

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук
Жеребчевского Владимира Иосифовича
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 темы диссертации

Диссертационная работа Шепелева Артема Сергеевича посвящена исследованию транспорта неравновесных носителей заряда в облученных релятивистскими протонами кремниевых детекторах, которые работают при температуре сверхтекучего гелия (1,9 К). Сегодняшние реалии в физике высоких энергий и элементарных частиц соответствуют тому, что большой массив прорывных экспериментальных результатов получен на установках, работающих на Большом Адронном Коллайдере (БАК) в ЦЕРНе. Этот ускоритель играет главенствующую роль в исследованиях кварк-глюонной материи, поиске и открытии новых элементарных частиц, изучении свойств адронов, содержащих тяжелые кварки. С другой стороны огромный интерес вызывают новые экспериментальные исследования за пределами стандартной модели, которые невозможно будет осуществить без увеличения светимости коллайдера на несколько порядков. В контексте представленной задачи была разработана программа модернизации БАК, причем важнейшим условием его функционирования становится повышение качества пучков сталкивающихся протонов и ионов свинца. В этой связи, одним из ключевых элементов ускорительных и пучковых технологий является прецизионная система диагностики пучков заряженных частиц. Современные системы диагностики включают в себя большое количество датчиков, позволяющих получить информацию о основных параметрах циркулирующих в коллайдере пучков, а также информацию о возможных отклонениях пучков от оптимальных траекторий. Последнее, жизненно необходимо для оптимального функционирования сверхпроводящих магнитов коллайдера, работающих при температуре 1,9 К. Дело в том что при взаимодействии ускоренных протонов с молекулами остаточного газа в ионопроводе, эти отклонившиеся протоны могут попасть в обмотку сверхпроводящего магнита, вызвать её локальный перегрев с дальнейшим выходом из сверхпроводящего состояния, выделением большого количества тепла и практически мгновенным разрушением всего магнита. Чтобы

избежать такого рода аварий, на БАК реализована система мониторинга, с помощью которой регистрируются как раз протоны, отклонившиеся от заданной траектории. Основными элементами этой системы являются газонаполненные детекторы, расположенные на корпусах сверхпроводящих магнитов, которые не охлаждаются. При текущей интенсивности пучков протонов на БАК, эти детекторы довольно хорошо решают поставленную задачу, тем самым предотвращая аварийные ситуации. Однако, в связи с планами по увеличению светимости пучка протонов на БАК, научным сообществом были инициированы исследования и разработки по созданию новой системы мониторинга отклонившихся протонов. В этой детекторной системе акцент будет сделан на использование сенсоров с высокой чувствительностью, высоким быстродействием и высокой радиационной стойкостью. Важным техническим решением стала геометрия расположения этих сенсоров, при которой они будут приближены к линии циркуляции протонов в коллайдере и смонтированы практически рядом со сверхпроводящим обмоткам. Таким образом, указанные детекторы будут находиться в ограниченном пространстве в температурных условиях близких к 1,9 К, а также в течение длительного времени получать значимые дозы ионизирующих излучений. Проанализировав информацию относительно уже успешно реализованных детекторных технологиях, было предложено в качестве сенсоров использовать компактные кремниевые детекторы, которые всецело удовлетворяют поставленным требованиям при комнатной температуре. Стоит отметить, что на сегодняшний день, насчитывается не так много экспериментальных исследований, направленных на изучение свойств и характеристик кремниевых сенсоров, работающих при температурах в диапазоне 1,9 К – 2,0 К и облучаемых протонами с высокой интенсивностью. В этой связи задачи, которые были решены в данной диссертационной работе, с акцентом на изучение свойств облученных кремниевых детекторов, работающих при температурах сверхтекучего гелия, являются актуальными и, несомненно, востребованными.

Научная новизна результатов

Одним из важных направлений исследований проведенных в рамках представленной диссертации, стало изучение эффективности работы кремниевого сенсора. Эта эффективность зависит от процессов собирания неравновесного заряда в сенсоре и в большей степени определяется транспортом неравновесных носителей заряда. Поэтому в диссертационной работе, в рамках задачи по созданию новой системы мониторинга пучков протонов, отклонившихся от оптимальных траекторий, А. С. Шепелевым были изучены физические процессы в таких детекторах, при их облучении протонами при

температуре сверхтекучего гелия. В рамках этих работ, впервые обнаружена полная ионизация атомов фосфора в области пространственного заряда p-n перехода, обнаружен многостадийный процесс транспорта носителей заряда, включающий лавинное умножение, обнаружена аномально высокая концентрация электрически активных дефектов, а также объяснено увеличение дозового диапазона эффективного функционирования детекторов.

Практическая значимость работы

К практической значимости работы следует отнести разработку универсальных методов исследования кремниевых детекторов, которые позволяют получить количественные оценки транспорта неравновесных носителей заряда в любых типах полупроводниковых детекторов. С другой стороны, полученные в работе результаты могут быть учтены при проектировании различных детекторных систем, в составе которых применяются кремниевые сенсоры, способные функционировать при криогенных температурах.

Можно с уверенностью отметить, что данное направление исследований важно не только для решения технических задач в области ускорительной и детекторной физики, но имеет большое значение в решении ряда прикладных задач связанных с созданием новых детекторных комплексов и технологических решений в области космических исследований и ядерной астрофизики. Поэтому актуальность темы, её научная новизна не вызывают сомнений и результаты работы представляют большой практический интерес.

Краткая характеристика основного содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Рисунки существенно облегчают чтение диссертации, однако выполнены местами довольно небрежно.

Введение включает в себя обоснование актуальности и новизны работы, а также формулировку целей и решаемых задач, представлена практическая значимость результатов работы и приведены выносимые на защиту научные положения.

В **первой главе** диссертации приведен обзор основных типов кремниевых детекторов излучений (и технологии их производства): от планарных сенсоров с несегментированным основным p-n переходом, до детекторов с трехмерной геометрией p-n переходов. Особое внимание уделяется описанию свойств p-n перехода в контексте его практического использования при создании

полупроводниковых сенсоров, обладающих значительной эффективностью сбора заряда и высокой радиационной стойкостью.

Во **второй** главе диссертации описывается метод переходного тока, используемый в работе для исследования свойств и параметров полупроводниковых детекторов. Также приводится подробное описание эксперимента и характеристики экспериментальной установки для исследования необлученных детекторов методом переходного тока в ФТИ им. Иоффе и описание эксперимента с соответствующей экспериментальной установкой для исследования детекторов на протонном синхротроне PS в ЦЕРН. В последнем случае были выполнены важные радиационные тесты детекторов, работавших при температуре 1.9К и 4.2К, непосредственно в момент их облучения интенсивным пучком протонов с энергией 23ГэВ.

В **третьей** главе приводится описание разработанного алгоритма и математического аппарата обработки экспериментальных токовых откликов детекторов. Это позволило восстановить распределение электрического поля и проанализировать процесс транспорта неравновесных носителей заряда в кремниевых сенсорах. В главе также приводятся результаты исследований механизмов, определяющие форму токовых импульсов. С использованием полученных результатов построена процедура восстановления физической формы импульса тока и создан алгоритм восстановления распределения электрического поля.

В **четвертой** главе приводятся данные по токовым откликам необлученных детекторов, с использованием экспериментальной установки на основе гелиевого криостата замкнутого цикла (ФТИ им. Иоффе). Анализ данных позволил получить распределения электрического поля в объеме детекторов и исследовать зарядовое состояние атомов фосфора в кремнии в температурном диапазоне 6 – 300К. Обнаружен и объяснен эффект ионизации атомов фосфора в указанном диапазоне.

В **пятой** главе приводится анализ экспериментальных результатов (токовые отклики), облученных при криогенных температурах кремниевых детекторов на ускорителе протонов PS в ЦЕРНе. Показано, что форма токового отклика детектора может быть объяснена только с привлечением эффекта ударной ионизации электронов и дырок в приконтактных областях детектора. Результатом этого явился ранее не наблюдавшийся в детекторах трехстадийный процесса собирания заряда.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы, среди которых следует выделить: экспериментальные данные о влиянии электрического поля на зарядовое состояние атомов фосфора в температурном диапазоне 6 – 300К. Было показано, что в этом температурном диапазоне все

атомы фосфора ионизированы в силу стимулирования эмиссии электронов эффектом туннелирования.

Стоит также отметить, что полученные экспериментальные результаты позволили создать модель распределения электрического поля в объеме детектора при температуре 1,9 К и вычислить эффективность введения радиационных дефектов, оказавшуюся на три порядка выше чем при комнатной температуре. Было показано, что ударная ионизация, инициируемая дрейфующими неравновесными носителями заряда, компенсирует падение постоянной времени захвата с увеличением дозы облучения, что увеличивает рабочий диапазон радиационных нагрузок.

Результаты диссертационной работы являются достоверными, а выводы обоснованными. Работа прошла апробацию на международных конференциях, в том числе на совещаниях международной коллаборации CERN RD50. По результатам работы опубликовано 8 статей в рецензируемых журналах.

Работа лишена серьезных недостатков, однако отмечены следующие **недочеты**:

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 не достаточно 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.

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общее положительное заключение о диссертационной работе, которая заслуживает высокой оценки. Считаю, что данная работа носит исследовательский характер, в ней ясно сформулированы актуальность, цель и проблемы. Детально описаны объект, предмет и методика исследования,

отражена научная значимость полученных результатов. В диссертации корректно описаны актуальные проблемы теоретического и практического характера. Список литературы достаточно полно отражают затрагиваемую в главах тематику и современное состояние исследований в этой области.

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».

Официальный оппонент,
Жеребчевский Владимир Иосифович
кандидат физико-математических наук,
доцент, заведующий учебной лабораторией
ядерных процессов, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9
+79117699364
v.zherebchevsky@spbu.ru

31.03.2023

В.И. Жеребчевский