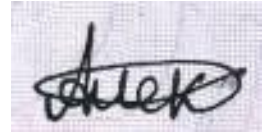


На правах рукописи



Алексеев Прохор Анатольевич

**Исследование распределения зарядов и электрических полей
в приборных наноструктурах
методами сканирующей зондовой микроскопии**

специальность

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»,
кафедра микро- и наноэлектроники.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе **Титков Александр Николаевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, **Миронов Виктор Леонидович**, Институт физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН)

кандидат технических наук, **Латникова Наталья Михайловна**, Центр микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского казанского научного центра российской академии наук»

Защита состоится «7» ноября 2013 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Автореферат разослан « 2 » октября 2013 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04,
доктор физико-математических наук



Мошников В.А.

Актуальность темы

В связи с быстрым уменьшением размеров приборов и устройств электроники в диапазон субмикронных и уже нано размеров существует нарастающая необходимость в изучении свойств современных материалов и приборных структур со столь же высоким латеральным разрешением. Этим требованиям хорошо отвечает применение высокочувствительных методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), обладающих возможностью исследования практически любых свойств поверхности с субмикронным латеральным разрешением [1]. В СЗМ методах изучаемые поверхности зондируются наноострыми зондами, что и определяет получение высокого разрешения.

Одним из важных направлений СЗМ является применение методов Кельвин-зонд микроскопии (КЗМ), детектирующих электростатическое взаимодействие между зондом и исследуемой поверхностью, которые позволяют получать информацию о распределении зарядов и электрических полей в материалах и приборных структурах, проясняющую особенности протекающих в них электронных процессов. К сожалению, недостаточное пространственное разрешение стандартного КЗМ метода довольно долго сдерживало его активное применение для изучения свойств субмикронных и нано структур. В стандартном методе КЗМ детектируется сила кулоновского взаимодействия зонда с поверхностью. Из-за дальнедействующего характера кулоновского взаимодействия во взаимодействии участвует не только острое окончание зонда, но и его боковые стенки и даже несущая острие консоль зонда. В результате, пространственное разрешение классического метода КЗМ редко бывает лучше 1 мкм. Разработка в последнее десятилетие градиентного метода КЗМ (ГКЗМ) привела к резкому повышению разрешения метода до 10-20 нм [2]. Повышенное разрешение градиентного ГКЗМ метода связано с тем, что в данном методе регистрируется градиент кулоновской силы в направлении перпендикулярном поверхности и его быстром спадании при удалении от поверхности. Это приводит к регистрации в методе взаимодействия поверхности преимущественно только с окончанием зонда.

Применение сочетания КЗМ и ГКЗМ методов позволяет эффективно и с большой детальностью исследовать свойства широкого спектра материалов и структур современной микро- и наноэлектроники. В качестве разнообразных целей исследований можно назвать изучение поведения зарядов в тонких диэлектрических слоях, являющихся функциональными вставками в различных транзисторах, включая транзисторы с эффектом памяти, определение распределений встроенных и внешних электрических полей в полупроводниковых светоизлучающих и приемных приборных структурах, выявление положений p-n и гетеропереходов в них, изучение поверхностных состояний и их подавления методами пассивации поверхности, а также новых объектов наноэлектроники, как например, полупроводниковых нанопроводов (НП) и приборных структур на их основе, и другое.

Цель диссертационной работы заключалась в развитии и применении методов сканирующей Кельвин-зонд микроскопии для исследования электрофизических свойств материалов и структур современной микро- и наноэлектроники, а именно: нанотонких слоёв диэлектриков SiO_2 , Si_3N_4 , LaScO_3 , гетероструктур на основе соединений GaAs, InAs и близких к ним твёрдых растворах, а также GaAs НП в целях оптимизации их применения в приборных разработках.

Для достижения целей работы решались следующие **задачи**:

- Исследование механизмов распространения и сохранения локально инжектированных зарядов в нанотонких слоях SiO_2 и Si_3N_4 при различных температурах и

условиях. Определение параметров диффузии локально инжектированных носителей заряда. Разработка способа оценки количества локально инжектированных зарядов в диэлектрических слоях на основе КЗМ измерений.

- Исследование механизмов утечки зарядов в нанотонких слоях high-k диэлектрика ($\epsilon=33$) LaScO_3 на Si подложке и сопоставление с результатами исследований слоёв SiO_2 и Si_3N_4 . Определение степени влияния пограничного с подложкой SiO_x слоя, а также влияния толщины диэлектрических слоёв на утечку зарядов.

- Изучение распределения встроенных и приложенных извне электрических полей в светодиодной гетероструктуре II типа $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ с двухцветной люминесценцией.

- Изучение распределения встроенных и приложенных извне электрических полей в фотодиодной гетероструктуре $\text{InAs}/\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}/\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ для среднего ИК диапазона. Определение положения p-n и гетеропереходов с целью оптимизации параметров приборов на основе гетероструктуры.

- Изучение особенностей распределения поверхностного потенциала на поверхности скола (110) детекторной структуры $n^+ - n^- - p^+$ GaAs (100) при различных внешних условиях: внешнее напряжение, оптическое возбуждение. Определение положения электрических переходов. Исследование влияния химической нитридной пассивации в гидразин-содержащих растворах на распределение поверхностного потенциала.

- Исследование влияния поверхностной обработки на морфологию зеркал мощных $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ лазеров. Определение оптимальной процедуры обработки, позволяющей существенно повысить оптическую мощность лазеров.

- Разработка методик СЗМ исследований механических свойств и проводимости GaAs НП, сохраняющих ростовой контакт с подложкой. Определение модуля Юнга исследуемых GaAs НП с целью создания стабильного электрического контакта с СЗМ. Изучение особенностей механизмов проводимости сильно и слаболегированных GaAs НП. Изучение влияния химической нитридной пассивации (в гидразин-содержащих растворах) и химической сульфидной пассивации (в растворах сульфида натрия) на проводимость GaAs НП. Сопоставление эффективности и долговечности нитридной и сульфидной пассивации GaAs нанопроводов.

- Исследование фотопроводимости GaAs нанопроводов различных типов и уровней легирования. Определение основных факторов, влияющих на фотопроводимость.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- На примере структуры LaScO_3/Si с интерфейсным SiO_x слоем показана возможность одновременного исследования КЗМ методом поведения инжектированных зарядов в отдельных слоях многослойных диэлектрических наноструктур.

- Для диэлектрических слоёв LaScO_3 показано существенное подавление скорости латеральной диффузии в сравнении с классическими диэлектрическими слоями SiO_2 и Si_3N_4 .

- Обнаружено накопление электронов на (110) GaAs поверхности детекторной структуры $n^+ - n^- - p^+$ GaAs (100) в области $n^- - p^+$ перехода при приложении к структуре обратного смещения.

- Обнаружено накопление дырок на поверхности p^+ -GaAs НП вблизи барьера Шоттки, вызывающее гистерезис вольт-амперных характеристик НП.

- Разработана СЗМ методика определения модуля Юнга нанопроводов, наклоннорастущих на подложке. Обнаружено в 2-3 раза меньшее значение модуля Юнга у изучавшихся GaAs НП, по сравнению со значениями в объёмном GaAs.

- Произведено сравнение эффективности и долговечности влияния химической нитридной и сульфидной пассивации на проводимость GaAs нанопроводов различных типов и уровней легирования. Показано превосходство по обоим параметрам нитридной пассивации.

- Исследована проводимость и фотопроводимость слаболегированных GaAs НП. Установлена определяющая роль поверхностных состояний в транспорте носителей заряда.

Научная и практическая значимость выполненной работы заключается в том, что автор с помощью КЗМ и ГКЗМ методов исследовал распределения зарядов и электрических полей в материалах и приборных наноструктурах различного рода и выявил новые данные, проясняющие их свойства и особенности функционирования создаваемых на их основе приборов. Представление о научной значимости выполненных исследований можно составить на основании приведенных выше новых результатов, полученных в работе.

Практическая значимость диссертационной работы выражена следующим образом:

- Определён оптимальный способ обработки поверхности зеркал мощных AlGaAs/GaAs лазеров, позволяющий в 2 раза увеличить выходную оптическую мощность.

- Определено положение p-n перехода в фотодиодной гетероструктуре InAs/InAsSb/ InAsSbP/ InAsSb / InAsSbP для среднего ИК диапазона, позволившее оптимизировать параметры фотодиода.

- Разработана методика определения модуля Юнга нанопроводов, наклоннорастущих на подложке. Для реализации методики требуется только один прибор - атомно-силовой микроскоп.

- Разработана СЗМ методика исследования проводимости химически пассивированных нанопроводов наклоннорастущих на подложке. Впервые произведена химическая нитридная пассивация GaAs НП. Стабильные и эффективные нитридные покрытия могут быть использованы для успешного применения GaAs НП в приборах оптоэлектроники.

На защиту выносятся следующие основные **положения**:

- 1) В многослойных диэлектрических наноструктурах методы сканирующей Кельвин зонд микроскопии позволяют независимо и одновременно для каждого диэлектрического слоя изучать латеральную диффузию и утечку в подложку локально инжектированных зарядов.

- 2) Скорость диффузии локально инжектированных зарядов в нанотонких high-k диэлектрических слоях LaScO₃, на кремниевой подложке на порядок меньше скорости диффузии инжектированных зарядов в слоях SiO₂ и Si₃N₄. Наличие на интерфейсе LaScO₃/Si переходного слоя SiO_x значительно ускоряет утечку зарядов из слоя LaScO₃ в Si подложку.

- 3) На боковой (110) поверхности n⁺-n⁻-p⁺ GaAs(100) структуры при приложении запирающего напряжения происходит накопление электронов в области n⁺-n⁻ перехода. Подобный эффект накопления зарядов на (110) поверхности p-GaAs нанопроводов вблизи Шоттки-контактов приводит к значительному изменению величины их проводимости и появлению гистерезиса вольт-амперных характеристик.

- 4) В слаболегированных GaAs нанопроводах приповерхностная область пространственного заряда занимает весь их объём, в результате чего проводимость и фотопроводимость определяются скоростью поверхностной рекомбинации.

- 5) Химическая нитридная пассивация GaAs нанопроводов в гидразин-содержащих растворах (N₂H₄) является более эффективной по сравнению с методиками сульфидной пассивации, обеспечивая большее увеличение проводимости GaAs нанопроводов и более длительное время сохранения эффекта пассивации в атмосферных условиях.

Достоверность и надежность результатов. Достоверность результатов экспериментов

обеспечена продемонстрированной воспроизводимостью измерительных данных, а также сравнительным анализом полученных результатов с имеющимися теоретическими моделями и литературными данными.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на XV международном симпозиуме «Нанозлектроника и Нанозлектроника» (Нижний Новгород, 2011); на 18, 19 и 21 международных симпозиумах «NANOSTRUCTURES:PHYSICS AND TECHNOLOGY» (Санкт-Петербург, Екатеринбург, Санкт-Петербург, 2010, 2011 и 2013); на 23, 24 и 25 Российских конференциях по электронной микроскопии, «РЭМ» (Черноголовка, 2011-2013); на конференциях по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-запада «Физика СПб» (Санкт Петербург, 2011, 2012); на международной зимней школе по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2011); на XXIV всероссийской конференции «Современная химическая физика» (Туапсе, 2012) и обсуждались на семинарах в ФТИ им. А. Ф. Иоффе и СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 24 научных работах, из них 9 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в перечне ВАК.

Методы исследования. Все основные результаты получены на АСМ приборах NTEGRA AURA и NTEGRA SPECTRA отечественной фирмы НТ-МДТ.

Личный вклад автора заключался в выполнении экспериментальной части работы, а также участии в анализе и интерпретации полученных результатов и написании статей.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографического списка из 132 наименований. Основной текст работы изложен на 160 страницах, включает в себя 3 таблицы и 66 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности, научной новизны и практической ценности работы, формулировку цели и задач исследования. Также изложены основные положения, выносимые на защиту, кратко описана структура диссертации.

В первой главе, носящей обзорный характер, описаны основные СЗМ методы исследования электрофизических свойств материалов и структур современной электроники. Рассмотрены контактный и полуконтактный способ получения топографии поверхности. Обсуждаются особенности измерения ВАХ с помощью СЗМ зонда. Подробно описаны особенности реализации КЗМ и ГКЗМ методов на основе амплитудной и частотной модуляции, и соответственно особенности измерения контактной разности потенциалов между СЗМ зондом и исследуемой поверхностью Укрп.

Во второй главе приведены результаты исследований поведения локально инжектированных зарядов в нанотонких слоях диэлектриков SiO_2 , Si_3N_4 и LaScO_3 . Слои были нанесены на Si подложку. Толщины слоёв составляли: Si_3N_4 – 11 нм, SiO_2 – 20 нм, LaScO_3 – 6, 12, 20 нм. Схема эксперимента по СЗМ исследованию поведения зарядов в нанотонких диэлектрических слоях представлена на Рис. 1. Первоначально осуществляется локальная зарядка слоя диэлектрика из приведенного в контакт с ним СЗМ зонда с одновременной подачей напряжения (Рис. 1 а). Площадь контакта зонда с поверхностью составляет несколько десятков квадратных нанометров. Последующая регистрация инжектированных в слой зарядов производится методом КЗМ. Визуализируемый таким методом заряд проявляется в виде локального изменения поверхностного потенциала (зарядового пятна, ЗП) на поверхности слоя диэлектрика (Рис. 1 б). В дальнейшем отслеживается эволюция ЗП во времени и соответственно распространение заряда в слое диэлектрика (Рис. 1 в, г). Когда скорость распространения

зарядов меньше скорости сканирования, то ЗП имеет форму круга, и профиль потенциала (Рис. 1 д), проведенный через центр пятна, несет в себе полную информацию о степени латерального распространения заряда и его возможной утечке в подложку.

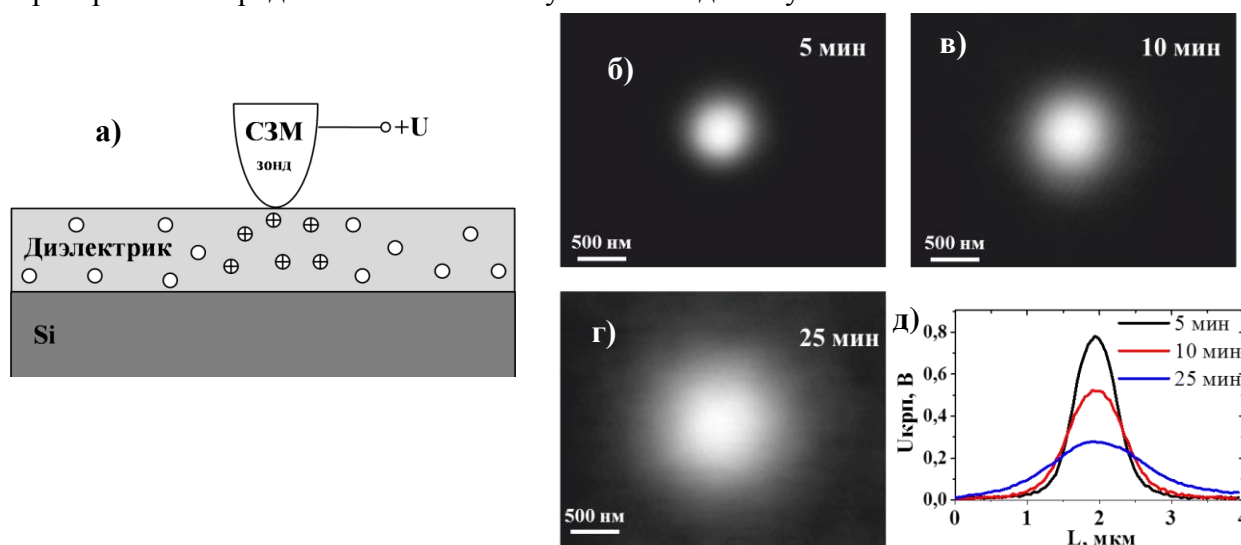


Рис.1. а) Схема эксперимента по зарядке нанотонкого диэлектрического слоя, б), в) и г) Зарядовое пятно, полученное КЗМ методом, спустя 5, 10 и 25 минуты соответственно после зарядки 20 нм слоя SiO₂ импульсом напряжения 5 Вольт длительностью 100 мсек д) соответствующие профили зарядовых пятен.

Из-за преимущественно диффузионного характера движения зарядов в плоскости слоя, распределение зарядов в пятне, а также детектируемое распределение поверхностного потенциала в пятне имеют Гауссов характер. При этом ширина на полувысоте L ЗП характеризует размеры заряженной области, которая обычно заметно превышает размеры начального контакта СЗМ зонда с поверхностью. Можно проинтегрировать изменение поверхностного потенциала по площади ЗП и получить количественную оценку полного числа инжектированных зарядов. Уменьшение ее величины во времени характеризует утечку зарядов из слоя. Таким образом, анализируя профили и форму ЗП можно изучать распространение зарядов в слое диэлектрика, уровень их сохранения и механизмы утечки.

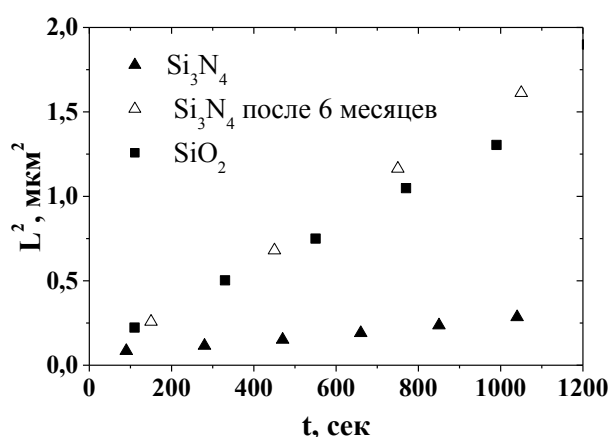


Рис.2 Зависимости квадрата полуширины ЗП от времени после зарядки слоёв SiO₂ и Si₃N₄, полученные при исследованиях в форвакууме. Для слоя Si₃N₄ приведены зависимости до и после шестимесячного хранения в атмосферных условиях.

Для оценки количества зарядов Q , инжектированных в слой, а также степени их сохранения в нём, в нашей работе было получено выражение $Q \approx \frac{\epsilon + 1}{4} \frac{\varphi_0 L^2}{d}$, где φ_0 – амплитуда зарядового пятна, ϵ – диэлектрическая проницаемость слоя, d – толщина слоя. Расчёт показал, что в исследуемые слои SiO₂ и Si₃N₄ инжектировалось порядка 10^4 зарядов, при этом заряды сохраняются в слое диэлектрика на протяжении нескольких часов.

Для определения механизма латерального движения зарядов в слое, были построены графики зависимости уширения ЗП от времени $L^2(t)$. Измерения проводились в

форвакууме для высушивания поверхности диэлектрических слоев. Эксперименты в комнатных условиях показали, что присутствие на поверхности пленки влаги вызывает ускорение латеральной диффузии зарядов. На Рис.2 приведены соответствующие зависимости для слоев SiO_2 и Si_3N_4 , причём для слоя Si_3N_4 до и после 6 месячного хранения в атмосферных условиях.

Линейный характер экспериментальных кривых ($L^2(t) \sim Dt$) указывает на преобладание диффузионного механизма в распространении инжектированного заряда в слое диэлектрика на больших временах. По наклону линий изображённых на Рис.2, можно определить коэффициент диффузии, который составил $D=1.5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ для слоя SiO_2 и $D=0.2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ для слоя Si_3N_4 . Было обнаружено, что после выдержки в атмосферных условиях, коэффициент диффузии для слоя Si_3N_4 значительно увеличивается и достигает значений $D(\text{Si}_3\text{N}_4)=1.6 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$. Обращает внимание сходство коэффициентов диффузии для относительно свежего SiO_2 слоя и слоя Si_3N_4 после атмосферного хранения. Возможным объяснением этому является дополнительное окисление поверхности слоя Si_3N_4 под действием атмосферной влаги до стадии SiO_x .

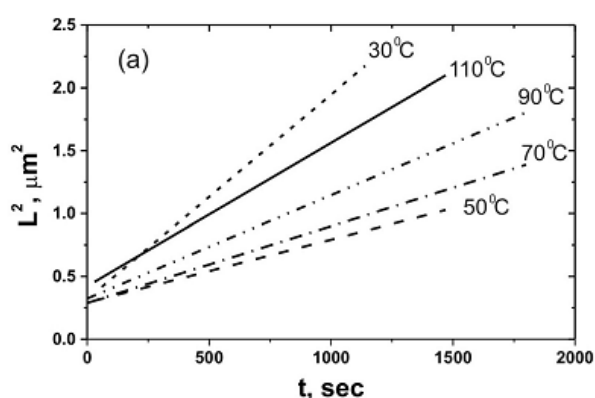


Рис.3 Зависимость квадрата полуширины ЗП от времени после зарядки слоя Si_3N_4 , полученные в условиях форвакуума при температурах 30-110 °С.

только потом наблюдалось ее ускорение (аналогичная ситуация наблюдалась и для слоев SiO_2 и LaScO_3). Объяснение этой особенности состоит в том, что при комнатной температуре в достигавшемся вакууме $p=10^{-5}$ Бар поверхностная пленка влаги становится значительно тоньше, но не исчезает полностью, а нагрев образца приводил к ее дальнейшему истощению, и соответственно уменьшению ее влияния на диффузию зарядов. Как видно из рис.3, влияние поверхностной влаги на латеральное распространение зарядов в условиях нашего эксперимента подавлялось при температуре около 50°C. Данные зависимостей на Рис.3, полученные при более высоких температурах, позволили определить значения энергии активации диффузии зарядов для исследуемых слоев: $E_a(\text{SiO}_2)=0.5\text{эВ}$ и $E_a(\text{Si}_3\text{N}_4)=0.25\text{эВ}$.

Первые эксперименты по исследованию поведения зарядов в слоях LaScO_3 привели к неожиданным наблюдениям. На рис.4 представлены профили ЗП, полученные при зарядке слоя LaScO_3 толщиной 12нм напряжением 8В в течение 10, 30 и 120 секунд, при температуре 30 °С. На рис. 4 можно видеть, что ЗП имеют сложную форму, не наблюдавшуюся для слоев SiO_2 и Si_3N_4 . Ее можно описать суммой двух сцентрированных по месту зарядки контуров Гаусса. При этом «узкая» составляющая практически не зависит от времени зарядки, как по амплитуде, так и по ширине. В то же время увеличение времени зарядки приводит к увеличению амплитуды и ширины «широкой» составляющей ЗП. Сложный профиль и разное поведение составляющих

ЗП во времени указывают на одновременную зарядку каких-то двух соприкасающихся диэлектрических слоев.

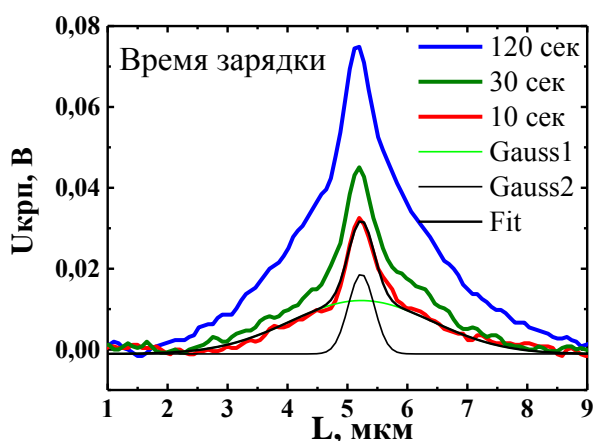


Рис.4 Профили зарядовых пятен в 12 нм слое LaScO_3 , полученные при приложении напряжения 8 В в течение 10 с, 30 с, 120с.

этих исследовавшихся образцов имеют две составляющие: узкую и широкую. Причём с увеличением толщины слоя LaScO_3 эффективность накопления и скорость разбегания заряда в интерфейсных слоях (широкая составляющая) вырастает. Увеличение скорости диффузии с увеличением толщины LaScO_3 , возможно связано с утолщением интерфейсного SiO_x слоя и соответственно уменьшением его сопротивления. Отметим, что в слоях LaScO_3 различной толщины практически не происходит уширения ЗП (узкая составляющая).

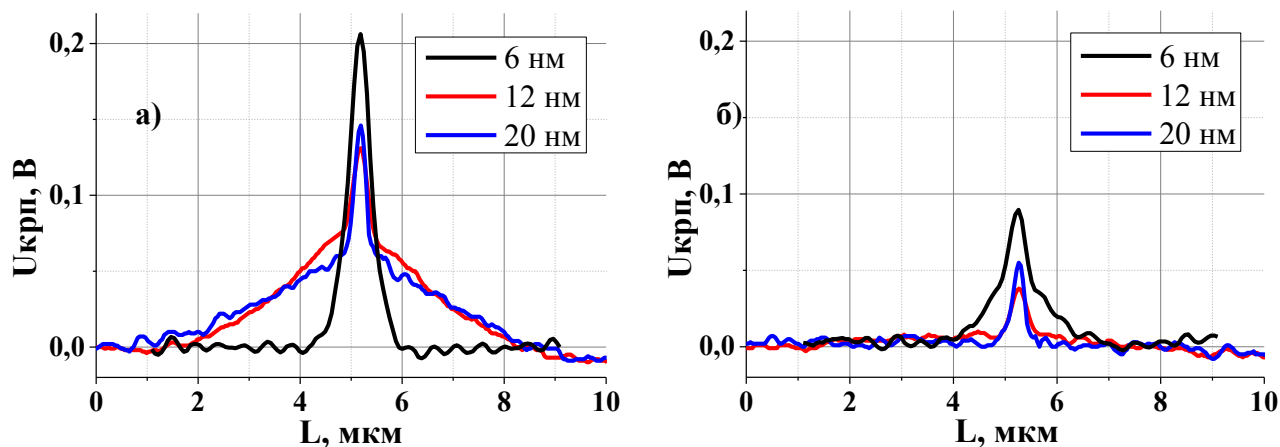


Рис.5 Профили ЗП полученные при зарядке слоёв LaScO_3 при температуре 50°C спустя а) 2 минуты после зарядки б) 10 минут после зарядки

Проведение аналогичных исследований при температуре 110°C показало, что нагрев приводит к резкому уширению и исчезновению широкой составляющей ЗП. Для структуры с 6 нм слоем LaScO_3 удалось выполнить оценку коэффициента диффузии и энергии активации для широкой составляющей, то есть для интерфейсного слоя. Процедура определения параметров диффузии была аналогична ранее изложенной для слоёв SiO_2 и Si_3N_4 , полученные значения составили $D=10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ ($T=50^\circ\text{C}$), $E_a=0,71\text{эВ}$.

Важно обратить внимание на то, что узкие компоненты ЗП, обусловленные распределением инжектированных зарядов непосредственно в слое LaScO_3 , практически, не уширяются со временем. Наблюдается лишь незначительное уширение при нагреве образцов до

110°С. Скорость диффузии в исследованных слоях LaScO₃, по крайней мере, на порядок меньше чем в слоях SiO₂ и Si₃N₄.

Наблюдение уменьшения амплитуд узких компонент ЗП во времени, однако, показывает, что во всех случаях имеет место уход зарядов из LaScO₃ слоя сначала, скорее всего, в интерфейсный слой, а затем и в подложку.

Таким образом, в отношении nano тонких слоёв high-k диэлектрика LaScO₃ на подложке кремния был получен важный вывод об эффективном подавлении латеральной диффузии зарядов в таких слоях. Одновременно, был обнаружен необычный двухслойный характер пространственного распространения зарядов, связанный, с уходом носителей в интерфейсный слой на границе с подложкой, существующий в изучавшейся системе. В этом слое сравнительно высокая латеральная диффузия носителей и имеется заметная вероятность ухода носителей в подложку.

В третьей главе представлены результаты СЗМ исследований поверхности сколов приборных гетероструктур на основе соединений GaAs и InAs.

В первой части главы приведены результаты СЗМ исследований влияния различных поверхностных обработок на морфологию зеркал мощных импульсных полупроводниковых AlGaAs/GaAs лазеров. Обработка лазерных зеркал необходима, для удаления поверхностного оксида и соответственно поверхностных центров безызлучательной рекомбинации, ведущих к перегреву и деградации зеркал за счет поглощения высокоинтенсивного лазерного излучения.

Выполненные АСМ исследования топографии сколов лазерных GaAs гетероструктур позволили выработать оптимальный режим обработки лазерных зеркал. Обработка граней Фабри-Перо резонатора, получаемых скалыванием, путем травления в плазме аргона и формирования покрытия с пассивирующими и блокирующими кислород слоями GaN и Si₃N₄ позволяет увеличить максимальную выходную оптическую мощность от 60 до 120 Вт.

Во второй части главы приведены результаты ГКЗМ исследований сколов структур n⁺-n⁻-p⁺ GaAs датчиков рентгеновского излучения. При создании датчиков рентгеновского излучения на основе GaAs, для увеличения сбора неравновесных носителей заряда на электродах, создают структуры с расширенной областью пространственного заряда (ОПЗ). Одним из способов увеличения ОПЗ является диффузия хрома в n⁺-n⁻-p⁺ структуру со стороны p⁺ слоя. Для определения глубины перекомпенсации n⁻ слоя акцепторным Cr, были выполнены ГКЗМ исследования на сколах (110), параллельных оси роста структур. На рис.6 представлены расчётные профили распределения примесей в исследуемой структуре, а также измеренные в работе распределения контактной разности потенциалов между зондом и поверхностью (Укрп) на сколе структуры в темноте и освещении белым светом и соответствующий разностный сигнал (фотопотенциал=светло-темно).

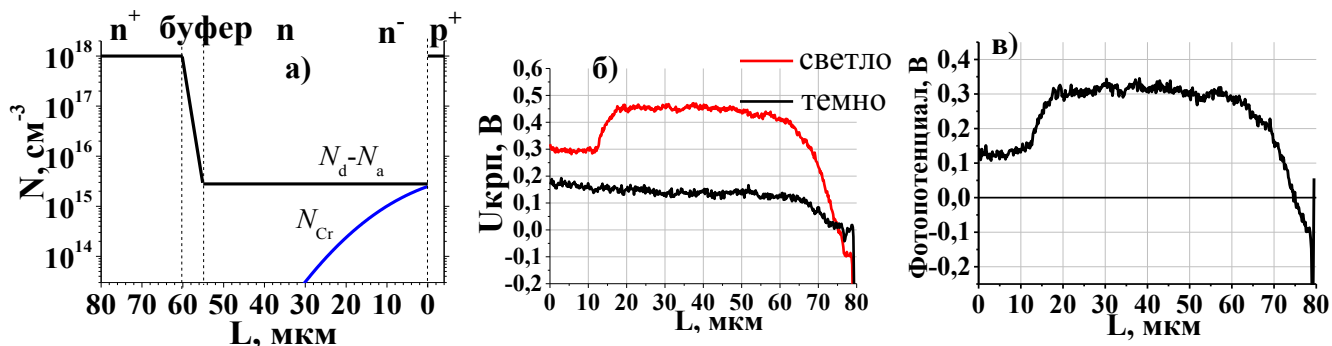


Рис.6 Распределения в вдоль оси исследуемой структуры (а) примесей, б) Укрп «светло» при внешней застветке и «темно» в темноте и в) поверхностного фотопотенциала.

Значение $U_{крп}$ в темноте на переходе от сильно легированной n^+ подложки к n^- слою и далее к поверхностному p^+ слою уменьшается, примерно на 0.2 В. Подобное уменьшение согласуется с известным отличием энергии закрепления уровня Ферми на окисленной поверхности (110) GaAs р и n типа. Вблизи перехода $n^- - p^+$ уменьшение поверхностного потенциала размыто на протяжении 10 – 15 мкм, что естественно объяснить проявлением нарастающей степени компенсации n^- слоя акцепторной примесью Cr. Дополнительная информация о состоянии примесей в изучавшейся структуре была получена при анализе распределения фотопотенциала на поверхности. Отрицательная величина фотопотенциала для освещенной поверхности указывает на р-тип легирования области, а положительная на n-тип. Положение места изменения знака фотопотенциала показало, что диффузия хрома привела к сдвигу границы р-n перехода на 4 мкм вглубь n-слоя по сравнению с положением изначальной эпитаксиальной границы р и n слоёв.

Проводя детальные исследования распределений приложенного обратного напряжения было обнаружено, что эти распределения могут существенно изменяться во времени на протяжении участков поверхности в несколько десятков микрон (рис.7а). Изменение распределений состоит в постепенном уменьшении падения напряжения на $n^- - p^+$ переходе и появлении значительного падения напряжения на $n^+ - n^-$ переходе. Медленный характер изменения распределений, указывает на поверхностную природу наблюдаемого процесса.

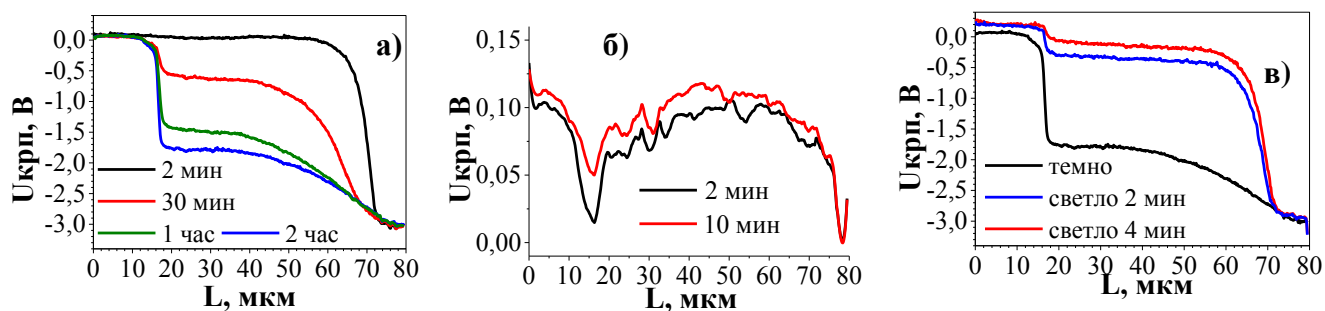


Рис.7 Перераспределение $U_{крп}$ в различных условиях (а) при приложении обратного смещения -3В к p^+ контакту б) последующем заземлении обоих n^+ и p^+ контактов в) освещении при обратном смещении -3В.

Поверхностная природа эффекта была подтверждена при наблюдении поведения распределения потенциалов на поверхности структуры сразу после снятия обратного напряжения и заземления структуры. На рис. 7 б) можно видеть появление в области $n^+ - n^-$ перехода отрицательного «пичка» напряжения, который со временем рассасывается. Отметим, что при наблюдениях на изначально заземленных структурах (рис. 6б) подобные «пички» никогда не возникали. Ещё одним подтверждением поверхностной природы наблюдаемого эффекта являются результаты наблюдений изменения распределения поверхностного потенциала для структуры с приложенным обратным смещением при последующем освещении поверхности светом, вызывающим межзонные переходы в структуре (рис. 7в). Как хорошо видно, освещение поверхности белым светом приводит к падению приложенного напряжения в области $p^+ - n^-$ перехода. Сделанные наблюдения приводят к выводу, что при приложении к структуре обратного смещения в поверхностном оксиде происходит накопление отрицательного заряда в области $n^+ - n^-$ перехода.

Таким образом, применение метода ГКЗМ позволило определить смещенное положение р-n перехода после диффузии хрома в GaAs детекторную структуру. Было показано, что распределение внешнего обратного напряжения на (110) поверхности скола вдоль оси роста GaAs $n^+ - n^- - p^+$ детекторной структуры может значительно отличаться от распределения в ее

объёме. В приповерхностной области основная часть обратного напряжения падает на $n^+ - n^-$ переходе, в объёме структуры – на $n^- - p^+$ переходе, отличие вызвано накоплением на поверхности электронов в области $n^+ - n^-$ перехода при приложении запирающего напряжения.

В третьей и четвертой частях главы изложены результаты КЗМ исследований ИК фотодиодных и светодиодных гетероструктур на основе InAs и родственных соединений. Определены положения p-n и гетеропереходов в InAs/ InAsSb/ InAsSbP/ InAsSb / InAsSbP структуре, что в дальнейшем позволило оптимизировать параметры ИК-фотодиодов. Изучены особенности распределения Укрп при приложении внешних прямых смещений к двухцветной InAsSbP/InAs светодиодной гетероструктуре. Зарегистрировано перераспределение носителей заряда в области p-n перехода и гетерограницы II типа, приводящее к электролюминесценции на двух длинах волн.

Четвертая глава посвящена результатам исследований электрофизических свойств GaAs нанопроводов, а именно: отличий проводимости не легированных и сильно легированных НП в темноте и при межзонном оптическом возбуждении, роли поверхностных состояний, возможности пассивации последних химическими методами.

GaAs НП были выращены на n^+ -GaAs (111)В подложке методом молекулярно-пучковой эпитаксии по механизму пар-жидкость-кристалл. Рост НП происходил преимущественно в направлении (111)В (рис. 8). При этом боковая поверхность НП была огранена плоскостями (110) [4]. На СЭМ изображении на рис. 12 также видно, что некоторые НП росли вдоль направлении (111)А наклонно к подложке под углом 19° .

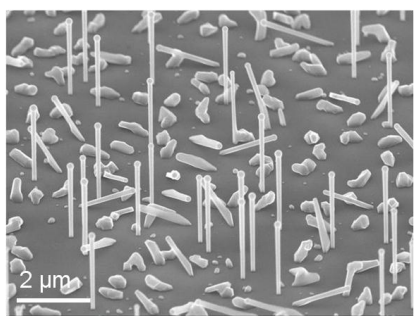


Рис.8 СЭМ изображение массива GaAs НП.

Исследовались специально нелегированные НП с фоновой примесью n-типа на уровне $n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и легированные бериллием $p^+ = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ разных диаметров: $d = 90 - 160 \text{ нм}$. Длина НП составляла $1.2 - 2.5 \text{ мкм}$. Уровень легирования подложки составлял $n^+ = 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

В первой части главы, представлены результаты ГКЗМ исследований НП, перенесенных с ростовой подложки на изолирующую поверхность SiO_2/Si с подведенными к окончаниям НП электрическими контактами. К сожалению, получение омических контактов было затруднительно и, как правило, один или оба контакта имели выпрямляющий характер. Это, однако, позволило сделать важное наблюдение. На рис.9 видно, что приложенное к p^+ GaAs НП внешнее напряжение первоначально равномерно падает вдоль НП, но имеет резкий скачок у одного из контактов, что указывает на формирование здесь Шоттки контакта. Однако, со временем, имеет место перераспределение напряжения вдоль НП, а после снятия внешнего напряжения на поверхности НП остается избыточный потенциал, преимущественно со стороны Шоттки контакта. Затем со временем этот потенциал рассасывается.

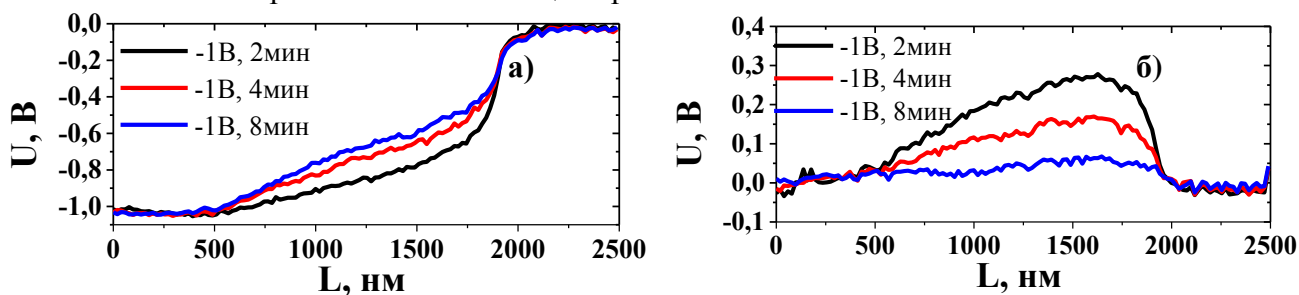


Рис.9 а) Профили распределений приложенного напряжения вдоль GaAs НП, полученные через разные интервалы времени после приложения напряжения б) Спадание во времени профилей наведенного потенциала на поверхности GaAs НП после снятия ранее приложенного напряжения.

Изменение со временем измеряемых профилей напряжений связано с накоплением заряда на боковой окисленной поверхности GaAs-НП. Наблюдаемая ситуация оказывается аналогичной ситуации, обнаруженной выше в Главе 3 для GaAs датчиков рентгеновского излучения. Однако, имеется сильное отличие в последствиях. Если для объемных датчиков накопление заряда на поверхности не оказывало заметного влияния на их работу, то в случае НП происходило существенное изменение вольт-амперных характеристик (ВАХ) НП, а именно: 1) развитие во времени заметного гистерезиса ВАХ и 2) нестандартный вид ВАХ с насыщением прямых веток при увеличении протекающего тока. Похожие эффекты наблюдались и для нелегированных НП.

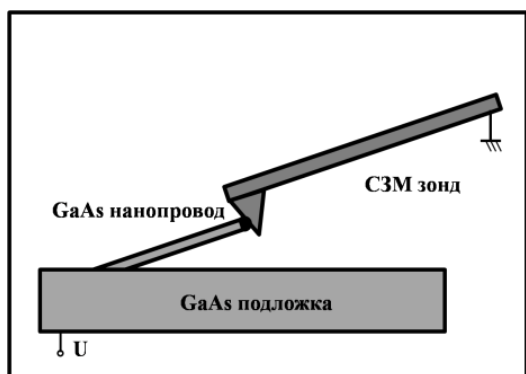


Рис.10 Схема СЗМ эксперимента по получению ВАХ

Вторая часть главы посвящена исследованию транспортных свойств и эффектов химической пассивации GaAs НП. Химическая пассивация осуществляется путем погружения ростовой подложки с НП на ней в специальные растворы. Процедуры последующего перенесения для электрических измерений пассивированных НП на изолирующие подложки и формирования электрических контактов нарушают пассивирующие покрытия. Поэтому эффекты пассивации могут изучаться только на НП на ростовой подложке. Здесь возникает проблема получения устойчивого электрического контакта к

верхнему свободному окончанию НП. Такой контакт, оказалось, можно реализовать в случае наклонно растущих НП. На рис. 10 представлена предложенная схема СЗМ эксперимента по измерению ВАХ НП, которая обеспечивает стабильный электрический контакт: боковая грань пирамиды острия СЗМ зонда прижимается к окончанию НП с определенной силой, увеличивая площадь контакта.

Предложенный способ требовал оценки механической прочности GaAs НП наклоннорастущих на подложке. Были выполнены исследования по изгибу GaAs НП зондом СЗМ вплоть до скалывания НП. Было установлено, что модуль Юнга исследовавшихся НП в 2-3 раза меньше модуля Юнга объемного GaAs, что позволило определить степень изгиба НП, достаточную для получения стабильного контакт с СЗМ зондом без разрушения НП.

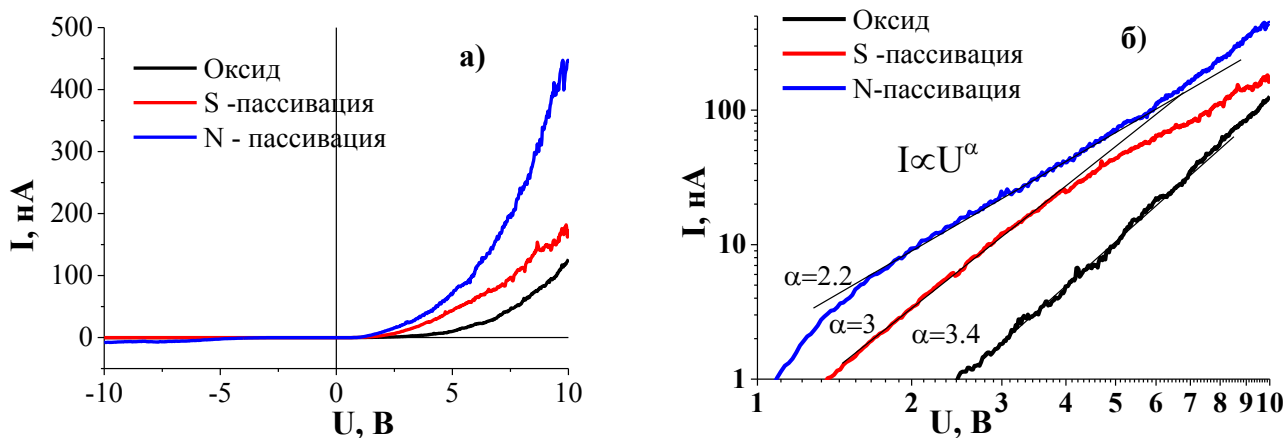


Рис.11 ВАХ полученные с помощью СЗМ зонда для непассивированного, сульфидированного и нитридизированного наклоннорастущего НП диаметром 100 нм. б) Прямые ветви ВАХ построенные в двойных логарифмических осях.

Измерение ВАХ на наклоннорастущих GaAs НП с помощью СЗМ зонда позволяет получать информацию о транспортных свойствах как неpassивированных, так и passивированных НП. Исследовались два типа passивации: сульфидная в растворах сульфида натрия $\text{Na}_2\text{S}^*(9\text{H}_2\text{O})$, и нитридная в гидразинсодержащих растворах $\text{N}_2\text{H}_4:\text{H}_2\text{O}+0.01\text{M Na}_2\text{S}$.

На рис. 11 представлены ВАХ неpassивированного, сульфидированного и нитридного n^- -GaAs НП диаметром 100 нм, растущих на n^+ -GaAs подложке. Из рис. 11 а) следует, что passивация приводит к значительному увеличению тока протекающего через НП, причём нитридная passивация приводит к большему увеличению, чем сульфидная. Также видно, что ВАХ имеет выпрямляющий характер. Для анализа влияния passивации на проводимость НП, рассмотрим прямые ветви ВАХ (0-10В на зонде). При небольших прямых смещениях (< 2 В), определяющим фактором является влияние n^+ - n барьера подложка-НП. Однако с увеличением прямого смещения барьер снижается, и ход ВАХ уже обуславливается механизмами токопротекания непосредственно в НП. Можно заметить, что ВАХ имеют степенной вид и для удобства интерпретации прямые ветви ВАХ построены в двойных логарифмических осях (рис. 11 б). В диапазоне напряжений 2-6 Вольт ВАХ имеют степенной вид с различными показателями степени α , отклонение от степенного закона при больших напряжениях обусловлено последовательным сопротивлением СЗМ зонда (10 -30 МОм).

Поскольку ток зависит от напряжения по степенному закону ($I \approx U^\alpha$ $\alpha=1+T_c/T$, где T_c – температура, характеризующая ширину энергетического распределения поверхностных состояний), то для дальнейшего анализа применим модель для токов ограниченных пространственным зарядом [5,6]. Подобная модель хорошо описывает процессы токопротекания, при которых количество инжектированных из контактов носителей заряда превышает собственную концентрацию. Такая ситуация характерна для диэлектриков и слаболегированных полупроводников. Причём, $\alpha=2$ если не происходит захвата инжектированных носителей на ловушки в объёме или на поверхности. Из графика (рис. 11 б) следует, что passивация приводит к снижению показателя степени α , характеризующего энергетическое распределение поверхностных состояний. Статистическая обработка результатов нескольких десятков измерений НП различного диаметра показала что, значение α для неpassивированных НП составляет 4 ± 1 , для сульфидированных - 3.2 ± 0.4 , нитридированных 2.4 ± 0.4 . Отметим, что после нитридной passивации $\alpha \approx 2$, что говорит о существенном снижении влияния поверхностных состояний на проводимость. Таким образом, увеличение проводимости и уменьшение коэффициента α , в n^- -GaAs НП после сульфидной и ещё большее после нитридной passивации связано со значительным уменьшением плотности поверхностных состояний и уменьшением ширины их энергетического спектра.

Важным параметром является стабильность passивированного покрытия при длительном хранении в атмосферных условиях. С целью проверки временной стабильности нитридного и сульфидного покрытия спустя полгода после проведения passивации были выполнены повторные исследования. Исследования показали, что сульфидное покрытие полностью деградировало и коэффициент α достигал значений соответствующих неpassивированным НП ($\alpha=4$). Нитридное покрытие практически не деградирует, что подтверждается незначительным увеличением $\alpha=2.6 \pm 0.4$, против 2.4 ± 0.4 для случая «свежих» образцов.

Аналогичные исследования проводимости p^+ -GaAs НП не выявили степенной зависимости ВАХ, что указывало на наличие в НП необеднённого носителями канала проводимости. К сожалению, сравнение проводимости passивированных и неpassивированных НП было затруднено, поскольку последовательное сопротивление СЗМ зонда оказалось больше

сопротивления НП.

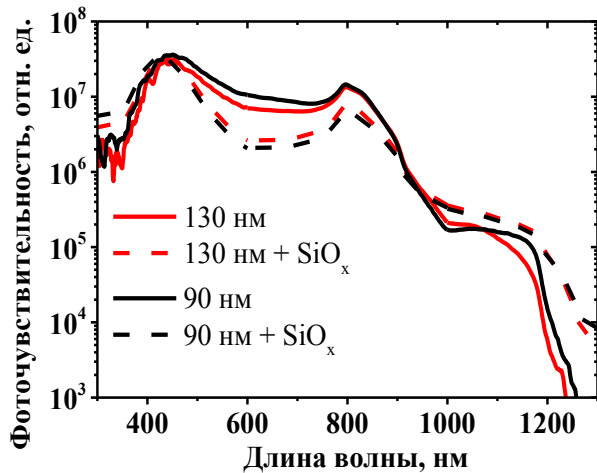


Рис.12 Спектры фотопроводимости GaAs n-НП диаметрами 90 и 130 нм с SiO_x покрытием и без него.

соответствующей ширине запрещенной зоны GaAs $E_g \approx 1,41$ эВ (300 К). Естественно связать ФП исследуемой структуры в спектральной области $\lambda < 900$ нм с межзонным оптическим поглощением в НП GaAs.

Также в спектрах ФП наблюдается второй порог в области $\lambda = 1000 \div 1150$ нм с краем, соответствующим ширине запрещенной зоны Si $E_g \approx 1,11$ эВ (300 К). Появление этого порога следует, очевидно, связать с влиянием изменения потенциала поверхности подложки SiO₂/Si, в результате собственного оптического поглощения в Si (поверхностной фотоЭДС). Отсюда следует, что потенциал поверхности подложки SiO₂/Si выполняет роль активного затвора в полевом транзисторе на базе НП на SiO₂/Si. Влияние этого потенциала может подавляться под действием оптического поглощения в Si.

На рис. 13 приведены зависимости сопротивления НП GaAs R от мощности фотовозбуждения P при возбуждении лазерами с длинами волн излучения $\lambda = 473$ нм, 632 нм и 785 нм.

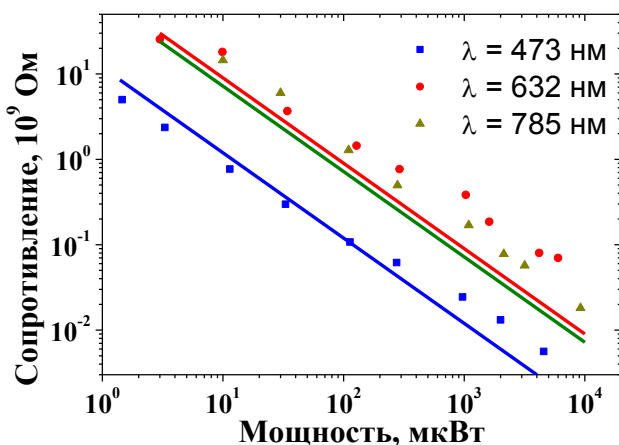


Рис.13 Экспериментальные и расчётные(сплошные линии) зависимости сопротивления НП с SiO_x покрытием от мощности лазерного излучения для трёх длин волн.

экспериментальных данных (Рис.13) была оценена скорость поверхностной рекомбинации в GaAs НП с SiO_x покрытием, которая составила $S_r \sim 10^5$ см·с⁻¹, что согласуется с известными

В заключительной части главы представлены результаты исследований фотопроводимости (ФП) GaAs НП. Были проведены исследования ФП индивидуальных НП GaAs, осаждённых на подложки SiO₂/Si с электрическими контактами к концам НП. Исследовались спектры ФП (300 К) НП различного диаметра, а также зависимость ФП от интенсивности фотовозбуждения и покрытия защитным слоем SiO_x.

На рис. 12 приведены спектры ФП (300 К) НП GaAs. На спектрах наблюдается порог вблизи $\lambda = 850 \div 900$ нм,

В слабелегированных НП приповерхностная ОПЗ занимает весь объём НП, и фотогенерируемые носители заряда выталкиваются на поверхность НП и рекомбинируют [7]. Поэтому, скорость поверхностной рекомбинации (S_r) в значительной степени влияет на фотопроводимость слабелегированных НП. На основе уравнения непрерывности было выведено выражение, позволяющее оценить скорость поверхностной рекомбинации

$$S_r = \frac{\pi e \alpha_0 \mu I_0 r^3 R}{2 \ell} - \text{где } I_0 - \text{интенсивность, } \alpha_0 -$$

коэффициент поглощения, μ – подвижность, ℓ – длина НП, r – радиус НП. Исходя из

литературными данными для границы SiO_2/GaAs [8]. На рис. 13 так же приведены расчётные зависимости $R(P)$ для соответствующих длин волн. Качественно экспериментальные зависимости $R(P)$ согласуются с расчётными, однако наклон экспериментальных кривых несколько меньше, чем у расчётных. Количественное согласие расчёта и эксперимента лучше при низких уровнях фотовозбуждения. Расхождение экспериментальных и расчётных зависимостей $R(P)$ в области сильного фотовозбуждения может быть связано с увеличением скорости объёмной рекомбинации избыточных носителей в НП при высоких уровнях фотовозбуждения, когда поверхностный барьер спрямляется. Сдвиг зависимостей $R(P)$ для различных значений λ относительно друг друга по оси ординат обусловлен различием α_0 для различных длин волн.

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. Методы Кельвин-зонд микроскопии позволяют одновременно и независимо исследовать латеральную диффузию и туннелирование в подложку локально инжектированных зарядов в отдельных слоях многослойных диэлектрических наноструктур.
2. Для слоев SiO_2 , Si_3N_4 и LaScO_3 на подложке Si были изучены механизмы транспорта локально инжектированных зарядов и определены параметры латеральной диффузии зарядов.
3. Скорость диффузии локально инжектированных зарядов в нанотонких $\text{high-}k$ диэлектрических слоях LaScO_3 , на кремниевой подложке на порядок меньше скорости диффузии инжектированных зарядов в слоях SiO_2 и Si_3N_4 . Наличие на интерфейсе LaScO_3/Si переходного слоя SiO_x значительно ускоряет утечку зарядов из слоя LaScO_3 в Si подложку.
4. Для получения корректных данных о поведении локальных зарядов в однослойных и многослойных диэлектрических наноструктурах методами КЗМ исследования должны проводиться в условиях нейтрализующих влияние поверхностной водной плёнки.
5. Для nano тонких слоев Si_3N_4 на подложке кремния было обнаружено ускорение латеральной диффузии зарядов после длительного хранения слоев в атмосферных условиях. Обнаруженный эффект связывается с частичным окислением слоя.
6. Обнаружен эффект накопления электронов на поверхности скола структуры $\text{n}^+ - \text{n}^- - \text{p}^+$ $\text{GaAs}(110)$ вблизи выхода на поверхность перехода $\text{n}^+ - \text{n}^-$ при приложении к структуре запирающего напряжения. Наблюдалось накопление электронов, приводящее к, практически, полному экранированию приложенного поля на n^- и p^+ участках поверхности. Найденное накопление электронов на поверхности связывается с отсутствием поверхностной проводимости по полностью заполненным состояниям на n^+ участке поверхности.
7. Выполнены исследования распределений встроенных и приложенных извне электрических полей в фотодиодах и светодиодах для средней ИК области спектра на основе полупроводниковых гетероструктур в системе InAs и близких твердых растворов. Результаты исследований позволили получить информацию о реально реализуемом распределении электрических полей и способствовали оптимизации свойств создаваемых приборов.
8. Выполнены АСМ исследования морфологии и шероховатости нанометрового диапазона зеркал мощных полупроводниковых лазеров на основе $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$ гетероструктур, подвергнутых различной поверхностной обработке. Выбор оптимальной процедуры обработки (плазме аргона + плазма азота + Si_3N_4) позволил увеличить выходную оптическую мощность в 2 раза до 120 Вт в непрерывном режиме.
9. Обнаружено накопление дырок на (110) поверхности GaAs НП в области Шоттки барьера при приложении запирающего напряжения. Аккумулируемый заряд приводит к изменению высоты барьера контакт-НП и возникновению гистерезиса ВАХ.

10. Разработана СЗМ методика измерения модуля Юнга GaAs НП, сохраняющих контакт с ростовой подложкой. Измеренные для изучавшихся НП значения оказались в 2-3 раза меньше значений модуля Юнга объёмного GaAs. Обнаруженные отличия связываются с наличием дефектов упаковки в исследуемых нанопроводах

11. Разработан способ СЗМ измерений влияния пассивации поверхности на электрофизические свойства GaAs НП, сохраняющих ростовой контакт с подложкой.

12. Применена новая нитридная пассивация в гидразин содержащих растворах, которая оказалась более эффективной, чем известные методики сульфидной пассивации. При нитридной пассивации наблюдалось более сильное увеличение проводимости нанопроводов и долгое (более 6 месяцев) сохранение эффекта при хранении образцов в атмосферных условиях.

13. Увеличение проводимости сильнолегированных НП после пассивации обусловлено происходящим увеличением диаметра проводящего канала в НП. Пассивация слаболегированных НП, не создаёт канала проводимости, необеднённых носителями заряда, и увеличение проводимости обусловлено снижением плотности поверхностных состояний, на которые захватываются инжектированные из контактов носители заряда.

14. Фотопроводимость сильнолегированных GaAs НП обусловлена расширением канала проводимости в НП, тогда как фотопроводимость НП, обеднённых носителями заряда, определяется снижением скорости поверхностной рекомбинации фотовозбуждённых носителей на поверхности НП.

15. Обнаружен эффект изменения проводимости GaAs НП на SiO₂/Si подложке при фотовозбуждении в спектральной области собственного поглощения Si. Эффект объясняется изменением поверхностного потенциала подложки SiO₂/Si при освещении. Отсюда следует, что подложка SiO₂/Si может играть роль управляющего затвора в транзисторе GaAs НП/ SiO₂/Si.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих печатных работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Импульсные полупроводниковые лазеры с повышенной оптической прочностью выходных зеркал резонатора / Петрунов А.Н., Подоскин А.А., Шашкин И.С., Слипченко С.О., Пихтин Н.А., Налет Т.А., Фетисова Н.В., Вавилова Л.С., Лютецкий А.В., Алексеев П.А., Титков А.Н., Тарасов И.С. // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, Вып. 6. – С. 817-821.

2. Фотодиоды с расширенным спектральным диапазоном 1.5-4.8 мкм на основе гетероструктур InAs/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP, работающие при комнатной температуре / Старостенко Д.А., Шерстнев В.В., Алексеев П.А., Андреев И.А., Ильинская Н.Д., Коновалов Г.Г., Серебренникова О.Ю., Яковлев Ю.П. // Письма в журнал технической физики. – 2011. – Т. 37, Вып. 19. – С. 95-103.

3. Kelvin probe force gradient microscopy of charge dissipation in nano thin dielectric layers (Градиентная Кельвин-зонд микроскопия распространения зарядов в нанотонких диэлектрических слоях) / Dunaevskiy M.S., Alekseev P.A., Girard P., Lahderanta E., Lashkul A., Titkov A.N. // Journal of Applied Physics. – 2011. – V. 110. – P. 084304.

4. Analysis of the lateral resolution of electrostatic force gradient microscopy (Анализ латерального разрешения электростатической силовой микроскопии) / Dunaevskiy M., Alekseev P., Girard P., Lashkul A., Lahderanta E., Titkov A. // Journal of Applied Physics. – 2012. – V. 112. – P. 064112.

5. Определение модуля Юнга нанопроводов GaAs, наклонно растущих на подложке / Алексеев П.А., Дунаевский М.С., Стовпяга А.В., Lepsa M, Титков А.Н. // Физика и техника

полупроводников. – 2012. – Т. 46, Вып. 5. – С. 659-664.

6. Накопление заряда на поверхности GaAs нанопроводов вблизи контакта Шоттки/ Дунаевский М.С., Алексеев П.А., Lepsa M.I., Gruetzmacher D. Титков А.Н., // Письма в журнал технической физики. – 2013. – Т. 39, Вып.4. – С. 53-60.

7. Двухцветная люминесценция в одиночной гетероструктуре II типа InAsSbP/InAs / Григорьев М.М., Алексеев П.А., Иванов Э.В., Моисеев К.Д.// Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, Вып. 1. – С. 30-35.

8. Поведение локально инжектированных зарядов в нанотонких слоях high-k диэлектрика LaScO₃ на подложке Si/ Алексеев П.А., Дунаевский М.С., Гущина Е.В., Durgun-Ozben E., Lahderanta E., Титков А.Н.// Письма в журнал технической физики. – 2013. – Т. 39, Вып.9. – С. 47-55.

9. Фотопроводимость нитевидных нанокристаллов GaAs/Алексеев П.А., Дунаевский М.С., Марычев М.О., Нежданов А.В., Lepsa M.I., Gruetzmacher D. Титков А.Н.// Вестник Нижегородского университета– 2013. – Т. 2, Вып. 2. – С. 39-44.

Материалы конференций

Перечислены наиболее важные

1. Электростатическая силовая микроскопия распределения электрических полей в датчиках рентгеновского излучения на основе арсенида галлия, легированного хромом /Алексеев П.А.// "Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов в области нанотехнологий и наноматериалов". Сборник студенческих научных работ. Москва: НИЯУ МИФИ, 2010, с. 307-313

2. Наблюдение эффектов дрейфа и аккумуляции электронов на поверхности n-GaAs методом Кельвин-зонд микроскопии в градиентной моде/ Алексеев П.А., Дунаевский М.С., Титков А.Н.// Нанопизика и наноэлектроника. Труды XV международного симпозиума 14-18 марта 2011 года. Нижний Новгород.: изд-во ИПФ РАН, 2011, том 2, с.556-557.

3. Effect of surface passivation on the conductivity of unintentionally doped GaAs nanowires (Влияние пассивации поверхности на проводимость слаболегированных GaAs нанопроводов) / Алексеев П.А., Дунаевский М.С., Львова Т.В., Улин В.П., Lepsa M.I., Gruetzmacher D., Титков А.Н. // NANOSTRUCTURES:PHYSICS AND TECHNOLOGY 21th International Symposium Saint-Petersburg, Russia, June 24–28, 2013 proceedings. СПб: Изд-во СПбАУ РАН, 2013, с.210-212

Список литературы:

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород: ИФМРАН, 2004

2. Girard P., Titkov A.N., (ed. Bhushan B., Fuchs H.). Applied Scanning Probe methods II, Springer, Heidelberg, 2006, pp. 283–320.

3. Lopes J.M.J., Littmark U., Roeckerath M., et. al// Jour. Appl. Phys. 101, 104109 (2007).

4. Rieger T., Heiderich S., Lenk S., et al.// J. Cryst. Growth. 353, 39-46 (2012)

5. Schricker A.D., Davidson F.M., Wiacek R.J.//Nanotechnology 17 2681–2688 (2006)

6. Rose A.// Physical Review, 97, p 1538 (1955)

7. Demichel O., Heiss M., Bleuse J., et al.// Appl. Phys. Lett. 97,201907 (2010)

8. Карпович И. А., Степихова М. В. // ФТП. 32. 182–186 (1998)