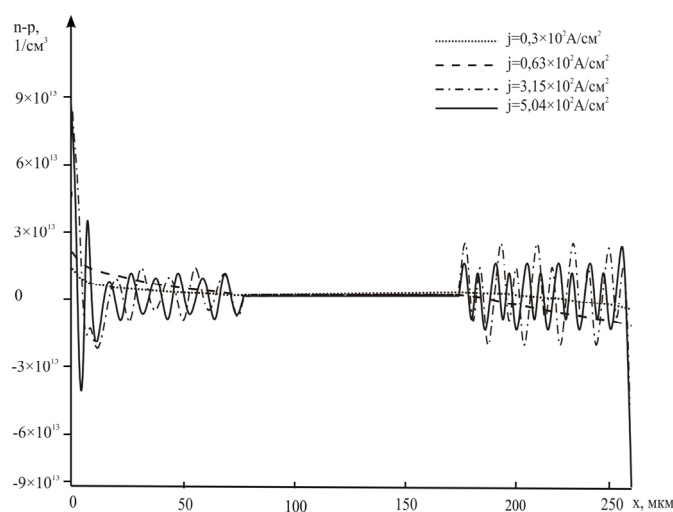


Рисунок 18. Профили распределения разности концентраций электронов и дырок вдоль кристалла р-і-п диода при различных плотностях тока, протекающего через диод

На рисунке 19 приведены результаты расчетов зависимости dE/dx от E на фазовой плоскости для двух значений плотности тока: $0.63 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ и $5.04 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$. Фазовый портрет для плотности тока $0.63 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ существенно отличается от портрета для плотности тока $5.04 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$, при которой на диаграмме можно видеть несколько замкнутых контуров.

На рисунке 20 приведена зависимость dE/dx от E на фазовой плоскости для случая, когда коэффициент диффузии от поля не зависит. Сравнение зависимостей dE/dx от E показывает, что зависимость, приведенная на рисунке 19, хорошо согласуется с измерениями, чего не наблюдается для зависимости, приведенной на рисунке 20. Это подтверждает принципиальную важность учета зависимости коэффициента диффузии для основных носителей заряда от электрического поля, действующего на эти носители, при описании процессов, протекающих в р-і-п диодах.

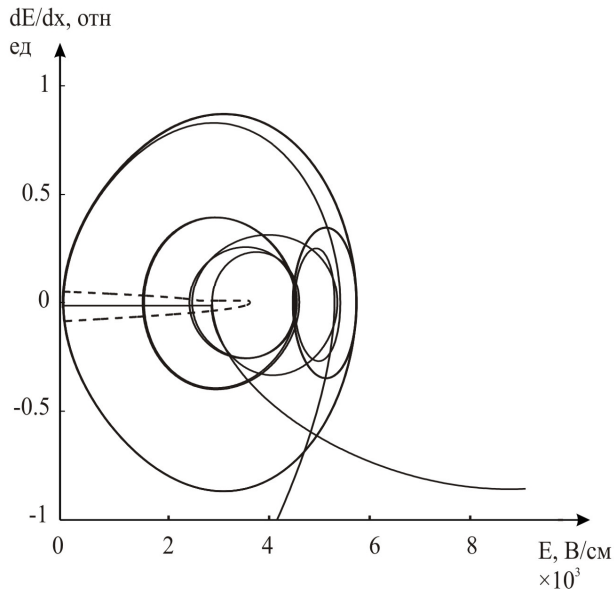


Рисунок 19. Зависимость dE/dx от E на фазовой плоскости для двух значений плотности тока: штриховая кривая – $0.63 \cdot 10^2$ А/см², сплошная кривая – $5.04 \cdot 10^2$ А/см², полученные с учетом зависимости коэффициента диффузии от напряженности электрического поля

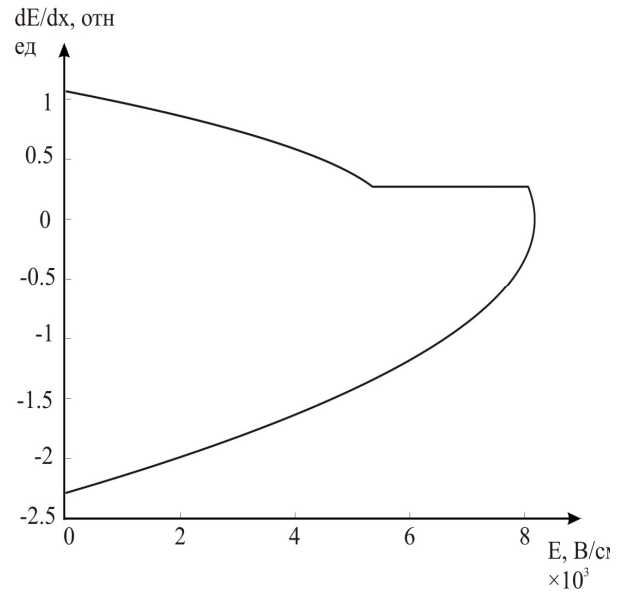


Рисунок 20. Зависимость dE/dx от E на фазовой плоскости для плотности тока $5.04 \cdot 10^2$ А/см², полученная, в предположении что коэффициент диффузии не зависит от напряженности электрического поля и равен такому при $j=0$

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Таким образом, в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Методом импедансного аналога электромагнитного пространства проведен расчет структуры электрического поля в низкоразмерном резонаторе типа «штырь с зазором – короткозамыкающий поршень». Показано, что поле СВЧ-волны в основном локализуется в области между штырем и короткозамыкателем. Продемонстрировано, что локализация поля в области между штырем и короткозамыкателем увеличивается при наличии выемки в поршне.

2. Показана возможность эффективного применения низкоразмерных резонаторов в качестве элемента зондовой системы ближнеполевого СВЧ микроскопа, для повышения чувствительности и разрешающей способности микроскопа.

3. Продемонстрирована возможность определения с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа с низкоразмерным резонатором типа «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма» анизотропии диэлектрических свойств СВЧ керамики.

4. Продемонстрирована возможность достижения с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа с резонансной системой емкостная диафрагма – пластина диэлектрика, металлический зонд устойчивого разрешения металлических полосок, нанесенных на диэлектрическое основание, шириной до 0.5 мкм. Чувствительность к изменению проводимости для такого микроскопа $\Delta R_x/R_x$ не хуже чем 4.027×10^{-3} .

5. Показана возможность использования ближнеполевого СВЧ микроскопа для локального исследования подвижности, концентрации носителей заряда и распределения напряженности электрического поля в p-i-n диодах. Экспериментально и теоретически показано, что при увеличении плотности тока выше некоторого критического значения в кристалле p-i-n диода наблюдаются осцилляции в распределении напряженности постоянного электрического поля вдоль кристалла диода и, как следствие, концентрации носителей заряда, имеющие в зависимости от величины протекающего через диод тока различное число максимумов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

Низкоразмерный резонатор для ближнеполевого СВЧ-микроскопа / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2014. – Т.17. – №1. – С. 41-44

Пространственные осцилляции электрического поля и плотности заряда в кремниевом р-і-п диоде / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев, А.А. Калямин // ПЖТФ. – 2014. – Т. 40. – Вып. 21.– С. 104-110.

Нелинейная динамика формирования пространственно-неоднородной структуры в р-і-п диоде / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. – 2014. – Т 22. – №4. – С.98-107.

В других изданиях

Низкоразмерный резонатор, настраиваемый магнитным полем / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев // 21-ая Международная Крымская конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011). Материалы конф. (Севастополь, 12-16 сент. 2011г.). Севастополь: Вебер, 2011 – С.674-675.

Распределение поля в резонаторе ближнеполевого СВЧ-микроскопа / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев // Материалы Всерос. научной школы-семинара «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами». г. Саратов, 14-15 мая 2014 г. : изд-во Саратовский источник, 2014, С 61-64

Ближнеполевая СВЧ микроскопия р-і-п диодов и диодов Ганна / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, В. Ю. Кваско, А.В. Фадеев // Тезисы докладов 12-ой Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». – г. Нижний Новгород. – 2014г. – С. 93-95.

Осцилляции пространственного распределения электрического поля и концентрации носителей заряда в полупроводниковой р-і-п структуре / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев, А.А. Калямин // 24-ая Международная Крымская конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). Материалы конф. (Севастополь, 7-13 сент. 2014г.). Севастополь: Вебер, 2014 – С.145-146.

Патент

Пат. 2529417 С1 Российская Федерация, МПК G01R27/26. Резонансное устройство для ближнеполевого СВЧ-контроля параметров материалов / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев; - № 2013147833/07; заявл. 25.10.2013.; опубл. 27.09.2014. бюл. №27.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Частотные характеристики низкоразмерных волноводных систем типа «емкостная диафрагма – короткозамыкающий поршень» / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, А.Н. Сорокин, // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2008. – №5. – С.77-80.,

2. Резонансы в волноводной системе "штырь с зазором – близкорасположенный поршень / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – Т. 49. – № 2. – С. 27–33.

3. Управляемый магнитным полем СВЧ-выключатель на р-і-п диодах / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – № 1. – С. 72–73.

4. Низкоразмерный резонатор для ближнеполевого СВЧ-микроскопа / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2014. – Т.17. – №1. – С. 41-44

5. Магнитная перестройка частоты СВЧ генератора на диоде Ганна / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, Семенов А.А., Сорокин А.Н., Кваско В.Ю. // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2009. – Т. 52. – №3. – С.77–80.

6. Резонансное ближнеполевое устройство для СВЧ микроскопа/ Д.А Усанов, С.С. Горбатов // Пат. РФ № 2417379, - №2009142478/28; Заявлено 19.11.09. Опубл. 27.04.11. Бюл. № 12.

7. Метод импедансного аналога электромагнитного пространства для решения начально-краевых задач электродинамики / С.А. Иванов, Б.В. Сестрорецкий, А.Н. Боголюбов // Вычислительные методы и программирование. – 2008. – Т. 9. – С. 274-304.

8. Пространственные осцилляции электрического поля и концентрации носителей заряда при биполярном дрейфе в полупроводнике / З.С. Грибников // ФТП. –1975. – Т.9. – №9. – С.1710-1716.

9. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях. / Э. Конуэлл. – Пер. с англ. А. Ф. Волкова и А. Я. Шульмана. М.: Мир. 1970. – 302 с.

Фадеев Алексей Владимирович

**БЛИЖНЕПОЛЕВАЯ СВЧ – МИКРОСКОПИЯ И ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ СВЧ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

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 № 23

Отпечатано в полиграфии ООО «Скайрей».

410054, Саратов, Политехническая 122.

Тел.8 (8452) 520 992