

Облучение тяжелыми ионами 4H-SiC детекторов ультрафиолетового излучения

© Е.В. Калинина^{*†}, А.А. Лебедев^{*}, Е. Богданова^{*}, В. Berenquier⁺, L. Ottaviani⁺, Г.Н. Виолина[‡], В.А. Скуратов[•]

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

⁺ IM2NP, CNRS UMR 7334, Aix Marseille Universite, OPTO-PV, France

[‡] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Санкт-Петербург, Россия

[•] Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

(Получена 23 сентября 2014 г. Принята к печати 30 сентября 2014 г.)

Ультрафиолетовые фотодетекторы на основе барьеров Шоттки к 4H-SiC формировались на слаболегированных эпитаксиальных слоях, выращенных методом газотранспортной эпитаксии на промышленных подложках. Диодные структуры облучались при температуре 25°С тяжелыми ионами Хе массой 131 а.е.м. с энергией 167 МэВ флюенсом $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Проводились сравнительные оптические и электрические исследования исходных и облученных структур в температурном интервале 23–180°С. Особенности изменений фоточувствительности и электрических характеристик детекторных структур объясняются захватом фотоносителей в ловушки, обусловленные флуктуациями дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, с последующей термодиссоциацией.

1. Введение

В настоящее время полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи для ультрафиолетовой (УФ) области спектра широко используются в экологии, биотехнологии, медицине, материаловедении, обеспечении безопасности жизнедеятельности, в сельском хозяйстве. Однако современное развитие атомной промышленности, ядерной энергетики, астрономии, аэрокосмической и военной техники остро нуждается в разработках электроники нового поколения, способной функционировать в экстремальных условиях — при повышенных уровнях радиации, высоких температурах и в химически активных средах.

Одним из направлений этой проблемы является создание высокотемпературных, радиационно-стойких детекторов, чувствительных к УФ излучению в диапазоне длин волн $\lambda = 200\text{--}400 \text{ нм}$ [1–5]. Такие УФ фотоприемники необходимы для нужд:

- помехоустойчивой УФ локации — пламя ракет;
- авиации — информационные системы;
- астрономии — исследование горячих объектов и объектов, излучающих в УФ диапазоне на планетах и в межпланетном пространстве;
- астрофизики и солнечной физики в частности;
- астронавигации — коммуникации между спутниками в коротковолновой области ($\lambda < 280 \text{ нм}$);
- дистанционного зондирования Земли и околоземного пространства, мониторинга геофизической обстановки;
- индивидуального вооружения.

Особенностью работы УФ детекторов является необходимость регистрировать слабые сигналы на фоне мощного видимого и инфракрасного излучения. Проблема усугубляется тем, что УФ излучение, которое составляет не более 9% от солнечного излучения, блокируется озоновым слоем и его эффективное наблюдение становится возможным только из верхних слоев атмосферы или из космоса с его повышенной радиационной активностью и резкими перепадами температур.

Приборы с указанной совокупностью свойств не выпускаются в мире и не могут быть реализованы с использованием традиционных полупроводниковых материалов (Ge, Si, CdTe, GaAs) [6]. Самыми распространенными коммерческими УФ приемниками являются Si-детекторы, что связано с дешевизной и промышленным выпуском материала. Они фоточувствительны в спектральной области 0.2–1.1 мкм, причем максимум спектра находится в инфракрасной (ИК) области спектра (0.8–1.0 мкм). Высокая чувствительность Si-фотоприемников к видимому и особенно ИК излучению требует использования УФ светофильтров, которые хотя и отсекают видимую область, имеют высокое пропускание в ИК области. Существенно меньшую чувствительность к ИК излучению имеют фотопреобразователи на основе GaAs и GaP в спектральной области 0.2–0.55 мкм. Для устранения чувствительности к видимому свету фотодиоды на основе GaAs и GaP комплектуются УФ светофильтрами. Применение светофильтров резко снижает эффективность приборов.

Для УФ области спектра перспективны фотоприемники на основе широкозонных полупроводников — нитридов элементов III группы, ширина их запрещен-

[†] E-mail: evk@mail.ioffe.ru

ной зоны может варьироваться от 3.47 до 6.14 эВ в зависимости от состава твердых растворов GaN–AlN. Фотодиоды на основе GaN имеют спектральную область чувствительности 0.24–0.37 мкм. Нитриды используются для изготовления солнечно-слепых УФ фотоприемников, не чувствительных к видимому и ИК излучению, что исключает необходимость применения УФ светофильтров. Однако снижение квантовой эффективности и увеличение темновых токов у нитридных фотодиодов по сравнению с Si-детекторами объясняется их более низким кристаллическим качеством. Все фотопреобразователи, выполненные на вышеуказанных полупроводниках, ввиду низких значений теплопроводности требуют применения принудительного охлаждения.

Алмазные детекторы, несмотря на теоретически отличные свойства, не нашли широкого применения из-за низкого качества объемного материала и отсутствия чистых эпитаксиальных слоев.

Температурный предел работы УФ детекторов, выполненных на традиционных полупроводниках и представленных на мировом рынке, не превышает 150°C [7]. По имеющимся в литературе данным, в УФ области спектра такие фотоприемники не обладают необходимой временной стабильностью и подвержены деградации при воздействии интенсивного УФ излучения. Так, детекторы на основе Si деградировали после 200 ч облучения ртутной лампой (254 нм) с плотностью мощности 200 Вт · м⁻², а приборы на основе GaP деградировали после 1000 ч облучения ртутной лампой с плотностью мощности 15 Вт · м⁻² [8].

Таким образом, электрофизические свойства, температурные и радиационные пределы традиционных полупроводников исключают их применение для работы в экстремальных условиях при высоких температурах и повышенных уровнях радиации.

Одним из перспективных полупроводников для создания подобных приборов является SiC. Большая ширина запрещенной зоны SiC (2.4–3.3 эВ в зависимости от политипа) обеспечивает работоспособность приборов до 1000°C и выше. Высокая теплопроводность (3–5 Вт · см⁻¹ · град⁻¹), в 2 раза выше по сравнению с теплопроводностью Si, исключает необходимость принудительного охлаждения SiC-приборов. Полупроводник имеет высокие значения напряженности поля лавинного пробоя (3–6 МВ · см⁻¹), высокую химическую и механическую прочность. SiC-фотодетекторы нечувствительны к видимому и ИК излучению, в диапазоне 200–400 нм они „солнечно-слепые“, что исключает необходимость использования УФ светофильтров. Низкие значения генерационных токов (~ 10⁻²⁵ А · см⁻² при 300 К), определяющих уровни шума, на несколько порядков меньше, чем в указанных выше традиционных полупроводниках. Это позволяет снизить порог фоточувствительности и регистрировать очень слабые сигналы с высокими значениями удельной обнаружительной способности, до 3.6 · 10¹⁵ Вт⁻¹ · Гц^{1/2} · см [3,9]. Изменяя электрофизические свойства исходного материала

и технологию создания УФ фотоприемников на основе SiC, возможно формировать селективные детекторы, работающие в области < 200 нм, что необходимо для регистрации в атмосфере молекулярного кислорода, водорода, монооксида углерода, метана, аммиака [6,10,11]. Кроме того, селективные SiC-детекторы в спектральной области 200–400 нм можно использовать для дозовой характеристики УФ излучения, влияющего на здоровье человека [12]. Низкие значения темновых токов в SiC позволяют наблюдать стабильную работу детекторов в УФ диапазоне при температурах 350–600°C [3,4,13–15].

Высокая пороговая энергия дефектообразования в SiC, равная $E_d = 25–35$ эВ (для традиционных полупроводников $E_d \leq 20$ эВ), является предпосылкой высокой радиационной стойкости SiC-приборов [16,17]. Так, поглощенная доза рентгеновского излучения 50 000 крэд не приводила к изменению характеристик приборов [5]. При облучении ртутной лампой (254 нм) потоком 1000 Вт · м⁻² не наблюдалось деградации характеристик SiC-детекторов в течение 5000 ч [7], а при облучении ртутной лампой с низким давлением потоком 1 мВт · см⁻² не наблюдалось деградации характеристик SiC-детекторов в течение 16 000 ч [18].

После γ -облучения SiC-детекторов дозой 40 Мрад эффективность собирания неравновесного заряда оставалась близкой к 100% [19]. При облучении нейтронами с энергией 2 МэВ флюенсом 10¹⁶ см⁻² токи утечки практически не менялись и оставались меньше 100 пА/см² при 100 В обратного напряжения с сохранением детектирующих свойств [11,20]. Детектирующие свойства сохранялись в приборах также после облучения протонами с энергией 24 ГэВ флюенсами 1.4 · 10¹⁶ см⁻² и электронами с энергией 8.6 МэВ дозами 10¹⁵ см⁻² [19,21].

Самостоятельный интерес представляют исследования радиационной стойкости SiC-приборов и, в частности, УФ детекторов при облучении высокоэнергетичными тяжелыми ионами в условиях высокого уровня ионизационных потерь и высокого темпа генерации радиационных дефектов. Облучение атомами с массой > 80 а.е.м. и энергиями > 100 МэВ моделирует структурные нарушения в полупроводниках, которые создаются осколками деления ядер. Именно разрушительное локальное воздействие на электронную аппаратуру высокоэнергетичных (МэВ) тяжелых заряженных частиц космического пространства названо Межведомственной комиссией и Роскосмосом одной из вероятных причин аварии на космической станции „Фобос-Грунт“.

Первые работы по облучению политипов 6H- и 4H-SiC *n*- и *p*-типа проводимости высокоэнергетичными тяжелыми ионами проводились в основном с целью исследования механизмов радиационного дефектообразования в материале. Кристаллы 6H-SiC облучались ионами Хе флюенсами 10¹⁰–10¹⁵ см⁻² с энергиями 124 МэВ, 5.5 ГэВ и 1.5 МэВ соответственно в работах [22–24]. Также с целью исследования процессов радиационного дефектообразования исходный материал и диодные структуры на основе политипов 6H- и 4H-SiC

облучались ионами Кг, Вi и Хе в широком интервале флюенсов, $4 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, с энергиями 245, 710 и 167 МэВ соответственно в работах [25–28].

Основным выводом из полученных результатов явилось подтверждение высокой радиационной стойкости SiC к осколкам деления ядер и тяжелоионной компоненте космической радиации. Облучение указанными тяжелыми ионами не приводило к образованию латентных треков, и формирование дефектной структуры проходило по каналу упругого рассеяния [26].

Цель данной работы — исследование спектральных характеристик УФ SiC-фотоприемников на основе Cr-барьеров Шоттки в температурном интервале 23–180°C до и после облучения высокоэнергетичными ионами Хе.

2. Методика эксперимента

В работе исследовались структуры на основе *n*-4H-SiC с эпитаксиальными слоями, выращенными методом газотранспортной эпитаксии (CVD), толщиной 9 мкм с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = (3-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ на коммерческих подложках *n*⁺-4H-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Барьеры Шоттки диаметром 1.2 мм формировались на CVD-слоях термовакуумным напылением Cr толщиной 80 нм. Хром обладает хорошими адгезионными характеристиками по отношению к 4H-SiC и выдерживает без деградации нагрев до 300°C [2]. Кроме того, Cr имеет работу выхода электронов ($\Phi_m = 4.6 \text{ эВ}$), превышающую средство к электрону 4H-SiC ($\chi_s = 4.05 \text{ эВ}$) [6]. Это должно обеспечить высоту барьера > 0.5 эВ в системе Cr — *n*-4H-SiC. Следует отметить, что диаметр контактов барьеров Шоттки и их толщина были не оптимальными для получения максимальной квантовой эффективности. Базовые контакты формировались также термовакуумным осаждением Cr/Al. Диодные структуры облучались при температуре 25°C тяжелыми ионами Хе массой 131 а.е.м. с энергией 167 МэВ, флюенсом $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$.

В работе проводились сравнительные оптические и электрические исследования в температурном интервале 23–180°C исходных и облученных структур с барьерами Шоттки.

Спектральные характеристики SiC-детекторов регистрировались при освещении ксеноновой лампой в диапазоне 200–400 нм с помощью монохроматора с разрешением 2 нм. Свет модулировался прерывателем, использовался усилитель синхронного детектирования для регистрации низких уровней света. Мощность освещения изменялась от 80 нВт · см⁻² при 200 нм до 10 мкВт · см⁻² при 400 нм. Для калибровки использовался диод Hamamatsu S1227. Фототок измерялся в режиме короткого замыкания, и из значений фототока определялась внешняя квантовая эффективность (η , в электронах на фотон).

Для проведения на воздухе температурных (до 180°C) измерений спектральных характеристик образцы закреплялись высокотемпературной проводящей пастой на медном держателе и затем помещались на нагреваемый предметный столик.

Профили распределения электрически активных примесей в CVD-слоях вблизи барьеров Шоттки определялись по вольт-фарадным характеристикам (ВФХ), измеренным на частотах 1 и 10 кГц. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) барьеров Шоттки проводились на постоянном токе.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Оптические исследования

При облучении структур ионами Хе с энергией 167 МэВ распределение первичных радиационных дефектов неоднородно по толщине образцов. Профили ионизационных потерь энергии E , $(dE/dx)_{\text{ion}}$, и числа первичных радиационных дефектов (в единицах dpa — displacement per atom) вдоль пробега ионов Хе, полученные с помощью программы SRIM2008, представлены на рис. 1, *a* и *b* соответственно. Согласно расчетам, пробег ионов Хе с энергией 167 МэВ составляет 13 мкм. Поскольку толщина CVD-слоя равнялась 9 мкм, максимум первичных радиационных дефектов располагался в подложке.

На рис. 2 показаны зависимости квантовой эффективности η от длины волны детектируемых фотонов для исходного фотоприемника с барьером Шоттки (кривая 1) и после облучения ионами Хе флюенсом $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ с энергией 167 МэВ (кривая 2), измеренные при тем-

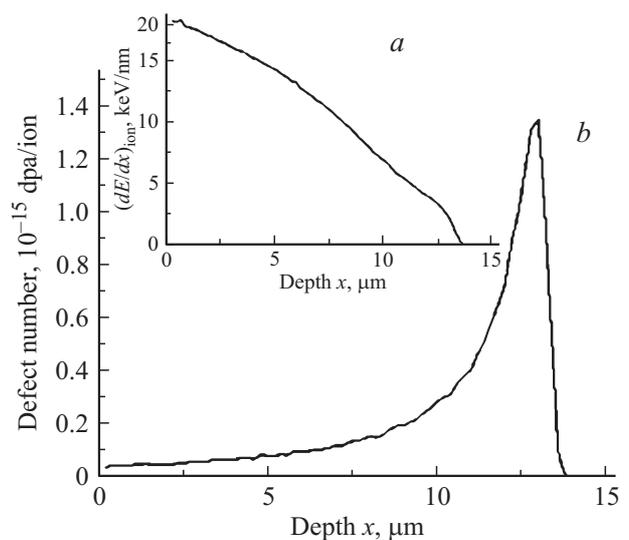


Рис. 1. Расчитанные по программе SRIM2008 профили распределения ионизационных потерь (*a*) и числа первичных радиационных дефектов (*b*) в 4H-SiC, облученном ионами Хе с энергией 167 МэВ.

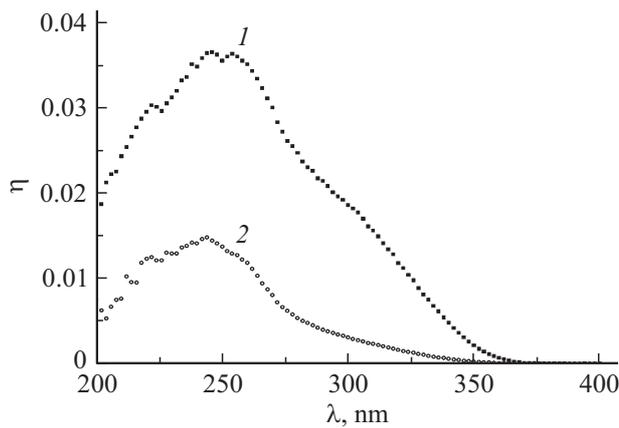


Рис. 2. Спектральные зависимости квантовой эффективности фотоэлектропреобразования 4H-SiC-фотоприемников с барьерами Шоттки: 1 — исходный образец; 2 — образец после облучения ионами Хе с энергией 167 МэВ, флюенсом $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Температура измерений 25°C.

пературе $T = 25^\circ\text{C}$. Как видно, характер спектральных зависимостей в результате облучения не изменился. При длинах волн $\lambda > 390 \text{ нм}$ (энергии фотона $h\nu = 3.2 \text{ эВ}$) фототок практически отсутствует, что соответствует ширине запрещенной зоны в политипе 4H-SiC. При длинах волн $< 380 \text{ нм}$ ($h\nu > 3.2 \text{ эВ}$) квантовая эффективность растет слабо с уменьшением длины волны благодаря непрямым оптическим переходам между валентной зоной и зоной проводимости вблизи *M*-точки зоны Бриллюэна. При длинах волн $< 320 \text{ нм}$ ($h\nu > 4.2 \text{ эВ}$) квантовая эффективность быстро возрастает и достигает максимума при 248–254 нм ($h\nu = 4.9 \text{ эВ}$) благодаря прямым оптическим переходам между валентной зоной и зоной проводимости вблизи Γ -точки зоны Бриллюэна [30].

После облучения детекторных структур ионами Хе их квантовая эффективность уменьшалась в 2–2.5 раза по сравнению с исходными образцами во всем исследуемом спектральном диапазоне. Результат очевиден, поскольку облучение приводило к введению в детекторную структуру широкого спектра радиационных дефектов [28]. Кроме того, в качестве одной из причин уменьшения квантовой эффективности после облучения можно отметить изменение режима измерения фототока. Для исходных образцов фототок снимался в режиме короткого замыкания, тогда как после облучения ионами Хе режим измерения фототока становился нагрузочным (вентильным) [29]. Основанием для такого заключения служит то, что до облучения последовательное сопротивление структур было 35 Ом, а после облучения оно возросло до 22 кОм. Однако при этом следует отметить, что облучение 4H-SiC-детекторов с барьерами Шоттки тяжелыми ионами Хе флюенсом $4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ с энергией 167 МэВ не приводит к заметной деградации прибора и сохраняется возможность регистрировать УФ излучение в спектральном диапазоне 200–400 нм.

Влияние температуры (75–400 К) на спектральные характеристики 4H-SiC-детекторов с барьерами Шоттки подробно обсуждалось нами в работах [30,31]. Характер изменения УФ спектров исходных 4H-SiC-фотодетекторов с барьерами Шоттки, исследованных в настоящей работе, в температурном интервале 23–180°C представлен на рис. 3, *a, b*. Как и в работах [30,31], поведение длинноволнового края фоточувствительности ($\lambda \geq 250 \text{ нм}$) с изменением температуры можно объяснить непрямыми и прямыми оптическими переходами и изменением ширины запрещенной зоны. Заметим, что поведение длинноволнового участка спектра практически идентично как при возрастании (рис. 3, *a*), так и при понижении температуры (рис. 3, *b*).

В коротковолновой области ($\lambda \leq 250 \text{ нм}$) не наблюдается монотонности изменения спектральной чувствительности с увеличением энергии фотонов. Кроме того, в деталях спектры коротковолновой чувствительности

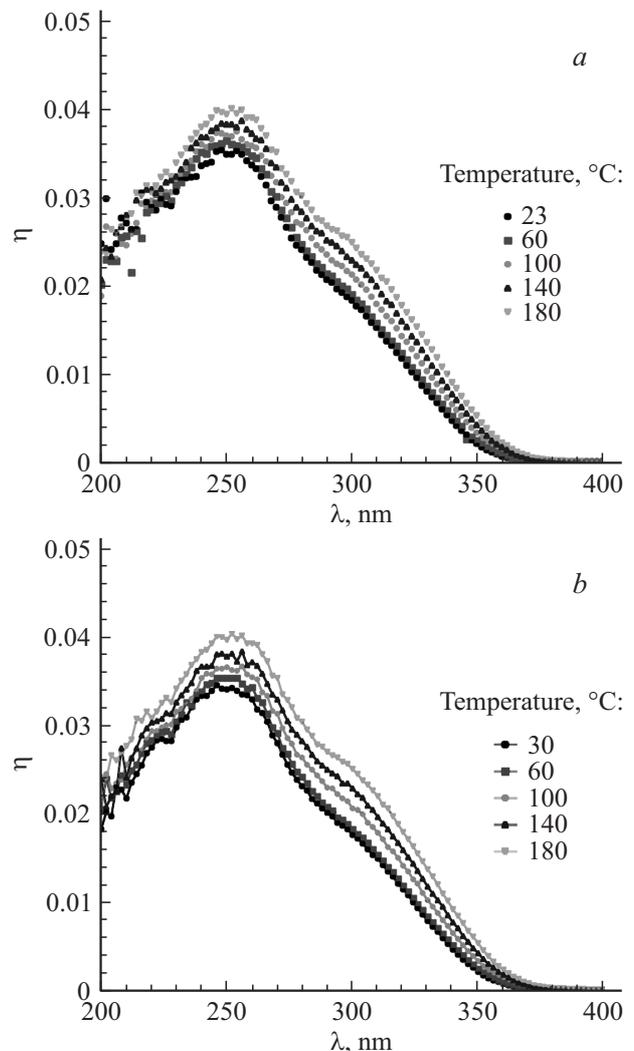


Рис. 3. Зависимости квантовой эффективности УФ фотоприемника на основе 4H-SiC с барьером Шоттки от температуры в интервале 25–180°C: *a* — увеличение температуры, *b* — охлаждение прибора.

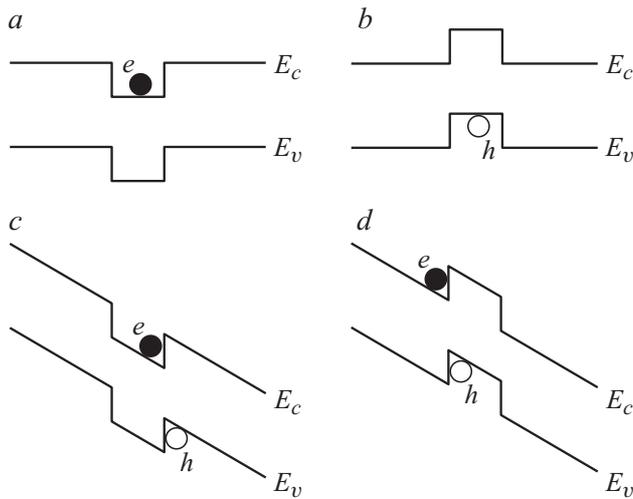


Рис. 4. Флуктуации дна зоны проводимости (E_c) и потолка валентной зоны (E_v) в отсутствие электрического поля (a, b) и в электрическом поле (c, d).

не совпадают при увеличении температуры (рис. 3, a) и при ее снижении (рис. 3, b). В работах [30,31] коротковолновая часть фоточувствительности аналогичных детекторных структур и влияние на нее температуры объясняются в рамках флуктуационной ловушечной модели. Несовершенная приповерхностная область полупроводника характеризуется как наличием локальных поверхностных ловушек, так и образованием флуктуационного профиля дна зоны проводимости и потолка валентной зоны. Возбужденные в приповерхностной области фотоносители локализируются либо на глубоких ловушках (рис. 4, a, b), либо в локальных ямах профилированных дна или потолка запрещенной зоны (рис. 4, c, d). С ростом температуры концентрация свободных термализованных фотоносителей растет за счет термодиссоциации электронно-дырочных пар, захваченных ловушками. В результате с повышением температуры квантовая эффективность фотоэлектропреобразования растет (рис. 3, a). Следует отметить, что влияние температуры на различные области локализации фотоносителей различно, что проявляется в различном изменении с температурой максимумов фоточувствительности при различной энергии фотонов в коротковолновой области.

Влияние температуры нагрева детекторных структур, облученных высокоэнергетичными ионами Хе, на их спектральные характеристики представлено на рис. 5, a, b . Наблюдается возрастание квантовой эффективности при подъеме температуры во всем диапазоне исследуемого спектра. Одной из причин такого поведения квантовой эффективности может быть отжиг некоторых низкотемпературных радиационных дефектов, который наиболее эффективен при температурах выше 1400°C .

При этом при нагреве облученных образцов влияние радиационных дефектов на спектральные характеристики

ки фотопреобразователя различны в различных областях спектров. Поведение длинноволнового участка спектра, аналогичного наблюдаемому в исходном образце как при возрастании (рис. 3, a), так и при понижении температуры (рис. 3, b), может быть объяснено уменьшением времени жизни основных носителей заряда за счет возрастания количества центров рекомбинации, введенных при облучении.

Более существенно проявляется влияние температуры на коротковолновую чувствительность $4H$ -SiC фотодетекторных структур после облучения их высокоэнергетичными ионами Хе. При облучении изначально несовершенная приповерхностная область полупроводника подвергается дополнительному разрушению, что обуславливает образование вблизи поверхности повы-

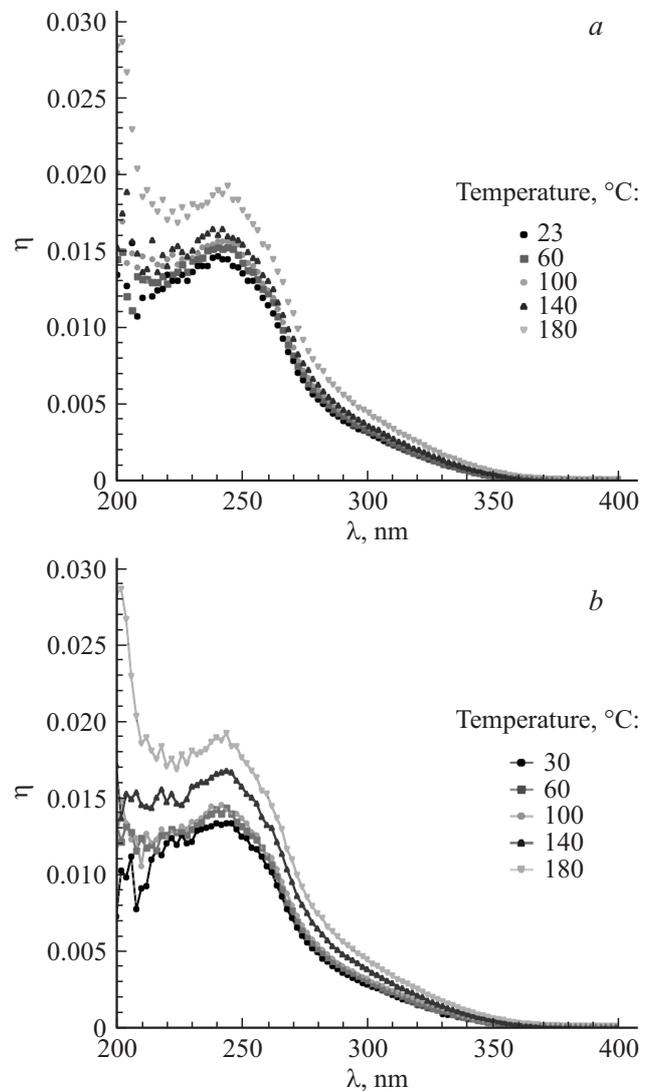


Рис. 5. Зависимости квантовой эффективности УФ фотоприемника на основе $4H$ -SiC с барьером Шоттки, облученного ионами Хе с энергией 167 МэВ, флюенсом $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ от температуры в интервале $25\text{--}180^\circ\text{C}$: a — увеличение температуры, b — охлаждение прибора.

шенной концентрации радиационных дефектов различной природы. Ранее при исследовании радиационных дефектов в 6H-SiC, облученном быстрыми нейтронами, методом фотопроводимости было установлено, что температура отжига радиационных дефектов различной природы колеблется в широком интервале температур (20–1350°C) [32]. Введением радиационных дефектов различной природы, часть из которых отжигалась при температурах до 500°C, объясняются изменения в спектрах катодоллюминесценции после облучения 4H-SiC-диодов ионами Хе с энергией 167 МэВ в широком интервале флюенсов [28]. Вероятно, введением радиационных дефектов различной ассоциативной природы при облучении исследуемых УФ фотоприемников ионами Хе, которые отжигаются при различных температурах и объясняются наблюдаемые особенности температурного поведения спектров фоточувствительности в коротковолновой области при возрастании температуры и последующем ее снижении (рис. 5, а, б).

3.2. Электрические измерения

Согласно измерениям ВФХ, для исходных детекторных структур с барьерами Шоттки не наблюдалось зависимости емкости объемного заряда от температуры в интервале 20–180°C, и выбора частоты 1 или 10 кГц (рис. 6, кривая 1). Облучение образцов ионами Хе в указанных режимах приводило к уменьшению концентрации нескомпенсированных доноров в области пространственного заряда на порядок по сравнению с исходным образцом, она становилась равной $N_d - N_a = (3-6) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (рис. 6, кривая 2). При этом наблюдалась частотная зависимость ВФХ в облученных образцах. Концентрация нескомпенсированных доноров была выше более чем в 2 раза в случае измерения ВФХ при частоте 1 кГц по сравнению с измерениями при частоте 10 кГц. Это указывает на введение при облучении в область объемного заряда некоторых радиационных дефектных центров компенсирующего типа. Именно введением таких радиационных дефектов мы объясняли в предыдущем разделе особенности спектров фоточувствительности облученных УФ детекторов на основе 4H-SiC в коротковолновой области спектра.

Нагрев образцов при измерениях до 180°C приводил к отжигу некоторых низкотемпературных радиационных дефектов, и величина $N_d - N_a$ возрастала (рис. 6, кривая 3). Остывание образцов до 23°C сопровождалось уменьшением концентрации нескомпенсированных доноров (рис. 6, кривая 4). Полученные результаты укладываются в рамки термоактивационной модели флуктуации профиля дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, обсуждавшейся нами ранее (рис. 4).

Введение радиационных дефектов компенсирующего типа при облучении ионами Хе детекторных 4H-SiC-структур приводило к увеличению их сопротивления от 35 Ом для исходных до 22 кОм для облученных образцов. Отжиг при 180°C некоторых низкотемператур-

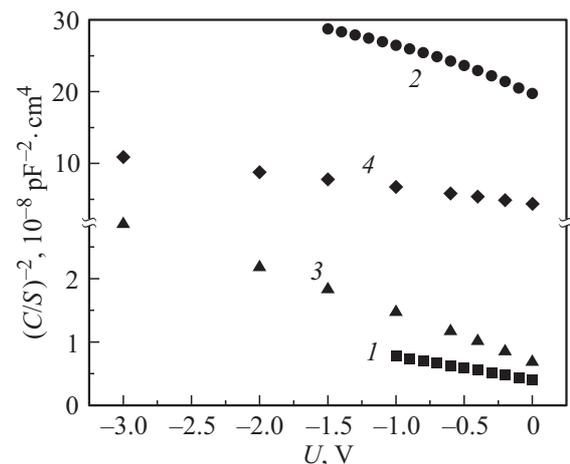


Рис. 6. Вольт-фарадные характеристики $C(U)$ УФ фотоприемника на основе 4H-SiC с барьером Шоттки при частоте 10 кГц: 1 — исходный образец; 2 — после облучения ионами Хе; 3 — после облучения ионами Хе и нагрева до 180°C; 4 — после облучения ионами Хе, нагрева до 180°C и последующего охлаждения до 23°C. Флюенс облучения $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. S — площадь образца.

ных радиационных дефектов компенсирующего типа сопровождался уменьшением сопротивления облученных структур до 1.5 кОм. Однако последующее остывание сопровождалось увеличением сопротивления детекторных структур до 2 кОм. Наблюдаемые температурные изменения сопротивления детекторных 4H-SiC-структур, облученных ионами Хе, согласуются с результатами измерения вольт-фарадных характеристик.

Учитывая, что максимум в распределении первичных радиационных дефектов находится в подложке (рис. 1), и учитывая глубокое распространение радиационных дефектов на всю толщ подложки (эффект дальнего действия) при облучении 4H-SiC высокоэнергетичными ионами Хе, можно предположить, что после облучения основной вклад в увеличение сопротивления исследуемых структур вносит подложка [28].

4. Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

— Коротковолновая часть спектра фоточувствительности ($\lambda \leq 250 \text{ нм}$) УФ детекторных 4H-SiC-структур с барьерами Шоттки определяется степенью совершенства поверхности полупроводника. Она квазинпряжена за счет приповерхностных несовершенств (в частности флуктуационных ловушек). Облучение детекторов высокоэнергетичными ионами Хе флюенсом $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ сильнее выявляет эту зависимость.

— УФ детекторные 4H-SiC-структуры с барьерами Шоттки сохраняют свою работоспособность при облучении тяжелыми ионами Хе флюенсом $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ с энергией 167 МэВ.

— С повышением рабочей температуры детекторов до 180°C их фоточувствительность сохраняется и даже наблюдается увеличение квантовой эффективности в спектральном диапазоне 200–400 нм. Это указывает на увеличение временного и радиационного ресурсов 4H-SiC-приборов при повышенных температурах.

Авторы благодарят А.В. Миронович за проведение термовакуумного напыления барьеров Шоттки и омических контактов к приборным структурам.

Список литературы

- [1] L.R. Koller. *Ultraviolet Radiation* (N.Y., Willey, 1965).
- [2] Р.Г. Веренчикова, Ю.А. Водаков, Д.П. Литвин, Е.Н. Мохов, А.Д. Роенков, В.И. Санкин. ФТП, **26**, 1008 (1992).
- [3] D.M. Brown, E.T. Downey, M. Ghezzi, J.W. Kretchmer, R.J. Saia, Y.S. Liu, J.A. Edmond, G. Gati, J.M. Pimbley, W.E. Schneider. IEEE Trans. Electron Dev., **40**, 327 (1993).
- [4] E. Monroy, F. Omnes, F. Calle. Semicond. Sci. Technol., **18**, R33 (2003).
- [5] А. Полищук. Современная электроника, **4**, 20 (2006).
- [6] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. ФТП, **37**, 1025 (2003).
- [7] Sglux — www.sglux.com
- [8] EOC Inc. — www.eoc-inc.com
- [9] Y. Feng, X. Xiaobin, S. Aslam, Z. Yuegang, D. Franz, J.H. Zhao, M. Weiner. IEEE J. Quant. Electron., **40**, 1315 (2004).
- [10] И. Артюков. Фотоника, **5**, 26 (2008).
- [11] J.F. Seely, B. Kjørnattawanich, G.E. Holland. Optics Lett., **30**, 3120 (2005).
- [12] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, Е.В. Калинина, О.В. Константинов. ЖТФ, **78** (1), 86 (2008).
- [13] J.A. Edmond, H.S. Kong, C.H. Carter, jr. Physica B, **185**, 453 (1993).
- [14] N. Watanabe, T. Kimoto, J. Suda. Appl. Phys. Express, **5** (9), 094 101 (2012).
- [15] B. Bérenguier, L. Ottaviani, S. Biondo, M. Lazar, F. Milesi, O. Palais, F. Torregrosa, A. Lyoussi, E. Kalinina, A. Lebedev. MRS Symp. Proc., **1693** (2014).
- [16] Е. Калинина. ФТП, **41**, 769 (2007).
- [17] F.H. Ruddy, A.R. Dulloo, J.G. Seidel, M.K. Das, S-H. Ryu, A.R. Agarwal. IEEE Trans. Nucl. Sci., **7**, 4575 (2004).
- [18] D. Prasai, W. John, L. Weixelbaum, O. Krüger, G. Wagner, P. Sperfeld, S. Nowy, D. Friedrich, S. Winter, T. Weiss. J. Mater. Res., **28** (1), 33 (2013).
- [19] F. Nava, E. Vittone, P. Vanni, G. Verzellesi, P. G. Fuochi, C. Lanzieri, M. Glaser. Nucl. Instrum. Meth. A, **505**, 645 (2003).
- [20] S. Sciortino, F. Hartjes, S. Lagomarsino, F. Nava, M. Brianzi, V. Cindro, C. Lanzieri, M. Moll, P. Vanni. Nucl. Instrum. Meth. A, **552**, 138 (2005).
- [21] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, F. Nava. Appl. Phys. Lett., **85**, 3780 (2004).
- [22] А.И. Гирка, А.Ю. Дидык, А.Д. Мокрушин, Е.Н. Мохов, С.В. Свирида, А.В. Шишкин, В.Г. Шмаровоз. Письма ЖТФ, **15**, 12 (1989).
- [23] I. Lhermitte-Sebire, J.L. Chermant, M. Levalois, E. Paumier. J. Vicens. Rad. Eff. Def. Sol., **126**, 173 (1993).
- [24] W.J. Weber, L.M. Wang, N.Yu. Nucl. Instrum. Meth. B, **116**, 322 (1996).
- [25] S.J. Zinkle, J.W. Jones, V.A. Skuratov. MRS Symp. Proc., **650**, R3.19.1 (2001).
- [26] Е.В. Калинина, Г.Ф. Холуянов, Г.А. Онушкин, Д.В. Давыдов, А.М. Стрельчук, А.О. Константинов, А.Халлен, А.Ю. Никифоров, В.А. Скуратов, К. Navacsak. ФТП, **38**, 1187 (2004).
- [27] Е.В. Калинина, В.А. Скуратов, А.А. Ситникова, Е.И. Колесникова, А.С. Трегубова, М.П. Щеглов. ФТП, **41**, 392 (2007).
- [28] Е.В. Калинина, Н.А. Чучвага, Е.В. Богданова, А.М. Стрельчук, Д.Б. Шустов, М.В. Заморьянская, В.А. Скуратов. ФТП, **48**, 167 (2014).
- [29] С.М. Рывкин. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках* (М., Гос. изд.-во. физ.-мат. лит., 1965) гл. 15.
- [30] T.V. Blank, Yu.A. Goldberg, O.V. Konstantinov. Nucl. Instrum. Meth. A, **509**, 109 (2003).
- [31] T.V. Blank, Yu.A. Goldberg, E.V. Kalinina, O.V. Konstantinov, A.O. Konstantinov, A. Hallen. Semicond. Sci. Technol., **20**, 710 (2005).
- [32] Г.Н. Виолина, Т.С. Крутилева. ФТП, **5**, 1130 (1971).

Редактор Л.В. Шаронова

Heavy ion irradiation of 4H-SiC ultraviolet detectors

*E.V. Kalinina**, *A.A. Lebedev**, *E. Bogdanova**,
B. Berenquier⁺, *L. Ottaviani⁺*, *G.N. Violina[≠]*,
V.A. Skuratov[•]

* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
⁺ IM2NP, CNRS UMR 7334, Aix Marseille Universite,
OPTO-PV, France
[≠] Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia
[•] Joint Institute for Nuclear Research,
141980 Dubna, Russia

Abstract 4H-SiC ultraviolet photodetectors based on Schottky barriers were formed on lightly doped *n*-type conductivity epitaxial layers grown by chemical vapor deposition method on industrial substrates. Diode structures were irradiated at 25°C with 167 MeV Xe ions, fluence was $6 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$. The comparative studies of optical and electrical properties of initial and irradiated structures with Schottky barriers were carried in the temperature range 23–180°C. Features of photosensitivity and electrical characteristics of the detector structures are explained by photocarriers capture in traps due to of the fluctuations in the bottom of the conduction band and the valence band top, with the subsequent thermodissociation.