

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**Ближнеполевая СВЧ микроскопия для исследования электрофизических
параметров полупроводниковых материалов и приборов**
НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 5 года обучения

Калямина

направления 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Калямина Алексея Александровича

Научные руководители:

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

Усанов 14.06.18

Д. А. Усанов

подпись, дата

доцент,
кандидат физико-математических наук

Постельга 14.06.2018

А.Э. Постельга

подпись, дата

Актуальность темы

В настоящее время большое значение для развития как всей электронной промышленности, так и СВЧ электроники имеет повышение предсказуемости работы полупроводниковых сверхвысокочастотных приборов в различных режимах, повышение воспроизводимости получаемых свойств в процессе производства, уменьшение разброса параметров полупроводниковых приборов в готовых изделиях, правильная трактовка отказов изделий в процессе эксплуатации.

Одним из наиболее очевидных путей решения этих актуальных проблем СВЧ электроники является качественное развитие технологии производства СВЧ полупроводниковых приборов, повышение воспроизводимости и предсказуемости свойств слоев полупроводниковых структур, а также применение более строгого выходного контроля на этапах производства. Для подобных изменений требуется серьезная научная база, основой которой должно служить более полное представление о физических процессах, происходящих в полупроводниковых СВЧ приборах и уточнение установившихся моделей работы этих приборов в различных режимах, на основе полученных экспериментальных данных.

Ближнеполевая сверхвысокочастотная микроскопия является динамически развивающимся перспективным направлением в исследовании параметров материалов и структур как в электронике, так и микро- и наноэлектронике, а ближнеполевой сканирующий СВЧ микроскоп является прибором, отвечающим всем требованиям, предъявляемым к современному исследовательскому оборудованию и способен решать широкий круг задач, которые ставятся исследователям структур и приборов полупроводниковой СВЧ электроники.

Многофункциональность ближнеполевой СВЧ микроскопии обусловлена тем, что по анализу параметров взаимодействия СВЧ поля с исследуемым образцом можно исследовать множество различных параметров материалов и их изменение при различных внешних воздействиях.

Ближнеполевая СВЧ микроскопия наделена рядом преимуществ перед другими современными высоколокальными методами исследования материалов и структур, такими как туннельная, атомно-силовая или оптическая ближнеполевая микроскопия.

Таким образом, современные экспериментальные исследования характеристик материалов и приборов, в том числе в процессе их работы с помощью ближнеполевой СВЧ микроскопии, и применение к описанию происходящих в них процессов уточненных математических моделей позволят уточнить знания о работе полупроводниковых приборов и возникающих в них явлений и дать рекомендации разработчикам и производителям этих устройств.

Целью работы состояла в поиске новых способов применения ближнеполевого СВЧ микроскопа для измерения электрофизических параметров материалов и приборов, применяемых в твердотельной СВЧ электронике.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Критический анализ современного состояния исследований полупроводниковых приборов и материалов с применением ближнеполевой СВЧ микроскопии.
2. Численный расчет распределения электрического поля и концентрации носителей заряда в кремниевом р-і-п диоде при прямом смещении с учетом зависимости коэффициентов диффузии и подвижности носителей заряда от напряженности электрического поля.
3. Экспериментальные исследования распределения электрического поля и подвижности носителей заряда в і-области СВЧ р-і-п диода с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа.
4. Разработка локального способа измерения подвижности носителей заряда в арсениде галлия с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа методом СВЧ магнитосопротивления.
5. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов.

Научная новизна работы:

1. Предложен способ локального определения концентрации носителей заряда и напряженности электрического поля в р-і-п диодах для различной плотности протекающего через них тока, основанный на анализе результатов измерений зависимости КСВН от координаты сканирования с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа.

2. Показано, что при увеличении плотности прямого тока через р-і-п 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.

3. Предложен способ локального измерения СВЧ подвижности носителей заряда в арсениде галлия методом СВЧ магнитосопротивления, основанный на анализе результатов измерений зависимости КСВН с помощью сканирующего ближнеполевого СВЧ-микроскопа при нулевом значении индукции внешнего магнитного поля и одинаковых индукциях внешнего магнитного поля, приложенных в противоположных направлениях.

4. Показана важность учета эффекта смещения СВЧ поля при численном расчёте СВЧ подвижности носителей заряда.

Практическая значимость результатов

1. Предложенная методика определения стационарного значения концентрации носителей заряда и напряженности электрического поля с высокой степенью локальности в р-і-п диодах при различных значениях протекающего через него тока дает возможность расширить представления о физике работы р-і-п диодов, и уточнить режимы эксплуатации разработчикам полупроводниковых СВЧ устройств на их основе.

2. Предложенный способ локального измерения подвижности носителей заряда в арсениде галлия с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа методом СВЧ магнитосопротивления позволит уточнить режимы работы СВЧ устройств на основе арсенида галлия, повысить воспроизводимость и предсказуемость электрофизических характеристик тонкопленочных структур и слоев на основе арсенида галлия и тем самым, повысить качество технологии производства СВЧ приборов и микросхем, выполненных на этом полупроводниковом материале. Кроме того, данный способ открывает возможность построения профиля распределения подвижности носителей заряда от координаты сканирования, в том числе и при протекании через структуру электрического тока.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Измерение распределения модуля коэффициента отражения СВЧ излучения от поверхности р-і-п диода вдоль координаты сканирования, получаемая с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа, может быть использована для локального определения напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в р-і-п диодах при различных значениях плотности протекающего через него тока.

2. При увеличении плотности прямого тока через р-і-п диод выше некоторых критических значений наблюдаются пространственные осцилляции распределения концентрации носителей заряда и напряженности электрического поля, что объясняется зависимостью от напряженности электрического поля подвижности и коэффициента диффузии носителей заряда.

3. Измерение модуля коэффициента отражения СВЧ излучения от поверхности образца арсенида галлия, с использованием эффекта СВЧ магнитосопротивления, может быть применено для измерения локальной СВЧ подвижности носителей заряда с высокой точностью при учёте погрешности, вносимой эффектом смещения СВЧ поля.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

1. 24-ой Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014), г. Севастополь, 7-13 сентября 2014г.;

2. Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами». Саратов, 16–17 мая 2018 г.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 1 работа [1] в журнале, рекомендованном ВАК при Минобрнауки России; 2 работы опубликована в сборнике конференций [2,3], 1 работа принята в печать журналом, рекомендованном ВАК при Минобрнауки России, подана заявка на патентование способа определения СВЧ подвижности носителей заряда с высокой степенью локальности.

Личный вклад автора

Личный вклад автора выразился в проведении всего объема экспериментальных работ, проектировании и практической реализации экспериментальных методов, проведении компьютерного моделирования и анализе полученных результатов, обработке полученных результатов, участии в формулировании научных положений и выводов.

Структура и объем работы

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, ее новизна и практическая значимость, определена цель

работы, представлены основные результаты, полученные в ходе работы и основные положения, выносимые на защиту. **Первая глава** посвящена обзору и критическому анализу современных исследований в области разработки и применения методов ближнеполевой СВЧ микроскопии и различных конструкций ближнеполевых СВЧ микроскопов для измерения параметров полупроводниковых материалов, структур и приборов. Рассмотрены основные способы повышения чувствительности и пространственного разрешения таких микроскопов.

Во **второй главе** описаны классические представления о распределении напряженности электрического поля и концентрации свободных носителей заряда в p-i-n диодах, основанные на результатах численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений [1]. Отмечено, что в классической математической модели распределения напряженности электрического поля и распределения концентрации носителей заряда вдоль базы p-i-n диода делались упрощающие предположения о том, что коэффициенты диффузии и подвижности носителей зарядов обоих знаков не зависят от напряженности электрического поля. В настоящий момент вычислительные мощности современных ЭВМ и новые численные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений позволяют произвести такие расчеты более строго.

В работе [2] нами был проведен численный расчет распределения напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в базе p-i-n диода при прямом смещении с учетом зависимости от напряженности электрического поля коэффициентов диффузии и подвижности носителей заряда. Расчет производился на ЭВМ с использованием функции bvp4c математического пакета MatLab 2009.

При теоретическом описании использовалось уравнение Пуассона

$$\varepsilon\varepsilon_0 \frac{dE}{dx} = e((p - p_0) - (n - n_0)), \quad (1)$$

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

$$j = e \left(n\mu_n(E) + p\mu_p(E) \right) E + eD_n(E) \frac{dn}{dx} - eD_p(E) \frac{dp}{dx}, \quad (2)$$

где j – плотность тока, протекающего через р-і-п диод, e – заряд электрона, E – напряженность электрического поля, $\mu_n(E)$ и $\mu_p(E)$ – подвижности электронов и дырок соответственно, $D_n(E)$ и $D_p(E)$ – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно, ε – относительная диэлектрическая проницаемость кремния, ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, n – концентрация электронов проводимости, $n_0 = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ – равновесная концентрация электронов проводимости в і-области р-і-п диода, p – концентрация дырок, $p_0 = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ – равновесная концентрация дырок в і-области р-і-п диода.

В качестве соотношений, выражающих зависимость подвижностей носителей заряда от напряженности электрического поля использовалось выражение, приведённое в [3]:

$$\mu_n(E) = \mu_{0n}(1 - \beta_n E^2), \quad (3)$$

$$\mu_p(E) = \mu_{0p}(1 - \beta_p E^2), \quad (4)$$

где для кремния $\mu_{0n} = 1500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_{0p} = 600 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\beta_n = 4.9 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{В}^2$, $\beta_p = 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{В}^2$.

В качестве зависимости коэффициентов диффузии электронов $D_n(E)$ и дырок $D_p(E)$ мы использовали предложенные нами выражения, аппроксимирующие известные из [4] для кремния экспериментальные зависимости, в виде:

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

$$D_p(E) = k e^{-\frac{(E-b)^2}{m}} + d, \quad (6)$$

где для кремния $a = 29 \text{ см}^2/\text{с}$, $b = 2 \cdot 10^3 \text{ В}/\text{см}$, $c = 1.73 \cdot 10^7 \text{ В}^2/\text{см}^2$, $d = 7 \text{ см}^2/\text{с}$, $k = 9 \text{ см}^2/\text{с}$, $m = 0.99 \cdot 10^7 \text{ В}^2/\text{см}^2$.

В соответствии с [5] в качестве граничных условий использовались:

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

где l – длина i -области p - i - n диода, при этом, левее $x = 0$ расположена n -область, а правее $x = l$ расположена p -область. Физически, использование данных граничных условий означает преобладание диффузионной компоненты плотности полного тока над дрейфовой при $x = 0$ и $x = l$.

Решение уравнения (2) с граничными условиями (7) позволяет определить распределение напряженности электрического поля $E(x)$ вдоль i -области p - i - n диода. Стоит отметить, что если не руководствоваться при расчете выражениями (3-6), то есть не учитывать зависимость коэффициентов диффузии и подвижности носителей заряда о напряжённости электрического поля, то при расчете пространственных осцилляций электрического поля не наблюдается. Результаты численного моделирования с использованием функции `bvp4c` математического пакета Matlab 2009 приведены на рисунке 1. Стоит отметить, что отклонение концентрации Δn от равновесного состояния (верхние кривые, правая шкала рисунка 6) было получено подстановкой полученных решений уравнения (2) в соотношение (1).

Из приведённых на рисунке 1 графиков видно, что i -область p - i - n диода можно разделить на 3 области: области у контактов, где наблюдаются пространственные осцилляции концентрации носителей заряда, и область квазинейтральности, где такие осцилляции не наблюдаются.

Так же нами были проведены экспериментальные исследования с помощью сканирующего ближнеполевого СВЧ микроскопа стационарных распределений напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в кремниевом p - i - n диоде.

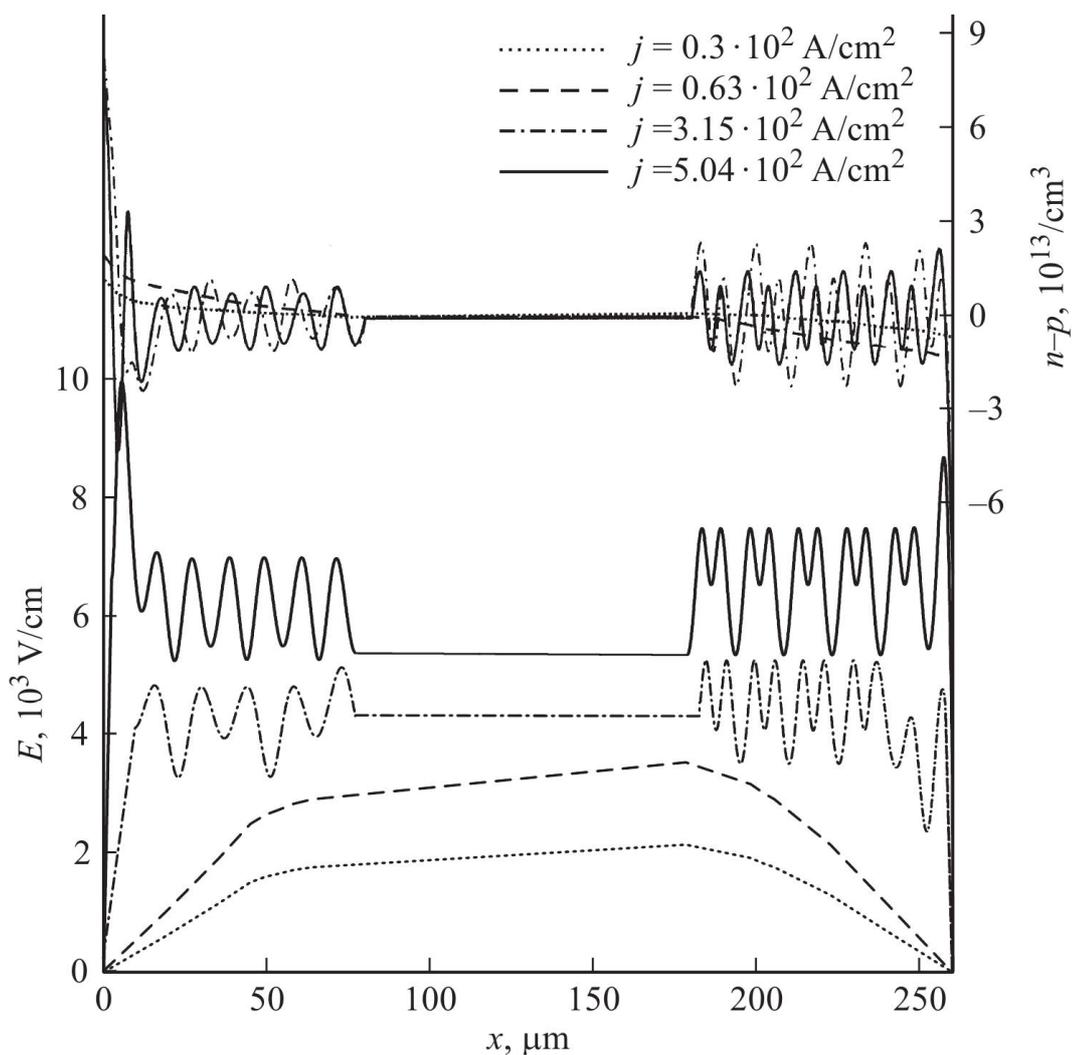


Рисунок 1. Рассчитанные распределения поля (нижние кривые, левая шкала) и плотности заряда (верхние кривые, правая шкала) в *i*-области *p-i-n* диода.

Нами были проведены исследования бескорпусного кремниевого СВЧ диода 2A513A-1 TP3.360.078 ТУ с переходами, созданными с помощью ионной технологии, на основе структуры типа *n-i-p-i-n*. Для этого был применен ближнеполевой СВЧ микроскоп, описанный в работе [6] (рисунок 2).

Измерения проводились следующим образом. Источником СВЧ излучения служил генератор качающей частоты ГКЧ-61 (6), передававший СВЧ мощность в волноводный измерительный тракт, который состоял из двух измерительных плеч – опорного (4) и измерительного (3). Плечи были включены по схеме

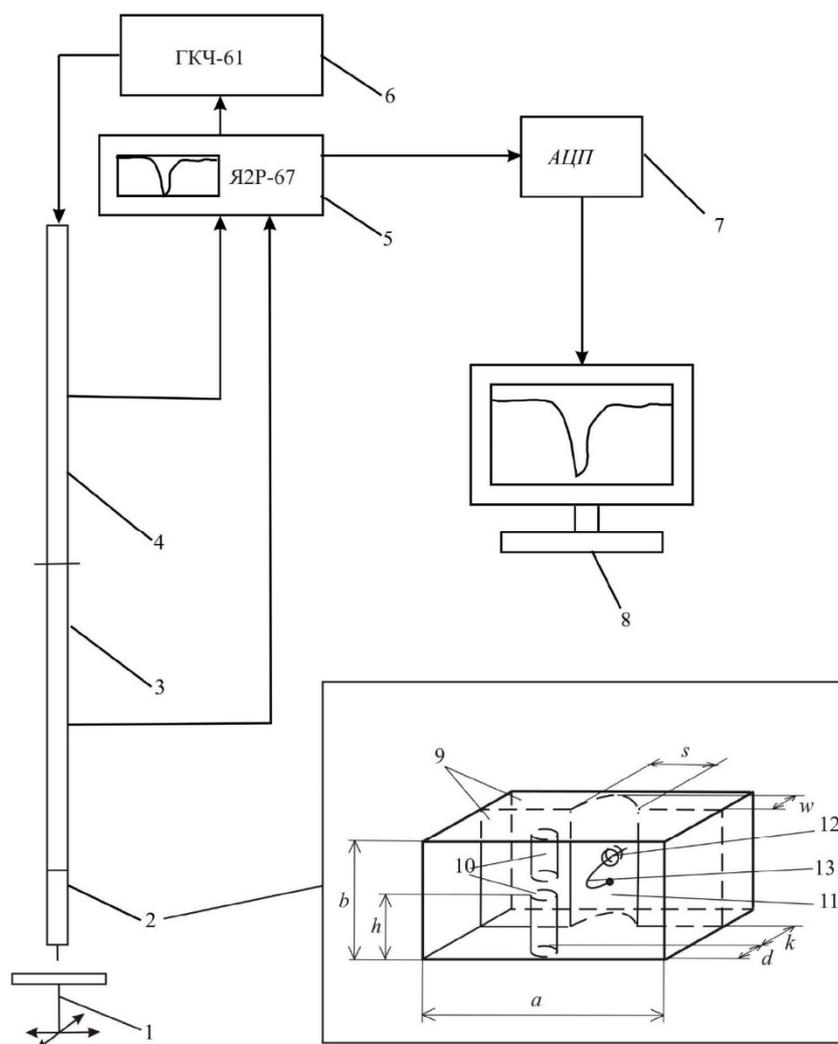


Рисунок 2. Ближнеполевой СВЧ микроскоп. Вставка – измерительная электродинамическая система.

измерения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН). Резонансная система (2) ближнеполевого СВЧ микроскопа состояла из короткозамыкателя (9) с выемкой (11) и штыря (10). Расстояние между штырем (10) и короткозамыкателем (9) изменялось до тех пор, пока в системе не возникал резонанс, характеризующейся малым коэффициентом отражения, после чего, расстояние фиксировалась. Панорамный индикатор КСВН и ослабления Я2Р-67 (5) регистрировал отраженный от исследуемой структуры сигнал, фиксируя значения резонансной частоты и коэффициента отражения. Полученный низкочастотный сигнал с панорамного индикатора КСВН и ослабления Я2Р-67

поступал на аналогово-цифровой преобразователь типа L-Card E14-140 (7), с которого цифровой сигнал поступал в персональный компьютер (8) для последующей обработки с использованием программной среды MathCAD.

Сканирование p-i-n диода проводилось вдоль верхней грани от p-области к n-области путем перемещения площадки с закрепленным диодом под зондом ближнеполевого СВЧ микроскопа. Шаг перемещения был равен 2 мкм, при этом расстояние от зонда до грани диода было фиксированным и равнялось 1 мкм. Диаметр иглы зонда был равен 250 нм. Плотность тока, пропускаемого через диод в прямом направлении, варьировался от 0 до $5.04 \cdot 10^2$ А/см². Зондирование диодной структуры проводилось на области протяженностью 260 мкм.

В результате проведенного сканирования удалось получить профили распределения СВЧ отклика (модуль коэффициента отражения СВЧ излучения $R(x)$, на частоте 11.45 ГГц, которая соответствовал резонансной частоте измерительной системы) от координаты сканирования при различных значениях плотностей протекающего через диод тока (рисунок 3).

Таким образом, при малых плотностях протекающего через диод тока (кривые 1, 2 рисунка 3) пространственные осцилляции коэффициента отражения не наблюдаются по всей длине базы диода. При достижении определенной плотности тока (кривая 3 рисунка 3) появляются 3 характерные области – 2 приконтактных области, в которых наблюдается осциллирующая зависимость коэффициента отражения от координаты, и области в центре базы, где коэффициент отражения остается практически постоянным.

Полученные таким образом координатные зависимости коэффициента отражения $R(x)$ можно конвертировать в распределения локальной напряженности электрического поля $E(x)$. Для этого мы использовали заранее полученную калибровочную кривую $E(R)$ (вставка к рисунку 3) для применённого нами ближнеполевого СВЧ микроскопа. Для построения отклонение концентрации Δn от равновесного состояния, как и в случае с

построением расчетной модели, полученная зависимость $E(x)$ подставлялась в уравнение Пуассона (1).

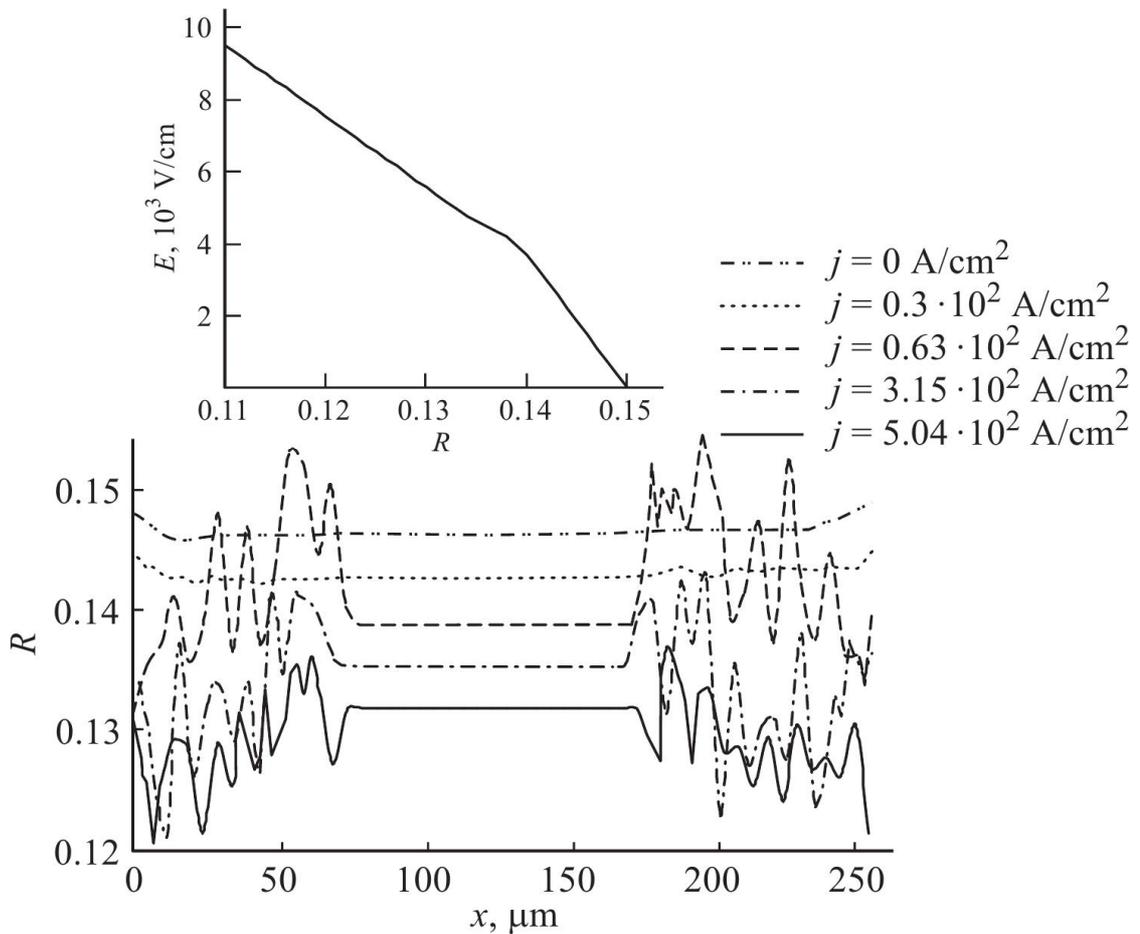


Рисунок 3. Экспериментальные зависимости коэффициента отражения от координаты сканирования при различных плотностях тока. На вставке изображена калибровочная кривая для ближнеполевого СВЧ микроскопа.

При сравнении полученных расчетных зависимостей распределения напряженности электрического поля и распределения концентрации носителей заряда вдоль диода (рисунок 1) и зависимостей, полученных обработкой экспериментальных данных (рисунок 4), видно их хорошее качественное согласование, что позволяет говорить о достоверности полученных в работе результатов.

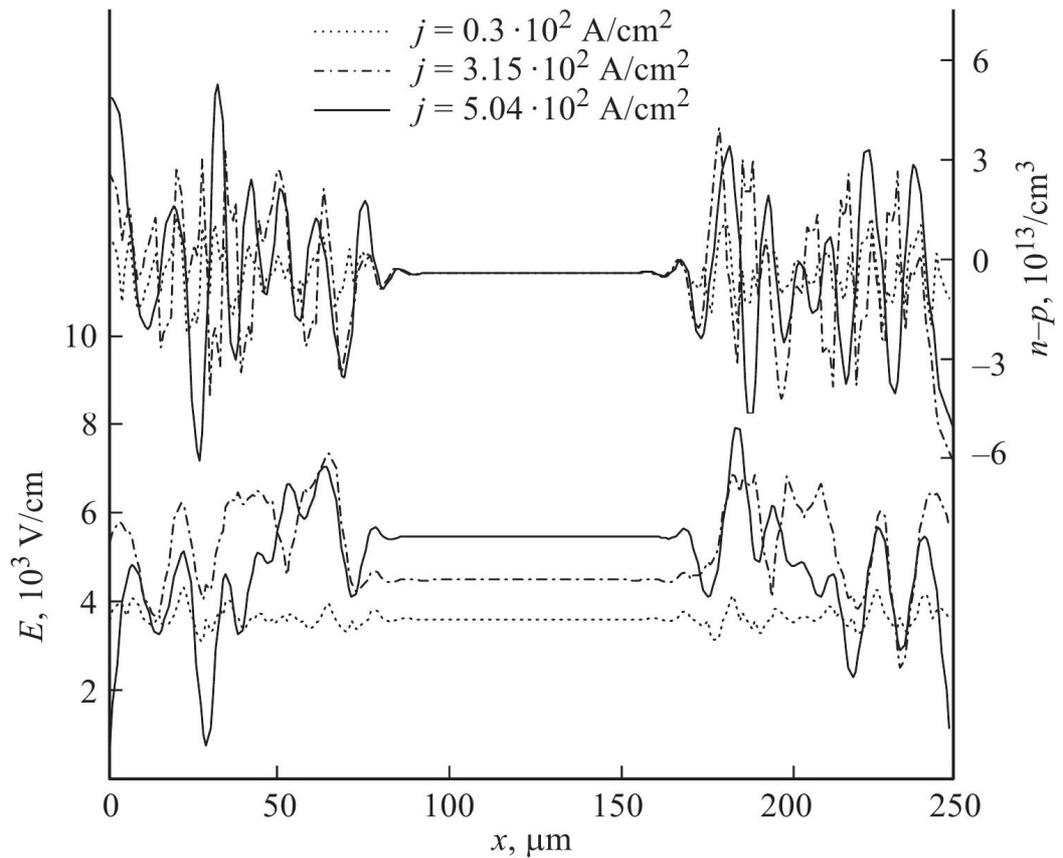


Рисунок 4. Определенные распределения напряженности электрического поля (нижние кривые, левая шкала) и отклонение концентраций носителей заряда от равновесного состояния (верхние кривые, правая шкала) в *i*-области *p-i-n* диода. Результат получен путем обработки экспериментальных данных (рисунок 3).

Нам удалось показать, что при некоторой критической плотности протекающего через диод тока, возникают пространственные осцилляции распределения поля и концентрации носителей заряда. Кроме того, была показана важность учёта зависимостей от напряженности электрического поля коэффициентов диффузии и подвижности носителей заряда, что позволило построить более точную математическую модель происходящих в *p-i-n* диоде физических процессов при протекании электрического тока. Представленные нами экспериментальная и численная методики расширяют представления о

физике работы р-і-п диодов и позволяют разработчикам полупроводниковых устройств с использованием р-і-п диодов уточнить условия их эксплуатации.

Третья глава посвящена описанию разработанного нами способа измерения подвижности носителей заряда в арсениде галлия с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа методом СВЧ магнитосопротивления. Отмечены недостатки «классических» способов измерения подвижности носителей заряда методом СВЧ магнитосопротивления, основными из которых является усреднение подвижности носителей заряда, невозможность локального измерения этого параметра и, как следствие, невозможность построения профиля распределения подвижности от координаты.

Для осуществления предложенного нами высоколокального способа измерения подвижности носителей заряда был применен ближнеполевой СВЧ микроскоп с измерительной головкой, построенную на основе резонансной системы «индуктивная диафрагма – близкорасположенная емкостная диафрагма» [7].

Исследуемый образец – арсенид галлия, с концентрацией носителей заряда, измеренной методом плазменного резонанса, $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, и подвижностью $4100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, найденной по номограммам для различных концентраций [8].

Схематичное взаиморасположение игл измерительного зонда, исследуемого образца и полюсов электромагнита приведены на рисунке 5. Образец (3) имел геометрические размеры $12 \text{ мм} \times 12 \text{ мм} \times 1,25 \text{ мм}$ и закреплялся в непосредственной близости от полюсов электромагнита (1) таким образом, что магнитное поле было параллельно его широкой грани. Учитывая малый размер немагнитного зазора сердечника магнитное поле можно считать квазиоднородным. К широкой грани исследуемого материала подводился зонд ближнеполевого СВЧ микроскопа, при этом вектор напряженности электрического СВЧ поля между связанными с низкоразмерным резонатором близкорасположенными друг от друга на концах иглами-зондами был

перпендикулярен вектору индукции магнитного поля. Расстояние между кончиками игл-зондов и образцом составляло 4 мкм.

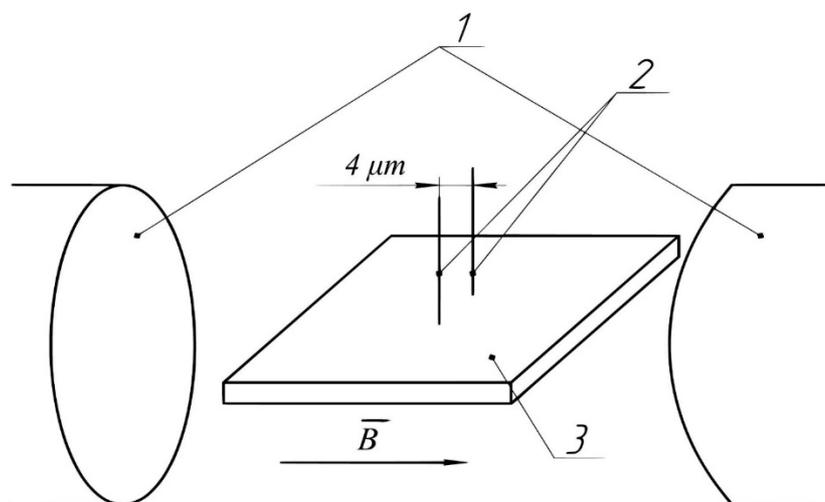


Рисунок 5. Схематичное взаиморасположение игл измерительного зонда, исследуемого образца и полюсов электромагнита: 1 – полюса электромагнита, 2 – иглы-зонды измерительной головки ближнеполевого СВЧ микроскопа, 3 – исследуемый образец.

Электромагнит калибровался с помощью линейного датчика Холла SS495A. Далее проводилось измерение модуля коэффициента отражения в полосе частот (8.23–8.29 ГГц) с помощью измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и ослабления Я2Р-61 при различных значениях индукции магнитного поля, с последующей оцифровкой полученных результатов на персональной ЭВМ с помощью АЦП L-Card E14-140M. Индукция магнитного поля изменялась в пределах от -140 мТл до 140 мТл.

Полученная зависимость модуля коэффициента отражения от индукции магнитного поля представлена на рисунке 6.

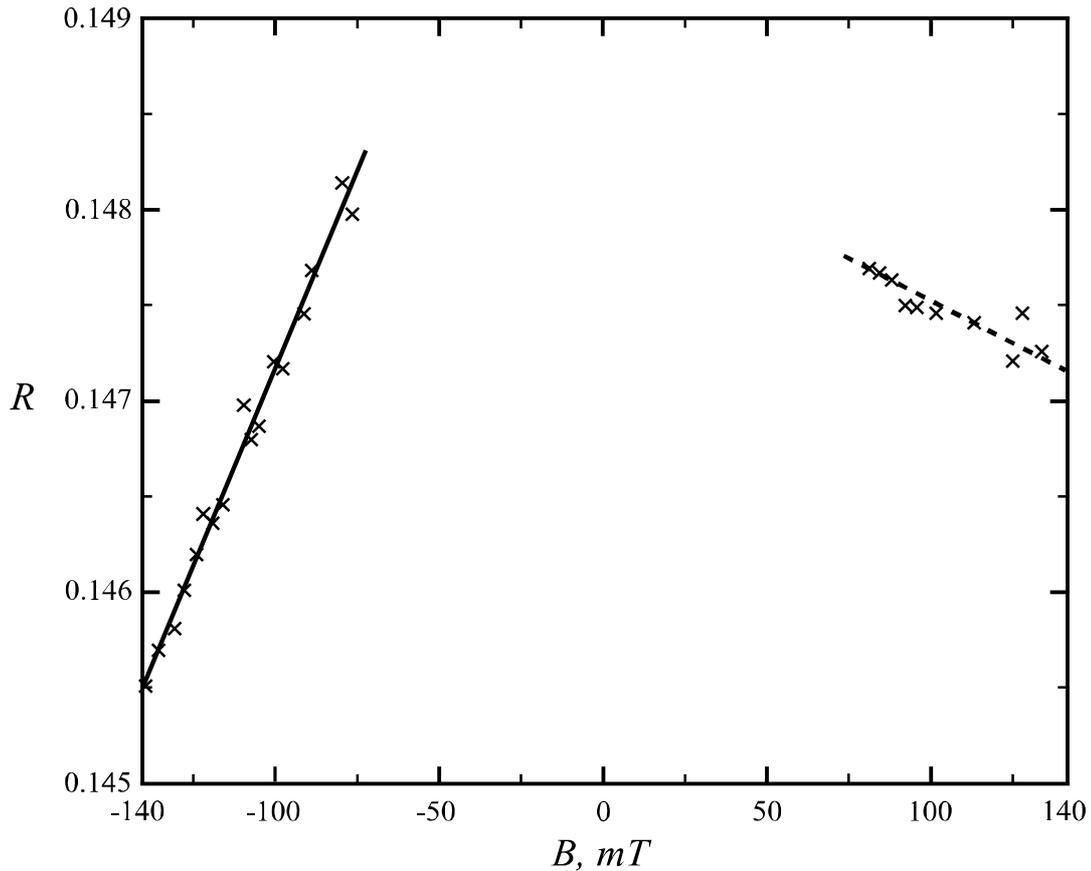


Рисунок 6. Экспериментальная зависимость модуля коэффициента отражения R от индукции магнитного поля B : основное направление вектора индукции магнитного поля (пунктирная линия), противоположное направление вектора индукции магнитного поля (сплошная линия).

Для расчета искомой СВЧ подвижности носителей заряда в образце использовалось соотношение, применяемое в «классических» методах определения подвижности с использованием эффекта СВЧ магнитосопротивления (8).

$$\mu = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha}}, \quad (8)$$

Для уточнения и правильной интерпретации полученных экспериментальных результатов воспользуемся соотношением, приведенным в [9] для многократного отражения в твёрдом теле. Это позволит учесть вклад

пропущенной образцом СВЧ мощности и снизить погрешность метода измерений.

Суммарная величина интенсивности, прошедшей через твердое тело толщиной x , может быть представлена сходящимся рядом интенсивности и равна:

$$I_T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha x)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha x)} I_0, \quad (9)$$

где I_T – интенсивность прошедшего СВЧ излучения, I_0 – интенсивность падающего СВЧ излучения на поверхность образца, R – коэффициент отражения по мощности, α – показатель поглощения.

Таким образом, выражение для коэффициента пропускания по мощности примет вид:

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha x)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha x)}, \quad (10)$$

В нашем случае справедливо условие $\alpha x = D < 1$ (малая глубина проникновения поля из-за близости игл-зондов) и, следовательно, членом $R^2 e^{-2\alpha x}$ пренебрегать нельзя.

Из закона сохранения энергии и закона Бугера-Ламберта имеем:

$$e^{-\alpha x} = 1 - R - T, \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) образуют систему уравнений с двумя неизвестными.

Приведём её к кубическому уравнению:

$$R^2 \beta^3 + R^2 (R - 1) \beta^2 + (2R - R^2 - 2) \beta + (1 - R) = 0, \quad (12)$$

где $\beta = e^{-\alpha x}$, $R = R_{\text{амп.}}$

Решение уравнения (12) дает только одно не отрицательное, не комплексное значение α для любого R из диапазона измеренных значений. Далее, полученные значения α_0 в отсутствие магнитного поля и α при индукции магнитного поля B , найденные решением уравнения (12) использовались в соотношении (8) для нахождения подвижности носителей заряда μ .

Измеренный коэффициент отражения для противоположных направлений приложенного внешнего магнитного поля оказываются различны, что может

быть объяснено эффектом смещения СВЧ поля либо по направлению к зондам, либо в противоположном направлении [10,11]. Такое смещение можно считать физически эквивалентным уменьшению или увеличению зазора между зондами и поверхностью полупроводника. Эффект смещения поля в рассматриваемом случае объясняется возникновением холловской составляющей СВЧ поля в зондах, которая, в зависимости от направления магнитного поля, либо суммируется, либо вычитается из наводимого в зондах поля. Эта дополнительная составляющая должна быть одинакова по величине для противоположных направлений магнитного поля и отличаться только знаком в случае линейной зависимости коэффициента отражения СВЧ излучения в области наблюдаемого резонанса от расстояния между концами зондов и измеряемой структурой. Экспериментальная зависимость модуля коэффициента отражения от расстояния между зондами и образцом представлена на рисунке 7. Наблюдаемый на графике линейный участок зависимости R от x в области, соответствующей реальным значениям величины изменения зазора, связанным с эффектом смещения СВЧ поля, наблюдаемым в эксперименте по определению подвижности, позволяет использовать формулу среднего арифметического (13) для устранения погрешности, возникающей из-за эффекта смещения поля.

$$R = \frac{R_+ + R_-}{2}, \quad (13)$$

где R_+ , R_- - значения модуля коэффициента отражения для противоположных направлений внешнего магнитного поля.

Используя значение модуля коэффициента отражения, найденное с помощью выражения (13) для расстояния зонд-образец 4 мкм, на электронной вычислительной машине с помощью выражений (8,12) было получено значение подвижности носителей заряда $\mu = 4190 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Полученное значение СВЧ подвижности носителей заряда в арсениде галлия хорошо согласуется со справочными данными. Показанная в настоящей работе возможность измерения СВЧ подвижности носителей заряда с помощью

сканирующего ближнеполевого СВЧ микроскопа и использованием эффекта СВЧ магнитосопротивления открывает перспективу исследования с высокой

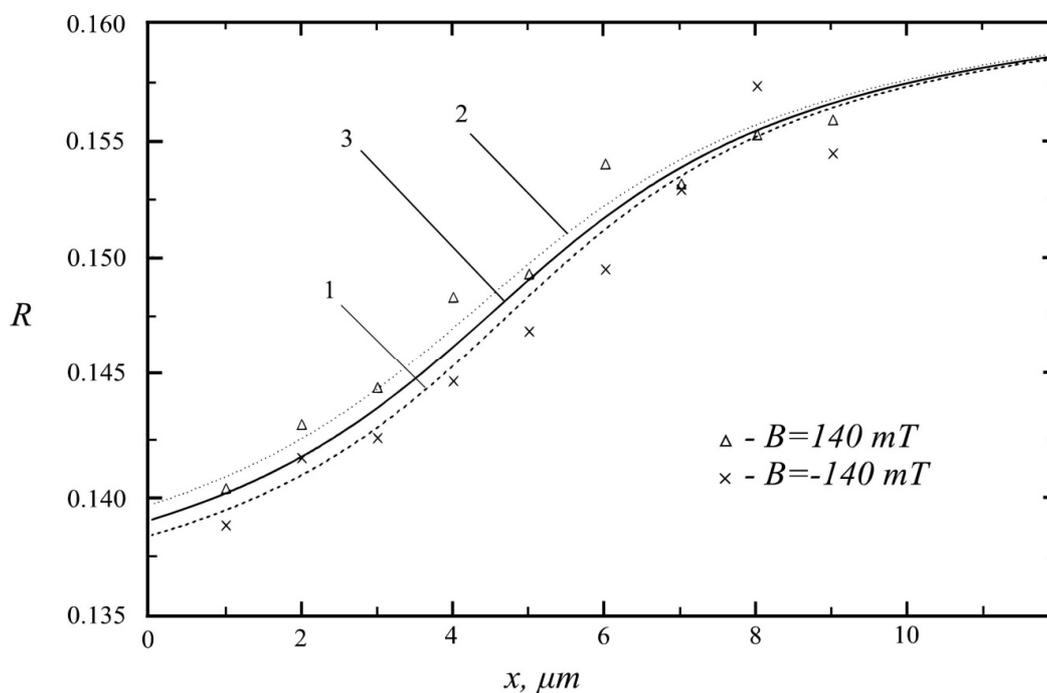


Рисунок 7. Экспериментальная зависимость модуля коэффициента отражения R от расстояния зонд-образец x : 1 – $B = -140$ мТл, 2 – $B = 140$ мТл, 3 – калибровочная кривая.

степенью локальности сложных полупроводниковых структур, в том числе построения профилей распределения подвижности носителей заряда от координаты сканирования. Приведённая в настоящей статье методика измерений может найти применение для исследования и контроля полупроводниковых структур, приборов и микросхем в процессе их производства, а также в условиях прохождения через них тока.

Основные результаты работы

1. Был проведён критический анализ современного состояния исследований полупроводниковых приборов и материалов с применением

ближнеполевой СВЧ микроскопии. Были отмечены преимущества резонансных конструкций микроскопов перед нерезонансными, отмечены успехи современных исследований в повышении пространственного разрешения и чувствительности ближнеполевых СВЧ микроскопов.

2. Был проведён численный расчет распределения напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в базе кремниевого р-і-п диода при прямом смещении для различных плотностей протекающего тока с учётом зависимости коэффициентов диффузии и подвижности носителей заряда от напряженности электрического поля при помощи функции решения краевой задачи bvp4c математического пакета MatLab 2009. Отмечено появление пространственных осцилляций распределения напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда после превышения некоторой критической плотности тока через диод.

3. Были проведены экспериментальные исследования распределения напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в базе СВЧ диода 2A513A-1 при различных плотностях протекающего через него тока с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа, построенного на основе резонансной системы «штырь с зазором – короткозамыкатель с выемкой». При увеличении тока выше некоторого критического значения, в диоде появляется немонотонная зависимость распределения проводимости вдоль диода.

4. Отмечено хорошее качественное согласование полученных с экспериментальных результатов с предложенной математической моделью, учитывающей зависимости коэффициентов диффузии и подвижности носителей заряда от напряженности электрического поля; показана важность учета этих зависимостей.

5. Разработан высоколокальный способ измерения сверхвысокочастотной подвижности носителей заряда в арсениде галлия с помощью ближнеполевого СВЧ микроскопа на основе резонансной системы «индуктивная диафрагма – близкорасположенная емкостная диафрагма» с

использованием эффекта СВЧ магнитосопротивления. Показана важность учёта эффекта смещения СВЧ поля при обработке результатов измерений.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Пространственные осцилляции электрического поля и плотности заряда в кремниевом p-i-n диоде / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, В.Ю. Кваско, А.В. Фадеев, А.А. Калямин // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – Вып. 21.– С. 104–110. Размещено по адресу: <http://journals.ioffe.ru/pjtf/2014/21/page-104.html.ru>
2. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Калямин А.А., Шаров И.В. Применение ближнеполевой СВЧ микроскопии для локального измерения подвижности носителей заряда в арсениде галлия методом СВЧ магнитосопротивления // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Материалы Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. – Саратов: Изд-во «Саратовский источник». 2018. С.123-126.
3. Осцилляции пространственного распределения электрического поля и концентрации носителей заряда в полупроводниковой p-i-n 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.

Цитируемая литература

1. Токи двойной инжекции в полупроводниках. / Э.И. Адирович, П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. – Под ред. Е. И. Гальперина. – М: Сов. радио, 1978. – 320 с.
2. Усанов Д. А., Горбатов С. С., Кваско В. Ю., А.В. Фадеев А.В., Калямин А.А.

Пространственные осцилляции электрического поля и плотности заряда в кремниевом p-i-n-диоде. Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 21. С 104.

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

4. Электроны в полупроводниках. Вып. 3. Диффузия горячих электронов. Вильнюс: Мокслас, 1981.

5. Роуз А. Основы теории фотопроводимости / Пер. с англ. А.А. Рогачева и Р.Ю. Хансварова. М.: Мир, 1966.

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

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

8. M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur. Handbook Series on Semiconductor Parameters. // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.-1996. – V. 1.– P. 84-85.

9. L.G. Parratt. Surface studies of solids by total reflection of x-rays. Physical Review, **95**, 359 (1954).

10. H.E.M. Barlow, R. Koike. Microwave propagation in a waveguide containing a semiconductor to which is applied a steady transverse magnetic field. Proceedings of the IEEE, **110** (12), 2177 (1963).

11. Л.Н. Баранов, В.Б. Гаманюк, Д.А. Усанов. К вопросу о невзаимном распространении волн в волноводе, частично заполненном полупроводником. Радиотехника и электроника, **18** (11), 73 (1973).