

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 УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 20.04.2023 №\_4\_\_

О присуждении Шепелеву Артему Сергеевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Транспорт неравновесных носителей заряда в облученных кремниевых детекторах при температуре сверхтекучего гелия», по специальности 1.3.11 — «физика полупроводников» принята к защите «16» февраля 2023 г., протокол № 3, диссертационным советом ФТИ 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, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75.

Соискатель Шепелев Артем Сергеевич, 13 декабря 1993 года рождения, в 2018 г. с отличием окончил Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» по направлению подготовки 11.04.04 – «электроника и наноэлектроника». С 2018 по 2022 гг. проходил обучение по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников» в аспирантуре при ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В настоящее время занимает должность младшего научного сотрудника в лаборатории неравновесных процессов в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

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

Научный руководитель – Еремин Владимир Константинович, кандидат физико-математических наук, в.н.с. лаборатории неравновесных процессов в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

**Официальные оппоненты:**

Дербин Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом ФГБУ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Гатчина, Ленинградская обл.

Жеребчевский Владимир Иосифович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ядерно-физических методов исследований физического факультета, заведующий учебной

лабораторией ядерных процессов ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург.

**Вопросы и замечания официального оппонента, д.ф.-м.н. Дербина Александра Владимировича:**

1. Кремниевые и германиевые кристаллы давно используются в качестве криогенных болометров, работающих при температурах  $10 \div 100$  мК, в которых регистрация ионизирующего излучения связана с изменением температуры кристалла. Например, коллаборация CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) использовала для поиска WIMPs (weakly interacting massive particles) Si- и Ge детекторы, с которых, помимо фононного сигнала, снимался и ионизационный сигнал. Возможно, полученные в данных работах результаты следовало бы отметить при обсуждении особенностей сбора носителей при низких температурах.
2. В пункте 3 "практической значимости" диссертационной работы указано, что «Экспериментальное наблюдение полной ионизации атомов мелкой примеси в области пространственного заряда p-n перехода кремниевого детектора в диапазоне температур, близких к температуре жидкого гелия, имеет принципиальное значение для создания кремниевых сенсоров нейтрино и слабо взаимодействующих массивных частиц (weakly interacting massive particles), требующих охлаждения сенсоров до температур ниже 1 К.» Однако в диссертации не поясняется, почему это важно именно для детекторов нейтрино и частиц темной материи, какие характеристики указанных детекторов при этом изменяются и отсутствуют ссылки на будущие или существующие проекты, направленные на регистрацию нейтрино или частиц темной материи с помощью кремниевых детекторов.
3. Работа практически свободна от стандартных замечаний, связанных с оформлением. Возможно, стоит отметить излишне частое употребление научного термина *in situ*.

**Вопросы и замечания официального оппонента, к.ф.-м.н. Жеребчевского Владимира Иосифовича:**

1. В приведенном обзоре технологии создания кремниевых детекторов описаны довольно поверхностно, а также не всегда четко описаны свойства соответствующих кремниевых сенсоров.
2. Нет достаточно полного описания радиационных дефектов и радиационных эффектов, которые могут возникать в кремниевых детекторах не только при их облучении релятивистскими протонами на БАК, но и заряженными частицами меньших энергий. Последнее имеет большое значение при использовании таких детекторов в экспериментальных исследованиях в других областях физики элементарных частиц.
3. В ряде случаев недостаточно полно описываются условия проведения эксперимента и не уделено внимание источникам возможных погрешностей в экспериментальных данных.

4. В работе замечены стилистические ошибки и необоснованное использование терминов на английском языке. Последнее, особенно ярко выражено в иллюстрациях и подписях к ним.

**Ведущая организация** Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований в своем заключении, подписанном доктором физико-математических наук А.С. Фомичевым, утвержденном вице-директором ОИЯИ доктором физико-математических наук С.Н. Дмитриевым, дала положительный отзыв и отметила, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершенное научное исследование, соответствующее профилю совета 34.01.02 (специальность 1.3.11 – «физика полупроводников»). В отзыве содержатся следующие вопросы и замечания:

1. В описании метода переходного тока не обсуждено влияние величины генерируемого лазером «пробного» дрейфующего заряда на распределение исследуемого электрического поля.
2. Опыт ОИЯИ в проведении экспериментов в физике высоких энергий и ядерной физике говорит о том, что построение сценариев радиационной деградации полупроводниковых детектирующих систем чрезвычайно важно при планировании длительных исследований. В связи с этим возникает вопрос, можно ли смоделировать сценарий радиационной деградации кремниевых детекторов при температуре 1.9 К на основании результатов диссертационной работы?
3. В диссертационной работе в описании эксперимента, проведенного на ускорителе Proton Synchrotron в ЦЕРНе, не указана величина тока в детекторе, возникающего под воздействием пакета протонов ускорителя.
4. Можно ли оценить примерную температуру «отжига» радиационных дефектов, вводимых протонами при температуре сверхтекучего гелия?

Отмечено, что указанные замечания не снижают общую высокую оценку диссертации. Результаты работы обладают научной и практической ценностью, обоснованы и достоверны. Исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, являются актуальными и своевременными. Результаты диссертации апробированы на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в 8 научных статьях в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Шепелев Артем Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико – математических наук по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловливается их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и

оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На все замечания соискателем даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

**На автореферат поступило 6 отзывов, все они положительные.**

1. Отзыв доктора физико-математических наук Родина Павла Борисовича ведущего научного сотрудника лаборатории мощных полупроводниковых приборов ФТИ им. А.Ф. Иоффе (194021, СПб, ул. Политехническая, д. 26).

Замечание к автореферату:

Из автореферата непонятно, почему эффект Пула-Френкеля сохраняет свою роль в ионизации мелкой примеси в электрическом поле вплоть до температуры в несколько Кельвинов. Можно ожидать, что при сверхнизких температурах доминирующим механизмом полевой ионизации является прямое туннелирование.

2. Отзыв доктора физико-математических наук Панкратова Андрея Леонидовича ведущего научного сотрудника отдела терагерцовой спектроскопии Института физики микроструктур РАН — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной физики им А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (603950, Россия, Нижний Новгород, ГСП-105).

Замечание к автореферату:

Замечанием к автореферату является отсутствие объяснения сравнительно низкого уменьшения амплитуды импульсного сигнала по сравнению с высокой скоростью введения радиационных дефектов.

3. Отзыв кандидата физико-математических наук Козлова Владимира Алексеевича ведущего научного сотрудника, руководителя группы полупроводниковых материалов и приборов импульсной электроники АО «Производственный комплекс «ФИД-Техника» (194223, СПб, пр. Тореза, д. 68 лит. В, пом. 18).
4. Отзыв кандидата физико-математических наук Егорова Николая Николаевича заместителя начальника отдела ООО НПП «ДОЗА» (124498, г. Зеленоград, Георгиевский пр., д. 5).
5. Отзыв доктора физико-математических наук Грунина Анатолия Васильевича главного научного сотрудника института ядерной и радиационной физики ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (607188, Нижегородская область, г. Саров, пр. Мира, 37).

Замечания к автореферату:

- 1) Приведенное на стр.1 краткое описание раздела 2.2 не позволяет оценить характеристики использованных соискателем экспериментальных установок и использованного оборудования ФТИ им. А.Ф. Иоффе.
- 2) Не приведены конструктивные особенности  $p+np+$  - детекторов, состав контактов и напряжение питания.
- 3) Энергетический спектр генерируемых высокоэнергетическими протонами неравновесных носителей заряда – электронов и дырок существенно отличается от спектра носителей при оптической генерации, и отсутствие информации о

характеристиках использованного в исследованиях лазерного излучения не позволяет сравнить начальные подвижности генерируемых носителей в этих двух случаях.

- 4) Приведенные на рисунках 1 и 2 результаты восстановления физической формы токовых откликов и восстановления распределения электрического поля при отсутствии используемых в этих процедурах аналитических соотношений не позволяют в полной мере оценить корректность применяемых процедур обработки экспериментальных данных.
- 5) При учете роли фононов в туннелировании электронов целесообразно привести оценку концентрации фононов при температуре 1.9К.
6. Отзыв кандидата технических наук Лашаева Сергея Ивановича старшего инженера АО «Радиовый институт им В.Г. Хлопина» (194021, СПб, 2-й Мушинский пр., д. 28).

Замечания к автореферату:

- 1) Присутствует некоторая произвольность в формулировках, отличающихся от общепринятых, например, расширенное трактование термина «транспорт», хотя по содержанию он ближе к кинетике носителей.
- 2) Недостаточно корректное применение понятия «радиационной стойкости», с расширением его границ, включающим изменение механизма работы детектора при появлении лавинного умножения носителей. Это скорее сохранение работоспособности при решении конкретной задачи.
- 3) Формулировка эффекта, как, «аномально высокая скорость введения электрически активных дефектов», можно более точно записать, заменив слово «введение» на «накопление».

#### **Научная и практическая значимость работы:**

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по экспериментальному исследованию облученных кремниевых детекторов при температуре сверхтекучего гелия были получены следующие результаты, представляющие практическую значимость и являющиеся актуальными для современной физики полупроводников:

1. Разработан универсальный алгоритм обработки импульсных токовых откликов детекторов с восстановлением их физической формы, который расширяет возможности метода переходного тока, применяемого для исследований кремниевых детекторов.
2. Предложенный способ определения амплитуды токового отклика детектора в нулевой момент времени, входящий в разработанный алгоритм обработки сигнала детектора, является универсальным и критически важным для количественного исследования транспорта неравновесных носителей заряда в любых типах полупроводниковых детекторов.
3. Экспериментально обнаружена полная ионизация атомов мелкой примеси в области пространственного заряда *p-n* перехода кремниевого детектора в диапазоне температур, близких к температуре жидкого гелия.

4. Обнаружена многостадийность процесса собирания неравновесного заряда в кремниевых детекторах, работающих при температурах сверхтекучего гелия, построена модель формирования сигнала в детекторе, включающая в себя лавинное умножение электронов и дырок вблизи контактов детектора.
5. Обнаружена аномально высокая скорость введения электрически активных дефектов при температурах сверхтекучего гелия вследствие отсутствия температурной перестройки первичных дефектов, вводимых протонами.
6. Обнаружено, что многостадийность процесса переноса заряда в детекторе с лавинным умножением компенсирует потери неравновесного заряда, связанные с захватом на глубокие уровни радиационных дефектов, что эффективно повышает радиационную стойкость детекторов при температуре 1.9 К.

Результаты, представленные в диссертации, являются оригинальными, а сама работа законченной и имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение.

#### **Достоверность результатов**

Достоверность исследования подтверждается использованием современного экспериментального оборудования, системным анализом полученных результатов и их воспроизводимостью на серии исследованных образцов и выполнением математических операций с необходимой точностью. Данные экспериментов для исследованных образцов согласованы и дополняют друг друга.

#### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в планировании, постановке и проведении экспериментов по исследованию кремниевых детекторов на экспериментальной установке в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Измерения, разработка алгоритма обработки данных, получение и анализ экспериментальных результатов были выполнены автором лично. Автор принимал непосредственное участие в построении модели, описывающей экспериментальные результаты *in situ* радиационных тестов кремниевых детекторов в рамках программы исследований BLM, выполненных на ускорителе PS в ЦЕРН. Разработка математической процедуры обработки экспериментальных данных и все численные расчеты в диссертации проведены автором лично.

#### **Апробация работы**

Основные результаты работы представлены на международных конференциях:

1. A. Shepelev, V. Eremin, E. Verbitskaya. «Novel view on extraction of charge carrier transport parameters from classical TCT». Oral presentation. 33<sup>rd</sup> RD50 Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders (CERN), 26-28 November 2018. Geneva, Switzerland.

2. А. Шепелев, «Гипотеза внутреннего умножения неравновесного заряда в облученных кремниевых детекторах ядерных излучений при температуре 1.9 К», PhysicA.SPB 2019, St Petersburg, 22-24 October 2019
3. A. Shepelev, V. Eremin, E. Verbitskaya, «Evidence of charge multiplication in silicon detectors operated at a temperature of 1.9 K». Oral presentation. 35<sup>th</sup> RD50 Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders (CERN) 18-20 November 2019. Geneve, Switzerland.
4. V. Eremin, E. Verbitskaya, A. Shepelev, «Enhanced influence of defect clusters on the electric field distribution in Si detectors: irradiation with <sup>40</sup>Ar ions. Contribution». 35<sup>th</sup> RD50 Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders (CERN) 18-20 November 2019. Geneve, Switzerland.
5. А. Шепелев, «Аномально низкая энергия эмиссии электронов с энергетических уровней фосфора в электрическом поле кремниевых *p-n* переходов при температуре 10-20 К», PhysicA.SPB 2020, St Petersburg, 19-23 October 2020.
6. А. Шепелев, «Параметризация процесса переноса заряда в присутствии лавинного умножения в сильнооблученных pin-структурах при T=1.9К», PhysicA.SPB 2021, St Petersburg, 18-22 October 2021.
7. A. Shepelev, V. Eremin, E. Verbitskaya, «Evidence of multistage charge collection in Si irradiated detectors operated as the monitors of intensive fragmented proton beams». Oral presentation. 39<sup>th</sup> RD50 Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders (CERN) 17-19 October 2021. Valencia, Spain.
8. A. Shepelev, V. Eremin, E. Verbitskaya, «Multistage impact ionization in Si detectors in situ irradiated at 1.9К». Oral presentation. 41<sup>st</sup> RD50 Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders (CERN) November 20 – December 2, 2022. Seville, Spain.

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 8 статей в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus (в скобках указан личный вклад автора):

1. Eremin V. et al. A comparative study of silicon detector degradation under irradiation by heavy ions and relativistic protons // *J. Inst.* — 2018. — Т. 13. — № 01. — С. P01019. (разработка и реализация экспериментов по методу переходного тока, анализ полученных результатов, подготовка текста статьи к публикации)
2. Eremin V. et al. The paradox of characteristics of silicon detectors operated at temperature close to liquid helium // *J. Appl. Phys.* — 2018. — Т. 123. — № 20. — С. 204501. (постановка и проведение экспериментов по методу переходного тока в различных режимах обеднения детекторов при температурах жидкого гелия, обработка и анализ экспериментальных результатов, построение модели формирования сигналов в детекторе, подготовка текста статьи к печати).

3. Verbitskaya E., Eremin V., Shepelev A. Electric field distribution in Si detectors irradiated with  $^{40}\text{Ar}$  ions: experimental study and simulation // *J. Inst.* — 2020. — Т. 15. — № 02. — С. P02017. (Планирование экспериментов, исследование детекторов до и после облучения, проведение экспериментов по методу переходного тока, разработка алгоритмов восстановления электрического поля в сильно облученных детекторах при температурах в районе 200К, построение модели формирования сигнала в детекторе, численное моделирование распределений электрического поля и сравнение с экспериментальными результатами, подготовка текста статьи к печати).
4. Shepelev A., Eremin V., Verbitskaya E. Anomalously low ionization energy of phosphorus atoms in the electric field of silicon p-n junctions in the temperature range 10-20 K // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2020. — Т. 1697. — № 1. — С. 012067. (проведение экспериментов по методу переходного тока, оптимизация параметров исследования, обработка и анализ экспериментальных результатов, подготовка текста статьи к печати)
5. Verbitskaya E. et al. Development of silicon detectors for Beam Loss Monitoring at HL-LHC // *J. Inst.* — 2017. — Т. 12. — № 03. — С. C03036. (анализ экспериментальных результатов по исследованию эффективности собирания заряда облученными детекторами при температурах жидкого гелия, построение физической модели формирования сигнала в детекторе)
6. Shepelev A., Eremin V., Verbitskaya E. Observation of internal multiplication of nonequilibrium charge in irradiated silicon detectors at a temperature of 1.9 K // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2019. — Т. 1400. — № 4. — С. 044015. (анализ экспериментальных результатов, полученных на ускорителе Proton Synchrotron в ЦЕРНе, построение аналитической модели, описывающей многостадийный транспорт носителей заряда в детекторе при температуре 1.9 К, учет различных механизмов, влияющих на форму токовых откликов детекторов, подготовка текста статьи к печати).
7. Shepelev A.S., Eremin V.K., Verbitskaya E.M. Parameterization of charge transport process with avalanche multiplication in irradiated Si p-i-n structures at  $T = 1.9\text{ K}$  // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2021. — Т. 2103. — № 1. — С. 012063. (количественное описание многостадийного процесса собирания заряда в облученных детекторах при температуре сверхтекучего гелия, подготовка текста статьи к публикации).
8. Eremin V., Shepelev A., Verbitskaya E. Signal amplification in multistage charge collection process in Si detectors in situ irradiated at superfluid helium temperature // *J. Inst.* — 2022. — Т. 17. — № 11. — С. P11037. (анализ экспериментальных результатов, построение количественной физической модели транспорта носителей заряда в облученных детекторах при температуре сверхтекучего гелия, включающей в себя лавинное умножение вблизи контактов детектора, восстановление распределения электрического поля, определение концентрации электрически активных дефектов, вводимых протонами с энергией 23 ГэВ в кремний, подготовка текста статьи к печати).



На заседании 20 апреля 2023 г. диссертационный совет принял решение присудить Шепелеву Артему Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении голосования диссертационного совета в количестве 20 человек, из них 14 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, очно проголосовали 15:

За присуждение Шепелеву Артему Сергеевичу ученой степени кандидата физико-математических наук подано голосов – 15

против – 0

недействительных бюллетеней – 0

Из 5 членов совета, участвовавших дистанционно, за присуждение Шепелеву Артему Сергеевичу ученой степени кандидата физико-математических наук проголосовали:

за – 5

против – 0

воздержались – 0

Итого: из 25 членов совета участвовали в очно-заочном голосовании – 20.

за: 20

против: 0

воздержались: 0

Зам. председателя диссертационного совета,  
академик РАН,

Ивченко Еугениус Левович

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

Сорокин Лев Михайлович

20 апреля 2023 года.