

Влияние температуры на характеристики 4H-SiC-фотоприемника

© Е.В. Калинина¹, Г.Н. Виолина², И.П. Никитина¹, Е.В. Иванова¹, В.В. Забродский¹, М.З. Шварц¹, С.А. Левина¹, А.В. Николаев¹

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 сентября 2019 г.

В окончательной редакции 30 сентября 2019 г.

Принята к публикации 30 сентября 2019 г.

Выявлено и объяснено в рамках теории фотопроводимости влияние концентрации носителей заряда в диапазоне $(1-50) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в *n*-4H-SiC CVD эпитаксиальных слоях на спектральные характеристики ультрафиолетовых фотоприемников с Cr-барьерами Шоттки в интервале 200–400 нм. Барьеры Шоттки с толщиной пленки Cr 20 нм и диаметром 8 мм формировались термовакуумным напылением через маски. Наблюдалось заметное влияние концентрации носителей заряда в CVD эпитаксиальных слоях на спектральные характеристики фотоприемников при нагреве до 200°C, что объясняется различием генерационно-рекомбинационных процессов. Облучение фотоприемников протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при температуре 200°C приводило к возрастанию квантовой эффективности по сравнению с образцами, облученными в аналогичных режимах при 25°C. Это свидетельствует о возрастании радиационного и временного ресурсов 4H-SiC-приборов при повышенных температурах.

Ключевые слова: карбид кремния, облучение, протоны, квантовая эффективность, флюенс.

DOI: 10.21883/FTP.2020.02.48903.9266

1. Введение

Задача разработки полупроводниковой электроники нового поколения актуальна для создания широкого спектра устройств, стабильно работающих в течение длительного времени в условиях повышенных температур, воздействия радиации и в химически активных средах. Такие „экстремальные“ условия возникают при исследовании горячих объектов космического пространства, звездных объектов с большими перепадами температур, изучении атмосферы планет и (или) их спутников. В подавляющем большинстве приборов, работающих по указанным направлениям, обеспечение помехоустойчивости при радиолокации достигается при использовании фотоприемников ультрафиолетового (УФ) излучения с чувствительностью в диапазоне 10–400 нм (энергия фотонов 124–3 эВ соответственно) [1]. Также для работы в столь сложных условиях требуется применение „видимо-слепых“ УФ фотоприемников, высокотемпературных и радиационно стойких [2].

Полупроводниковые материалы с шириной запрещенной зоны $E_g < 3 \text{ эВ}$ (Si, Ge, GaAs, GaP) не пригодны для создания УФ детекторов, сохраняющих длительную устойчивую работоспособность в „экстремальных“ условиях. Детекторы на основе таких материалов чувствительны к видимому и инфракрасному (ИК) излучениям, что требует применения УФ фильтров, резко снижающих квантовую эффективность приборов [1,3]. Для создания „видимо-слепых“ фотоприемников, не требующих применения светофильтров, перспективны

более широкозонные полупроводники — GaN, AlN и твердые растворы на их основе, алмазы [2,4–6]. Однако ввиду низких значений теплопроводности и значительных темновых токов при нагреве такие детекторы требуют применения принудительного охлаждения, что существенно увеличивает габариты, вес аппаратуры и энергозатраты [1,7,8]. Для фотоприемников с барьерами Шоттки на основе всех вышеперечисленных материалов температурный предел работы не превышает 150°C, а значения энергии смещения атомов при облучении высокоэнергетичными частицами оказываются менее 20 эВ, что исключает их применение для работы в экстремальных условиях при повышенных температурах и (или) уровнях радиационного воздействия.

Перспективным широкозонным полупроводником для создания УФ фотоприемников является 4H-SiC с шириной запрещенной зоны 3.23 эВ, что обеспечивает работоспособность приборов при температурах до 600°C. Также 4H-SiC-фотодетекторы нечувствительны к видимому и ИК излучению [9]. Низкие значения генерационных токов в 4H-SiC и высокая теплопроводность материала (на уровне меди) снижает (или исключает) требования по принудительному охлаждению приборов, что намного снижает габариты и энергообеспечение оборудования [10].

Наиболее эффективными, по сравнению со структурами типа металл-полупроводник-металл или на основе *p-n*-переходов, для регистрации УФ излучения оказываются вертикальные фотоприемники с потенциальным барьером в виде барьеров Шоттки [11,12]. В структурах с барьерами Шоттки генерация носителей про-

исходит в области пространственного заряда вблизи поверхности полупроводника с сильным встроенным электрическим полем. Преимущества структур с барьерами Шоттки позволили наблюдать для УФ Ni/4H-SiC-фотоприемников площадью 5×5 мм с толщиной пленки Ni 4.5 нм значения квантовой эффективности 65% при 275 нм [13]. УФ Ni₂Si/4H-SiC-фотоприемники с толщиной пленки Ni₂Si 21 нм в максимуме спектральной чувствительности (256 нм) демонстрировали значения квантовой эффективности до 78% [12]. Для детекторов Cr/4H-SiC диаметром 10 мм с толщиной пленки Cr 7 нм были получены значения квантовой эффективности до 50% при однородности фоточувствительности по площади барьера Шоттки лучше 4% [14].

Температурный предел работы приборов с барьерами Шоттки определяется качеством как исходного материала, так и характеристиками самого барьера, его высотой, температурной зависимостью обратных токов, качеством контакта металл-полупроводник. Коммерчески выпускаемые 4H-SiC-фотоприемники с Au-барьерами Шоттки работоспособны до 170°C с температурным коэффициентом сигнала $< 0.1\% \text{ K}^{-1}$ [15]. При нагреве до температуры 200°C с улучшением спектральных характеристик работали фотоприемники 4H-SiC с Ni- и Cr-барьерами Шоттки [16,17].

Радиационная стойкость исходного материала SiC и различных приборов на его основе исследовалась при облучении электронами, нейтронами и высокоэнергетичными ионами в широком диапазоне их масс от легких (протоны) до тяжелых (Kr, Xe, Bi) [18,19]. Результаты работ подтвердили высокую радиационную стойкость SiC-приборов политипов 4H, 6H и 3C.

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 световым потоком $1000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ от ртутной лампы (254 нм) [7,15]. Поскольку космическое излучение содержит до 90% протонов, интерес представляло исследование влияния протонного облучения на работу УФ 4H-SiC-фотоприемников. 4H-SiC-фотоприемники с Cr-барьерами Шоттки выдерживали облучение протонами с энергией 15 МэВ флюенсом до $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ без ухудшения фоточувствительности в спектральном диапазоне 200–400 нм [20]. Наблюдаемый результат объяснялся увеличением времени жизни носителей заряда за счет геттерирования простых радиационных дефектов кластерными и аморфными образованиями и структурного улучшения облученного материала. Высокую радиационную стойкость Cr/4H-SiC-детекторы продемонстрировали и при облучении тяжелыми ионами Хе флюенсом до $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Регистрируемое снижение квантовой эффективности составило только в 2 раза [21], тогда как никакие другие полупроводники не выдерживают подобного облучения тяжелыми высокоэнергетичными ионами.

Для прогнозирования возможностей работы УФ 4H-SiC-фотоприемников в космосе с характерными перепадами температур и вблизи горячих объектов интерес представляют исследования влияния облучения высокоэнергетичными частицами при повышенных температурах на спектральные характеристики детекторов.

Цель данной работы заключается в исследовании оптических и структурных характеристик УФ 4H-SiC-фотоприемников с Cr-барьерами Шоттки в спектральном диапазоне 200–400 нм при нагреве до 200°C, а также после облучения протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при температурах 25°C и 200°C.

2. Методика эксперимента

Фотоприемники были сформированы на 4H-SiC-структурах с эпитаксиальными слоями, выращенными методом газотранспортной эпитаксии (CVD) толщиной 5 мкм с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = (1-50) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ 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 термовакuumным напылением Cr толщиной 20 нм через маски. Базовые контакты формировались также термовакuumным осаждением Cr/Al. Фотодиодные структуры с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = (1-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD слоях облучались при температурах 25 и 200°C протонами с энергией 15 МэВ флюенсами $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Исходные образцы и после облучения прогревались до 200°C.

Сравнительные структурные изменения в эпитаксиальном слое 4H-SiC после облучения протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при температурах 25 и 200°C исследовались методом рентгеновской дифрактометрии на двухкристальном спектрометре. Контурные равной интенсивности вблизи узла обратной решетки на симметричном отражении (0008) были получены при использовании методики, описанной в работе [20].

Катодолюминесценция (CL) исходных образцов и после облучения при температурах 25 и 200°C протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ исследовалась электронным пучком с энергией 10 кэВ, токе 150 нА и температуре 77 К.

Спектральные характеристики фоточувствительности Cr/4H-SiC-детекторов в диапазоне 210–400 нм регистрировались при освещении лампой ДДС-30 с использованием монохроматора СФ-16. Для оценки потока излучения использовался калиброванный кремниевый фотодиод SPD-100UV. Регистрация токов Cr/4H-Si-детектора и калиброванного кремниевого фотодиода проводилась пикоамперметром Keithley 6487.

Для исследований температурных спектральных характеристик Cr/4H-SiC детекторов испытываемые образцы

устанавливались в вакуумной камере на держателе, нагреваемом от 25 до 200°C.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Характеристики исходных образцов

На рис. 1 представлены спектры квантовой эффективности Cr/4H-SiC-фотоприемников в УФ диапазоне 210–400 нм в зависимости от концентрации нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = (1-50) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD эпитаксиальном слое.

Представленные на рис. 1 характеристики квантовой эффективности измерялись на четырех Cr/4H-SiC-фотоприемниках с указанными различными концентрациями $N_d - N_a$ в CVD слоях, которые изготавливались в одном технологическом цикле. Поэтому разницу в квантовой эффективности представленных фотодиодов нельзя объяснить ни различным поглощением в Cr-пленке, ни различным отражением границ воздух/Cr/4H-SiC. С ростом концентрации в CVD слое $N_d - N_a$ в интервале $(1-10) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1, кривые 1–3) наблюдалось увеличение квантовой эффективности во всем исследуемом спектральном диапазоне. При взаимодействии света с полупроводником фоточувствительность определяется процессами генерации неравновесных носителей, их движением и рекомбинацией. Вероятно, в указанном интервале $N_d - N_a$ определяющими факторами являются зависимости как фоточувствительности, так и коэффициента поглощения света от концентрации носителей заряда в полупроводнике [22–24]. Однако при значительных концентрациях $N_d - N_a$ возрастает скорость рекомбинации носителей заряда, уменьшается их время жизни, что приводит к снижению квантовой эффективности (рис. 1, кривая 4) [24].

Наблюдалось влияние концентрации носителей заряда в исходных CVD слоях и на характер изменения

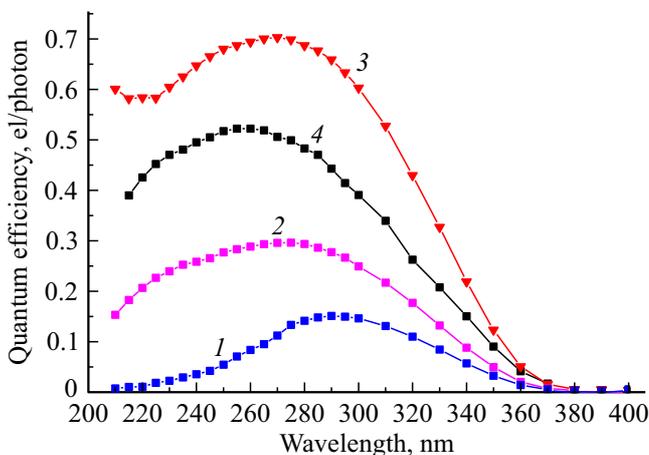


Рис. 1. Квантовая эффективность Cr/4H-SiC-фотоприемников в зависимости от концентрации $N_d - N_a$ в эпитаксиальном CVD слое, см^{-3} : 1 — $1 \cdot 10^{14}$, 2 — $4 \cdot 10^{14}$, 3 — $1 \cdot 10^{15}$, 4 — $5 \cdot 10^{15}$.

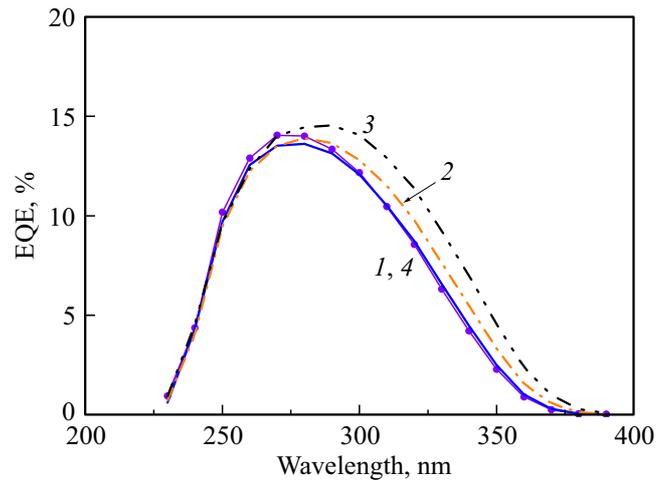


Рис. 2. Зависимость квантовой эффективности от температуры измерений УФ Cr/4H-SiC-фотоприемника с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в CVD слое, °C: 1 — 25, 2 — 125, 3 — 200, 4 — 25 (после нагрева и остывания).

спектральных характеристик при нагреве фотоприемников до 200°C, при этом нагрев детекторов различным образом влиял на разные частотные области спектров (рис. 2).

Для структур с концентрацией в CVD слое $N_d - N_a = (1-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ для длин волн менее 270 нм значения квантовой эффективности не зависели от температуры. В этой спектральной области определяющий вклад в фоточувствительность вносит поверхностная рекомбинация носителей заряда, а не структурные изменения и ее степень совершенства. Наибольшие значения коэффициента поглощения в приповерхностной области и увеличение коэффициента поглощения с температурой компенсируются интенсивными рекомбинационными процессами вблизи поверхности барьера Шоттки [25–28]. Генерируемые фотонами носители из-за интенсивной рекомбинации не могут образовывать фототок, и кривые отклика в области коротких длин волн остаются независимыми от температуры [29].

Наблюдаемый рост квантовой эффективности от температуры в максимуме спектральных зависимостей можно объяснить ростом времени жизни неосновных носителей тока при нагреве [30–32]. Наиболее заметно влияние температуры на спектральные характеристики в длинноволновой части спектра. Смещение спектральной зависимости при нагреве в области длинных волн объясняется температурной зависимостью ширины запрещенной зоны в 4H-SiC, ее уменьшением с дифференциальным температурным коэффициентом $-2.4 \cdot 10^{-4} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$ [10,27]. В этой области спектра имеют место непрямые оптические переходы с участием фононов. При повышенной температуре вероятностью переходов растет с ростом числа фононов, что приводит к возрастанию фоточувствительности [17,33]. После нагрева образцы остывали до 25°C, их спектральные ха-

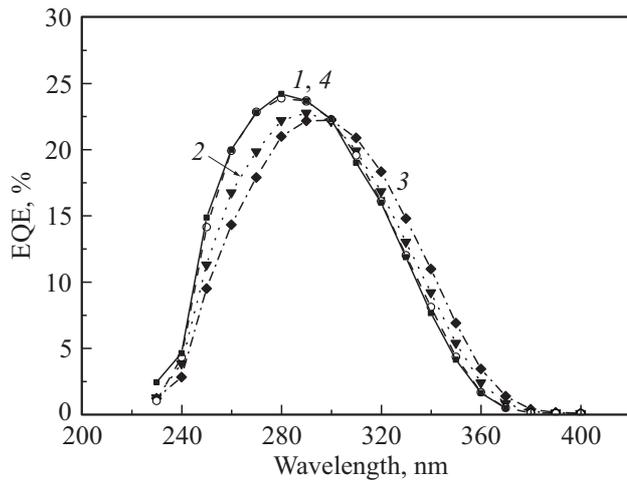


Рис. 3. Зависимость квантовой эффективности от температуры измерений УФ Cr/4H-SiC-фотоприемника с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD слое, °C: 1 — 25, 2 — 100, 3 — 175, 4 — 25 (после нагрева и остывания).

рактические характеристики возвращались в первоначальное состояние (рис. 2, кривая 4).

В отличие от образцов с концентрацией в CVD слое $N_d - N_a = (1-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, нагрев до 200°C более высокоомных структур с $N_d - N_a = (1-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ сопровождался другим характером генерационно-рекомбинационных процессов, что отразилось на спектральных характеристиках фотоприемников. В области коротких длин волн температурное влияние на степень дефектности CVD слоя оказывается преобладающим на фоне постоянной поверхностной рекомбинации.

Сдвиг спектральной характеристики при нагреве в длинноволновую область, как и в предыдущем случае, определяется температурной зависимостью ширины запрещенной зоны. Уменьшение с температурой фоточувствительности во всем диапазоне 230–400 нм можно объяснить уменьшением среднего времени жизни фотогенерированных электронно-дырочных пар из-за наличия центров безызлучательной рекомбинации, энергетические уровни которых попадают в запрещенную зону (рис. 3, кривые 2, 3). Фотогенерированные носители могли быть захвачены этими центрами и не доступны для фоточувствительности [34]. После нагрева образцы остывали до 25°C, их спектральные характеристики возвращались в исходное состояние (рис. 3, кривая 4).

3.2. Облучение протонами

Сравнительные исследования в УФ области спектральных зависимостей образцов с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD слое, облученных протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, выявили различия при разных температурных режимах облучения (25 и 200°C). При „горячем“ облучении (200°C) квантовая эффективность в спектральном диапа-

зоне 250–400 нм возрастала по сравнению с облучением при 25°C (рис. 4).

Ранее было показано, что в результате четырехкратного облучения 4H-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD слое протонами с энергией 15 МэВ суммарным флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при температуре 25°C происходило упорядочение структуры эпитаксиального слоя с выделением локализованных областей с отрицательной деформацией (рис. 5, a) [20]. Предполагалось, что образование областей с отрицательной деформацией может быть вызвано скоплением в них дефектов вакансионного типа. Этот эффект сопровождался частичным структурным улучшением и увеличением квантовой эффективности с увеличением флюенсов облучения протонами. При „горячем“ (200°C) облучении протонами с теми же энергией и флюенсом в структуре 4H-SiC было выявлено подобное образование локализованных областей с отрицательной деформацией, вызванных скоплением в них дефектов вакансионного типа (рис. 5, b). При этом наблюдалось увеличение квантовой эффективности по сравнению с данными для фотоприемника, облученного протонами в аналогичных режимах при 25°C (рис. 4, кривая 2).

Данные по CL подтверждают различный характер изменения структуры 4H-SiC CVD слоя в зависимости от температуры облучения протонами. После облучения протонами при разных температурах наблюдалась широкая полоса с максимумом 2.6 эВ, известным как дефектный центр D_1 в SiC (рис. 6) [35]. Этот дефектный центр ассоциируется с центром акцепторного типа Z_1/Z_2 в политипе 4H-SiC с энергией ионизации 0.68 эВ, его структура предполагается как неаксиальная ближайшая дивакансия $V_C - V_{Si}$ или вакансии V_{Si} в различных зарядовых состояниях [36,37]. С повышением температуры

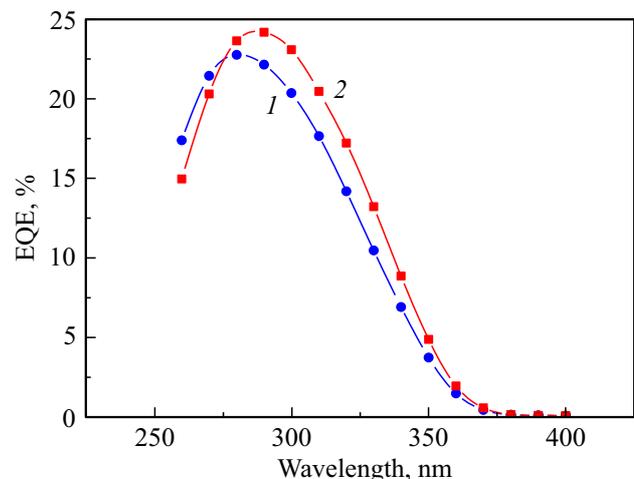


Рис. 4. Зависимость квантовой эффективности от длины волны УФ Cr/4H-SiC-фотоприемников с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD слое, облученных протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при температурах 25°C (кривая 1) и 200°C (кривая 2).

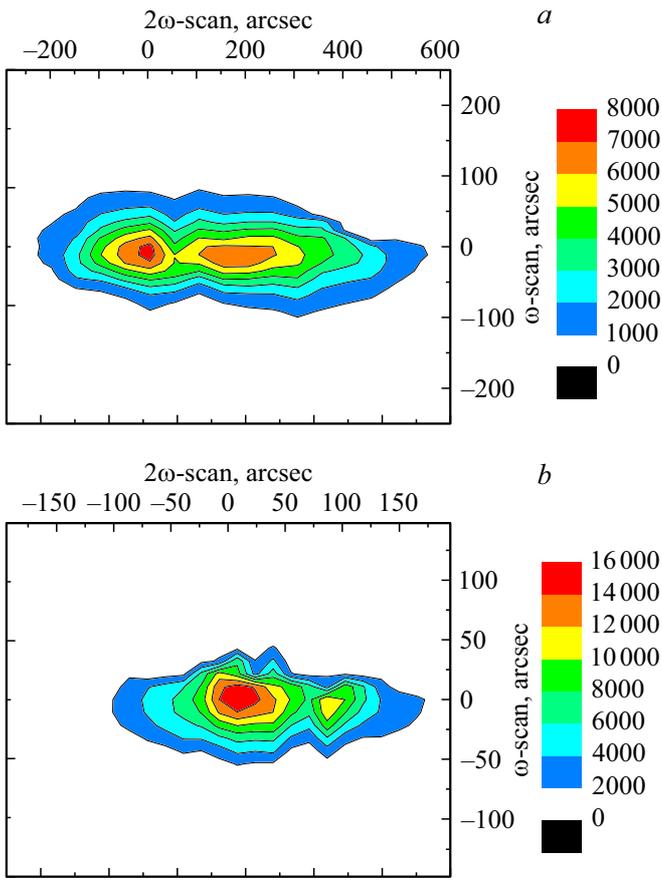


Рис. 5. Контуры равной интенсивности на отражении (0008) в 4H-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD слое, облученном протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при температурах 25°C (a) и 200°C (b).

облучения протонами концентрация дефектной полосы возрастала (рис. 6, кривая 2). Также при „горячем“ облучении протонами возрастала интенсивность экситонного спектра с максимумом 3.169 эВ, обусловленного рекомбинацией свободного экситона с участием поперечного оптического фонона (FE-TO) в политипе 4H-SiC (рис. 6). При этом наблюдалось уменьшение ширины излучательной рекомбинации и появление пиков в экситонной люминесценции, что связывают с образованием связанного экситона, предположительно с дефектом вакансионного типа (V_{Si}) [38]. Полученные результаты рентгеновских и CL исследований указывают на дополнительное улучшение структурного совершенства 4H-SiC CVD слоя при „горячем“ облучении протонами, вероятно, из-за дополнительной дефектной перегруппировки, а не отжига некоторых низкотемпературных дефектов [39]. Подтверждением может служить тот факт, что облучение протонами в аналогичных режимах при 25°C с последующим отжигом при 200°C (рис. 7, кривая 2) не равно результатам, наблюдаемым при „горячем“ облучении при 200°C (рис. 4, кривая 2).

При последующем нагреве до 200°C УФ Cr/4H-SiC-фотоприемников с концентрацией в CVD слое $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, облученных протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при температурах 25 и 200°C, характер спектральных зависимостей был аналогичен данным, полученным при нагреве до 200°C исходного образца (рис. 3). Квантовая эффективность фотоприемников, облученных протонами при разных температурах, уменьшалась одинаково при последующем нагреве до 200°C. На рис. 7 представлена зависимость квантовой эффективности в спектральном диапазоне 250–400 нм для фотодиода, облученного протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при 200°C (рис. 7, кривая 1) и после последующего нагрева

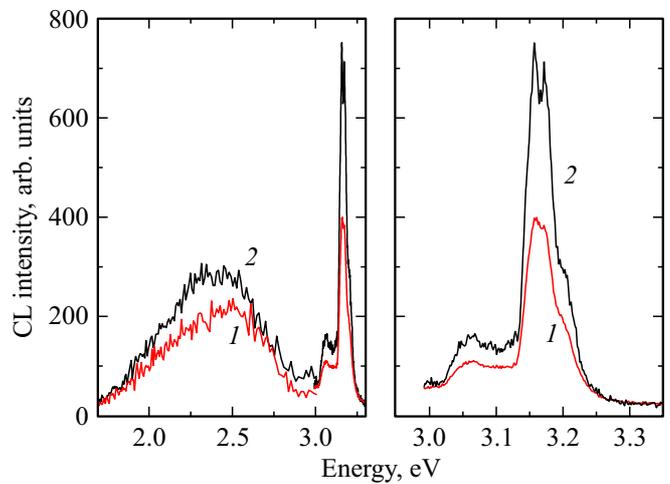


Рис. 6. Спектры катодолуминесценции 4H-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD слое, облученном протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при температурах 25°C (кривая 1) и 200°C (кривая 2).

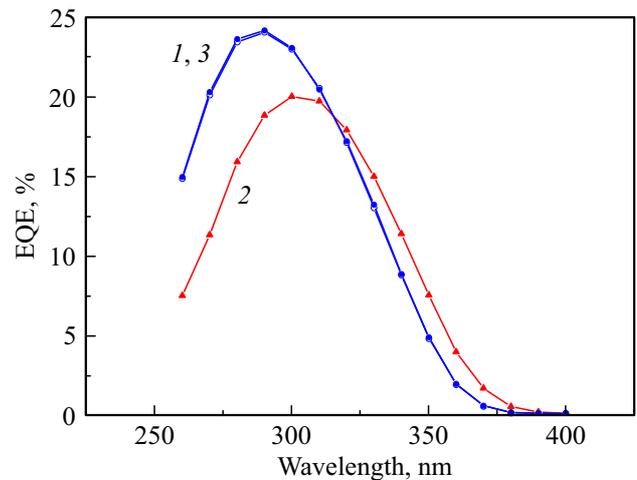


Рис. 7. Зависимость квантовой эффективности от температуры измерений УФ Cr/4H-SiC-фотоприемника с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD слое, облученном при 200°C протонами с энергией 15 МэВ флюенсом $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, °C: 1 — 25, 2 — 200, 3 — 25 (после нагрева и остывания).

до 200°C (рис. 7, кривая 2). После нагрева образцы остывали до 25°C, их спектральные характеристики возвращались в исходное состояние (рис. 7, кривая 3).

Возврат спектральных характеристик после нагрева и последующего охлаждения в исходное состояние свидетельствует о способности УФ 4H-SiC-фотоприемников с Cr-барьерами Шоттки работать при циклических перепадах температур 25–200°C без ухудшения квантовой эффективности. Такие ситуации возникают на борту космического корабля при работе вблизи горячих космических объектов.

4. Заключение

Возрастание квантовой эффективности УФ Cr/4H-SiC-фотоприемников, слабо легированных в CVD эпитаксиальном слое, с увеличением флюенсов в диапазоне $(1-40) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при облучении протонами с энергией 15 МэВ подтверждает высокую радиационную стойкость 4H-SiC-приборов.

При нагреве исследуемых исходных образцов до 200°C наблюдалась различная структурная перестройка в CVD эпитаксиальных слоях в зависимости от концентрации носителей заряда:

— $N_d - N_a = (1-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ — ухудшение спектральных характеристик объясняется влиянием на фоточувствительность в большей степени структурного несовершенства на фоне постоянной поверхностной рекомбинации;

— $N_d - N_a = (1-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ — улучшение спектральных характеристик объясняется определяющим вкладом в фоточувствительность поверхностной рекомбинации носителей заряда, а не структурных изменений.

Облучение при 200°C и облучение при 25°C с нагревом до 200°C по-разному влияют на перестройку структуры в 4H-SiC CVD слоях. Отжиг низкотемпературных собственных и радиационных дефектов не является определяющим в перестройке структуры.

Увеличение квантовой эффективности УФ Cr/4H-SiC-фотоприемников при облучении 15 МэВ протонами флюенсами $(1-40) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при нагреве до 200°C указывает на увеличение радиационного и временного ресурсов 4H-SiC-приборов при повышенных рабочих температурах.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-12-10106).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E. Monroy, F. Omnes, F. Calle. *Semicond. Sci. Technol.*, **18** (4), R33 (2003).
- [2] R.A. Miller, H. So, T.A. Heuser, D. G. Senesky. *J. Vacuum Sci. Technol. B*, **33** (4), 04602 (20015).
- [3] D. Decoster, J. Harari. *Ultraviolet Photodetectors in Optoelectronic Sensors*, Hoboken (N.J., John Wiley & Sons, Inc., 2009).
- [4] Yu. Goldberg. *Semicond. Sci. Technol.*, **14**, R41 (1999).
- [5] T. Saito, T. Hitora, H. Ishihara, M. Matsuoka, H. Hitora, H. Kawai, I. Saito, E. Yamaguchi. *Metrologia*, **46**, S272 (2009).
- [6] Z. Alaie, S.M. Hejad, M.H. Yousefi. *Mater. Sci. Semicond. Processing*, **29**, 16 (2015).
- [7] 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).
- [8] X. Chen, H. Zhu, J. Cai, Z. Wu. *J. Appl. Phys.*, **102**, 024505 (2007).
- [9] F. Yan, X. Xin, S. Aslam, Y. Zhao, D. Franz, J. Zhao, M. Weiner. *IEEE J. Quant. Electron.*, **40**, 1315 (2004).
- [10] M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur. *Properties of Advanced Semiconductor Materials* (N.Y., Wiley, 2001) Chap. 5.
- [11] S.M. Sze, K.K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed. Hoboken (N.J., John Wiley & Sons, Inc., 2007).
- [12] A. Sciuto, F. Rossaforte, S. Di Franco, V. Raineri, G. Bonanno. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 081111 (2006).
- [13] J. Hu, X. Xin, J.H. Zhao, F. Yan, B. Guan, J. Seely. *Optics Lett.*, **31** (11), 1591 (2006).
- [14] A. Gottwald, U. Kroth, E. Kalinina, V. Zabrodskii. *Appl. Optics*, **57** (28), 6431 (2018).
- [15] Sglux-www.sglux.com; www.coc-inc.com
- [16] Y. Xu, D. Zhou, H. Lu, D. Chen, F. Ren, R. Zhang, Y. Zheng. *J. Vacuum Sci. Technol. B*, **33**, 040602 (20015).
- [17] T.V. Blank, Yu A. Goldberg, E.V. Kalinina, O.V. Konstantinov, A.O. Konstantinov, A. Hallen. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, 710 (2005).
- [18] Е.В. Калинина. *ФТП*, **41** (7), 769 (2007).
- [19] А.А. Лебедев. *Mater. Res. Found.*, **6**, 1 (2017).
- [20] Е.В. Калинина, Г.Н. Виолина, И.П. Никитина, М.А. Яговкина, Е.В. Иванова, В.В. Забродский. *ФТП*, **53** (6), 705 (2019).
- [21] Е.В. Калинина, А.А. Лебедев, Е.В. Богданова, В.В. Benquier, L. Ottaviani, Г.Н. Виолина, В.А. Скуратов. *ФТП*, **49** (4), 540 (2015).
- [22] С.М. Рывкин. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках* (М., Изд-во физ.-мат. лит., 1963) гл. I.
- [23] П.С. Киреев. *Физика полупроводников* (М., Высш. шк., 1969) гл. VIII.
- [24] В.И. Фистуль. *Введение в физику полупроводников* (М., Высш. шк., 1975) гл. V.
- [25] E.D. Palik (ed.) *Handbooks of Optical Constants of Solids*, 1st edn (Academic, 1998).
- [26] S.G. Sridhara, R.P. Devaty, W.J. Choyke. *J. Appl. Phys.*, **84** (5), 2963 (1998).
- [27] A.Galeckas, P. Grivickas, V. Grivickas, V. Bikbajevs, J. Linnros. *Phys. Status Solidi A*, **191** (2), 613 (2002).
- [28] H.-Y. Cha, P.M. Sandvik. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (7), 5423 (2008).
- [29] B. Chen, Y.T. Yang, X.R. Xie, N. Wang, Z.Y. Ma, K. Song, X.J. Zhang. *Appl. Phys.*, **57** (34), 4427 (2012).

- [30] Р.Б. Кэмпбелл, Х.С. Берман. *Карбид кремния* (М., Наука, 1972) с. 231.
- [31] А.М. Стрельчук. ФТП, **29**,(7), 1190 (1995).
- [32] A. Udal, E. Velme. Mater. Sci. Forum, **556–557**, 375 (2007).
- [33] M. Mazzilo, A. Sciuto, S. Marchese. J. Instrumentation, **9**, P12001 (2014).
- [34] G. Adamo, D. Agro, S. Stivala, A. Parisi, L. Curcio, A. Ando, A. Tomasino, C. Giaconia, A.C. Busacca, M.C. Mazzillo, D. Sanfilippo, G. Fallica. *Special Issue on the Third Mediterranean Photonics Conference (MePhoCo2014)* (Trani, Italy) [EEE Photon. J., **6**, 1 (2014)].
- [35] L. Patrick, W.J. Choyke. Phys. Rev. B, **5**, 3253 (1972).
- [36] T. Delibor, G. Pensl, H. Matsunami, T. Kimoto, W.J. Choyke, A. Schoner, N. Nordell. Phys. Status Solidi A, **162**, 199 (1997).
- [37] H.J. von Bandeleben, J.L. Cantin, I. Vickridge, G. Battistig. Phys. Rev. B, **62**, 10126 (2000).
- [38] A. Fissel, W. Richter, J. Furthmüller, F. Bechstedt. Appl. Phys. Lett., **78**, 2512 (2001).
- [39] V. Kozlovski, V. Abrosimova. *Radiation Defect Engineering. Selected topics in electronics and systems* (Singapore–N.J.–London–Hong Kong, World Scientific, 2005) v. 37.

Редактор Г.А. Оганесян

Effect of temperature on the characteristics of 4H-SiC UV photodetectors

E.V. Kalinina¹, G.N. Violina², I.P. Nikitina¹,
E.V. Ivanova¹, V.V. Zabrodski¹, M.Z. Shvarts¹,
S.A. Levina¹, A.V. Nikolaev¹

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

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

Abstract The influence of the concentration of charge carriers in the range $(1-50) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ in *n*-4H-SiC CVD epitaxial layers on the spectral characteristics of ultraviolet photodetectors with Cr Schottky barriers in the range of 200–400 nm was revealed and explained within the framework of the photoconductivity theory. Schottky barriers with Cr film thickness of 20 nm and a diameter of 8 mm were formed by thermal vacuum sputtering through masks. A noticeable effect of the concentration of charge carriers $N_d - N_a$ in CVD epitaxial layers on the spectral characteristics of photodetectors upon heating to 200°C was also observed and explained by the difference in the generation-recombination processes. Irradiation of photodetectors by 15 MeV protons with a fluence of $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ at a temperature of 200°C led to an increase in quantum efficiency compared to samples irradiated in similar modes at 25°C. This indicates an increase in the radiation and time resources of 4H-SiC devices at elevated temperatures.