



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Ж.И. АЛФЕРОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

194021, С.-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

Телефон (факс): (812) 297-2145

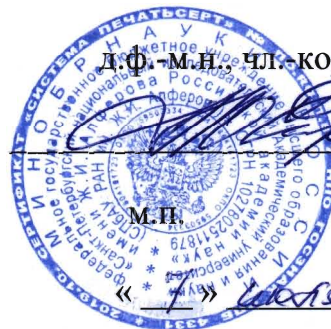
www.spbau.ru

ОКПО 59503334, ОГРН 1027802511879

ИНН/КПП 7804161723/780401001

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»



д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

А.Ю. Егоров

М.П.

2022 г.

Заключение организации, в которой выполнена работа

федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

о диссертационной работе **Шугурова Константина Юрьевича «Нитевидные нанокристаллы нитрида галлия на кремнии: свойства и приборное применение»**, представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики» (ранее 01.04.01)

Диссертация «Нитевидные нанокристаллы нитрида галлия на кремнии: свойства и приборное применение» выполнена в СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова.

В период подготовки диссертации соискатель Шугуров Константин Юрьевич являлся младшим научным сотрудником в 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».

В 2015 г. Шугуров К. Ю. защитил диссертацию на соискание степени магистра по направлению подготовки 03.04.01 «Прикладные математика и физика» в Московском физико-техническом институте. В 2021 г. Шугуров К. Ю. закончил очную аспирантуру по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», по профилю «Физика полупроводников» в Санкт-Петербургском национальном исследовательском Академическом университете имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук. Научный руководитель – Мухин Иван Сергеевич, д.ф.-м.н., и.о. директора Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого (СПбПУ).

Актуальность диссертационной работы.

Работа Шугурова К. Ю. посвящена исследованию свойств синтезированных на кремнии нитевидных нанокристаллов (ННК) нитрида галлия (GaN), а также разработке и созданию на их основе диода Шоттки.

Постепенно растущие требования, предъявляемые к выходным характеристикам электронных устройств, заставляют искать пути совершенствования и улучшения электронных компонентов. На сегодняшний день основным материалом полупроводниковой промышленности и электроники является кремний (Si), однако, ввиду его фундаментальных ограничений, возможности приборов на его основе также ограничены. Следовательно, для дальнейшего развития данного направления необходимо привлечение новой материальной базы.

Одним из материалов, способных уже в обозримом будущем составить серьёзную конкуренцию кремнию, является 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 и сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. Нельзя не отметить, что на базе GaN был создан первый мощный светодиод синего и ультрафиолетового (УФ) свечения, что в итоге привело к революции в области энергоэффективного освещения, а в 2014 году ознаменовалось Нобелевской премией по физике. Несмотря на колоссальный успех в освоении GaN и коммерческую доступность ряда компонентов, стремительное внедрение GaN в гражданскую индустрию сдерживается экономическими 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. Даже синтез на кремнии решает экономическую проблему лишь отчасти, поскольку из-за всё тех же технологических сложностей конечная стоимость продукции остаётся весьма высокой, а

«собственные» подложки GaN очень дороги и массово недоступны. Более того, актуальной проблемой гетероэпитаксиального GaN до сих пор является получение высококачественных плёнок в промышленных масштабах.

Сложившиеся ограничения могут быть преодолены посредством перехода от классических планарных структур к нитевидным нанокристаллам, которые, благодаря своей геометрии, обладают рядом уникальных свойств и преимуществ. Во-первых, кристаллическое качество синтезируемых GaN ННК значительно превосходит качество планарных слоёв. Механические напряжения в ННК релаксируют на боковой поверхности, поэтому они практически не имеют дислокаций и могут быть синтезированы без использования буферных слоёв даже на подложках с существенным рассогласованием по параметру решётки. Во-вторых, морфологические особенности ННК позволяют эффективней 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. Таким образом, GaN ННК сохраняют возможность экономически обоснованной интеграции с кремнием, попутно устраняя ряд ключевых преград, препятствующих широкой доступности GaN-компонентов. Более того, такой подход открывает новые перспективы и возможности в совершенствовании существующей ЭКБ.

Тем не менее, несмотря на множество исследований и работ по созданию на базе GaN ННК всевозможных полупроводниковых приборов, в случае системы GaN ННК/Si незначительное внимание уделено соответствующему гетеропереходу, который, являясь составной частью структуры, может оказывать существенное влияние на её характеристики. С другой стороны, при рассмотрении одиночных ННК, неизученными остаются их возможности с точки зрения высоких токовых нагрузок, что важно для силовой электроники. А в плоскости таких значимых компонентов, как, например, диодов Шоттки, акцент сделан на высоковольтные свойства GaN, при этом, их частотный потенциал остаётся без должного рассмотрения.

Принимая во внимание вышесказанное, исследования, изложенные в диссертации Шугурова К. Ю., несомненно, являются **актуальными**. Кроме того, в России технологии создания ЭКБ относятся к критическим, что дополнительно подчёркивает **важность и значимость** исследований в данной области.

Целью диссертационной работы являлось исследование транспортных свойств гетероперехода GaN ННК/Si, одиночных GaN ННК, а также создание на их основе диода Шоттки и изучение его частотных характеристик.

Для достижения цели в рамках настоящей диссертации были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Разработать технологический цикл постростовой обработки структур GaN ННК / Si, а также исследовать влияние на их транспортные свойства различных затравочных слоёв.
- 2) Исследовать возможности одиночных GaN ННК в условиях высоких токовых нагрузок.
- 3) Составить физическую модель и провести расчёт диода Шоттки на основе одиночного GaN ННК.
- 4) Разработать дизайн и технологическую карту изготовления диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК. Определить их частотные характеристики.

По итогам рассмотрения принято следующее заключение:

1. Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации.

Диссертация Шугурова К. Ю. является самостоятельной и оригинальной научно-исследовательской работой, вклад автора диссертации в которую был определяющим. Личный вклад автора состоит в участии в постановке цели и задач исследований, анализе литературных источников по теме диссертации, разработке и реализации спектра технологических процессов постростовой обработки полупроводниковых структур на основе одиночных ННК, а также их массивов. Все результаты экспериментальных и теоретических исследований, отраженных в данной диссертационной работе, обработаны и получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

2. Степень достоверности результатов, проведенных соискателем ученой степени исследований.

Достоверность полученных методологических и экспериментальных результатов не вызывает сомнений благодаря широкому использованию современной экспериментально-технологической базы, методов физического эксперимента, повторяемостью и воспроизводимостью получаемых экспериментальных данных. Достоверность результатов и выводов подтверждается их активным обсуждением на всероссийских и международных конференциях, а также публикациями в престижных рецензируемых международных журналах. Полученные результаты хорошо согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными.

3. Научная новизна данной диссертационной работы обусловлена использованием нового, активно исследуемого, но пока еще не получившего широкого

распространения в производстве ЭКБ материала - нитрида галлия, а также реализацией на его основе полупроводникового прибора со структурой гибридной размерности (квази-одномерная/планарная). Также:

- 1) Впервые проведено исследование влияния различных затравочных слоёв при синтезе GaN ННК на кремнии на транспортные свойства гетероинтерфеса GaN ННК/Si.
- 2) При помощи численного моделирования впервые показано, что диод Шоттки на основе одиночного GaN ННК достигает субтерагерцовых частот отсечки.
- 3) Впервые продемонстрирована способность одиночных GaN ННК коммутировать токи плотностью 2 MA/cm^2 в импульсном режиме без принудительного охлаждения и деградации.
- 4) Впервые изготовлен диод Шоттки на основе одиночного GaN ННК, демонстрирующий частоту отсечки 165.8 ГГц.

4. Значимость полученных результатов.

Результаты, полученные в рамках данной работы, могут лечь в основу дальнейших исследований полупроводниковых приборов в концепции ННК, а также могут быть использованы отечественными предприятиями для внедрения новых подходов в создании электронных компонентов, обладающих улучшенными характеристиками по сравнению с уже производимыми на данный момент. 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.

Общая оценка диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка условных обозначений и списка литературы. Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обосновывается актуальность научного исследования, указываются научная новизна и практическая значимость работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения о структуре и объеме диссертации, а также апробации результатов исследования.

В первой главе приведен литературный обзор по теме диссертации. Представлена краткая история исследований, посвященных нитриду галлия, отмечаются его особенности и свойства. Рассматриваются проблемы, связанные с синтезом данного материала и, как следствие, препятствующие его активному внедрению в индустрию. Далее обосновывается

переход от планарной геометрии полупроводниковых структур к геометрии ННК, приводится подробное описание их свойств на примере конкретных прикладных возможностей. Кратко отражаются основные методы и особенности синтеза GaN ННК. Рассматриваются концепции создания полупроводниковых приборов на основе GaN ННК.

Вторая глава посвящена описанию технологических и экспериментальных методик, используемых в ходе проведённых исследований. Приведены краткие описания экспериментальных установок, их особенностей.

Третья глава посвящена исследованию транспортных свойств гетероинтерфейса GaN ННК/Si, где ННК были синтезированы на различных затравочных слоях. В рамках главы приводится детальное описание технологического цикла постростовой подготовки структур на базе массива GaN ННК. Исследуются вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных структур, в том числе в условиях внешнего освещения. Показано, что в целом для структур наблюдаются высокие уровни токовых утечек, обусловленные паразитным легированием кремниевой подложки в ходе ростового процесса, а также наличием на интерфейсе GaN ННК/Si структурных дефектов. Установлено, что предварительная обработка структур в плазме водорода для всех рассматриваемых затравочных слоёв способствует снижению обратного темнового тока. Для ННК, синтезированных без затравки, оптимальное время обработки составляет 10 минут.

В четвёртой главе исследуются возможности одиночных GaN ННК в условиях высоких токовых нагрузок. Приводится подробное описание технологического процесса постростовой подготовки образцов. Исследование ВАХ показывает, что одиночные GaN ННК способны коммутировать токи плотностью в 2 MA/cm^2 , при этом, учёт поверхностных состояний на боковой границе ННК приводит к увеличению данного значения до 4 MA/cm^2 .

Пятая глава посвящена численному моделированию диода Шоттки на основе одиночного GaN ННК. Составленная физическая модель включала учёт пиннинга уровня Ферми, поверхностных состояний, эффекта Шоттки, туннелирования. В результате проведённого численного расчёта установлено, что частота отсечки такого диода Шоттки лежит в субтерагерцовом диапазоне.

В шестой главе представлены результаты приборного исполнения диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК, а также исследования их частотных возможностей при помощи малосигнального частотного анализа. Проведено численное моделирование GSG-топологии контактных площадок, показано, что потери при прохождении СВЧ сигнала, обусловленные наличием металлизации, незначительны. В ходе исследования ВАХ изготовленных диодов обнаружено, что рост диаметра ННК сопровождается снижением эффективной высоты барьера Шоттки. В свою очередь, частотные исследования показали, что соответствующие диоды на основе легированных GaN ННК достигают частоты отсечки в 165.8 ГГц .

Таким образом, структура и содержание работы свидетельствуют, что диссертация представляет собой завершённое научное исследование, в котором показана актуальность, новизна и перспективность подходов. Выводы и заключения обоснованы и имеют научную и практическую ценность для разработок в области создания полупроводниковых приборов на базе GaN ННК.

Результаты диссертационной работы опубликованы в отечественных и зарубежных рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных работах в профильных журналах по данной тематике исследований: *Materials Science in Semiconductor Processing*, *Nanotechnology*, *physica status solidi (RRL)* – *Rapid Research Letters*, *Journal of Physics: Conference Series* и др., индексируемых в Scopus и WoS.

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (2017 – 2019 г.)
- Международная конференция Физика.СПб (2017, 2019 г.)
- International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN» (2018 – 2022 г.)
- Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники (с участием иностранных ученых) ФОТОНИКА 2021

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Основное содержание диссертации опубликовано в 12 статьях в изданиях, индексируемых Web of Science или Scopus, и входящих в перечень ВАК:

1. Shugurov K. Y. et al. Study of SiC buffer layer thickness influence on photovoltaic properties of n-GaN NWs/SiC/p-Si heterostructure // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2019. – Т. 90. – С. 20-25.

В данной работе исследуется солнечный элемент на основе массива GaN ННК, синтезированных на подложке Si методом молекулярно-пучковой эпитаксии с буферным слоем SiC. Кристаллическое качество слоя SiC и GaN ННК было изучено с помощью метода комбинационного рассеяния света и измерения низкотемпературной фотолюминесценции. Исследованы спектральные и вольт-амперные характеристики гетероструктур n-GaN/SiC/p-Si с различной толщиной буферных слоев SiC-3С. Показано, что увеличение толщины буферного слоя более 100 нм приводит к

увеличению напряжения холостого хода и увеличению эффективности солнечного элемента по сравнению с гетероструктурой n-GaN/p-Si без буферного слоя. Экспериментальные данные показывают наличие дефектных состояний на гетерогранице.

2. Bolshakov, A. D., Fedorov, V. V., Shugurov, K. Y., Mozharov, A. M., Sapunov, G. A., Shtrom, I. V., ... & Mukhin, I. S. (2019). Effects of the surface preparation and buffer layer on the morphology, electronic and optical properties of the GaN nanowires on Si. *Nanotechnology*, 30(39), 395602.

В работе исследована роль подготовки поверхности подложки Si(111) и состава буферного слоя на рост, электронные и оптические свойства GaN ННК, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Проведено сравнительное исследование роста ННК GaN на голой подложке Si (111), промежуточном слое нитрида кремния, предварительно осажденных буферных слоях AlN и GaOx, монослойном смачивающем слое Ga, подготовленным методом капельной эпитаксии. Показано, что однородность и морфология массивов ННК существенно зависят от выбранного буферного слоя и способа подготовки поверхности. Также обсуждается влияние буферного и затравочного слоев на зародышеобразование и десорбцию. Установлено, что использование буферного слоя AlN соответствует наиболее однородному массиву ННК с наименьшей дисперсией длины, а наименее однородному массиву соответствует голая кремниевая подложка.

3. Shugurov K. Y. et al. Hydrogen passivation of the n-GaN nanowire/p-Si heterointerface // *Nanotechnology*. – 2020. – Т. 31. – №. 24. – С. 244003.

В работе исследовано влияние обработки водородной плазмой на электрические и оптические свойства гетероструктур GaN ННК/Si, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Также изучается влияние длительности обработки на эффект пассивации. Установлено, что оптимальная продолжительность пассивации, обеспечивающая улучшение электрических свойств, составляет 10 мин в пределах исследованных режимов пассивации.

4. Shugurov K. et al. Single GaN Nanowires for Extremely High Current Commutation // *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*. – 2021. – Т. 15. – №. 4. – С. 2000590.

В работе исследуется возможность одиночных GaN ННК, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, коммутировать высокие плотности тока. Установлено, что такие ННК выдерживают токи плотностью в 2 MA/cm^2 без принудительного охлаждения и деградации.

5. 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*. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1695. – №. 1. – С. 012172.

В работе проведено численное моделирование диода Шоттки на основе одиночного вертикально ориентированного GaN ННК на кремниевой подложке. Высота потенциального барьера рассчитывалась с учетом возникновения сил изображения, а также закрепления уровня Ферми на границе раздела металл/полупроводник. Вольт-амперные характеристики были получены для различных уровней легирования ННК с учетом модели туннелирования Венцеля–Крамерса–Бриллюэна. Частоты отсечки определены по кривым релаксации тока от времени для различных длин ННК и уровней легирования. Показано, что такая диодная структура демонстрирует частоту отсечки в диапазоне 0.1 до 0.9 ТГц.

6. 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. – Т. 48. – С. 22.

В работе описывается изготовление серии диодов Шоттки на основе одиночных нитевидных нанокристаллов GaN. По данным малосигнального частотного анализа (параметр S_{21}) диодных структур при различных напряжениях смещения определены параметры соответствующей эквивалентной электрической схемы. Показано, что частота отсечки созданных диодов достигает 27.5 ГГц.

7. Shugurov K. U. et al. Influence of interface layer preparation on the electrical and spectral characteristics of GaN/Si solar cells // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2018. – Т. 993. – №. 1. – С. 012034.

В работе получены и проанализированы вольт-амперные и спектральные характеристики солнечных элементов на основе GaN ННК на кремнии, различающихся способом подготовки интерфейсного слоя. Продемонстрированы экспериментальные зависимости внешней квантовой эффективности от интенсивности падающего излучения.

8. Bolshakov, A. D., Fedorov, V. V., Sapunov, G. A., Mozharov, A. M., Dvoreckaia, L. N., Shugurov, K., ... & Mukhin, I. S. (2018, September). GaN nanowires on Si (111) substrates via molecular beam epitaxy: growth, electronic and optical properties. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1092, No. 1, p. 012013). IOP Publishing.

В этой работе изучается влияние буферных слоёв на рост, электронные и оптические свойства GaN ННК. Получены и проанализированы статистические данные о морфологии синтезированных массивов. Показано, что поверхностная плотность ННК

существенно зависит от способа подготовки поверхности подложки. Электрические свойства массивов изучались посредством анализа вольт-амперных характеристик, а оптические свойства исследовались с помощью фотолюминесценции. Установлено, что самая высокая проводимость и оптический отклик были получены для образцов с буферным слоем AlN.

9. Shugurov K. U. et al. Influence of hydrogen plasma passivation on electrical and spectral characteristics of GaN nanowires/Si solar cells //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1124. – №. 4. – С. 041021.

В работе исследуются вольт-амперные и спектральные характеристики серии солнечных элементов GaN ННК/Si, различающихся способом подготовки интерфейсного слоя. Проанализировано влияние предварительной обработки водородной плазмой на электрические и спектральные характеристики изготовленных структур. Показано, что обработка интерфейса существенно влияет на характеристики исследуемых солнечных элементов.

10. Sharov, V., Bolshakov, A., Fedorov, V., Shugurov, K. Y., Mozharov, A. M., Sapunov, G. A., & Mukhin, I. S. (2019, December). Conductive AFM study of the electronic properties of individual epitaxial GaN nanowires. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 699, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.

В этой работе методом атомно-силовую микроскопии изучается влияние подготовки поверхности подложки и состава буферного слоя на электрические и транспортные свойства GaN ННК.

11. Shugurov K. Y. et al. GaN-nanowire/Si solar cell: numerical modeling, fabrication and characterization //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1199. – №. 1. – С. 012030.

В работе исследуется солнечный элемент на основе кремния с эмиттерным слоем из массива GaN ННК. Сопоставлены и проанализированы теоретические и экспериментальные вольт-амперные и спектральные характеристики солнечного элемента. Показано значительное влияние рекомбинации на эффективность. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

12. Shugurov K. Y. et al. GaN nanowires/p-Si interface passivation by hydrogen plasma treatment //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1537. – №. 1. – С. 012012.

В работе исследовано влияние обработки водородной плазмой на электрические и оптические свойства вертикальных гетероструктур GaN ННК/Si, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Вольт-амперные характеристики показывают, что водород может эффективно пассивировать центры рекомбинации на гетерогранице GaN ННК/Si.

Таким образом, диссертация Шугурова К. Ю. на тему «Нитевидные нанокристаллы нитрида галлия на кремнии: свойства и приборное применение», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой, представляющей научный и практический интерес. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация полностью отвечает формуле специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики» (ранее 01.04.01), что полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор – Шугуров Константин Юрьевич заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Диссертационная работа и настоящий отзыв рассмотрены и утверждены на научном семинаре Центра нанотехнологий «Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» (Протокол №7 от 7 июля 2022 г.).

Заключение составил:

Заведующий кафедрой физики и
технологии наногетероструктур,
профессор СПбАУ РАН им. Ж.И.

Алфёрова

д.ф.-м.н.

Тел.: +7 (812) 448-85-91
e-mail: lipovsky@spbau.ru



А.А. Липовский