

На правах рукописи

Шепелев Артем Сергеевич

**Транспорт неравновесных носителей заряда в облученных кремниевых
детекторах при температуре сверхтекучего гелия**

1.3.11 — «Физика полупроводников»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

Еремин Владимир Константинович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории неравновесных процессов в полупроводниках ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

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.

Ведущая организация:

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл.

Защита состоится «__» ____ 2023 г. в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте www.ioffe.ru

Автореферат разослан «__» ____ 2023 г.

Учёный секретарь диссертационного совета:

Доктор физико-математических наук
Сорокин Л.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Актуальность работы обусловлена возможным использованием кремниевых детекторов излучения в криогенной среде на крупнейшей ускорительной установке Большом Адронном Коллайдере (БАК) в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН, Женева, Швейцария). В БАК траектории ускоряющихся частиц – протонов с энергией до 7ТэВ – формируются магнитным полем величиной порядка 10Тл, для чего через обмотки электромагнитов пропускается электрический ток до 10кА. Конструкция магнитов, обеспечивающая подобные параметры, может быть реализована только с использованием сверхпроводящих материалов, находящихся при температуре сверхтекучего гелия (1.9К). В такой системе возникает необходимость контролировать радиационное поле в непосредственной близости к сверхпроводящим элементам установки, поскольку непредсказуемый локальный нагрев участка обмотки магнита вследствие рассеяния протонов пучка БАК может привести к срыву сверхпроводимости, выходу из строя и дорогостоящему длительному ремонту ускорителя [1, 2]. Система контроля радиационного поля в области магнитов БАК состоит из детекторов, регистрирующих протоны, которые покидают траектории ускорения и проникают в окружающее пространство ускорителя и поэтому получила название *Beam Loss Monitors*, BLM (мониторы потерь пучка). В настоящее время на БАК используются газонаполненные датчики, расположенные на внешних «теплых» корпусах дипольных магнитов [3]. Однако в связи с планами по увеличению светимости пучка протонов в БАК и переходу к HL-LHC (*High-Luminosity Large Hadron Collider*), было предложено усовершенствовать систему BLM с целью своевременного предотвращения потенциально опасных ситуаций, что инициировало исследование возможных вариантов принципиального изменения системы BLM.

Идея повышения чувствительности системы BLM заключается в размещении сенсоров максимально близко к сверхпроводящим элементам внутри криостата [4].

Однако после сборки конструкции ускорителя и начала проведения исследований внутренний объем криостата становится недоступным в течение нескольких лет. Следовательно, размещение ВЛМ вблизи сверхпроводящих обмоток электромагнитов ускорителя накладывает требования на компактность устройств и необходимость их предсказуемого функционирования в широком диапазоне доз облучения.

Для решения таких задач с учетом специфических требований было предложено использовать компактные полупроводниковые детекторы излучений, способные функционировать при температуре 1.9К [5 – 7]. С одной стороны, исследования характеристик полупроводниковых сенсоров, функционирующих в таких условиях, не были проведены в достаточном количестве и были выполнены только на эмпирическом уровне ввиду сложности и большой стоимости проведения экспериментов, моделирующих работу устройств. С другой стороны, формирование сигнала в детекторе определяется транспортными свойствами неравновесных носителей заряда. Под транспортом в данной работе понимается дрейф неравновесных носителей заряда в объеме детектора, поэтому этот термин включает транспортные параметры самих носителей заряда (например, подвижность, дрейфовая скорость, вероятности захвата носителей на энергетические уровни в запрещенной зоне), характеристики, определяющие собирание заряда, и условия, в которых происходит дрейф носителей. К последним относятся распределение электрического поля, определяемое свойствами материала, зависящими в свою очередь от температуры и дозы облучения. Поэтому сценарии функционирования сенсоров при температурах сверхтекучего гелия не могут быть построены путем экстраполяции экспериментальных данных, полученных в исследованиях детекторов при температурах вблизи комнатных и требуют целевых исследований.

Работа посвящена решению двух задач и заключается в разработке методов исследования полупроводниковых детекторов применительно к их функционированию при температуре сверхтекучего гелия (ниже 2.17К) и анализу экспериментальных результатов *in situ* радиационных тестов кремниевых

детекторов, проведенных при температуре 1.9К. Полученные в работе методические результаты позволили количественно описать транспорт носителей в кремниевых детекторах, показать многостадийность процесса собирания неравновесного заряда и обнаружить аномально высокую скорость введения электрически активных дефектов в чувствительную область сенсоров в условиях, характерных для мониторинга радиационного поля вблизи обмоток сверхпроводящих электромагнитов [8].

Целью работы является исследование транспорта неравновесных носителей заряда в кремниевых детекторах ядерных излучений, функционирующих при температуре сверхтекучего гелия и находящихся под воздействием облучения релятивистскими протонами.

В рамках сформулированной цели были поставлены следующие **задачи**.

1. Разработка и реализация эксперимента по исследованию влияния температуры на токовый отклик необлученных кремниевых детекторов.
2. Разработка алгоритма обработки экспериментальных токовых откликов кремниевого детектора с целью определения транспортных характеристик неравновесных носителей заряда (ННЗ) и условий их дрейфа в объеме детектора.
3. Исследование зарядового состояния атомов фосфора в обедненной области *p-n* перехода кремниевого детектора и экстраполяция результатов в диапазон температур сверхтекучего гелия.
4. Анализ экспериментальных результатов *in situ* радиационных тестов кремниевых детекторов, проведенных при температуре сверхтекучего гелия.
5. Построение количественной физической модели, описывающей транспорт ННЗ в облученных кремниевых детекторах при температуре сверхтекучего гелия.

Научная новизна

1. Разработан универсальный алгоритм обработки экспериментальных токовых откликов полупроводниковых детекторов, позволяющий восстанавливать

распределение электрического поля и анализировать транспортные параметры неравновесных носителей заряда.

2. Обнаружена полная ионизация атомов фосфора в области пространственного заряда p - n перехода кремниевого детектора при температуре 6К, что объясняется совокупным действием эффекта Пула-Френкеля и туннелирования электронов с участием фононов (*Phonon Assisted Tunneling*, PAT).
3. Показано, что собирание заряда в кремниевом детекторе, облучаемом протонами *in situ* при температуре 1.9К, является многостадийным процессом, включающим лавинное умножение электронов и дырок в областях сильного электрического поля вблизи контактов детектора.
4. Показано, что в облученном кремниевом детекторе лавинное умножение ННЗ при температуре 1.9К является значимым фактором, компенсирующим уменьшение эффективности собирания заряда за счет захвата ННЗ на энергетические уровни радиационных дефектов и таким образом повышающим радиационную стойкость сенсоров.
5. Установлено, что при температуре 1.9К скорость введения электрически активных дефектов релятивистскими протонами значительно превышает ее значение в области комнатных температур.

Практическая значимость

1. Разработанный алгоритм обработки импульсных токовых откликов детекторов с восстановлением их физической формы является универсальным и расширяет возможности метода переходного тока, применяемого для исследований кремниевых детекторов, облучаемых различными частицами.
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 ННЗ в любых типах полупроводниковых детекторов.

3. 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 1К.
4. Многостадийность процесса собирания неравновесного заряда в кремниевых детекторах, работающих при температурах сверхтекучего гелия, следует учитывать при разработке сценариев их радиационной деградации.
5. Обнаруженная аномально высокая скорость введения электрически активных дефектов при температурах сверхтекучего гелия должна учитываться при создании аппаратуры контроля радиационных полей не только в сверхпроводящих магнитах, но и в сверхпроводящих резонаторах перспективной ускорительной техники.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Атомы фосфора в области электрического поля кремниевого $p^+/n/n^+$ детектора являются ионизированными в диапазоне температур 6 – 300К, что является следствием проявления эффекта Пула-Френкеля и туннелирования электронов с участием фононов. Экстраполяция результатов в диапазон меньших температур показывает возможность ионизации атомов фосфора в электрическом поле и при температуре сверхтекучего гелия.
2. Введение радиационных дефектов в объем кремния при воздействии интенсивного пучка протонов при температуре сверхтекучего гелия приводит к неоднородному распределению электрического поля с его максимумами вблизи обоих контактов детектора. В этих областях реализуются условия для возникновения процесса лавинного умножения электронов и дырок, оказывающего существенное влияние на кинетику переноса ННЗ, вследствие чего наблюдается многостадийный процесс собирания заряда.

3. Ударная ионизация, инициируемая электронами и дырками при температуре сверхтекучего гелия, компенсирует уменьшение постоянной времени захвата ННЗ с увеличением дозы облучения, что приводит к повышению радиационной стойкости кремниевых детекторов при их потенциальном использовании в качестве мониторов потерь пучка БАК.
4. Распределение электрического поля, возникающее непосредственно в момент воздействия релятивистских протонов на кремниевый детектор при температуре сверхтекучего гелия, показывает аномально высокую концентрацию электрически активных дефектов, что является особенностью дефектообразования в кремнии при отсутствии температурной перестройки первичных дефектов.

Достоверность и апробация 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. Основные результаты представлены докладами на научных семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на международных конференциях:

1. A. Shepelev, V. Eremin, E. Verbitskaya. «Novel view on extraction of charge carrier transport parameters from classical TCT». Oral presentation. 33rd RD50 Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders (CERN), 26-28 November 2018. Geneve, 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. 35th 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 ^{40}Ar ions. Contribution». 35th 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 $T=1.9\text{K}$ », 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. 39th 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 1.9K». Oral presentation. 41st RD50 Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders (CERN) November 20 – December 2, 2022. Seville, Spain.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 8 печатных изданиях, включенных в базы данных Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в планировании, постановке и проведении экспериментов по исследованию кремниевых детекторов на экспериментальной установке в ФТИ им. 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 VLM, выполненных на ускорителе PS в ЦЕРН группой Еремина В.К. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе). Разработка математической процедуры обработки экспериментальных данных и все численные расчеты в диссертации проведены автором лично.

Структура и объем диссертации

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.

Содержание работы

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 диссертации является обзором литературных источников. В ней рассмотрены основные свойства p - n переходов, приведены сведения о распределении электрического поля, вольтамперных и вольтемкостных характеристиках резких несимметричных p^+ - n переходов (раздел 1.1). Приведено описание кинетики переноса неравновесного заряда (раздел 1.2) и процессов дефектообразования в кремнии (раздел 1.3). Рассмотрены основные типы кремниевых детекторов излучений и их функционирование (раздел 1.4). Описаны современные технологии производства кремниевых детекторов, позволяющие создавать устройства различных конструкций и назначений: от простых планарных сенсоров с несегментированным основным p - n переходом (*pad* детекторы), до так называемых 3D детекторов с трехмерной геометрией p - n переходов. Во всех без

исключения рассмотренных в Главе приборах чувствительным элементом детектора является $p-n$ переход. Именно свойства $p-n$ перехода определяют ключевые с точки зрения практического использования характеристики полупроводниковых детекторов – эффективность сбора заряда и радиационную стойкость.

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментальных методов исследования. В разделе 2.1 описывается метод переходного тока (*Transient Current Technique*, ТСТ), используемый в работе для исследования полупроводниковых детекторов, их свойств и параметров. Суть метода состоит в регистрации токового отклика сенсора на импульсную генерацию носителей заряда лазером вблизи одного из контактов. Созданный пакет неравновесных носителей заряда дрейфует как единое целое в электрическом поле области пространственного заряда (ОПЗ) $p-n$ перехода, формируя импульсный токовый отклик во внешней электрической цепи. Форма токового отклика детектора однозначно связана с дрейфовой скоростью неравновесных носителей заряда, величина которой определяется распределением электрического поля в объеме детектора. Таким образом, данный метод исследования позволяет из кинетики переноса заряда в сенсорах получать информацию о распределении электрического поля и свойствах материала, а, значит, исследовать зарядовые состояния и примесных атомов и дефектов в объеме сенсоров.

В разделе 2.2 приведено описание экспериментальной установки и используемого оборудования для исследования необлученных детекторов методом переходного тока в ФТИ им. Иоффе.

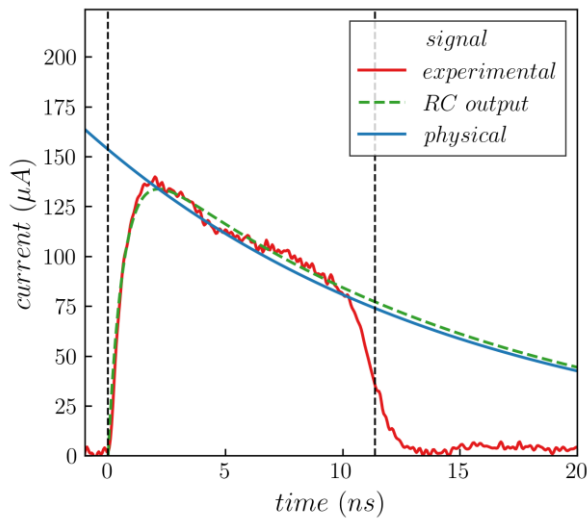
В разделе 2.3 приведено описание схемы эксперимента, экспериментальной установки и оборудования, использованного для исследования облученных детекторов в ЦЕРНе. Эксперименты выполнялись как *in situ* радиационные тесты детекторов при температуре сверхтекучего гелия (1.9К) непосредственно в момент их облучения интенсивным пучком протонов с энергией 23ГэВ, фрагментированным во времени на сгустки длительностью 400мс. Источником протонов являлся синхротрон PS в ЦЕРНе. В виду важности исследований и

значимости их результатов для планирования модернизации БАК, ЦЕРНом было выделено три сеанса работы ускорителя для выполнения экспериментов при температурах 1.9К и 4.2К и общей длительностью в 3 месяца. Токовые отклики регистрировались во время активной фазы работы сенсоров, то есть в момент непосредственного воздействия сгустка протонов.

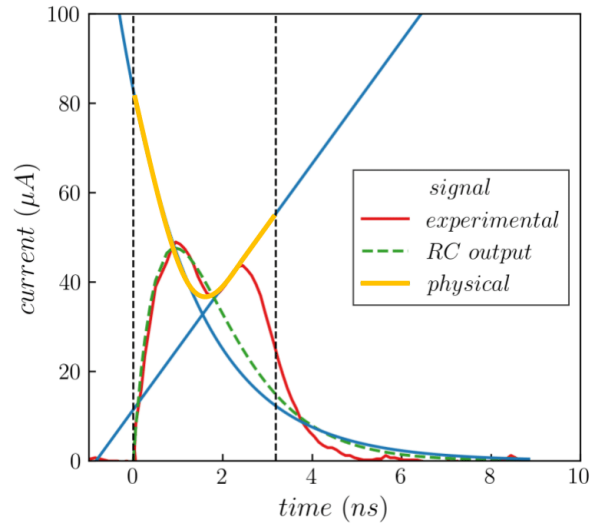
Третья глава диссертации посвящена построению универсального алгоритма и математического аппарата обработки экспериментальных токовых откликов детекторов, позволяющего восстанавливать распределение электрического поля и анализировать процесс транспорта ННЗ в кремниевых сенсорах. В главе детально исследованы механизмы, определяющие форму токовых импульсов. На основании полученных результатов построены универсальные процедура восстановления физической формы импульса тока и алгоритм восстановления распределения электрического поля.

В разделе 3.1 проанализировано влияние цепи регистрирующей электроники на фронт нарастания токового отклика детектора, показан способ определения истинной величины тока отклика в момент времени $t = 0$, основанный на анализе экстремума функции, описывающей форму экспериментального токового отклика. Детально исследованы факторы, определяющие форму спада импульса переходного тока, такие как неоднородность распределения генерированных лазером носителей заряда, диффузионное растекание облака дрейфующих носителей заряда и влияние регистрирующей электроники.

В разделе 3.2 построена процедура восстановления физической формы импульса тока, связанной исключительно с дрейфом носителей заряда в объеме детектора, то есть с условиями транспорта заряда в детекторе. Применение процедуры рассмотрено на примерах экспериментальных импульсов, показанных на рисунке 1.



(a)



(б)

Рисунок 1. Примеры восстановления физической формы токовых откликов: (а) – необлученного детектора, (б) – облученного детектора.

В разделе 3.3 описан алгоритм восстановления распределения электрического поля в объеме детектора из физической формы импульса тока. Определены три критерия корректности применения алгоритма, позволяющие судить о точности восстановления распределения электрического поля. Использование алгоритма рассмотрено на иллюстративном примере экспериментального токового отклика необлученного детектора с известными параметрами в следующей последовательности. На основе восстановленной физической формы отклика детектора определяется значение тока в нулевой момент времени. Используя зависимость величины тока от дрейфовой скорости и эмпирические зависимости дрейфовой скорости от напряженности электрического поля и температуры, находится значение электрического поля в момент начала дрейфа пакета ННЗ, из чего восстанавливается профиль электрического поля как зависимость напряженности поля, воздействующего на пакет носителей, от времени. На последнем этапе осуществляется переход к пространственному распределению электрического поля. Указанный алгоритм пошагово проиллюстрирован на рисунке 2.

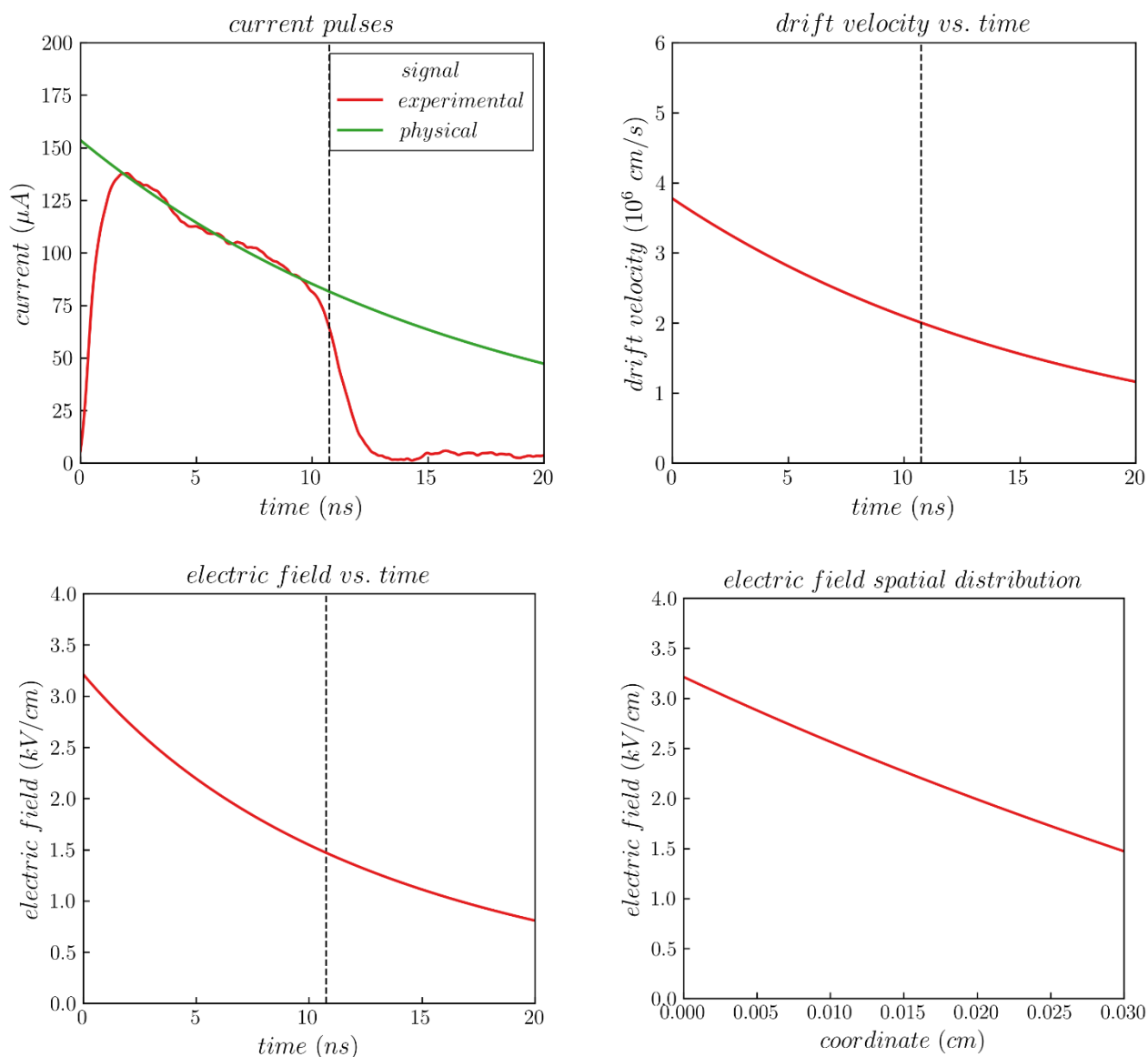


Рисунок 2. Иллюстрация пошагового применения алгоритма восстановления распределения электрического поля.

В четвертой главе работы рассмотрены токовые отклики необлученных детекторов, полученные на экспериментальной установке в ФТИ им. Иоффе, созданной на основе гелиевого криостата замкнутого цикла. В разделе 4.1 приведено описание характеристик образцов, использованных в исследованиях. В работе эксперименты проводились с $p^+/n/n^+$ детекторами с различным уровнем легирования чувствительного объема n -типа. В силу технических ограничений, минимальная доступная на установке температура составила 6К. Для получения информации о транспорте носителей заряда при температуре сверхтекучего гелия полученные результаты были экстраполированы в область меньших температур.

В разделе 4.2 показаны результаты проведенных исследований с детекторами в режиме их полного обеднения. Анализ данных позволил восстановить распределения электрического поля в объеме детекторов и исследовать зарядовое состояние атомов фосфора в кремнии в температурном диапазоне 6 – 300К. Все распределения показали линейный ход $E(x)$ с не зависящим от температуры наклоном, что прямым образом указывает на постоянство концентрации заряженных атомов фосфора в объеме детектора. Полученная концентрация совпадает с результатами C-V измерений при комнатной температуре, что позволило сделать вывод о полной ионизации атомов фосфора как мелкой донорной примеси в кремнии, во всем температурном диапазоне 6 – 300К. Результаты показаны на рисунке 3.

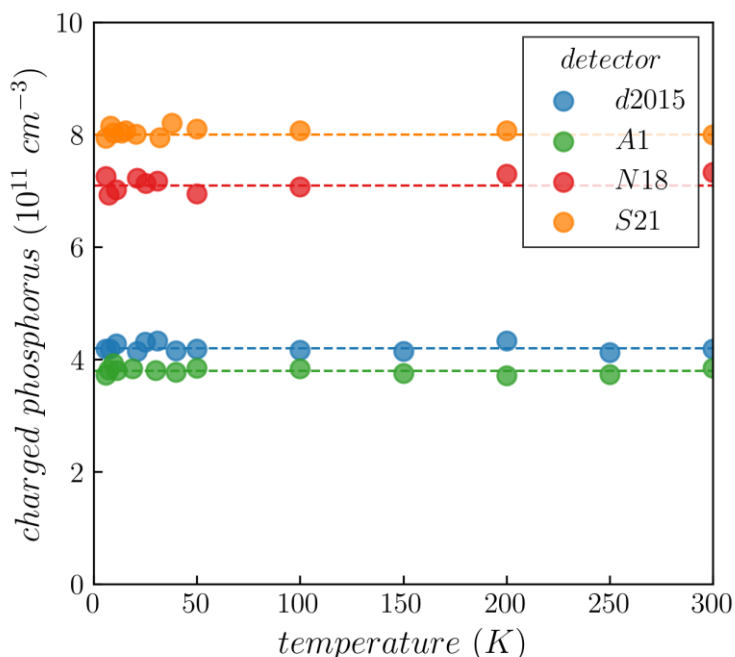


Рисунок 3. Зависимости концентрации заряженных примесей фосфора от температуры для различных образцов. Пунктирные линии – уровень, соответствующий концентрации примеси фосфора в образцах, полученной с помощью C-V измерений при комнатной температуре.

В разделе 4.3 приведены токовые отклики детекторов, полученные в режиме неполного обеднения чувствительной области. Анализ токовых откликов показал неизменность ширины ОПЗ при понижении температуры, то есть неизменную концентрацию ионизированных атомов фосфора в области электрического поля, в

то время как в нейтральной области структуры, в которой электрическое поле отсутствует, вымораживание электронов на энергетическом уровне фосфора происходит уже при температуре 25К. Установленный факт является прямым следствием проявления эффекта Пула-Френкеля [9, 10].

В разделе 4.4 приведен анализ обнаруженных особенностей поведения атомов фосфора в области электрического поля и в условиях электронейтральности. Результаты расчетов вероятности ионизации атомов фосфора в кремнии показали принципиальную возможность процесса эмиссии электронов с уровня атома фосфора в зону проводимости при температурах ниже 10К за счет эффекта Пула-Френкеля и сопутствующего туннелирования электронов с участием фононов [11, 12]. Поскольку эксперименты в ЦЕРНе были выполнены при температуре 1.9К, проведена экстраполяция результатов расчетов в область температур ниже 6К. Показано, что при увеличении электрического поля температурная зависимость темпа эмиссии электронов является слабой в силу того, что процессы ионизации атомов фосфора полностью определяются туннелированием электронов, на которое температура оказывает малое влияние; следовательно, с большой вероятностью атомы фосфора в электрическом поле порядка 10кВ/см будут ионизированы и при температуре 1.9К. Таким образом, влияние процессов ионизации мелких примесей на сигнал детекторов, изготовленных из чистого высокоомного кремния, должно учитываться как фундаментальное свойство их функционирования при температурах сверхтекучего гелия.

Полученные в данной Главе результаты представлены в работах [A1 – A4].

Пятая глава посвящена изучению кремниевых детекторов, облучаемых при температуре 1.9К, на основе данных *in situ* радиационных тестов, в которых были измерены токовые отклики *pad* детекторов на ускорителе PS в ЦЕРНе. В разделе 5.1 приведено описание характеристик образцов для исследований и использованного в экспериментах оборудования. В разделе 5.2 выполнено сравнение экспериментальной и эмпирической зависимостей дрейфовой скорости дырок от напряженности электрического поля и температуры. На основании

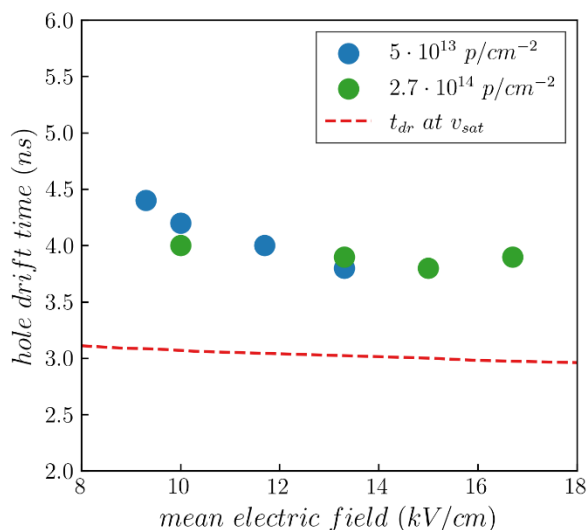
результатов сравнения скорректированы эмпирические коэффициенты, описывающие температурную зависимость параметров при температурах ниже 10К.

В разделе 5.3 приведен анализ токовых откликов облученных детекторов, который позволил обнаружить многостадийный процесс переноса заряда при температуре 1.9К. На основании экспериментальных токовых откликов детектора при его облучении дозой $5 \cdot 10^{13} \text{ p/см}^2$, построена и аргументирована феноменологическая модель формирования сигнала в детекторе, включающая умножение носителей заряда вблизи p^+ контакта детектора и учитывающая различные механизмы, влияющие на форму импульсов, такие как захват носителей заряда на глубокие энергетические уровни, диффузия носителей при дрейфе и влияние цепи регистрирующей электроники.

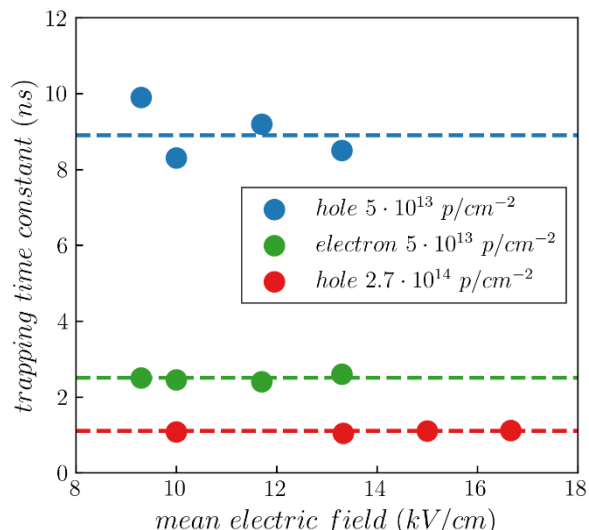
В разделе 5.4 на основании построенной модели предложены два варианта обработки экспериментальных результатов, основанные на анализе экспериментальных токовых откликов детекторов с применением математических методов, минимизирующих ошибку вычислений, и позволяющие определить транспортные параметры дырок и электронов.

В разделе 5.5 приведены экспериментальные токовые отклики детектора при облучении дозой $2.7 \times 10^{14} \text{ p/см}^2$, показан способ обработки результатов, позволивший проиллюстрировать протекание трехстадийного процесса переноса заряда с лавинным умножением носителей заряда вблизи обоих контактов детектора.

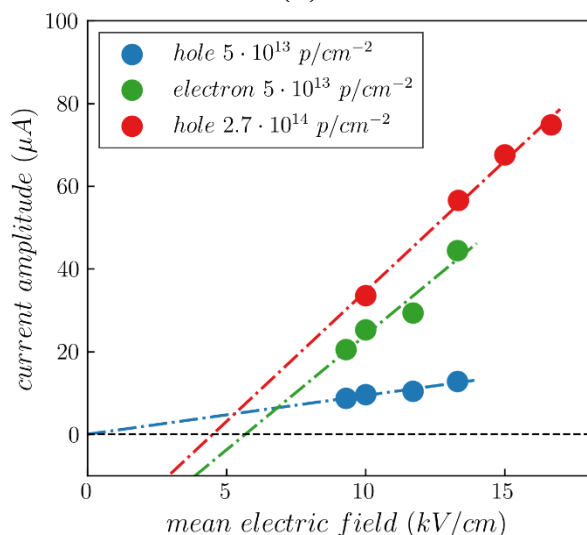
В разделе 5.6 приведены зависимости транспортных параметров ННЗ, а также амплитуды тока и величины собранного заряда от средней напряженности электрического поля в детекторе (рисунок 4). Зависимости для электронов показали наличие порогового эффекта в отношении напряженности электрического поля, что свидетельствует о возникновении лавинного умножения носителей заряда в объеме детектора как процесса, влияющего на транспорт ННЗ, и подтверждает предложенную модель формирования импульсного токового отклика.



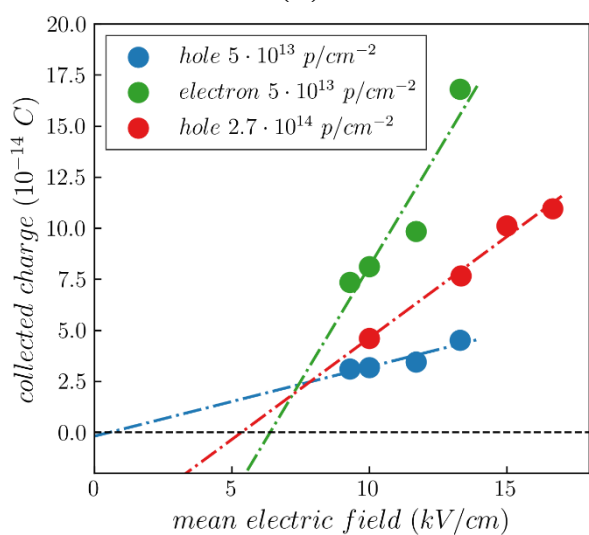
(a)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 4. Зависимости характеристик транспорта носителей заряда от среднего электрического поля для облученных детекторов: (а) время дрейфа, (б) постоянные времена захвата носителей, (в) амплитуды тока, (г) собранный заряд. Штриховые линии в б) – усредненные значения параметров; штрихпунктирные линии в (в) и (г) – аппроксимация данных с использованием линейной функции.

В разделе 5.7 на основании полученных зависимостей для транспортных параметров носителей заряда определены рабочие характеристики детектора, характеризующие его радиационную стойкость (раздел 5.7.1). Показано, что ударная ионизация, инициируемая дрейфующими ННЗ, компенсирует деградацию постоянной времени захвата носителей с увеличением дозы облучения, что приводит к внутреннему усилению сигнала и повышению радиационной стойкости детекторов, благодаря чему дозовый диапазон эффективного функционирования сенсоров расширяется, как это показано на рисунке 5. Эффект компенсации деградации времени жизни ННЗ за счет лавинного умножения является значимым и должен учитываться при разработке кремниевых детекторов, работающих при температурах сверхтекучего гелия.

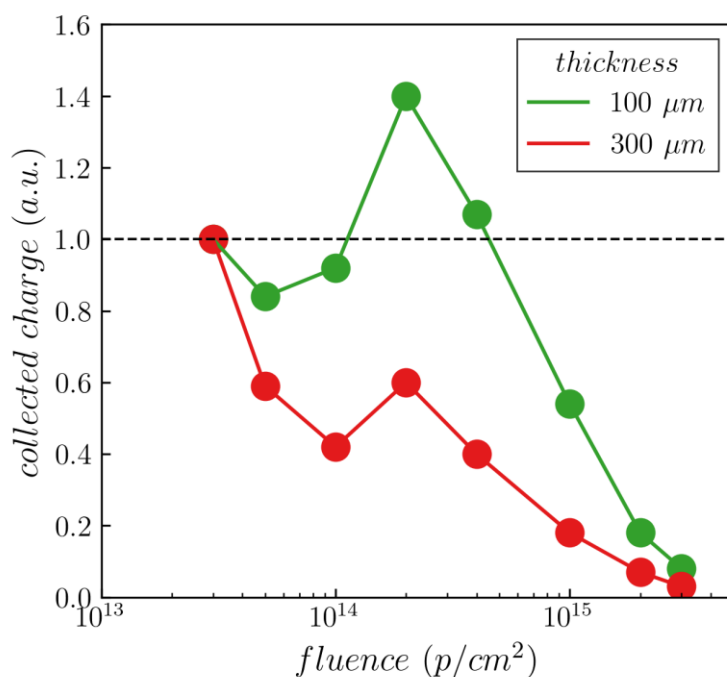


Рисунок 5. Нормированная зависимость собранного заряда детекторами различной толщины от дозы облучения при температуре 4.2К.

На основании полученных экспериментальных результатов предложена и обоснована модель распределения электрического поля в объеме детектора, качественно объясняющая наблюдаемые закономерности (раздел 5.7.2). Показано, что распределение электрического поля имеет два характерных максимума у контактов. Области высокого электрического поля вблизи контактов детектора

имеют небольшую толщину, в то время как в большей части чувствительного объема детектора величина электрического поля мала. На основании полученного распределения электрического поля вычислены минимально возможная концентрация дефектов и эффективность их введения (раздел 5.7.3). Из сравнения этих величин с их значениями при комнатной температуре [13] сделан вывод о существенном превышении количества нестабильных нарушений решетки кремния (первичных радиационных дефектов), вводимых протонами [14, 15], при температуре 1.9К. Обнаруженная аномально высокая скорость введения электрически активных дефектов в кремний при температурах сверхтекучего гелия реализуется благодаря отсутствию температурной перестройки первичных дефектов. Это приводит к существенной неоднородности распределения электрического поля с областями максимумов напряженности, что формирует условия для возникновения процессов лавинного умножения ННЗ, определяющих кинетику собирания заряда детектором. Таким образом, высокая скорость введения дефектов протонами в кремний при температуре сверхтекучего гелия должна учитываться при планировании длительных экспериментов в условиях интенсивных радиационных полей.

Полученные в данной Главе результаты представлены в работах [А5–А8].

В Заключение сформулированы основные **результаты** работы:

- Разработан и проведен эксперимент по исследованию влияния температуры на форму токовых откликов кремниевых детекторов, позволивший исследовать зарядовое состояние мелкой примеси фосфора в необлученных детекторах.
- Разработана процедура восстановления физической формы токовых откликов детектора, связанной исключительно с кинетикой дрейфа носителей заряда в объеме детектора. Построен алгоритм восстановления распределения электрического поля в объеме детектора из физической формы импульса тока.
- Проведены исследования токовых откликов детекторов в режиме полного обеднения, которые позволили восстановить распределения электрического поля в объеме сенсоров в температурном диапазоне 6 – 300К. Показано, что в

указанном температурном диапазоне все атомы фосфора ионизированы. Проведены измерения токовых откликов детекторов в режиме неполного обеднения, и показано отличие в температурной зависимости заполнения атомов фосфора электронами в ОПЗ и электронейтральной области.

- Выполнены расчеты вероятности ионизации атомов фосфора в кремнии, которые показали принципиальную возможность эмиссии электронов при температурах ниже 10К за счет эффекта Пула-Френкеля и сопутствующего процесса туннелирования электронов с участием фононов. Экстраполяция результатов расчетов в область более низких температур показала возможность ионизации атомов фосфора в объеме кремния в электрическом поле величиной более 10кВ/см и при температуре 1.9К.
- Проведена обработка экспериментальных результатов *in situ* радиационных тестов кремниевых детекторов, проведенных при температуре 1.9К при облучении интенсивным пучком протонов с энергией 23ГэВ. Построена и аргументирована феноменологическая модель формирования токового отклика детектора, учитывающая различные механизмы, влияющие на форму импульсов – захват носителей заряда на глубокие энергетические уровни и их диффузия при дрейфе, а также влияние цепи считывающей электроники. На основании построенной модели предложены алгоритмы обработки экспериментальных результатов, позволившие получить зависимости транспортных характеристик дырок и электронов от напряженности электрического поля в детекторе.
- На основе анализа токовых откликов детекторов установлена многостадийность процесса переноса заряда, включающего, наряду с дрейфом, лавинное умножение носителей заряда в областях с высокой напряженностью электрического поля вблизи контактов детектора.
- На основании полученных экспериментальных результатов предложена модель распределения электрического поля в объеме детектора, качественно объясняющая наблюдаемые закономерности, и вычислены минимально возможная концентрация дефектов и эффективность их введения. Обнаружена

аномально высокая скорость введения электрически активных дефектов при температурах сверхтекучего гелия, которая реализуется благодаря отсутствию температурной перестройки первичных дефектов.

- Исходя из полученных транспортных параметров носителей заряда, рассчитаны характеристики детектора, определяющие его радиационную стойкость. Показано, что ударная ионизация, инициируемая дрейфующими ННЗ, компенсирует деградацию постоянной времени захвата с увеличением дозы облучения, что приводит к усилению сигнала, благодаря чему расширяется дозовый диапазон эффективного функционирования детектора.
- Построена физическая модель, описывающая транспорт ННЗ в облученных кремниевых детекторах при температурах сверхтекучего гелия. В модели описаны: многостадийный процесс переноса заряда в детекторе, определяемый лавинным умножением ННЗ вблизи контактов детектора, количественные оценки транспортных параметров электронов и дырок, распределение электрического поля, концентрация электрически активных дефектов и скорость их введения.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что функционирование кремниевых детекторов, облучаемых при температуре сверхтекучего гелия, не может быть предсказано с помощью экстраполяции зависимостей, полученных при более высоких температурах. Анализ экспериментальных результатов позволил обнаружить эффекты, проявляющиеся исключительно при низких температурах, которые важны с практической точки зрения и должны учитываться при проектировании систем, в которых кремниевые детекторы используются при температурах сверхтекучего гелия. Исследования детекторов, облучаемых при температуре 1.9К, показали необходимость дальнейших исследований, направленных на изучение деталей дефектообразования в кремнии и приборах на его основе.

Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. 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.
- A2. 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.
- A3. Verbitskaya E., Eremin V., Shepelev A. Electric field distribution in Si detectors irradiated with ^{40}Ar ions: experimental study and simulation // *J. Inst.* — 2020. — Т. 15. — № 02. — С. P02017.
- A4. 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.
- A5. Verbitskaya E. et al. Development of silicon detectors for Beam Loss Monitoring at HL-LHC // *J. Inst.* — 2017. — Т. 12. — № 03. — С. C03036.
- A6. Shepelev A., Eremin V., Verbitskaya E. Observation of internal multiplication of nonequilibrium charge in irradiated silicon detectors at a temperature of 1.9K // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2019. — Т. 1400. — № 4. — С. 044015.
- A7. 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.
- A8. 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.

Список литературы

1. Dehning B. *CERN Yellow Reports*. CERN, Geneva, 2016. С. 303.
2. Kastriotou M. *u òp. Proceedings of the 4th International Beam Instrumentation Conference*. JACoW, Geneva, Switzerland, 2016.
3. Dehning B. *u òp. Proceedings of 2011 International Particle Accelerator Conference*. San Sebastián, Spain, 2011.
4. Apollinari G. *u òp. High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) Preliminary Design Report*. CERN, 2015.
5. Bartosik M. Characterisation of SI Detectors for the Use at 2 K. Shanghai, China, 2013.
6. Kurfuerst C. Operation of Silicon, Diamond and liquid Helium Detectors in the range of Room Temperature to 1.9 K and after an Irradiation Dose of several Mega Gray. Oxford, UK, 2013.
7. Kurfürst C. *u òp. Nucl. Instrum. Meth. A* — 2015. — Т. 782. — С. 149–158.
8. Verbitskaya E. *u òp. Nucl. Instrum. Meth. A* — 2015. — Т. 796. — С. 118–125.
9. Jonscher A.K. *J. Phys. C: Solid State Phys.* — 1970. — Т. 3. — № 8. — С. 159–162.
10. Hartke J.L. *J. Appl. Phys.* — 1968. — Т. 39. — № 10. — С. 4871–4873.
11. Chynoweth A.G., Logan R.A., Thomas D.E. *Phys. Rev.* — 1962. — Т. 125. — № 3. — С. 877–881.
12. Kleinman L. *Phys. Rev.* — 1965. — Т. 140. — № 2A. — С. 637–648.
13. Lindström G. *u òp. Nucl. Instrum. Meth. A* — 1999. — Т. 426. — № 1. — С. 1–15
14. Van Lint V.A.J. *Nucl. Instrum. Meth. A* — 1987. — Т. 253. — № 3. — С. 453–459.
15. Watkins G.D. *Solid State Phys.* — 1999. — Т. 41. — № 5. — С. 746–750.