

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
24.1.029.01 (Д002.034.01) НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАП РАН),
Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «30» января 2023 г. № 1

о присуждении Шугурову Константину Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Нитевидные нанокристаллы нитрида галлия на кремнии: свойства и приборное применение» по специальности 1.3.2 (01.04.01) – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 28.10.2022 г., протокол № 15, диссертационным советом 24.1.029.01 (Д002.034.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.31-33, лит. А, приказ 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель: Шугуров Константин Юрьевич, 1992 года рождения, окончил в 2015 году магистратуру Московского физико-технического института по направлению подготовки 03.04.01 «Прикладные математика и физика», в 2021 г. окончил очную аспирантуру Академического университета им. Ж.И. Алфёрова по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия» по профилю 01.04.10 «Физика полупроводников». В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории Возобновляемых источников энергии Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук».

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук», г. Санкт-Петербург.

Научный руководитель: Мухин Иван Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, директор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты:

Тарасов Сергей Анатольевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой Фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета имени В.И. Ленина (ЛЭТИ), представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

- 1) В главе 3 в качестве одного из объяснений значительных обратных токов в структурах $n\text{-GaN}/\text{NHK}/p\text{-Si}$ выступают дефекты в области гетероинтерфейса. Какие исследования проводились для подтверждения их наличия?
- 2) В главе 3, на страницах 55 – 56 представлены экспериментальные ВАХ для структур $n\text{-GaN}/\text{NHK}/p\text{-Si}$ до и после обработки в плазме водорода. Представляется, что для большей наглядности следовало бы также проиллюстрировать эти данные в полупологарифмическом масштабе по оси ординат. Кроме того, при описании полученных зависимостей говорится, что «... у образцов 1, 2 и 4 – 7 обратный темновой ток падает более чем на порядок, а у образца 3 – в 1.5 раза». Здесь и в ряде других мест третьей главы количественное сравнение обратных ветвей ВАХ, вероятно, приведено для конкретной точки по напряжению – этот момент следовало бы отразить в тексте диссертации;
- 3) В главе 5, посвященной моделированию диода Шоттки на основе одиночного НК GaN, не приведены детали расчета, в частности, не указано, какие уравнения и параметры материалов использовались, каким образом учитывался эффект Шоттки и наличие поверхностные состояний?
- 4) В главе 6 при описании эквивалентной схемы диодных структур вводится элемент, отвечающий за паразитную индуктивность контактных площадок. Оценивалось ли влияние индуктивной составляющей на частоту отсечки диодов?
- 5) В тексте диссертации присутствуют опечатки. На странице 56 (рисунок 3.8) неверно указана подпись для образца с затравочным слоем 0.3 МС Ga, вместо этого указано 0.2 МС Ga. На странице 83 неверно указана ссылка на рисунок 6.1г.

Малеев Николай Анатольевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории Нанопотоники Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

- 1) В разделе 3.4 приведены результаты исследования влияния предварительной обработки в плазме водорода на транспортные характеристики гетероперехода $n\text{-GaN}/\text{NHK}/p\text{-Si}$. При этом варьировалось только время обработки, а мощность

плазмы, давление и температура держателя образцов были зафиксированы на уровне 20 Вт, 500 мТорр и 350 °С соответственно. Представляется, что указанные параметры могут оказывать заметное влияние и их вариация представляет существенный интерес для выбора оптимального режима обработки;

- 2) В главе 4, раздел 4.3 «Влияние поверхностных состояний на канал проводимости в GaNННК» при анализе поверхностного обеднения для расчета реальной плотности тока в структурах ННК использована модель поверхностных состояний с уровнем энергии 0.55 эВ относительно дна зоны проводимости и плотностью поверхностных состояний $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (стр. 69). В то же время, в главе 5, раздел 5.1 «Физическая модель» использована модель поверхностных состояний с уровнем энергии 0.7 эВ относительно дна зоны проводимости и плотностью поверхностных состояний $1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (стр. 73). Причина данного расхождения не вполне понятна. Поскольку плотность поверхностных состояний в структурах GaNННК может варьироваться в широких пределах (см. ссылки на стр. 73), было бы целесообразным выполнить расчеты для нескольких вариантов плотности поверхностных состояний в целях оценки ее влияния на результаты моделирования.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва – **в своем положительном заключении**, утвержденном профессором М.Р. Филоновым, проректором по науке и инновациям НИТУ «МИСиС», подписанном Диденко Сергеем Ивановичем, кандидатом физико-математических наук, заведующим кафедрой Полупроводниковой электроники и физики полупроводников, и Сараниным Дániлой Сергеевичем, кандидатом технических наук, доцентом «МИСиС», указала, что диссертация Шугурова К.Ю. полностью отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 (01.04.01), а также отметила следующие замечания:

- 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.

Соискатель имеет **23 (двадцать три)** опубликованные работы, из которых по теме диссертации **12 (двенадцать)**. Работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и международные библиометрические базы SCOPUS и/или Web of Science. Также соискатель имеет **11 (одиннадцать)** публикаций в материалах всероссийских и международных научных конференций.

К наиболее значимым работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся:

1. **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.
2. **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., Cirilin G. E. & Mukhin I. S. Hydrogen passivation of the n-GaN nanowire/p-Si heterointerface // *Nanotechnology* – 2020. – Vol. 31. – P. 244003.
3. Bolshakov A. D., Fedorov V. V., **Shugurov K. Y.**, Mozharov A. M., Sapunov G. A., Shtrom I. V., Mukhin M. S., Uvarov A. V., Cirilin 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.

4. **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.
5. **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.
6. **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.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
10. **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.
11. 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.
12. 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., Cirlin 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.

На автореферат диссертации поступили следующие отзывы:

1. От Преображенского Валерия Владимировича, кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела,

заведующего Лабораторией физических основ эпитаксии полупроводниковых гетероструктур ИФП СО РАН и Пчелякова Олега Петровича, профессора, доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела, заведующего отделом роста и структуры полупроводниковых кристаллов и пленок ИФП СО РАН, лауреата Государственной премии РФ.

Замечание:

- К недостаткам автореферата можно отнести неудачно выбранный формат представления результатов на рис. 2 а) и б), 3 а) и 5 – контраст между различными кривыми практически неразличим.

2. От Вывенко Олега Федоровича, профессора кафедры электроники твердого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Замечания:

- На рисунке 1 представлена «краткая технологическая карта постростовой обработки структур GaN ННК/Si». Как из данной подписи, так и сопроводительного текста детали описываемой процедуры остаются непонятными;
- На рисунке 2 представлены вольт-амперные характеристики структур *n*-GaN ННК/*p*-Si, при этом ток нормирован на «совокупную площадь гетероинтерфейса». Остается непонятным, как эта площадь была определена.

3. От Дунаевского Михаила Сергеевича, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника Лаборатории оптики поверхности, отделения физики твердого тела ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Замечания:

- Из текста автореферата не понятно, какое освещение использовалось для получения световых вольт-амперных характеристик для гетероструктур GaN ННК/Si;
- Также нет объяснения того факта, что частота отсечки диодов в случае использования легированных ННК значительно выше.

4. От Кукушкина Сергея Арсеньевича, доктора физико-математических наук, профессора, руководителя подразделения «Структурные и фазовые превращения в конденсированных средах» Федерального государственного

бюджетного учреждения науки «Институт проблем машиноведения Российской академии наук».

Замечания:

- Не приводятся рассуждений касательно выбора золота в качестве барьерообразующего электрического контакта;
- В автореферате отражены негативные аспекты использования кварца как материала вспомогательной подложки для одиночных ННК, однако не сообщается, чем все-таки такой выбор обусловлен.

5. От Фирсова Дмитрия Анатольевича, доктора физико-математических наук, профессора Санкт-Петербургского политехнического Университета Петра Великого.

Замечания:

- Из текста автореферата не совсем ясно, каким образом проводилось высвобождение (вскрытие) вершин нитевидных нанокристаллов от полимера SU-8 (глава 3)?
- Также следовало бы привести непосредственное изображение эквивалентной схемы, которую использовал автор в рамках исследований частотных характеристик диодов Шоттки (глава 6).

6. От Рыбина Михаила Валерьевича, доктора физико-математических наук, сотрудника международного научно-исследовательского центра нанофотоники и метаматериалов Университета ИТМО.

Замечания:

- Сопоставлял ли автор результат исследований свойств одиночных ННК с литературными данными по транзисторным структурам?
- Отсутствие в работе температурных исследований изготовленных диодов Шоттки.

Все отзывы на автореферат диссертации положительные.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их большим опытом работы в областях эпитаксиальных технологий, физики полупроводников, создания и исследования полупроводниковых микро- и наноструктур, что подтверждается публикациями в соответствующих сферах исследования. Официальные оппоненты и ведущая организация не имеют совместных проектов и публикаций с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

впервые продемонстрировано существенное снижение обратных токов утечки и улучшение выпрямляющих свойств гетероинтерфейса *n*-GaN ННК/*p*-Si за счёт обработки в водородной плазме;

впервые продемонстрирована способность одиночных GaN ННК коммутировать токи плотностью 1.7 ± 0.3 MA/cm² в импульсном режиме;

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;

предложена конструкция диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК, для которых **впервые** достигнуто экспериментально подтвержденное значение частоты отсечки 166 ± 2 ГГц;

продемонстрированы возможности приборного применения GaN ННК, направленные на совершенствование электронных компонентов в области силовой и быстродействующей электроники.

Теоретическая значимость исследования обусловлена тем, что:

показано, что транспортные свойства гетероинтерфейса *n*-GaN ННК/*p*-Si в значительной степени зависят от выбора затравочного слоя для синтеза ННК. При этом наименьший уровень утечек соответствует затравочному слою GaO_x, а наибольший – AlN;

установлено, что эффективная 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;

выполнен численный расчет диода Шоттки на основе одиночного GaN ННК, учитывающий одновременно эффекты Шоттки и туннелирования, а также наличие поверхностных состояний на границе металл/полупроводник.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что они:

- были использованы при изготовлении приборных структур диодов Шоттки в рамках реализации проекта РФФИ «Разработка, создание и исследование быстродействующего диода Шоттки на базе нитевидных нанокристаллов нитрида галлия для современной компонентной базы силовой электроники» (проект 19-38-90026, руководитель Мухин И.С.);
- были использованы для разработки топологии и создания диодных структур в рамках реализации проекта РФФИ «Диоды Ганна и Шоттки

СВЧ/ТГц диапазона на базе нитевидных нанокристаллов нитрида галлия» (проект 22-22-20070, руководитель Можаров А.М.);

- были использованы в рамках учебного курса «Постростовые технологии» в СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова.

Кроме того, 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.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Достоверность научных положений, результатов и выводов диссертации обуславливается корректным использованием признанных экспериментальных методов исследования, выполненных на современном автоматизированном оборудовании, а также использованием апробированных программных пакетов и воспроизводимостью экспериментальных данных. В работе продемонстрировано хорошее количественное совпадение между экспериментальными и расчетными данными, а также соответствие с ранее полученными результатами, представленными в литературе. Достигнутые научные результаты были многократно представлены на научно-технических конференциях, а также опубликованы в реферируемых научных российских и зарубежных журналах.

Личным вкладом соискателя является:

- создание и научное обоснование технологии формирования полупроводниковых структур, необходимых для решения задач, поставленных в рамках диссертационной работы;
- совершенствование методики лазерной литографии для получения топологического рисунка с субмикронным разрешением;
- изготовление приборных структур на основе одиночных нитевидных нанокристаллов и их массивов;
- обоснование математических моделей и проведение численных расчетов, а также измерение вольтамперных характеристик изготовленных структур;
- написание вспомогательных программ и скриптов для получения и обработки экспериментальных данных;
- участие в написании и подготовке научных публикаций по теме диссертационной работы.

На заседании 30 января 2023 года диссертационный совет принял решение присудить Шугурову Константину Юрьевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

Для проведения тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 20 докторов наук, участвовавших в заседании, из 21 человека входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета
д.т.н., профессор

В.Е. Курочкин

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

А.Л. Буляница

Дата оформления заключения

30 января 2023 г.

М.П.

