

На правах рукописи



КВАСКО ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА, НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
И ОБРАЗОВАНИЯ ДОМЕНОВ В ДИОДАХ ГАННА

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 – 2013

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, доцент

Горбатов Сергей Сергеевич

Официальные оппоненты:

Клинаев Юрий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Энгельсский технологический институт Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина, профессор кафедры «Техническая физика и информационные технологии»

Гусятников Виктор Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский государственный социально-экономический университет, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики факультета учета, статистики и информатики.

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

Защита диссертации состоится 26 сентября 2013 г. в 15.30 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 им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан « ____ » июня 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Представление о физических процессах в полупроводниковых приборах, в том числе широко применяющихся в современной твердотельной СВЧ электронике и использующихся в сложных радиофизических системах, в значительной степени сформировались в первые десятилетия после открытия эффектов, лежащих в основе их работы. Эти представления сохраняются до настоящего времени, несмотря на то, что произошли революционные изменения в уровне измерительной аппаратуры, современные образцы которой позволяют гораздо более детально исследовать изменение характеристик приборов при изменении режима питания, температуры, уровня воздействующего сигнала и других факторов. К такой аппаратуре, в частности, относится сканирующий ближнеполевой СВЧ микроскоп, открывающий возможность проводить измерение физических характеристик объектов с локальностью, соизмеримой с аналогичными параметрами у атомно-силовых и туннельных микроскопов, но выгодно отличающийся от них возможностью измерять характеристики материала «под поверхностью». Эффекты, связанные с явлением "ближнего поля", обусловлены возникновением квазистационарных (часто называемых эванесцентными) полей, которые локализуются в малой (в сравнении с длиной волны основного типа, распространяющейся в электродинамической системе) окрестности излучающей антенны. Если исследуемый объект находится в области существования этого, быстро затухающего с увеличением расстояния, квазистационарного поля, то существует возможность исследовать распределение его электрофизических свойств с разрешением, намного меньшим, чем длина волны используемого излучения. В этом смысле микроскопия ближнего поля позволяет «перешагнуть» через дифракционный предел. Этот вид микроскопии имеет ряд преимуществ, среди которых – отсутствие квантовых эффектов поглощения излучения веществом исследуемого объекта, прозрачность в СВЧ-диапазоне многих оптически непрозрачных веществ. Данный вид микроскопии особенно предпочтителен при отладке технологии производства микроэлектронных устройств, предназначенных для использования именно в СВЧ-диапазоне, так как параметры материалов и структур измеряются на тех же частотах, на которых они будут работать в конечном устройстве. Таким образом, если даже СВЧ-ближнеполевая микроскопия и не заменяет других видов контроля и исследования, то, как минимум, гармонично их дополняет.

Отметим, что элементами ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа, наиболее существенным образом влияющими на его основные характеристики, является СВЧ резонатор и зондирующая часть. Именно эти элементы должны быть выполнены с учетом специфики исследуемого объекта, поставленных задач исследований. Одним из типов применяемых в ближнеполевой сканирующей СВЧ микроскопии резонаторов являются низкоразмерные резонаторы «штырь с зазором – короткозамыкающий поршень» и «индуктивная диафрагма близко расположенная емкостная диафрагма». Свойства систем близкорасположенный штырь с зазором – короткозамыкающий поршень исследовались в работах [1], при этом было обнаружено, что параметрами резонансов в таких системах можно эффективно управлять [2]. Резонансы в таких системах связаны с возбуждением “ближнего поля” в окрестности штыря с зазором и взаимодействием этого поля с короткозамыкателем. Математически это поле можно описать системой высших типов колебаний [3,4], включающей в себя, в том числе и Е-типы волн. То есть, фронт Е-компоненты поля, возбуждаемого между короткозамыкателем и штырем, не лежит только в поперечной плоскости волновода, как для волны основного типа. Поэтому для обеспечения наибольшей добротности возникающих в системе резонансов плоский короткозамыкатель не является оптимальным. Вносимое в низкоразмерный резонатор малое возмущение, изменяющее его электрическую длину, приводит к значительному изменению его характеристик, что и демонстрировалось в работах [5-7]. Низкоразмерными авторами [8,9] назвали такие электродинамические системы, в которых длина волны основного типа в 10 и более раз превосходит, по крайней мере, один из размеров системы.

Использование современных методов измерений, основанных на новых физических принципах, и теоретическое исследование, выполненное в более строгой постановке решаемых задач, открывает перспективу расширения представлений о рассматриваемых физических эффектах, нашедших практическое применение, установление новых закономерностей в их проявлении. Проведение такого комплекса исследований актуально для науки и практики прежде всего в связи с перспективой установления новых закономерностей проявления физических явлений в сильных электрических полях, к которым, в частности, относится эффект Ганна. Установление таких закономерностей может позволить сформировать рекомендации для разработчиков приборов на этом эффекте по улучшению их основных характеристик.

Цель диссертационной работы:

Выявление нелинейной динамики распределения концентрации носителей заряда, напряженности электрического поля и образования доменов в диодах Ганна методом ближнеполевой сканирующей СВЧ микроскопии и путем решения численным методом описывающей эти процессы системы нелинейных дифференциальных уравнений.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование СВЧ резонаторов для ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа.
2. Экспериментальное исследование технологии создания зонда для ближнеполевого СВЧ микроскопа.
3. Создание ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа, предназначенного для исследования диодов Ганна.
4. Теоретическое описание распределения концентрации носителей заряда, напряженности электрического поля и образования доменов в диоде Ганна при изменении режима его питания.
5. Экспериментальное исследование нелинейной динамики изменения характеристик диодов Ганна с изменением режима питания.
6. 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: радиофизика и твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы 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 диода Ганна вдоль его длины.

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

1. Предложена методика локального определения концентрации носителей заряда и напряженности электрического поля в диодах Ганна для различных значений питающего напряжения, основанная на использовании результатов измерений коэффициента отражения от координаты с помощью ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа.
2. Предложен и реализован способ изготовления зонда для ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа, включающий локальный нагрев стеклянной полой трубки с помещенным в ее сердцевину легкоплавким металлом или металлическим сплавом, температура плавления которого значительно меньше температуры размягчения стекла, до его размягчения и последующее растяжение трубки до разрыва.
3. Показано, что при увеличении плотности тока через диод Ганна 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.

4. Предложен новый тип волноводного измерительного резонансного устройства для ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа с резонатором в виде резонансного штыря с зазором и близкорасположенного к нему короткозамыкателя с отверстием в короткозамыкающей стенке низкоразмерного резонатора, в котором коаксиально расположен заостренный на конце зонд, выступающий за пределы резонатора и с помощью петли связи, гальванически соединенный с короткозамыкающей стенкой резонатора. Короткозамыкатель содержит полукруглую выемку. Условия возникновения резонанса достигаются подбором расстояния между короткозамыкателем и установленного в центральной части на широких стенках волновода, параллельно выемке, штыря с зазором, а также положением зазора и его размером.

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 проходящего через диод Ганна тока открывает возможность нахождения уточненных значений импеданса диода на СВЧ, что, в свою очередь, позволяет более строго сформулировать требования к конструкциям СВЧ устройств, в которых диод Ганна используется в качестве активного элемента.

Предложен новый тип устройства ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа, содержащего СВЧ-генератор с подключенным к нему прямоугольным волноводом, имеющим короткозамыкатель и введенный в него штырь, установленный в центральной части на одной из широких стенок волновода параллельно короткозамыкателю с зазором между ним и другой широкой стенкой. Короткозамыкатель имеет на поверхности, обращенной внутрь волновода, полукруглую выемку, параллельную штырю, и отверстие, расположенное в выемке, в котором коаксиально расположен зонд в виде иглы с помощью петли связи, гальванически соединенный с короткозамыкателем, выступающий за пределы волновода. При этом расстояние от штыря до короткозамыкателя, величина и положение зазора выбраны из условия возникновения резонанса. Новизна предложенного устройства защищена патентом на изобретение.

Предложен новый способ создания стеклянного зонда с проводящей сердцевинкой для ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа, включающий локальный нагрев стеклянной полой трубки до ее размягчения и последующее растяжение трубки до разрыва, отличающийся тем, что перед началом процесса в стеклянную трубку помещают легкоплавкий металл или металлический сплав, температура плавления которого значительно меньше температуры размягчения стекла, из которого изготовлена стеклянная трубка. Предложенный способ создания зонда и устройство для его реализации защищены патентами.

Основные положения, выносимые на защиту:

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

При увеличении плотности тока через диод Ганна выше некоторого критического значения наблюдается немонотонная зависимость концентрации носителей заряда и 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 горячих электронов.

Для достижения высокой чувствительности ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа в качестве измерительного узла, включающего СВЧ резонатор и связанный с ним зонд, целесообразно в качестве резонатора использовать металлический штырь с зазором, близкорасположенный от короткозамыкателя с отверстием в стенке, в котором находится заостренный на конце зонд, с помощью петли связи гальванически соединенный с короткозамыкающей стенкой и выступающий за пределы резонатора. Близость штыря и короткозамыкателя необходима для возбуждения волн высших типов, увеличивающих селективность резонатора.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы доложены на:

- 18-й Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008), г. Севастополь, Украина, 8-12 Сентября 2008г.;
- 7-й Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Самара, 15-21 сентября 2008г.;
- 8-й Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Санкт-Петербург, 14-19 сентября 2009г.;
- 21-ой Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011), г. Севастополь, Украина, 12-16 сентября 2011г.;
- 4-й международной научной конференции «Современные проблемы радиоэлектроники», г. Ростов-на-Дону, 17 мая 2012г.;
- Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, 4-7 июня 2012г.;

Исследования выполнялись в рамках НИР «Технология формирования наноструктур и нанокompозитов, разработка и создание новых технологий измерений параметров материалов, наноструктур и нанокompозитов на основе низкоразмерных резонансных систем оптического и микроволнового диапазонов» ГК № 02.513.11.3058, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 годы», НИР «Разработка новых высокочувствительных методов измерения электрических и магнитных свойств нанокompозитных материалов и структур в СВЧ и оптическом диапазонах и создание компьютерного диагностического комплекса для их реализации» (грант Президента РФ для поддержки молодых ученых — докторов наук и кандидатов наук и их научных руководителей (МК-415.2009.8), 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, гранта 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, НИОКР «Ближнеполевой СВЧ микроскоп на основе низкоразмерных резонансных систем с коаксиальным зондом» по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») 2009 ГК № 7379р/10164.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе, 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК; 6 работ опубликованы в трудах международных и Всероссийских конференций, получено 2 патента РФ на изобретение и 1 патент РФ на полезную модель.

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, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 110 страницах, содержит 35 рисунков и список литературы из 118 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 первой главе проведен анализ современного состояния исследований физики работы диодов Ганна.

Во второй главе приведены результаты исследований частотных зависимостей системы короткозамыкатель с выемкой – металлический штырь, расположенный напротив выемки, при различных, но всегда значительно меньших длины волны основного типа, расстояниях между короткозамыкателем с выемкой и штырем [1,2]. Экспериментально установлено, что предложенная резонансная система при наличии цилиндрической выемки в короткозамыкателе, позволяет значительно повысить селективность возникающих резонансов, что, в свою очередь, открывает возможность повышения эффективности работы измерительных устройств на ее основе.

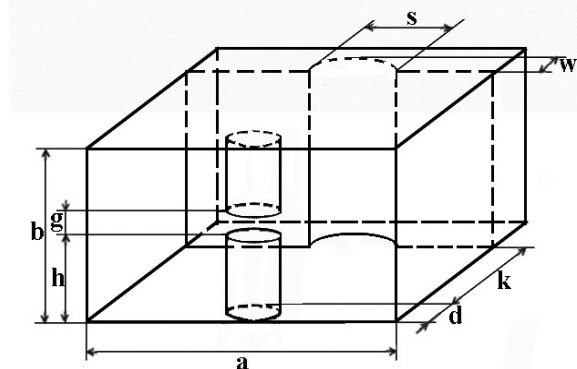


Рисунок 1. Схематическое изображение системы «короткозамыкатель с цилиндрической выемкой – штырь с зазором».

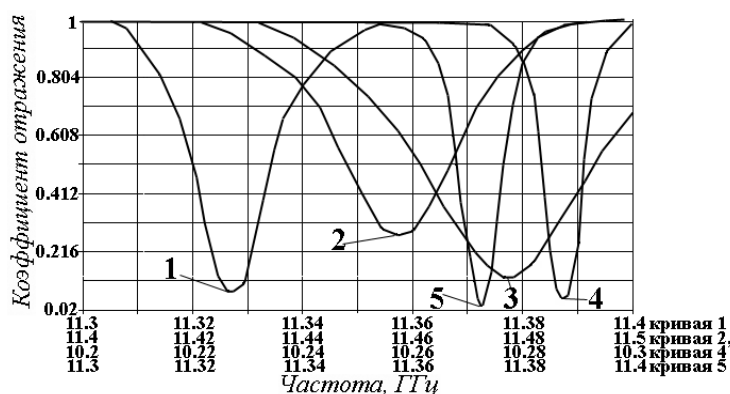


Рисунок 2. Резонансы в системе «короткозамыкатель с цилиндрической выемкой – штырь с зазором», зависимости коэффициента отражения от частоты соответствуют следующим параметрам: $s=w=2,3$ мм, $g=0,5$ мм, $d=0,8$ мм; для кривых 1, 2 – $h=5,5$ мм, для кривых 3, 4, 5 – $h=6$ мм. Расстояния между короткозамыкателем и штырем составляли: 1 – 0.0625 мм; 2 – 0.125 мм; 3 – 0.1875 мм; 4 – 0.25 мм; 5 – 0.5 мм.

Экспериментально определены геометрические размеры резонатора, при которых наблюдается селективность 3000 Дб/ГГц. Схематическое изображение системы «короткозамыкатель с цилиндрической выемкой – штырь» приведено на рисунке 1, на котором $a=23$ мм, $b=10$ мм – размеры волновода; $h=0 \div 10$ мм – расстояние от широкой стенки волновода до нижнего края зазора, $g=0,5$ мм \div 9 мм – ширина зазора; $s=1 \div 8,3$ мм – ширина выемки; $w=0,5 \div 2,4$ мм – глубина выемки. Диаметр штыря составлял $d=0,5 \div 1$ мм.

Цилиндрическая форма поверхности выемки выбиралась из соображения ее соответствия форме поверхности штыря.

Измерения производились в диапазоне значений расстояния между короткозамыкателем и штырем k от 62.5 мкм до 1.5 мм с шагом 62.5 мкм.

На рисунке 2 представлены результаты измерений частотных характеристик коэффициента отражения при различных значениях расстояния между короткозамыкателем и цилиндрическим штырем различных размеров.

В третьей главе продемонстрирована возможность достижения с помощью ближнеполевых СВЧ микроскопов (рисунок 3 и рисунок 4) устойчивого разрешения металлических полосок, нанесенных на диэлектрическое основание, шириной до 0.5 мкм. Чувствительность к изменению проводимости для ближнеполевого СВЧ микроскопа на основе низкоразмерного резонатора типа «короткозамыкатель с выемкой – металлический штырь» $\Delta R_x/R_x$ была не хуже чем $4.027 \cdot 10^{-3}$.

Описанный в главе 2 резонатор был применен в качестве составного элемента ближнеполевого сверхвысокочастотного микроскопа, который использовался для измерения электрических параметров исследуемых образцов (вставка слева и справа сверху к рисунку 3).

На рисунке 4а поверх фотоизображения тестовой структуры приведена экспериментальная зависимость частоты резонанса системы от смещения измерительного зонда вдоль оси x . Образец перемещался относительно зонда с помощью микрометрического винта. Видно, что при изменении местоположения зонда происходит изменение резонансной частоты, что позволяет судить о разрешении металлических элементов исследуемой структуры с шириной отдельного элемента ~ 8 мкм. Следует отметить, что значения резонансной частоты при прохождении зонда над неметаллизированной частью встречно – штыревой структуры были различными в зависимости от наличия или отсутствия на ней следов не удаленного фоторезиста.

На рисунке 4б изображена аналогичная приведенной на рисунке 3а экспериментальная зависимость частоты резонанса от величины смещения измерительного зонда относительно встречно-штыревой структуры с шириной полосок 0.5 мкм. Видно, что при изменении местоположения зонда происходит изменение резонансной частоты, что позволяет говорить о разрешении элементов исследуемой структуры шириной ~ 0.5 мкм.

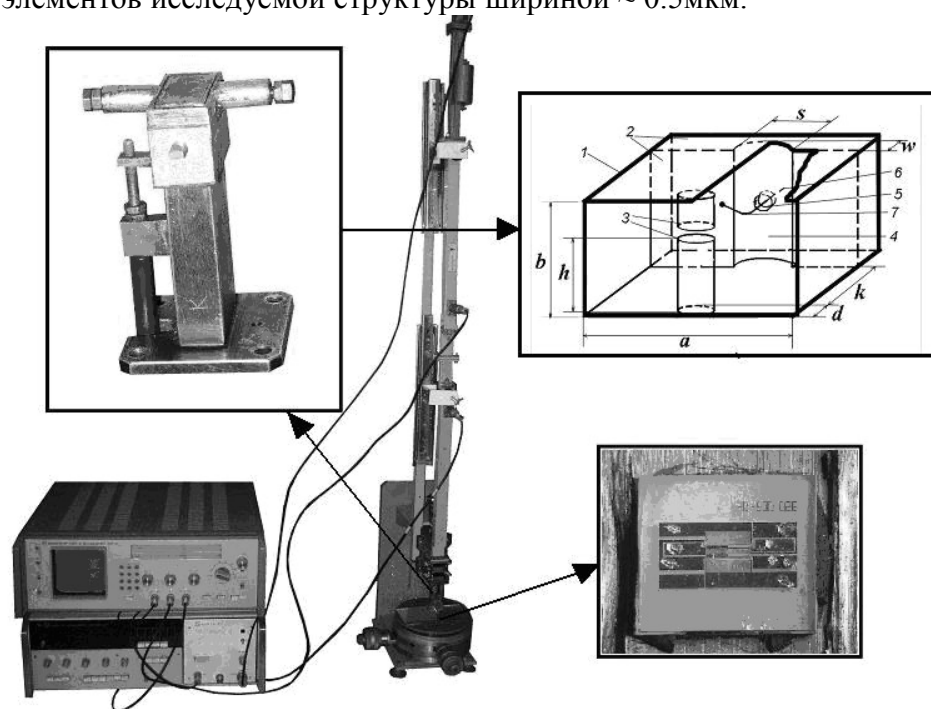


Рисунок 3. Ближнеполевой СВЧ микроскоп, вставка к рисунку слева и справа сверху: система «штырь с зазором – короткозамыкатель с выемкой», вставка справа снизу – фотоизображение

структуры из ниобата лития с нанесенной на него металлизацией в виде встречно-штыревой алюминиевой системы с периодом 0.5 мкм.

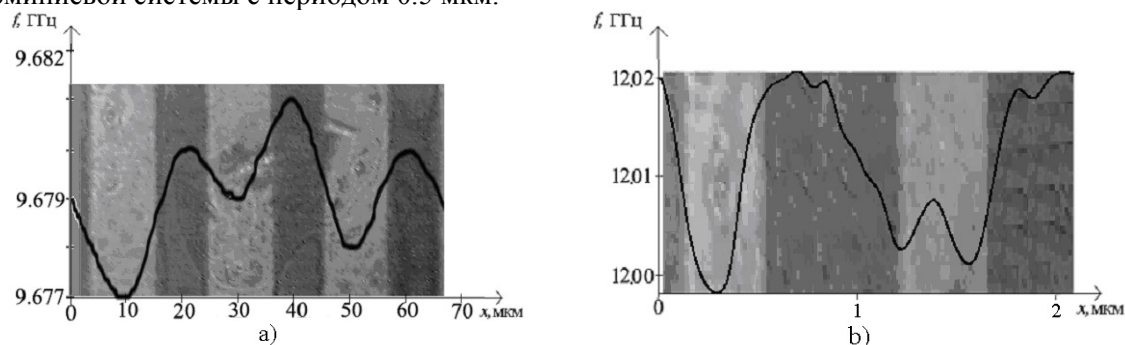


Рисунок 4. Частотные зависимости резонанса при прохождении зонда над встречно-штыревой структурой.

Также был применен в качестве составного элемента ближнеполевого сверхвысокочастотного микроскопа резонатор типа «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма», который использовался для измерения электрических параметров исследуемых образцов рисунок 5.

В резонансной системе, состоящей из волновода 1, индуктивной диафрагмы 2 и емкостной диафрагмы 3, имеющей две металлических иглы – зонда 4, изготовленных из медной проволоки диаметром 0.25 мм, свободные концы которых химически затачивались до радиуса закругления кончика 0.5 мкм и сводились друг к другу на расстояние 1...2 мкм, возбуждались высшие типы волн, обуславливающие резонансы. Зонды закреплялись с обеспечением гальванической связи на тыльной стороне емкостной диафрагмы (рисунок 5). Изменением расстояния между емкостной диафрагмой 3 и индуктивной диафрагмой 2, добивались возникновения резонанса с малым коэффициентом отражения, после чего это расстояние фиксировалось. Часть электромагнитного поля, возникшего в резонансной структуре, локализовалась в зазоре между двумя иглами – зондами 4 в виде квазистационарного (ближнего) поля и взаимодействовала с исследуемым объектом, поднесенным к этому зазору на расстояние 0.5...1.5 мкм.

Для иллюстрации возможностей описанного микроскопа выбрана использующаяся в акустических линиях задержки и фильтрах на поверхностных акустических волнах структура из ниобата лития с нанесенной на него металлизацией в виде встречно-штыревой алюминиевой системы с периодом 0.5 мкм, фотоизображение которой приведено на рисунке 6, а.

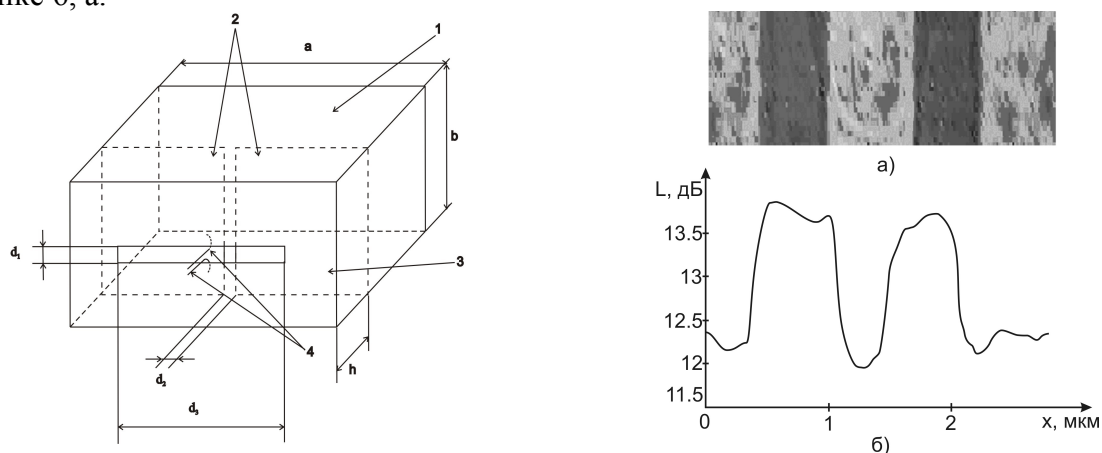


Рисунок 5. Резонатор типа «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма».

Рисунок 6. а) Внешний вид исследуемой структуры из ниобата лития с нанесенной на него металлизацией в виде встречно-штыревой алюминиевой системы; б) Результаты сканирования исследуемой структуры.

Описан способ, который позволяет изготавливать новый тип зондов, обладающих улучшенной локализацией поля, а, следовательно, повышенной разрешающей способностью,

а также улучшенными в сравнении с аналогами и прототипом механическими свойствами и долговечностью.

На рисунке 7 условно изображены технологические этапы формирования заявляемого зонда и его внешний вид. Позициями на рисунке 7 обозначены: 1 – стеклянная трубка, 2 – полость стеклянной трубки, 3 – сердцевина, 4 – острие.

Зонд представляет из себя стеклянную трубку, с тупым и острым концами и сердцевиной, представляющей собой высокопроводящий металл или металлический сплав. Острый конец трубки (острие) выполнен сужающимся, при этом даже самый кончик заполнен высокопроводящим металлом или металлическим сплавом. Металлическая сердцевина заканчивается на одном уровне со стеклянной оболочкой.

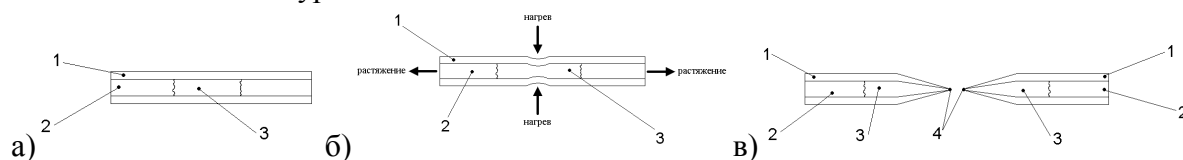


Рисунок 7. Технологические этапы формирования зонда и его внешний вид.

В четвертой главе приведены результаты исследования локальной напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в объеме арсенид-галлиевого диода Ганна с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа.

В применяемом ближнеполевом микроскопе в качестве низкоразмерного резонатора использовалась система короткозамкатель с выемкой – металлический штырь, расположенный напротив выемки (описанная в главе 2), при различных, но всегда значительно меньших длины волны основного типа, расстояниях между короткозамкателем с выемкой и штырем. Источником зондирующего ближнего поля служил заостренный зонд, связанный с резонатором через петлю связи.

Панорамный измеритель КСВН и ослабления P2-61

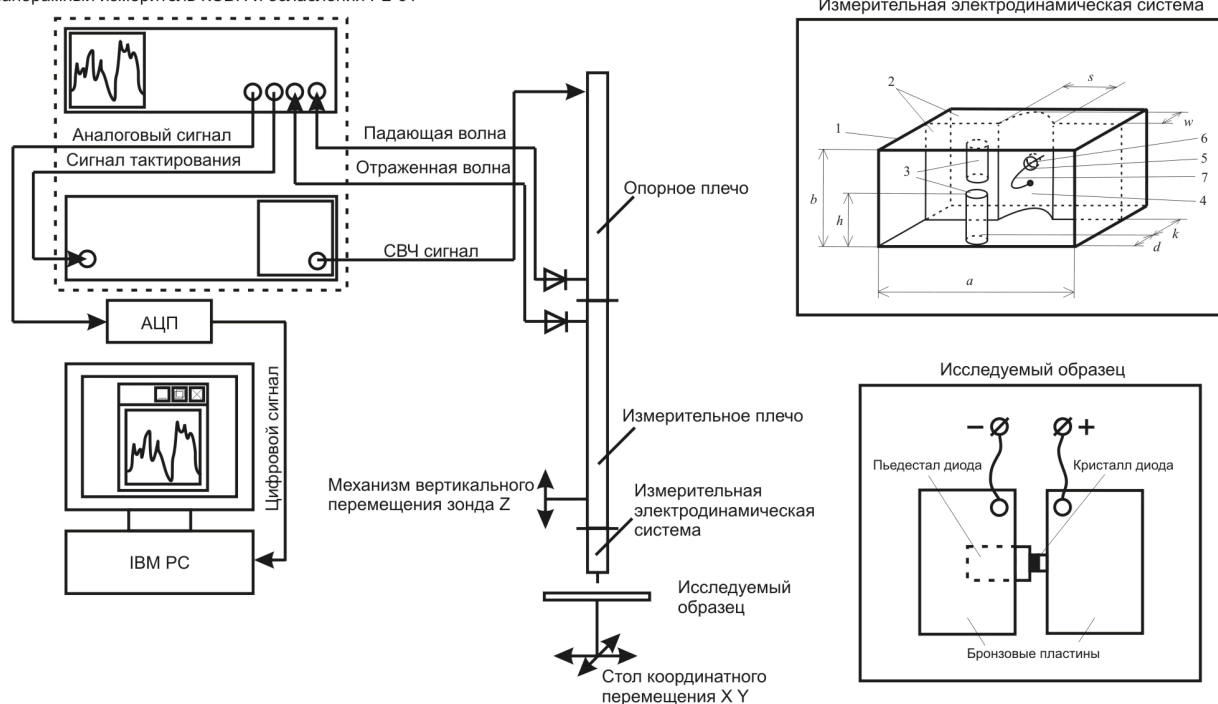


Рисунок 8. Ближнеполевой СВЧ микроскоп. Вставка внизу слева – измерительная электродинамическая система. Вставка внизу справа – диод AA735A-6, установленный в специальную оправку.

Исследованная система применялась для измерения электрических параметров полупроводниковой структуры в диоде Ганна. Измерения проводились на панорамном измерителе КСВН (коэффициента стоячей волны по напряжению) и ослабления P2-61. СВЧ сигнал от генератора ГКЧ-61 подавался в СВЧ тракт волновода 1. В волноводе 1 происходило взаимодействие СВЧ сигнала со штырем 3 и короткозамкателем 2, имеющим выемку 4. В

результате в окрестности штыря возникало ближнее поле, приводящее к возникновению резонанса. Отраженный от низкоразмерной резонансной системы сигнал поступал на входящий в состав Р2-61 измерительный блок типа Я2Р-67 с аналоговым выходом и через аналогово-цифровой преобразователь LCard E14-140 на компьютер, где обрабатывался с использованием программной среды Mathcad v14. Изменением расстояния между короткозамыкателем 2 и штырем 3 добивались возникновения резонанса с малым коэффициентом отражения, после чего это расстояние фиксировалось (рисунок 8). Ближнее поле в резонаторе взаимодействовало с заостренным зондом 6, выступающим за пределы резонатора и являющимся продолжением петли связи 7, а ближнее поле от зонда 6 взаимодействовало с исследуемым образцом, который располагался вблизи него. В измерительное устройство поступал отраженный сигнал, и проводились измерения частоты резонанса ($f_{рез}$) и коэффициента отражения ($R_{рез}$).

Резонатор характеризовался следующими 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 1мкм .

На основе вышеописанного низкоразмерного резонатора был создан действующий образец ближнеполевого микроскопа (Рисунок 8).

Было проведено экспериментальное исследование распределения напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда вдоль диода Ганна с помощью созданного СВЧ ближнеполевого микроскопа при различных значениях внешнего смещения, поданного на диод. Данный метод, являясь бесконтактным, позволяет обеспечить высокую разрешающую способность по координате. В качестве исследуемого диода использовался промышленно выпускающийся бескорпусной диод Ганна типа АА735А-6.

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.

Напряженность электрического поля E в кристалле можно определить, зная величину приложенного к кристаллу электрического напряжения U и размеры кристалла. Таким образом, можно получить калибровочную кривую для ближнеполевого СВЧ микроскопа, приведя во взаимное соответствие СВЧ отклик (модуль коэффициента отражения R) и измеряемую локальную напряженность электрического поля. В результате можно построить профили распределения напряженности электрического поля (рисунок 9).

Неравновесная компонента концентрации Δn вычислялась из уравнения Пуассона:

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

где e – заряд электрона, E – напряженность 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.

Воспользовавшись этим соотношением с использованием определенной из эксперимента зависимости dE/dx , можно построить профили распределения неравновесной компоненты концентрации Δn вдоль длины кристалла (рисунок 10).

Погрешность результатов измерений определялась погрешностью определения КСВН панорамного измерителя КСВН и ослабления типа Р2-61 и составляла для малых КСВН величину не более 5%.

Таким образом, показана возможность использования ближнеполевого СВЧ микроскопа для локального исследования концентрации носителей заряда и распределения напряженности электрического поля в диодах Ганна и процесса формирования в них стационарного домена. Предложенная методика может представлять интерес для анализа путей повышения качества производимых полупроводниковых структур и выяснения

соответствия эксперименту используемых математических моделей, описывающих физику их работы.

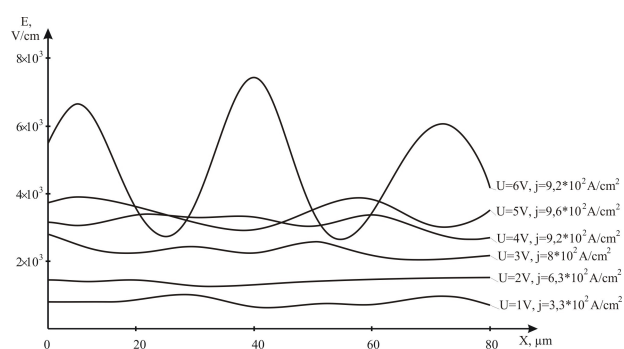


Рисунок 9. Профили распределения напряженности электрического поля вдоль кристалла диода Ганна.

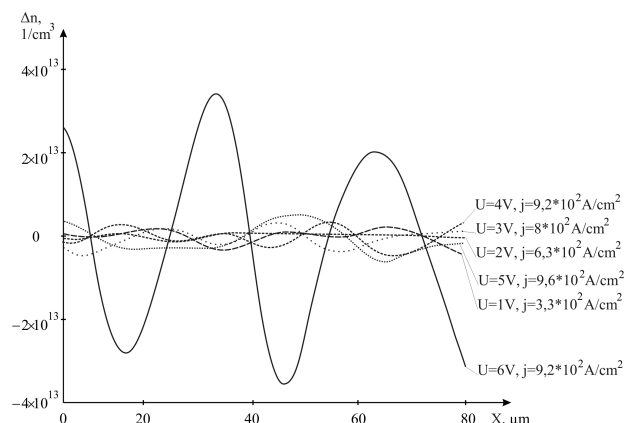


Рисунок 10. Профили распределения неравновесной компоненты концентрации Δn вдоль кристалла диода Ганна.

В пятой главе приведены результаты численного расчета стационарного распределения электрического поля и концентрации носителей заряда для одномерного случая в диоде Ганна, а также экспериментальные исследования этих характеристик с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа. Показана принципиальная важность учета зависимости коэффициента диффузии основных носителей заряда от электрического поля при описании процессов, протекающих в диодах Ганна. Численные результаты качественно согласуются с экспериментом, выполненным с использованием ближнеполевого СВЧ-микроскопа.

Нами выполнен численный расчет стационарного распределения электрического поля и концентрации носителей заряда в диоде Ганна с использованием ЭВМ, с учетом зависимости от напряженности электрического поля подвижности и коэффициента диффузии электронов, а также проведены экспериментальные исследования распределения этих величин с помощью созданного нами ближнеполевого СВЧ микроскопа.

В качестве объекта численного моделирования использовалось уравнение Пуассона (1) и уравнение для 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.

Подставляя n из (1) в уравнение (2), можно записать его в следующем виде:

$$j = -\varepsilon\varepsilon_0\mu_n(E)E\frac{dE}{dx} + en_0\mu_n(E)E - \varepsilon\varepsilon_0D_n(E)\frac{d^2E}{dx^2}. \quad (3)$$

В качестве зависимости $\mu_n(E)$ было использовано выражение, приведенное в [10]. Эта зависимость имеет вид:

$$\mu(E) = \frac{1}{E(x)} \frac{\mu_0 E(x) + v_s \left(\frac{E(x)}{E_n} \right)^4}{1 + \left(\frac{E(x)}{E_n} \right)^4}, \quad (4)$$

где для GaAs $\mu_0 = 6000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $v_s = 8,5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$, $E_n = 4000 \text{ В/см}$.

В качестве зависимости $D(E)$ мы использовали предложенное нами выражение, аппроксимирующее известную для GaAs из [11] экспериментальную зависимость, в виде:

$$D_n(E) = a \cdot e^{\frac{-(E(x)-b)^2}{c}} + d, \quad (5)$$

где для GaAs $a = 830 \text{ см}^2/\text{с}$, $b = 3000 \text{ В/см}$, $c = 17 \cdot 10^7 \text{ В/см}$, $d = 150 \text{ см}^2/\text{с}$.

Экспериментальная зависимость из [11] и аппроксимирующее ее выражение (5) приведены на рисунке 11 (сплошная – аппроксимирующая зависимость, штрихованная – эксперимент из [11]). Как следует из рисунка 5.1, сравнение этих зависимостей показывает их качественное соответствие.

Подставив (4) и (5) в (3), получим уравнение:

$$-\varepsilon\varepsilon_0 \left(a \cdot e^{\frac{-(E(x)-b)^2}{c}} + d \right) \frac{d^2 E(x)}{dx^2} - \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\mu_0 E(x) + v_s \left(\frac{E(x)}{E_n} \right)^4}{1 + \left(\frac{E(x)}{E_n} \right)^4} \frac{dE(x)}{dx} + en_0 \frac{\mu_0 E(x) + v_s \left(\frac{E(x)}{E_n} \right)^4}{1 + \left(\frac{E(x)}{E_n} \right)^4} - j = 0, \quad (6)$$

В качестве граничных условий использовались следующие:

$$E(0) = 0; E(l) = 0, \quad (7)$$

где l – длина активной n-области диода Ганна.

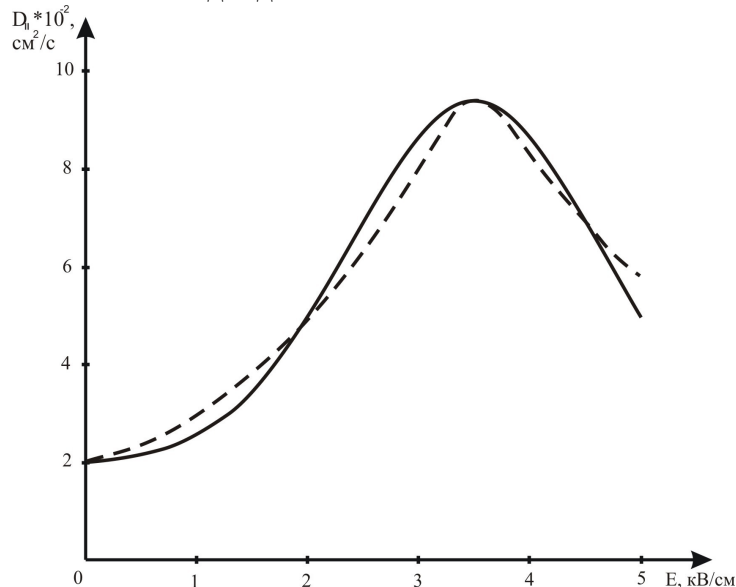


Рисунок 11. Экспериментальная зависимость из [11] и аппроксимирующее ее выражение (5).

Решение уравнения (6) с граничными условиями (7) позволяет определить распределение электрического поля $E(x)$ вдоль диода. Результаты численного моделирования приведены на рисунке 12. Распределение концентрации неравновесных носителей заряда вдоль активной n-области диода можно получить, подставляя полученное решение для $E(x)$ в (1). Данное распределение (рисунок 13) представляет собой отклонение концентрации Δn от равновесного значения.

Уравнение (6) решалось с использованием функции `bvp4c` математического пакета Matlab 2009.

Постоянство плотности тока во времени следует из предположения стационарности вследствие того, что нами рассматривались режимы питания, при которых диод не доводился до порога генерации. По этой же причине в конечном уравнении (6) нами опущено слагаемое, отвечающее за ток смещения.

Полученные экспериментально распределения $\Delta n(x)$ и $E(x)$ (рисунок и 9 из главы 10) качественно повторяют аналогичные распределения, определенные в результате численного моделирования (рисунок 12 и 13).

Из приведенных на рисунке 12 и 13 графиков видно, что при увеличении плотности тока выше некоторого критического значения до наступления порога генерации в кристалле наблюдается немонотонная зависимость распределения напряженности постоянного

электрического поля и, как следствие, концентрации носителей заряда, имеющая в зависимости от величины протекающего через диод тока различное число максимумов. Это хорошо согласуется с результатами проведенных экспериментальных исследований (кривые, соответствующие 6 В, на рисунке 12 и 13).

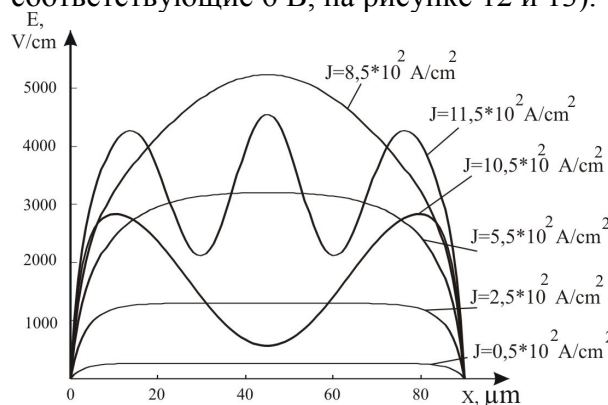


Рисунок 12. Профили распределения напряженности электрического поля вдоль кристалла диода Ганна.

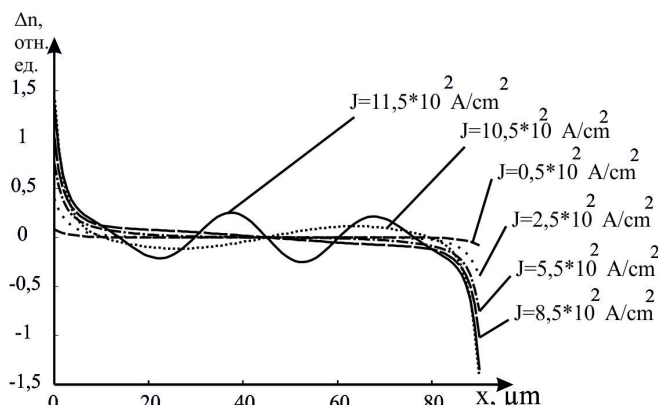


Рисунок 13. Профили распределения неравновесной компоненты концентрации Δn вдоль кристалла диода Ганна.

На рисунке 14 приведены для сравнения результаты численного моделирования распределения неравновесной концентрации носителей заряда вдоль диодной структуры с учетом зависимости коэффициента диффузии от электрического поля $D(E)$ (штрихованная кривая) и с коэффициентом диффузии равным константе (сплошная кривая). Из результатов, приведенных на рисунке 14, следует несоответствие характера поведения зависимости неравновесной концентрации n от координаты при $D=Const$ и качественное соответствие результатов расчета и эксперимента при учете зависимости $D(E)$.

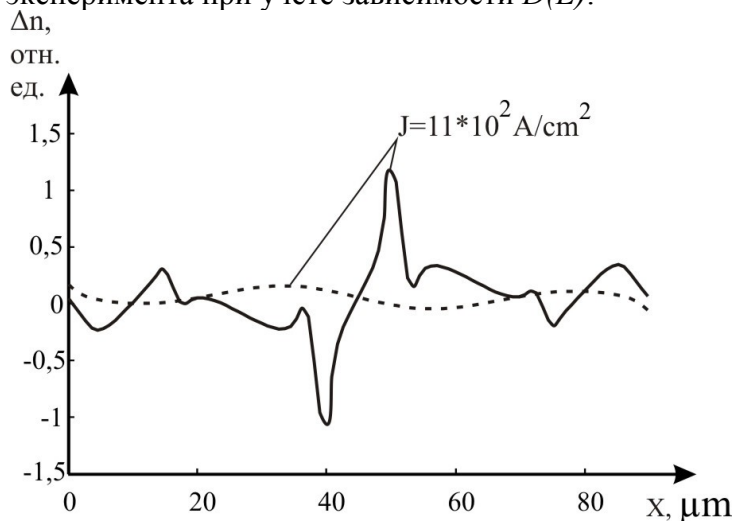


Рисунок 14. Профили распределения неравновесной компоненты концентрации Δn вдоль кристалла диода Ганна.

Появление пространственного разделения зарядов, образующего двойной электрический слой, называемый стационарным доменом, порождает на границах этого слоя появление областей зарядов противоположных знаков, примыкающих к граничным областям стационарного домена. Наличие этих областей, в свою очередь, порождает появление вблизи них областей с противоположным зарядом и так далее. Ясно, что этот процесс возможен при наличии больших значений производной электрического поля по координате, а, следовательно, при высоких плотностях тока через диод. Экспериментальные данные свидетельствуют о существенной роли в установлении стационарных распределений Δn и E диффузионной составляющей плотности тока, в которой учтена зависимость $D(E)$.

На рисунке 15 приведены результаты расчетов распределения поля и концентрации носителей заряда вдоль диода Ганна, а также фазовые диаграммы для двух значений плотности тока: $9 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ и $11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$. Из представленных графиков видно, что при

увеличении плотности тока до значения $11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ равномерное распределение концентрации носителей и поля вдоль диода сменяется резко неоднородным. Фазовые диаграммы в координатах $dE(x)/dx - E(x)$ приведены для соответствующих значений плотности тока. Фазовая диаграмма для допорогового значения плотности тока существенно отличается от фазовой диаграммы для плотности тока $11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$, при которой фазовая диаграмма имеет дополнительный замкнутый контур. Следует отметить, что повышение плотности тока выше $11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ может вызывать потерю работоспособности диода, поэтому фазовые диаграммы для больших значений плотности тока нами не приведены.

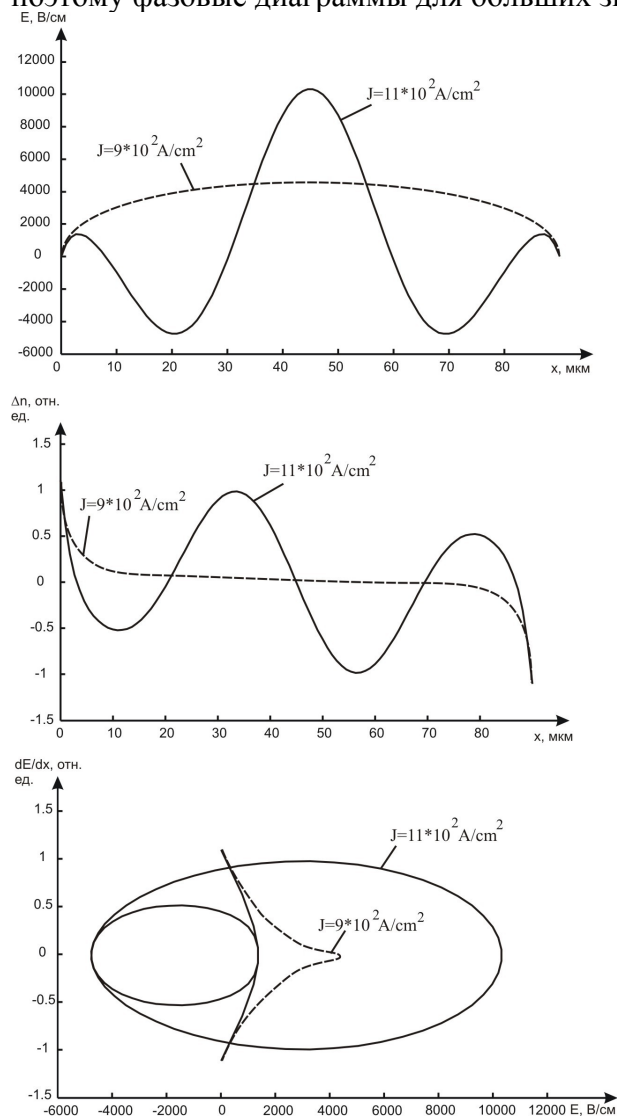


Рисунок 15. Результаты расчетов распределения электрического поля и концентрации носителей заряда вдоль диода Ганна, а также фазовые диаграммы для двух значений плотности тока: $9 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ и $11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$

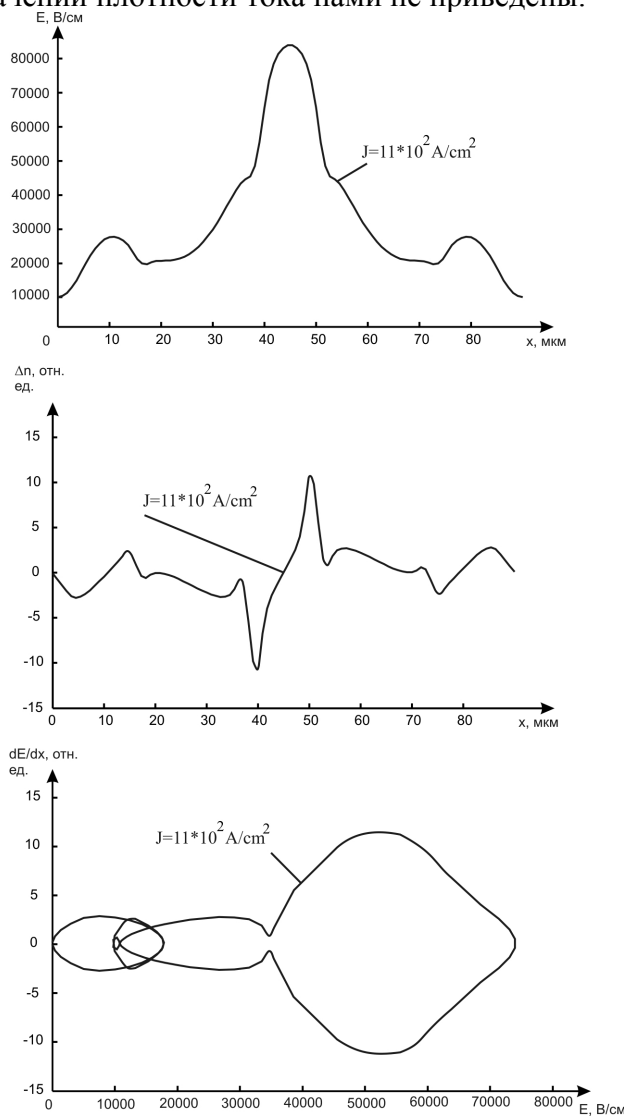


Рисунок 16. Результаты расчетов распределения электрического поля и концентрации носителей заряда вдоль диода Ганна, а также фазовые диаграммы для значения плотности тока: $j = 11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$.

На рисунке 16 приведены соответствующие зависимости и фазовая диаграмма для случая, когда коэффициент диффузии от поля не зависит. Как следует из результатов, приведенных на этом рисунке, в распределении концентрации и поля при $j = 11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ наблюдается преобладание одного стационарного домена сильного поля.

В результате численного моделирования и экспериментальных исследований продемонстрирован характер изменения распределения концентрации носителей заряда и поля с изменением плотности тока через диод. Результаты расчета и эксперимента находятся в хорошем качественном согласии. Предложенные экспериментальная и численная методики могут позволить разработчикам полупроводниковых приборов на основе эффекта Ганна

анализировать физические процессы, происходящие в создаваемых ими приборах, с более высокой точностью, что открывает новые возможности совершенствования характеристик этих приборов.

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Таким образом, в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Экспериментально установлено и теоретически подтверждено, что предложенная резонансная система при наличии цилиндрической выемки в короткозамыкателе, позволяет значительно повысить селективность возникающих резонансов, что, в свою очередь, открывает возможность повышения эффективности работы измерительных устройств на ее основе.

2. Показана возможность эффективного применения низкоразмерных резонаторов в качестве элемента зондовой системы ближнеполевого СВЧ микроскопа, которые увеличивают чувствительность и разрешающую способность микроскопа.

3. Продемонстрирована возможность достижения с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа с низкоразмерным резонатором типа "индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма" устойчивого разрешения металлических полосок шириной до 0.5 мкм, нанесенных на диэлектрическое основание.

4. Продемонстрирована возможность достижения с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа с резонансной системой короткозамыкатель с выемкой – металлический штырь устойчивого разрешения металлических полосок, нанесенных на диэлектрическое основание, шириной до 0.5 мкм. Также продемонстрирована чувствительность к изменению проводимости для такого микроскопа не хуже чем $\Delta R_x/R_x=4.027*10^{-3}$.

5. Показана возможность использования ближнеполевого СВЧ микроскопа для локального исследования концентрации носителей заряда и распределения напряженности электрического поля в диодах Ганна и процесса формирования в них стационарного домена.

6. Экспериментально и теоретически показано что, что при увеличении плотности тока выше некоторого критического значения до наступления порога генерации в кристалле диода Ганна наблюдается немонотонное распределение напряженности постоянного электрического поля вдоль кристалла диода и, как следствие, концентрации носителей заряда, имеющая в зависимости от величины протекающего через диод тока различное число максимумов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

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.

Высокодобротный низкоразмерный резонатор с электрической перестройкой частоты / Д. А.Усанов, С.С. Горбатов, А. Н. Сорокин, В. Ю. Кваско // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2009. – Т. 52. – №9. – С.78–80.

Ближнеполевым СВЧ-микроскоп с низкоразмерным резонатором типа "индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма". / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, В. Ю. Кваско // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2010. – Вып.6. – С.66–69

Ближнеполевая СВЧ-микроскопия структур металл-диэлектрик / Д. А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль, С. С. Горбатов, Д. В. Пономарев, А. П. Фролов, В. Ю. Кваско // Электронная техника, Сер. 1, СВЧ-техника, – 2012 – Вып. 3(514). – С.71–81.

Измерение подвижности и концентрации носителей заряда в арсенид-галлиевом диоде Ганна с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа. / Д. А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско // Известия вузов. Электроника. – 2013. – №2(100). – С. 77 – 82.

В других изданиях

Полупроводниковые СВЧ-генераторы с низкоразмерными резонаторами / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, А. Н. Сорокин, В. Ю. Кваско // Пленарные доклады 8-ой Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» г. Санкт-Петербург – 2009. – Т. 12. – №3. – С. 69–77.

Электрическая перестройка частоты в высокодобротном низкоразмерном СВЧ резонаторе / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, А. Н. Сорокин, В. Ю. Кваско // Тезисы докладов 7-ой Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». – г. Самара. – 2008г. – С. 238-239

Высокодобротные резонансы в системах «штырь с зазором – короткозамыкатель» / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, А. Н. Сорокин, В. Ю. Кваско // Тезисы докладов 18-ой международной крымской конференции «СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии» КрымМиКо 8-12 сентября 2008г., – Севастополь, Украина. – С. 728–729.

Бесконтактные измерения подвижности носителей заряда в диоде Ганна с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа. / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, В. Ю. Кваско // Материалы четвертой международной научной конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» 17 мая 2012г. Ростов-на-Дону. С. 282-285.

Измерения подвижности носителей заряда в арсенид-галлиевом диоде Ганна с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа. / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, В. Ю. Кваско // Сборник трудов всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ» том 2. 4-7 июня 2012. г. Санкт-Петербург. С. 381-384.

Измерения подвижности носителей заряда в арсенид-галлиевом диоде Ганна с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа. / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, В. Ю. Кваско // Сборник трудов XV международной конференции «Опто- и нанoeлектроника, нанотехнологии и микросистемы» 4-7 сентября 2012. г. Ульяновск. С. 278-279.

Патенты

Пат. 2373545 С1 Российская Федерация, МПК G01R27/26. Устройство для измерения параметров материалов / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, А.Н. Сорокин, В.Ю. Кваско; заявитель и патентообладатель Саратов. гос. ун-т. заявл. 03.06.2008. опубл. 20.11.2009. бюл. №32.

Пат. 2475761 С2 Российская Федерация, МПК G01Q70/08, B82B3/00. Способ изготовления зонда для ближнеполевой сверхвысокочастотной микроскопии / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско; заявитель и патентообладатель Саратов. гос. ун-т. заявл. 31.03.2011. опубл. 20.02.2013. бюл. №5.

Пат. 126842 U1 Российская Федерация, МПК G01Q 60/22. Зонд для ближнеполевой сверхвысокочастотной микроскопии/ Усанов Д.А., Горбатов С.С., Кваско В.Ю.; заявитель и патентообладатель Саратов. гос. ун-т. Заявл. 25.09.2012; опубл. 10.04.2013. бюл. №10.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Усанов Д. А. 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.

2. Усанов Д. А. 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.

3. Усанов Д.А. Резонансы в системе диафрагма – короткозамыкающий поршень / Д. А. Усанов, С.С. Горбатов. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2001г. – Т.4. – №3. – С. 13-20.

4. Усанов Д. А. Теоретическое описание резонансов на высших типах колебаний в полубесконечном волноводе с емкостной диафрагмой. / Д. А. Усанов, С.С. Горбатов. // Тезисы докладов и сообщений. 1-я Международная научно-техническая конференция “Физика и технические приложения волновых процессов”. – г. Самара – 2001 г. – Т. 2. – С. 91.

5. Усанов Д. А. 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. Усанов Д. А. Высокодобротный низкоразмерный резонатор с электрической перестройкой частоты / Д. А.Усанов, С.С. Горбатов, А. Н. Сорокин, В. Ю. Кваско // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2009. – Т. 52. – №9. – С.78–80.
7. Усанов Д.А. Полупроводниковые СВЧ-генераторы с низкоразмерными резонаторами / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, А. Н. Сорокин, В. Ю. Кваско // Пленарные доклады 8-ой Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» г. Санкт-Петербург – 2009. – Т. 12. – №3. – С. 69–77.
8. Усанов Д. А. 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.,
9. Усанов Д. А. Электрическая перестройка частоты в высокодобротном низкоразмерном СВЧ резонаторе / Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, А. Н. Сорокин, В. Ю. Кваско // Тезисы докладов 7-ой Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». – г. Самара. – 2008. – С. 238-239.
10. Murayama K. Static negative resistance in highly doped Gunn diodes and application to switching and amplification/ K. Murayama, T. Ohmi // Japan J. Appl. Phys. – 1973. – V.12. – №12. – P.1931–1940.
11. Барейкис В. Электроны в полупроводниках. Вып.3. Диффузия горячих электронов. / В. Барейкис, А. Матуленис, Ю. Пожела, [и др.]; под ред. Ю. Пожелы. – Вильнюс: Мокслас, – 1981. – 212 с.

Кваско Владимир Юрьевич

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА, НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И
ОБРАЗОВАНИЯ ДОМЕНОВ В ДИОДАХ ГАННА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл. – печ. л. 1.0
Тираж 100 экз. Заказ № ____.
Типография Издательства Саратовского университета.
410012, Саратов, Астраханская, 83.