07

Моделирование процессов облучения структур Cr/4*H*-SiC высокоэнергетическими ионами Ar

© М.А. Чумак, Е.В. Калинина, В.В. Забродский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: equilibrium2027@yandex.ru

Поступило в Редакцию 7 октября 2024 г.
В окончательной редакции 27 января 2025 г.
Принято к публикации 30 января 2025 г.

Проведено комплексное математическое моделирование процессов образования радиационных дефектов при облучении 4*H*-SiC ионами Ar. Ультрафиолетовые фотодетекторы на основе барьеров Шоттки Cr/4*H*-SiC с концентрацией носителей заряда $3 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ в CVD-слое толщиной $5\,\mu\mathrm{m}$ облучались 7 раз ионами Ar флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (общий флюенс — $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$) с энергией 53 MeV. На основе результатов измерения внешней квантовой эффективности фотодетекторов при разных флюенсах облучения ионами Ar и моделирования процессов облучения в SRIM/TRIM показано, в каком диапазоне значений должна быть концентрация радиационных дефектов при облучении, чтобы произошло заметное снижение квантовой эффективности вплоть до его полной деградации при предельных флюенсах. Для указанной концентрации носителей заряда впервые экспериментально определен предельный флюенс ионов Ar, приводящий к полной деградации Cr/4*H*-SiC фотоприемников. В результате моделирования впервые определено соотношение вакансий кремния и углерода по глубине тормозного пути ионов Ar.

Ключевые слова: карбид кремния, ионы Ar, облучение, SRIM/TRIM, глубинные профили, внешняя квантовая эффективность.

DOI: 10.61011/JTF.2025.06.60465.356-24

Введение

Полупроводниковые приборы для силовых, высокочастотных и ядерных применений, создания детекторов излучений требуют использования высокотемпературных, радиационно-стойких материалов, работающих в агрессивных средах. Наиболее освоенным в промышленном отношении полупроводником является карбид кремния политипа 4*H* с его уникальными электрофизическими характеристиками. Большая ширина запрещенной зоны (3.23 eV), высокая теплопроводность (на уровне меди), чрезвычайно низкие значения токов утечки ($10-25\,\mathrm{A} \cdot \mathrm{cm}^{-2}$), высокие значения пороговой энергии образования дефектов позволяют работать при высоких температурах (до 900 °C) и при повышенных уровнях радиации [1–5]. Радиационная стойкость 4*H*-SiC доказана при облучении электронами, протонами, нейтронами, мощными рентгеновскими импульсами, а также ионами в широком диапазоне их масс и энергий [6,7]. Особый интерес представляет облучение тяжелыми ионами, имитирующими структурные повреждения, создаваемые осколками деления ядер [8,9]. Следует отметить отсутствие публикаций по оценке предельных флюенсов при облучении фотодетекторов ионами Ar, приводящих к полной деградации характеристик фотодетекторов на основе SiC.

Для прогнозирования результатов радиационного дефектообразования в полупроводниках при облучении потоками заряженных частиц используется математическое моделирование с применением программного комплекса TRIM, реализующего метод Монте-Карло [10]. Математическое моделирование также позволяет прогнозировать и анализировать характеристики новых приборов до их производства, тем самым существенно сокращая затраты на их разработку. Кроме того, оно дает возможность визуализировать многие физические явления и процессы в объеме полупроводника, измерение и оценка которых представляет определенные трудности при работе с реальным кристаллом [11–13]. При облучении 4*H*-SiC протонами и различными ионами математическое моделирование частично использовалось для определения потерь энергии, расчета профиля внедренных частиц, расчета количества вакансий и параметров ионно-индуцированных смещений [6,9,14–20].

Целью настоящей работы является определение предельного флюенса ионов Ar при пошаговом облучении детекторных структур Cr/4*H*-SiC с энергией 53 MeV флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (общий флюенс — $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$), проведение комплексного моделирования радиационного дефектообразования в облученных структурах, сопоставление результатов моделирования с изменением спектров внешней квантовой эффективности фотодетекторов Cr/4*H*-SiC.

1. Материалы и методы

1.1. Описание реального объекта моделирования

Моделирование облучения проводилось для образцов 4*H*-SiC с Cr барьерами Шоттки, предназначенными для детектирования ультрафиолетового (УФ) излучения в диапазоне длин волн 40–400 nm [21]. На подложках 4*H*-SiC толщиной 400 μm с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d-N_a = (1-3)\cdot 10^{18}\,\mathrm{cm}^{-3}$ методом химического вакуумного осаждения (CVD) наращивался сначала тонкий высоколегированный буферный слой толщиной $< 1\,\mu$m, а затем эпитаксиальный 4*H*-SiC слой толщиной 5 μm с концентрацией $N_d-N_a = 3\cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ (рис. 1). Cr/Al базовые контакты и Cr-барьеры Шоттки формировались термовакуумным напылением с использованием различных технологий напыления. Cr-барьеры Шоттки напылялись через маски диаметром 2–8 mm толщиной 20 nm.

Образцы облучались ионами Ar со стороны Cr-барьеров Шоттки пошагово 7 раз флюенсом $1\cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ с энергией 53 MeV при температуре 25 °C на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. С учетом характеристик циклотрона можно утверждать, что нагрев образцов при имплантации ионами Ar исключается. Флюенс определялся по полному заряду пучка ионов Ar, приносимого на облучаемую мишень. Поскольку SiC обладает накопительным эффектом, общий флюенс после семикратного облучения составлял $7\cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$. Однородность плотности образующихся радиационных дефектов по поверхности образцов при имплантации ионами Ar была не хуже 7 %.

Спектры внешней квантовой эффективности УФ фотоприемников Cr/4*H*-SiC измерялись методом сравнения с помощью монохроматора на базе спектрофотометра СФ-16. Источником УФ излучения в диапазоне длин волн 200–400 nm служила дейтериевая лампа ДДС-30. Регистрация токов осуществлялась с помощью пикоамперметра Keithley 6485, темновые токи Cr/4*H*-SiC фотодетекторов не превышали 10^{-13} A.

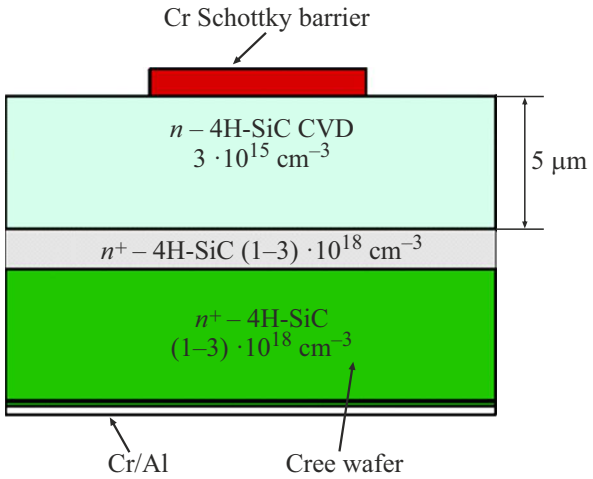


Рис. 1. Поперечное сечение детектора 4*H*-SiC с Cr барьером Шоттки.

1.2. Описание метода моделирования в SRIM/TRIM

С помощью программного обеспечения TRIM были проведены оценки глубины проникновения ионов Ar в структуру 4*H*-SiC при энергии 53 MeV, потерь энергии налетающих ионов и генерации фононов, общего числа дефектов и числа образовавшихся вакансий Si и C. Кроме того, с помощью программного обеспечения TRIM были рассмотрены особенности взаимодействия атомов мишени 4*H*-SiC с имплантированными ионами как в эпитаксиальном CVD-слое толщиной 5 μm, так и в подложке до полной остановки ионов при флюенсах облучения в диапазоне $1\cdot 10^{10}-7\cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$. При этом использовался расчет бинарных столкновений с учетом ион-ионного анализа Циглера [10]. Это широко используемая программа в области ионно-лучевого анализа, позволяющая изучать любой состав мишени при условии ввода корректных свойств облученной структуры. С помощью этого кода была оценена концентрация вакансий, созданных при воздействии пучка ионов Ar на 4*H*-SiC, в широком диапазоне их энергий. Согласно программе TRIM, при энергии ионов Ar 53 MeV тормозной путь ионов составлял $\sim 10\,\mu$m, т.е. они тормозились в подложке. Слой Cr толщиной 20 nm не влияет на процесс дефектообразования в SiC при энергии ионов 53 MeV.

Для более корректного определения концентрации вакансий был реализован детальный расчет с каскадным режимом полного повреждения. Материалом мишени служила структура 4*H*-SiC. Для корректного расчета вакансий в мишени использовался вариант расчета столкновений монослоев [10]. Поток падающих ионов можно рассчитать по току пучка, а флюенс связан со временем облучения.

2. Результаты и обсуждение

Расчетные характеристики по программе TRIM материала 4*H*-SiC и моделирования процесса облучения ионами Ar представлены в таблице с учетом общепринятых значений указанных параметров при плотности 4*H*-SiC, равной 3.21 g/cm^3.

На рис. 2, *a* показаны рассчитанные каскады столкновений ионов Ar с атомами мишени 4*H*-SiC на глубину 12 μm. Рассеяние ионов Ar при их внедрении в мишень составило не более 2.5 μm. При энергии 53 MeV общая глубина проникновения ионов Ar в 4*H*-SiC до полной остановки не превысила 10 μm. Распределение концентрации ионов Ar в структуре 4*H*-SiC показало, что наибольшее их количество сосредоточено на глубине 9.83 μm (рис. 2, *b*).

Распределение событий столкновений по глубине моделируемой структуры показано на двумерном графике

Параметры моделирования облучения SiC ионами Ar

Энергия Ar, MeV	53	
Флюенс, cm^{-2}	$1 \cdot 10^{10} - 7 \cdot 10^{10}$	
Число итераций	10^5	
Толщина мишени, μm	12	
Плотность мишени SiC, g/cm^3	3.21	
Атомы	Si	C
Стехиометрический состав	0.5	0.5
Энергия связи решетки, eV	3	2
Энергия связи атомов на поверхности, eV	7.41	4.47
Энергия смещения, eV	28	15

(рис. 2, *c*). Пик событий столкновений произошел на глубине около $9.83\,\mu$m при энергии ионов 53 MeV для мишени 4*H*-SiC, что согласуется с распределением концентрации ионов Ar (рис. 2, *b*). Общее число смещений составило 8860/ion. Число атомных вакансий Si и C, которое включено в общее число смещений, было определено как 8422/ion. Между тем число смещенных атомов во время ионного облучения составило 438/ion.

Рассчитано, что полная энергия, переданная на повреждение мишени в расчете на один ион, составляет 21.05 keV/ion. Основными из них являются ионизационные потери при прохождении ионов Ar в 4*H*-SiC до полной остановки (рис. 2, *d*). Интенсивность распределения относительной величины ионизационных потерь энергии ионов в 4*H*-SiC изменяется в зависимости от глубины проникновения ионов Ar. Полная энергия, переданная на ионизацию 4*H*-SiC, составила 52720.4 keV/ion. На рис. 2, *e* показаны детали распределения отдачи атомов мишени 4*H*-SiC. Распределение фононов по глубине структуры 4*H*-SiC в единицах eV/(Å-ion) показано на рис. 2, *f*. Фононы описываются как объемные колебания решетки атомов и молекул. В случае, когда переданная энергия не превышает энергию смещения, необходимую для удаления атома из ее кристаллической решетки на достаточное расстояние, он вернется в исходное состояние и испустит фонон. Если энергия превышает энергию смещения, то атом не возвращается в исходное состояние и испускание фонона не наблюдается. Полная энергия, переданная для генерации фононов в мишени 4*H*-SiC, составила 258.6 keV/ion. Согласно расчетам, наибольшее количество фононов наблюдается в конце тормозного пути ионов Ar на глубине $\sim 10\,\mu$m.

Потери на ионизацию, генерация фононов и энергия ионов Ar, поглощаемая атомами Si и C при облучении 4*H*-SiC ионами Ar с энергией 53 MeV, показаны на рис. 3, *a*. Полученные данные согласуются со значениями, представленными на рис. 2. К концу пути торможения ионов Ar ($\sim 10\,\mu$m) потери на ионизацию в 4*H*-SiC уменьшаются, особенно при прохождении ионами Ar CVD-слоя ($5\,\mu$m) и выходе на подложку, где они активно тормозятся. Потери энергии на образование фононов и энергия, поглощаемая атомами Si и C, наоборот, резко возрастают (рис. 3, *b, c*).

Изменения концентрации дефектов в структуре 4*H*-SiC с глубиной торможения ионов Ar для флюенса $1 \cdot 10^{10}\,cm^{-2}$ показаны на рис. 4, *a*. Кроме того, на рисунке показаны профили концентрации вакансий Si и C, их общее количество и количество смещенных атомов. Все профили распределения концентрации всех типов дефектов были аппроксимированы функцией Пирсона IV. Из результатов видно, что для структуры 4*H*-SiC наибольшее количество дефектов с концентрацией $8 \cdot 10^{17}\,atom/cm^3$ ожидается на глубине $9.83\,\mu$m при облучении ионами Ar данной энергии.

Концентрация дефектов в структуре 4*H*-SiC в CVD-слое на глубине $5\,\mu$m при облучении ионами Ar с флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,cm^{-2}$, согласно расчетам, составляет около $2.5 \cdot 10^{16}\,cm^{-2}$ (рис. 4, *b*). Расчетная суммарная концентрация дефектов в диапазоне флюенсов облучения ионами Ar $1 \cdot 10^{10} - 7 \cdot 10^{10}\,cm^{-2}$ при глубине CVD-слоя $5\,\mu$m находится в диапазоне $2.6 \cdot 10^{16} - 1.8 \cdot 10^{17}\,atom/cm^3$ (рис. 4, *c*).

Результаты расчетов также показали, что для указанных режимов облучения 4*H*-SiC ионами Ar наибольшее количество выбитых атомов приходится на Si, так как они поглощают большую часть поступающей от ионов энергии по сравнению с атомами C. Это обусловлено разницей в массах и размерах атомов Si (радиус 0.24 nm, масса 28.0855 a.m.u.) и атомов C (радиус 0.154 nm, масса 12.0107 a.m.u.). Следует отметить, что отношение концентраций вакансий Si и C по глубине тормозного пути ионов Ar в 4*H*-SiC ($\sim 10\,\mu$m) нелинейно и уменьшается от 2.42 до 2.19 (рис. 4, *d*). Рост концентраций вакансий C происходит быстрее, чем рост вакансий Si, что связано с вторичным образованием радиационных дефектов в каскадах смещений [19].

Рассчитанная суммарная концентрация дефектов для флюенсов облучения ионами Ar $1 \cdot 10^{10} - 7 \cdot 10^{10}\,cm^{-2}$ отразилась в результатах квантовой эффективности фотодетекторов Cr/4*H*-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{15}\,cm^{-3}$ в CVD-слое. Квантовая эффективность снизилась с 0.7 electron/photon для необлученного образца до 0.01 electron/photon при облучении фотодетектора флюенсом $7 \cdot 10^{10}\,cm^{-2}$ (рис. 5). Для фотодетектора Cr/4*H*-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{15}\,cm^{-3}$ в CVD-слое флюенс ионов Ar, равный $7 \cdot 10^{10}\,cm^{-2}$, оказался фатальным, в результате чего детектор деградировал. График на рис. 5 представлен при облучении ультрафиолетовым излучением с длиной волны 240 nm (прямой переход).

Таким образом, согласно расчетам и данным экспериментов, для того, чтобы произошло снижение квантовой эффективности фотодетектора на основе SiC, концентрация радиационных дефектов в приповерхностной области прибора, на которой поглоща-

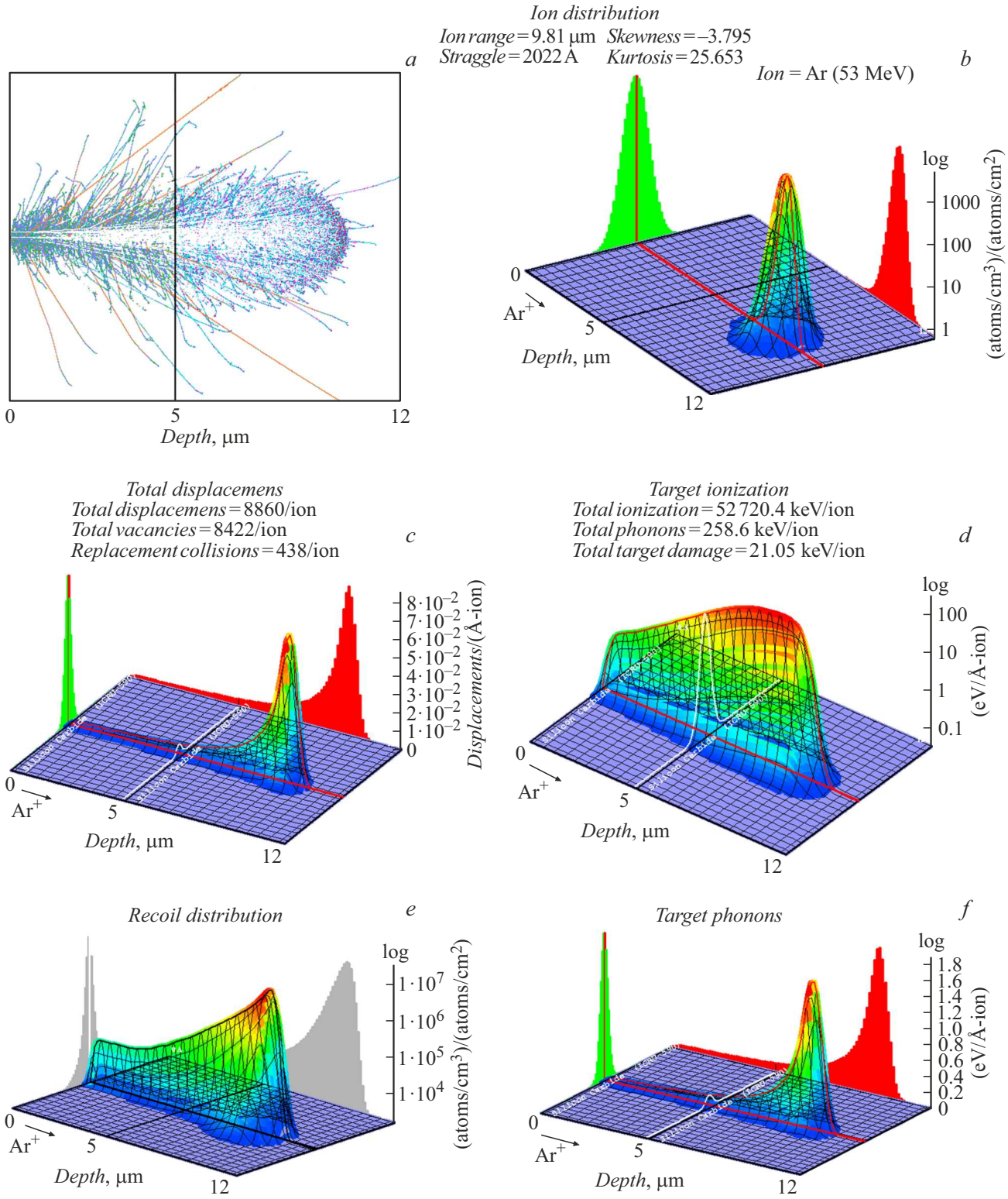


Рис. 2. Расчетные характеристики, полученные при моделировании облучения структуры 4*H*-SiC с $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ ионами Ar с энергией 53 MeV: *a* — каскады смещений, образованные ионами Ar при облучении 4*H*-SiC; *b* — профиль распределения имплантированных ионов Ar в 4*H*-SiC; *c* — распределение полных смещений; *d* — ионизационные потери мишени; *e* — распределение атомов отдачи; *f* — генерация фононов.

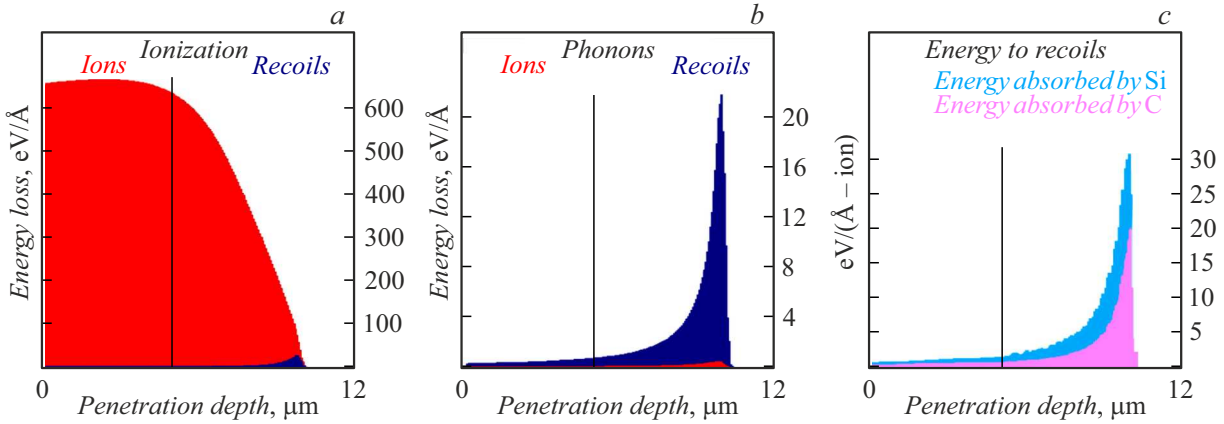


Рис. 3. Результаты моделирования облучения структуры 4*H*-SiC с $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ ионами Ar с энергией 53 MeV и флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$: *a* — ионизационные потери мишени, *b* — генерация фононов, *c* — энергия ионов Ar, поглощенная атомами Si и C.

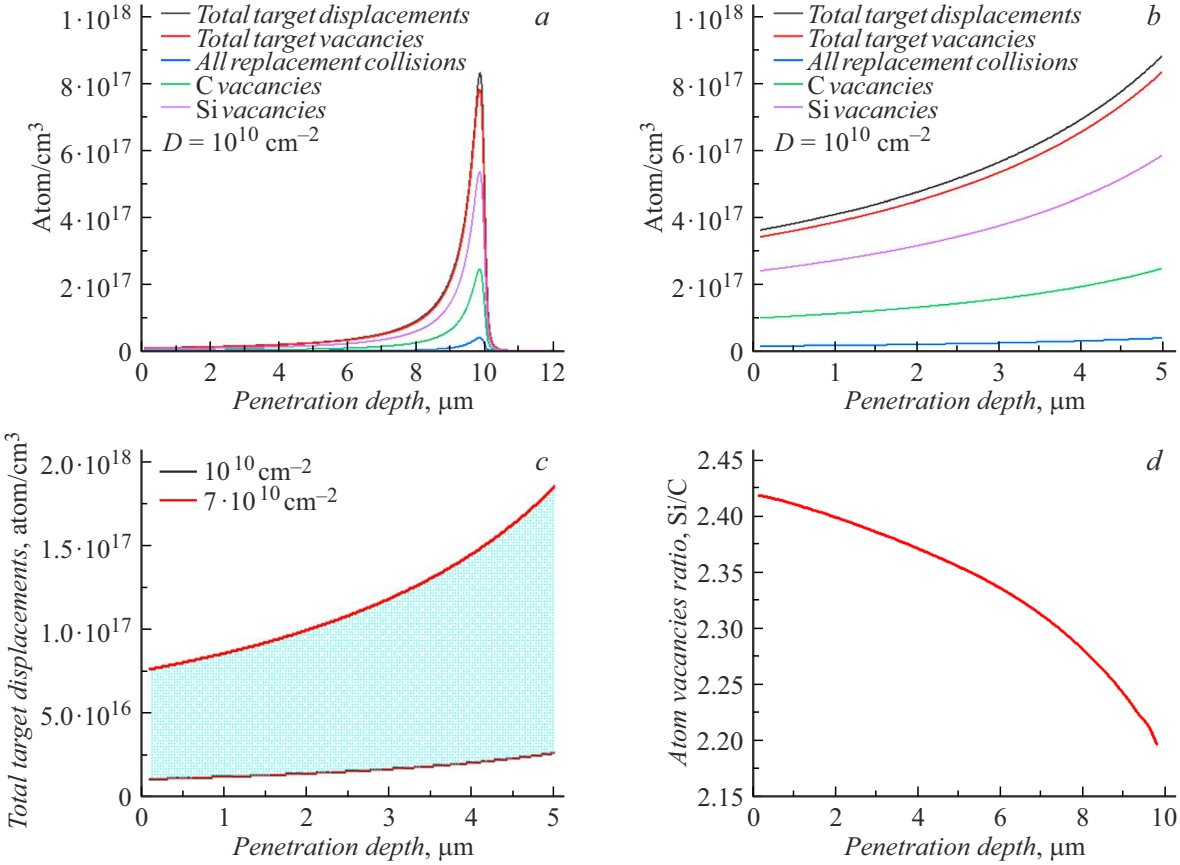


Рис. 4. Результаты моделирования облучения структуры 4*H*-SiC с уровнем легирования $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ ионами Ar с энергией 53 MeV: *a, b* — распределение различных типов дефектов в зависимости от глубины проникновения ионов Ar при облучении 4*H*-SiC флюенсом $1 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$; *c* — полные смещения в CVD-слое 4*H*-SiC толщиной $5\,\mu$m при флюенсах облучения в диапазоне $1 \cdot 10^{10} - 7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$; *d* — соотношение концентраций вакансий Si и C в зависимости от глубины проникновения ионов Ar ($\sim 10\,\mu$m).

ется ультрафиолетовое излучение, должна быть в пределах $2.6 \cdot 10^{16} - 1.8 \cdot 10^{17}\,\mathrm{atom/cm}^3$. Также полученный профиль концентрации радиационных дефектов для SiC на предельных флюенсах ионов Ar, равный $5 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$, показал, что полная деградация характеристик фотокатодов на основе 4*H*-SiC происходит при концентрации дефектов, лежащей в диапазоне $5.2 \cdot 10^{16} - 1.8 \cdot 10^{17}\,\mathrm{atom/cm}^3$.

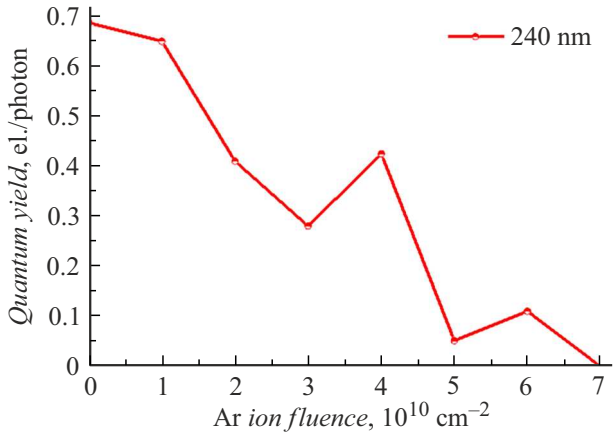


Рис. 5. Зависимость квантовой эффективности детектора Cr/4*H*-SiC с уровнем легирования $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ в CVD-слое для ультрафиолетового излучения с длиной волны 240 nm от флюенсов облучения ионами Ar.

Заключение

По результатам численного моделирования процесса облучения высокоэнергетическими ионами Ar структур Cr/4*H*-SiC можно сделать следующие выводы:

1) при облучении 4*H*-SiC ионами Ar с энергией 53 MeV тормозной путь ионов до полной остановки не превышает 10 μm для флюенсов $1-7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^2$;

2) общая концентрация радиационных дефектов, рассчитанная в диапазоне флюенсов облучения $1 \cdot 10^{10}-7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$, лежит в пределах $2.6 \cdot 10^{16}-1.8 \cdot 10^{17}\,\mathrm{atom/cm}^3$;

3) увеличение концентрации радиационных дефектов при имплантации ионов Ar от $2.6 \cdot 10^{16}$ до $1.8 \cdot 10^{17}\,\mathrm{atom/cm}^3$ приводит к снижению внешней квантовой эффективности фотодетектора Cr/4*H*-SiC;

4) экспериментально установлен предельный флюенс $7 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ при имплантации ионов Ar с энергией 53 MeV, приводящий к полной деградации фотоприемника Cr/4*H*-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ в CVD-слое;

5) соотношение концентраций вакансий Si и C по глубине тормозного пути ионов Ar в эпитаксиальном слое 4*H*-SiC нелинейно и изменяется в диапазоне 2.42–2.19, что связано с вторичным образованием радиационных дефектов в каскадах смещения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Финансирование работы

Е.В. Калинина выражает благодарность за частичную финансовую поддержку Российскому научному фонду (проект № 22-12-00003). М.А. Чумак благодарит государственное задание (проект № FFUG-2024-0044) за частичную поддержку исследований.

Список литературы

[1] J.R. O'Connor, J.R. Smiltens. Semiconductors, **1**, 388 (1960).
[2] J.A. Powell, P.G. Neudeck, L.G. Matus, J.B. Petit. Symp. Proc., **242**, 495 (1992).
[3] O. Kordina, J.P. Bergman, A. Henry, E. Janzen, S. Savage, J. Andre, K. Bergman. Appl. Phys. Lett., **67** (11), 1561 (1995). https://doi.org/10.1063/1.114734
[4] W.J. Choyke, G. Pensl. Mrs Bull., **22** (3), 25 (1997). https://doi.org/10.1557/S0883769400032723
[5] Y. Zhang, W.J. Weber, W. Jiang, A. Hallén, G. Possnert. J. Appl. Phys., **91** (10), 6388 (2002). https://doi.org/10.1063/1.1469204
[6] P.A. Persson, L. Hultman, M.S. Janson, A. Hallén, R. Yakimova, D. Panknin, W. Skorupa. J. Appl. Phys., **92** (5), 2501 (2002). https://doi.org/10.1063/1.1499749
[7] A.Y. Nikiforov, P.K. Skorobogatov, D.V. Boychenko, V.S. Figurov, V.V. Luchinin, E.V. Kalinina. RADECS-2003, **527**–**528**, 1473 (2003).
[8] I. Lhermitte-Sebire, J.L. Chermant, M. Levalois, E. Paumier, J. Vicens. Radiation Effects and Defects in Solids, **126** (1–4), 173 (1993). https://doi.org/10.1080/10420159308219702
[9] W.J. Weber, L.M. Wang, N.Yu. Nucl. Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, **116** (1–4), 322 (1996). https://doi.org/10.1016/0168-583X(96)00066-3
[10] J. Ziegler. SRIM code. http://www.srim.org. Last access: January 17th (2022).
[11] П.П. Панченко, А.А. Малахов, С.Б. Рыбалка, А.В. Радьков. Ж. Радиоэлектроника, **8**, 1 (2016). [P.P. Panchenko, A.A. Malakhov, S.B. Rybalka, A.V. Rad'kov. J. Radio Electron., **8**, 1684 (2016).
[12] В.В. Муравьев, В.Н. Мищенка. Доклады БГУИР, **104** (2), 53 (2007).
[13] E.A. Kulchenkov, S.B. Rybalka, A.A. Demidov, A.Yu. Drakin. Appl. Mathem. Phys., **52** (1), 33 (2020). https://doi.org/10.18413/2687-0959-2020-52-1-33-40
[14] А.И. Михайлов, А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, С.А. Решанов, M. Krieger, A. Schöner, T. Sledziewski. ФТП, **48** (12), 1621 (2014). [A.I. Mikhaylov, A.V. Afanasiev, V.A. Ilyin, V.V. Luchinin, S.A. Reshanov, M. Krieger, A. Schöner, T. Sledziewski. Semiconductors, **48** (12), 1581 (2014). https://doi.org/10.1134/S1063782614120148]
[15] Е.В. Калинина, Г.Ф. Холуянов, Г.А. Онушкин, Д.В. Давыдов, А.М. Стрельчук, А.О. Константинов, A. Hallen, А.Ю. Никифоров, В.А. Скуратов, K. Havancsak. ФТП, **38** (10), 1223 (2004). [E.V. Kalinina, G.F. Kholuyanov, G.A. Onushkin, D.V. Davydov, A.M. Strel'chuk, A.O. Konstantinov, A. Hallén, A.Yu. Nikiforov, V.A. Skuratov, K. Havancsak. Semiconductors, **38**, 1187 (2004). https://doi.org/10.1134/1.1808826]
[16] S.J. Zinkle, J.W. Jones, V.A. Skuratov. MRS Symp. Proceed., **650**, R3.19.1 (2000). https://doi.org/10.1557/PROC-650-R3.19
[17] P. Kumar, M. Belanche, N. Fur N, L. Guzenko, J. Woerle, M.E. Bathen, U. Grossner. MSF, **1092**, 187 (2023). https://doi.org/10.4028/p-0y444y

[18] L. Liszkay, K. Havancsak, M.-F. Barthe, P. Desgardin, L. Henry, Zs. Kajcsos, G. Battistig, E. Szilagyi, V.A. Skuratov. Mater. Sci. Forum, **363**, 123 (2001). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.363-365.123
[19] В.В. Козловский, А.Э. Васильев, П.А. Карасев, А.А. Лебедев. ФТП, **52** (3), 327 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.03.45616.8741 [V.V. Kozlovski, A.E. Vasil'ev, P.A. Karasev, A.A. Lebedev. Semiconductors, **52**, 310 (2018). https://doi.org/10.1134/S1063782618030132]
[20] M.J. Madito, T.T. Hlatshwayo, V.A. Skuratov, C.B. Mtshali, N. Manyala, Z.M. Khumalo. Appl. Surf. Sci., **493**, 1291 (2019). https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.147
[21] A. Gottwald, U. Kroth, E. Kalinina, V. Zabrodskii. Appl. Opt., **57** (28), 8431 (2018). https://doi.org/10.1364/AO.57.008431