

На правах рукописи

Давыдовская Клавдия Сергеевна

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛУЧЕНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ
РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ И ДЕГРАДАЦИЮ
ПРИБОРОВ НА ЕГО ОСНОВЕ**

Специальность 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: **Лебедев Александр Александрович**
доктор физико-математических наук, профессор,
руководитель отделения твердотельной электроники,
заведующий лабораторией физики полупроводниковых
приборов ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты: **Михаил Михайлович Соболев**
доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник лаборатории диагностики материалов и
структур твердотельной электроники ФТИ им. А. Ф.
Иоффе.

Попов Владимир Павлович
доктор физико-математических наук, заведующий
лабораторией физических основ материаловедения
кремния института физики полупроводников Сибирского
отделения Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого».

Защита состоится «___» _____ 2024 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.

Ученый секретарь диссертационного совета _____

Актуальность темы

Современной цивилизации для дальнейшего развития требуется все больше и больше энергии. Можно предположить, что в будущем основными источниками энергии станут атомная энергетика, а также солнечная – преобразование солнечного излучения с помощью наземных и орбитальных преобразователей. Повышение надежности работы атомных электростанций, а также космической техники требует изучения радиационно-стойких материалов, а также приборов на их основе. Исследование радиационной стойкости полупроводников также необходимо для дальнейшего прогресса в аэрокосмической и военной технике. Для дальнейшего развития электроники важна разработка приборов нового поколения, которые могли бы функционировать в экстремальных условиях – при высоких температурах, повышенном уровне радиации, а также в химически активных средах.

К сожалению, традиционные полупроводниковые материалы – Si, Ge, GaAs – по своим физико-химическим свойствам не могут удовлетворить возросшим требованиям современной промышленности. Это вызывает необходимость использовать новые материалы, на основе которых можно было бы получить более стойкие к экстремальным условиям работы приборы.

Подходящими электрофизическими свойствами обладают широкозонные полупроводниковые соединения, такие как нитриды элементов 3^{ей} группы (III-N) и карбид кремния. Ряд нерешенных технологических проблем в технологии материалов III-N снижает возможность их применения для создания приборов силовой электроники. В связи с этим карбид кремния в настоящее время является одним из наиболее перспективных материалов для создания приборов силовой и высокотемпературной электроники.

В течение последних десятилетий на основе SiC удалось создать практически все основные типы полупроводниковых приборов: диоды Шоттки и JBS (Junction Barrier Schottky diodes) и MOSFET транзисторы.

Известно, что при торможении заряженной частицы в объеме полупроводника происходит нарушение кристаллической решетки и образование радиационных дефектов (РД). Появление РД приводит к изменению ряда характеристик полупроводникового материала – уменьшению уровня легирования (компенсация), уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда, снижению квантовой эффективности излучательной рекомбинации.

Введение радиационных дефектов может быть использовано и как контролируемое легирование полупроводников для создания локальных высокоомных областей.

Исследования радиационной стойкости карбида кремния начались еще в 60х годах прошлого века. Следует отметить, что в то время изготавливаемые образцы SiC имели высокую концентрацию легирующей примеси и содержали много структурных дефектов. На фоне низкого структурного совершенства исследуемых образцов нарушения, вносимые облучением, было достаточно сложно выделить. Это приводило к завышению определяемой радиационной стойкости SiC. По мере того, как совершенствовалась технология карбида кремния и удавалось получать все более чистые и структурно совершенные кристаллы, определяемая радиационная стойкость данного материала снижалась. Даже появились работы, где говорилось о том, что радиационная стойкость SiC меньше, чем у кремния.

Несмотря на длительную историю исследований, далеко не все аспекты радиационной стойкости карбида кремния можно считать полностью изученными. Например, нет окончательной ясности какие именно РД являются основными компенсирующими дефектами при облучении SiC при комнатной температуре. Не проводились исследования результатов комбинированного воздействия облучения и высоких температур на SiC приборы. Не ясно, почему скорость удаления носителей в карбиде кремния всего в два раза ниже, чем в кремнии, хотя величина запрещенной зоны SiC в три раза выше, чем в Si.

Цель работы

Основная цель работы заключалась в комплексном исследовании процессов деградации приборов на основе 4H-SiC под воздействием облучения, в том числе исследование зависимости радиационной стойкости от температуры облучения.

Задачи

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение параметров радиационных дефектов в 4H-SiC, возникающих в результате облучения электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ как при комнатной, так и при повышенных температурах.
2. Сравнение результатов облучений при комнатной и при повышенных температурах.
3. Определение скорости удаления носителей в SiC в зависимости от условий облучения.
4. Сравнение радиационной стойкости кремния и карбида кремния.

Научная новизна

Данная диссертация является фактически первым комплексным исследованием как свойств глубоких центров и скорости удаления носителей заряда, так и проводимости карбидкремниевых приборов при различных режимах облучения. Более того, впервые изучен результат воздействия высокотемпературного «горячего» облучения на SiC приборы.

Подробно изучены DLTS спектры радиационных дефектов, образующихся в 4H-SiC после «холодного» (проводимого при комнатной температуре) и горячего облучений электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ. Проведено сравнение результатов с литературными данными, полученными другими экспериментальными методиками.

Проведено сравнение результатов горячего и холодного облучений. Показано, что при повышенных температурах облучения происходит частичный отжиг радиационных дефектов, из-за чего процесс деградации параметров приборов происходит медленнее, чем при холодном облучении.

Проведено сравнение результатов измерений вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик приборов после различных доз облучения. Показано, что при больших дозах облучения наблюдается серьезное различие между определяемыми с помощью этих методик концентрациями некомпенсированных примесей ($N_d - N_a$) и свободных носителей заряда (n). Это приводит к значительной (на порядки) разнице в величине скоростей удаления носителей заряда (V_d), рассчитанных на основе изменения $N_d - N_a$ или изменения n . Предложена простая теоретическая модель, хорошо объясняющая экспериментальные результаты. Показано, что такая особенность в измерении V_d может наблюдаться и в других широкозонных материалах.

Практическая значимость

Проведено детальное экспериментальное исследование скоростей удаления носителей в JBS диодах на основе 4H-SiC при их облучении электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергиями 15 МэВ. Показано, что повышение температуры облучения приводит к увеличению радиационной стойкости карбида кремния. Исследовано влияние высокотемпературного облучения протонами с энергией 15 МэВ на параметры высоковольтных 4H-SiC диодов Шоттки в диапазоне температур облучения T_i 23 - 500° С и доз D от $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ до $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. После облучения дозой $D = 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре величина прямого тока при прямом напряжении $U = 2 \text{ В}$ уменьшается на ~ 10 порядков. При этом величина напряжения отсечки U_c , равная $\approx 0.6 \text{ В}$ в необлученных

приборах, уменьшается до значения $U_c \approx 0.35$ В. Облучение той же дозой при температуре $T_i = 500^\circ$ С, напротив, приводит к росту величины U_c до значения $U_c \approx 0.8$ В. При референтном значении прямого напряжения $U = 2$ В уменьшение тока по сравнению со значением в необлученных приборах составило ~ 4 порядка. Полученные результаты важны для SiC, так как этот материал рассматривается в первую очередь как материал для создания устройств высокотемпературной электроники.

Показано, что снижение скорости удаления носителей в SiC при повышенных температурах облучения связано с отжигом образовавшихся РД при температурах 300-450 К.

Методология и методы исследования

1. Исследование проделано на SiC современных интегрированных диодах Шоттки (JBS диодах).
2. Для облучения JBS диодов электронами с энергией 0.9 МэВ использовался ускоритель электронов РТЭ-1В.
3. Для облучения JBS диодов протонами с энергией 15 МэВ использовался малогабаритный циклотрон МГЦ-20.
4. Для измерения концентрации нескомпенсированных носителей заряда в базах JBS диодов использовался метод вольт-фарадных (CV) характеристик. CV-зависимости измерялись с помощью измерителя иммитанса E7-14 с использованием программы CV-meter.
5. Для изучения параметров глубоких центров в JBS диодах использовался метод нестационарной емкостной спектроскопии (DLTS). Для этого была использована установка на основе емкостного спектрометра CE-8C, разработанного компанией Omnitel по принципам, предложенным Лангом [1].

Научные положения, выносимые на защиту

1. Облучение электронами с энергией 0.9 МэВ или протонами с энергией 15 МэВ при повышенных температурах существенно увеличивает радиационную стойкость SiC. Для создания определенного уровня компенсации в SiC, облучаемом электронами с энергией 0.9 МэВ или протонами с энергией 15 МэВ, с ростом температуры облучения в диапазоне температур $200-500^\circ$ С монотонно возрастает доза, необходимая для реализации заданного уровня компенсации.
2. Скорость удаления носителей заряда в SiC, облученном при комнатной температуре электронами с энергией 0.9 МэВ или протонами с энергией 15 МэВ, в 2 раза ниже, чем

в Si при аналогичных условиях облучения. Различие объясняется тем, что в Si отжиг первичных радиационных дефектов происходит при температурах менее 300 К, в то время как в SiC отжиг первичных радиационных дефектов начинается только при температурах более 400 К.

3. При высокотемпературном (200-500° С) облучении электронами с энергией 0.9 МэВ или протонами с энергией 15 МэВ спектр вводимых в SiC радиационных дефектов существенно отличается от спектра дефектов, вводимых при комнатной температуре: ряд глубоких центров не проявляются.
4. Компенсация карбида кремния n-типа, как широкозонного полупроводника, под воздействием облучения электронами с энергией 0.9 МэВ или протонами с энергией 15 МэВ, может быть описана простой четырехуровневой моделью, учитывающей донорный уровень и возникающие в результате облучения три типа глубоких акцепторных уровня. Данная модель позволяет объяснить различия в определении концентраций по результатам вольт-амперных и вольт-фарадных измерений. Определение концентрации по результатам вольт-амперных измерений обладает существенно более высокой разрешающей способностью, чем определение концентрации на основе вольт-фарадных характеристик.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается их повторяемостью и воспроизводимостью, применением современного оборудования. Измеренные DLTS-спектры, а также рассчитанные концентрации некомпенсированных носителей заряда хорошо согласуются с данными литературных источников.

Апробация полученных результатов

Основные результаты работы представлены на 15 конференциях:

1. А. А. Лебедев, К. С. Давыдовская, В. В. Козловский. Радиационная стойкость карбида кремния 4H-SiC n-типа проводимости. 18-я всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 28 ноября – 02 декабря, 2016 г.
2. А. А. Лебедев, К. С. Давыдовская, В. В. Козловский. Радиационная стойкость SiC диодов Шоттки. Physica.SPb, Санкт-Петербург, 24 октября 2016 – 27 октября, 2016 г.
3. A. A. Lebedev, K. S. Davydovskaya, A. M. Strel'chuk, A. N. Yakimenko, V. V. Kozlovski. Comparison of the effects of electron and proton irradiation on 4H-SiC and Si device structures. Mater. Sci. Forum, v.924 MSF, 2018, p. 217 – 220. International Conference on

- Silicon Carbide and Related Materials, ICSCRM 2017; Washington DC, USA; 17-22 September 2017.
4. А. А. Лебедев, К. С. Давыдовская, В. В. Козловский, А. Н. Якименко. Сравнение эффектов электронного и протонного облучения приборов на основе 4H-SiC и Si. 19-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 27 ноября 2017 – 01 декабря, 2017 г.
 5. A. A. Lebedev, K. S. Davydovskaya, A. M. Strel'chuk, A. N. Yakimenko, and V. V. Kozlovski. Comparison of the Effects of Electron and Proton Irradiation of Devices based on 4H-SiC and Si., *Frontiers of 21st Century Physics and Ioffe Institute*, 29.10 – 1.11, 2018 г.
 6. К. С. Давыдовская, А. А. Лебедев, А. М. Стрельчук и В. В. Козловский. Сравнение эффектов электронного и протонного облучения приборов на основе 4H-SiC, GaN и Si. 21-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 25 ноября – 29 ноября, 2019 г.
 7. К. С. Давыдовская, А. А. Лебедев, А. М. Стрельчук и В. В. Козловский, Перспективы использования карбида кремния и нитрида галлия для силовой электроники. Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020», Санкт-Петербург, 23 – 24 апреля, 2020 г.
 8. К. С. Давыдовская, А. А. Лебедев, В. В. Козловский. Дефектообразование при электронном и протонном облучении приборов на основе 4H-SiC, GaN и Si. Международная конференция Физика А.СПб, Санкт-Петербург, 20-22 октября 2020 г.
 9. К. С. Давыдовская, А. А. Лебедев, М. Е. Левинштейн и В. В. Козловский. Влияние горячего облучения электронами/протонами на дефектообразование в карбиде кремния. 22-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 23 - 27 ноября, 2020 г.
 10. К. С. Давыдовская, А. А. Лебедев, В. В. Козловский. Перспективы использования карбида кремния и нитрида галлия для силовой электроники, VII Международная научно-практическая конференция “Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики” IPDME-2020, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 23-24 апреля 2020 г.

11. К. С. Давыдовская, А. А. Лебедев, М. Е. Левинштейн, В. В. Козловский, А. Е. Иванов. Высокотемпературное облучение протонами с энергией 15 МэВ SiC JBS диодов. Международная конференция Физика.СПб, Санкт-Петербург, 18-22 октября 2021 г.
12. А. А. Лебедев, В. В. Козловский, К. С. Давыдовская, М. Е. Левинштейн, А. Е. Иванов, Г. А. Оганесян. Влияние температуры облучения на радиационную стойкость SiC. XXXI международная конференция «Радиационная физика твёрдого тела». г. Севастополь, 5 июля – 10 июля 2021 г.
13. A. A. Lebedev, V. V. Kozlovski, K. S. Davydovskaya, M. E. Levinstein, D. A. Malevsky, G. A. Oganesyanyan. Effect of electron irradiation temperature on radiation resistance of SiC. 4th International Conference on Material Science & Nanotechnology. Online. March 24-25 2022.
14. В. В. Козловский, А. Э. Васильев, А. А. Лебедев, М. Е. Левинштейн, К. С. Давыдовская. Влияние температуры облучения электронами на образование радиационных дефектов в карбиде кремния. 51-я Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами. Москва, МГУ им М.В. Ломоносова, 24-26 мая 2022.
15. А. В. Соломникова, К. С. Давыдовская, Р. А. Двоглазов, В. В. Козловский, П. А. Иванов, А. А. Лебедев, В. И. Зубков. Влияние глубоких центров на частотную дисперсию емкости в р-п диодах 4H-SiC. Международная конференция Физика. СПб, Санкт-Петербург, 17-21 октября 2022 г.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus.

Список работ приведен в заключении.

Личный вклад автора

Соискателем были проведены вольт-фарадные и DLTS измерения JBS диодов на основе 4H-SiC, а также обработка результатов в виде расчетов концентраций нескомпенсированных носителей заряда, параметров глубоких центров и скоростей удаления носителей зарядов. Соискателем были построены все вытекающие из них зависимости, а также проведено сравнение с имеющимися литературными данными.

Также соискателем были рассчитаны концентрации свободных носителей заряда из вольт-амперных характеристик (ВАХ), измеренных коллегами, и совместно с научным

руководителем выведена качественная модель образования в карбиде кремния глубоких центров.

Соискатель принимала участие в апробации работ на конференциях, семинарах и подготовке результатов исследований к публикациям. Постановка задач и целей осуществлялась совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, в котором сформулированы основные выводы, и списка литературы из 132 источников. Объем диссертации составляет 143 страницы, включая 54 рисунка и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность и новизна проведенных исследований, сформулированы цель и задачи работы, указаны объекты исследования, представлены теоретическая и практическая значимость полученных результатов, описана методология исследований и приведены выносимые на защиту научные положения.

В **1 главе “Литературный обзор”** приведен обзор и анализ литературных источников, посвященных карбиду кремния, а также приборам, созданным на его основе.

Первая часть посвящена истории создания и разработки приборов. Показана важность чистоты и структурного совершенства карбида кремния. Вторая часть посвящена политипизму карбида кремния и свойствам разных его политипов. В третьей части продемонстрированы свойства SiC как материала для полупроводниковой электроники, а также указаны преимущества карбида кремния над другими материалами в создании полупроводниковых приборов, особенно силовых. Четвертая часть посвящена дефектам в кристаллической решетке: их видам и свойствам. В пятой части подробнее рассматривается радиационное дефектообразование. В шестой и седьмой частях представлены параметры, введенные для описания радиационной стойкости полупроводников, такие как пороговая энергия дефектообразования и скорость удаления носителей заряда. Восьмая часть описывает известные дефекты и примеси (в том числе глубокие) в 4H-SiC, а также их параметры.

Во **2-ой главе** описываются экспериментальные методики, использовавшиеся в работе для определения параметров и концентраций радиационных дефектов.

Метод вольт-фарадных характеристик (CV) основан на возможности определить концентрацию нескомпенсированных доноров (акцепторов) из зависимости емкости барьера от приложенного обратного напряжения:

$$C_G = S \times \sqrt{\frac{q \times \varepsilon \times \varepsilon_0 \times N_{d,a}}{2 \times \Delta U}} \quad (1),$$

где S – площадь барьера, $\Delta U = (U_d + U)$ – сумма контактного и приложенного напряжения. $N_{d,a} = (N_d - N_a)$ – концентрация нескомпенсированной примеси, ε – диэлектрическая проницаемость (для карбида кремния $\varepsilon = 10.03$), $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-2}$ пФ/см – диэлектрическая постоянная вакуума.

Формула профиля для неоднородной структуры имеет вид:

$$N(x) = \frac{2}{q \times \varepsilon \times \varepsilon_0 \times S^2} \times \frac{dU}{dC_G^{-2}} \quad (2).$$

Эта зависимость является основной рабочей формулой вольт-фарадного метода, более того, она определяет концентрацию именно свободных носителей, а не легирующей примеси.

Метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) состоит в измерении релаксации высокочастотной емкости, обусловленной перезарядкой глубоких центров, оказавшихся в слое объёмного заряда, при приложении к исследуемому образцу импульсов обратного напряжения и при температурном сканировании. Благодаря ему возможно получить спектр ловушек в изучаемой структуре, имеющий вид положительных и отрицательных пиков. Высота пика пропорциональна концентрации ловушек, в то время как расположение пика на оси температур определяется энергией, определяющей термическую эмиссию с ловушки. Из DLTS спектра, определяется энергия активации ловушки и сечения захвата электрона или дырки.

При измерении DLTS-характеристик к р-n-переходу или барьеру Шоттки одновременно с измерительным высокочастотным сигналом подается обратное смещение $U < 0$, а затем на время t_i уменьшается до нуля. После этого в момент времени t_0 резко восстанавливается обратное смещение U и держится постоянным в течении времени t_r . Емкость образца C при наличии в области пространственного заряда примесей с глубокими уровнями в запрещенной зоне будет изменяться по закону:

$$\Delta C(t) = \Delta C(0) \times e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (3)$$

где θ – время релаксации емкости, $\Delta C(0) < 0$ – изменение стационарного значения емкости в момент времени $t = 0$. Во время релаксации емкости напряжение на диоде $U < 0$ поддерживается постоянным. Время опустошения центров t_θ и время заполнения центров

t_1 и t_2 независимые величины. Обозначим через C_0 – стационарное значение высокочастотной емкости при текущей температуре.

Если произвести измерения нестационарной емкости $\Delta C(t)$ в два момента времени t_1 и t_2 , и образовать разность

$$S = \frac{\Delta C(t_2) - \Delta C(t_1)}{C_0} = - \frac{\Delta C(0)}{C_0} \times \left(e^{-\frac{t_2}{\theta}} - e^{-\frac{t_1}{\theta}} \right), \quad (4)$$

то при изменении величины θ с температурой эта разность как функция θ имеет вид спектральной линии, которая называется DLTS-спектром.

Функция $S(\theta)$ достигает максимума при

$$\theta_{\max} = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \quad (5)$$

Максимальное значение $S_{\max} = S(\theta_{\max})$ выражается соотношением:

$$S_{\max} = - \frac{\Delta C(0)}{C_0} \times \left(e^{-\frac{t_2}{\theta_{\max}}} - e^{-\frac{t_1}{\theta_{\max}}} \right) = - \frac{\Delta C(0)}{C_0} \times \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right) \times \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^{\frac{-t_1}{t_2 - t_1}}. \quad (6)$$

Рассмотренный метод измерения мгновенных значений емкости $\Delta C(t)$ в моменты времени t_1 и t_2 с образованием разности емкостей $S = \frac{\Delta C(t_2) - \Delta C(t_1)}{C_0}$ получил название дифференциального DLTS метода.

Для измерения вольт-фарадных характеристик использовался измеритель иммитанса E7-14, а для DLTS - установка на основе емкостного спектрометра CE-8C, разработанного компанией Omnitel по принципам, предложенным Лангом.

Облучение полупроводниковых приборов электронами с энергией 0.9 МэВ проводилось на импульсном ускорителе электронов РТЭ-1В, а облучение протонами с энергией 15 МэВ - на циклотроне МГЦ-20.

В **третьей главе** приведены результаты исследований характеристик 4H-SiC JBS диодов, облученных электронами и протонами при различных температурах, а также после отжигов. Проведены сравнения радиационной стойкости карбида кремния и кремния. Определены особенности скорости удаления носителей заряда при облучении широкозонных полупроводников. Предложена качественная модель для объяснения различия значений скоростей удаления носителей, полученных на основе результатов измерений методами (CV и ВАХ). Глава включает в себя 7 разделов.

В **1 и 2 разделах третьей главы** описываются результаты вольт-фарадных исследований 4H-SiC JBS, облученных электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ при комнатной температуре [A1-A7, A10]. При малых дозах облучения наблюдается линейное уменьшение концентрации носителей заряда от дозы облучения. Это означает, что в SiC реализуется механизм компенсации, при котором радиационные

дефекты создают глубокие акцепторные уровни, на которые переходят электроны с мелких донорных уровней [2, 3]. Примеры зависимостей $(C/S)^{-2}$ от приложенного напряжения и концентрации $(N_d - N_a)$ от дозы облучения D представлены на рисунках 1 и 2. Стоит отметить, что кривая 4 на рисунке 1, измеренная после максимальной дозы облучения, имеет напряжение отсечки большее, чем контактная разность потенциалов для 4H-SiC. Это говорит о том, что сопротивление образцов уже слишком велико, и измерения емкости нельзя считать полностью корректными.

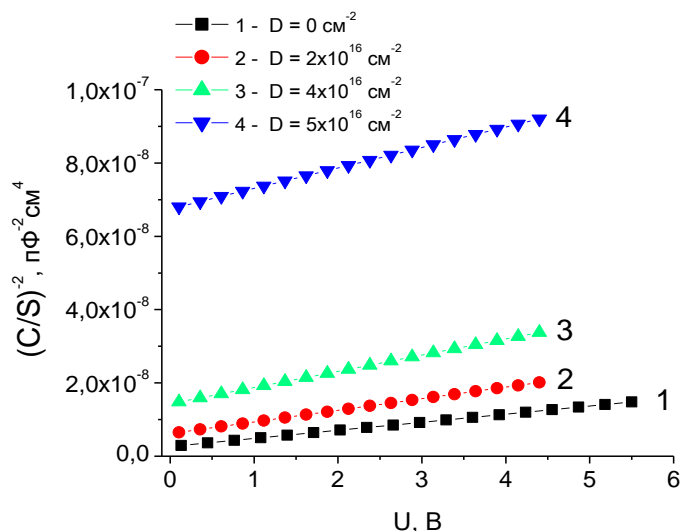


Рис. 1. Зависимость $(C/S)^{-2}$ от приложенного обратного напряжения для JBS с блокирующим напряжением $U_b = 600$ В при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ, $T = 300$ К.

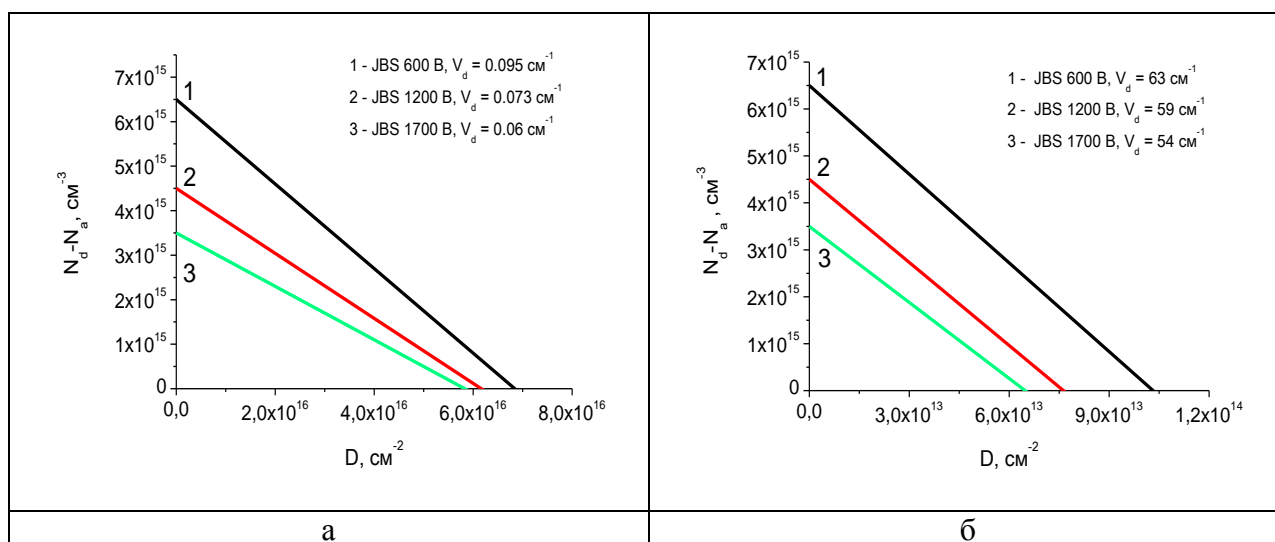


Рис. 2. Зависимость концентрации $(N_d - N_a)$ от дозы облучения D для JBS с блокирующим напряжением $U_b = 600, 1200$ и 1700 В: а - при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ, б - при облучении протонами с энергией 15 МэВ.

Для описания процесса компенсации полупроводника используется понятие “скорость удаления носителей заряда” V_d :

$$V_d = \frac{\Delta n}{D} = \frac{(n_0 - n)}{D}, (7)$$

где n_0 и n – концентрации носителей в зоне проводимости до и после облучения, D – доза облучения.

В разделе 3 третьей главы описывается сравнение радиационной стойкости кремния и карбида кремния (Таблица 1) [A1, A3, A4, A11].

Таблица 1. Скорости удаления носителей заряда в приборах на основе SiC и Si.

Тип прибора	SiC JBS 600 В	SiC JBS 1200 В	SiC JBS 1700 В	Si
$N_d - N_a$ в базе, см^{-3}	6.5×10^{15}	4.5×10^{15}	3.5×10^{15}	$\sim 10^{15}$
V_d (0.9 МэВ электроны), см^{-1}	0.095	0.073	0.06	0.23 [4]
V_d (15 МэВ протоны), см^{-1}	63	59	54	110 [5]

Сравнение можно проводить двумя способами. В первом случае сравниваются два диода с одинаковым напряжением пробоя на основе SiC и Si. Скорости удаления носителей заряда у карбида кремния примерно в 2 раза меньше, чем у кремния. С учетом того, что критическое поле пробоя в SiC на порядок выше, чем в Si, при одинаковом напряжении пробоя база SiC диода может иметь концентрацию на два порядка больше. Таким образом, для компенсации базы SiC диодов потребуется приблизительно в 200 раз большая доза облучения, чем для компенсации базы Si диода с таким же напряжением пробоя.

При втором способе сравнения можно сопоставлять радиационную стойкость SiC и Si диодов с одинаковым уровнем легирования базы. В этом случае происходит прямое сравнение скоростей удаления носителей. Как видно из таблицы 1, величина V_d для SiC всего в два раза меньше чем для Si. Однако, поскольку величина запрещенной зоны (E_g) SiC почти в три раза больше чем E_g для кремния, возник вопрос – чем обусловлена столь незначительная разница в величинах V_d для этих двух материалов? Данную разницу можно объяснить различиями в температурах отжига первичных и вторичных дефектов в

этих материалах (рисунок 3). Экспериментальная проверка данного предположения описана в разделах 4 и 5 главы 3.

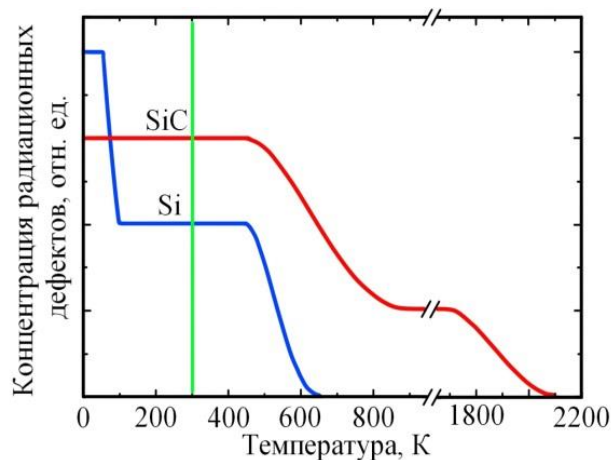


Рис. 3. Схематическое изображение отжига радиационных дефектов в кремнии и карбиде кремния. [6]

В разделах 4 и 5 главы 3 приведены результаты измерений вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик, из которых рассчитывались параметры 4H-SiC JBS после облучения электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ при повышенных температурах [A8, A9, A11-A14]. Как и в случае холодного облучения, при малых дозах наблюдалось линейное уменьшение концентрации носителей заряда от дозы облучения. При этом скорости удаления носителей заряда уменьшались при повышении температуры облучения. То есть радиационная стойкость увеличивалась с увеличением температуры облучения (рисунок 4 и таблица 2).

Аналогичные выводы можно сделать и из исследования вольт-амперных характеристик.

Участок «насыщения» на зависимости $\lg I(U)$ (рисунок 5) соответствует линейному росту тока с ростом напряжения U и определяется сопротивлением базы R_b . Значение R_b в необлученных диодах составляет ~ 0.1 Ом для JBS с блокирующим напряжением 1200 В [7]. Как видно из рисунка 5, после облучения дозой $D = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре сопротивление составляет $\sim 10^6$ Ом. Этот результат полностью согласуется с данными работы [8]. Такая ситуация соответствует случаю, когда мелкий донорный уровень, отвечающий за начальную концентрацию электронов в базе необлученных диодов, полностью обеднен, а «остаточная» концентрация электронов определяется генерацией электронов с уровня $Z1/2$ с энергией активации ~ 0.65 эВ (вставка к рисунку 5а).

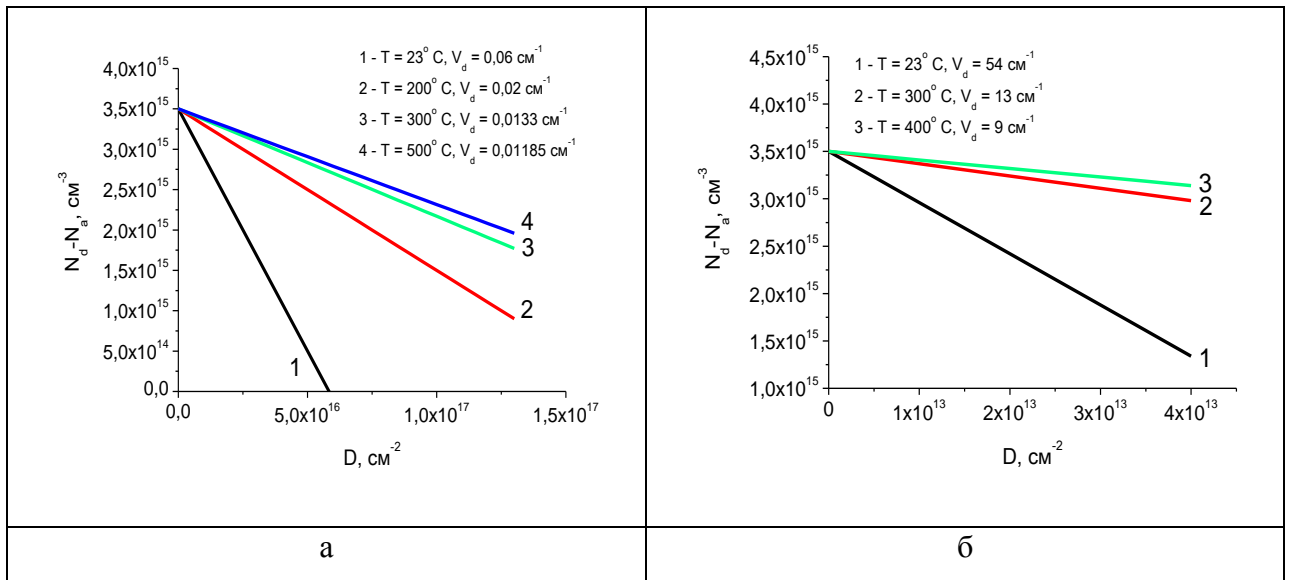


Рис. 4. Зависимость концентрации ($N_d - N_a$) в JBS-структурах с блокирующим напряжением 1700 В от дозы облучения при разных температурах: а - при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ, б - при облучении протонами с энергией 15 МэВ.

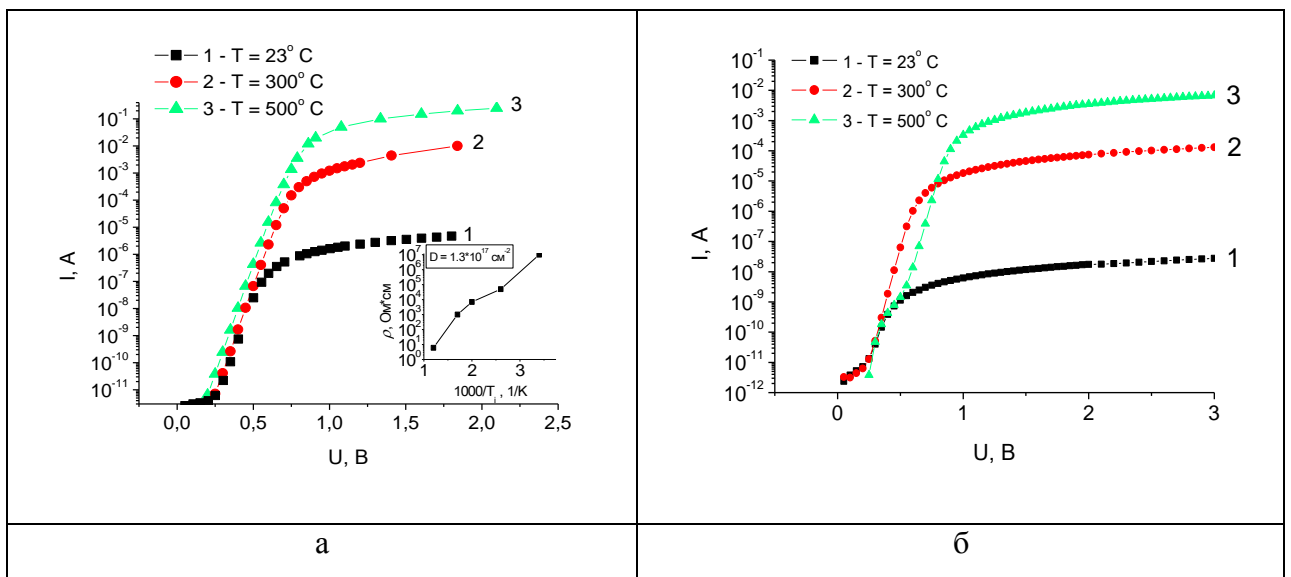


Рис. 5. Прямые вольт-амперные характеристики диодов после:
а - облучения электронами с энергией 0.9 МэВ при трех различных температурах T_i , доза облучения $D = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (на вставке показана зависимость удельного сопротивления ρ от обратной температуры T_i после облучения дозой $D = 1.3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$);
б - облучения протонами с энергией 15 МэВ при трех различных температурах облучения T_i , доза $D = 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

На рисунке 6 изображены зависимости удельного сопротивления базы ρ от обратной температуры $1/T_i$ после облучений электронами и протонами. То обстоятельство, что кривые 1 и 2 на рисунке 6 практически параллельны, служит

дополнительным убедительным аргументом в пользу того, что и при электронном, и при протонном облучении остаточная концентрация электронов в базе определяется тепловой генерацией с одного и того же уровня.

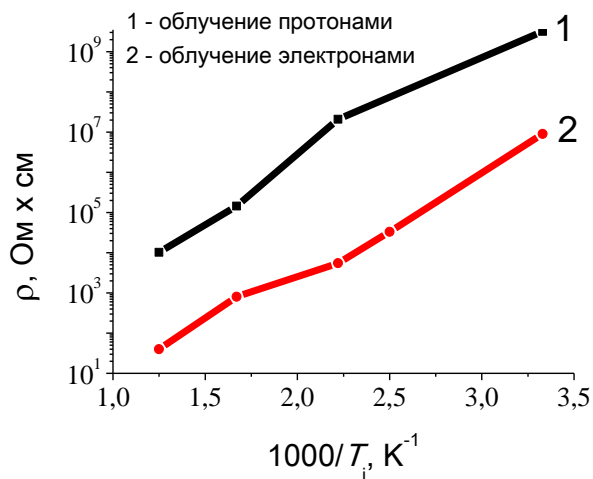


Рис. 6. Зависимости удельного сопротивления базы ρ от обратной температуры $1/T_i$ после облучения протонами с энергией 15 МэВ (доза $D = 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) и электронами с энергией 0.9 МэВ (доза $D = 1.3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$).

Все скорости удаления носителей заряда для разных температур и видов облучения сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Скорости удаления носителей заряда для разных температур и видов облучения для JBS 1700 В.

Температура облучения	$V_d, \text{см}^{-1}$
Облучение электронами с энергией 0.9 МэВ	
$T = 23^\circ \text{C}$	0.06
$T = 200^\circ \text{C}$	0.02
$T = 300^\circ \text{C}$	0.0133
$T = 500^\circ \text{C}$	0.01185
Облучение протонами с энергией 15 МэВ	
$T = 23^\circ \text{C}$	54
$T = 300^\circ \text{C}$	13
$T = 400^\circ \text{C}$	9

В разделе 6 главы 3 описываются результаты DLTS исследований 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].

При исследовании методом DLTS в верхней половине запрещённой зоны 4H-SiC JBS было обнаружено ~ 6 глубоких центров (таблица 3). Типичные DLTS спектры 4H-SiC JBS после различных доз облучения при комнатной температуре представлены на Рис. 7.

Таблица 3. Параметры глубоких центров в JBS с блокирующими напряжениями 600, 1200 и 1700 В после облучения электронами и протонами при комнатной температуре.

Температура максимума пика T, К	169	195	286÷292	417	530÷552	650
Энергия термической активации Et, эВ	~ 0.57	~ 0.6	0.689	0.82	1.13÷1.26	1.58
Пик [9, 10]	Бор	EH2	Z1/Z2	RD1/2	EH5	EH6/EH7

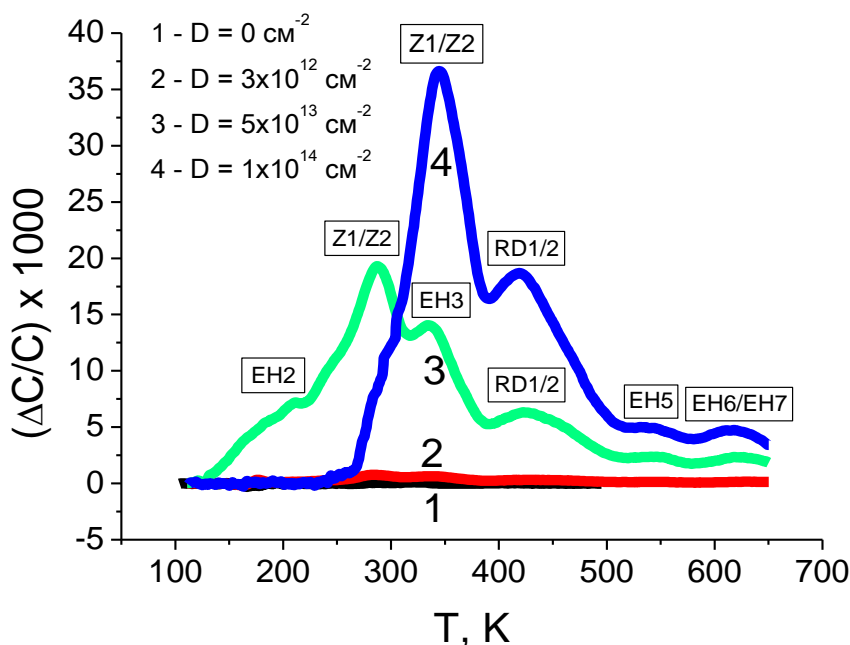


Рис. 7. DLTS спектры для JBS 1200 В при холодном облучении электронами с энергией 0.9 МэВ при дозах 0, 3×10^{12} , 5×10^{13} и 1×10^{14} см^{-2} .

До облучения в DLTS спектрах JBS обычно наблюдаются 3 пика: бор с энергией активации $E_t = \sim 0.57$ эВ, Z1/Z2 с $E_t = \sim 0.68$ эВ и RD1/2 с $E_t = \sim 0.88$ эВ. После облучения как электронами, так и протонами в DLTS спектрах становятся видны следующие пики: EH2 с энергией активации $E_t = \sim 0.6$ эВ, EH3 с $E_t = \sim 0.72$ эВ, EH5 с $E_t = \sim 1.08$ эВ и EH6/7 с $E_t = \sim 1.58$ эВ. Также значительно повышаются концентрации уровней Z1/Z2 и RD1/2.

Дополнительно был изучен отжиг образцов непосредственно в процессе DLTS измерений, которые обычно проводятся вплоть до 700 К. Как выяснилось, при этих температурах происходит отжиг глубоких центров, перезаряжающихся при температурах < 400 К. Из рисунка 8 видно, что при температурах измерения > 450 К DLTS спектр практически не изменяется. Третье измерение DLTS на этом же образце повторило второй спектр, что означает, что уже произошел отжиг менее температурно-стойких радиационных дефектов. Основная же концентрация нескомпенсированных носителей заряда при таком “отжиге” увеличилась на $\Delta N = 0.28 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Можно заметить, что при таком “отжиге” происходит практически полное исчезновение сигнала от глубоких центров (ГЦ), расположенных по оси температур DLTS спектра до центра Z1/2.

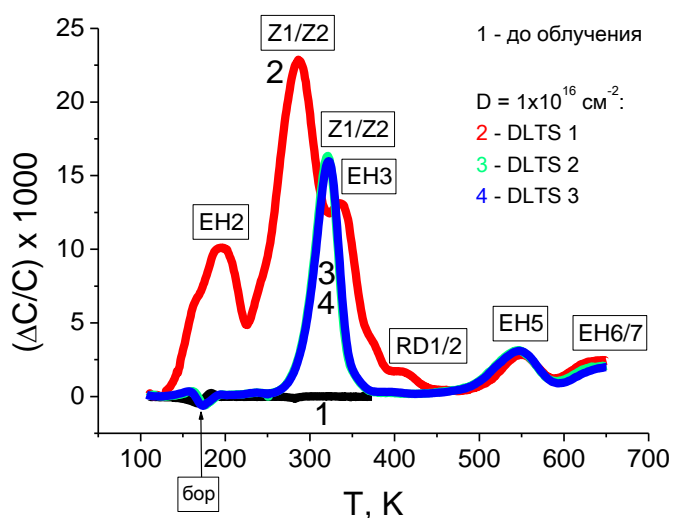


Рис. 8. DLTS спектры для JBS с блокирующим напряжением 1700 В, облученного электронами с энергией 0.9 МэВ дозой $D=1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. 1 – спектр, снятый сразу после облучения; 2 – вторично измеренный спектр. 3 – спектр, снятый в третий раз (повторяет второй).

Результаты горячего облучения JBS также изучались с помощью DLTS метода (рисунок 9). Как видно из рисунка, по сравнению с холодным облучением, при горячем облучении происходит образование значительно меньшего числа радиационных дефектов.

Из анализа DLTS спектров на рисунке 9 можно сделать вывод, что во время горячего облучения скорее происходит частичный отжиг вводимых дефектов.

Более того из рисунка 9 можно видеть, что “отжиг” дефектов при горячем облучении относится только к радиационным дефектам, перезаряжающимся при температурах 300-450 К. На концентрации более глубоких дефектов, таких как EH5 и EH6/7, температура облучения не влияет.

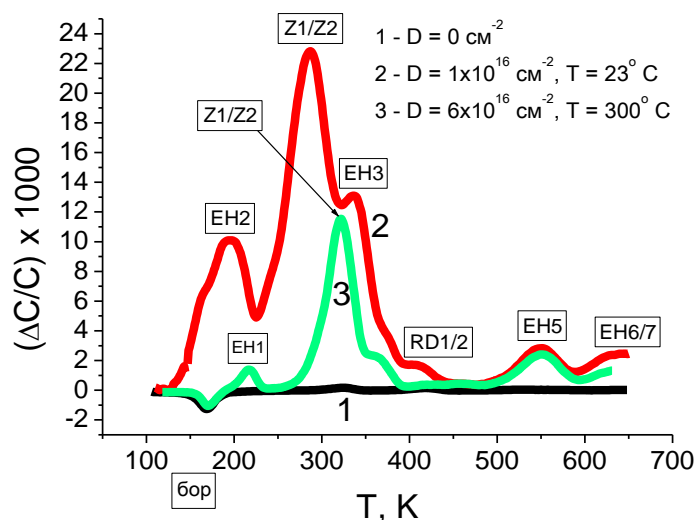


Рис. 9. DLTS спектры для JBS с блокирующим напряжением 1700 В при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ при разных температурах.

В разделе 7 рассматриваются общие особенности определения скорости удаления носителей заряда при облучении широкозонных полупроводников [A15]. В ней рассмотрена проблема расчета концентраций (а из них и скоростей удаления носителей заряда) при больших дозах облучения на основе данных CV и ВАХ. Как видно из рисунка 10, сопротивление при больших дозах облучения изменяется на порядки, то есть концентрация n на порядки падает. При этом из рисунка 11 видно, что $N_d - N_a$ при тех же дозах облучения изменяется существенно меньше и даже выходит на насыщение.

Проблема заключается в том, что из CV измерений определяется концентрация некомпенсированных носителей заряда ($N_d - N_a$), а из ВАХ – концентрация свободных носителей (n), и при больших дозах облучения эти концентрации различаются.

Если быть точным, то степень заполнения глубоких центров при измерениях ВАХ и CV измерениях – всегда различна.

В случае измерения ВАХ реализуется ситуация когда заполнение уровня определяется двумя процессами: термоэмиссией электронов с соответствующего уровня и обратным захватом из зоны проводимости (С-зоны) на уровень. То есть, если уровень при

температуре измерения лежит выше уровня Ферми, то он пуст; в противном случае уровень заполнен.

При CV измерениях уровни располагаются в слое объемного заряда, носителей в С-зоне практически нет, а концентрация носителей на уровнях определяется только термическим выбросом с этих уровней.

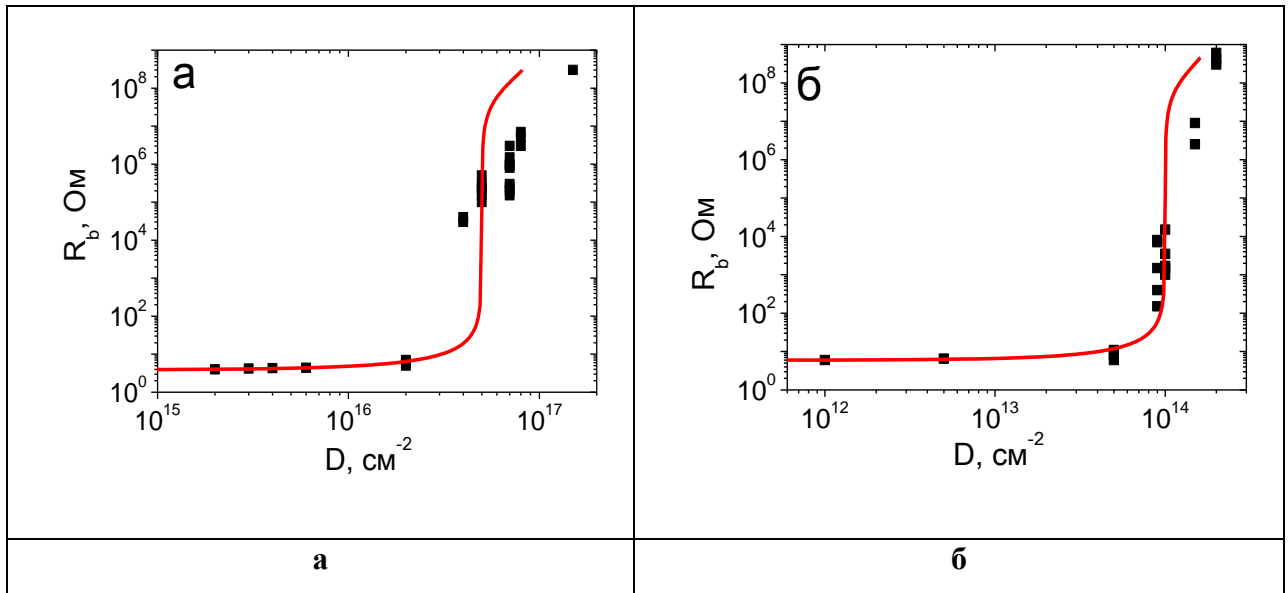


Рис. 10. Экспериментальные и расчетные (уравнения 8 и 9) зависимости сопротивления базы диодов Шоттки 4H-SiC, R_b , от дозы D при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ (а) и протонами с энергией 15 МэВ (б). Точки – экспериментальные данные, линии – результаты расчета.

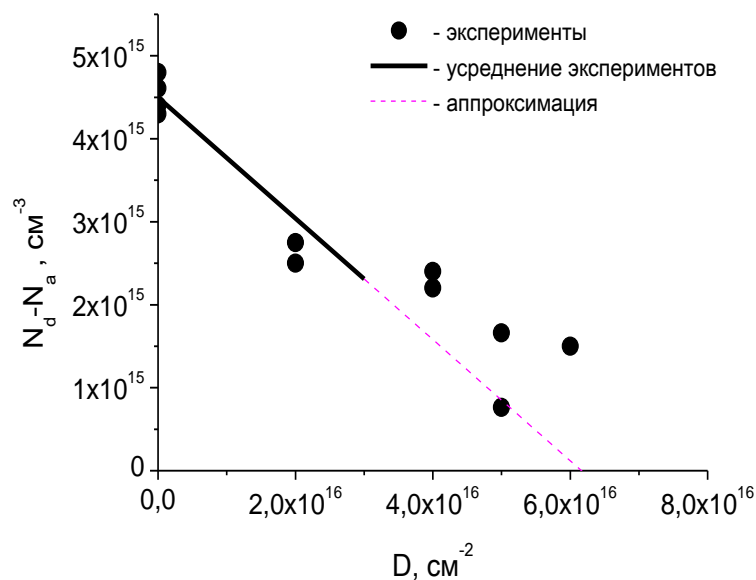


Рис. 11. Зависимость концентрации $(N_d - N_a)$ от дозы облучения D для JBS с блокирующим напряжением 1200 В при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ, $T = 300$ К. $V_d = 0.073$ см⁻¹.

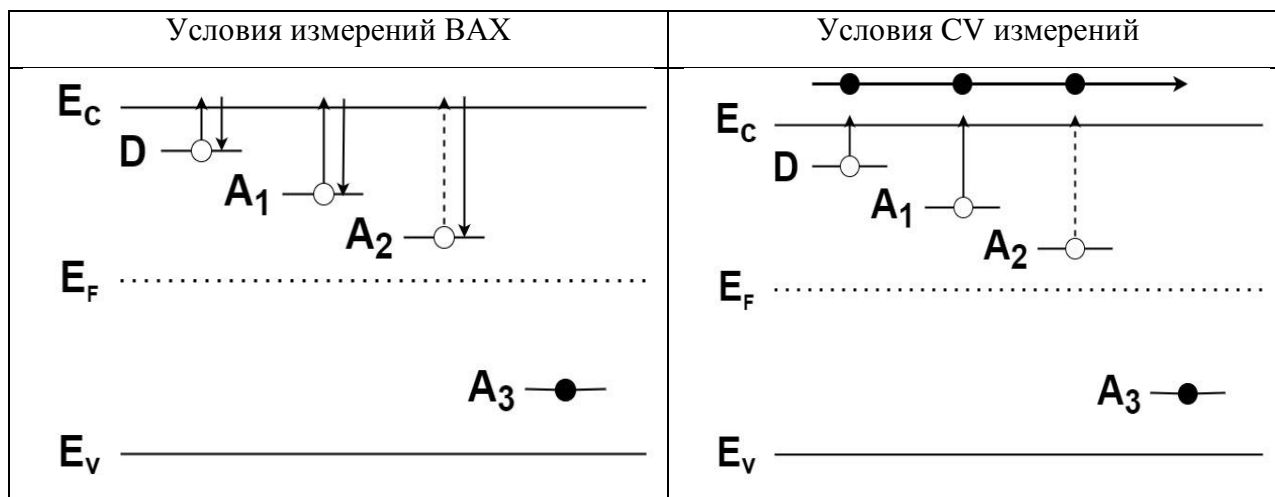


Рис. 12. Схема расположения основных типов уровней в зоне 4H-SiC. Стрелками показаны преобладающие переходы электронов с данного уровня. Пунктиром показана середина запрещенной зоны. D — уровень мелкого донора; относительно неглубокий акцепторный уровень A1 связан с уровнем $Z_{1/2}$; уровень A2 ассоциируется с уровнем $E_{6/7}$; уровень A3 расположен в нижней половине запрещенной зоны.

Для объяснения такого сильного расхождения в скоростях удаления носителей при больших дозах облучения рассматривалась качественная модель образования в карбиде кремния под влиянием трех типов глубоких центров (Рисунок 12):

1. D - мелкий донорный уровень - рассматривается как уровень азота с энергией ионизации $E_i = 0.1$ эВ. При достаточно большой дозе облучения этот уровень почти полностью обеднен в квазинейтральной области (ВАХ). При CV измерениях уровень полностью обеднен при любых дозах облучения.

2. A₁ - относительно неглубокий акцепторный уровень. Такой уровень будет заполнен в квазинейтральной области и опустошен в слое объемного заряда. В качестве такого модельного уровня целесообразно выбрать уровень $Z1/Z2$ с энергией ионизации $E_i = 0.65$ эВ. Этот уровень окажет влияние на уменьшение величины n , но не скажется на уменьшении величины $N_d - N_a$.

3. A₂ - расположен в верхней половине запрещенной зоны, но энергия его ионизации ($E_c - E_{A2}$) достаточно велика (> 1 эВ), так что за характерное время измерения C-V характеристик ионизацией электронов с этого уровня можно пренебречь. Рассматривается как уровень $E_{6/7}$ с энергией ионизации $E_i \sim 1.5$ эВ [8, 3]. Уровень A₃ расположен в нижней половине зоны, и энергия его ионизации еще больше, чем энергия ионизации уровня A₂.

Ввиду большой разницы в энергии ионизации рассматриваемых уровней, величину концентрации электронов n_i , поставляемых в зону проводимости с каждого уровня, с

хорошей точностью можно считать не зависящей от заполнения всех других уровней. Тогда [10]:

$$n_i = \frac{2 \times (N_d - N_a)}{1 + \frac{g \times N_a}{N_c} \times e^{\varepsilon_d} + \sqrt{\left(1 + \frac{g \times N_a}{N_c} \times e^{\varepsilon_d}\right)^2 + \frac{4 \times g \times (N_d - N_a) \times e^{\varepsilon_d}}{N_c}}} \quad (8),$$

где N_c – плотность состояний в зоне проводимости, $g = 1$ – фактор вырождения соответствующего уровня, $\varepsilon_d = \frac{E_d}{k \times T}$, E_d - энергия ионизации уровней.

Сопротивление образцов рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{L}{e \times n \times \mu \times S} \quad (9).$$

На рисунке 11 представлены экспериментальные и рассчитанные зависимости сопротивления 4H-SiC диодов Шоттки от дозы, а также расчетная зависимость $N_d - N_a$. С учетом того, что изменение сопротивления R_b прослеживается в диапазоне восьми порядков, соответствие экспериментальных данных расчету следует признать удовлетворительным.

В заключении обобщены основные результаты работы:

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 вольтамперных 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.

Список публикаций автора по теме диссертации

[A1] А. А. Лебедев, К. С. Давыдовская, А. М. Стрельчук. // Радиационная стойкость диодов Шоттки на основе 4H-SiC при облучении электронами с энергией 0,9 МэВ. // 2017, Поверхность, т. 9 страницы: 35-37.

[A2] В. В. Козловский, А. А. Лебедев, А. М. Стрельчук, К. С. Давыдовская, А. Э. Васильева, Л. Ф. Макаренко. // Влияние энергии бомбардирующих электронов на проводимость эпитаксиальных слоев n-4H-SiC (CVD). // 2017 г., ФТП, т. 51, 3 страницы: 331-316.

[A3] А. А. Лебедев, К. С. Давыдовская, А. Н. Якименко, А. М. Стрельчук, В. В. Козловский. // Исследование воздействия электронного и протонного облучения на приборные структуры на основе 4H-SiC. // 2017 г., Письма в ЖТФ, т. 43, 22 страницы 63-67.

[A4] A. A. Lebedev, K. S. Davydovskaya, V. V. Kozlovski, O. Korolkov, N. Sleptsuk, J. Toompuu // Degradation of 600-V 4H-SiC Schottky Diodes under Irradiation with 0.9 MeV Electrons // Materials Science Forum // 2016, ISSN: 1662-9752, Vol. 897, pp. 447-450.

[A5] A. A. Lebedev, K. S. Davydovskaya, A. M. Strelchuk, A. N. Yakimenko, V. V. Kozlovski. // Comparison of the Effects of Electron and Proton Irradiation on 4H-SiC and Si Device Structures. // June 2018, Materials Science Forum, pp. 217-220.

[A6] В. В. Козловский, А. А. Лебедев, К. С. Давыдовская, Ю. В. Любимова. // Гальванические и емкостные эффекты при компенсации проводимости n-SiC радиационными дефектами // 2018 г., ФТП, т.52, 12 страницы: 1532 – 1534.

[A7] В. В. Козловский, А. Э. Васильев, К. С. Давыдовская, А. А. Лебедев. // Роль подрешетки углерода в компенсации проводимости n-SiC. // 2019 г., Поверхность, т. 2 страницы 82-88.

[A8] A. A. Lebedev, K. S. Davydovskaya, V. V. Kozlovski, O. Korolkov, N. Sleptsuk, J. Toompuu. // Dependence of the carrier removal rate in 4H-SiC PN structures on irradiation

- temperature. // 2019 г., 12TH EUROPEAN CONFERENCE ON SILICON CARBIDE AND RELATED MATERIALS 2018 (ECSCRM 2018) Mater. Sci. Forum, v.963 страницы: 730-733; 2019 TRANS TECH PUBLICATIONS LTD ISSN: 0255-5476 ISBN: 978-3-0357-1332-9.
- [A9] В. В. Козловский, О. Корольков, К. С. Давыдовская, А. А. Лебедев, М. Е. Левинштейн, Н. Слепчук, А. М. Стрельчук, J. Тоотруу. // Влияние температуры протонного облучения на характеристики мощных высоковольтных карбид-кремниевых диодов Шоттки // 2020 г., Письма ЖТФ, т.46, 6 страницы: 35-37.
- [A10] К. С. Давыдовская, А. А. Лебедев, В. В. Козловский. // Перспективы использования карбида кремния и нитрида галлия для силовой электроники // 2020 г. // В книге (сборнике): инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020 (840 стр.) страницы: 497-500, 2020 г. Санкт-Петербургский Горный университет. VII Международная научно-практическая конференция “Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики” IPDME-2020; Санкт-Петербург, Российская Федерация; 23-24 апреля 2020.
- [A11] A. A. Lebedev, V. V. Kozlovski, K. S. Davydovskaya, M. E. Levinshtein. // Radiation hardness of silicon carbide upon high-temperature electron and proton irradiation. // 2021, Materials, v.14, 17 ArtNo: #4976.
- [A12] A. A. Lebedev, V. V. Kozlovski, M. E. Levinshtein, A. E. Ivanov, K. S. Davydovskaya // Effect of high temperature irradiation with 15 MeV protons on characteristics of power SiC Schottky diodes. // Solid-State Electronics, Volumes 181–182, August 2021.
- [A13] A. A. Lebedev, V. V. Kozlovski, M. E. Levinshtein, A. E. Ivanov, K. S. Davydovskaya, V. S. Yuferev, A. V. Zubov // Impact of high temperature electron irradiation on characteristics of power SiC Schottky diodes_Radiat. Phys. Chem., v.185, 2021.
- [A14] А. А. Лебедев, В. В. Козловский, М. Е. Левинштейн, Д. А. Малевский, Г. А. Оганесян, А. М. Стрельчук, К. С. Давыдовская. // Отжиг высоковольтных 4H-SiC диодов Шоттки, облученных электронами при высокой температуре. // 2022, ФТП, т.56, 4 страницы: 441-445.
- [A15] A. A. Lebedev, V. V. Kozlovski, K. S. Davydovskaya, R. A. Kuzmin, M. E. Levinshtein, A. M. Strelchuk. // Features of the Carrier Concentration Determination during Irradiation of Wide-Gap Semiconductors: The Case Study of Silicon Carbide. // Materials, v.15, 23, 2022, ArtNo: #8637.

Список литературы

- [1] D. V. Lang. // Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. // J. Appl. Phys. 1974. 45, 3023.
- [2] V. V. Kozlovski, A. A. Lebedev, E. V. Bogdanova. // Model for conductivity compensation of moderately doped n- and p- 4H-SiC by high-energy electron bombardment. // J. Appl. Phys. 2015. 117, 155702.
- [3] P. Hazdra, J. Vobecký. // Radiation defects created in n-type 4H-SiC by electron irradiation in the energy range of 1 to 10 MeV. // Phys. Stat. Sol. 2019. 216 1900312.
- [4] V. V. Kozlovski, N. B. Strokan, A. M. Ivanov, A. A. Lebedev, V. V. Emtsev, G. A. Oganessian, D. S. Poloskin. // Charge carrier removal rates in n-type silicon and silicon carbide subjected to electron and proton irradiation. // Phys. B. 2009, 404, 4752–4754.
- [5] E. V. Kalinina, A. A. Lebedev, E. V. Bogdanova, B. Berenquier, L. Ottaviani, G. N. Violina, V. A. Skuratov. // Irradiation of 4H-SiC UV detectors with heavy ions. // Semiconductors. 2015. 4, 540–546.
- [6] А. А. Лебедев, В. В. Козловский. // Сравнение радиационной стойкости кремния и карбида кремния. // ФТП. 2014. т. 48, 1329-1331.
- [7] E. I. Shabunina, M. E. Levinshtein, N. M. Shmidt, P. A. Ivanov, J. W. Palmour. // 1/f noise in forward biased high voltage 4H-SiC Schottky diodes. // Solid State Electron. 2014. 96, 44–47.
- [8] V. V. Kozlovski, A. A. Lebedev, M. E. Levinshtein, S. L. Romyantsev, J. W. Palmour. // Impact of high energy electron irradiation on high voltage Ni/4H-SiC Schottky diodes. // Appl. Phys. Lett. 2017. 110, 083503.
- [9] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, F. Nava. // Low temperature annealing of electron irradiation induced defects in 4H-SiC. // J. Appl. Phys. 2004. volume 85, number 17, 3780.
- [10] Шалимова К.В. // Физика полупроводников. // Энергоатомиздат. 1985.