

Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический Институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук
Отделение твердотельной электроники
Лаборатория физики полупроводниковых приборов

Давыдовская Клавдия Сергеевна

**Исследование процессов деградации приборов на основе 4H-SiC
при воздействии облучения.**

Научный доклад

Направление подготовки

1.3

Физические науки

Специальность

1.3.11

Физика полупроводников

Санкт-Петербург

2022

Научный руководитель:

Лебедев Александр Александрович

доктор физико-математических наук, профессор, руководитель
лаборатории полупроводниковых приборов ФТИ им А.Ф.Иоффе.

_____Лебедев А.А.

Рецензенты:

Зубков Василий Иванович

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского
государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. в. и.

Ульянова (Ленина).

Оганесян Гагик Араратович

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории неравновесных процессов в
полупроводниках.

Оглавление

Введение.....	4
Научные положения.....	7
1 Глава. Влияние температуры облучения на радиационную стойкость SiC.....	12
2 Глава. Особенность компенсации SiC.....	18
3 Глава. Различия скорости удаления носителей заряда у кремния и карбида кремния.....	23
Заключение.....	28
Список использованной литературы.....	29

Введение

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.

К сожалению, традиционные полупроводниковые материалы – Si, Ge, GaAs – по своим физико-химическим свойствам не могут удовлетворить возросшие требования 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 их возможность применения для создания приборов силовой электроники. В связи с этим карбид кремния 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. Уже начато промышленное производство диодов Шоттки и JBS (Junction Barrier Schottky, “контакт Шоттки – p-n-переход”) и MOSFET транзисторов.

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, снижение квантовой эффективности излучательной рекомбинации. Введение радиационных дефектов также 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 SiC 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 в кремнии.

Не смотря на длительную историю исследований, далеко не все аспекты радиационной стойкости карбида кремния можно считать полностью изученными. Например, нет окончательной ясности какие именно РД являются основным компенсирующим дефектом 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.

Целью настоящей работы было комплексное исследование процессов деградации приборов на основе 4H-SiC при воздействии облучения, в том числе исследование зависимости радиационной стойкости от температуры облучения.

Объект исследования

Объектом исследования служили диоды Шоттки и JBS-структуры на основе 4H-SiC n- и p-типов проводимости, MOSFET транзисторы облучаемые электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ.

Задачи работы

- Определение параметров радиационных дефектов в 4H-SiC, возникающих в результате холодного и горячего облучения после облучения электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ.
- Сравнение результатов горячего и холодного облучений.
- Определение скорости удаления носителей в SiC в зависимости от условий облучения.
- Сравнение радиационной стойкости кремния и карбида кремния.

Используемые методы исследования

В работе использовались емкостные методы исследования, такие как исследования вольт-фарадных характеристик и DLTS спектров. Также рассчитывались сопротивления образцов из вольт-амперных характеристик.

Научная новизна

Впервые проведено комплексное исследование влияния температуры облучения SiC приборов на их радиационную стойкость.

Подробно изучены DLTS спектры радиационных дефектов, образующихся в 4H-SiC после холодного и горячего облучений электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ.

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

Проведено сравнение между результатами вольт-фарадных измерений и вольт-амперных. Определено серьезное различие между концентрацией нескомпенсированного заряда и концентрацией свободных зарядов. Это приводит к особенностям расчета скоростей удаления носителей заряда для карбида кремния, особенно при больших дозах облучения. Выведено теоретическое обоснование данной особенности карбида кремния, как широкозонного материала.

Научные положения

1. Обнаружено, что проведение облучения SiC при температурах ~ 500 С приводит к уменьшению сопротивления базовой области на 6 порядков по сравнению с облучением при комнатной температуре.

2. Обнаружено, что скорости удаления носителей при облучении SiC, определенные из ВАХ и из C-V характеристик могут отличаться в несколько раз. Это связано с тем, что при облучении SiC могут образовываться достаточно глубокие уровни, чьи зарядовые состояния будут отличаться в слое объемного заряда и в квазинейтральной области при комнатной температуре. В результате будут отличаться и значения V_d , определенные из C-V и из ВАХ.

3. Небольшое отличие в скорости удаления носителей в SiC и Si при комнатной температуре связано с тем, что в карбиде кремния в отличие от кремния, еще не произошел отжиг первичных радиационных дефектов.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 12^{ти} конференциях и семинарах:

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. International Conference on Silicon Carbide and Related Materials. USA, Washington, September 17-22. 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, постерный доклад, 19-я всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 27 ноября 2017 – 01 декабря, 2017 г.

5. Alexander A. Lebedev, Klavdia S. Davydovskaya, Anatoly M. Strel'chuk, Andrey N. Yakimenko, and Vitali 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. Давыдовская К. С., Лебедев А. А., Стрельчук А. М. и Козловский В. В., Сравнение эффектов электронного и протонного облучения приборов на основе 4H-SiC, GaN и Si, постерный доклад, 21-я всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 25 ноября – 29 ноября, 2019 г.

7. Давыдовская К. С., Лебедев А. А., Стрельчук А. М. и Козловский В. В., Перспективы использования карбида кремния и нитрида галлия для силовой электроники, доклад, 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, Козловский В. В., Дефектообразование при электронном и протонном облучении приборов на основе 4H-SiC, GaN и Si, Международная конференция Физика.СПб, Санкт-Петербург, 20-22 октября 2020 г.

9. Давыдовская К. С., Лебедев А. А., М. Е. Левинштейн и Козловский В. В., 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, Козловский В. В., Дефектообразование при электронном и протонном облучении приборов на основе 4H-SiC, GaN и Si., Международная конференция Физика.СПб, Санкт-Петербург, 20-22 октября 2020 г.

11. 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.

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.

Публикации

По материалам диссертации автором опубликовано 15 статей.

1. Lebedev, AA; Davydovskaya, KS; Yakimenko, AN; Strel'chuk, AM; Kozlovskii, VV // A study of the effect of electron and proton irradiation on 4H-SiC device structures // 2017, Tech. Phys. Lett., v.43, 11 страницы: 1027-1029.
2. Alexander A. Lebedev, Klavdia S. Davydovskaya, Anatoly M. Strel'chuk, Andrey N. Yakimenko, Vitalii 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.
3. Kozlovski, VV; Vasil'ev, AE; Davidovskaya, KS; Lebedev, AA // Role of the Carbon Sublattice in n-SiC Conductivity Compensation // 2019, J. Surf. Invest. X-ray, v.13, 1 страницы: 140-145
4. Lebedev, AA; Davydovskaya, KS; Kozlovski, VV; Korol'kov, O; Sleptsuk, N; Toompuu, J // 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
5. Kozlovski, VV; Korol'kov, O; Davidovskaya, KS; Lebedev, AA; Levinshtein, ME; Slepchuk, N; Strel'chuk, AM; Toompuu, J // Influence of the Proton Irradiation Temperature on the Characteristics of High-Power High-Voltage Silicon Carbide Schottky Diodes // 2020 г., Tech. Phys. Lett., v.46, 3 страницы: 287-289.
6. Lebedev, AA; Davydov, VYu; Smirnov, AN; Eliseyev, IA; Davydovskaya, KS; Zavarin, EE; Zakheim, DA; Lundin, WV; Nikolaev, AE; Sakharov, AV; Tsatsulnikov, AF; Zubov, AV; Kozlovski, VV // Proton irradiation effects on GaN-based epitaxial structures. // 2020 г., В книге (сборнике): International Conference PhysicA.SPb/2020 J. Phys.: Conf. Ser., v.1697, 1. International Conference PhysicA.SPb/2020; St.Petersburg, Russian Federation; 19–23 October 2020.

7. Lebedev,AA; Kozlovski,VV; Levinshtein,ME; Ivanov,AE; Davydovskaya,KS; Yuferev,VS; Zubov,AV // Impact of high temperature electron irradiation on characteristics of power SiC Schottky diodes_Radiat. Phys. Chem., v.185 , 2021.

8. Alexander A. Lebedev, Vitali V. Kozlovski, Michael E. Levinshtein, Anton E. Ivanov, Klava 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.

9. Lebedev A. A., Kozlovski V. V., Davydovskaya K. S., Levinshtein M. E. // Radiation hardness of silicon carbide upon high-temperature electron and proton irradiation. // 2021, Materials, v.14, 17 ArtNo: #4976.

10. Lebedev,AA; Kozlovski,VV; Levinshtein,ME; Malevsky,DA; Oganesyan,GA; Strel`chuk,AM; Davydovskaya,KS // Annealing High-Voltage 4H-SiC Schottky Diodes Irradiated with Electrons at a High Temperature // Semiconductors, v.56, 2022.

1 Глава. Влияние температуры облучения на радиационную стойкость SiC

1 положение: обнаружено, что проведение облучения SiC при температурах ~ 500 С приводит к уменьшению сопротивления базовой области на 6 порядков по сравнению с облучением при комнатной температуре.

Для данного исследования использовались образцы промышленных 4H-SiC интегральных диодов Шоттки (JBS) n-типа проводимости с блокирующим напряжением 1700 В производства компании CREE.

Образцы облучали электронами с энергией 0.9 МэВ (на ускорителе РТЭ-1В) и протонами с энергией 15 МэВ (на циклотроне МГЦ-20) как при комнатных, так и повышенных температурах до 500 С (то есть - горячем облучении).

В ходе настоящего исследования впервые было проведено облучение SiC при повышенных температурах.

Изменение характеристик отслеживалось по вольт-емкостным (CV) и вольт-амперным (ВАХ) измерениям, а также DLTS спектрам. Из них рассчитывались концентрация нескомпенсированных носителей зарядов ($N_d - N_a$), а также параметры глубоких центров ГЦ, такие как концентрация ГЦ, их энергия ионизации и сечения захвата. Также рассчитывалась скорость удаления носителей заряда по формуле:

$$V_d = \frac{(N_d - N_a)_0 - (N_d - N_a)_1}{D} \quad (1),$$

где $(N_d - N_a)_0$ и $(N_d - N_a)_1$ - концентрации нескомпенсированных носителей заряда до и после облучения, см^{-3} , D - доза облучения, см^{-2} . [1]

На Рисунке 1 продемонстрированы зависимости концентрации нескомпенсированных носителей заряда в JBS структурах от дозы облучения электронами и протонами при разных температурах.

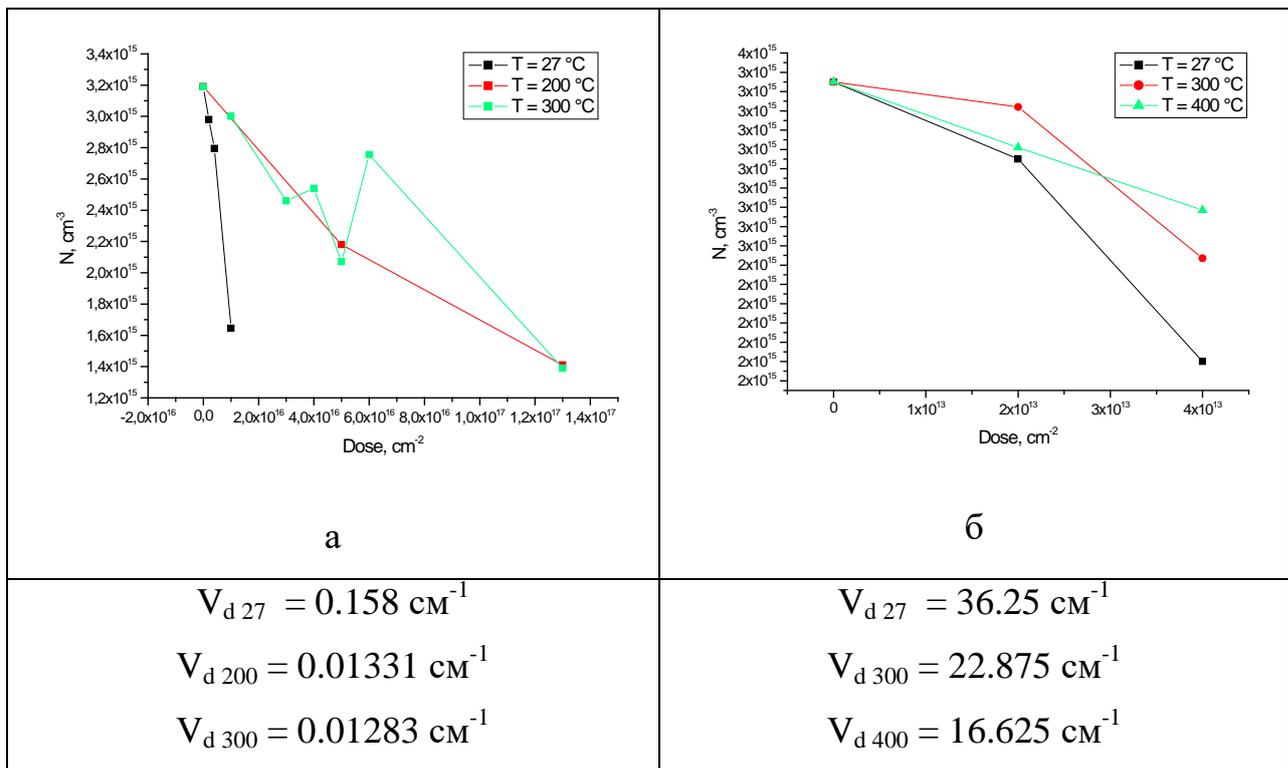


Рисунок 1. Зависимости концентрации нескомпенсированных носителей заряда ($N_d - N_a$) в JBS-структурах от дозы облучения при разных температурах: а – электронами, б – протонами.

Можно увидеть, что, во-первых, наблюдается линейное уменьшение ($N_d - N_a$) с увеличением дозы облучения. А, во-вторых, при горячем облучении для уменьшения концентрации носителей заряда понадобилась значительно большая доза облучения. То есть при горячем облучении приборы имеют большую радиационную стойкость. Это же можно видеть и из рассчитанных скоростей удаления носителей заряда - чем она меньше, тем более радиационно-стойкий образец. Т.е. для его компенсации требуется большая доза облучения.

Также на Рисунке 2 показаны прямые вольт-амперные характеристики диодов после облучений электронами или протонами при разных температурах.

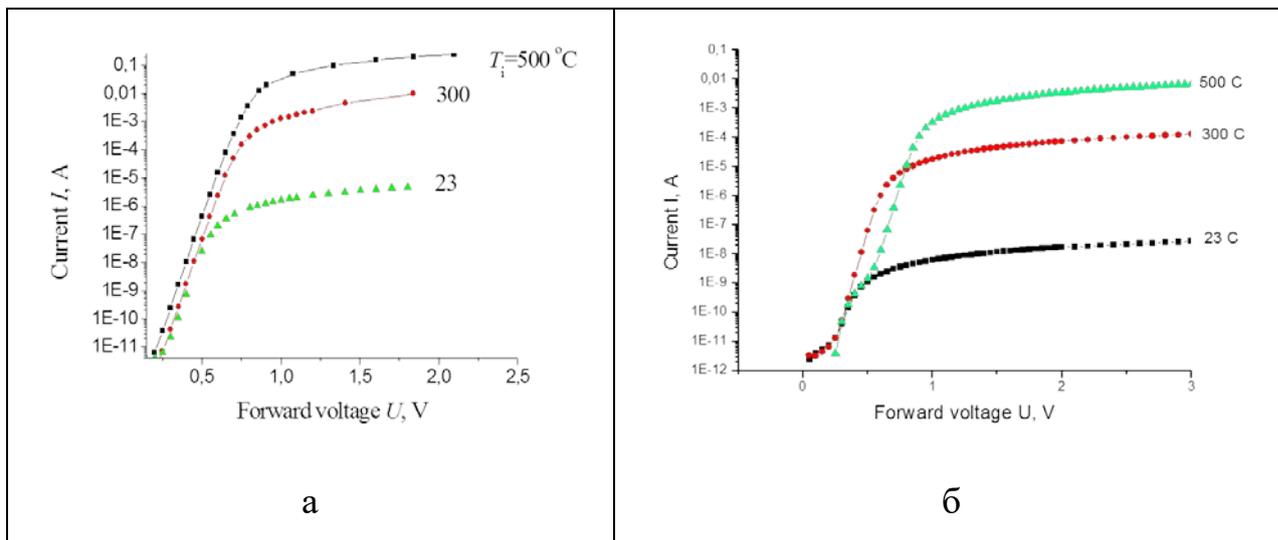


Рисунок 2. Прямые вольт-амперные характеристики диодов после облучения: а - электронами с энергией 0,9 МэВ при трех различных температурах T_i , измерения проводились при комнатной температуре, $D = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. б - протонами с энергией 15 МэВ при трех различных температурах облучения T_i , Доза $D = 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

При повышении температуры облучения от 23 до 500 С в случае облучения электронами (при дозе $1.3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$) - сопротивление базы уменьшается на 6 порядков.

В случае же облучения протонами (при дозе $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$):

- При комнатной температуре облучения величина прямого тока при прямом напряжении $U = 2 \text{ В}$ уменьшается на 10 порядков.
- При температуре облучения 500 С – прямой ток уменьшается на 4 порядка.

Рисунок 3 демонстрирует различия удельных сопротивлений, рассчитанных из ВАХ характеристик, от температуры.

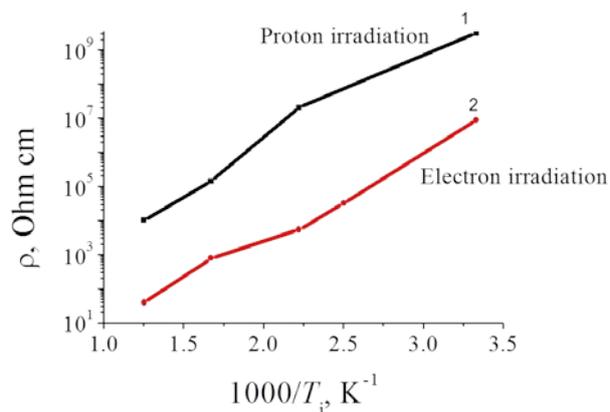


Рисунок 3. Зависимость удельного сопротивления базы ρ от обратной температуры T_i после облучения: протонами с энергией 15 МэВ (доза $D = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) и электронами с энергией 0.9 МэВ (доза $D = 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$).

Обе кривые на Рисунке 3 соответствуют дозам, при которых мелкий донорный уровень, определяющий концентрацию электронов в базе необлученных диодов, полностью опустошен за счет созданных облучением акцепторных уровней.

Остаточная концентрация электронов, обуславливающая величину удельного сопротивления базы, определяется тепловой генерацией электронов с уровней, созданных облучением.

Хотя и электронное, и протонное облучение создают в запрещенной зоне SiC многочисленные (и частично идентичные) локальные уровни, остаточная концентрация электронов для обоих типов облучения определяется, по-видимому, в основном, тепловой генерацией с уровня $Z_{1/2}$ с энергией активации ~ 0.6 эВ.

То обстоятельство, что кривые 1 и 2 на Рисунке 3 практически параллельны, служит дополнительным убедительным аргументом в пользу того, что и при электронном, и протонном облучении остаточная концентрация электронов в базе определяется тепловой генерацией с одного и того же уровня.

Выводы по главе:

- В результате облучения 4H-SiC электронами и протонами наблюдается линейное уменьшение концентрации нескомпенсированных носителей заряда ($N_d - N_a$) с увеличением дозы облучения.
- Увеличение температуры облучения приводит к росту радиационной стойкости карбида кремния. Это важно для SiC, так как этот материал рассматривается, прежде всего, как материал для создания приборов высокотемпературной электроники.
- Уменьшение скорости удаления носителей в SiC при повышенных температурах облучения обусловлено отжигом образующихся РД при температурах 300-450 К.

2 Глава. Особенность компенсации SiC

2 положение: обнаружено, что скорости удаления носителей при облучении SiC, определенные из ВАХ и из C-V характеристик могут отличаться в несколько раз. Это связано с тем, что при облучении SiC могут образовываться достаточно глубокие уровни, чьи зарядовые состояния будут отличаться в слое объемного заряда и в квазинейтральной области при комнатной температуре. В результате будут отличаться и значения V_d , определенные из C-V и из ВАХ.

Для этого исследования изучались диоды Шоттки с напряжениями пробоя 800-950 В, 1200-1550 В, 1600-1860 В и JBS-структуры с напряжениями пробоя 1700 В. Образцы измерялись как вольт-фарадными, так и вольт-амперными методами, изучались их DLTS-спектры, а также строилась качественная модель образования в карбиде кремния глубоких центров.

Для оценки радиационной стойкости полупроводников часто используют параметр V_d - скорость удаления носителей под влиянием облучения (см., например, [2,3]).

$$V_d = \frac{n_0 - n_1}{\Phi} \quad (2)$$

где n_0 – концентрация электронов в полупроводнике до облучения, n_1 – концентрация электронов после облучения; Φ флюенс. (для определенности рассматривается материал n -типа проводимости).

Концентрация свободных носителей заряда высчитывалась из сопротивления образцов через ВАХ:

$$n = \frac{L}{R * e * \mu * S} \quad (3),$$

где L – длина базы диода, e – заряд электрона, μ - подвижность электронов, S – площадь контакта.

При этом для определения величины V_d часто вместо величины n используют значение концентрации нескомпенсированных доноров N_d-N_a :

$$V_d = \frac{(N_d-N_a)_0 - (N_d-N_a)_1}{\Phi} \quad (4),$$

где $(N_d-N_a)_0$ – исходное значение концентрации нескомпенсированных доноров, $(N_d-N_a)_1$ – значение (N_d-N_a) после облучения, Φ – доза облучения.

Концентрация нескомпенсированного заряда рассчитывается из вольт-фарадных характеристик:

$$N(x) = \frac{2}{e \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S^2} * \frac{dU}{dC_b^{-2}} \quad (5),$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость (для 4H-SiC $\epsilon = 10$), $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-2}$ пФ/см – электрическая постоянная, C_b – барьерная емкость.

Раньше, при исследованиях узкозонных полупроводников, облучали небольшими дозами, и концентрации n и (N_d-N_a) при расчетах скорости удаления носителей заряда считались равноценно заменяемыми. Однако современные широкозонные полупроводники способны выдержать большие дозы, чем раньше. И новые эксперименты (Таблицы 1,2, Рисунок 5) показали сильное расхождение между скоростями удаления носителей заряда при расчетах через концентрацию свободных зарядов (рассчитанную через n) и через концентрацию нескомпенсированных носителей заряда (рассчитанную через N_d-N_a) при больших дозах облучения диодов, а также резкое увеличение сопротивления образцов после определенной дозы облучения.

Таблица 1. Концентрации свободных и нескомпенсированных носителей заряда диодов Шоттки при облучении электронами, а также рассчитанные скорости удаления.

$D_{\text{обл}}, \text{см}^{-2}$	n	V_d	N_d-N_a	V_d
0	$7 \cdot 10^{15}$	-	$7 \cdot 10^{15}$	-
$6 \cdot 10^{16}$	$2.7 \cdot 10^{15}$	0.072	$2 \cdot 10^{15}$	≈ 0.083
$1 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^9$	0.067	-	

Таблица 2. Концентрации свободных и нескомпенсированных носителей заряда диодов Шоттки при облучении протонами, а также рассчитанные скорости удаления.

$D_{\text{обл}}, \text{см}^{-2}$	n	V_d	$N_d - N_a$	V_d
0	$7 \cdot 10^{15}$	-	$7 \cdot 10^{15}$	-
$1 \cdot 10^{14}$	$2.7 \cdot 10^{15}$	43	$2 \cdot 10^{15}$	≈ 50
$2 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^7$	27	-	

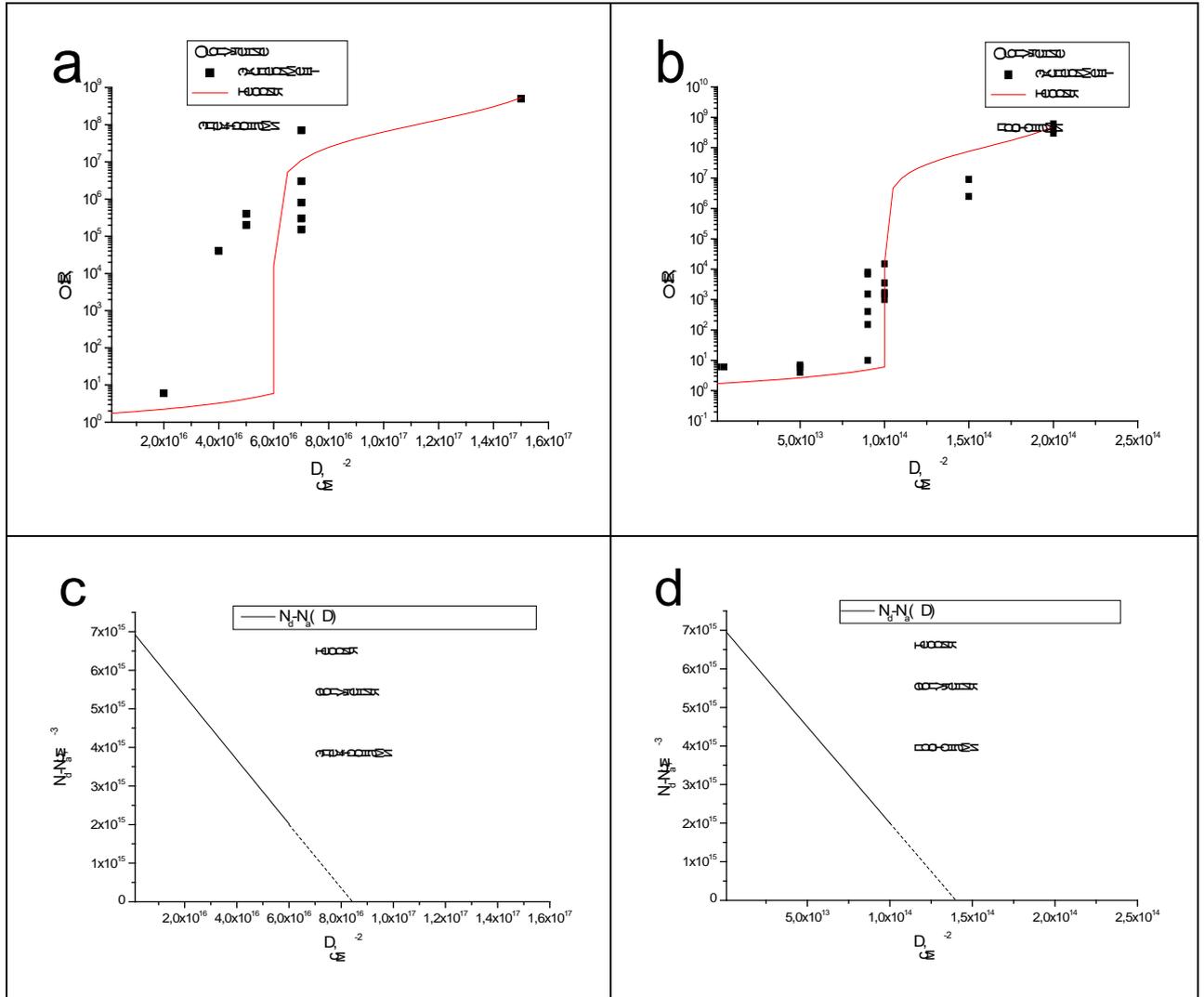


Рисунок 5. Экспериментальные [4] и расчетные зависимости $R = F(dD)$ при облучении 4H-SiC диодов Шоттки электронами с энергией 0,9 МэВ (a) и протонами с энергией 8 МэВ (b). Точки эксперимент, линия расчет. Расчетные зависимости $N_d - N_a = F(dD)$ при облучении 4H-SiC диодов Шоттки электронами с энергией 0,9 МэВ (c) и протонами с энергией 8 МэВ (d).

Для вывода гипотезы такого сильного расхождения в концентрациях диодов при больших дозах облучения рассматривалась качественная модель образования в карбиде кремния 3 типов глубоких центров (Рисунок 6):

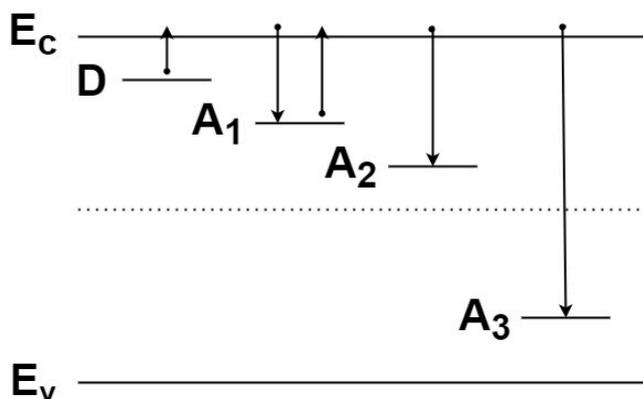


Рисунок 6. Схема расположения основных типов уровней в зоне 4H-SiC. Стрелками показаны преобладающие переходы электронов с участием данного ГЦ. Пунктиром показана середина запрещенной зоны.

A_1 - мелкий донорный уровень, рассматривается как уровень азота с энергией ионизации $E_i = 0,1$ эВ.

A_2 - расположен в верхней половине запрещенной зоны, но энергия его ионизации ($E_c - E_{A_2}$) 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 [3,5].

A_3 - расположен в нижней половине зоны, и энергия его ионизации еще больше, чем A_2 .

В связи с разными свойствами этих трех уровней, они будут давать разный вклад в концентрацию свободных носителей заряда в зависимости от дозы облучения.

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 (см., например, [6]):

$$n_i = \frac{2*(N_d - N_a)}{1 + \frac{g*N_a}{N_c} * e^{\varepsilon_d} + \sqrt{\left(1 + \frac{g*N_a}{N_c} * e^{\varepsilon_d}\right)^2 + \frac{4*g*(N_d - N_a)*e^{\varepsilon_d}}{N_c}}} \quad (6),$$

Где N_c – плотность состояний в зоне проводимости, $g = 1$, $\varepsilon_d = \frac{E_d}{k*T}$, где E_d - энергия ионизации уровней.

Сопротивление образцов рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{L}{e*n*\mu*S} \quad (7).$$

На Рисунке 5 представлены экспериментальные и рассчитанные зависимости сопротивления 4H-SiC диодов Шоттки от дозы, а также расчетные зависимость Nd-Na.

Выводы по главе:

Были рассмотрены особенности радиационной компенсации широкозонного полупроводника, на примере карбида кремния. Было показано, что наблюдавшиеся экспериментальные зависимости можно объяснить на основе простой модели, учитывающая образование при облучении SiC как мелких, так и глубоких акцепторных уровней в верхней половине запрещенной зоны.

Было показано, что основной вклад в концентрацию свободных носителей (а соответственно, и сопротивление) до определенной дозы облучения, при которой степень компенсации становится порядка 71 %, вносит мелкий донорный уровень 0.1.

После же этой дозы остаточная проводимость начинает определяться ионизацией носителей с относительно мелкого акцепторного центра, из-за чего скачком падает концентрация свободных носителей, и, соответственно, растет сопротивление. При этом величины скорости удаления носителей, измеренные на основе вольт-фарадных и вольтамперных характеристик могут отличаться на несколько порядков.

3 Глава. Различия скорости удаления носителей заряда у кремния и карбида кремния

3 положение: небольшое отличие в скорости удаления носителей в SiC и Si при комнатной температуре связано с тем, что в карбиде кремния в отличии от кремния, еще не произошел отжиг первичных радиационных дефектов.

Исследовались результаты облучения электронами и протонами диодов Шоттки с напряжением пробоя 600 В и 1200 В, а также JBS-структур с напряжением пробоя 1700 В.

Скорости удаления носителей заряда для кремния и карбида кремния представлены в Таблице 3.

Диоды на основе SiC и Si можно сравнивать разными способами, например, как два диода с одинаковым напряжением пробоя, учитывая разную напряженность поля. Также можно сравнивать радиационную стойкость SiC- и Si-диодов с одинаковой толщиной базовой области [7].

Однако из Таблицы 3 видно, что значение V_d для SiC всего в два раза меньше, чем для Si. Поскольку ширина запрещенной зоны E_g у SiC почти в три раза больше, чем у кремния, возникает вопрос, почему разница между значениями V_d для этих двух материалов столь незначительна.

Таблица 3. Скорости удаления носителей заряда в устройствах на основе SiC и Si.

Тип устройства	SiC ДШ 600 В	SiC ДШ 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 [8]	0.073 [8]	0.15 [9]	0.23 [10]
V_d (15 МэВ протоны), см ⁻¹	63 [9]	50 [9]	54 [9]	110 [11]

Параметры обнаруженных дефектов в DLTS спектре JBS структур 1700 В можно увидеть на Рисунке 7 и Таблицах 4, 5, в которых указаны, в том числе, и усредненные температуры, при которых обнаружены максимумы пиков. Следует отметить, что определение параметров некоторых пиков является трудно выполнимой задачей из-за их плохого разрешения.

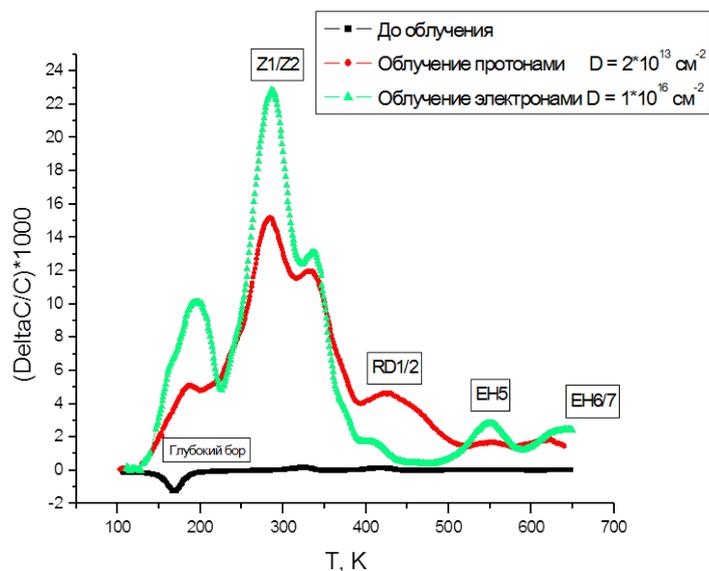


Рисунок 7. DLTS спектры JBS до и после холодного облучения протонами и электронами.

Таблица 4. Параметры обнаруженных глубоких центров в JBS структуре до облучения.

Т, К	169	325	417	530
Et, эВ	0.57	0.689	0.82	1.13
пик	Глубокий бор	Z1/Z2	RD1/2	EH5

Таблица 5. Параметры обнаруженных глубоких центров в JBS структуре после облучения, обобщение.

Т, К	169	282-287	325-338	417	550	617-642
Et, эВ	0.57	~ 0.6	~ 0.7	~ 0.82	~ 1.24	~ 1.58
пик	Глубокий бор	EH2	Z1/Z2	RD1/2	EH5	EH6/EH7

Стандартный отжиг при 250 С 1 час приводит к отжигу двух неразрешенных пиков, и оставил глубокий бор и Z1/Z2 (Рисунок 8).

Другие аналогичные исследования показали, что высокотемпературные пики (ЕН5 и ЕН6/7) практически не изменяются.

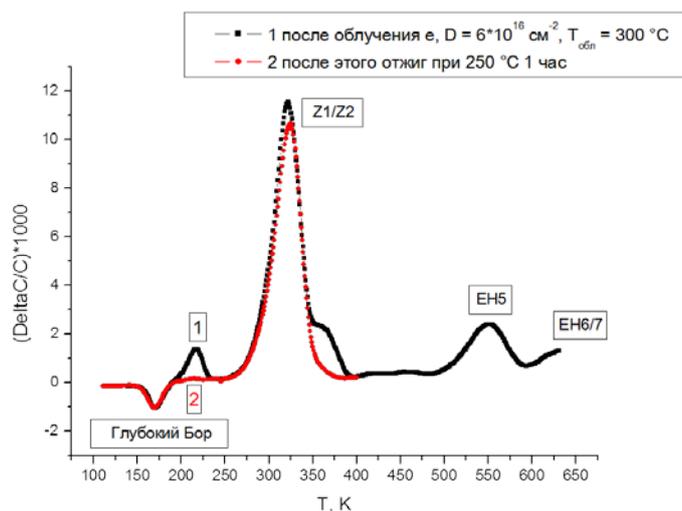


Рисунок 8. DLTS спектры JBS структур до и после отжига (250 С 1 час).

Поскольку карбид кремния является весьма теплостойким материалом, то DLTS спектр возможно снимать до больших температур (~ 650-670 К). Исследование по вторичному снятию DLTS спектра (в среднем, от температуры жидкого азота до 650 К образец постепенно нагревается и параллельно измеряется за 5-6 часов) показало результаты, отличные от первого измерения. Происходит частичный отжиг образованных после облучения дефектов (Рисунок 9). Отжиг завершается уже при температуре порядка 400 К. При температурах измерения $> 450 \text{ К}$ DLTS спектр практически не изменяется.

Третье измерение DLTS на этом же образце повторило 2 спектр, что означает, что уже произошел отжиг менее температурно-стойких радиационных дефектов.

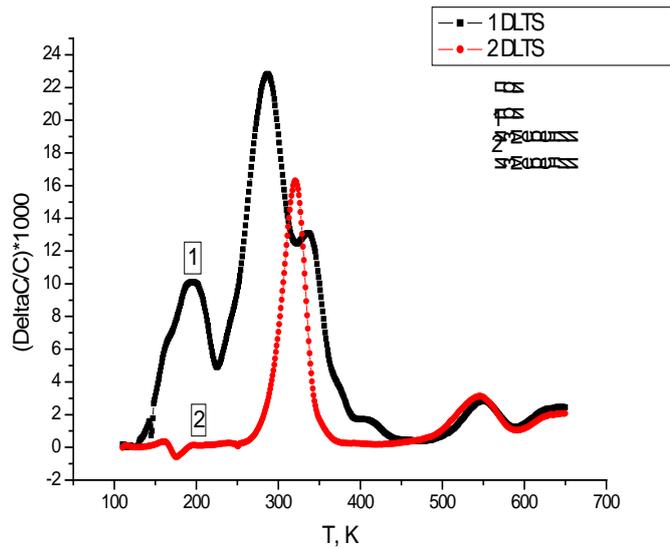


Рисунок 9. DLTS спектр образца, облученного электронами с энергией 0,9 МэВ и дозой $D=1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. 1 – спектр снятый сразу после облучения; 2 – вторично измеренный спектр.

Эксперименты показали, что температуры отжига первичных дефектов, возникающих в 4H-SiC, находятся в температурном диапазоне 200-900 С, а вторичных дефектов на 1000-1200 С [12, 13]. В то же время в кремнии первичные дефекты отжигаются при температуре $\sim 80 \text{ К}$, а вторичные при температурах 150-350 С [14].

Схематично можно представить стадии отжига этих двух материалов на Рисунке 10.

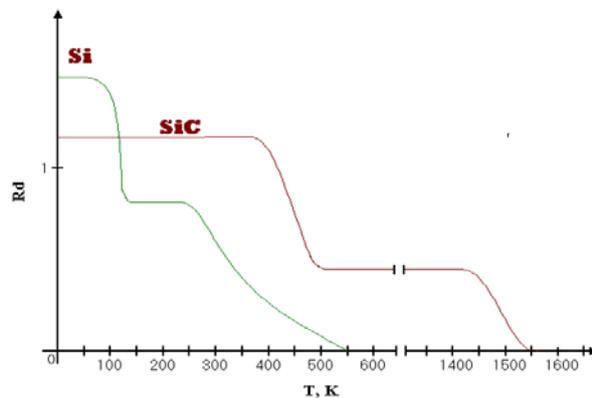


Рисунок 10. Схематическое изображение отжига радиационных дефектов в кремнии и карбиде кремния.

Как видно из Рисунка 10, при комнатной температуре Si и SiC находятся в существенно отличающихся состояниях. В кремнии уже закончился отжиг первичных дефектов, а в карбиде кремния он еще не начался. В итоге измеренная при 300К величина V_d в SiC может оказаться такой же или даже выше, чем в Si.

Выводы по главе:

Были рассмотрены результаты облучения диодов Шоттки и JBS структур на основе карбида кремния, в том числе скорости удаления носителей и параметры получаемых дефектов.

Проведено сравнение с данными кремния.

Выяснилось, что достаточно небольшая разница в скорости удаления носителей в SiC и Si при комнатной температуре связана с тем, что в SiC в отличии от Si, еще не произошел отжиг первичных радиационных дефектов.

Заключение

В результате проведенной работы:

- Определены параметры радиационных дефектов в 4H-SiC, возникающих в результате холодного и горячего облучения после облучения электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ;
- В результате облучения 4H-SiC электронами и протонами наблюдается линейное уменьшение концентрации некомпенсированных носителей заряда ($N_d - N_a$) с увеличением дозы облучения;
- Сравнение результатов горячего и холодного облучений показало, что увеличение температуры облучения приводит к росту радиационной стойкости карбида кремния;
- Выяснено, что уменьшение скорости удаления носителей в SiC при повышенных температурах облучения обусловлено отжигом образующихся РД при температурах 300-450 К;
- Определены скорости удаления носителей в SiC в зависимости от условий облучения, а также рассмотрены особенности ее расчета при больших дозах облучения;
- Величины скорости удаления носителей, измеренные на основе вольт-фарадных и вольтамперных характеристик при больших дозах облучения, могут отличаться на несколько порядков;
- Проведено сравнение радиационной стойкости кремния и карбида кремния. Достаточно небольшая разница в скорости удаления носителей в SiC и Si при комнатной температуре связана с тем, что в SiC в отличие от Si, еще не произошел отжиг первичных радиационных дефектов.

Список использованной литературы

- [1] Физические процессы в облученных полупроводниках под ред. Л. С. Смирнова, Наука, 1972.
- [2] E. Omotoso, W.E. Meyer, F.D. Auret, A.T. Paradzah, M. Diale, S.M.M. Coelho, P.J. Janse van Rensburg “The influence of high energy electron irradiation on the Schottky barrier height and the Richardson constant of Ni/4H-SiC Schottky diodes” *Materials Science in Semiconductor Processing* 39, 112–118 (2015)
- [3] Pavel Hazdra and Jan Vobecký Radiation Defects Created in n-Type 4H-SiC by Electron Irradiation in the Energy Range of 1–10MeV, *Phys. Status Solidi A* 2019, 216, 1900312
- [4] А.М.Стрельчук, В.В.Козловский, А.А.Лебедев, Радиационное повреждение карбид-кремневых диодов заряженными частицами высоких энергий, *ФТП*, т.52, вып.13, стр.1651-1655. (2018)
- [5] Castaldini, A., Cavallini A., Rigutti L., and Nava F. 2004 Low temperature annealing of electron irradiation induced defects in 4H–SiC. *Appl. Phys. Lett.* 85, 3780–3782
- [6] Шалимова К.В. Физика полупроводников, Энергоатомиздат 1985.
- [7] Zolnai, Z.; Son, N.T.; Hallin, C.; Janzen, E. Annealing behavior of the carbon vacancy in electron—Irradiated 4H-SiC. *J. Appl. Phys.* 2004, 96, 2406–2408.
- [8] Lebedev, A.A.; Davydovskaya, K.S.; Strel’chuk, A.M.; Yakimenko, A.N.; Kozlovski, V.V. A study of the effect of electron and proton irradiation on 4H-SiC device structures. *Tech. Phys. Lett.* 2017, 43, 1027–1029.
- [9] Kozlovski, V.V.; Emtsev, V.V.; Emtsev, K.V.; Strokan, N.B.; Ivanov, A.M.; Lomasov, V.N.; Oganessian, G.A.; Lebedev, A.A. Effect of electron irradiation on carrier removal rate in silicon and silicon carbide with 4H modification. *Semiconductors* 2008, 42, 242–247.
- [10] Kozlovski, V.V.; Strokan, N.B.; Ivanov, A.M.; Lebedev, A.A.; Emtsev, V.V.; Oganessian, G.A.; Poloskin, D.S. Charge carrier removal rates in n-type

silicon and silicon carbide subjected to electron and proton irradiation. Phys. B 2009, 404, 4752–4754.

[11] Kalinina, E.V.; Lebedev, A.A.; Bogdanova, E.V.; Lebedev, A.A.; Berenquier, B.; Ottaviani, L.; Violina, G.N.; Skuratov, V.A. Irradiation of 4H-SiC UV detectors with heavy ions. Semiconductors 2015, 4, 540–546.

[12] Лебедев, А А; Козловский, В В. // О сравнении радиационной стойкости кремния и карбида кремния. // 2014 г, Физика и техника полупроводников, том 48, вып. 10.

[13] Lebedev A. A., Kozlovski V. V., Davydovskaya K. S., Levinshtein M. E. // Radiation hardness of silicon carbide upon high-temperature electron and proton irradiation. // 2021, Materials, v.14, 17 ArtNo: #4976.

[14] 3.J.W. Corbett, J.C. Bourgein. In: Point Defects in Solids (N.Y.–London, Plenum Press, 1975) v. 2, p. 1.