

УДК 621.38:539.1

РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАДИАЦИОННОМ ПОВРЕЖДЕНИИ КАРБИД-КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2022 г. В. В. Козловский^{a, *}, А. Э. Васильев^{a, **}, А. А. Лебедев^{b, ***},
А. М. Стрельчук^{b, ****}, М. Е. Левинштейн^{b, *****}

^aСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251 Россия

^bФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, 194021 Россия

*e-mail: kozlovski@physics.spbstu.ru

**e-mail: electronych@mail.ru

***e-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru

****e-mail: Anatoly.strelchuk@mail.ioffe.ru

*****e-mail: melev@nimis.ioffe.ru

Поступила в редакцию 23.10.2021 г.

После доработки 10.12.2021 г.

Принята к публикации 25.12.2021 г.

Впервые проведено сравнительное исследование влияния электронного и протонного облучения при температуре 20–500°C на характеристики полупроводниковых приборов на основе карбида кремния – коммерческих высоковольтных диодов Шоттки 4H-SiC. Диоды облучали протонами с энергией 15 МэВ и электронами с энергией 0.9 МэВ. Установлено, что наиболее чувствительным к облучению параметром, определяющим радиационную стойкость приборов, является омическое сопротивление базы, монотонно возрастающее с дозой облучения D . Показано, что при низкотемпературном (“холодном”) облучении эффективность компенсации полупроводника протонным облучением примерно в 400 раз превосходит эффективность облучения электронами. При “горячем” (высокотемпературном) облучении радиационная стойкость диодов в несколько раз превышает стойкость диодов при “холодном” облучении. С ростом температуры облучения уменьшается скорость образования глубоких центров в верхней половине запрещенной зоны карбида кремния.

Ключевые слова: протоны, электроны, карбид кремния, диод Шоттки, радиационные дефекты, температура облучения, пара Френкеля.

DOI: 10.31857/S1028096022060097

ВВЕДЕНИЕ

Перспективы полупроводниковой электроники в значительной степени связаны с освоением широкозонных материалов [1–4], в частности карбида кремния SiC [1–3]. В последние два десятилетия достигнуты значительные успехи в создании методом газовой эпитаксии высококачественных слоев политипа 4H-SiC [3]. На рубеже веков было достигнуто существенное улучшение характеристик высоковольтных силовых и высокотемпературных приборов на основе 4H-SiC, что позволяет успешно заменять ими аналогичные приборы на базе кремния [1, 2]. Основное преимущество приборов на основе SiC по сравнению с приборами на основе Si заключается, в частности, в более высокой радиационной стойкости и в возможности функционирования при

более высоких температурах. В последнее время проведена большая работа по изучению влияния облучения заряженных частиц различных видов на приборы на основе SiC. В подавляющем большинстве опубликованных работ облучение проводили при комнатной температуре (“холодное” облучение). Влияние облучения электронами при комнатной температуре на свойства высоковольтных диодов Шоттки 4H-SiC исследовали во многих работах (например, [5–12]). Влияние облучения протонами при комнатной температуре изучали в [13–18]. Однако, насколько нам известно, влияние высокотемпературного облучения на свойства приборов на основе SiC до сих пор остается практически неисследованным.

Между тем возможность использования этих приборов при высоких температурах во многом

зависит от их устойчивости к различным видам высокотемпературного облучения. Особенно высокие требования относительно радиационной стойкости предъявляются к приборам и оборудованию, предназначенным для работы при разгрузке отработанного топлива ядерных реакторов и для работы в космических условиях [19]. Два года назад авторами были начаты работы по изучению радиационной стойкости приборов на основе SiC при повышенных температурах. В двух опубликованных ранее работах изучали влияние только горячего протонного облучения [20, 21] и в одной работе – только горячего электронного облучения [22].

В настоящей работе представлены результаты сравнительного исследования радиационной стойкости выпрямительных диодов нескольких типов на основе SiC с напряжениями пробоя 1–2 кВ к двум видам облучения заряженными частицами (электронному и протонному), выполненного при температурах в диапазоне 20–500°C.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследовали коммерческие диоды Шоттки (Schottky Barrier Diode – SBD) трех видов на основе слабо легированных слоев карбида кремния политипа 4H проводимости n -типа, рассчитанных на обратное напряжение 600, 1200 и 1700 В производства компании CREE [23]. Диоды различались уровнем легирования базового слоя: концентрация некомпенсированных доноров $N_d - N_a$ до облучения составляла $\sim(6-7) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в SBD-600, $\sim(4-5) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в SBD-1200 и $\sim 3.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в интегрированных диодах Шоттки JBS-1700 (JBS – Junction Barrier Schottky). Облучение электронами с энергией 0.9 МэВ проводили на ускорителе РТЭ-1В, облучение протонами с энергией 15 МэВ – на циклотроне МГЦ-20 [24]. Как при электронном, так и при протонном облучении дефекты вводили практически равномерно по всему объему не только слабо легированного слоя, но и подложки, толщины которых (~ 10 и ~ 300 мкм соответственно) во всех случаях были значительно меньше длины пробега электронов и протонов (более 1 мм). Для высокотемпературного облучения были созданы специальные мишенные камеры. Эти камеры позволяли проводить облучение электронами на воздухе, а протонами – в вакууме в диапазоне температур от комнатной до 800°C. Точность поддержания температуры образца при облучении $\pm 5^\circ$. Скорость нагрева составляла 0.5 град./с, скорость охлаждения 0.25 град./с.

В ходе исследований измеряли вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики. По вольт-фарадным характеристикам определяли концентрацию некомпенсированных доноров. Для облучения отбирали диоды, характеризую-

щиеся близкой к идеальной характеристикой $I-V$ при прямом смещении, а именно экспоненциальной (до области влияния последовательного сопротивления диода), прямой вольт-амперной характеристикой, описываемой стандартным уравнением $I = I_0 \exp(qU/\beta kT)$ с коэффициентом идеальности $\beta \approx 1.02-1.04$ и $I_0 \sim 10^{-13}-10^{-12}$ А. Здесь q – элементарный заряд, k – постоянная Больцмана. Вольт-амперные ($I-V$) и вольт-фарадные ($C-V$) характеристики измеряли при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Облучение при комнатной температуре

Эксперимент показывает, что облучение во всем исследованном температурном диапазоне весьма слабо влияет на зависимость прямого тока от напряжения на экспоненциальном участке вольт-амперной характеристики. В области больших прямых смещений облучение приводит к существенному возрастанию сопротивления диода. В этом случае большая часть приложенного напряжения падает на базе прибора (квазилинейные вольт-амперные характеристики). На рис. 1 показано влияние электронного и протонного облучения при комнатной температуре на прямые вольт-амперные характеристики трех структур: SBD-600, SBD-1200 и JBS-1700. Главное изменение наблюдается на линейном участке. Резко увеличивается сопротивление диодов. Если в необлученных структурах сопротивление составляет от 0.1 до 0.3 Ом, то после облучения оно возрастает на порядок. Для сравнения эффективностей двух видов облучений методически подбирали эквивалентные дозы, приводящие к одинаковой степени компенсации диодов. Согласно данным, приведенным на рис. 1, одинаковый уровень компенсации может быть получен, если использовать дозы электронного облучения, превосходящие дозы протонного облучения примерно в 300–500 раз. Как правило, скорость удаления носителей заряда из зоны проводимости (η_e) при облучении определяется простым выражением:

$$\eta_e = (n_0 - n)/D, \quad (1)$$

где n_0 и n – концентрации носителей заряда до и после облучения, D – доза облучения. Введение параметра η_e предполагает линейную зависимость функции $n(D)$. Обычно такая зависимость соблюдается вплоть до уменьшения исходной концентрации n_0 на порядок. Экспериментальные результаты показывают, что, например, диоды SBD-1200 при облучении протонами увеличивают свое сопротивление на порядок (до 3.3 Ом) при дозе $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Поскольку значение n_0 для этих диодов составляет $\sim 4.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, по формуле (1) получим скорость удаления порядка

80 см^{-1} . Для тех же диодов доза электронного облучения, приводящая к увеличению сопротивления на порядок, $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Таким образом, скорость удаления, рассчитанная по формуле (1), составит $\sim 0.2 \text{ см}^{-1}$. С учетом линейности функции $n(D)$ отношение эффективности двух видов облучения — около 400. Теперь оценим, насколько линейна функция $n(D)$. При протонном облучении доза, при которой сопротивление диодов SBD-1200 увеличивается всего в два раза, составляет $1.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. В этом случае скорость удаления носителей заряда, рассчитанная по формуле (1), 150 см^{-1} , т.е. почти в два раза больше, чем в случае сильно облученных образцов. Такая нелинейность вводит ограничение на использование параметра η_e и формулы (1). Параметр η_e при облучении полупроводников допустимо вводить только при степени компенсации не выше 50%. Эксперименты, выполненные на двух других структурах SBD-600 и JBS-1700, показали, что при малых дозах протонного облучения значения η_e аналогичны. При малых дозах электронного облучения величины η_e для всех исследуемых структур превышают значения η_e при значительных дозах облучения более чем в два раза и составляют $0.4\text{--}0.5 \text{ см}^{-1}$. Такие значения η_e в два—три раза превосходят значения, полученные во многих работах исходя не из вольт-амперных, а из вольт-фарадных характеристик диодов [5, 7, 11, 13, 18].

Полученные значения приведены в табл. 1. Остановимся на их различии подробнее. При измерении вольт-амперной характеристики определяется именно концентрация носителей заряда (концентрация электронов в зоне проводимости). Емкостные измерения определяют концентрацию некомпенсированных доноров в области пространственного заряда полупроводника. Скорость уменьшения концентрации некомпенсированных доноров η_D , определяется по той же формуле (1), в которую вместо концентраций носителей заряда подставляют концентрации некомпенсированных доноров до (N_0) и после облучения (N). Различие в полученных значениях η_e и η_D свидетельствует в пользу модели радиационного дефектообразования, основанной на сложном спектре вводимых радиационных дефектов. Невозможно, как считали ранее, обойтись одним радиационным дефектом (как правило, в подрешетке углерода), создающим глубокий акцепторный уровень в запрещенной зоне полупроводника. Необходимо допустить образование нескольких глубоких центров, играющих большую роль при сильной компенсации проводимости материала. В перспективе весьма желательно изучить раздельное введение акцепторов и доноров при облучении, например, с помощью различных ме-

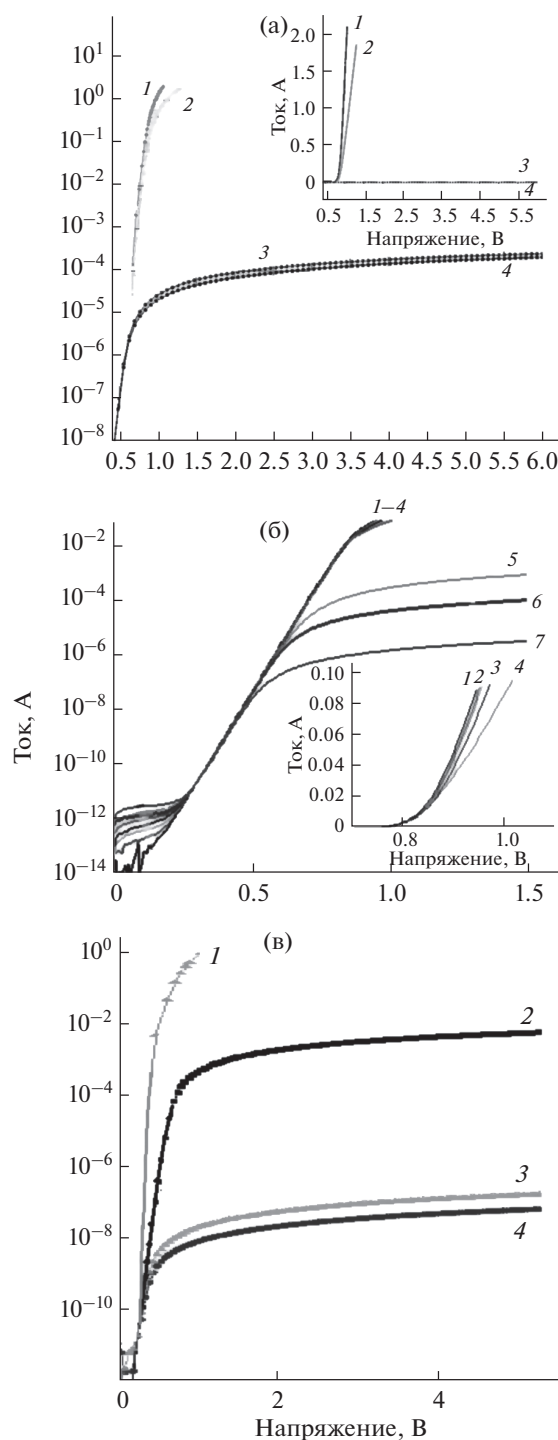


Рис. 1. Прямые вольт-амперные характеристики диодов Шоттки различных типов в области больших напряжений до и после облучения при комнатной температуре: а — диод SBD-600 до (1) и после облучения дозой 5×10^{15} (2), $4 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (4) и протонов $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (3) (на вставке — те же характеристики в линейном масштабе); б — диод SBD-1200 до (1) и после облучения дозой электронов 2×10^{15} (2), 5×10^{15} (3), 1.5×10^{16} (4), 3×10^{16} (5), $7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (7) и протонов $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (6) (на вставке — те же характеристики в линейном масштабе); в — диод JBS-1700 до (1) и после облучения дозой электронов 1×10^{16} (2), 4×10^{16} (4) и протонов $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (3).

Таблица 1. Скорости удаления носителей заряда (η_e) и нескомпенсированных доноров (η_D) в приборах на основе 4H-SiC

Тип прибора	SBD-600	SBD-1200	JBS-1700
$n_0 = (N_d - N_a)_0, 10^{15} \text{ см}^{-3}$	6.5	4.5	3.4
η_D (электроны, 0.9 МэВ), см^{-1}	0.2	0.2	0.15
η_e (электроны, 0.9 МэВ), см^{-1}	0.5	0.4	0.4
η_D (протоны, 15 МэВ) см^{-1}	63	50	54
η_e (протоны, 15 МэВ) см^{-1}	160	150	140

Примечание: n_0 – концентрация носителей заряда (нескомпенсированных доноров $N_d - N_a$) до облучения.

Таблица 2. Критическая доза D_{cr} электронного и протонного облучения при комнатной температуре для диодов Шоттки разных типов на основе 4H-SiC

Тип диода	SBD-600	SBD-1200	JBS-1700
$n_0, 10^{15} \text{ см}^{-3}$	6–7	4–5	3
$D_{cr} (e, 0.9 \text{ МэВ}), 10^{15} \text{ см}^{-2}$	8	6	4
$D_{cr} (p, 15 \text{ МэВ}), 10^{13} \text{ см}^{-2}$	2	1.5	1

Примечание: n_0 – концентрация носителей заряда до облучения.

тодик, использующих зависимость коэффициента Холла от температуры [3, 4]. Для проверки этого предположения измерили вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики на одних и тех же структурах JBS-1700 до и после облучения дозой электронов $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Концентрация нескомпенсированных доноров, полученная из емкостных измерений, уменьшилась в два раза – от 3.4×10^{15} до $1.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, т.е. в соответствии с данными емкостных измерений это случай слабой компенсации. Вольт-амперная характеристика этого же образца представлена на рис. 1в. Ее обработка показывает, что сопротивление диода увеличилось на три порядка (до 640 Ом), что соответствует уменьшению исходной концентрации приблизительно на три порядка, т.е. случаю сильной компенсации.

Представленные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что наиболее чувствительным к облучению параметром выпрямительного диода является его последовательное сопротивление. Таким образом, радиационную стойкость выпрямительных диодов на основе барьера Шоттки можно характеризовать некими критическими дозами D_{cr} . Увеличение сопротивления базы диодов влияет на функционирование устройств, в которых они используются. Предельно допустимой мерой такого отклонения обычно считается рост сопротивления в два раза [1, 5, 12, 19]. В табл. 2 приведены критические дозы D_{cr} электронного и протонного облучения, при которых происходит такое увеличение сопротивления базы. Подчеркнем, что приведенные дан-

ные относятся к облучению при комнатной температуре.

Полученные данные требуют некоторого пересмотра сложившихся представлений о вторичном радиационном дефектообразовании в SiC. Как известно, темп генерации η_{FP} первичных радиационных дефектов – пар Френкеля – в SiC при облучении протонами с энергией 15 МэВ составляет 198 см^{-1} и при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ – 1 см^{-1} [7, 9]. Отношение скорости удаления к темпу генерации дает четкое представление о доли первичных радиационных дефектов в подрешетке углерода, которая избежала рекомбинации и разделилась на отдельные компоненты. Строка 3 табл. 1, полученная традиционным вольт-емкостным методом, подтверждает, что при облучении меньшая часть первичных радиационных дефектов избегает рекомбинации. При электронном облучении эта доля составляет 10–15%, а при протонном облучении – 25–30%. Новые данные, полученные в настоящей работе (табл. 1, строка 5), показывают, что избегает рекомбинации значительно большая часть пар Френкеля. При электронном облучении не рекомбинируют порядка 50% первичных радиационных дефектов, а при протонном облучении – от 70 до 80%.

Высокотемпературное облучение

С ростом температуры облучения резко уменьшается радиационная деградация диодов. На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики

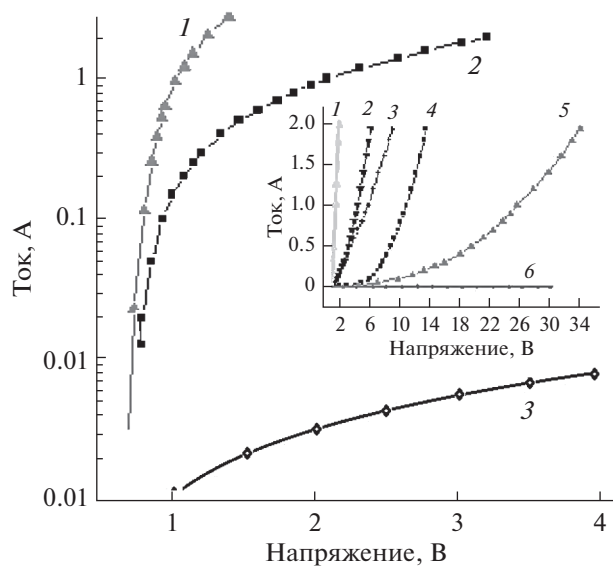


Рис. 2. Прямые вольт-амперные характеристики диодов JBS-1700 до (1) и после (2, 3) облучения дозой электронов $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при различных температурах θ : 2 – 300; 3 – 20°C. На вставке – те же характеристики в линейном масштабе для более широкого диапазона температур θ : 2 – 500; 3 – 300; 4 – 200; 5 – 150; 6 – 20°C. Доза $D = 1.3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

диодов JBS-1700 после облучения электронами при температурах от 20 до 500°C. Из рисунка хорошо видно, что при одинаковой дозе облучения ($1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) диоды, облученные при 300°C, имеют сопротивление 1.22 Ом, что в 500 раз меньше, чем диоды, облученные при комнатной температуре (640 Ом).

Данные о сравнении влияния температуры электронного и протонного облучения на характеристики высоковольтных диодов на основе структур 4H-SiC с барьерами Шоттки представлены на рис. 3. При проведении горячего протонного облучения здесь использовали дозу $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Далее определяли дозу электронного облучения, приводящую к такой же степени компенсации, что и протонное облучение. Эти дозы составили $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ для 300°C и $1.3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ для 500°C. По полученным в работе вольт-амперным характеристикам облученных при 300°C диодов по аналогии с табл. 2 попытались оценить критические дозы D_{cr} , при которых сопротивление диодов увеличивается в два раза. Оказалось, что в случае протонного облучения при температуре 300°C критические дозы возрастают в три–пять раз, а в случае электронного облучения при той же температуре – в шесть–восемь раз. Это позволяет прогнозировать увеличенный ресурс работы приборов на основе SiC для работы в экстремальных условиях (при одновременном воздействии высокой температуры и высоких уровней радиации).

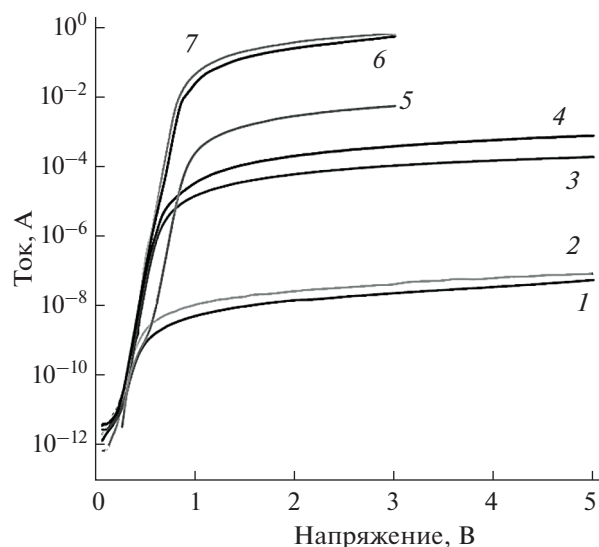


Рис. 3. Прямые вольт-амперные характеристики диодов JBS-1700 в области больших напряжений после облучения электронами (1, 3, 5, 7) и протонами (2, 4, 6) при различных температурах θ : 1, 2 – 20; 3, 4 – 300; 5 – 400; 6, 7 – 500°C. Доза протонного облучения при всех температурах $D = 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Доза электронного облучения D : 1 – 4×10^{16} ; 3 – 6×10^{16} ; 5 – 1×10^{17} ; 7 – $1.3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Рассмотрим возможные механизмы радиационного дефектообразования, позволяющие объяснить полученные в настоящей работе результаты влияния температуры облучения на характеристики диодов. Основной механизм образования радиационных дефектов в *n*-SiC при холодном протонном облучении сводится к следующему. Радиационные дефекты, обуславливающие компенсацию проводимости, связаны с компонентами пары Френкеля (вакансия и междоузельный атом) только в одной из подрешеток SiC, а именно в углеродной. Считали, что при холодном протонном облучении около 25% первичных пар Френкеля избегают рекомбинации и разделяются на отдельные компоненты, входящие в состав известных дефектов Z1/Z2 и EH6/7, создающих в запрещенной зоне *n*-SiC глубокие акцепторные уровни E_c 0.65 и 1.55 эВ соответственно [8, 16, 17]. Захват электронов на эти уровни приводит к росту удельного сопротивления базы. В настоящей работе уточнено, что доля первичных пар Френкеля, избегающих рекомбинации при протонном облучении, составляет не 25, а 75%. При электронном облучении доля диссоциировавших пар Френкеля порядка 50, а не 15%, как считали ранее. Кроме того, необходимо допустить, что при холодном облучении вводятся радиационные дефекты, создающие глубокие доноры в *n*-SiC. Эти доноры особенно сильно сказываются на концентрации нескомпенсированных доноров при больших дозах облучения.

При горячем облучении возможны два сценария, объясняющих эффекты облучения. В первом варианте спектр вторичных радиационных дефектов не изменяется по отношению к холодному облучению. В этом случае с ростом температуры облучения просто уменьшается доля первичных пар Френкеля, которые диссоциируют на отдельные компоненты и создают дефекты $Z1/Z2$ и $EN6/7$, компенсирующие проводимость n -SiC. Сделанные выше оценки показывают, что при температуре облучения 300°C эта доля составляет для протонного облучения порядка 15–25%, т.е. в три–пять раз меньше, чем при облучении при комнатной температуре. В случае электронного облучения при температуре 300°C доля диссоциировавших дефектов может составлять 6–8%. Второй сценарий предполагает, что при высокой температуре облучения полностью изменяется спектр создаваемых вторичных радиационных дефектов. Такой эффект ранее наблюдался при горячем электронном облучении GaAs, InP и Si [25, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований было установлено, что при холодном облучении эффективность компенсации полупроводника протонным облучением примерно в 400 раз превосходит эффективность облучения электронами. Абсолютные значения скоростей удаления носителей заряда в этих условиях составляют 150 и 0.4 см^{-1} соответственно. Скорости удаления некомпенсированных доноров в этих же условиях не превышают 50 и 0.2 см^{-1} . Обнаруженное различие объясняется образованием при облучении не только глубоких акцепторных уровней, но и глубоких донорных уровней. С ростом температуры облучения скорость удаления носителей из зоны проводимости существенно уменьшается: так, при температуре облучения 300°C уменьшение в случае протонного облучения составляет три–пять раз, а в случае электронного облучения — шесть–восемь раз. Уменьшение скорости образования центров компенсации с повышением температуры облучения может быть связано с уменьшением концентрации тех же радиационных дефектов, которые создаются при холодном облучении. Возможно также кардинальное изменение спектра создаваемых вторичных радиационных дефектов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят К.С. Давыдовскую и А.Е. Иванова за помощь в экспериментальной работе.

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Claeys C., Simoen E.* Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices. Berlin: Springer-Verlag, 2002. 401 p.
2. *Ohshima T., Onoda Sh., Iwamoto N. et al.* // Physics and Technology of Silicon Carbide Devices / Ed. Hijikata Y. InTech, 2013. Chapter 16.
3. *Iwamoto N., Svensson B.G.* // Defects in Semiconductors / Ed. Romano L. et al. Ser. Semiconductors and Semimetals. Vol. 91. Elsevier, 2015. P. 369.
4. *Emtsev V.V., Davydov V.Yu., Goncharuk I.N. et al.* // Mater. Sci. Forum. 1997. V. 258–263. P. 1143.
5. *Castaldini A., Cavallini A., Rigutti L., Nava F.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 3780.
6. *Hazdra P., Vobecký J.* // Phys. Stat. Sol. A. 2019. V. 216. P. 1900312. <https://doi.org/10.1002/pssa.201900312>
7. *Козловский В.В., Васильев А.Э., Емцев В.В., Оганесян Г.А., Лебедев А.А.* // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2019. № 12. С. 20. <https://doi.org/10.1134/S1028096019120173>
8. *Kaneko H., Kimoto T.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 262106. <https://doi.org/10.1063/1.3604795>
9. *Alfieri G., Monakhov E.V., Svensson B.G., Hallén A.* // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. P. 113524.
10. *Lebedev A.A., Ber B.Ya., Seredova N.V., Kazantsev D.Yu., Kozlovski V.V.* // J. Phys. D. 2015. V. 48. P. 485106. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485106>
11. *Omotoso E., Meyer W.E., Auret F.D. et al.* // Mater. Sci. Semicond. Process. 2015. V. 39. P. 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.04.031>
12. *Vobecký J., Hazdra P., Popelka S., Sharma R.K.* // IEEE Trans. Electron Dev. 2015. V. 62. P. 1964. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2421503>
13. *Hazdra P., Popelka S.* // IET Power Electron. 2019. V. 12. № 15. P. 3910. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0049>
14. *Kozlovski V.V., Vasil'ev A.E., Lebedev A.A.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2021. V. 15. № 2. P. 341. <https://doi.org/10.1134/S1027451021020257>
15. *Karsthof R., Bathen M.E., Galeckas A., Vines L.* // Phys. Rev. B. 2020. V. 102. P. 18411. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.18411>
16. *Castaldini A., Cavallini A., Rigutti L.* // Semicond. Sci. Technol. 2006. V. 21. № 6. P. 724. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/6/002>
17. *Kozlovski V., Lebedev A., Levinshtein M., Rumyantsev S., Palmour J.* // J. Appl. Phys. 2018. V. 123. P. 024502. <https://doi.org/10.1063/1.5018043>
18. *Vobecky J., Hazdra P., Záhava V., Mihaila A., Berthou M.* // Solid-State Electron. 2014. V. 94. № 1. P. 32. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2014.02.004>
19. *Duzellier S.* // Aerospace Sci. Technol. 2005. V. 9. № 1. P. 93. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2004.08.006>
20. *Kozlovski V., Korol'kov O., Davidovskaya K.S., Lebedev A.A., Levinshtein M., Slepchuk N., Strel'chuk A., Toompuu J.* // Tech. Phys. Lett. 2020. V. 46. P. 287. <https://doi.org/10.1134/s1063785020030244>

21. *Lebedev A.A., Kozlovski V.V., Levinshtein M.E., Ivanov A.E., Davydovskaya K.S.* // *Solid-State Electron.* 2021. V. 181–182. P. 108009.
<https://doi.org/10.1016/j.sse.2021.108009>
22. *Lebedev A.A., Kozlovski V.V., Levinshtein M.E., Ivanov A.E., Davydovskaya K.S., Yuferev V.S., Zubov A.V.* // *Rad. Phys. Chem.* 2021. V. 185. P. 109514.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109514>
23. <http://cree.com/>
24. *Zakharenkov L.F., Kozlovski V.V., Shustrov B.A.* // *Phys. Stat. Sol. A.* 1990. V. 117. № 1. P. 85.
<https://doi.org/10.1002/pssa.2211170107>
25. *Kozlovski V.V., Kolchenko T.I., Lomako V.M., Zakharenkov L.F.* // *Rad. Eff. Defects Solids.* 1996. V. 138. P. 63.
26. *Lindstrom J.L., Murin L.I., Hallberg T. et al.* // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 2002. V. 186. Iss. 1–4. P. 121.

Role of Temperature in Radiation Damage of Silicon Carbide Diodes by High-Energy Charged Particles

V. V. Kozlovski^{1,*}, A. E. Vasil'ev^{1,**}, A. A. Lebedev^{2,***},
A. M. Strel'chuk^{2,****}, M. E. Levinshtein^{2,*****}

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251 Russia*

²*Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021 Russia*

**e-mail: kozlovski@physics.spbstu.ru*

***e-mail: electronych@mail.ru*

****e-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru*

*****e-mail: Anatoly.strelchuk@mail.ioffe.ru*

******e-mail: melev@nimis.ioffe.ru*

For the first time, a comparative study of the effect of electron and proton irradiation at a temperature of 20–500°C on the characteristics of semiconductor devices based on silicon carbide – commercial high-voltage 4H-SiC Schottky diodes – was carried out. The diodes were irradiated with 15 MeV protons and 0.9 MeV electrons. It was found that the most sensitive parameter, which determined the radiation resistance of devices, was the base resistance, which monotonically increased with the radiation dose D . It was shown that under low-temperature (“cold”) irradiation, the efficiency of compensation of a semiconductor by proton irradiation was about 400 times higher than the efficiency of electron irradiation. Under “hot” (high-temperature) irradiation, the radiation resistance of diodes was several times higher than the resistance of diodes under “cold” irradiation. The rate of formation of deep centers in the upper half of the band gap of silicon carbide decreased with increasing irradiation temperature.

Keywords: protons, electrons, silicon carbide, Schottky diodes, radiation defects, irradiation temperature, Frenkel pairs.