

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Давыдовской Клавдии Сергеевны «Влияние температуры облучения на образование радиационных дефектов в карбиде кремния и деградацию приборов на его основе» по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Диссертационная работа Давыдовской Клавдии Сергеевны посвящена актуальному направлению современной физики полупроводников, а именно исследованию образования радиационных дефектов в широкозонном карбиде кремния и приборах на его основе, пригодных для устройств экстремальной электроники. Актуальность работ в данном направлении определяется широким кругом проводимых в мире исследований, в которых анализируются пути развития энергетических систем, обеспечивающих углеродную нейтральность экономики, например, в ядерной или солнечной энергетике. Микроэлектронные устройства, контролирующие безопасность этих устройств, должны сохранять свою работоспособность при повышенных температурах и при радиационных воздействиях, например, в ядерных установках, космических и околоземных искусственных спутниках, и т.д. Среди важных приложений следует упомянуть также устройства транспортного и распределенного энергоснабжения, датчики параметров пучков заряженных частиц и гамма-квантов в источниках ионизирующего излучения, в том числе для медицинских применений.

Высокая теплопроводность и термостабильность полупроводника карбида кремния 4H-SiC выделяют его среди других широкозонных полупроводников. Однако на пути использования приборов на основе 4H-SiC имеются нерешенные фундаментальные проблемы компенсации проводимости легирующих примесей радиационными дефектами с уровнями электрически активных центров в запрещенной зоне. Интерес представляют также механизмы заполнения этих центров в условиях внешнего возбуждения и/или инжекции основных и неосновных носителей.

В настоящее время нет достаточно экспериментальных данных по изменению скорости введения компенсирующих дефектов в приборах на основе карбида кремния при повышенных рабочих температурах, а также при больших полевых или токовых нагрузках. Решение этих проблем зависит от результатов фундаментальных исследований механизмов формирования радиационных дефектов, их агрегации с собственными дефектами и различными примесными и фоновыми атомами в решетке. Высокие значения энергий связи атомов углерода и кремния в 4H-SiC приводят к большим барьерам для миграции, отжига и структурной перестройки дефектов. Поэтому многие теоретические модели оптически и электрически активных центров, предложенные ранее для объяснения формирования компенсирующих центров в более узкозонных материалах, не находят экспериментальных подтверждений в SiC.

Экспериментальное исследование таких центров является непростой задачей, поскольку обычно в 4H-SiC наблюдается множество собственных и примесных оптически и электрически активных центров, а различными методами (элементный анализ, оптическое поглощение, электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), фото- и катодоллюминесценция, электрофизические методы) определяются свойства, слабо коррелирующие друг с другом. Поэтому разработка адекватной модели, эффективно прогнозирующей изменение электрических параметров приборов на основе 4H-SiC, является актуальной задачей, имеющей важное практическое значение.

Диссертация построена по классической схеме и состоит из введения, трех глав с основными результатами и выводами, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 132 источника. Работа изложена на 143 страницах и содержит 54 рисунка и 17 таблиц.

Во **Введении** обосновываются актуальность и новизна проведенных исследований, цель и задачи работы, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, а также выносимые на защиту научные положения

Первая глава посвящена обзору и анализу литературных источников по свойствам объекта исследования - карбида кремния, в особенности, политипа 4H-SiC, а также приборам на его основе. Продемонстрированы преимущества карбида кремния над другими материалами в создании силовых полупроводниковых приборов. Особое внимание уделено анализу свойств дефектов в 4H-SiC при радиационном дефектообразовании. Подробно описаны параметры для описания радиационной стойкости, такие как пороговая энергия дефектообразования и скорость удаления носителей заряда.

Во **второй главе** охарактеризованы теоретические основы экспериментально признанных методов исследования 4H-SiC диодов Шоттки (SBD) и диодов Шоттки с интегрированными p-n переходами (JBD) с базой n-типа, включающих исследование вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик (ВАХ и CV) и нестационарной спектроскопии глубоких уровней (НСГУ или DLTS).

Третья глава, в которой приводятся основные результаты диссертационной работы, подразделяется на семь разделов. В каждом из разделов, исходя из анализа литературных данных, сформулирована задача исследования. Причем, разделы посвящены актуальным проблемам: разделы 3.1 и 3.2 – анализу результатов вольт-фарадных исследований 4H-SiC JBS, облученных электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ при комнатной температуре, представленных в работах [A1-A7, A10].; раздел 3.3 - сравнению радиационной стойкости кремния и карбида кремния по работам [A1, A3, A4, A11].; разделы 3.4 и 3.5 - исследованию вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик, из которых рассчитаны параметры 4H-SiC JBS диодов после облучения электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ при повышенных температурах, отраженные в публикациях [A8, A9, A11-A14]; раздел 3.6 посвящен исследованию параметров глубоких уровней в 4H-SiC JBS после облучения электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ как при комнатной, так и при повышенных

температурах [A9, A15]; раздел 3.7 содержат анализ особенностей определения скорости удаления носителей заряда при облучении широкозонных полупроводников, а также простую модель, позволяющую не только объяснить резкий рост сопротивления в n-базе [A15], но и применить её на практике для высокоразрешающей дозиметрии.

Диссертация К.С. Давыдовской посвящена детальному изучению природы и электронных свойств электрически активных центров в n-базе 4H-SiC JBS диодов, связанных с введением в приборную структуру дефектов при облучении электронами и протонами. Новые данные о свойствах электрически активных центров удалось получить в диссертационной работе, используя набор температур облучения от комнатной до 500°C, позволивших разделить вклад первичных и вторичных дефектов в радиационную стойкость 4H-SiC JBS диодов. Дополнительные результаты получены из анализа перестроек этих центров в условиях облучения и последующих термообработок при измерении спектров DLTS.

Актуальность данной работы заключается в формировании единого подхода к описанию компенсированных широкозонных полупроводников, позволяющего получать требуемые оптические и электрические свойства центров, содержащих атомы примесей.

Наиболее **значимыми научными результатами** диссертационной работы К.С. Давыдовской являются следующие:

1. установлены параметры радиационных дефектов в 4H-SiC, возникающих в результате «холодного» и «горячего» облучения электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ;
2. показано, что основной причиной деградации приборов является увеличение сопротивления слаболегированной базы за счет введения компенсирующих радиационных дефектов акцепторного типа;
3. при горячем облучении продемонстрирован рост радиационной стойкости карбида кремния за счет отжига первичных радиационных дефектов при температурах 300-450 К. При комнатной температуре облучения относительно небольшая разница в скорости удаления носителей в SiC и Si связана с тем, что в SiC в отличие от Si, отжиг первичных радиационных дефектов в процессе облучения практически отсутствует.
4. определена скорость удаления носителей в SiC и предложена модель основных акцепторных уровней, объясняющая особенности скорости удаления носителей заряда при больших дозах облучения в широкозонных полупроводниках. Показано, что измерения вольтамперных характеристик обеспечивают более точную информацию о зависимости концентрации носителей от дозы облучения по сравнению с емкостными измерениями.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы достигаются тем, что предложенные в диссертации структурные и

электронные модели дефектов, а также методы расчета параметров опираются на экспериментально установленные и известные теоретически уровни дефектов и примесей. Достоверность результатов основана на правильном выборе современного метода исследования – емкостной спектроскопии (DLTS), на сравнении с литературными данными по люминесценции и ИК спектроскопии, которые взаимосогласованно подтверждают и дополняют основные результаты DLTS на качественном, а в ряде случаев количественном уровне с результатами других авторов. Материалы диссертации прошли апробацию на 15 конференциях и опубликованы в 15 печатных изданиях, цитируемых в базе данных Web of Science и Scopus.

Научная ценность работы состоит в однозначности интерпретаций полученных данных по условиям образования и электронным состояниям радиационных дефектов в 4H-SiC политипе карбида кремния, а также их температурной стабильности и трансформациям при отжиге.

Практическая ценность работы заключается в установлении температурной нестабильности первичных дефектов, что позволяет проводить направленные поиски вариантов повышения радиационной стойкости для достижения требуемых параметров приборов при работе в экстремальных условиях, а также возможности регенерации их свойств умеренными термообработками.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для анализа результатов экспериментов по радиационной стойкости силовых приборов на основе широкозонных полупроводников. Они представляют интерес для таких организаций, как Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), Институт автоматики и электрометрии СО РАН (г. Новосибирск), Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва), Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (г. Москва).

Недостатки и замечания по работе:

По диссертации имеются следующие замечания:

1. В первой главе упоминаются полевые 4H-SiC транзисторы типа MOSFET, в состав которых входят оксиды, которые в оригинальной части диссертации никак не обсуждаются, но в которых не компенсирующие акцепторы, а полевые эффекты, связанные с индуцированным облучением зарядом в подзатворном диэлектрике, определяют радиационную стойкость.
2. В диссертации на рисунках 15, 17, 19, 22, 24, 26, 30, 34, 41, 53 и на аналогичных в автореферате отсутствуют доверительные интервалы у экспериментальных точек, что затрудняет их сравнение с расчетными кривыми.
3. Формулы 3.3.3 и 3.3.5 на стр. 89 записаны неверно, что ставит под сомнение достоверность вывода о низкой эффективности взаимодействия первичных дефектов с атомами легирующей примеси. Просто в n-базе SiC примеси на 2 порядка больше, чем в кремнии при том же напряжении блокирования.

4. В экспериментальной части я не нашел данных о подвижности носителей заряда при больших дозах облучения электронами и протонами, что может повлиять на определение скорости удаления носителей.
5. Нет данных по концентрации глубоких центров в n-базе, которые можно было бы извлечь из результатов анализа спектров DLTS при низких и ВАХ диодов при высоких дозах облучения.
6. Ссылки на литературу оформлены не единообразно и есть недостоверная, например, ссылка [28] на стр.30 не содержит формулу для расчета пороговой энергии E_d .
7. В диссертации не отражены параметры приборных структур и электрические схемы их включения, что не позволяет оценить роль встроенных полей или генерированных облучением носителей заряда в перезарядку дефектов при межзонном или внутризонном возбуждении, а также возможный вклад примесных атомов, например бора, из других элементов приборов в генерацию дефектов в n-базе.

Указанные замечания не снижают научной значимости и общей положительной оценки диссертационной работы, выполненной на высоком экспериментальном уровне.

Содержание диссертационной работы полно и достоверно отражено в автореферате и опубликованных работах.

В целом диссертационная работа К.С. Давыдовской является законченным научным исследованием, содержит новые результаты, имеющие большую научную значимость и практическую ценность. Основные результаты работы опубликованы в 15 публикациях в научных изданиях, входящих в перечень ВАК. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа К.С. Давыдовской является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная задача. В работе получен ряд новых важных результатов, способствующих развитию представлений о механизмах дефектообразования в широкозонных полупроводниках.

Диссертация свидетельствует о высокой квалификации автора. Научные положения и выводы диссертации обоснованы и подтверждены соответствующими исследованиями. Анализ публикаций автора показывает, что основные результаты диссертации достаточно полно представлены в научных журналах, в том числе входящих в перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus. Результаты работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях. Диссертация написана понятным языком и аккуратно оформлена.

Рассмотренная диссертация обладает высокой научной ценностью в области твердотельной электроники и имеет важное значение для практического применения в микро- и силовой электронике. Считаю, что диссертационная работа Давыдовской Клавдии Сергеевны «Влияние температуры облучения на образование радиационных дефектов в карбиде

кремния и деградацию приборов на его основе» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - «физика полупроводников» согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», а ее автор Давыдовская К.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

Попов Владимир Павлович, д-р физ.-мат. наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников, заведующий лабораторией физических основ материаловедения кремния, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

тел.: +7 (383) 333-25-37

e-mail: popov@isp.nsc.ru

_____ Попов Владимир Павлович

29. 01. 2024

Подпись Попова В.П. удостоверяю:

Заместитель директора

ФГБУН ИФП СО РАН

канд. физ.-мат. наук

_____ А.В. Каламейцев

ФГБУН ИФП СО РАН, Россия, 630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.

<http://www.isp.nsc.ru/>; IFP@isp.nsc.ru