10

Особенности геттерирования при облучении ионами аргона Cr/4*H*-SiC-фотоприемников

© Е.В. Калинина, И.П. Никитина, М.Ф. Кудояров, М.Я. Патрова, В.В. Забродский, Ш.А. Юсупова

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: evk@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 15.05.2025 г.
В окончательной редакции 03.09.2025 г.
Принята к публикации 22.09.2025 г.

Представлены результаты влияния пошагового семикратного облучения ионами аргона с энергией 53 MeV флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (общий флюенс $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$) на структурные и оптические характеристики ультрафиолетовых Cr/4*H*-SiC-фотоприемников. Показано, что особенности спектральных характеристик в диапазоне длин волн 200−400 nm определяются геттерированием простых радиационных дефектов вакансионной природы кластерными образованиями в 4*H*-SiC. Подтвержден циклический характер эффекта геттерирования при последовательном семикратном облучении Cr/4*H*-SiC-фотодетекторов ионами аргона флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$, впервые наблюдаемый при протонном облучении. Для концентрации нескомпенсированных доноров $(1-3) \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ в эпитаксиальном слое 4*H*-SiC, выращенного методом химического осаждения из газовой фазы, определен флюенс ионов аргона, приводящий к деградации фотодетектора Cr/4*H*-SiC, составляющий $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$.

Ключевые слова: карбид кремния, облучение, аргон, геттерирование, внешняя квантовая эффективность, рентген.

DOI: 10.61011/OS.2026.01.62616.8177-25

Введение

Концентрации фоновых примесей и дефектов в полупроводниках негативно влияют на электрофизические и функциональные характеристики приборов. Разработка и использование в полупроводниковой технологии приемов, которые препятствуют или существенно снижают отрицательные последствия примесного или дефектного составов, обозначаются термином „геттерирование“. Эти приемы весьма разнообразны, с их помощью возможно проводить очистку объема полупроводников, используя различные технологические операции: термическую обработку в инертных или химически-активных средах, нанесение различных пленок на поверхность, введение геттера при выращивании или при последующей диффузии [1–4]. Кроме того, очистку от примесей и дефектов полупроводниковых структур, а также для изменения электрофизических характеристик приборов возможно проводить с помощью нарушенных гомо- или гетерофазных областей, существующих в объеме самого полупроводника — так называемое „внутреннее геттерирование“ [5,6]. Особое внимание уделяется очистке исходного материала в процессе роста и улучшение качества приборных структур введением редкоземельных элементов Yb, Gd, Sm, Nd, Er [7–11]. Одним из эффективных методов создания внутреннего геттера является облучение высокоэнергетичными легкими ионами [12,13]. В 4*H*-SiC геттерирование впервые наблюдалось при формировании ионно-легированных Al p^+-n-переходов при проведении исследований с применением различных методик: SEM, EBIC, SIMS, XPS, CCL, BAX. Улучшение качества исходного эпитаксиального 4*H*-SiC-слоя, выращенного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD), за счет геттерирования дефектов имплантированным Al p^+-слоем было подтверждено XRD-, LCL-, CL- и TEM-измерениями, что привело к увеличению времени жизни неравновесных носителей заряда в 2−2.5 раза [14–16].

Ультрафиолетовые (УФ) фотодетекторы на основе 4*H*-SiC с барьерами Шоттки широко используются в диагностике космического пространства, изучении атмосферы планет, исследовании „озоновых дыр“. Широкое применение УФ 4*H*-SiC-детекторов объясняется уникальными электрофизическими свойствами полупроводника: ширина запрещенной зоны (3.23 eV), низкие значения генерационных токов, высокая теплопроводность. Эти свойства позволяют создавать высокотемпературные „видимо-слепые“ детекторы с низким порогом фоточувствительности, что обеспечивает регистрацию слабых УФ сигналов. Радиационная стойкость приборов на основе 4*H*-SiC подтверждена при облучении различными высокоэнергетичными частицами. Причем радиация при повышенных температурах до 500 °C приводит к увеличению радиационного и временного ресурсов 4*H*-SiC-приборов за счет отжига некоторых радиационных дефектов [17]. Детекторы с барьерами Шоттки Cr/4*H*-SiC способны работать до 200 °C без ухудшения оптических характеристик [18]. Процессы геттерирования радиационных дефектов исследовались при облучении протонами УФ Cr/4*H*-SiC-фотодетекторов. При пошаговом

облучении протонами 7 раз с энергией 150 MeV и флюенсом $1 \cdot 10^{12}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (суммарный флюенс $7 \cdot 10^{12}\,\mathrm{cm}^{-2}$) впервые был выявлен циклический характер эффекта геттерирования [19].

В настоящей работе рассматриваются вопросы влияния пошагового облучения ионами Ar семь раз флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (общий флюенс $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$) с энергией 53 MeV на структурные и оптические характеристики УФ Cr/4*H*-SiC-фотодетекторов. Определен предельный флюенс облучения ионами Ar, приводящий к деградации детектора с концентрацией нескомпенсированных доноров $(1-3) \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ в 4*H*-SiC-эпитаксиальном CVD-слое.

Образец

УФ фотодетекторы Cr/4*H*-SiC были сформированы на структурах, состоящих из n^+-подложек 4*H*-SiC толщиной $400\,\mu$m с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{18}\,\mathrm{cm}^{-3}$ и эпитаксиальных слоев *n*-4*H*-SiC, выращенных CVD-методом толщиной $5\,\mu$m с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = (1-3) \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$. Базовые контакты Cr/Al со стороны подложки, а также Cr-барьеры Шоттки диаметром 8 mm и толщиной $< 0.1\,\mu$m на CVD-слоях были сформированы термическим испарением в вакууме. Одни и те же фотодиодные структуры 7 раз последовательно облучались восьмизарядными ионами Ar при комнатной температуре с энергией 53 MeV и флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$. Поскольку SiC обладает накопительным эффектом радиации, общий флюенс после седьмого облучения составлял $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$. Равномерность плотности образующихся радиационных дефектов по поверхности образцов (не хуже 7%) обеспечивалась сканированием пучка ионов Ar, сфокусированных в линию, при сканировании по координате, перпендикулярной этой линии.

Методы исследования

Структурные изменения в 4*H*-SiC после каждого облучения ионами Ar исследовались с помощью рентгенодифракционного анализа (X-ray). Картины распределения интенсивности вблизи узла обратной решетки на отражении (0008) CuK_α были получены при измерениях в двух модах сканирования ω и 2ω на двухкристальном спектрометре, собранном на базе промышленного дифрактометра ДРОН-3. Детали методики измерений подробно описаны в работе [19]. Глубина проникновения рентгеновских лучей на отражении (0008) 4*H*-SiC, рассчитанная по динамической теории, равна $17\,\mu$m, средний проецированный пробег ионов аргона равен примерно $8.3\,\mu$m [20]. Наибольшие структурные изменения происходят в области торможения ионов на глубине около 10 mm, однако эти изменения заметны и вблизи поверхности CVD-слоя, что отражено в оптических измерениях.

Измерения спектральных характеристик фоточувствительности Cr/4*H*-SiC-фотодетекторов в области длин волн 200–400 nm проводились методом сравнения с показаниями калиброванного кремниевого фотодиода ФДУК-100УТ. Измерения проводились при освещении дейтериевой лампой ДДС-30 с использованием монохроматора СФ-16, площадь луча составляла $5\,\mathrm{mm}^2$. Ошибка в измерении фоточувствительности составляла 10% для интервала длин волн 210–240 nm и 6% для длин волн 240–400 nm. Для регистрации токовых сигналов Cr/4*H*-SiC-фотодетектора и калиброванного кремниевого фотодиода применялся пикоамперметр Keithley 6487. Темновые токи исходного фотодетектора Cr/4*H*-SiC и после облучений ионами Ar не превышали 10^{-13} A.

Результаты и обсуждение

Рентгеновские измерения

Как отмечалось ранее [21,22], структура исходного образца с концентрацией $N_d - N_a = (1-3) \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ уже являлась несовершенной (рис. 1, initial). В ней наряду с матрицей (при $2\omega = 0$) существовала область с отрицательной деформацией (со стороны больших углов при $2\omega = 60$ arcsec), а со стороны меньших 2ω-углов наблюдалась протяженная интенсивная область отражения (вплоть до $2\omega = -60$ arcsec). Сосуществование в структуре матрицы и этих двух областей делало структуру изначально напряженной. В процессе первого облучения ионами Ar флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ простые радиационные дефекты (преимущественно вакансионного типа) мигрируют под действием напряжений в сторону локализованной монокристаллической области с отрицательной деформацией (при $2\omega = 60$ arcsec), делая ее более мощной (рис. 1, 1D). Именно эта область служит стоком для возникающих при 1-м облучении простых радиационных дефектов вакансионного типа, являясь по сути внутренним геттером. Наряду с этим протяженность области со стороны меньших 2ω увеличивается до $2\omega = -100$ arcsec, что свидетельствует об образовании в процессе 1-го облучения и межузельных дефектов. По-видимому, напряжения в структуре на этом этапе уже достигают критических значений, и существование такой конфигурации становится энергетически невыгодным. Поэтому в ходе второго облучения ионами Ar суммарным флюенсом $2 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ происходит частичное снятие напряжений за счет разрушения монокристаллического кластера, пересыщенного вакансиями, путем образования и укрупнения дислокационных петель и их трансформации в дефекты протяженного типа [23]. Подобный эффект наблюдался нами при облучении протонами [18]. При этом, как и в случае облучения протонами, плотность протяженных дефектов в структуре (по сравнению с исходным образцом) возрастает. Однако поскольку масса иона Ar в несколько десятков

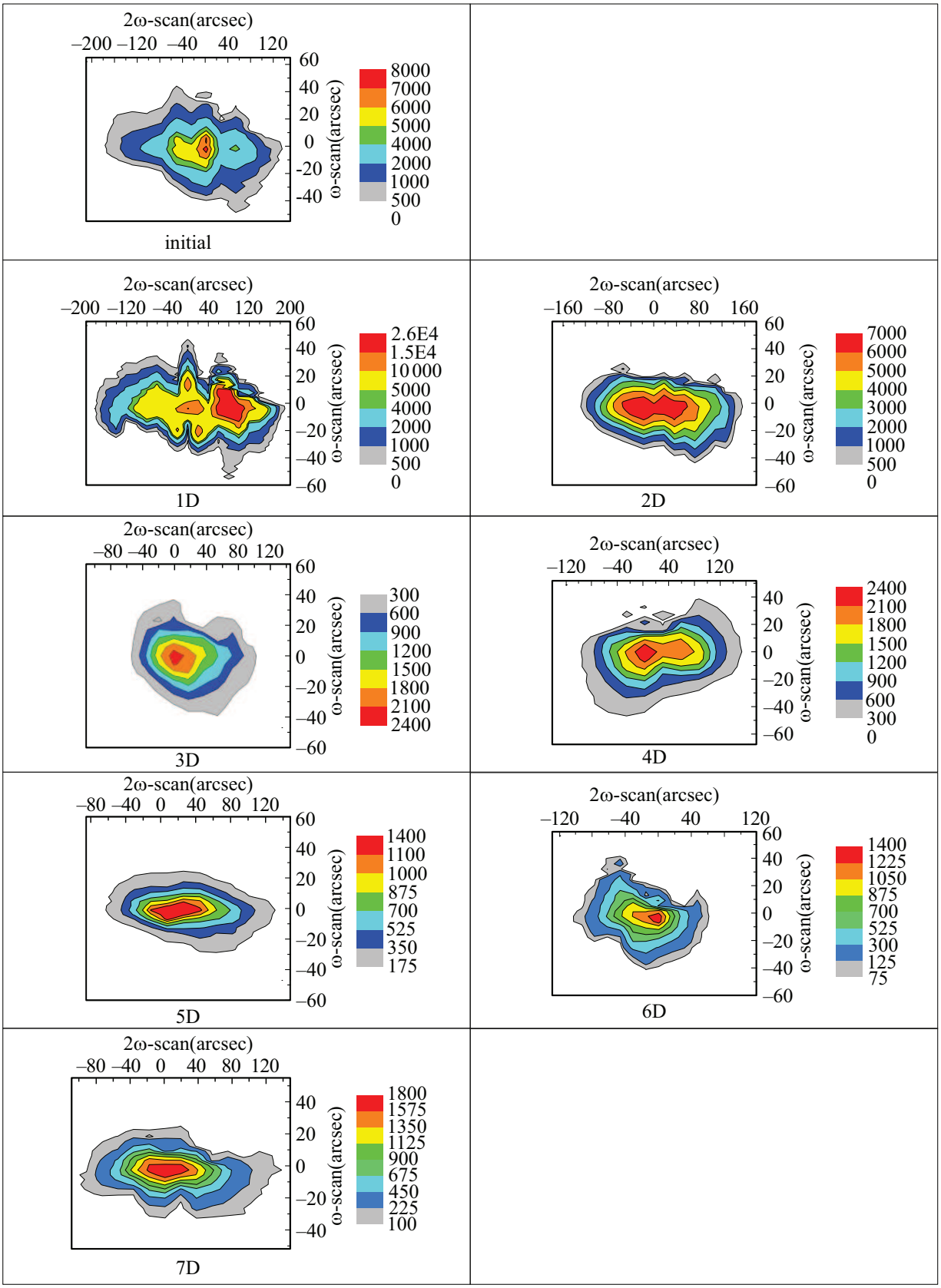

Рис. 1. Распределение интенсивности на отражение (0008) в исходном образце 4*H*-SiC с концентрацией $N_d - N_a = (1-3) \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ в эпитаксиальном CVD-слое (initial) и после каждого из 7 облучений ионами Ar с энергией 53 MeV и флюенсом ($\cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$): 1 (1D), 2 (2D), 3 (3D), 4 (4D), 5 (5D), 6 (6D), 7 (7D).

раз превосходит массу протона, в случае облучения ионами Ar наряду с образованием большого количества дефектов вакансионного типа происходит заметное образование межузельных атомов (рис. 1, 2D). Структура на этом этапе представляет собой сосуществование 3 монокристаллических областей: матрицы и областей как с отрицательной, так и с положительной деформацией. Упругие напряжения в такой структуре вызывают миграцию радиационных дефектов в противоположных направлениях, т. е. обе области работают как внутренние геттеры как для дефектов вакансионного типа, так и межузельных атомов. Очевидно, что такая структура неравновесная, и в процессе 3-го облучения суммарным флюенсом $3 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ происходит разрушение геттерирующих областей с одновременным преобладающим образованием простых дефектов вакансионного типа (рис. 1, 3D). Последующее 4-е облучение опять приводит к образованию монокристаллической области с отрицательной деформацией, работающей как геттер для вакансионных дефектов (рис. 1, 4D). В ходе 5-го облучения вновь происходит разрушение геттерирующей области с отрицательной деформацией. Напряжения, стимулирующие миграцию мелких радиационных дефектов, исчезают (рис. 1, 5D). Как и в результате 2-го облучения, процесс разрушения монокристаллической области с отрицательной деформацией сопровождается формированием в структуре дефектов линейного типа и дальнейшей деградации структурного совершенства исходной структуры. 6-е облучение суммарным флюенсом $6 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ приводит к преобладающему образованию межузельных атомов с явной тенденцией к формированию монокристаллического комплекса (рис. 1, 6D). После 7-го облучения наблюдается практически равномерное расширение областей, насыщенных простыми радиационными дефектами обоих типов (рис. 1, 7D). Суммируя результаты, полученные при проведении X-ray-исследований при пошаговом облучении 4*H*-SiC ионами Ar с энергией 53 MeV и флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$, можно констатировать цикличность эффекта внутреннего геттерирования простых радиационных дефектов за счет формирования в процессе облучения крупных кластеров, обогащенных как вакансиями (с отрицательной деформацией), так и межузельными атомами (с положительной деформацией), и их последующего разрушения на разных этапах облучения. Такой характер трансформации структуры нашел отражение в оптических измерениях.

Спектральные измерения

Процессы структурных перестроек в эпитаксиальных CVD-слоях 4*H*-SiC, которые наблюдались при проведении рентгеновских исследований после пошагового облучения ионами Ar с энергией 53 MeV и различными флюенсами, проявились в спектрах внешней квантовой эффективности (QE) Cr/4*H*-SiC-фотоприемников (рис. 2). После первого облучения ионами Ar флюенсом

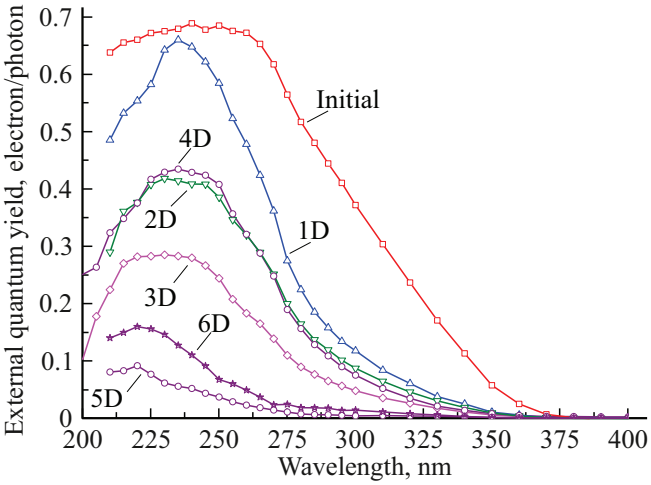

Рис. 2. Спектры QE Cr/4*H*-SiC-фотодетекторов исходных с концентрацией $N_d - N_a = (1-3) \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ в эпитаксиальном CVD-слое (initial) после облучения ионами Ar с энергией 53 MeV и флюенсом ($\cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$): 1 (1D), 2 (2D), 3 (3D), 4 (4D), 5 (5D), 6 (6D).

$1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ QE в максимуме практически не менялся за счет миграции простых радиационных дефектов под действием напряжений в сторону локализованной монокристаллической области с отрицательной деформацией, уже существующей в исходном образце (рис. 2, кривая 1D). Наблюдаемый эффект способствовал уменьшению количества радиационных дефектов вакансионного типа, росту времени жизни неравновесных носителей тока [14,16] и, как следствие, значениям QE Cr/4*H*-SiC-фотоприемников на уровне исходных образцов. Существенное уменьшение QE после второго облучения общим флюенсом $2 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ вызвано, согласно X-ray-измерениям, общим разупорядочением структуры CVD-слоя (рис. 2, кривая 2D). Разрушение геттерирующих областей в процессе третьего облучения с одновременным преобладающим образованием одиночных дефектов вакансионного типа приводило к дальнейшему уменьшению времени жизни неравновесных носителей заряда [24,25] и, как следствие, к уменьшению QE Cr/4*H*-SiC-фотоприемников (рис. 2, кривая 3D). Последующее 4-е облучение сопровождалось очередным образованием монокристаллической области с отрицательной деформацией, работающей как геттер для простых вакансионных дефектов в 4*H*-SiC-слое (рис. 1, 4D), и QE вновь возрастало (рис. 2, кривая 4D). В ходе 5-го облучения ионами Ar суммарным флюенсом $5 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ снова происходило разрушение геттерирующей монокристаллической области в CVD-слое 4*H*-SiC (рис. 1, 5D). Разрушение монокристаллической области сопровождалось деградацией структурного совершенства исходной структуры, в результате чего QE Cr/4*H*-SiC-фотодетектора резко падало (рис. 2, кривая 5D). Согласно X-ray-измерениям, 6-е облучение 4*H*-SiC-структуры ионами Ar суммарным флюенсом $6 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ приводило к

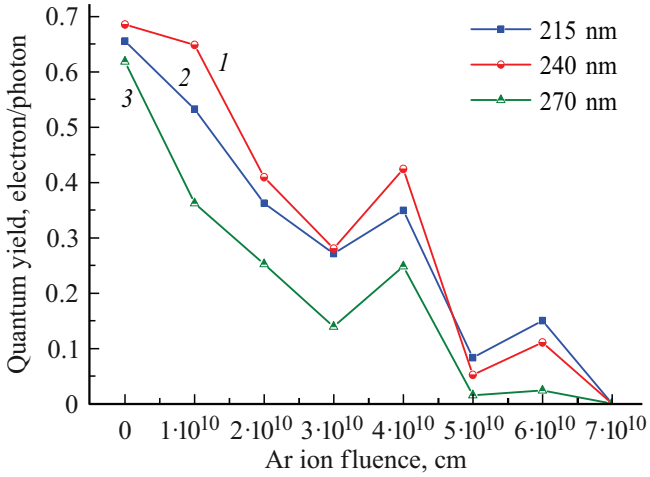

Рис. 3. Зависимость QE УФ Cr/4*H*-SiC-детектора с уровнем легирования $N_d - N_a = (1-3) \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ в CVD-слое от флюенса облучения ионами Ar для длин волн: *1* — 240 nm, *2* — 215 nm, *3* — 270 nm.

преобладающему образованию междуузельных атомов с тенденцией к формированию монокристаллического комплекса с положительной деформацией, играющего роль геттера (рис, 1, 6D). На спектре QE вновь наблюдался рост (рис. 2, кривая 6D). После 7-го облучения ионами Ar общим флюенсом $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ наблюдалось необратимое увеличение темнового тока на порядки с одновременной технической невозможностью зарегистрировать фототок, что было интерпретировано как разрушение структуры 4*H*-SiC, приведшее к полной деградации Cr/4*H*-SiC-фотодетектора.

Характер зависимости QE Cr/4*H*-SiC-фотодетекторов существенно отличается для областей длинноволнового и коротковолнового фотоэффектов. При длинах волн $\lambda < 380\,\mathrm{nm}$ (энергия фотона $h\nu > 3.2\,\mathrm{eV}$) QE растет медленно, поскольку эта область определяется непрямыми оптическими переходами между валентной зоной в Г-точке зоны Бриллюэна и дном зоны проводимости вблизи точки Mk-пространства. При энергии фотонов $h\nu = 4.9\,\mathrm{eV}$ имеет место прямой оптический переход в 4*H*-SiC с максимумом в QE-спектре (240–250 nm). Резкий спад в спектрах QE в коротковолновой области при энергиях фотонов, превышающих 5 eV, объясняется образованием горячего экситона, связывающего электрон и дырку в процессе фотоэффекта, и его поведением в контактном электрическом поле [26,27].

Корреляция между структурными изменениями в 4*H*-SiC и спектрами QE Cr/4*H*-SiC-фотодетекторов при пошаговом их облучении 7 раз ионами Ar хорошо прослеживается при построении спектров для трех длин волн: 240 nm (прямой переход), 215 и 270 nm (непрямые переходы) (рис. 3). Значения QE Cr/4*H*-SiC-детекторов изменялись синхронно с формированием и последующим разрушением кластерных образований в 4*H*-SiC согласно X-ray-исследованиям. Цикличность этих процессов подтверждает цикличность процесса геттерирования радиационных дефектов при пошаговом облучении Cr/4*H*-SiC-детекторов ионами Ar семь раз флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (общий флюенс $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$).

Выводы

Облучение 4*H*-SiC ионами Ar семь раз с энергией 53 MeV и флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (общий флюенс $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$) приводит к сложным структурным изменениям. Согласно X-ray-исследованиям, в результате облучения с набором флюенсов происходит периодическое образование и разрушение кластерных образований в 4*H*-SiC, обогащенных как вакансиями, так и межузельными атомами.

1. Кластерные образования в 4*H*-SiC служат стоками для простых дефектов, играя роль их геттеров. Наблюдаемый эффект геттерирования после первого облучения ионами Ar флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ обеспечивает значения QE УФ детекторов Cr/4*H*-SiC на уровне исходных образцов.

2. Подтвержден циклический характер эффекта геттерирования при пошаговом облучении 4*H*-SiC ионами Ar флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$.

3. Определен флюенс ионов Ar, приводящий к деградации УФ Cr/4*H*-SiC-детекторов с уровнем легирования $N_d - N_a = (1-3) \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ в CVD-слое, составляющий $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Goetzberger, W. Shockley. J. Appl. Phys., **31** (10), 1821–1824 (1960). DOI: 10.1063/1.1735455
[2] T.M. Buck, K.A. Pickar, J.M. Poate, C.-M. Hsieh. Appl. Phys. Lett., **21** (10), 485–487 (1972). DOI: 10.1063/1.1654228
[3] K. Nagasawa, Y. Matsushita, A. Kushino. Appl. Phys. Lett., **37** (7), 622–624 (1980). DOI: 10.1063/1.91998
[4] В.А. Перевощиков, В.Д. Скупов. *Геттерирование примесей и дефектов в полупроводниках* (Изд. Нижегородского госуниверситета, Н. Новгород, 2002), ч. 1, гл. 3.
[5] J.R. Monkowski. Sol. St. Technology, **7**, 44–51 (1981).
[6] Г.З. Немцев, А.И. Пекарев, Ю.Д. Чистяков. Микроэлектроника, **12** (5), 432–439 (1983).
[7] T.E. Seidel, L. Meck, A.G. Cullis. J. Appl. Phys., **46** (2), 600–601 (1975).
[8] К.А. Гацоев, А.Т. Гореленок, С.Л. Карпенко, В.В. Мамутин, Р.П. Сейсян. ФТП, **17** (12), 2148–2151 (1983).
[9] С.И. Лариков, А.И. Петров, О.В. Рычков, А.Э. Юнович. ЖТФ, **12** (6), 328–331 (1986).
[10] W. Körber, D. Weber, A. Hahgleiter, K.W. Benz, W.H. Ennen, H.D. Molleret. J. Cryst. Growth, **79** (1–3), 741–744 (1986). DOI: 10.1016/0022-0248(86)90548-8
[11] В.К. Киселев, С.В. Оболенский, В.Д. Скупов. ЖТФ, **69** (6), 129–131 (1999).

[12] H.S. Geipl, W.K. Tice. Appl. Phys. Lett., **30** (7), 325–327 (1977). DOI: 10.1063/1.89385
[13] T.W. Sigson, L. Cspredi, I.W. Mayer. J. Electrochem. Soc., **123** (7), 1116–1117 (1976). DOI: 10.1149/1.2133007
[14] E. Kalinina, G. Kholujanov, V. Solov'ev, A. Strel'chuk, V. Kossov, R. Yafaev, A. Kovarskii, A. Shchukarev, S. Obyden, G. Saparin, P. Ivannikov, A. Hallén, A. Konstantinov. Appl. Surf. Science, **184**, 323–329 (2001). DOI: 10.1016/S0169-4332(01)00682-1
[15] E.V. Kolesnikova, E.V. Kalinina, A.A. Sitnikova, M.V. Zamoryanskaya, T.P. Popova. Solid State Phenomena, **131–133**, 53–58 (2008). DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.131-133.53
[16] E. Kalinina, G. Kholujanov, A. Sitnikova, V. Kossov, R. Yafaev, G. Pensl, S. Reshanov, A. Hallen, A. Konstantinov. Mat. Sci. Forum, **433–436**, 637–640 (2003). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.433-436.637
[17] Е.В. Калинина. ФТП, **41** (7), 769 (2007).
[18] Е.В. Калинина, Г.Н. Виолина, И.П. Никитина, Е.В. Иванова, В.В. Забродский, М.З. Шварц, С.А. Левина, А.В. Николаев. ФТП, **54** (2), 196–202 (2020). DOI: 10.21883/0000000000
[19] И.П. Никитина, Е.В. Калинина, В.В. Забродский. ЖТФ, **93** (4), 562–567 (2023). DOI: 10.21883/TP.2023.04.55945.259-22
[20] М.А. Чумак, Е.В. Калинина, В.В. Забродский. ЖТФ, **95** (6), 1157 (2025). DOI: 10.61011/JTF.2025.06.60465.356-2
[21] Е.В. Калинина, М.Ф. Кудояров, И.П. Никитина, Е.В. Иванова, В.В. Забродский. ФТП, **54** (11), 1244 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620110123
[22] Е.В. Калинина, М.Ф. Кудояров, И.П. Никитина, Е.В. Дементьева, В.В. Забродский. ФТП, **56** (2), 254 (2022). DOI: 10.1134/S1063782622020087
[23] D. Hull. *Introduction to dislocations* (Atomizdat, Moscow, 1968), p. 118.
[24] G. Alfieri, A. Mihaila, H.M. Ayedh, B.G. Svensson, P. Hazdra, P. Godignon, J. Mikkan, S. Kicin. Mat. Sci. Forum, **858**, 308–311 (2016). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.858.308
[25] P. Kumar, M. Belanche, N. Fur, L. Guzenko, J. Woerle, M.E. Bathen, U. Grossner. Mat. Sci. Forum, **1092**, 187–193 (2023). DOI: 10.4028/p-Oy444y
[26] T.V. Blank, Y.A. Goldberg, O.V. Konstantinov. Nuclear Instr. and Methods in Physics Research A, **509**, 109 (2003). DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01558-4
[27] T.V. Blank, Yu.A. Goldberg, E.V. Kalinina, O.V. Konstantinov, A.O. Konstantinov, A. Hallén. Semicond. Sci. Technol., **20**, 710–715 (2005). DOI: 10.1088/0268-1242/20/8/010