

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Проректор по науке и инновациям  
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»,  
профессор, М.Р. Филонов  
«11 января» 2023 г.

**ОТЗЫВ**

Ведущей организации на диссертационную работу Шугурова Константина Юрьевича «Нитевидные нанокристаллы нитрида галлия на кремнии: свойства и приборное применение», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики.

**Актуальность диссертационной работы**

Тема диссертации полностью соответствует направлению из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, касающегося перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создания систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

Развитие современной электроники и зависящих от нее технологий требует постоянного совершенствования электронной компонентной базы (ЭКБ). На протяжении последних 70-ти лет преобладающим материалом полупроводниковой индустрии является кремний, однако, сегодня совершенно очевидно, что его фундаментальные возможности не позволяют в полной мере удовлетворить растущие требования, предъявляемые к электронным компонентам и устройствам. Свидетельством этому является активное развитие и внедрение новой материальной базы, в частности, нитрида галлия (GaN). При этом, ввиду технологической сложности синтеза, получение высококачественных слоев на его основе до сих пор является актуальной задачей. При этом развитая кремниевая платформа (Si ростовые подложки) с экономической точки зрения остается наиболее предпочтительной для получения гетероэпитаксиальных GaN-структур.

Одной из перспективных концепций в создании полупроводниковых устройств является переход от планарных структур к нитевидным нанокристаллам (ННК), главным преимуществом которых является высокое кристаллическое качество. Кроме того, в случае ННК кристаллическое совершенство практически не зависит от решеточного

рассогласования GaN с материалом ростовой подложки. В свою очередь, геометрические особенности ННК также обуславливают наличие и ряда других важных свойств, которые в совокупности позволяют создавать и совершенствовать широкий спектр полупроводниковых приборов. Таким образом, интеграция ННК GaN с кремнием, с одной стороны, устраняет ключевую на данный момент проблему гетероэпитаксиального синтеза GaN, а с другой – обоснована экономически.

Все это определяет **актуальность** диссертационной работы Шугурова Константина Юрьевича, посвященной исследованию ННК GaN на кремнии, а также разработке на их основе приборной структуры диода Шоттки.

### **Новизна исследования и полученных результатов**

Научная новизна диссертационной 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 получены следующие новые результаты:

- Впервые продемонстрировано улучшение диодных характеристик гетероинтерфейса *n*-GaN ННК/*p*-Si за счёт обработки в водородной плазме;
- Впервые продемонстрирована способность одиночных GaN ННК коммутировать токи плотностью  $1.7 \pm 0.3 \text{ MA/cm}^2$  в импульсном режиме для приложений силовой электроники;
- При помощи численного моделирования исследованы свойства контакта GaN ННК/Au и впервые показано, что диод Шоттки на основе одиночного GaN ННК может достигать субтерагерцовых частот отсечки;
- Изготовлены диоды Шоттки на основе одиночных GaN ННК и впервые экспериментально продемонстрировано достижение частоты отсечки  $165.8 \pm 1.5 \text{ ГГц}$ .

### **Значимость научных и практических результатов диссертации**

Диссертационная работа К.Ю. Шугурова имеет существенную практическую значимость, заключающуюся в методиках процессирования полупроводниковых гетероструктур, технологических методах и их апробации в приборах:

- 1) Развита методика постростовой обработки структур на базе массивов ННК GaN на

кремнии, а также изучены транспортные свойства гетероинтерфейса GaN ННК/Si для различных затравочных ростовых слоев;

- 2) Реализована технология формирования структур на основе одиночных ННК GaN, перенесенных на вспомогательную подложку-носитель, и продемонстрированы их возможности в условиях высоких токовых нагрузок;
- 3) Разработана модель диода Шоттки на основе одиночного ННК GaN с учетом поверхностных состояний, эффектов Шоттки и туннелирования;
- 4) Разработанные технологические подходы успешно апробированы в приборных структурах: продемонстрирована фотодиодная структура GaN ННК/Si, а также диод Шоттки на базе единичного ННК в системе материалов GaN/ Au.

#### **Оформление диссертации, публикации и апробация работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 6-ти глав, заключения, списка сокращений и литературы. Общий объем диссертации составляет 146 с. и включает 57 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 242 источников. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ в изданиях, индексируемых Web of Science и/или Scopus и соответствующих требованиям ВАК.

Результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях:

- 5<sup>th</sup>/6<sup>th</sup>/7<sup>th</sup>/8<sup>th</sup>/9<sup>th</sup> International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint-Petersburg OPEN», апрель-май 2018-2022 гг., Санкт-Петербург, Россия;
- Международная конференция Физика.СПб, октябрь 2017 и 2019 гг., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия;
- 19-я/20-я/21-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, ноябрь-декабрь 2017 – 2019 гг., Санкт-Петербургский Академический Университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;
- Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники ФОТОНИКА 2021, ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова, октябрь 2021 г., Новосибирск, Россия.

Публикации в авторитетных изданиях и выступления на международных конференциях свидетельствуют о том, что полученные автором диссертации результаты

соответствуют уровню современной науки.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

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 электронной промышленности, производство продукции в которых осуществляется по полному циклу «исследование — разработка — производство — реализация». Продукция предприятий используется в аппаратуре радиосвязи, радиолокации, телевидения, медицины, бытовой техники.

Помимо этого, полученные результаты и разработанные методы следует рекомендовать для использования в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов в области электроники и технологии полупроводниковых структур.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Во Введении автором указывается, что существующие ограничения в области гетероэпитаксиального синтеза планарных слоев GaN, которые сдерживают темпы внедрения данного материала в индустрию, «могут быть преодолены посредством перехода от классических планарных структур к нитевидным нанокристаллам (ННК)». Такой подход решает проблему кристаллического качества, однако, с другой стороны, создает определенные сложности при масштабировании технологии при массовом производстве.
2. В третьей главе «Исследование гетероинтерфейса GaN ННК/Si» приведены экспериментальные данные для структур, где GaN ННК были синтезированы на подложках кремния *p*-типа проводимости. При этом гетеропереход GaN ННК/*n*-Si не рассматривается.
3. В пятой главе «Численное моделирование диода Шоттки на основе одиночного GaN ННК» численный расчет выполнен для двух барьерообразующих металлов — золота и платины. Однако, приборная структура реализована лишь в системе Au/GaN ННК. Требуется пояснить выбор материала для экспериментальной

реализации.

4. В шестой главе «Приборное исполнение диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК» экспериментальным путем получен результат, указывающий на наличие зависимости высоты барьера Шоттки от диаметра ННК. При этом соискатель не рассуждает о возможных причинах возникновения данного эффекта.
5. Помимо частотных характеристик важным приборным параметром диодов является, например, предельно допустимая величина протекающего тока. Изготовленные приборные структуры требуют более подробного исследования, в частности, в различных температурных условиях.

Сделанные замечания носят частный характер и не ставят под сомнение основные результаты и выводы диссертации, не снижают научной и практической ее значимости.

### **Заключение**

Диссертационная работа К.Ю. Шугурова является завершённой научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном и техническом уровне. Полученные результаты являются достоверными и научно обоснованными. Автореферат и публикации полно и правильно отражают содержание диссертации, а также её основные положения и выводы.

По своей актуальности, научной новизне, практической значимости, достоверности, а также объёму проведенных исследований и личному вкладу соискателя диссертационная работа К.Ю. Шугурова «Нитевидные нанокристаллы нитрида галлия на кремнии: свойства и приборное применение» полностью отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям в соответствии с пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор Шугуров Константин Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв, составленный на основании ознакомления с текстом диссертации, автореферата, публикаций и доклада К.Ю. Шугурова, обсужден и одобрен на заседании расширенного научного семинара кафедры Полупроводниковой электроники и физики

полупроводников (ППЭ и ФПП) НИТУ «МИСиС» 20 декабря 2022 г., протокол №5-2022/2023.

Диденко Сергей Иванович

ин Данила Сергеевич

Подписи руки С.И. Диденко и Д.С. Саранина заверяю



Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр., д. 4, стр. 1.

8 (495) 638-46-78, [kancela@misis.ru](mailto:kancela@misis.ru)

<https://misis.ru/>

Исп.: Диденко Сергей Иванович, зав. каф. ППЭ и ФПП