

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ведущей организации – Объединенного института ядерных исследований на диссертационную работу **Шепелева Артема Сергеевича** на тему: «Транспорт неравновесных носителей заряда в облученных кремниевых детекторах при температуре сверхтекучего гелия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников»

### Актуальность диссертационной работы

В работе А.С. Шепелева объектом исследований являются кремниевые детекторы излучений, представляющие собой  $p^+/n/n^+$  структуры, функционирующие в нестандартных условиях – при температуре сверхтекучего гелия (1.9К) и находящиеся под воздействием релятивистских протонов. Актуальность изучения работы детекторов в таких условиях обусловлена необходимостью мониторирования потерь пучка протонов Большого адронного коллайдера (БАК) с минимальным воздействием на результат фонового излучения в канале ускорителя, что является критически важным в связи с планами модернизации БАК. В связи с этим в рамках сотрудничества ФТИ им. А.Ф. Иоффе и группы ЦЕРНа было предложено рассмотреть возможность создания системы регистрации частиц, покидающих траектории ускорения, (мониторов потерь пучка - *Beam Loss Monitors, (BLM)*) на основе компактных кремниевых детекторов. Это позволяет расположить мониторы в непосредственной близости к сверхпроводящим обмоткам

электромагнитов и тем самым измерять поток частиц, непосредственно воздействующий на сверхпроводящие обмотки. Очевидно, что кремниевый детектор в этом случае должен находиться при температуре обмотки магнита, т.е. при температуре сверхтекучего гелия (1.9К). Следует подчеркнуть, что системные исследования радиационной деградации кремниевых сенсоров под воздействием облучения при столь низкой температуре ранее не проводились.

Основной информацией, получаемой от полупроводниковых детекторов в режиме мониторирования пучка коллайдера, является амплитуда сигнала. Ее величина определяется транспортом неравновесных носителей заряда, генерируемых пучком релятивистских протонов, т.е. свойствами неравновесных электронов и дырок и условиям их дрейфового переноса. Именно этому вопросу, а именно транспорту неравновесных носителей заряда в чувствительной области кремниевых детекторов, облучаемых при температуре сверхтекучего гелия, посвящена работа А.С. Шепелева.

Таким образом, поставленная цель и задачи, решаемые в работе А.С. Шепелева, являются объективно востребованными, и поэтому актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Структурно диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 137 страниц, включая 68 рисунков, 5 таблиц и список цитируемых источников, содержащий 143 наименования.

Введение включает в себя обоснование актуальности и новизны работы. В разделе сформулирована цель и соответствующие ей решаемые задачи, представлена практическая значимость результатов работы и приведены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу литературных источников. В ней содержатся необходимые для предмета исследования сведения по физике полупроводников и кремниевых детекторов излучений, рассмотрены статические характеристики устройств, приведено описание кинетики переноса неравновесного заряда в чувствительном объеме детектора.

В главе приведены модели и математические закономерности, описывающие транспорт носителей заряда в необлученных и облученных детекторах. Отдельно рассмотрены различные варианты конструкций кремниевых детекторов, используемых в экспериментах на БАК.

Во второй главе содержатся сведения об использованном в работе методе переходного тока, который состоит в регистрации и последующем анализе формы токовых откликов детектора на импульсную генерацию носителей заряда. Приведена модель формирования сигнала и математическая формулировка учитываемых физических закономерностей. В главе подробно описаны две экспериментальные установки, использованные для измерения токовых откликов детекторов. Первая – лабораторная, собранная на базе криостата замкнутого цикла в ФТИ им. А.Ф. Иоффе при непосредственном участии А.С. Шепелева, и вторая – реализованная в ЦЕРНе (Женева, Швейцария) на ускорителе Proton Synchrotron с использованием комплекса приборов, необходимых для исследований фотоотклика детекторов в процессе облучения при температуре 1.9К с участием персонала ЦЕРНа.

Третья глава диссертационной работы посвящена построению алгоритма обработки экспериментальных токовых сигналов детекторов. В ней подробно рассмотрены формирование токового сигнала и механизмы, влияющие на форму импульсов тока. С учетом того, что фронт нарастания токового отклика детектора определяется входной цепью регистрирующей электроники, был построен алгоритм определения истинного значения тока в нулевой момент времени, что важно для количественного анализа процессов в детекторе. Рассмотрены механизмы, определяющие форму спада импульса тока, включающие профиль поглощения лазерного излучения в кремнии и диффузионное растекание носителей заряда в процессе дрейфа. В результате была создана процедура восстановления физической формы импульса тока, удобная для получения количественной информации о транспорте носителей заряда в чувствительной области детектора. Приведена оценка точности

получаемой физической информации, что делает результат несомненно важным для практического использования.

Четвертая глава посвящена исследованию зарядового состояния мелкой примеси фосфора в кремнии на установке в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в температурном диапазоне 6 –300К и анализу экспериментальных результатов. Вопрос несомненно важен для физики формирования электрического поля в кремниевых детекторах, работающих при температурах, способных влиять на зарядовое состояние атомов фосфора, а, следовательно, и на распределение электрического поля. В главе приведены результаты для нескольких экспериментальных образцов детекторов, работающих в режиме как полного, так и частичного обеднения чувствительной области. С использованием алгоритма обработки токового отклика детектора, разработанного в главе 3, установлено, что электрическое поле в чувствительных объемах полностью обедненных детекторов неоднородно во всем температурном диапазоне проведения эксперимента, а концентрация заряженных атомов фосфора соответствует их 100% ионизации вплоть до температуры 6К. Результат был подтвержден и при условии частичного обеднения чувствительной области детектора. Наблюдаемая закономерность была объяснена эффектом Пула-Френкеля при доминирующей роли туннелирования электронов сквозь модифицированный электрическим полем потенциальный барьер атома фосфора. Количественная оценка результатов эксперимента и их экстраполяция в область меньших температур с учетом изменения спектра фононов показала принципиальную возможность полной ионизации атомов фосфора и при температуре сверхтекучего гелия, что, несомненно, следует учитывать при использовании кремния, как чувствительного объема отдельных типов болометрических детекторов, работающих при температурах ниже единиц градуса Кельвина.

В пятой главе диссертационной работы приведены результаты анализа экспериментальных данных *in situ* радиационных тестов, проведенных на ускорителе Proton Synchrotron в ЦЕРНе. Глава посвящена обнаруженной

автором многостадийности процесса созиания неравновесного заряда в детекторах, облучаемых *in situ* протонами с энергией 23 ГэВ при температуре 1.9К и описанию феноменологической модели многостадийности, предполагающей лавинное умножение носителей заряда вблизи контактов детектора. Модель обоснована экспериментальными зависимостями времени дрейфа, времени захвата, амплитуды тока и величины собранного заряда от среднего электрического поля в детекторе. Восстановленное в рамках модели распределение электрического поля в чувствительном объеме детектора, показало его существенную неоднородность с узкими максимумами вблизи контактов детектора. Характеристики максимумов электрического поля, т.е. их ширина и максимальное значение поля, позволили оценить введенную протонным облучением минимальную концентрацию радиационных дефектов и скорость их введения при температуре 1.9К, которая приблизительно на 3 порядка больше чем соответствующая скорость введения дефектов при комнатной температуре. Аномально высокое значение объясено отсутствием перестройки (отжига) первичных дефектов при столь низкой температуре. Обнаруженные закономерности показали, что ударная ионизация, инициируемая носителями заряда вблизи контактов детектора, приводит к компенсации потерь переносимого в детекторе заряда, связанных с захватом носителей на глубокие уровни радиационных дефектов, что увеличивает дозовый диапазон эффективного функционирования детекторов.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов, содержащихся в диссертации, подтверждается использованием современного экспериментального оборудования, системным анализом полученных результатов и выполнением математических операций с необходимой точностью. Эксперименты проведены на серии образцов, результаты для которых согласованы и дополняют друг друга, при этом их достоверность подтверждена воспроизводимостью. Разработанные алгоритмы

обработки экспериментальных результатов состоят из обоснованных и не противоречащих друг другу математических операций и содержат в себе численные критерии, позволяющие судить о высокой точности выполнения процедур. При построении моделей формирования сигнала в исследованных образцах использованы известные и общепризнанные в физике полупроводников закономерности и уравнения, ссылки на литературные источники приведены в работе в полном объеме. Полученные модельные результаты хорошо согласуются с наблюдаемыми в экспериментах физическими процессами, при этом отличия корректно объяснены ограничениями рассматриваемых моделей.

Основные результаты диссертационной работы были апробированы на международных конференциях, в том числе на 4 совещаниях международной коллаборации CERN-RD50. По результатам работы опубликовано 8 статей в рецензируемых журналах.

**Практическая значимость** работы имеет два аспекта. Во-первых, необходимость экспериментальных исследований кремниевых детекторов при низких температурах, и физическое осмысление результатов важны для планирования модернизации БАК. Второй аспект связан с физикой кремниевых детекторов и вопросом их радиационной деградации. В этой части в представленной работе построен алгоритм обработки токовых сигналов детектора, расширяющий возможности метода переходного тока, и получены важные результаты, объясняющие физические процессы, протекающие в детекторах при низких температурах, и позволяющие количественно оценивать темп радиационной деградации кремниевых детекторов, а, следовательно, и прогнозировать сценарий изменения их характеристик в длительных экспериментах на модернизированном БАК.

### **Рекомендации для использования результатов и выводов диссертационной работы**

Полученные в работе результаты исследований физических процессов в кремниевых детекторах при низких температурах имеют принципиальное

значение и должны учитываться, например, при проектировании кремниевых сенсоров нейтрино или слабо взаимодействующих массивных частиц, требующих охлаждения сенсоров до температур ниже 1К.

При знакомстве с работой возникли 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 важным 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?

Указанные вопросы и замечания не являются принципиальными, не снижают общего высокого качества выполненной работы и не влияют на общее положительное заключение о диссертационной работе.

### **Заключение**

Работа является актуальной, законченной и выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Представленные в работе результаты исследований достоверны, выводы и научные положения обоснованы. Автореферат диссертации корректно и полно отражает основное содержание диссертационной работы. По значимости полученных результатов

и научному уровню диссертация соответствует 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. Автор диссертации, Шепелев Артем Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Содержание диссертационной работы и ее результаты обсуждались на семинаре сектора №6 ЛЯР ОИЯИ “Структура легких экзотических ядер” (30.03.2023), а также в рамках прямых контактов и в режиме on-line сотрудников ФТИ им. А.Ф Иоффе и ОИЯИ.

Отзыв составили:

Начальник сектора №6 ЛЯР,  
доктор физико-математических наук

А.С. Фомичев

Начальник группы №3 “Детекторные системы”  
сектора №6 ЛЯР

А.А. Безбах