

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Дербина Александра Владимировича

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»

Диссертационная работа А.С. Шепелева посвящена исследованиям параметров полупроводниковых кремниевых детекторов ионизирующего излучения, изготовленных по планарной технологии, при температурах близких к температуре жидкого гелия. Вторая важная задача, также успешно решенная в диссертации, состояла в изучении радиационной стойкости кремниевых детекторов, работающих при температуре 2⁰К, при облучении интенсивным ($\sim 10^{10} \text{ c}^{-1}$) пучком протонов. **Актуальность** исследований в обоих направлениях не вызывает сомнений. В частности, проведенные исследования были инициированы возможностью использовать кремниевые детекторы для контроля радиационного фона вблизи обмоток сверхпроводящих магнитов ускорителя ЛНС.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемых работ. Общий объем диссертации составляет 137 страниц, включая 68 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 143 наименований.

Во введение сформулирована цель и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность выбранной темы и новизна полученных результатов. Кратко описана методика исследований, приведены выносимые на защиту положения и отмечена практическая значимость результатов работы.

В первой главе дан хороший обзор основных теоретических положений в области физики полупроводников, которые относятся к процессам транспорта зарядов в кремниевых детекторах ионизирующего излучения. Приведены сведения о распределении электрического поля, вольтамперных и вольтемкостных характеристиках несимметричных p⁺-n переходов, описаны процессы образования дефектов в кристаллах. Рассмотрены основные типы данных детекторов, способы их производства, дано краткое описание конструкций в зависимости от решаемых физических задач.

Вторая глава представляет описание экспериментальных методов исследования процесса переноса заряда в детекторах. Обсуждается влияние распределения напряженности электрического поля в объеме детектора на дрейф носителей заряда, и, как следствие, на токовый отклик детектора.

В третьей главе описан алгоритм обработки токовых откликов детекторов, который позволяет восстанавливать форму импульса тока, распределения электрического поля и концентрации заряженных энергетических уровней и дефектов в объеме детектора.

Четвертая глава посвящена анализу результатов измерений характеристик кремниевых детекторов в температурном диапазоне 6 – 300 К до облучения, полученных методом переходного тока. Установлена неизменность ширины области пространственного

заряда при уменьшении температуры и полная ионизация атомов фосфора, что объясняется эффектом Пула-Френкеля и туннелированием электронов, стимулированным фононами.

В пятой главе приведен анализ экспериментальных результатов, полученных при облучении кремниевых детекторов, находящихся при температуре 1.9 К, в пучке протонов с энергией 23 ГэВ ускорителя в ЦЕРНе. Предложена модель многостадийного процесса переноса заряда, которая включает лавинное умножение носителей заряда в области большой напряженности электрического поля вблизи контактов детектора. Получено распределение электрического поля в объеме детектора, рассмотрено влияние радиационных повреждений на эффективность собирания заряда в детекторе.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

По представленной работе можно сделать некоторые **замечания**.

1) Кремниевые и германиевые кристаллы давно используются в качестве криогенных болометров, работающих при температурах 10-100 мК и, в которых, регистрация ионизирующего излучения связана с изменением температуры кристалла. Например, коллаборация CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) использовала для поиска WIMPs 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*.

Отмеченные замечания не меняют в целом **положительной оценки** диссертационной работы А.С. Шепелева. В работе получены важные результаты, среди которых можно выделить следующие:

1) Обнаружено, что при температуре 2⁰К скорость образования электрически активных дефектов в кремнии при облучении протонами значительно, на 2-3 порядка, больше чем при температуре 300⁰К, что объясняется отсутствием восстановления первичных дефектов за счет температуры.

2) Установлено, что лавинное умножение электронов и дырок при температуре сверхтекучего гелия, компенсирует уменьшение эффективности собирания заряда при увеличении флюенса протонов, что приводит к повышению радиационной стойкости кремниевых детекторов при регистрации пучка протонов.

В целом диссертация производит положительное впечатление, она выполнена на высоком научном уровне, написана хорошим русским языком и отлично оформлена. Основные результаты диссертационной работы являются оригинальными и получены впервые. Они были апробированы на международных конференциях, известны специалистам и опубликованы в ведущих физических журналах, что подтверждает **обоснованность и достоверность** положений и выводов диссертации.

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,
Дербин Александр Владимирович
доктор физико-математических наук
заведующий Отделом Петербургского института
ядерной физики НИЦ "Курчатовский институт"
Гатчина, Ленинградская область.
81371-4-63-27
derbin_av@pnpi.nrcki.ru

А.В. Дербин
04.04.2023 г.

Подпись А.В. Дербина заверяю:
Ученый секретарь ПИЯФ НИЦ КИ,
кандидат физико-математических наук

С.И. Воробьев