

На правах рукописи



Кусакин Дмитрий Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ И СТРУКТУРАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

01.04.10 – Физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Рязань – 2017

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования при ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель: **Литвинов Владимир Георгиевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Анкудинов Александр Витальевич**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических свойств полупроводников, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), г. Санкт-Петербург;

Трегулов Вадим Викторович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», г. Рязань

Ведущая организация: Группа компаний «NT-MDT Spectrum Instruments», г. Москва, Зеленоград

Защита диссертации состоится «19» сентября 2017 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ и на сайте РГРТУ: www.rsreu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Д 212.211.03 д.ф.-м.н., профессор



М.В. Чиркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Надежность радиоэлектронной аппаратуры напрямую зависит от элементной базы, используемой при ее создании. В связи с этим ведущее место в создании элементной базы занимает контроль параметров исходных материалов и структур, используемых при изготовлении полупроводникового прибора. К важнейшим характеристикам полупроводниковых материалов или структур относятся концентрация свободных носителей заряда и профиль ее распределения. Указанные характеристики определяют усилительные (например, коэффициент усиления тока базы в схеме с общим эмиттером биполярного транзистора), частотные свойства (предельная частота усиления транзисторов тем выше, чем ниже сопротивления активных областей), предельные эксплуатационные параметры полупроводниковых приборов (максимальное рабочее напряжение) и т.д.

Разработка физических основ метода, объединяющего в себе известные электрофизические методы исследования полупроводниковых структур и зондовую систему атомно-силового микроскопа для формирования контакта, является актуальной задачей. Использование совмещенной методики позволит определять основные электронные свойства полупроводниковых структур: энергии активации процессов эмиссии и захвата носителей заряда на основные уровни размерного квантования, величины разрывов разрешенных энергетических зон на гетерограницах, макро- и микронеоднородности распределения указанных величин, локальный импеданс образца в области формирования контакта, молекулярная проводимость и т.д.

В солнечной энергетике используются солнечные элементы (СЭ) на основе n -Si или p -Si. В дальнейшем элементы проходят процедуру текстурирования. Текстурирование гладкой поверхности СЭ используется для повышения коэффициента поглощения света, что впоследствии может увеличить КПД. Процедура текстурирования приводит к тому, что поверхность образца становится сильно развитой и исследования классическими методами не дают представления о полной картине распределения примеси, так как полученные результаты являются усредненными по площади контакта. Это приводит к необходимости создавать методы исследования, которые включают электрофизические измерения и возможность одновременного исследования параметров рельефа поверхности полупроводниковых структур.

Цель диссертационной работы – разработка методики определения концентрации носителей заряда на основе локальных вольт-фарадных характеристик для изучения электрофизических свойств полупроводниковых материалов и структур.

Основные задачи

1. Анализ существующих методов исследования электрофизических свойств полупроводниковых барьерных микро- и наноструктур, физических моделей точечного металлического контакта и полупроводника.

2. Анализ и уточнение физической модели точечного барьерного контакта металл-полупроводник.

3. Разработка методики локального измерения вольт-фарадной характеристики, основанной на использовании атомно-силовой микроскопии для формирования точечного контакта металл-полупроводник.

4. Апробация методики исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур, основанной на измерении вольт-фарадной характеристики точечного контакта металл-полупроводник в областях, имеющих размер, определяемый либо длиной Дебая, либо радиусом закругления острия проводящего зонда атомно-силового микроскопа в диапазоне 10-100 нм.

5. Исследование особенностей распределения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых структурах с развитым рельефом поверхности.

Основными объектами исследований являлись полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми ямами на основе систем InGaAs/GaAs, полученные методом эпитаксии из молекулярных пучков, а также пластины *p*-Si с концентрацией бора 10^{17} см^{-3} , прошедшие процедуру текстурирования поверхности методом жидкостного химического травления.

Научная новизна представленных в работе результатов заключается в следующем:

1. Разработан способ получения локальной вольт-фарадной характеристики полупроводниковой барьерной структуры в атто- и фемтофарадном диапазоне, заключающийся в измерении постоянной составляющей тока через контакт, образованный проводящим зондом атомно-силового микроскопа и полупроводниковым образцом при воздействии на него импульсным напряжением пилообразной формы с изменяемой постоянной составляющей.

2. Разработан измерительный комплекс на базе зондовой системы атомно-силового микроскопа, позволяющий проводить измерение релаксационного тока с минимальной амплитудой 1 пА, алгоритм и программное обеспечение для автоматизации и обработки полученных экспериментальных данных.

3. Апробирована методика определения профиля концентрации основных носителей заряда в квантово-размерных структурах вблизи слоев квантовой ямы с использованием в качестве контакта проводящего зонда атомно-силового микроскопа.

4. Впервые исследованы вольт-фарадные характеристики кремниевых *p-n*-структур с развитым пирамидальным рельефом поверхности. Экспериментально установлено влияние рельефа поверхности на распределение концентрации свободных носителей заряда.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Математические соотношения для расчета зависимости электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник при

сферической симметрии распределения электрического потенциала с учетом размера металлического контакта и нерезкой границы области пространственного заряда в полупроводнике.

2. Методика определения концентрации носителей заряда по локальным вольт-фарадным характеристикам, заключающаяся в измерении токового отклика при подаче на полупроводниковую барьерную структуру импульсного напряжения пилообразной формы, позволяющая получить латеральное распределение концентрации свободных носителей заряда.

3. Зависимость распределения концентрации свободных носителей заряда от рельефа пирамидальной структурированной поверхности кремниевой структуры с *p-n*-переходом. При увеличении высоты пирамидок до 5 мкм концентрации свободных носителей заряда возрастает на 20 – 30 %.

Достоверность научных результатов работы обеспечивается использованием общепринятого математического аппарата физики полупроводников и подтверждением результатов, полученных независимым методом вольт-фарадных характеристик с макроконтактом (при измерении с использованием проводящего контакта на поверхности исследуемой структуры). Эксперименты проводились в Региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета на поверенном и калиброванном оборудовании.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Расширены возможности классического метода вольт-фарадных характеристик за счет совмещения с техникой атомно-силовой микроскопии, углублены существующие представления о физических процессах, происходящих в полупроводниковых наногетероструктурах.

2. Разработан способ локального контроля профиля распределения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковой структуре, а именно в областях, размеры которых находятся в нанометровом диапазоне (область менее 100 нм).

3. Получен локальный профиль концентрации носителей заряда в квантово-размерных структурах вблизи слоев квантовой ямы в областях менее 100 нм.

4. Получен локальный профиль распределения концентрации носителей заряда в кремниевых структурах, используемых при производстве элементов для солнечной энергетики, с развитым рельефом поверхности, в которых размеры отдельных областей не превышают 100 нм.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI, VII, VIII Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (г. Рязань; 2013, 2014, 2015), Всероссийской молодежной школе-семинаре «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (г. Рязань, 2013), II и III Международных научно-практических конференциях «Инновации в науке, производстве и образовании» (г. Рязань; 2013, 2014),

IX и X Международных конференциях «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (г. Санкт-Петербург; 2014, 2016), Международной конференции «Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2016» (г. Рязань, 2016), XXVIII Международной научно-практической конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-28» (г. Саратов, 2015), 18-ой молодежной научно-практической конференции по твердотельной электронике «Микро- и нанотехника нового поколения» (г. Санкт-Петербург, 2015), 6th Mediterranean conference on embedded computing (MECO-2017) (Черногория 2017 г.).

Публикации. Основные результаты опубликованы в 21 научной работе, из них 6 статей (по специальности) в журналах из списка ВАК, 15 тезисов докладов на российских и международных конференциях, 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патент.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 85 наименований, приложений. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 2 таблицы и 74 рисунка.

Внедрение результатов

Полученные научные результаты использовались при разработке комплексного метода исследования свойств элементов солнечной энергетики (НИР 17-14Г), при разработке методики локального исследования электрофизических свойств полупроводниковых наногетероструктур (НИР 1-16Г), а также в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 11.03.04 и магистрантов по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основные задачи исследований и научные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен аналитический обзор методов исследования электрофизических характеристик полупроводниковых структур. Рассмотрены методы вольт-фарадных характеристик (ВФХ), релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ), зондовые методы исследования с применением сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), а также ряд других методов исследования электрофизических параметров полупроводниковых структур.

Анализ экспериментальных методов показал, что недостатком всех методов, основанных на измерении значения электрической емкости полупроводниковых структур, являются требования к наличию покровного слоя определенной толщины при заданном уровне легирования в структурах с квантовыми ямами и квантовыми точками. Основным недостатком зондовых методов с использованием СЗМ является сложность интерпретации по-

лученных результатов. Расширение возможностей существующих методов и минимизация их недостатков возможны за счет разработки комбинированного метода, который будет включать плюсы описанных методик и минимизировать их минусы.

Вторая глава посвящена разработке методики локального исследования вольт-фарадных характеристик с использованием сканирующей зондовой микроскопии. Проведен анализ электрических свойств точечного барьерного контакта металл-полупроводник. Разработан макет измерительной установки для реализации разрабатываемого метода. Разработано программное обеспечение (ПО) для автоматизации процесса измерений и обработки измерительных данных.

Недостатком классического метода ВФХ считают требование к наличию сформированного на поверхности образца контакта Шоттки или *p-n*-переход. Данные, полученные при таких исследованиях, относятся ко всей площади контакта, то есть получается некоторое усреднение по площади. Техника атомно-силовой микроскопии (АСМ) имеет определенные недостатки, затрудняющие реализацию метода локальной ВФХ: наличие паразитной электрической емкости между зондом и окружающей средой; термодрейф, ограничивающий время измерения емкости. Влияние этих факторов можно снизить при использовании быстродействующих измерительных схем для регистрации малых электрических сигналов.

На рисунке 1 представлены зависимости длины Дебая от концентрации свободных носителей заряда (СНЗ) для барьерных структур на основе Si и GaAs.

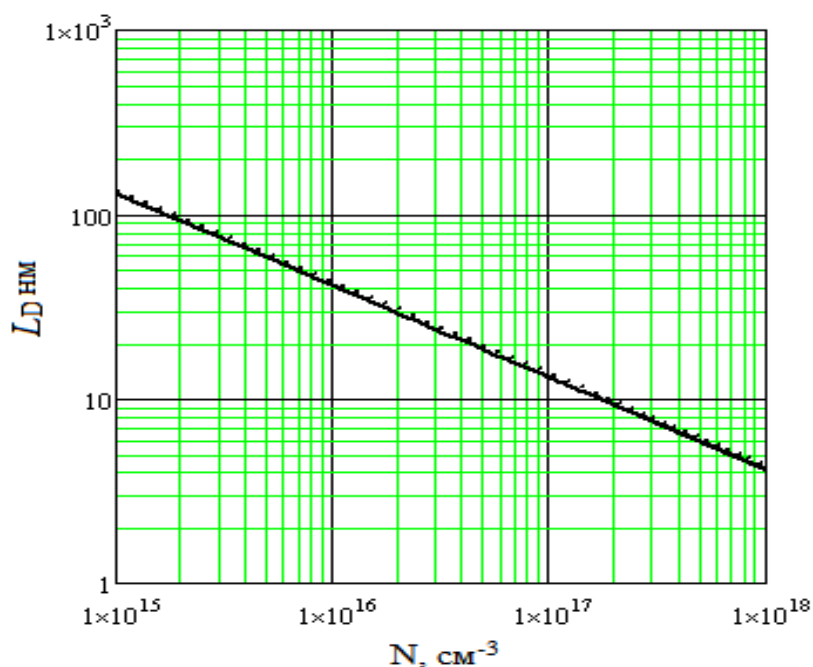


Рисунок 1 – Зависимость длины Дебая от концентрации СНЗ:
сплошная прямая для Si, точечная прямая для GaAs

Из рисунка 1 следует, что для выполнения условия $L_D > 2r_0 = 50$ нм (условие, при котором распределение электрического поля в полупроводнике будет считаться сферически симметричным) необходимо выбирать образцы с концентрацией СНЗ не более $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

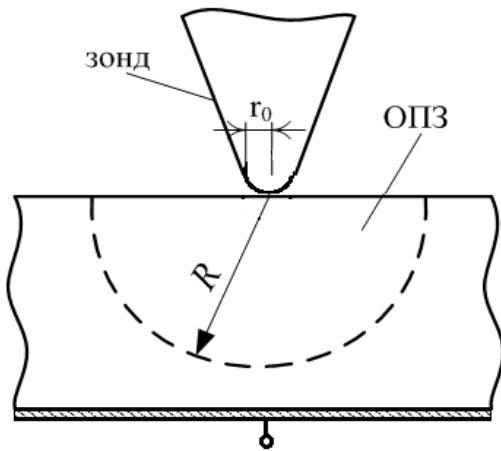


Рисунок 2 – Схематичное изображение точечного барьерного контакта (штриховой линией показана граница ОПЗ)

Для исследования распределения электрического потенциала решено уравнение Пуассона в сферических координатах:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = - \frac{eN(1 - e^{-e\varphi/kT})}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, ε_0 – электрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, N – концентрация ионизированной легирующей примеси, φ – электрический потенциал. Экспонентой в (1) можно пренебречь в случае $e\varphi \gg kT$. Сделаны допущения о том, что поверхность полупроводника является незаряженной, рассматривается случай полной

ионизации атомов донорной примеси $n_0 = N$ (комнатная температура соответствует участку истощения примеси).

Уравнение (1) решено для граничных условий:

$$\varphi(R) = \frac{kT}{e}, \quad \varphi(r_0) = \varphi_{\max} = U_R + U_K, \quad \frac{d\varphi}{dr}(R) = 0 \quad (2)$$

В результате решения получено соотношение для распределения потенциала в ОПЗ:

$$\varphi(r, r_0) = \frac{r_0(U_K + U_R) \left(\operatorname{ch} \left(\frac{r}{L_D} \right) - \operatorname{sh} \left(\frac{r}{L_D} \right) \right)}{r \left(\operatorname{ch} \left(\frac{r_0}{L_D} \right) - \operatorname{sh} \left(\frac{r_0}{L_D} \right) \right)}, \quad (3)$$

где U_K – контактная разность потенциалов, U_R – модуль напряженности обратного смещения на контакте металл-полупроводник, $L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 kT}{eN}}$ – дебаевская длина экранирования.

Значение емкости для полусферического контакта рассчитывается по формуле:

$$C(U) = 2\pi eNR^2(U) \left[\frac{dR(U)}{dU} \right]. \quad (4)$$

Проведен расчет зависимости емкости точечного барьерного контакта от концентрации носителей заряда согласно уравнению (4). На рисунке 3 показана теоретическая зависимость емкости точечного контакта от концентрации носителей заряда при разных радиусах закругления зонда АСМ.

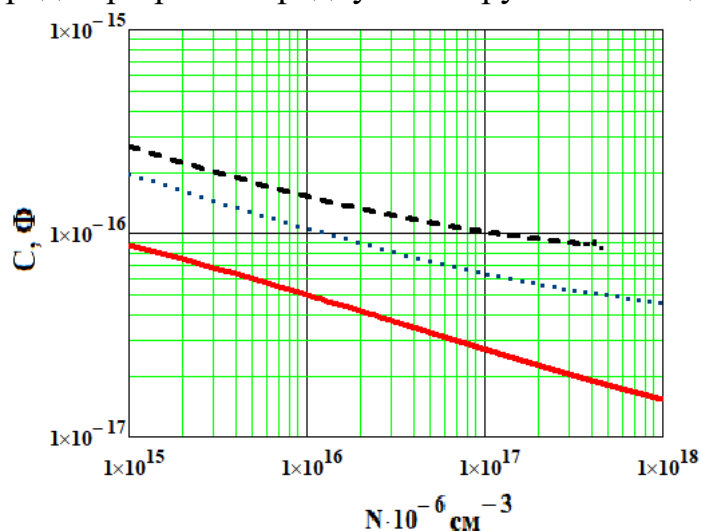


Рисунок 3 – Рассчитанная зависимость емкости точечного контакта от концентрации носителей зарядов для различных радиусов закругления острия зонда: сплошная кривая – 10 нм, точечная – 50 нм, штриховая – 100 нм

Результаты, приведенные на рисунке 3, свидетельствуют о том, что емкость сферического точечного контакта зависит от концентрации носителей заряда и радиуса закругления острия зонда АСМ.

Расчет концентрации свободных носителей заряда производится по выражению (5):

$$N(R) = \frac{i_{c-}(U)}{2\pi e \alpha R^2(U) \left[\frac{dR(U)}{dU} \right]}, \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{U_{\max}}{T}$ – скорость нарастания напряжения измерительного пилообразного импульса (U_{\max} – амплитуда напряжения, T – период), i_{c-} – постоянная составляющая тока, протекающего через образец при подаче пилообразного импульса.

На рисунке 4 приведены зависимости удельной емкости плоского и сферического барьерных контактов. В результате моделирования было показано, что емкость точечного контакта зависит от концентрации носителей заряда и от радиуса контакта (радиус используемого зонда). В приближении сферического контакта при росте обратного напряжения емкость увеличивается. Кроме того, данные рисунка 4 свидетельствуют о том, что удельная емкость сферического контакта примерно в 4 раза больше удельной емкости плоского контакта.

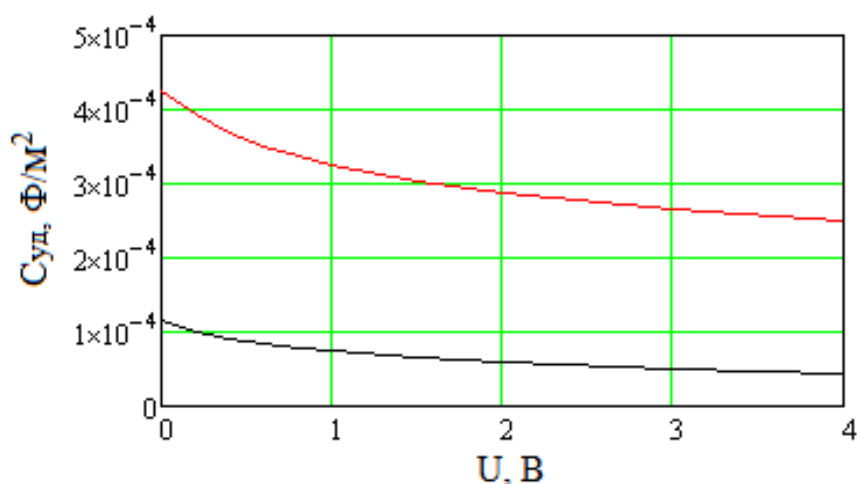


Рисунок 4 – Зависимость удельной емкости плоского (нижняя кривая) и сферического (верхняя кривая) барьерных контактов

Создана измерительная установка для реализации разработанного метода (рисунок 5). Измерительная ячейка представляет собой базовый блок атомно-силового микроскопа, адаптированного для подключения к проводящему зонду и образцу внешних приборов: генератора и быстродействующего преобразователя ток-напряжение. С генератора импульсов напряжения Γ непосредственно на исследуемый образец подаются импульсы пилообразной формы. Электрический ток через образец и проводящий зонд поступает на преобразователь ток-напряжение. Далее сигнал в виде релаксационных импульсов напряжения поступает на АЦП в ПЭВМ.

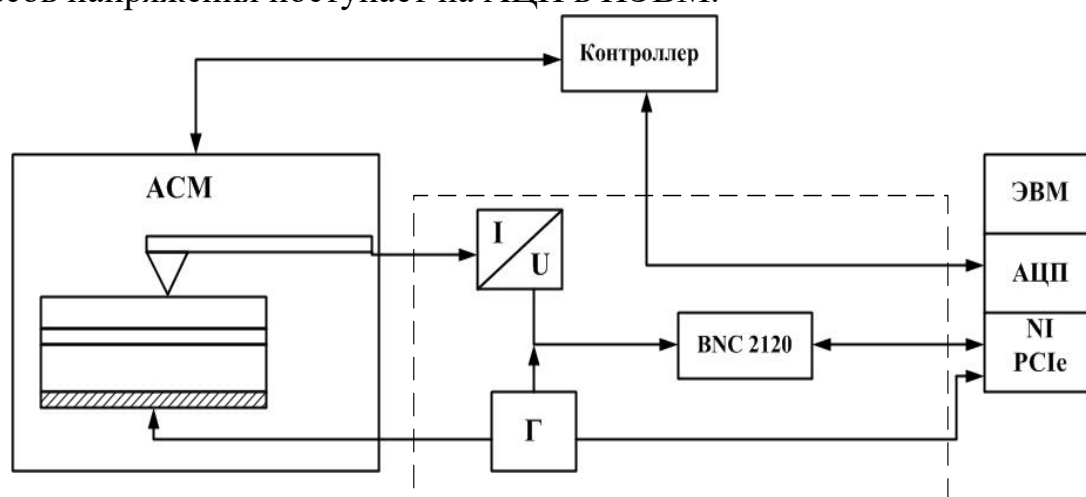


Рисунок 5 – Структурная схема измерительной установки: АСМ – базовый блок атомно-силового микроскопа, Γ – генератор импульсов напряжения, I/U – преобразователь ток-напряжение, BNC 2120 – коммутационный блок, NI PCIe – плата сбора данных, Контроллер – блок, отвечающий за управление зондовой системой, АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Характеристики разработанной измерительной установки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики аппаратно-программного комплекса

Параметр	Значение
Диапазон измеряемой емкости	100 аФ...100 пФ
Диапазон измеряемого тока (постоянной составляющей)	1 пА...10 мкА
Диапазон напряжений	-5... +5 В
Диапазон dU/dt	0,1...10 ⁵ В/с

Вначале происходит измерение квазистатической вольт-амперной характеристики (ВАХ) для определения тока утечки при заданной величине постоянного напряжения. После этого настраиваются параметры сигнала для измерения токового отклика (постоянной составляющей в сигнале токового отклика). Для уменьшения уровня шума предусмотрен выбор количества усреднений. Из постоянной составляющей в токовом отклике вычитается постоянная составляющая, обусловленная током утечки.

Для управления генератором сигнала и оценки полученных результатов в среде инженерно-графического программирования LabVIEW было создано специализированное ПО (Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2016618137 и №2017616573).

В третьей главе представлены результаты апробации измерительной установки на тестовых образцах, а также изучения профиля концентрации НЗ в структурах A_3B_5 с квантовыми ямами (КЯ). В качестве исследуемых образцов использованы структуры на основе InGaAs/GaAs с тремя КЯ (рисунок 6).

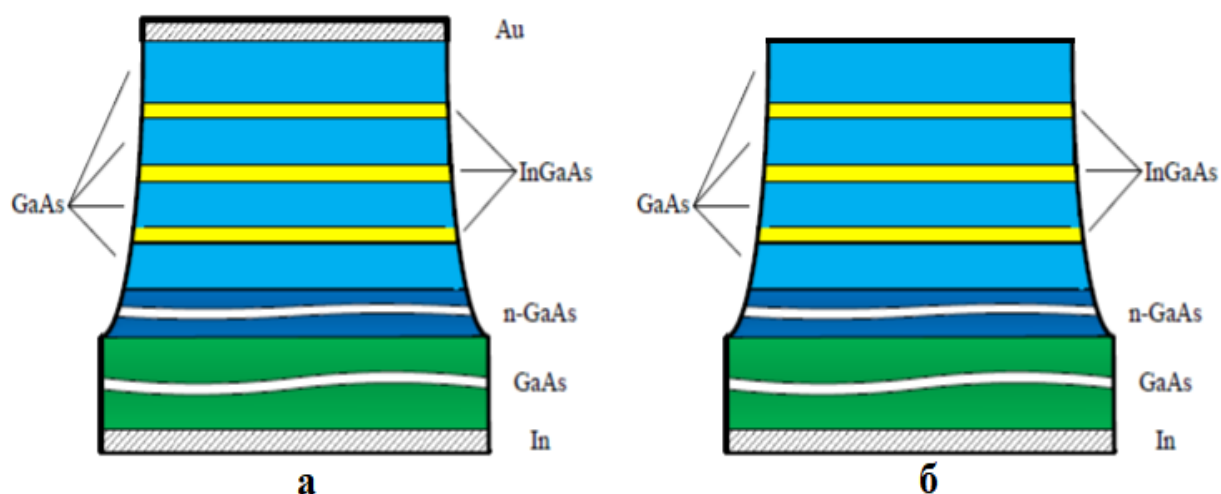


Рисунок 6 – Структура тестового образца в разрезе:
 а – образец InGaAs/GaAs со сформированным золотым контактом,
 б - образец InGaAs/GaAs без золотого контакта

Структуры получены методом эпитаксии из молекулярных пучков. Подложка – n^+ -GaAs; буферный слой – n-GaAs (300 нм); слой n-GaAs (150 нм), уровень легирования – $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; слой i-GaAs (5 нм); Слой КЯ InGaAs (7 нм); слой i-GaAs (5 нм); слой n-GaAs (150 нм). Далее структура КЯ повторяется. Покровный слой – n-GaAs (400 нм), уровень легирования – $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Для проведения измерений были выбраны проводящие Pt зонды компании Rocky Mountain Nanotechnology RMN-25PT300B. Выбор связан с тем, что указанные зонды полностью выполнены из проводящего материала с большой работой выхода, что позволяет минимизировать паразитное сопротивление зонда и обеспечить формирование барьерной структуры при контакте к слаболегированному полупроводнику. Радиус закругления и химический состав зонда контролировались растровым электронным микроскопом Jeol JSM6610LV. РЭМ-изображение кончика зонда представлено на рисунке 7.

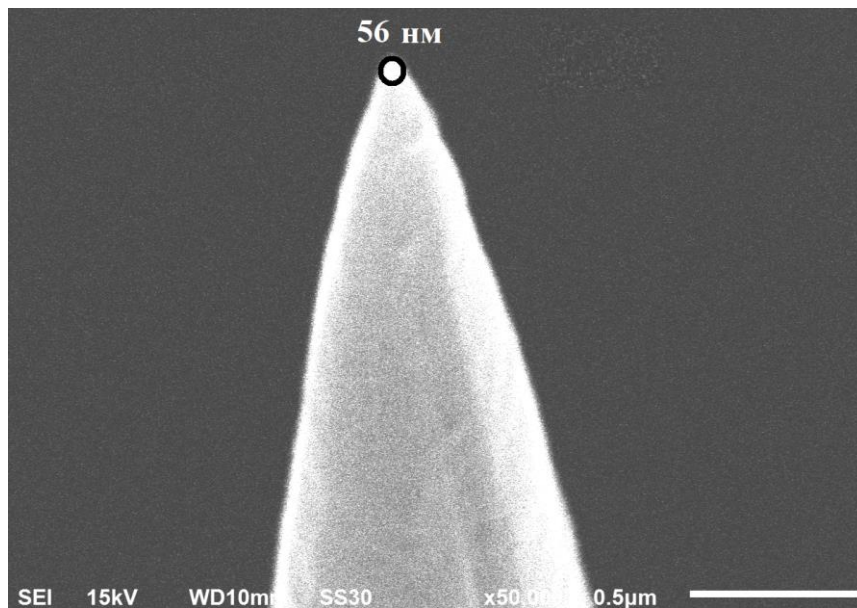


Рисунок 7 – РЭМ-изображение проводящего зонда RMN-25PT300B с определением радиуса закругления

Профиль концентрации свободных носителей заряда $N(z)$ рассчитан из ВФХ для плоской диодной структуры:

$$N(z) = - \frac{\left(\frac{C(z)}{S} \right)^3}{e \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial(C(z)/S)}{\partial U}}, \quad (6)$$

где C – электрическая емкость, z – расстояние от металлургической границы металл-полупроводник до края ОПЗ в базе диода или толщина ОПЗ, ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, ε_0 – электрическая постоянная.

Применено соотношение (6), поскольку для данного уровня легирования дебаевская длина в 5 раз меньше, чем диаметр контакта (рисунок 1).

Был проведен анализ поверхности исследуемого образца и выбор наиболее ровного участка для формирования контакта зонд-образец (рисунок 8), чтобы исключить влияние шероховатости на сопротивление контакта при проведении электрических измерений.

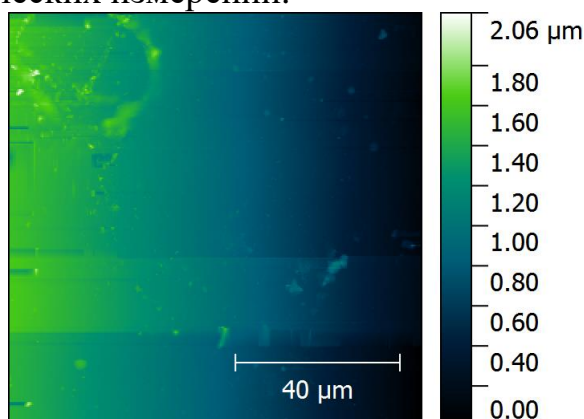


Рисунок 8 – АСМ-изображение поверхности исследуемого образца

При использовании зондовой системы АСМ была измерена локальная ВФХ, которая в дальнейшем сравнивалась с характеристикой, полученной при использовании макроконтакта (рисунок 9, а). На рисунке 9, б представлена ВФХ, рассчитанная по измеренному току при усреднении по 1000 измерениям из выражения (4).

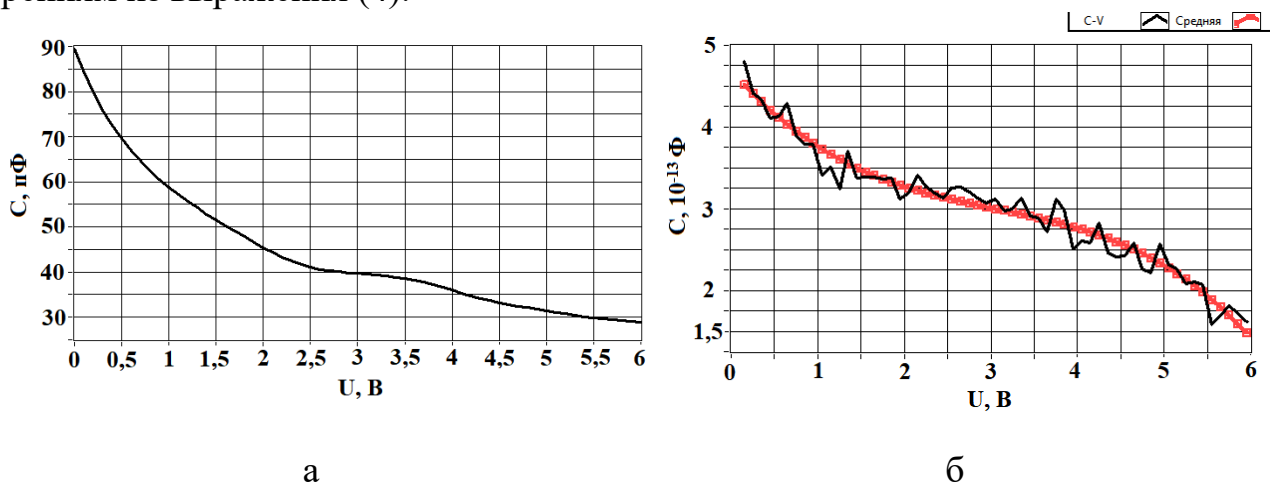


Рисунок 9 – ВФХ тестовой структуры:

а – характеристика на макроконтакте; б – локальная характеристика

На локальной ВФХ наблюдается небольшой излом в диапазоне обратных напряжений 2,25 В – 3,5 В. По указанной характеристике (рисунок 9, б) был построен профиль распределения концентрации носителей заряда, представленный на рисунке 10.

Рассчитанный концентрационный профиль показывает относительно малое заполнение второй КЯ электронами. Это объясняется влиянием накопленного заряда в крайней (первой) КЯ, что приводит к появлению вокруг широких локальных областей обеднения СНЗ. Условия проведения измере-

ний были таковы, что край ОПЗ не достиг третьей квантовой ямы, поэтому на $C-V$ -характеристике наблюдалось только два перегиба.

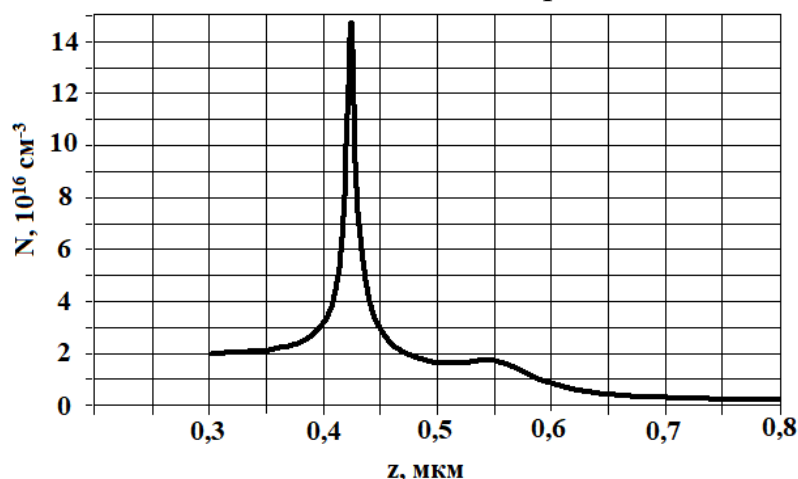


Рисунок 10 – Профиль распределения концентрации носителей заряда в тестовой структуре

В четвертой главе представлены результаты исследования локальных ВФХ и профиля распределения концентрации носителей заряда в структурах с развитым рельефом поверхности.

В качестве экспериментальных образцов выбраны пластины p -Si с концентрацией бора 10^{17} см^{-3} , прошедшие процедуру текстурирования поверхности методом жидкостного химического травления (рисунок 11). В результате проведения диффузии фосфора на поверхности кремниевой пластины толщиной около 200 мкм сформирован слой n -типа, проникающий на глубину около 0,5 мкм с концентрацией фосфора на поверхности порядка 10^{20} см^{-3} . Таким образом, p - n -переход локализован у самой поверхности солнечного элемента.

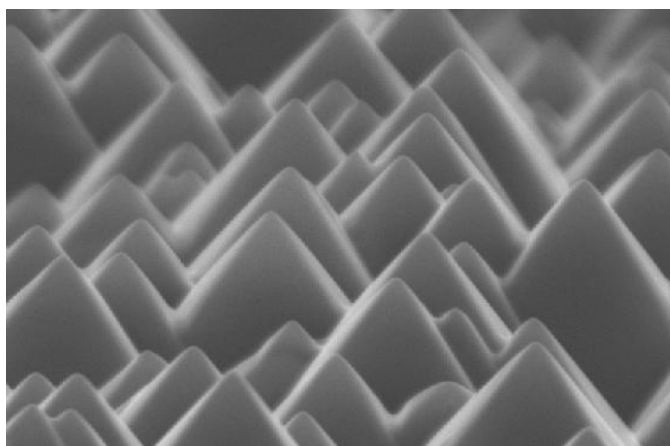


Рисунок 11 – РЭМ-изображение поверхности исследуемого образца. Высота пирамидок составляет 3-5 мкм

Для проведения измерений необходимо создать непроникающий контакт зонд-образец. Была снята резонансная характеристика зонда и кривая

подвода-отвода для расчета силы давления зонда на поверхность исследуемого образца.

На рисунке 12 приведены типовые ВФХ, полученные на вершинах пирамид (рисунок 12, а) и между пирамидами (рисунок 12, б).

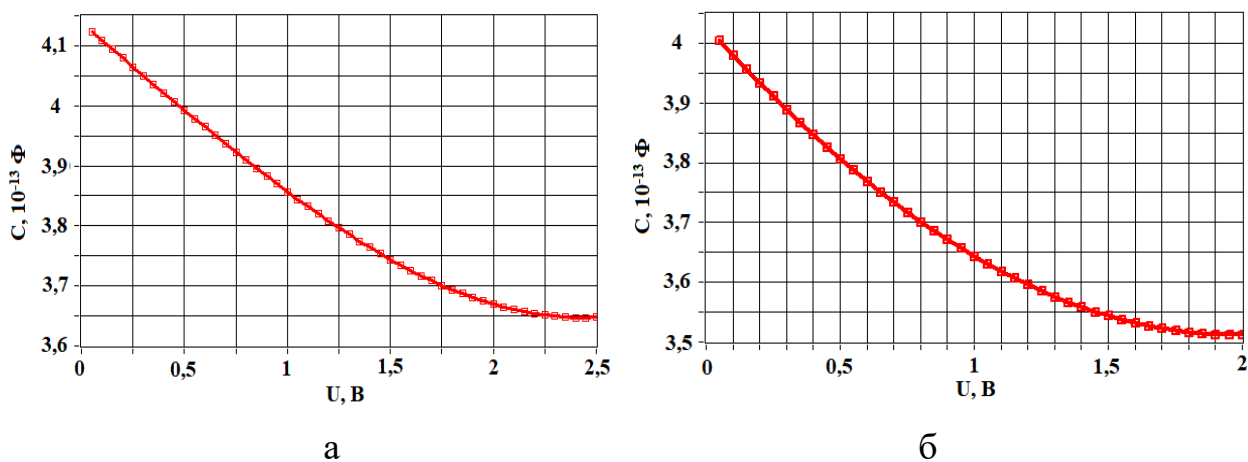


Рисунок 12 – Локальная ВФХ структуры:
а – на вершине пирамиды, б – между пирамидами

Из полученных ВФХ рассчитан профиль концентрации носителей заряда в структуре, представленный на рисунке 13.

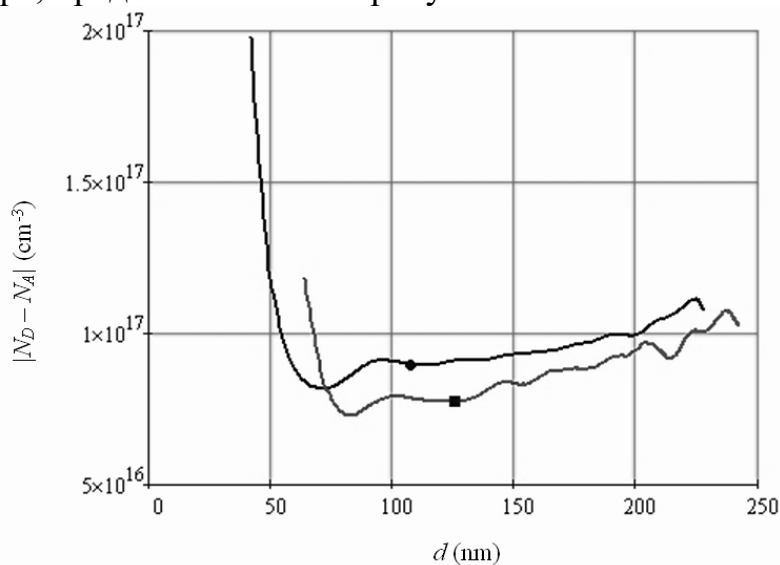


Рисунок 13 – Профиль концентрации носителей заряда, d – ширина ОПЗ.
Верхняя кривая – контакт к вершине пирамиды,
нижняя кривая – контакт между пирамидами.

Для расчета профиля распределения концентрации легирующей примеси использован диапазон напряжений до +0,5 В. При напряжении больше +0,5 В диод приоткрывается, появляется паразитная диффузионная емкость.

Различие в концентрациях фосфора и бора составляет около трех порядков величины, поэтому при изменении напряжения на структуре изменя-

ется положение края слоя объемного заряда в менее легированной p -области. Различие в полученных профилях концентрации составляет 20 – 30 % при изменении рельефа поверхности в сторону увеличения до 5 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проанализирована и уточнена электромеханическая модель точечного барьерного контакта металл-полупроводник образованного проводящим зондом атомно-силового микроскопа и полупроводниковым материалом.

2. Получены математические соотношения для электрического потенциала и электрической барьерной емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник в приближении неполного обеднения свободными носителями заряда вблизи границы области пространственного заряда в полупроводнике и с учетом размера металлического контакта. Рассчитаны теоретические зависимости электрического потенциала и электрической барьерной емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник от концентрации свободных носителей заряда и радиуса закругления острия зонда атомно-силового микроскопа, который использовался для создания точечного барьерного контакта.

3. Разработана методика измерения локальной вольт-фарадной характеристики полупроводниковой барьерной структуры, основанная на измерении токового отклика в образце при подаче на него импульсного напряжения пилообразной формы.

4. Для реализации методики измерения локальной вольт-фарадной характеристики полупроводниковой барьерной структуры изготовлен измерительный комплекс с использованием атомно-силового микроскопа с возможностью измерять электрическую емкость в диапазоне от 100 аФ до 100 пФ. Разработано программное обеспечение для автоматизации проведения исследований, записи и хранения экспериментальных данных.

5. Апробирована методика измерения локальной вольт-фарадной характеристики с использованием тестовой структуры на основе гетероперехода InGaAs/GaAs с тремя квантовыми ямами, выращенной методом эпитаксии из молекулярных пучков. На основе измеренной локальной вольт-фарадной характеристики рассчитан «кажущийся» профиль распределения концентрации свободных электронов с характерными пиками концентрации, пространственное положение которых совпадает с пространственным положением квантовых ям в исследуемом образце.

6. Получены профили концентрации свободных носителей заряда в кремниевой p - n -структуре с пирамидальной структурированной поверхностью, используемой для производства солнечных элементов. Обнаружена зависимость распределения концентрации свободных носителей заряда от рельефа структурированной поверхности. При увеличении высоты пирамидок до 5 мкм концентрация свободных носителей заряда – дырок вблизи p - n -перехода со стороны области базы возрастает на 20-30 %.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Кусакин Д.С. DLTS исследование диода Шоттки на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовой ямой // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 2 (44). С. 91-96.

2. Кусакин Д.С., Литвинова В.С., Литвинов В.Г., Воробьев Ю.В., Рыбин Н.Б. Методика локального измерения электрической емкости фемтофарадного диапазона точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-2. С. 122-125.

3. Вишняков Н.В., Воробьев Ю.В., Кусакин Д.С., Мальченко С.И., Маслов А.Д. Влияние характеристик проводящего зонда атомно-силового микроскопа и исследуемой поверхности на электрическое сопротивление точечного контакта между ними // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 52. С. 168-173.

4. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б., Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В. Анализ электрических свойств точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 53. С. 149-153.

5. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Измерение электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-2. С. 132-136.

6. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Измерительно-аналитический комплекс для локального исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводников // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 56. С. 177-182.

Охранные документы:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617225. Программа для автоматизированного измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых микро и наноструктур / Ермачихин А.В., Кусакин Д.С., Литвинова В.С. 2014 г.

2. Патент на изобретение №2534382. Способ определения концентрации носителей заряда в полупроводниках и устройство для их осуществления / Корнилович А.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Кусакин Д.С. 2014 г.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2015617376. Программа для исследования электрически и оптически активных дефектов в диодных структурах / Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Кусакин Д.С., Вишняков Н.В., Гудзев В.В. 2015 г.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2016618137. Программа управления измерительным комплексом для локального исследования вольт-фарадных характеристик полупроводниковых материалов и структур / Кусакин Д.С., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. 2016 г.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2017616573. Программа для анализа вольт-фарадных характеристик полупроводниковых барьерных структур / Кусакин Д.С., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. 2017 г.

Прочие публикации:

1. Кусакин Д.С., Ермачихин А.В. Измерительный комплекс для локальных исследований электрофизических свойств полупроводниковых структур на базе АСМ // Труды VI Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур», том 3, Рязань, 2013. С. 47-51.

2. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Разработка методики локального измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур с использованием зондовой системы атомно-силового микроскопа // В сборнике: Диагностика наноматериалов и наноструктур Труды VII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению. 2014. С. 28-31.

3. Литвинов В.Г., Ермачихин А.В., Кусакин Д.С. Особенности исследования диода Шоттки на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовой ямой методом DLTS // Труды VI Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур», том 3, Рязань, 2013. С. 169-175.

4. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Измерительный комплекс для исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур на базе АСМ-СТМ «NTEGRA» // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании», Рязань 2013, С. 60-62.

5. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Разработка методики локального измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур с использованием атомно-силовой микроскопии // Сборник трудов IX Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 2014. С. 274-275.

6. Литвинова В.С., Литвинов В.Г., Кусакин Д.С. Обоснование методики определения концентрации свободных носителей заряда в локальных областях полупроводниковых наноструктур по C-V-характеристикам // Труды VII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур», Том 3, Рязань 2014. С. 32-38.

7. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б. Разработка методики локального измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами с использованием техники атомно-силовой микроскопии // Сборник трудов III Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании», ИНПО-2014. Рязань, 2014. С. 30-33.

8. Кусакин Д.С., Рыбин Н.Б., Литвинов В.Г., Воробьев Ю.В. Разработка методики измерения электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Труды VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур», Том 3, Рязань 2015. С. 16-21.

9. Семенов А.Р., Литвинов В.Г., Кусакин Д.С. Исследование электрических характеристик точечного барьерного контакта металл-полупроводник с помощью атомно-силовой микроскопии // Труды VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур», Том 3, Рязань 2015. С. 203- 207.

10. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Локальное измерение электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник с помощью атомно-силовой микроскопии // Сборник трудов 18-ой молодежной научной школы по твердотельной электронике «Микро- и нанотехника нового поколения». Санкт-Петербург, 12-13.11.2015. С. 64-66.

11. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Моделирование вольт-фарадной характеристики точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Сборник трудов XXVIII Международной научно практической конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-28». Том 10. Саратов, 2015. ISBN 978-5-7433-2386-9. С. 106-109.

12. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Измерительный комплекс для локального исследования электрофизических свойств полупроводниковых наноматериалов и наноструктур // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016 сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 томах. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2016. С. 248-252.

13. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Мальченко С.И. Разработка комплекса с использованием АСМ для исследования C-V и I-V характеристик полупроводниковых нанообъектов и наноструктур // Сборник трудов Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 2016. С.121-122.

14. Кусакин Д.С., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. Измерительный комплекс для локального исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур // Сборник трудов XV Международной конференции NIDays 2016. Москва, 2016. С. 157-159.

15. Kusakin D.S., Litvinov V.G., Rybin N.B., Ermachikhin A.V., Gudzev V.V., Shchelushkin V.N., Khudysh A.I. Local investigation of capacitance-voltage characteristics of silicon solar cell with the modified surface // Proceeding 2017 6th Mediterranean conference on embedded computing (MECO). Bar, Montenegro. 11-15 June 2017. P. 324-327.

Кусакин Дмитрий Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ И СТРУКТУРАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 05.07.2017 Формат бумаги 60x84 1/16
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз.
Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.