



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,  
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251  
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080  
office@spbstu.ru

22.12.2023 № 23/01/043

«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по научной работе  
федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра  
Великого» к.ф.-м.н. Ю.В. Фомин

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», на диссертацию Давыдовской Клавдии Сергеевны на тему «Влияние температуры облучения на образование радиационных дефектов в карбиде кремния и деградацию приборов на его основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников

Диссертационная работа Давыдовской Клавдии Сергеевны «Влияние температуры облучения на образование радиационных дефектов в карбиде кремния и деградацию приборов на его основе» посвящена изучению деградации карбида кремния и приборов на его основе под воздействием облучения электронами и протонами как при комнатной, так и при повышенных температурах. Данная тема представляет в настоящее время как научный, так и практический интерес.

В будущем, как предполагается, основными источниками энергии станут атомная энергетика и солнечная энергия, которые обеспечат достаточное количество ресурсов для поддержания процессов развития. Для обеспечения надежности работы атомных электростанций и космической техники необходимо проводить исследования в области радиационно-стойких материалов и разрабатывать приборы, работающие на их основе. Также важно изучать радиационную стойкость полупроводников с целью прогресса в аэрокосмической и военной технике. Развитие электроники тесно связано с созданием нового поколения приборов, способных функционировать в экстремальных условиях – при высоких температурах, в условиях повышенного уровня радиации и в химически активных средах. Наша электроника должна быть подготовлена к работе в различных неблагоприятных ситуациях, чтобы успешно справляться с вызовами будущего.

Успешное исследование процессов деградации приборов на основе 4H-SiC под воздействием облучения, включая зависимость радиационной стойкости от температуры облучения, предоставит возможность прогнозировать изменение характеристик карбидных

приборов на основе карбида кремния при воздействии радиации. Кроме того, более глубокое понимание физики формирования радиационных дефектов в дальнейшем способствует созданию более стойких к радиационному излучению приборов на основе карбида кремния. Все вышесказанное подтверждает **актуальность** темы диссертационной работы Клавдии Сергеевны Давыдовской.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении представлен обзор литературы по тематике исследований, описанных в диссертации, обосновываются актуальность и новизна проведенных исследований, формулируются цель и задачи работы, подробно указываются объекты исследования, указываются объекты исследования, представляются теоретическая и практическая значимость полученных результатов, описывается методология исследований и выносятся на защиту научные положения.

В первой главе представлен обзор и анализ источников литературы по карбиду кремния и устройствам на его основе.

Во второй главе описаны экспериментальные методы, используемые для определения параметров и концентраций радиационных дефектов.

Третья глава данного исследования представляет результаты, полученные в ходе изучения характеристик диодов 4H-SiC JBS, подвергнутых облучению электронами и протонами при различных температурах, а также после отжига. Также было проведено сравнение радиационной стойкости карбида кремния и кремния. Определены особенности скорости удаления носителей заряда при облучении широкозонных полупроводников. В рамках исследования была предложена качественная модель, объясняющая различия в значениях скоростей удаления носителей, полученных на основе результатов измерений емкостными и гальваническими методами (CV и ВАХ).

В заключении описаны основные выводы работы. Можно выделить следующие **новые результаты**, представленные в диссертации:

1. Определены 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. Установлено, что в результате облучения 4H-SiC электронами и протонами малыми дозами происходит линейное уменьшение концентрации нескомпенсированных носителей заряда ( $N_d - N_a$ ) с увеличением дозы облучения;
3. Показано, что деградация приборов обусловлена, в первую очередь, возрастанием прямого падения напряжения. Причиной этого является увеличение сопротивления слаболегированной базы за счет введения радиационных дефектов акцепторного типа;
4. Сравнение результатов горячего и холодного облучений показало, что увеличение температуры облучения приводит к росту радиационной стойкости карбида кремния;
5. При высокотемпературном («горячем») облучении спектр вводимых в SiC радиационных дефектов существенно отличается от спектра дефектов, вводимых при комнатной температуре;
6. Показано, что уменьшение скорости удаления носителей в SiC при повышенных температурах облучения обусловлено отжигом образующихся РД при температурах 300-450 К;

7. Определена скорость удаления носителей в SiC в зависимости от условий облучения, рассмотрены особенности скорости удаления носителей при больших дозах облучения;
8. Величины скорости удаления носителей, измеренные на основе вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик при больших дозах облучения, могут отличаться на несколько порядков. Измерения вольтамперных характеристик обеспечивают более точную информацию о зависимости концентрации от дозы облучения;
9. Проведено сравнение радиационной стойкости кремния и карбида кремния. Относительно небольшая разница в скорости удаления носителей в SiC и Si при облучении при комнатной температуре связана с тем, что в SiC в отличие от Si, отжиг первичных радиационных дефектов в процессе облучения практически отсутствует.

**Достоверность** и обоснованность полученных результатов, содержащихся в диссертации, подтверждается их повторяемостью и воспроизводимостью, применением современного оборудования. Измеренные DLTS-спектры после холодного облучения, а также рассчитанные концентрации некомпенсированных носителей заряда хорошо согласуются с данными литературных источников на малых дозах облучения. Составленная модель же хорошо согласуется с экспериментами как на малых, так и на больших дозах облучения.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы заключается, в первую очередь, в следующем:

- 1) Данная диссертация представляет собой первое комплексное исследование свойств глубоких центров, скорости удаления носителей заряда и проводимости карбидных кремниевых приборов при различных режимах облучения.
- 2) Впервые изучены результаты воздействия высокотемпературного "горячего" облучения на карбид кремниевые приборы. Показано, что при горячем облучении радиационная стойкость карбида кремния выше, чем при комнатном (холодном) облучении. Такой результат отличался от первоначальных предположений о негативном влиянии горячего облучения на характеристики карбида кремния. Проведено сравнение результатов горячего и холодного облучений. Также показано, что при повышенных температурах облучения не просто происходит частичный отжиг радиационных дефектов, что замедляет процесс деградации параметров приборов в сравнении с холодным облучением, но и меняется сам спектр вводимых дефектов.
- 3) Впервые были отмечены различия между результатами измерений вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик карбид кремниевых приборов после различных доз облучения. Было установлено, что при больших дозах облучения лучше использовать гальванические методы измерения, а не емкостные. Впервые предложена простая теоретическая модель, хорошо объясняющая экспериментальные результаты как для малых, так и для больших доз. Более того, было показано, что подобные особенности в измерениях могут наблюдаться и в других материалах с широкой запрещенной зоной.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем:

- 1) Поскольку при горячем облучении радиационная стойкость карбида кремния выше, чем при комнатном (холодном) облучении, можно сделать вывод о целесообразности использования данной особенности в силовой энергетике, где при работе выделяется большое количество тепла. В работе было показано, что высокая температура не просто не усилит деградацию приборов, но и увеличит их стойкость, что позволит частично экономить на отводе тепла и

продлит срок их службы.

- 2) Разработанная модель образования в карбиде кремния под воздействием облучения трех типов глубоких центров позволяет описать изменение концентрации свободных носителей заряда, а также сопротивление, как на малых, так и на больших дозах облучения электронами и протонами. Более того, она применима и к другим широкозонным полупроводникам с оговоркой на параметры вводимых дефектов.

Обосновано, что при измерениях концентрации на больших дозах облучения следует использовать гальванические методы измерения, а не емкостные.

**Основные положения, выносимые на защиту**, являются новыми и достоверными. В работе использовано современное оборудование для комплексного исследования свойств глубоких центров, скорости удаления носителей заряда и проводимости карбидных кремниевых приборов при различных режимах облучения. Результаты удалось теоретически обосновать, создав простую модель образования в карбиде кремния под воздействием облучения глубоких центров.

**Результаты работы** в полном объеме опубликованы в индексируемых журналах, в том числе Semiconductors, Technical Physics Letters, Journal of Surface Investigation: X-ray, Materials, Solid-State Electronics и Radiation Physics and Chemistry. 5 из статей опубликовано в изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science.

Автореферат корректно и полностью отражает содержание диссертации.

**По тексту диссертации имеются следующие вопросы и замечания:**

- 1) Необходимо уточнить вклад каждого из четырех уровней предлагаемой автором  $4^x$  уровневой модели в объяснение двух перегибов на экспериментальной кривой дозой зависимости сопротивления базы диодов при электронном и протонном облучении.
- 2) Автор, к сожалению, не приводит данных о положении уровня Ферми не только в облученных, но и в исходных образцах SiC. Это затрудняет анализ заполняемости глубоких центров при измерении вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик диодов. На рис.52, правда, традиционное обозначение уровня Ферми  $E_F$  появляется, но в подписи к рисунку говорится, что это середина запрещенной зоны.
- 3) Автор впервые проводит исследование одновременного воздействия на полупроводник и радиации и температуры. В то же время присутствует и изучение традиционного последовательного воздействия радиации и температуры. Это «холодное» облучение и последующий отжиг. Насколько эквиваленты эти воздействия, если температуры облучения и отжига совпадают?

Изложенные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

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

Полученные в работе результаты и развитые подходы могут быть использованы при теоретических и экспериментальных исследованиях радиационного дефектообразования в новых полупроводниковых материалах, при разработке промышленной технологии создания высокотемпературной радиационно-стойкой электроники нового поколения в различных научно-исследовательских и производственных организациях, среди которых можно выделить такие как ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Институт физики твердого тела РАН, Санкт-

Петербургский государственный университет, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Академический университет им. Ж.И. Алфёрова, Университет ИТМО, Новосибирский государственный технический университет, ПАО «Светлана», ЗАО «Светлана-Электронприбор», ЗАО «Нитридные кристаллы» и др.

### **Заключение**

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, защищаемые положения и выводы. Диссертационная работа Давыдовской Клавдии Сергеевны «Влияние температуры облучения на образование радиационных дефектов в карбиде кремния и деградацию приборов на его основе», отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям 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-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Давыдовская Клавдия Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв ведущей организации подготовил:

профессор кафедры физики

ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого»

Д.ф.-м.н.

тел.: (904) 511-84-02, E-mail: [nasred\\_fs@spbstu.ru](mailto:nasred_fs@spbstu.ru)

Ф.С. Насрединов

Доклад, отражающий основные результаты диссертационной работы был заслушан и обсуждался на заседании кафедры физики ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого» (протокол № 3 от «15» декабря 2023 г.). На заседании присутствовало 35 человек. На все вопросы, возникшие во время обсуждения, были получены ответы.

Заведующий кафедрой физики

ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого»,

д.ф.-м.н., доцент

тел.: (812) 552-77-90

Секретарь

к.ф.-м.н., доцент

Е.Г. Апушкинский

В.В. Мизина

**Сведения о ведущей организации.** федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

тел: +7 (812) 775—05-30, E-mail: [office@spbstu.ru](mailto:office@spbstu.ru)