

На правах рукописи



Шугуров Константин Юрьевич

**Нитевидные нанокристаллы нитрида галлия на кремнии: свойства и приборное применение**

Специальность: 1.3.2 (01.04.01)  
Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук».

**Научный руководитель:**

Мухин Иван Сергеевич

Доктор физико-математических наук, директор  
Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого (СПбПУ)

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, заведующий кафедрой  
Фотоники Санкт-Петербургского государственного  
электротехнического университета имени В.И. Ленина

Тарасов Сергей Анатольевич

Кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник лаборатории Нанопотоники Физико-  
технического института им. А.Ф. Иоффе

Малеев Николай Анатольевич

**Ведущая организация:**

Национальный исследовательский технологический университет НИТУ «МИСИС».

Защита состоится 30.01.2023 г. в 11:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.1.029.01 на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН) по адресу: 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ИАП РАН по тому же адресу и на сайте в сети Интернет:

Отзывы на диссертацию и автореферат направлять по адресу: 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А.

Автореферат разослан

«\_\_\_»

2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



А.Л. Буляница

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Растущие требования, предъявляемые к выходным характеристикам электронных устройств, стимулируют поиски путей совершенствования и улучшения электронных компонентов. На сегодняшний день основным материалом полупроводниковой промышленности и электроники является кремний (Si), однако, ввиду фундаментальных ограничений, возможности приборов на его основе ограничены. Таким образом, для дальнейшего развития данного направления необходимо привлечение новой материальной базы.

Одним из материалов, способных уже в обозримом будущем составить серьёзную конкуренцию кремнию, является нитрид галлия (GaN) – широкозонный полупроводник, обладающий высокой термической, химической и радиационной стойкостью. Его фундаментальный потенциал делает возможным работу электронных компонентов в неблагоприятных условиях и агрессивных средах, а также позволяет осуществлять модернизацию электронной компонентной базы (ЭКБ) в первую очередь в области силовой, сверхвысокочастотной (СВЧ) и оптоэлектроники. Важно отметить, что на базе GaN был создан первый мощный светодиод синего и ультрафиолетового (УФ) излучения, что в итоге привело к революции в области энергоэффективного освещения, а в 2014 году ознаменовалось Нобелевской премией по физике. Несмотря на значительный успех в освоении GaN и коммерческую доступность ряда компонентов на его основе, стремительное внедрение GaN в гражданскую индустрию сдерживается экономическими и технологическими факторами. Это обусловлено использованием дорогостоящих ростовых подложек (SiC, сапфир) и, что более важно, необходимостью наращивания буферных слоёв для компенсации решёточного рассогласования GaN с материалом подложки. Синтез на кремнии является наиболее перспективным с экономической точки зрения вариантом, однако, из-за всё тех же технологических сложностей конечная стоимость продукции остаётся весьма высокой, а «собственные» подложки GaN очень дороги и массово недоступны [1]. Более того, получение высококачественных гетероэпитаксиальных слоёв GaN до сих пор остаётся актуальной проблемой [2], что препятствует активному совершенствованию электронных компонентов.

Сложившиеся ограничения могут быть преодолены посредством перехода от классических планарных структур к нитевидным нанокристаллам (ННК), которые благодаря своей геометрии обладают рядом уникальных свойств и преимуществ. Во-первых, кристаллическое качество синтезируемых GaN ННК значительно превосходит качество планарных слоёв [3]. Возникающие во время синтеза механические напряжения в ННК

эффективно релаксируются на боковой поверхности, поэтому данные наноструктуры практически не имеют дислокационных дефектов и могут быть синтезированы без использования буферных слоёв даже на подложках с существенным рассогласованием по параметру кристаллической решётки [4]. Во-вторых, морфологические особенности ННК позволяют эффективно отводить тепло от кристалла за счёт развитой боковой поверхности. В-третьих, субмикронные поперечные размеры ННК (обычно порядка 100 – 200 нм) обуславливают сверхмалые величины электрической ёмкости полупроводникового прибора, что немаловажно для обеспечения быстродействия приборных структур на их основе [5]. Таким образом, GaN ННК сохраняют возможность экономически обоснованной интеграции с кремнием, при этом устраняя ряд ключевых преград, препятствующих широкой доступности GaN-компонентов. Более того, концепция приборов на основе ННК открывает новые перспективы и возможности в совершенствовании существующей ЭКБ.

Несмотря на множество исследований, посвященных созданию на базе GaN ННК различных полупроводниковых приборов, в случае системы GaN ННК/Si недостаточное внимание уделено соответствующему гетеропереходу, который, являясь составной частью структуры, может оказывать существенное влияние на её выходные характеристики. С другой стороны, при рассмотрении одиночных GaN ННК неизученными остаются их возможности по коммутации высоких токовых нагрузок, что важно для силовой электроники. Кроме того, в плоскости таких значимых компонентов, как, например, диодов Шоттки, не исследованы частотные возможности диодов в конфигурации ННК.

Таким образом, исследование свойств GaN ННК и гетероперехода GaN ННК/Si является **актуальным** для дальнейшего создания современных полупроводниковых приборов и совершенствования их характеристик. Кроме того, в России технологии создания ЭКБ относятся к критическим, что дополнительно подчёркивает **важность и значимость** исследований в данной области.

### **Цель работы**

Исследование транспортных свойств гетероперехода GaN ННК/Si и одиночных GaN ННК для создания на их основе диодов Шоттки.

### **Задачи работы:**

- 1) Разработать технологический цикл и развить методы постростовой обработки структур GaN ННК/Si, а также исследовать влияние различных затравочных слоёв на их транспортные характеристики;
- 2) Составить физическую модель и провести численный расчёт приборных характеристик диода Шоттки на основе одиночного GaN ННК;

- 3) Развить методы формирования электрических контактов к одиночным GaN ННК, перенесённым на вспомогательную непроводящую подложку;
- 4) Исследовать транспортные свойства одиночных GaN ННК в условиях высоких токовых нагрузок для силовых полупроводниковых приборов;
- 5) Разработать топологию контактных площадок и технологическую карту изготовления диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК;
- 6) Изготовить серию диодов Шоттки и определить их частотные характеристики.

**Научная новизна** работы обусловлена использованием нового, активно исследуемого, но пока не получившего широкого распространения в производстве ЭКБ материала – нитрида галлия, а также реализацией на его основе полупроводникового прибора со структурой комбинированной размерности (квазиодномерная/планарная). Также в работе:

- 1) Впервые продемонстрировано улучшение диодных характеристик гетероинтерфейса *n*-GaN ННК/*p*-Si за счёт обработки в водородной плазме;
- 2) Впервые продемонстрирована способность одиночных GaN ННК коммутировать токи плотностью  $1.7 \pm 0.3$  МА/см<sup>2</sup> в импульсном режиме для приложений силовой электроники;
- 3) При помощи численного моделирования исследованы свойства контакта GaN ННК/Au и впервые показано, что диод Шоттки на основе одиночного GaN ННК достигает субтерагерцовых частот отсечки;
- 4) Изготовлены диоды Шоттки на основе одиночных GaN ННК и впервые экспериментально продемонстрировано достижение частоты отсечки  $165.8 \pm 1.5$  ГГц.

### **Практическая значимость**

Результаты, полученные в рамках данной работы, могут лечь в основу дальнейших исследований полупроводниковых приборов на базе ННК, а также могут быть использованы отечественными предприятиями для внедрения новых подходов к созданию электронных компонентов, обладающих улучшенными характеристиками по сравнению с уже производимыми на данный момент. В частности, предложена конструкция диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК, достигающих субтерагерцовых частот отсечки. В России, в том числе и Санкт-Петербурге, располагается ряд предприятий, занимающихся исследованиями, разработкой и производством электронных компонентов для различных отраслей промышленности, разработка и производство продукции в которых осуществляется по полному циклу «исследование — разработка — производство — реализация». Продукция предприятий используется в аппаратуре радиосвязи, радиолокации, телевидения, медицины, бытовой техники.

**Положения, выносимые на защиту**

1. Гетероструктуры *n*-GaN ННК/*p*-Si, в которых GaN ННК синтезированы без затравочного слоя, при обработке в плазме водорода с плотностью мощности 2 мВт/см<sup>3</sup>, давлением 0.5 Торр, температуре 350 °С и в интервале 1 – 20 минут демонстрируют уменьшение темнового обратного тока более чем на порядок; длительность обработки, при котором наблюдается снижение обратного тока более чем на 3 порядка, составляет 10 минут;
2. Экспериментально продемонстрировано, что отделённые от ростовой подложки кремния одиночные нитевидные нанокристаллы GaN, синтезированные методом молекулярно-пучковой эпитаксии, обеспечивают коммутацию токов плотностью  $1.7 \pm 0.3$  МА/см<sup>2</sup> в импульсном режиме с длиной импульса 1 мс и коэффициентом заполнения 0.001;
3. В соответствии с результатами численного моделирования диод Шоттки, образованный одиночным GaN ННК диаметром 200 нм, уровнем легирования  $1 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup> и торцевым Au-контактом, а также находящийся при нулевом смещении по напряжению имеет частоту отсечки в диапазоне от 100 до 300 ГГц при длине ННК от 0.5 до 3 мкм. Частота отсечки от 200 до 400 ГГц достигается для диодов Шоттки на основе GaN ННК такого же диаметра и длине 2 мкм с уровнем легирования, лежащим в диапазоне  $10^{17}$  –  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>;
4. Диоды Шоттки на основе одиночных нитевидных нанокристаллов GaN легированных кремнием на уровне  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремнии, достигают частот отсечки  $165.8 \pm 1.5$  ГГц.

**Личный вклад автора** заключается в разработке и реализации ряда технологических процессов постростовой обработки полупроводниковых структур на основе одиночных ННК, а также их массивов. Разработана математическая модель для описания частотных характеристик диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК. Все результаты экспериментальных и теоретических исследований, отраженных в данной диссертационной работе, обработаны и получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

**Достоверность** полученных экспериментальных результатов не вызывает сомнений благодаря широкому использованию современной приборно-технологической базы, методов физического эксперимента, повторяемостью и воспроизводимостью получаемых экспериментальных данных. Достоверность результатов и выводов подтверждается их активным обсуждением на всероссийских и международных конференциях, публикациями в престижных

рецензируемых международных журналах, а также согласованностью с имеющимися литературными данными.

### **Апробация результатов работы**

По материалам диссертации сделано 11 докладов на всероссийских и международных конференциях:

- 1) Международная конференция Физика.СПб, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 24.10.2017 – 26.10.2017, «Исследование электрических и спектральных характеристик GaN/Si солнечных элементов при различной подготовке интерфейсов»;
- 2) 5th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2018», Санкт-Петербургский Академический Университет РАН, 02.04.2018 – 05.04.2018, «Influence of hydrogen plasma passivation on electrical and spectral characteristics of GaN nanowires / Si solar cells»;
- 3) Международная конференция Физика.СПб, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 22.10.2019 – 24.10.2019, «Исследование режимов водородной пассивации гетероинтерфейса GaN ННК/Si»;
- 4) 6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2019», Санкт-Петербургский Академический Университет РАН, 22.04.2019 – 25.04.2019, «Hydrogen passivation effect on performance of GaN NWs/Si photovoltaic heterostructures»;
- 5) 7th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2020», Санкт-Петербургский Академический Университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, 27.04.2020 – 30.04.2020, «Numerical study of Schottky diode based on single GaN NW on Si»;
- 6) 8th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2021», НИУ ВШЭ (Санкт-Петербург), 25.05.2021 – 28.05.2021, «Single GaN nanowires for high current commutation devices»;
- 7) 9th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2022», НИУ ВШЭ (Санкт-Петербург), 24.05.2022 – 27.05.2022, «Microwave Schottky diodes based on single GaN nanowires»;
- 8) Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных учёных) ФОТОНИКА 2021, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, 04.10.2021 – 08.10.2021, «Исследование работы диода Ганна в рамках новой многодолинной модели зоны проводимости»;
- 9) 19-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербургский

Академический Университет РАН, 27.11.2017 – 01.12.2017, «Влияние способа подготовки интерфейсного слоя на электрические и спектральные характеристики GaN/Si солнечных элементов»;

10) 20-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербургский Академический Университет РАН, 26.11.2018 – 30.11.2018, «GaN ННК/Si солнечный элемент: численное моделирование, синтез и характеристика»;

11) 21-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербургский Академический Университет РАН, 25.11.2019 – 29.11.2019, «Исследование эффектов объёмной неустойчивости в одиночных GaN ННК в сильных электрических полях».

### **Публикации**

В рамках диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, входящих в перечень, рекомендуемых ВАК, а также индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Объём диссертации составляет 146 страниц печатного текста и содержит 57 рисунков, 9 таблиц и списка литературы из 242 источников.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обосновывается актуальность научного исследования, указывается научная новизна и практическая значимость работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения о структуре и объёме диссертации, а также апробации результатов исследования.

В **первой главе** приведён литературный обзор по теме диссертации. Представлена краткая историческая хронология исследований, посвященных нитриду галлия, отмечаются его свойства, особенности и преимущества перед другими полупроводниками, обосновывается интерес к нему научного сообщества. Рассматриваются проблемы, связанные с синтезом GaN и, как следствие, препятствующие его активному внедрению в индустрию. Отмечено, что за последние 20 лет GaN-технология существенно развилась, и сейчас коммерческую доступность имеет ряд компонентов, начиная от различных оптоэлектронных приборов и заканчивая



мощными СВЧ интегральными схемами. Однако, из-за технологических и экономических аспектов проблема получения высококачественных слоёв на основе GaN остаётся актуальной и по сей день. В данной главе также обосновывается перспективы перехода от планарной геометрии полупроводниковых структур к геометрии ННК, приводится подробное описание их свойств на примере конкретных прикладных возможностей. Указывается, что GaN ННК сохраняют потенциал экономически обоснованной интеграции с кремнием, при этом устраняя ряд ключевых преград, ограничивающих широкую доступность GaN-компонентов, а также позволяя концептуально расширить возможности устройств на их основе. В завершающей части главы внимание акцентируется на аспектах, которые в отношении GaN ННК и системы GaN ННК/Si остаются неизученными или без должного рассмотрения, и которые важны для дальнейшего совершенствования полупроводниковых приборов.

**Вторая глава** посвящена технологическим и экспериментальным методам, использованным в ходе выполнения диссертационной работы. Приведено краткое описание основного оборудования, в том числе, установок лазерной литографии, вакуумного осаждения, плазменной и термической обработки, задействованных в постростовом цикле подготовки полупроводниковых структур.

**Третья глава** посвящена исследованию транспортных свойств гетероинтерфейса *n*-GaN ННК/*p*-Si, где ННК были синтезированы на различных затравочных слоях: Si (без затравки), SiN<sub>x</sub>, AlN, GaO<sub>x</sub>, 0.3, 0.6 и 2 монослоя (МС) Ga. Приводится детальное описание разработанного технологического цикла постростовой подготовки структур на базе массива GaN ННК (рисунок 1), включающее формирование нижнего контакта (Al) к Si-подложке, слоя диэлектрика между ННК и верхним контактом (ITO) к вершинам ННК.

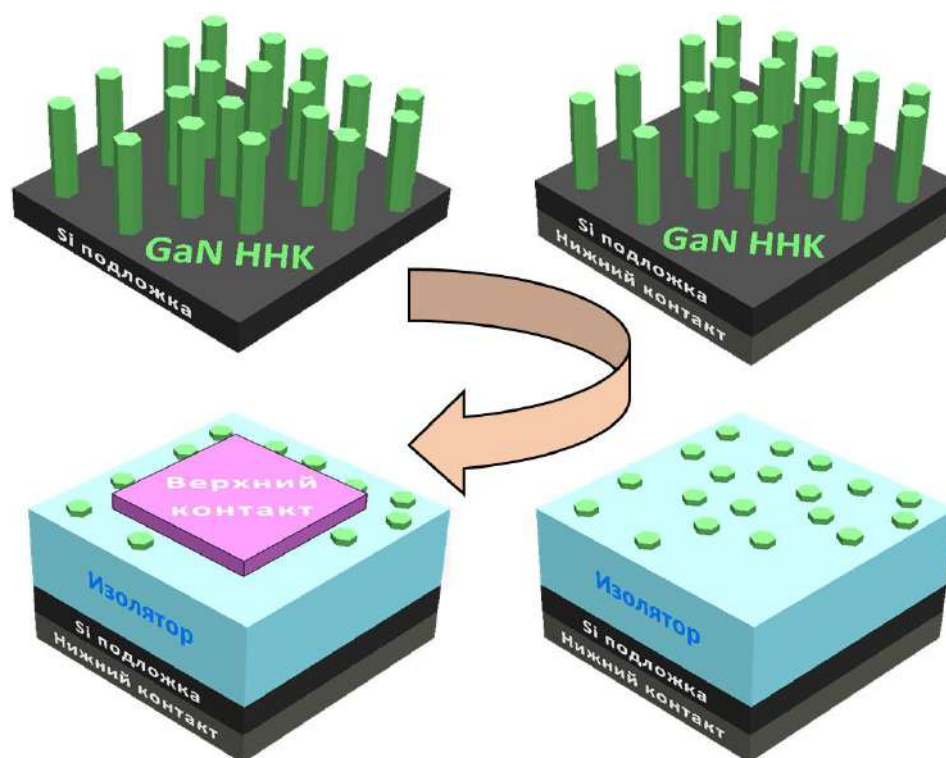


Рисунок 1 – Краткая технологическая карта постростовой обработки структур GaN HNK/Si

При этом в качестве изолятора использовалась непроводящая прозрачная фотоотверждаемая эпоксидная смола SU-8, которая в рамках поставленных задач позволила не только упростить технологическую карту подготовки структур, но по ряду параметров даже превзойти традиционные материалы, используемые в полупроводниковой промышленности.

Для выявления наличия потенциального барьера на интерфейсе GaN HNK/ITO использовался метод электронной микроскопии наведённого тока (ЕВИС), который позволяет визуализировать наличие встроенных электрических полей и, следовательно, потенциальных барьеров в области гетероинтерфейсов. В соответствии с полученными данными было установлено отсутствие особенностей ЕВИС-сигнала в области интерфейса *n*-GaN/ITO, что свидетельствовало об омическом поведении данного контакта.

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) изготовленных образцов показали, что транспортные свойства гетероинтерфейса GaN HNK/Si в значительной степени зависят от выбора затравочного слоя (рисунок 2). Структура с затравочным слоем GaO<sub>x</sub> продемонстрировала наименьший уровень утечек, в то время как для всех остальных структур соответствующий уровень был значителен. Установлено, что наибольший уровень утечек соответствует структурам с затравочными слоями AlN и 2 монослоя (МС) Ga, что вызвано паразитной диффузией атомов Al и Ga в подложку и её легированием, а также возможным образованием дефектов в области гетероинтерфейса. Также было обнаружено, что снижение количества галлия в затравочном слое сопровождается снижением утечек.

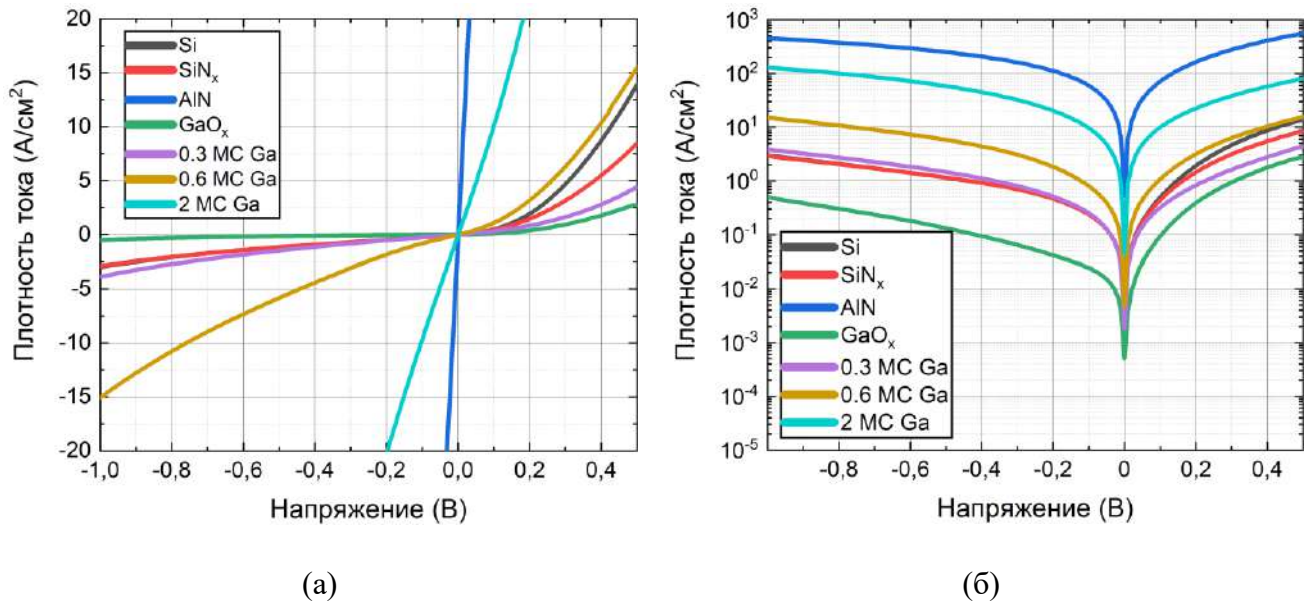


Рисунок 2 – Темновые ВАХ исследованных образцов, соответствующих различным затравочным слоям, в линейном (а) и полулогарифмическом (б) масштабе. Ток нормирован на совокупную площадь гетероинтерфейса

Было проведено исследование влияния предварительной обработки гетероструктур в плазме водорода на их транспортные характеристики. Водородная обработка является широко используемым методом снижения числа поверхностных состояний и дефектов в объёме кремния, а также применяется как в микроэлектронике, например, для формирования высококачественных МОП-структур [6], так и в фотовольтаике – для создания высокоэффективных кремниевых фотопреобразователей [7]. Экспериментально показано, что данный метод обеспечивает существенное улучшение диодных характеристик гетероперехода *n*-GaN ННК/*p*-Si. Для всех структур обратный темновой ток снизился более чем на порядок, за исключением структуры с затравочным слоем AlN. В ходе более детального исследования было обнаружено, что для структуры без затравочного слоя оптимальное время обработки составляет порядка 10 минут. При этом наблюдалось снижение обратного темнового тока более чем на 3 порядка, а также наибольший уровень фототока (рисунок 3) в рамках рассмотренного временного интервала. Дальнейшее увеличение длительности обработки приводило к постепенной деградации структур, сопровождающейся снижением фототока, ростом утечек и вызванной, предположительно, накоплением водорода в подложке Si.

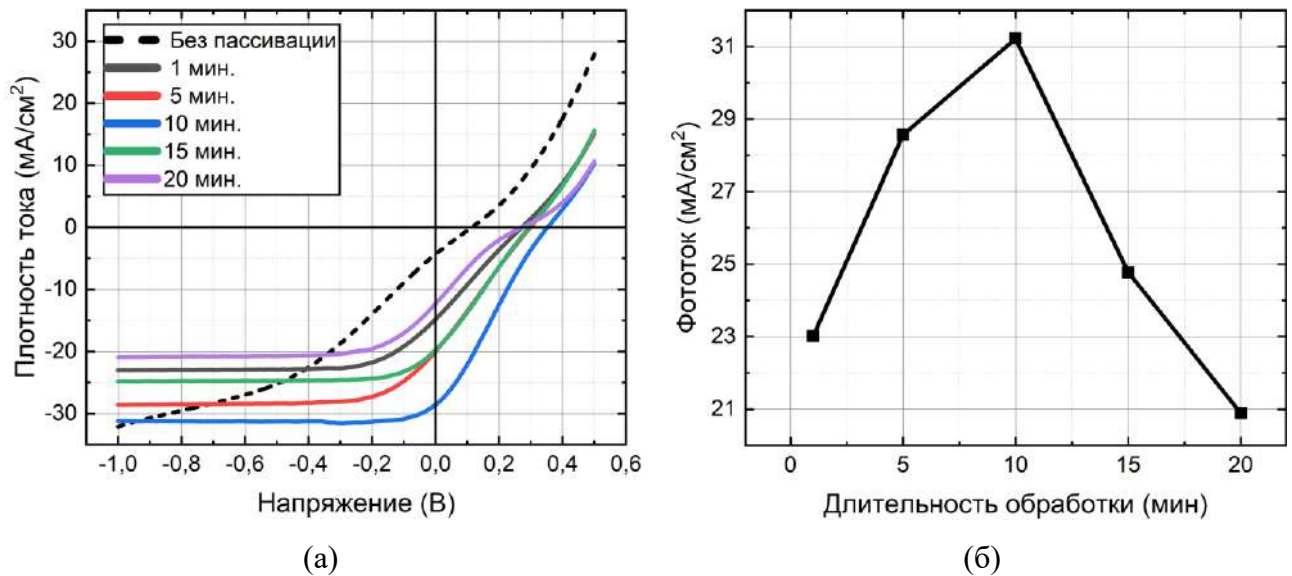


Рисунок 3 – Световые ВАХ (а) и зависимость фототока (при -1 В) от длительности обработки структур в плазме водорода (б) для образца без затравочного слоя

В четвёртой главе исследовались характеристики одиночных GaN ННК в условиях высоких токовых нагрузок. Для этого были изготовлены соответствующие структуры (рисунок 4) со сформированными к ННК омическими контактами на основе Ti/Au. Процесс формирования омических контактов является базовым при создании полупроводниковых приборных структур. Здесь можно выделить несколько основных этапов:

- 1) Формирование топологических участков будущих контактных площадок на поверхности образца методами литографии;
- 2) Подготовка поверхности структуры для формирования контактов. На этом шаге поверхность очищалась при помощи жидкостного травления для удаления слоя оксида с поверхности полупроводника;
- 3) Осаждение металлов на образец путём вакуумного напыления;
- 4) Удаление лишнего металла с поверхности структуры посредством взрывной литографии (lift-off);
- 5) Быстрый термический отжиг (при необходимости) для уменьшения контактного сопротивления.

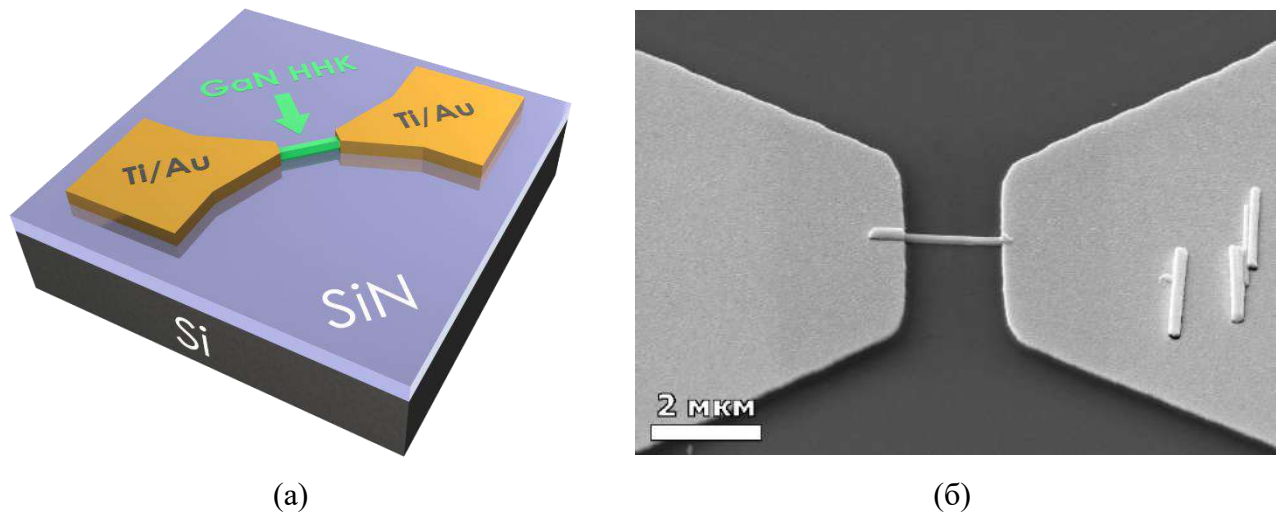


Рисунок 4 – Схематическое изображение изготовленных структур на базе одиночных GaN ННК (а), типичное СЭМ-изображение одиночного GaN ННК со сформированными металлическими контактами (б)

При исследовании электрических характеристик на ННК подавались импульсы напряжения, при этом ННК был последовательно соединён с малошумящим токовым предусилителем SR-570 (Stanford Research Systems). Предусилитель использовался для прецизионного определения величины тока, протекающего через одиночный GaN ННК в процессе измерений. Прецизионный источник-измеритель Keithley 2400 и генератор импульсов использовались для формирования выходного сигнала напряжения заданной амплитуды. Форма электрических импульсов показана на вставке к рисунку 5. Во время измерений цифровым многоканальным осциллографом снимались осциллограммы напряжение-время и ток-время, соответствующие напряжению на ННК и протекающему через него току. Эти данные автоматически преобразовывались в ВАХ внутренними алгоритмами осциллографа.

Для сравнения ВАХ, полученных от разных ННК, измеренный ток нормировался на площадь поперечного сечения исследуемых ННК, а приложенное напряжение на их длину. На рисунке 5 показаны экспериментальные зависимости плотности тока ( $J$ ) от напряженности электрического поля ( $E$ ) для нескольких одиночных GaN ННК, обозначенных как ННК 1 – 5. Следует отметить, что плотность тока для некоторых структур достигает значения порядка  $2 \text{ MA/cm}^2$ , что является высоким показателем. Причём для всех исследованных ННК данный показатель находился в диапазоне  $1.7 \pm 0.3 \text{ MA/cm}^2$ . Таким образом, было впервые показано, что одиночные GaN ННК способны коммутировать токи экстремально высокой плотности без необходимости принудительного охлаждения, что немаловажно для приложений силовой электроники. Кроме того, в результате проведённого численного моделирования, учитывающего обеднение канала проводимости за счёт наличия поверхностных состояний на боковой границе ННК, было установлено, что коммутируемый ток достигает плотности  $4 \text{ MA/cm}^2$ .

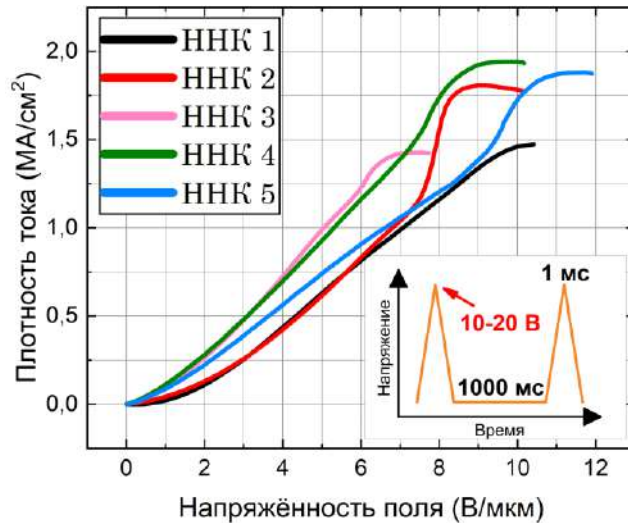


Рисунок 5 – Измеренные нормированные ВАХ одиночных GaN ННК; на вставке показана форма приложенных к ННК импульсов напряжения

Также все измеренные зависимости ВАХ продемонстрировали характерное насыщение. Расчёт показал, что данное явление соответствует насыщению дрейфовой скорости электронов в GaN [8] и хорошо согласуется с результатами опубликованных экспериментальных и теоретических исследований.

**Пятая глава** посвящена численному моделированию диода Шоттки на основе одиночного GaN ННК (геометрия структуры представлена на рисунке 6). Высота потенциального барьера металл-полупроводник является одним из основных параметров, влияющих на работу такого диода. В идеальном случае высота барьера на границе металла с полупроводником определяется разностью работы выхода металла и энергией сродства к электрону полупроводника. Однако, помимо этих двух величин существует ряд факторов, который может в значительной степени повлиять на данный параметр. Главным из них является наличие поверхностных состояний (энергетических уровней) полупроводника на границе с металлом, обусловленных нарушением периодичности кристаллической решётки. Зачастую, такие состояния настолько существенны, что происходит закрепление (пиннинг) уровня Ферми на поверхности полупроводника. Это, в свою очередь, приводит к фактической независимости высоты барьера от величины работы выхода металла. Таким образом, для корректности описания в составляемой модели было учтено наличие поверхностных состояний. Другим явлением, влияющим на высоту потенциального барьера, является эффект Шоттки, который также был принят во внимание и который обуславливает снижение высоты барьера из-за возникновения сил изображения, действующих на инжектируемый из металла электрон. Помимо этого, учитывались составляющие термоэлектронной эмиссии и квантово-механического туннелирования. В

качестве образующих барьер электродов рассматривались два металла – золото и платина. Диаметр ННК был принят равным 200 нм.

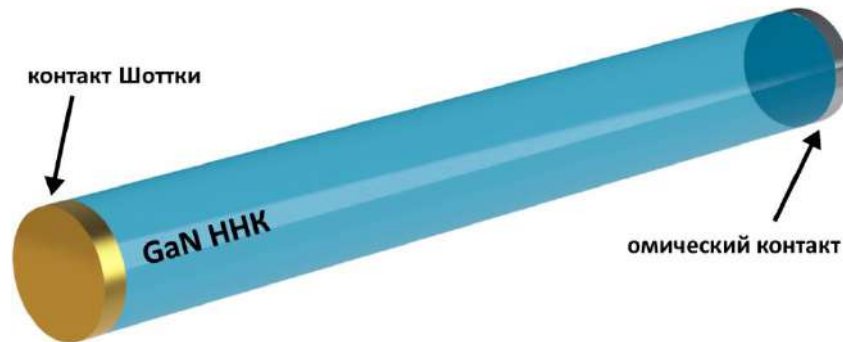
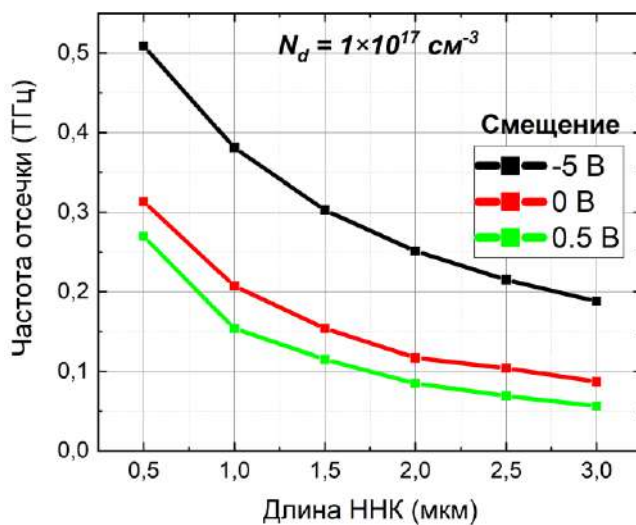


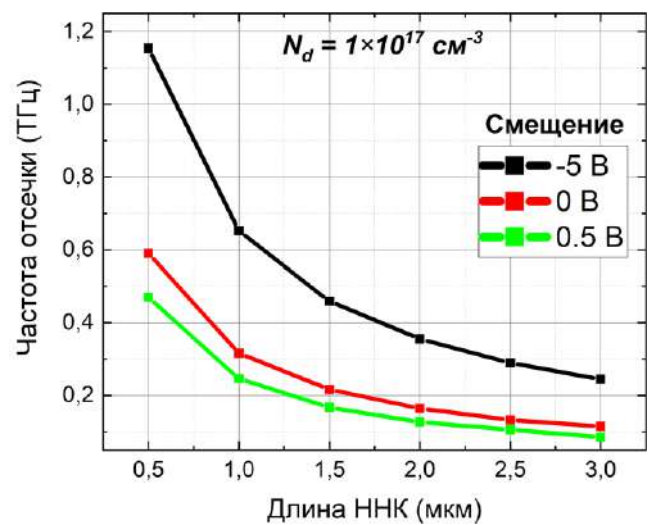
Рисунок 6 – Схематическое изображение геометрической модели диода Шоттки на базе одиночного GaN ННК, используемой при численном расчёте

В ходе проведённого численного расчёта были получены зависимости высоты потенциального барьера от приложенного электрического напряжения, а также ВАХ для различных уровней легирования ННК. Показано, что в рамках рассматриваемой модели не происходит закрепления уровня Ферми на поверхности GaN (0001).

Для оценки частотных свойств диода было численно определено произведение последовательного сопротивления структуры ( $R$ ) и её барьерной ёмкости ( $C$ ). Зная постоянную  $RC$ , можно рассчитать частоту отсечки диода, выше которой эффективность его работы существенно снижается. На рисунке 7 представлены полученные зависимости частоты отсечки от длины и уровня легирования ННК. Как для золотого, так и для платинового контактов частота отсечки соответствовала диапазону от 0.1 до 1.2 ТГц в зависимости от выбора рабочей точки по напряжению.



(а)



(б)

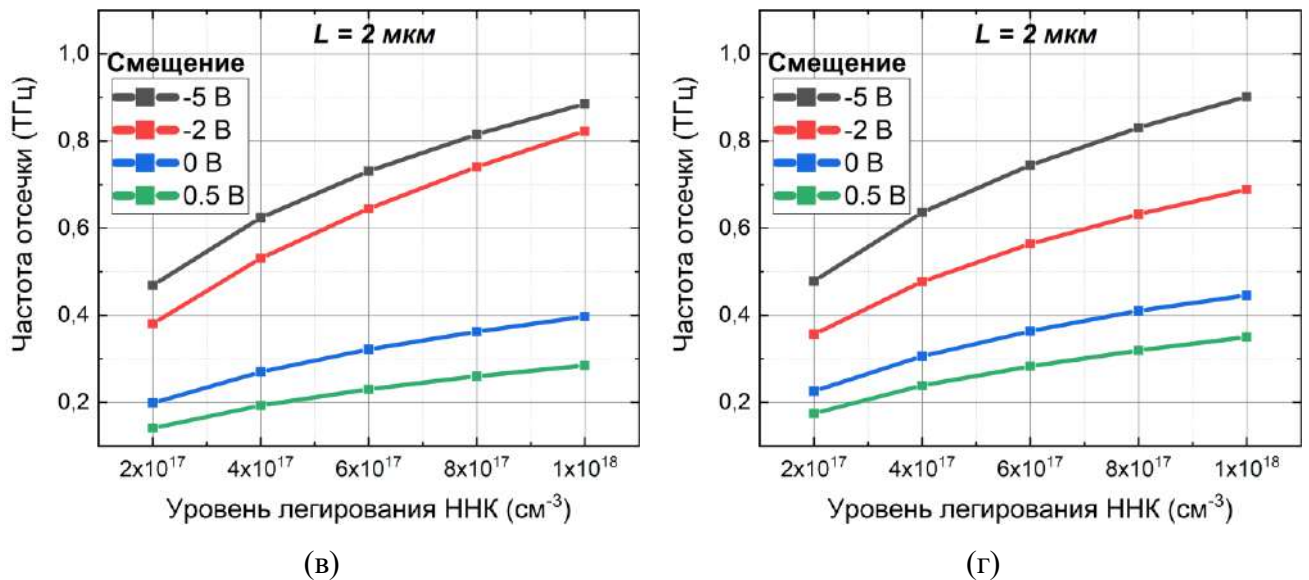


Рисунок 7 – Рассчитанные зависимости частоты отсечки в зависимости от длины ННК для золотого и платинового контактов (а, б). Рассчитанные зависимости частоты отсечки в зависимости от уровня легирования ННК для золотого и платинового контактов (в, г)

Таким образом, установлено, что частота отсечки диода Шоттки рассматриваемой конфигурации при нулевом смещении по напряжению находится в субтерагерцовом диапазоне.

В **шестой главе** представлена приборная реализация диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК, а также исследование их характеристик. Топология контактных площадок при работе на высоких частотах может оказывать непосредственное влияние на измеряемые характеристики диода. Контактная металлизация является волноводом, по которому электрический сигнал распространяется через структуру. При его передаче от источника к исследуемому объекту (в данном случае ННК) сигнал может претерпевать значительные искажения на интерфейсе измерительный зонд/металлизация, что усложняет интерпретацию полученных данных. Для оценки влияния GSG-топологии (Ground-Signal-Ground) контактных площадок на прохождение СВЧ сигнала через структуру, а также для дальнейшего учёта её паразитных составляющих было проведено численное моделирование предложенного дизайна металлизации (рисунок 8).



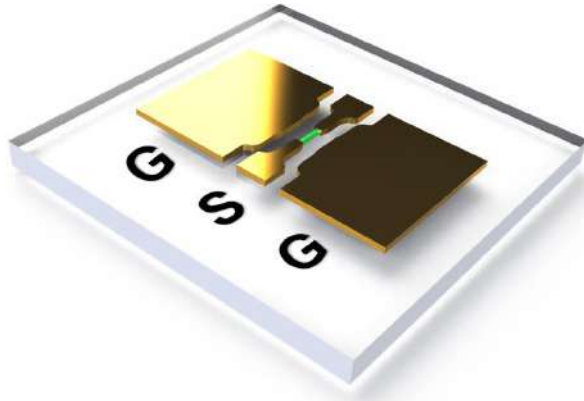
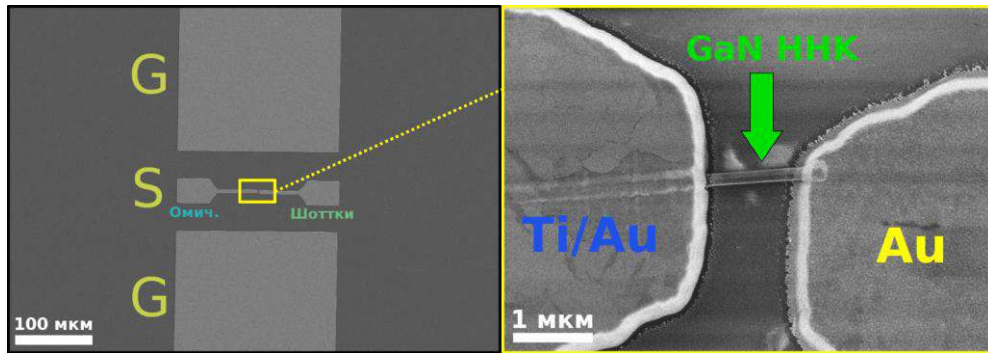


Рисунок 8 – Схематичный 3D-дизайн диодной структуры

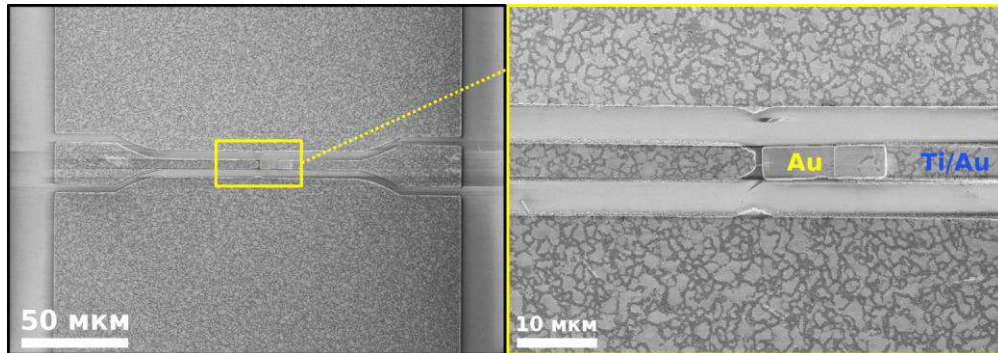
Результаты численного расчёта показали, что несмотря на несогласованность импедансов металлизации и линии передачи, потери, обусловленные топологией при прохождении СВЧ сигнала через структуру, являются незначительными и составляют менее 2 % в диапазоне 0.1 – 4 ГГц и не более 6% в диапазоне 4 – 40 ГГц.

Приборная реализация диодов в целом проводилась аналогично процедуре, описанной выше (в четвёртой главе) при подготовке структур на основе одиночных ННК. Однако, следует отметить ряд отличительных особенностей. Выбор кварца, как материала вспомогательных подложек для переноса на них ННК, с одной стороны, решал ряд приборных моментов, а с другой – создавал определённые трудности в ходе технологического процесса. Это обусловлено тем, что используемый на этапе фотолитографии полимер PMGI обладает крайне низкой адгезией к кварцевому стеклу и начинал отделяться от поверхности подложки при дальнейшем проявлении, что делало невозможным получение необходимого топологического рисунка. Для решения этой проблемы было проведено дополнительное исследование, в ходе которого установлено, что предварительный отжиг подложки непосредственно перед нанесением полимерного покрытия обеспечивает необходимые адгезионные свойства.

При металлизации сначала формировались омические контакты Ti/Au и G-площадки – это выполнялось в одном технологическом процессе. Затем цикл фотолитографии повторялся, и формировались уже Au-контакты с барьером Шоттки. Толщина металлических площадок составила 700 нм. Было изготовлено две группы диодов: на основе нелегированных (А) и легированных (В) ННК. При этом в последнем случае топология контактов была модифицирована, что позволило уменьшить паразитную шунтирующую ёмкость. На рисунке 9 представлены соответствующие типичные СЭМ-изображения изготовленных диодных структур.



(a)



(б)

Рисунок 9 – Типичные СЭМ-изображения диодных структур на основе нелегированных (а) и легированных (б) ННК после постростовой обработки

В ходе исследования ВАХ было установлено, что для обеих групп диодов эффективная высота барьера Шоттки снижается с ростом диаметра ННК (рисунок 10), причём для легированных наноструктур эта зависимость менее выражена, и полученные значения для большинства структур находятся в диапазоне 0.2 – 0.3 эВ. В свою очередь, для нелегированных ННК высота барьера изменялась в пределах 0.3 – 0.95 эВ. Коэффициент неидеальности для всех диодов принимал значения от 2.1 до 13.2.

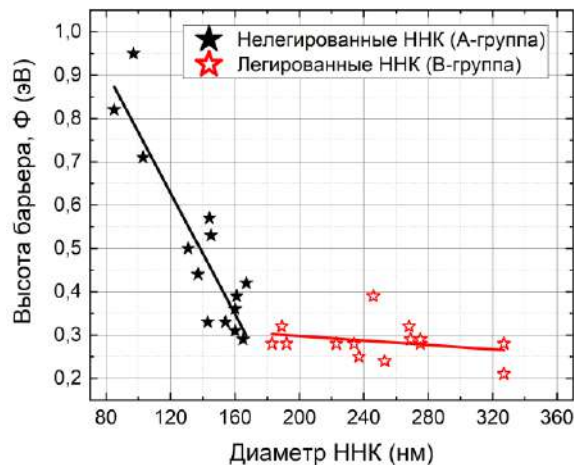


Рисунок 10 – Экспериментальные зависимости эффективной высоты барьера от диаметра ННК для А- и В-групп диодов

Изучение частотных характеристик осуществлялось посредством малосигнального частотного анализа в широком диапазоне от 100 МГц до 40 ГГц. В ходе данного исследования векторным анализатором цепей измерялись элементы матрицы рассеяния ( $S$ -параметры) четырёхполюсника, которые затем аппроксимировались соответствующими аналитическими выражениями эквивалентной электрической схемы диодных структур. Анализ результатов показал:

1. Хорошее соответствие между собой экспериментальных данных, численного моделирования и аппроксимации;
2. Отсутствие существенного влияния паразитных составляющих металлизации, за исключением шунтирующей ёмкости, на  $S$ -параметры;
3. Локализацию в СВЧ диапазоне частот отсечки всех изготовленных диодов;
4. Согласованность резистивных характеристик с соответствующими данными из ВАХ.

При этом диоды на основе нелегированных ННК продемонстрировали более низкие значения частоты отсечки, лучший результат составил  $27.5 \pm 0.3$  ГГц, в то время как для легированных ННК данное значение соответствовало  $165.8 \pm 1.5$  ГГц.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- Показано, что транспортные свойства гетероинтерфейса GaN ННК/Si в значительной степени зависят от выбора затравочного слоя для синтеза ННК. При этом наименьший уровень утечек соответствует затравочному слою  $\text{GaO}_x$ , а наибольший - слоям AlN и 2 МС Ga, что вызвано паразитной диффузией атомов Al и Ga в подложку Si и её легированием, а также образованием дефектов в ОПЗ;
- Обнаружено, что снижение количества Ga, соответствующее затравкам 2, 0.6 и 0.3 МС, сопровождается уменьшением уровня утечек на гетероинтерфейсе GaN ННК/Si;
- Установлено, что предварительная обработка гетероструктур  $n$ -GaN ННК/ $p$ -Si в водородной плазме улучшает их диодные характеристики и приводит к более чем 10-ти кратному снижению обратного тока для всех затравочных слоёв, за исключением слоя AlN. Для структур без затравочного слоя длительность обработки, при которой наблюдается снижение обратного тока более чем на 3 порядка, составляет 10 минут;
- Обнаружено, что одиночные GaN ННК способны коммутировать токи плотностью  $1.7 \pm 0.3$  MA/cm<sup>2</sup> в импульсном режиме без принудительного охлаждения, при этом их деградации не наблюдается. Кроме того, учёт наличия поверхностных состояний на боковой грани ННК показал, что коммутируемый ток достигает 4 MA/cm<sup>2</sup>;
- В соответствии с проведённым численным моделированием показано, что частота отсечки диода Шоттки на основе одиночного GaN ННК лежит в субтерагерцовом диапазоне;

- Обнаружено, что высота потенциального барьера изготовленных диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК убывает с ростом диаметра ННК, при этом для легированных ННК этот эффект выражен в меньшей степени;
- Установлено, что частота отсечки изготовленных диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК лежит в СВЧ диапазоне, при этом для нелегированных ННК наилучший результат составляет  $27.5 \pm 0.3$  ГГц, в то время как для легированных –  $165.8 \pm 1.5$  ГГц.

#### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Zubair A., Perozek J., Niroula J., Aktas O., Odnoblyudov V. & Palacios T. First Demonstration of GaN Vertical Power FinFETs on Engineered Substrate in // *2020 Device Research Conference (DRC)* (IEEE, 2020). – P. 1–2. doi:10.1109/DRC50226.2020.9135176
2. Zhong Y., Zhang J., Wu S., Jia L., Yang X., Liu Y., Zhang Y. & Sun Q. A review on the GaN-on-Si power electronic devices // *Fundamental Research* – 2022. – Vol. 2. – P. 462–475.
3. Calarco R., Meijers R. J., Debnath R. K., Stoica T., Sutter E. & Lüth H. Nucleation and Growth of GaN Nanowires on Si(111) Performed by Molecular Beam Epitaxy // *Nano Letters* – 2007. – Vol. 7. – P. 2248–2251.
4. Bertness K., Sanford N. & Schlager J. Gallium nitride nanowires achieve crystalline perfection // *SPIE Newsroom* – 2011. doi:10.1117/2.1201109.003892
5. Pitanti A., Ercolani D., Sorba L., Roddaro S., Beltram F., Nasi L., Salviati G. & Tredicucci A. InAs/InP/InSb Nanowires as Low Capacitance n-n Heterojunction Diodes // *Physical Review X* – 2011. – Vol. 1. – P. 011006.
6. Cartier E., Stathis J. H. & Buchanan D. A. Passivation and depassivation of silicon dangling bonds at the Si/SiO<sub>2</sub> interface by atomic hydrogen // *Applied Physics Letters* – 1993. – Vol. 63. – P. 1510–1512.
7. Lee S. H., Bhopal M. F., Lee D. W. & Lee S. H. Review of advanced hydrogen passivation for high efficient crystalline silicon solar cells // *Materials Science in Semiconductor Processing* – 2018. – Vol. 79. – P. 66–73.
8. Bhapkar U. V & Shur M. S. Monte Carlo calculation of velocity-field characteristics of wurtzite GaN // *Journal of Applied Physics* – 1997. – Vol. 82. – P. 1649–1655.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [A1] **Shugurov K.**, Mozharov A., Sapunov G., Fedorov V., Tchernycheva M. & Mukhin I. Single GaN Nanowires for Extremely High Current Commutation // *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters* – 2021. – Vol. 15. – P. 2000590.
- [A2] **Shugurov K. Y.**, Mozharov A. M., Bolshakov A. D., Fedorov V. V., Sapunov G. A., Shtrom I. V., Uvarov A. V., Kudryashov D. A., Baranov A. I., Yu Mikhailovskii V., Neplokh V. V., Tchernycheva M., Cirlin G. E. & Mukhin I. S. Hydrogen passivation of the n-GaN nanowire/p-Si heterointerface // *Nanotechnology* – 2020. – Vol. 31. – P. 244003.
- [A3] Bolshakov A. D., Fedorov V. V., **Shugurov K. Y.**, Mozharov A. M., Sapunov G. A., Shtrom I. V., Mukhin M. S., Uvarov A. V., Cirlin G. E. & Mukhin I. S. Effects of the surface preparation and buffer layer on the morphology, electronic and optical properties of the GaN nanowires on Si // *Nanotechnology* – 2019. – Vol. 30. – P. 395602.
- [A4] **Shugurov K. Y.**, Reznik R. R., Mozharov A. M., Kotlyar K. P., Koval O. Y., Osipov A. V., Fedorov V. V., Shtrom I. V., Bolshakov A. D., Kukushkin S. A., Mukhin I. S. & Cirlin G. E. Study of SiC buffer layer thickness influence on photovoltaic properties of n-GaN NWs/SiC/p-Si heterostructure // *Materials Science in Semiconductor Processing* – 2019. – Vol. 90. – P. 20–25.
- [A5] **Шугуров К. Ю.**, Можаров А. М., Сапунов Г. А., Фёдоров В. В., Моисеев Э. И., Блохин С. А., Кузьменков А. Г. & Мухин И. С. Сверхвысокочастотные диоды Шоттки на основе одиночных нитевидных нанокристаллов GaN // *Письма в журнал технической физики* – 2022. – Vol. 48. – P. 22.
- [A6] **Shugurov K. Y.**, Mozharov A. M., Bolshakov A. D., Fedorov V. V., Uvarov A. V., Kudryashov D. A., Yu Mikhailovskii V., Cirlin G. E. & Mukhin I. S. GaN nanowires/ p-Si interface passivation by hydrogen plasma treatment // *Journal of Physics: Conference Series* – 2020. – Vol. 1537. – P. 012012.
- [A7] **Shugurov K. Y.**, Mozharov A. M. & Mukhin I. S. Numerical study of Schottky diode based on single GaN NW on Si // *Journal of Physics: Conference Series* – 2020. – Vol. 1695. – P. 012172.
- [A8] **Shugurov K. Y.**, Mozharov A. M., Sapunov G. A., Fedorov V. V., Bolshakov A. D., Cirlin G. E. & Mukhin I. S. GaN-nanowire/Si solar cell: numerical modeling, fabrication and characterization // *Journal of Physics: Conference Series* – 2019. – Vol. 1199. – P. 012030.
- [A9] **Shugurov K. U.**, Mozharov A. M., Sapunov G. A., Fedorov V. V., Bolshakov A. D. & Mukhin I. S. Influence of interface layer preparation on the electrical and spectral characteristics of GaN/Si solar cells // *Journal of Physics: Conference Series* – 2018. – Vol. 993. – P. 012034.

- [A10] **Shugurov K. U.**, Mozharov A. M., Fedorov V. V., Bolshakov A. D., Sapunov G. A. & Mukhin I. S. Influence of hydrogen plasma passivation on electrical and spectral characteristics of GaN nanowires / Si solar cells // *Journal of Physics: Conference Series* – 2018. – Vol. 1124. – P. 041021.
- [A11] Sharov V., Bolshakov A., Fedorov V., **Shugurov K. Y.**, Mozharov A. M., Sapunov G. A. & Mukhin I. S. Conductive AFM study of the electronic properties of individual epitaxial GaN nanowires // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* – 2019. – Vol. 699. – P. 012047.
- [A12] Bolshakov A. D., Fedorov V. V., Sapunov G. A., Mozharov A. M., Dvoreckaia L. N., **Shugurov K.**, Shkoldin V., Shtrom I. V., Mukhin M. S., Cirilin G. E. & Mukhin I. S. GaN nanowires on Si (111) substrates via molecular beam epitaxy: growth, electronic and optical properties // *Journal of Physics: Conference Series* – 2018. – Vol. 1092. – P. 012013.