

Облучение протонами 4H-SiC фотоприемников с барьером Шоттки

© Е.В. Калинина¹, Г.Н. Виолина², И.П. Никитина¹, М.А. Яговкина¹, Е.В. Иванова¹, В.В. Забродский¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197376 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: evk@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 24 января 2019 г.

В окончательной редакции 31 января 2019 г.

Принята к публикации 31 января 2019 г.

Впервые проведены комплексные сравнительные исследования рентгеновскими и оптическими методами ультрафиолетовых фотоприемников с Cr барьерами Шоттки, сформированными на 4H-SiC эпитаксиальных слоях, до и после облучения протонами с энергией 15 МэВ флюенсами в интервале $(1-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. С увеличением флюенсов облучения протонами наряду с ненарушенной матрицей карбида кремния наблюдалось формирование локализованных областей с отрицательной деформацией. Получено согласие рентгеновских и оптических исследований, позволяющих объяснить особенности спектральных изменений фоточувствительности детекторов в диапазоне 200–400 нм с увеличением флюенсов облучения протонами. Ультрафиолетовые фотоприемники Cr/4H-SiC выдерживали облучение протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ практически без изменения фоточувствительности за счет геттерирования простых дефектов кластерными и аморфными образованиями, что приводило к частичному структурному улучшению облученного материала.

DOI: 10.21883/FTP.2019.06.47742.9072

1. Введение

Современное развитие космонавтики, изучение атмосферы планет и их спутников, исследование межзвездного и межпланетного пространства, диагностика „озоновых дыр“ проявляют повышенный интерес к регистрации электромагнитного излучения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. Эффективное наблюдение УФ излучения возможно только с борта ракет и космических аппаратов из космоса с его повышенной радиационной активностью и значительными перепадами температур. Работа в столь сложных „экстремальных“ условиях требует применения фотоприемников высокотемпературных, радиационно-стойких к облучению высокоэнергетичными частицами и „видимо-слепых“.

Приборы с указанной совокупностью свойств не могут быть реализованы с использованием традиционных полупроводниковых материалов (Si, Ge, GaAs, GaP) с шириной запрещенной зоны 0.7–2.2 эВ. Детекторы на таких материалах чувствительны к видимому и ИК-излучению, поэтому требуется применение УФ светофильтров, что резко снижает квантовую эффективность приборов [1,2]. Для создания „видимо-слепых“ фотоприемников, не требующих применения светофильтров, перспективны более широкозонные полупроводники — GaN, AlN и твердые растворы на их основе, алмазы [3,4]. Температурный предел работы фотоприемников на всех вышеперечисленных материалах не превышает 150°C, а значения энергии смещения атомов при облучении высокоэнергетичными частицами менее 20 эВ, что исключает их применение для работы в экстремальных условиях при высоких температурах и повышенных

уровнях радиации. Кроме того, ввиду низких значений теплопроводности и значительным темновым током, такие детекторы требуют применения принудительного охлаждения, что существенно увеличивает габариты, вес аппаратуры и энергозатраты [1,5,6].

Одним из перспективных широкозонных полупроводников для создания фотоприемников УФ диапазона является 4H-SiC с шириной запрещенной зоны 3.23 эВ, что обеспечивает работоспособность приборов до 600°C. 4H-SiC фотодетекторы нечувствительны к видимому и ИК-излучению, что исключает необходимость использования УФ светофильтров [7]. Низкие значения генерационных токов в 4H-SiC ($10^{-25} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ при 300 К) и теплопроводность материала ($3-5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$) на уровне меди исключают необходимость принудительного охлаждения приборов, что намного снижает габариты и энергообеспечение оборудования [8]. Качество современного материала обеспечивает низкие значения токов утечки, что в совокупности с низкими значениями генерационных токов позволяет снизить порог фоточувствительности 4H-SiC фотоприемников и регистрировать слабые УФ сигналы [7,9]. 4H-SiC УФ фотоприемники с Cr барьерами Шоттки стабильно работали при нагреве до 180°C [10].

Радиационная стойкость различных 4H-SiC приборов исследовалась при облучении электронами [11,12], нейтронами [13] и высокоэнергетичными ионами в широком диапазоне их масс от легких (протоны) [14,15] до тяжелых (Kr, Xe, Bi) [16,17]. Результаты работ подтверждали высокую радиационную стойкость 4H-SiC приборов. Радиационная стойкость 4H-SiC фотоприемников с барьерами Шоттки для спектрального диапазона 200–400 нм

рассматривалась в основном при длительной УФ радиации. 4H-SiC фотоприемники с Au-барьерами Шоттки не деградировали в течение 5000 ч при облучении ртутной лампой (254 нм) потоком $1000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ [18]. 4H-SiC фотоприемники с Cr-барьерами Шоттки показали высокую радиационную стойкость при облучении тяжелыми ионами, они выдерживали облучение ионами Хе флюенсом $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ со снижением квантовой эффективности в 2 раза [10]. Никакие другие полупроводники не выдерживают облучения высокоэнергетичными тяжелыми ионами, моделирующего структурные нарушения в материале, которые создаются осколками деления ядер и тяжелыми частицами в космосе.

Поскольку солнечное излучение содержит 91% протонов, интерес представляет исследование влияния протонного облучения на работу УФ 4H-SiC фотоприемников, что важно для прогнозирования возможностей работы детекторов в космосе.

Цель данной работы — исследование структурных и оптических УФ 4H-SiC фотоприемников с Cr-барьерами Шоттки в спектральном диапазоне 200–400 нм при облучении протонами с энергией 15 МэВ в диапазоне флюенсов $(1-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

2. Методика эксперимента

Фотоприемники были сформированы на *n*-4H-SiC эпитаксиальных слоях, выращенных методом газотранспортной эпитаксии (CVD) толщиной 5 мкм с концентрацией некомпенсированных доноров $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ на коммерческих *n*⁺-4H-SiC подложках с концентрацией $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Барьеры Шоттки диаметром 8 мм формировались на CVD слоях термовакуумным напылением Cr толщиной 20 нм через маски. Базовые контакты формировались также термовакуумным осаждением Cr/Al. Фотодиодные структуры облучались протонами с энергией 15 МэВ 4 раза последовательно флюенсами $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ с суммарным флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Сравнительные структурные изменения в эпитаксиальном слое 4H-SiC до и после каждого облучения протонами исследовались с привлечением методов рентгеновской (*X*-ray) дифрактометрии. Съёмки рентгеновских кривых качания (КК) проводились на 2-кристальном спектрометре на симметричном отражении (0008), в качестве монохроматора использовался бездислокационный монокристалл 6H-SiC.

Карты интенсивности рассеяния рентгеновских лучей для асимметричного отражения ($10 - 110$) были получены на высокоразрешающем дифрактометре D8Discover фирмы Bruker. Дифрактометр оснащен вращающимся медным анодом мощностью 6 кВт и четырёхкратным проточным монохроматором по Бартелю Ge (022) в схеме (+*n*; -*n*). Угловая расходимость отраженного луча в плоскости дифракции составляет 0.003° .

Дифракционные кривые для определения возможных изменений политипа 4H-SiC в результате облучения получены на рентгеновском дифрактометре D2Phaser фирмы Bruker, в геометрии „скользящего отражения“. Источник рентгеновских лучей — рентгеновская трубка с медным анодом, регистрация осуществлялась PSD-детектором Lynxeye. Измерения проводились в соответствии с методикой измерений [19] в части, касающейся определения политипа SiC.

Катодолюминесценция (CL) исходных образцов и после облучения протонами с энергией 15 МэВ суммарным флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ исследовалась при энергии электронов 10 кэВ, токе электронного пучка 150 нА и температуре 77 К.

Спектральные характеристики фоточувствительности Cr/4H-SiC детектора в диапазоне 200–400 нм измерялись методом сравнения при освещении лампой ДДС-30 с использованием монохроматора СФ-16. Для абсолютной оценки потока излучения использовался калиброванный кремниевый фотодиод ФДУК-100УТ. Регистрация токов Cr/4H-SiC детектора и калиброванного кремниевое фотодиода проводилась пикоамперметром Keithley 6487. Спектральные характеристики фоточувствительности Cr/4H-SiC детекторов в диапазоне 200–400 нм регистрировались при освещении лампой ДДС-30 с использованием монохроматора СФ-16. Для оценки потока излучения использовался калиброванный кремниевый фотодиод SPD-100UV. Регистрация темновых токов Cr/4H-SiC детекторов проводилась пикоамперметром Keithley 6487.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Рентгеновские исследования

Согласно расчетам по программе SRIM, пробег протонов с энергией 15 МэВ составляет около 1 мм, можно считать распределение радиационных дефектов однородным по толщине в 5 мкм CVD слоя.

Увеличение суммарных флюенсов облучения протонами в образцах не приводило к заметному увеличению полуширины 2-кристальных КК. Однако в результате протонного облучения по сравнению с исходным образцом наблюдалось слабое увеличение интенсивности отражения на хвостах КК со стороны больших углов уже после второго акта облучения, проявляющееся наиболее ярко после 4-го акта облучения (рис. 1).

Для детального исследования устойчивого увеличения интенсивности отражения на хвостах КК были проведены измерения КК с узкой щелью (0.05 мм) перед детектором при пошаговом сдвиге ($\Delta 2\theta = 0.01$ град) детектора со щелью относительно максимума в обе стороны до полного исчезновения отражения. Полученные таким образом картины распределения интенсивности на отражении (0008) в двух направлениях ω - и 2ω -сканирования до и после каждого акта облучения протонами представлены на рис. 2. Как видно, после 2-го

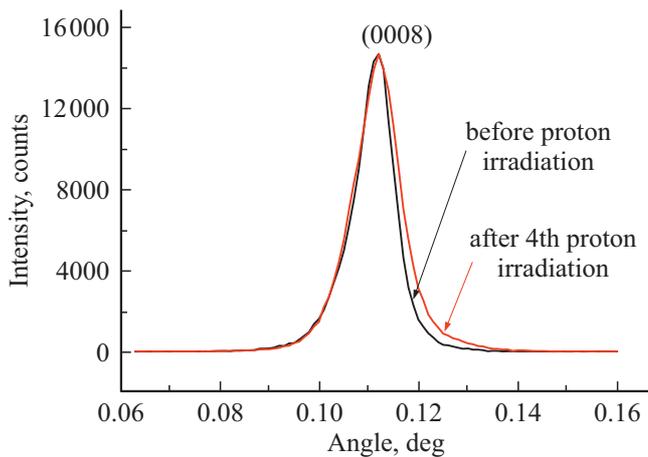


Рис. 1. Двухкристалльные кривые качания для исходного образца с $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD слое и после 4-кратного облучения протонами с энергией 15 МэВ суммарным флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

и 3-го актов облучения протонами наблюдается явно выраженная тенденция к асимметричному увеличению интенсивности отражения со стороны больших углов.

В результате четырехкратного облучения протонами в распределении интенсивности со стороны больших

углов появляется дополнительный максимум. Этот факт свидетельствует о возникновении в структуре CVD слоя, наряду с ненарушенной матрицей, локализованных областей с отрицательной деформацией в направлении оси c . Эволюция распределения интенсивности на отражении (0008) свидетельствует о перестройке степени дефектности и изменения природы дефектов с повышением флюенсов при облучении протонами с энергией 15 МэВ.

Измерения, проведенные на асимметричном отражении ($10 - 110$) после 4-го облучения, также выявили уменьшение параметра a в деформированных областях. Оценки показали, что параметр a уменьшился на $\sim 0.0014 \text{ \AA}$, а параметр c на 0.0025 \AA . Появление локализованных областей со сжатой решеткой в структуре CVD слоя может быть вызвано образованием кластеров точечных дефектов вакансионного типа, вероятнее всего вакансий кремния (V_{Si}).

В то же время наблюдаемое увеличение интенсивности отражения в направлении ω -сканирования в результате 2-го и 3-го актов облучения свидетельствует об общем хаотическом разупорядочении структуры эпитаксиального слоя за счет дефектообразования с тенденцией к кластерообразованию дефектов вакансионного типа. На четвертом этапе облучения происходит упорядочение структуры эпитаксиального слоя с выделением локализованных областей с отрицательной деформацией.

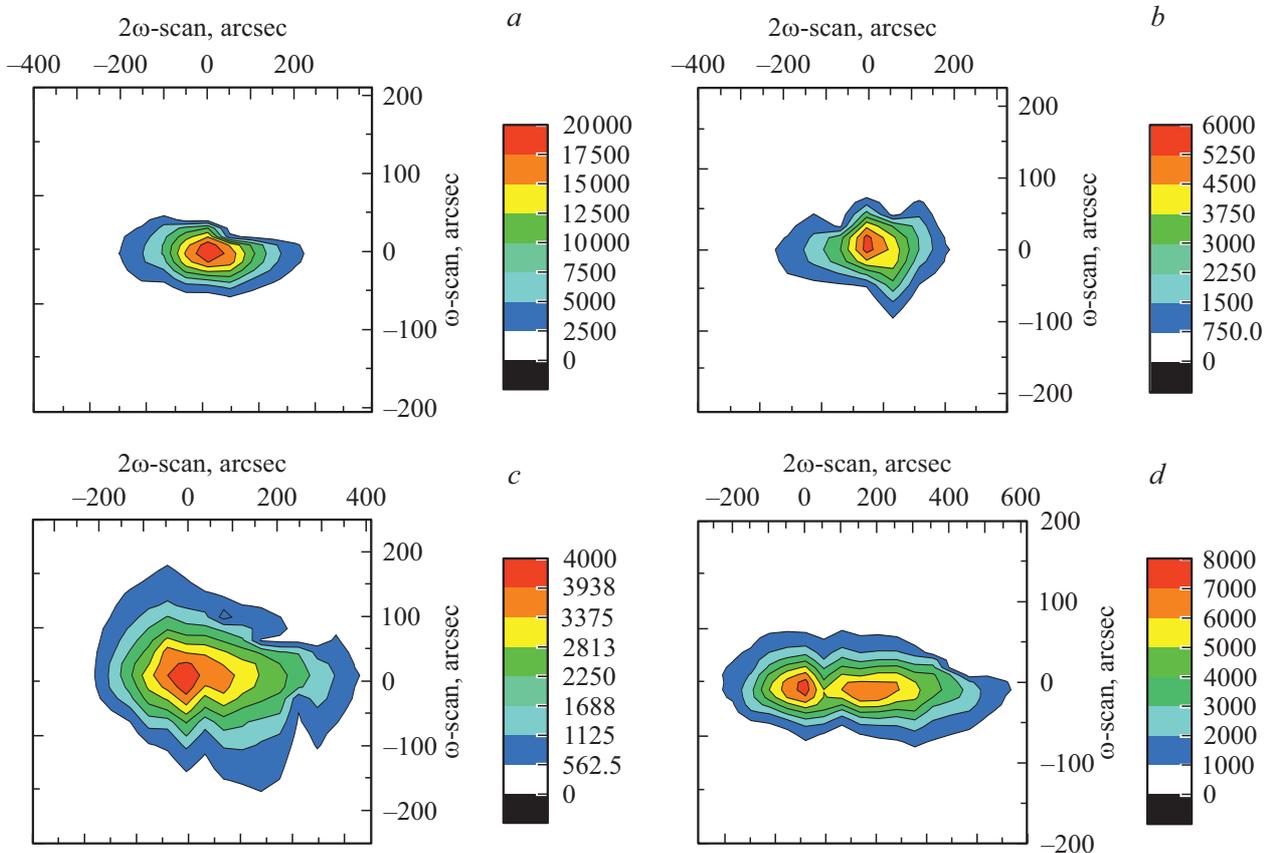


Рис. 2. Распределения интенсивности в направлениях ω - и 2ω -сканирования на отражении (0008) в исходном образце (a) и после облучения протонами с энергией 15 МэВ флюенсами (10^{12} см^{-2}): 2 (b), 3 (c) и 4 (d).

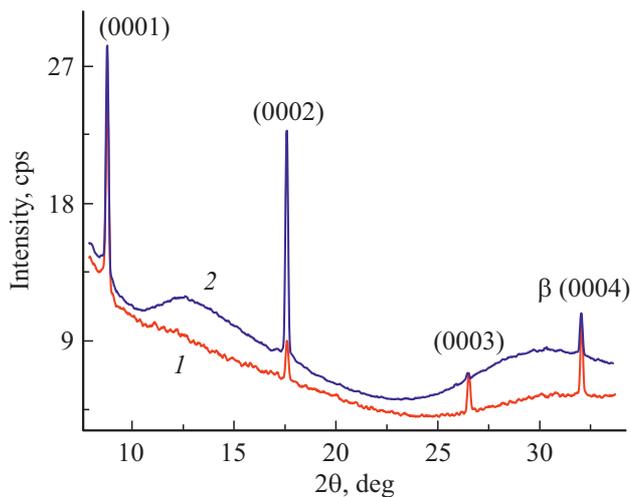


Рис. 3. Дифракционные кривые: 1 — исходный образец 4H-SiC, 2 — после облучения протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Полученные результаты согласуются с данными EPR (электронный парамагнитный резонанс) и ESP (электронный спиновый резонанс) исследованиями [20,21]. При малых флюенсах протонов были выявлены простые дефекты в различных зарядовых состояниях V_{Si} , V_{Si}^- , V_{Si}^{2-} , V_{C} и V_{C}^+ . С увеличением флюенсов протонов простые вакансии образовывали радиационные дефекты со структурой дивакансии ($V_{\text{C}} - V_{\text{Si}}$) или рекомбинировали с межузельными атомами, согласно исследованиям методом аннигиляции позитронов (PAS) [22]. Полученные данные согласуются с выводами DLTS измерений, с вычислением числа образующихся вакансий после облучения 4H-SiC образцов протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ [23].

Измерения на рентгеновском дифрактометре D2Phaseg исходных 4H-SiC образцов и после 4-го облучения протонами флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ показали присутствие на дифракционных кривых сверхструктурных отражений, относящихся только к политипу 4H-SiC — три максимума (0001), (0002) и (0003) (рис. 3). Четвертый пик в области углов $2\theta = 32^\circ$ относится к β — линии ($\text{CuK}\beta$) основного максимума (0004) отражения от базовой плоскости в политипе 4H-SiC. Результаты исследований указывают на отсутствие как в исходной структуре, так и после облучения протонами других политипов.

Видимым отличием дифракционных кривых, полученных от необлученного (кривая 1) и облученного (кривая 2) образцов, является поднятие фона в области углов 13 и 30 по шкале 2θ на кривой 2 (тип „гало“). Поскольку область, попадающая в зону анализа для обоих образцов одинакова, такая форма линии фона свидетельствует о появлении в образце после облучения аморфизованной области. С точки зрения структуры эту область можно определить как место с нарушенным

порядком расположения атомов. По полуширине „гало“ в области 13° по шкале 2θ можно оценить толщину аморфизованной области в 2–3 нм.

3.2. Католюминесценция

На спектрах CL исходных CVD слоев наблюдалась интенсивная полоса с максимумом 3.169 эВ, обусловленная рекомбинацией свободного экситона с участием поперечного оптического фонона (FE-TO) в политипе 4H-SiC (рис. 4, 5 кривые 1) [24]. Широкий экситонный спектр типичен для непрямозонных полупроводников.

После облучения CVD слоев протонами флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ излучение свободного экситона не исчезло (рис. 4, 5, кривые 2). Наблюдаемые при этом уменьшение ширины излучательной рекомбинации и появление 2 пиков в экситонной люминесценции указывают на

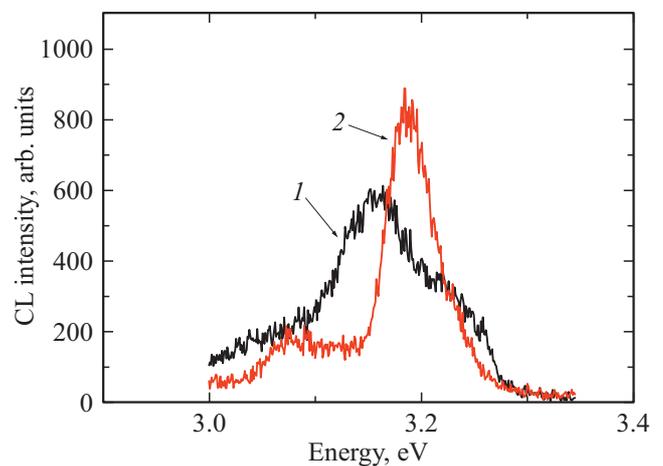


Рис. 4. Спектры катодолюминесценции в области рекомбинации свободного экситона исходного 4H-SiC CVD слоя (кривая 1) и после облучения протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2).

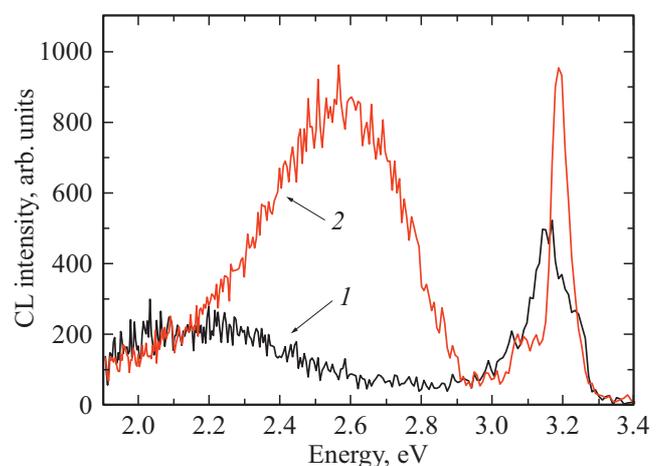


Рис. 5. Спектры катодолюминесценции исходного 4H-SiC CVD слоя (кривая 1) и после облучения протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2).

образование связанного экситона, предположительно с дефектом вакансионного типа (V_{Si}) [25]. Как видно, после 4-го облучения протонами спектр CL существенно изменился не только в краевой люминесценции, но и в области низких энергий. В исходных образцах в спектрах присутствовала широкая дефектная полоса с максимумом 2.2 эВ, типичная для SiC и обусловленная наличием глубоких уровней [26]. После облучения CVD слоев протонами дефектная полоса с максимумом 2.2 эВ исчезала, но появлялась широкая полоса с максимумом 2.6 эВ, известным как дефектный центр D_1 в SiC [27]. Такие результаты указывают на изменения структурной однородности и состава в исходном CVD слое, что согласуется с рентгеновскими данными.

3.3. Исследование фоточувствительности

Сложные процессы структурной перестройки 4H-SiC в процессе облучения протонами с энергией 15 МэВ с последовательным набором флюенсов нашли отражение в спектрах фоточувствительности УФ излучения фотоприемников с Cr-барьерами Шоттки (рис. 6).

После облучения протонами флюенсами $1 \cdot 10^{12}$ и $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривые 2 и 3 соответственно) наблюдалось ожидаемое снижение квантовой эффективности Cr/4H-SiC детекторов за счет введения простых радиационных дефектов, согласно выводам рентгеновских исследований (рис. 2, b). Но уже после 3-го облучения протонами флюенсом $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ наблюдается резкое увеличение квантовой эффективности (кривая 4) с тенденцией к повышению с увеличением флюенса (кривая 5). Согласно рентгеновским исследованиям, именно на этом этапе начинается кластероформирование точечных дефектов. Дальнейшее облучение приводит к упорядочению структуры эпитаксиального слоя с выделением локализованных областей с отрицательной деформацией, включающих аморфизованные области.

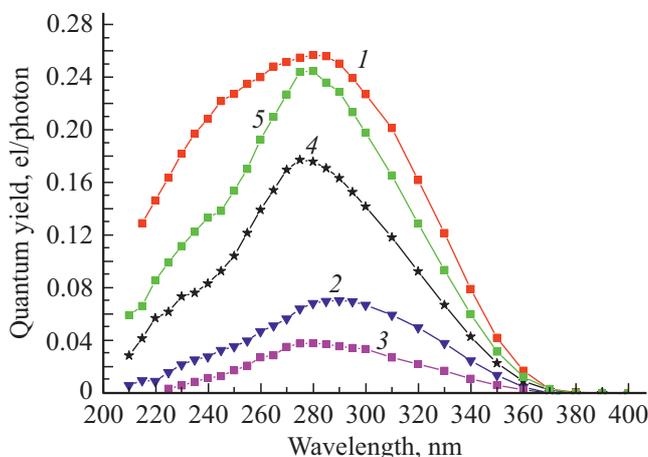


Рис. 6. Спектры квантовой эффективности Cr/4H-SiC фотоприемников исходные (кривая 1) и после облучения протонами с энергией 15 МэВ флюенсами (10^{12} см^{-2}): 1 (кривая 2); 2 (кривая 3), 3 (кривая 4) и 4 (кривая 5).

Известно, что при облучении полупроводников высокоэнергетичными частицами формирование протяженных дефектов (кластеров, дислокаций и т.д.) и аморфных областей сопровождается эффектом геттерирования простых дефектов на этих нарушениях [28–30]. Аналогичный эффект геттерирования наблюдался в 4H-SiC при имплантации ионов Al высокими дозами, что приводило к улучшению качества CVD слоев, увеличению диффузионной длины неосновных носителей тока и улучшению электрофизических характеристик в формируемых $p-n$ -структурах [31]. Вероятно, именно эффект геттерирования точечных дефектов кластерными и аморфными образованиями, выявленными рентгеновскими методами при облучении протонами высокими флюенсами, приводит к частичному улучшению структурного совершенства облученного материала, увеличению времени жизни носителей заряда и, как следствие, к увеличению квантовой эффективности Cr/4H-SiC УФ фотоприемников в спектральном диапазоне 200–400 нм.

4. Заключение

В заключение можно отметить следующее.

— Впервые примененная для 4H-SiC рентгенодифракционная методика измерений и построения картин распределения интенсивности отражения на каждом этапе облучения позволила проследить динамику структурных изменений в результате облучения протонами с энергией 15 МэВ флюенсами в интервале $(1-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

— Уменьшение параметров решетки при облучении протонами в указанных режимах свидетельствует о природе дефектных центров вакансионной природы. При малых флюенсах протонов это простые дефекты, которые с увеличением флюенсов облучения организуются в кластерные и аморфные образования.

— Полученные результаты рентгеновских исследований согласуются с данными катодолуминесценции и объясняют особенности изменения спектральных характеристик фоточувствительности Cr/4H-SiC УФ фотоприемников в спектральном диапазоне 200–400 нм.

— УФ фотоприемники Cr/4H-SiC выдерживали облучение протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ практически без изменения фоточувствительности за счет геттерирования простых дефектов кластерными и аморфными образованиями, что приводило к частичному структурному улучшению облученного материала.

Авторы выражают благодарность А.В. Миронович за проведение термовакuumных напылений омических контактов и Cr-барьеров Шоттки.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ при ФТИ им. А.Ф. Иоффе (идентификатор проекта RFMEFI62117X0018).

Список литературы

- [1] E. Monroy, F. Omnes, F. Calle. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, R33 (2003).
- [2] Yu.A. Gold'berg. *Semicond. Sci. Technol.*, **14**, R41 (1999).
- [3] T. Saito, T. Hitora, H. Ishihara, M. Matsuoka, H. Hitora, H. Kawai, I. Saito, E. Yamaguchi. *Metrologia*, **46**, S272 (2009).
- [4] A. Ben Moussa, A. Solyani, U. Schuhle, K. Haenen, Y.M. Chong, W.J. Zhang, R. Dahal, J.Y. Lin, H.X. Jiang, H.A. Barkad, B. Ben Moussa, D. Bolsee, C. Hermans, U. Kroth, C. Laubis, V. Mortet, J.C. De Jaeger, B. Giordano, M. Richter, F. Scholze, J.F. Hochedez. *Diamond. Relat. Mater.*, **18**, 860 (2009).
- [5] D. Prasai, W. John, L. Weixelbaum, O. Krüger, G. Wagner, P. Sperfeld, S. Nowy, D. Friedrich, S. Winter, T. Weiss. *J. Mater. Res.*, **28**, 33 (2013).
- [6] X. Chen, H. Zhu, J. Cai, Z. Wu. *J. Appl. Phys.*, **102**, 024505 (2007).
- [7] F. Yan, X. Xin, S. Aslam, Y. Zhao, D. Franz, J. Zhao, M. Weiner. *IEEE J. Quant. Electron.*, **40**, 1315 (2004).
- [8] M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur. *Properties of Advanced Semiconductor Materials* (N.Y., Wiley, 2001) Chap. 5.
- [9] 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**, 325 (1993).
- [10] Е.В. Калинина, А.А. Лебедев, Е.В. Богданова, В.В. Веренquier, L. Ottaviani, Г.Н. Виолина, В.А. Скуратов. *ФТП*, **49** (4), 540 (2015).
- [11] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, F. Nava. *Appl. Phys. Lett.*, **85** (17), 3780 (2004).
- [12] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev. *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 083503 (2017).
- [13] Е.В. Калинина, Г.Ф. Холуянов, Д.В. Давыдов, А.М. Стрельчук, А. Hallen, А.О. Константинов, В.В. Лучинин, А.Ю. Никифоров. *ФТП*, **37** (10), 1260 (2003).
- [14] L. Storasta, F.H.C. Carisson, S.G. Shidhara, A. Aberg, J.P. Bergman, A. Hallen, E. Jznzen. *Mater. Sci. Forum*, **353–356**, 431 (2001).
- [15] D.M. Martin, H. Kortegaard Nielsen, P. Leveque, A. Hallen. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (10), 1704 (2004).
- [16] Е.В. Калинина, В.Г. Коссов, Р.Р. Яфаев, А.М. Стрельчук, Г.Н. Виолина. *ФТП*, **44** (6), 807 (2010).
- [17] Е.В. Калинина, Н.А. Чучвага, Е.В. Богданова, А.М. Стрельчук, Д.Б. Шустов, М.В. Заморянская, В.А. Скуратов. *ФТП*, **48** (2), 167 (2014).
- [18] Sglux-www.sglux.com; www.coc-inc.com
- [19] С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. *Рентгенографический и электронно-оптический анализ*. 4-е изд. (М., МИСИС. 2002) с. 77.
- [20] H.J. von Bandeleben, J.L. Cantin, I. Vickridge, G. Battistig. *Phys. Rev. B*, **62**, 10126 (2000).
- [21] H. Itoh, M. Yoshikawa, I. Nashiyama, S. Misawa, H. Okumura, S. Yoshida. *J. Electron. Mater.*, **21**, 707 (1992).
- [22] D.T. Britton, M.-F. Barthe, C. Cörbel, A. Hempel, L. Henry, P. Desgardin, W. Bauer-Kugelmann, G. Kogel, P. Sperr, W. Triftshäuser. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 1234 (2001).
- [23] V.V. Emtsev, A.M. Ivanov, V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, G.A. Oganessian, N.B. Strokan, G. Wagner. *ФТП*, **46**, 473 (2012).
- [24] M. Ikeda, H. Matsunami. *Phys. Status Solidi A*, **58**, 657 (1980).
- [25] A. Fissel, W. Richter, J. Furthmüller, F. Bechstedt. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2512 (2001).
- [26] Ю.А. Водаков, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, М.Г. Рамм, В.И. Соколов. *ФТП*, **20**, 2153 (1986).
- [27] L. Patrick, W.J. Choyke. *Phys. Rev. B*, **5**, 3253 (1972).
- [28] A. Goetzberger, W. Shockley. *J. Appl. Phys.*, **31**, 1821 (1960).
- [29] H. Wong, N.W. Cheung, P.K. Chu. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 889 (1988).
- [30] В.А. Перевошиков, В.Д. Скупов. *Геттерирование примесей и дефектов в полупроводниках* (Н. Новгород, Изд-во Нижегородского ГУ) ч. 1, гл. 3, с. 158.
- [31] E. Kalinina, G. Kholuyanov, A. Sitnikova, V. Kossov, R. Yafaev, G. Pensl, S. Reshanov, A. Konstantinov, Anders Hallén. *Mater. Sci. Forum*, **433–436**, 637 (2003).

Редактор Г.А. Оганесян

Proton irradiation of the 4H-SiC photodetectors with Schottky barriers

E.V. Kalinina¹, G.N. Violina², I.P. Nikitina¹, M.A. Yagovkina¹, E.V. Ivanova¹, V.V. Zabrodski¹

¹ Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia

Abstract For the first time, complex comparative studies of X-ray and optical methods of ultraviolet photodetectors with Cr Schottky barriers formed on 4H-SiC epitaxial layers were carried out before and after irradiation with 15 MeV protons in fluences in the interval $(1-4) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. With an increase in fluence of proton irradiation, along with the undisturbed silicon carbide matrix, the formation of localized regions with negative deformation was observed. The agreement of X-ray and optical studies was obtained, which makes it possible to explain the features of the spectral changes in the photosensitivity of detectors in the range of 200–400 nm with an increase in the fluence of proton irradiation. The ultraviolet Cr/4H-SiC photodetectors withstood the irradiation of 15 MeV protons with a fluence of $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ with virtually no change in photosensitivity due to gettering of simple defects by cluster and amorphous formations, which led to a partial structural improvement of the irradiated material.