

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.02 ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ УЧРЕЖДЕНИИ
НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Аттестационное дело № _____
Решение диссертационного совета от 17.04.2025 № 6

О присуждении Лебедевой Наталье Михайловне, гражданке РФ, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Физические и конструктивно-технологические решения по созданию высоковольтных и лавинных 4H-SiC диодов» по специальности 1.3.11. Физика полупроводников принята к защите «19» декабря 2024 г., протокол №11, диссертационным советом 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утверждённым 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе №75.

Соискатель Лебедева Наталья Михайловна, 19 августа 1990 года рождения, в 2006 году поступила в Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)». В 2012 году окончила магистратуру в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по направлению «Электроника и микроэлектроника». В 2016г. Закончила аспирантуру ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В настоящее время занимает должность научного сотрудника в лаборатории квантоворазмерных гетероструктур в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертационная работа выполнена в ФГБУН Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Научный руководитель – Иванов Павел Анатольевич

доктор физико-математических наук, Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН», ведущий научный сотрудник лаборатории мощных полупроводниковых приборов

Научный консультант – Левинштейн Михаил Ефимович

доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, главный научный сотрудник лаборатории физики полупроводниковых приборов

Официальные оппоненты:

1. **Векслер Михаил Исаакович**, доктор физико-математических наук, профессор Российской академии наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией мощных полупроводниковых приборов в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, дал положительный отзыв на диссертацию.

В отзыве содержится 5 замечаний:

1. Чем обусловлены выбор энергии облучающих структуру ионов аргона и выбор толщины полуизолирующей области?
2. Проведенные исследования и полученные результаты представляются чрезвычайно важными с точки зрения их реализации в широком (промышленном) масштабе. Автору следовало бы указать на перспективу реализации полученных в работе результатов.
3. Считаю, что диссертация смотрелась бы ярче, если бы автор в той или иной форме представил сравнение с результатами работ других групп по эффективности защиты от краевого пробоя.
4. Менее существенное замечание касается терминологии. Диссертант в тексте диссертации и в своих статьях использует термин «прямая» фаска. Действительно, термины «прямая» и «обратная» фаска широко употребляются в отечественной литературе. Однако в англоязычных источниках общеупотребительными являются термины «отрицательная» и «положительная» фаска (negative and positive bevel). Представляется, что правильнее было бы использовать термины «отрицательная» и «положительная» фаска. Это необходимо для правильного перевода статей с русского на английский. Далее, в тексте диссертации для терминов «быстрый термический отжиг» в некоторых разделах используется аббревиатура БТО, а в некоторых других – RТА (от английского Rapid Thermal Annealing).
5. С сожалением следует отметить, что количество пунктуационных недочетов и мелких опечаток весьма значительно.

Сделанные замечания не снижают актуальности, научной и практической ценности полученных результатов. Не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту, и выводы, сформулированные в диссертации.

2. Афанасьев Алексей Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

В отзыве содержится 3 замечания:

1. В разделе 2.2 диссертации, посвященном моделированию охранной полуизолирующей области, показано, что эффективность охраны должна, в принципе, постепенно деградировать при повышении температуры из-за теплового выброса захваченных электронов в зону проводимости. Было бы важно экспериментально исследовать облученные диоды на предмет эффективности охраны при повышенных температурах, чего в диссертации, к сожалению, нет.
2. В работе продемонстрированы два типа p^+-p-n^+ диодов, выполненных с различной охранной системой (полуизолирующая i -периферийная область и структура с прямой фаской), имеющие идентичные ВАХ и величины напряжений лавинного пробоя. Поскольку диоды классифицированы в работе как ДДРВ (рис.5б), то представляет несомненный интерес оценка влияния используемых охранных систем на скорость переключения диодов при работе в режиме «ключа размыкающего типа».
3. В главе 6 отмечается, что прямая фаска эффективна для защиты от поверхностного пробоя именно для приборов, выполненных на основе SiC-эпиструктур типа p^+-p-n^+ . Хотелось бы услышать рассуждения автора о возможности использования таких приборов в качестве эффективных лавинных обострителей в структуре генераторов сверхкоротких импульсов.

В отзыве сказано, что сформулированные замечания и вопросы не снижают актуальности, научной и практической ценности полученных результатов, не ставят под сомнение положения, выносимые на защиту, и выводы, сформулированные в диссертации.

Ведущая организация - АО «Группа «КРЕМНИЙ-ЭЛ», предоставила положительный отзыв на диссертацию. Отзыв подготовлен главным технологом дизайн центра Брюшно Н.А. и утвержден директором по развитию и новой технике Гаврилиным Андреем Николаевичем. В заключении указано, что по актуальности темы исследования, значимости и научному уровню полученных результатов представленная работа полностью удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

В отзыве ведущей организации содержится 3 замечания:

1. В диссертации обратные ВАХ диодов с р-п-переходом, измеренные с помощью цифрового характериографа, показаны в линейном масштабе от нуля до 4 мА. Интересно было бы видеть ВАХ в экспоненциальном масштабе, показывающем величину предпробойных утечек, начиная с наноамперных токов, как это сделано для диодов Шоттки.
2. В разделе диссертации, посвященном диодам Шоттки с краевой i -областью, не указана высота барьера Шоттки, хотя выбор по технологии небольшой, это T_i с высотой барьера 1.19 эВ.
3. Работа диодов с р-п-переходом рассматривается только в обратном направлении. В случае облучения р-п-диодов, в принципе, возможно некоторая трансформация прямых ВАХ и характеристик обратного восстановления из-за влияния проникающего облучения на время жизни инжектированных носителей.

В отзыве сказано, что изложенные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловлен их высоким научным авторитетом, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. В ходе защиты на все замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

На автореферат поступило 3 отзыва:

- 1) **Отзыв член-корр. РАН, д.т.н. Рукина Сергея Николаевича**, главного научного сотрудника, заведующего лабораторией импульсной техники Института электрофизики Уральского отделения РАН (620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106).
Отзыв положительный, содержит 2 замечания:
 1. Работа диодов с р-п-переходом исследована только для обратного смещения. Однако известно, что облучение р-п-диодов может приводить к изменению и прямых ВАХ из-за влияния проникающего облучения. Возможное негативное влияние на прямую ветвь ВАХ в диссертации не рассмотрено.
 2. Неясно, чем обусловлен выбор энергии облучающих структуру ионов аргона и выбор толщины полуизолирующей области.

В отзыве указано, что работа соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

2) **Отзыв д. ф.-м.-н. Шмидт Наталии Михайловны**, главного научного сотрудника лаб. интегральной оптики на гетероструктурах Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26).

Отзыв положительный, без замечаний.

3) **Отзыв к. ф.-м. н. Прудаева Ильи Анатольевича**, доцента, и.о. заведующего кафедрой полупроводниковой электроники, заведующего лабораторией неравновесных процессов в полупроводниковой электронике, Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, Томск, пр. Ленина, 36).

Отзыв положительный, содержит 2 замечания:

1. В обзоре литературных данных не хватает рассмотрения достигнутого уровня. Работы по карбиду кремния ведутся интенсивно, существует множество серийных приборов, на каждый из которых выпускается технический паспорт, есть патенты и оригинальные статьи. Читателю хорошо было бы увидеть некую сравнительную таблицу параметров, из которой можно было бы сделать вывод о месте работы среди прочих. Без такого сравнения предложенные технологические подходы могут показаться своеобразной панацеей.
2. В автореферате часто упоминается, что та или иная технология была разработана. Однако, в основном представлено описание реализованной технологии, но не результаты разработки. Например, разработка технологии имплантации ионов аргона должна содержать перебор ряда технологических параметров (энергии ионов, дозы, толщины и параметров топологии маски). В ходе технологического моделирования средствами TCAD или в процессе ряда технологических экспериментов следовало бы получить наиболее оптимальный с точки зрения технических характеристик и стоимости изготовления маршрут. После знакомства с авторефератом о подобных разработках делать выводы сложно.

В отзыве указано, что работа соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Публикации. Личный вклад автора.

Н.М. Лебедевой были разработаны технологии постростовой обработки 4H-SiC-структур для создания охранного контура в виде полуизолирующей i -области для высоковольтных диодов с p - n -переходом и диодов Шоттки, а также охранного контура в виде прямой фаски для высоковольтных диодов с p - n -переходом. Диссертантом были проведены экспериментальные исследования различных этапов постростовой технологии, разработан оптимальный технологический маршрут изготовления перечисленных приборов, по результатам которых были созданы опытные партии приборов. Кроме того, Н.М. Лебедева принимала активное участие в моделировании и проведении измерений вольт-амперных характеристик изготовленных приборов. Результаты диссертационного исследования докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 2020г.
Н.М. Лебедева, П.А. Иванов, Н.Д. Ильинская, М.Ф. Кудояров Высоковольтные 4Н-SiC диоды с охранной полуизолирующей i-областью, Труды конференции, с.60-62
2. Электроника и микроэлектроника СВЧ, 2021
Н.М. Лебедева; П.А. Иванов; Н.Д. Ильинская; Т.П. Самсонова Высоковольтные лавинные 4Н-SiC диоды с прямой фаской, Сборник тезисов, т.1, с. 84 - 88
3. 24-я Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники», 2021г.
П.А. Иванов, Н.М. Лебедева, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова, М.Ф. Кудояров Высоковольтные лавинные 4Н-SiC диоды с охранной краевой полуизолирующей областью, Сборник тезисов, с. 182-184

Основные результаты по теме диссертации были опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus. Их список с описанием личного вклада соискателя приводится ниже:

1. Лебедева Н.М., Самсонова Т.П., Ильинская Н.Д., Трошков С.И., Иванов П.А. «Формирование SiC-мезаструктур с пологими боковыми стенками сухим селективным травлением через маску из фоторезиста», 2020, ЖТФ, т.90, 6 стр. 997-1000
Личный вклад: принимала участие в расчете параметров фоторезистивной маски с помощью простой геометрической модели селективного травления. Участвовала в разработке технологического процесса создания маски и режимов реактивного ионно-плазменного травления SiC с целью получения необходимого угла наклона фаски.
2. Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Иванов П.А. «О защите высоковольтных мезаструктурных 4Н-SiC-приборов от поверхностного пробоя: прямая фаска», 2020, ФТП, т.54, 2 стр. 207-211
Личный вклад: принимала участие в моделировании диодов с охранной системой в виде прямой фаски.
3. Ильинская Н.Д., Лебедева Н.М., Задиранов Ю.М., Иванов П.А., Самсонова Т.П., Коньков О.И., Потапов А.С. «Микропрофилирование 4Н-SiC сухим травлением в технологии формирования структуры полевого транзистора с затвором Шоттки», 2020, ФТП, т.54, 1 стр. 97-102
Личный вклад: исследование методов сухого травления SiC для получения вертикальной и наклонной стенки меза-структуры через маску фоторезиста или металла.
4. Иванов П.А., Потапов А.С., Лебедева Н.М., Грехов И.В. «Лавинный пробой в 4Н-SiC диодах Шоттки: вопросы надежности», 2020, ЖТФ, т.90, 12 стр. 2133-2138
Личный вклад: принимала участие в измерениях вольт-амперных характеристик промышленных диодов и обсуждении результатов.
5. Иванов П.А., Лебедева Н.М. «TCAD-моделирование высоковольтных 4Н-SiC диодов с охранной полуизолирующей областью», 2021, ФТП, т.55, 2 стр. 201-206
Личный вклад: принимала участие в моделировании высоковольтных 4Н-SiC диодов с охранной полуизолирующей областью с помощью компьютерной программы SILVACO TCAD.
6. Иванов П.А., Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Кудояров М.Ф., Самсонова Т.П., Коньков О.И., Задиранов Ю.М. «Высоковольтные 4Н-SiC диоды Шоттки с полевой обкладкой», 2021, ФТП, т.55, 2 стр. 188-194
Личный вклад: принимала участие в разработке маскирующих элементов для защиты активной области диода от облучения, в создании опытного диода Шоттки и измерении его вольт-амперных характеристик.

7. Иванов П.А., Кудояров М.Ф., Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Самсонова Т.П. «Высоковольтные лавинные 4H-SiC-диоды с охранной полуизолирующей областью», 2021, Письма ЖТФ, т.47, 6 стр. 48-50

Личный вклад: принимала участие в изготовлении опытных высоковольтных диодов с охранной полуизолирующей областью, измерении их вольт-амперных характеристик на лабораторном характериографе, а также импульсных ВАХ с помощью схемы разблокированного индуктивного переключения.

8. Иванов П.А., Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Самсонова Т.П., Коньков О.И. «Высоковольтные лавинные 4H-SiC диоды с прямой фаской», 2021, ФТП, т.55, 4 стр. 349-353

Личный вклад: принимала участие в изготовлении опытных диодов с охранной системой в виде прямой фаски. Принимала участие в измерении вольт-амперных характеристик полученных диодов.

Диссертационный совет отмечает, что рассмотренная диссертация является законченной работой, полученные соискателем результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение, и на своем заседании 17 апреля 2025 г. принял решение присудить Лебедевой Наталье Михайловне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

При проведении голосования диссертационного совета в количестве 18 человек из 23 членов совета, из них в заседании участвовали 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, очно проголосовали:

За присуждение Лебедевой Наталье Михайловне ученой степени кандидата физико-математических наук подано голосов – 15,

против – нет,

недействительных бюллетеней – нет,

не проголосовали – нет.

Из 3 членов совета, участвовавших дистанционно, за присуждение Лебедевой Наталье Михайловне ученой степени кандидата физико-математических наук проголосовали: «за» – 3,

«против» – нет,

«воздержались» – нет,

«не голосовали» – нет.

Итого: из 18 членов совета, участвовавших в очно-заочном голосовании,

«за»: 18

«против»: нет

«испорченных бюллетеней»: нет

«воздержались»: нет

«не проголосовали»: нет

Зам. председателя диссертационного совета
д.ф.-м.н.,

Бурков Анатолий Трофимович

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

Сорокин Лев Михайлович

17 апреля 2025 г.