

Облучение ионами аргона Cr/4H-SiC-фотоприемников

© Е.В. Калинина, М.Ф. Кудояров, И.П. Никитина, Е.В. Дементьева, В.В. Забродский

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

E-mail: evk@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 16 октября 2021 г.

В окончательной редакции 5 ноября 2021 г.

Принята к публикации 5 ноября 2021 г.

Представлены результаты влияния облучения ионами Ar на структурные, электрофизические и оптические характеристики ультрафиолетовых Cr/4H-SiC-фотоприемников спектрального диапазона 200–400 нм. После однократного облучения ионами Ar с энергией 53 МэВ флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ значения квантовой эффективности фотоприемников практически оставались на уровне исходных образцов за счет „эффекта геттерирования“ простых радиационных дефектов кластерными образованиями. Наблюдаемый эффект способствовал уменьшению количества простых радиационных дефектов вакансионного типа, росту времени жизни носителей тока и, как следствие, неизменным значениям фотопроводимости Cr/4H-SiC-фотоприемников. После повторного облучения фотоприемников ионами Ar общим флюенсом $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ наблюдался распад кластеров, образование значительного количества простых дефектных центров, что приводило к снижению времени жизни носителей тока и фотопроводимости Cr/4H-SiC-детекторов.

Ключевые слова: карбид кремния, облучение, аргон, квантовая эффективность.

DOI: 10.21883/FTP.2022.02.51971.9745

1. Введение

Как отмечалось в работе [1], современное развитие космических исследований, а также диагностика „озоновых дыр“ обуславливают интерес к обнаружению электромагнитного излучения в ультрафиолетовом (УФ) спектральном диапазоне 40–400 нм. Поскольку значительная часть УФ-излучения поглощается верхними слоями атмосферы, его эффективное наблюдение возможно только на борту космических аппаратов при их работе в космосе с его повышенной радиационной активностью. Работа в столь сложных условиях требует использования „видимо-слепых“ и радиационно стойких детекторов. Для создания фотоприемников УФ-излучения перспективным является полупроводник 4H-SiC. Ширина запрещенной зоны материала $E_g = 3.23 \text{ эВ}$ обеспечивает нечувствительность к видимому излучению и исключает необходимость использования УФ-светофильтров. Чрезвычайно малые значения токов генерации и высокая теплопроводность материала исключают необходимость в принудительном охлаждении устройств даже при повышенных температурах, что значительно снижает габариты и затраты энергии на оборудование. Радиационная стойкость исходного материала и различных приборов на основе 4H-SiC была широко исследована при облучении электронами, нейтронами, протонами и подтверждена их высокая радиационная стойкость [2–4]. Самостоятельный интерес представляют исследования радиационной стойкости УФ-детекторов при облучении тяжелыми ионами высоких энергий, поскольку они моделируют структурные повреждения полупроводников, создаваемые осколками ядерного деления, которые являются фатальными для полупроводниковой электроники. Высокая радиационная стойкость устройств 4H-SiC с

p - n -переходами и барьерами Шоттки была показана при облучении высокоэнергетическими ионами Kr, Xe и Bi [5,6]. Недавно эффективность фотоприемников с барьерами Шоттки была исследована после облучения ионами Ar с энергией 53 МэВ флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ [1].

В данной статье представлены результаты облучения УФ-детекторов Cr/4H-SiC ионами Ar с энергией 53 МэВ с последующим набором флюенсов.

2. Методика эксперимента

Фотоприемники были сформированы на основе эпитаксиальных слоев n -4H-SiC, выращенных методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) толщиной 5 мкм и концентрацией $N_d - N_a = (1 - 50) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ на n^+ -4H-SiC-подложках с $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Базовые контакты Cr/Al и Cr-барьеры Шоттки диаметром 8 мм и толщиной 20 нм были сформированы на CVD слоях термическим испарением в вакууме. Фотодиодные структуры дважды последовательно облучались ионами Ar с энергией 53 МэВ при комнатной температуре флюенсами $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Поскольку SiC обладает накопительным эффектом радиации, общий флюенс после второго облучения составлял $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Структурные превращения, происходящие в 4H-SiC при облучении ионами Ar, исследовались с помощью рентгеноструктурного анализа (X-ray). Измерения симметричного отражения (0008) проводились на двухкристальном спектрометре, собранном на базе промышленного дифрактометра ДРОН-3 по методике, описанной в работе [7]. Шаг сканирования при измерениях в направлении 2ω составлял 0.005° .

Спектры катодолюминесценции (CL) CVD слоев 4H-SiC были получены при температуре 77 К, энергии

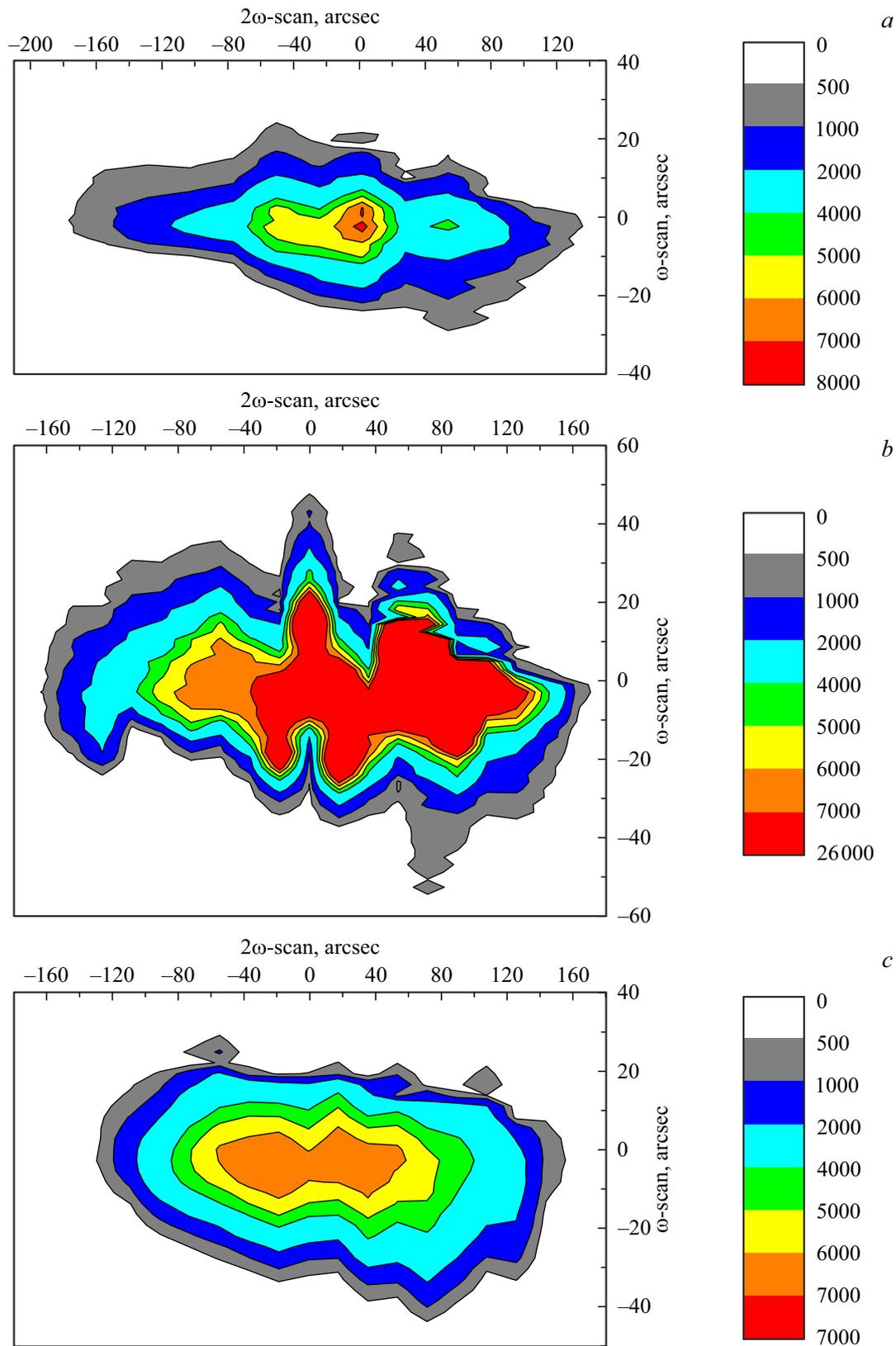


Рис. 1. Распределение интенсивности отражения вблизи узла обратной решетки на отражении (0008) в исходном образце 4H-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в CVD эпитаксиальном слое (a) и после облучения ионами Ag с энергией 53 МэВ флюенсами $1 \cdot 10^{10}$ (b) и $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (c). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

электронов 10 кэВ, токе электронного пучка 100 нА, диаметре электронного пучка 5 мкм и нормированы на интенсивность донорно-акцепторных переходов.

Спектры квантовой эффективности образцов измерены методом сравнения с монохроматором на базе спектрофотометра СФ-16. Источником УФ излучения непрерывного спектра в диапазоне длин волн 220–400 нм служила дейтериевая лампа ДДС-30. Токи регистрировались пикоамперметром Keithley 6485.

Вольт-амперные (ВАХ) характеристики снимались на постоянном токе при температуре 25°C.

3. Результаты эксперимента

3.1. Рентгеновские измерения

Согласно расчетам с помощью программного обеспечения SRIM, пробег ионов Ar с энергией 53 МэВ составляет ~ 10 мкм, поэтому распределение радиационных дефектов можно считать равномерным по толщине CVD слоя (5 мкм).

Уже в исходном образце 4H-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в CVD эпитаксиальном слое присутствует небольшая локальная область с меньшим параметром по сравнению с ненарушенной матрицей, т.е. область, пересыщенная вакансиями. Кроме того, присутствует нелокализованная область с большим параметром (рис. 1, а). После первого облучения ионами Ar флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$ наблюдалось интенсивное разрушение исходной структуры с образованием двух мощных локализованных областей с отрицательной деформацией, пересыщенных вакансиями. По угловому положению этой области можно предположить, что она образовалась на месте локальной области, уже отмеченной в исходном образце, но значительно более обогащенной вакансиями, возникшими в результате облучения. В то же время происходит и усиление области с большим параметром с положительной деформацией, т.е. обогащенной межузельными атомами (рис. 1, б).

Такое изменение структуры позволило высказать предположение о функции напряженных кластеров с высокой концентрацией вакансионных дефектов и межузельных атомов как эффективных геттеров для формирующихся в процессе облучения простых дефектов, так называемый „эффект геттерирования“ в полупроводниках [8,9]. В результате 2-го облучения 4H-SiC ионами Ar общим флюенсом $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ наблюдается разрушение области, богатой вакансиями, при сохранении области, богатой межузельными атомами, что приводит к выравниванию вклада обеих областей и ненарушенной матрицы в отражение рентгеновских лучей вблизи узла обратной решетки на отражении (0008) (рис. 1, в).

Для более наглядной демонстрации трансформации исходной структуры 4H-SiC CVD эпитаксиального слоя после облучения ионами Ar с энергией 53 МэВ были построены гистограммы в двух направлениях ω -сканирования как вдоль 2ω -, так и вдоль ω -направления (рис. 2).

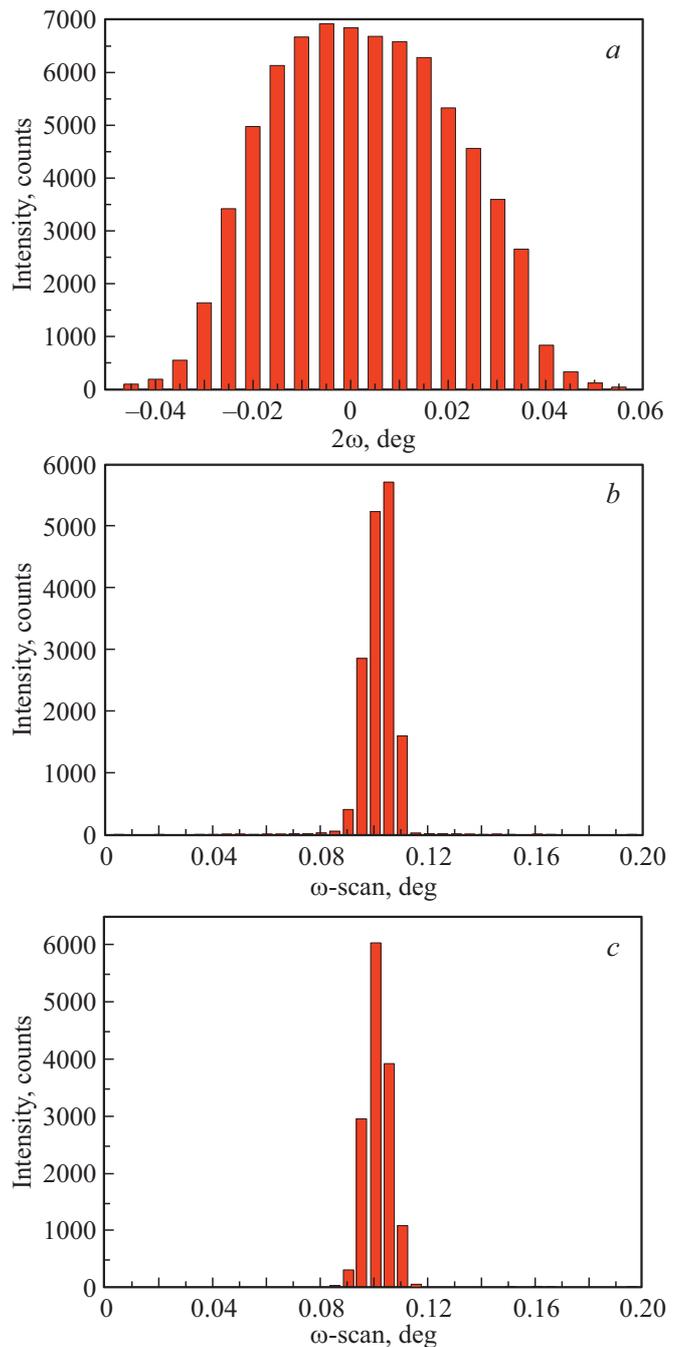


Рис. 2. Зависимость максимальной интенсивности отражения после второго облучения ионами Ar флюенсом $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ образцов 4H-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в CVD эпитаксиальном слое от двойного брэгговского угла при $\omega = 0$ (а), зависимость максимальной интенсивности отражения от брэгговского угла при $2\omega = 0.015^\circ$ (в области с отрицательной деформацией) (б) и при $2\omega = -0.015^\circ$ (в области с положительной деформацией) (с).

Значения максимальной интенсивности отражения при 2ω -сканировании ($\omega = 0$) (рис. 2, а) образцов 4H-SiC наглядно демонстрирует выравнивание распределения интенсивности вблизи узла обратной ре-

шетки после второго облучения ионами Ar флюенсом $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ по сравнению с распределением после первого облучения флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. При 2ω -сканировании в области с отрицательной деформацией ($2\omega = 0.015^\circ$) после второго облучения в структуре остается лишь одна область, обогащенная вакансиями (рис. 2, b). В области с положительной деформацией при 2ω -сканировании ($2\omega = -0.015^\circ$) наблюдалась область, обогащенная межузельными атомами, по интенсивности соизмеримая с областью, обогащенной вакансиями (рис. 2, c).

3.2. Католюминесценция

Результаты измерений CL исходных образцов 4H-SiC и структур, последовательно дважды облученных ионами Ar, согласуются с рентгеновскими исследованиями.

Как отмечалось ранее в работах [1,7], в исходном образце 4H-SiC наблюдалась интенсивная полоса с максимумом 3.17 эВ, обусловленная рекомбинацией свободного экситона (рис. 3) [10]. Кроме того, в спектрах присутствовала широкая полоса с максимумом 2.2 эВ, типичная для 4H-SiC и обусловленная наличием глубоких уровней в запрещенной зоне [11]. После первого облучения 4H-SiC ионами Ar флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ интенсивность экситонного пика при 3.17 эВ заметно уменьшалась (рис. 3, кривая 2), а при повторном облучении ионами Ar суммарным флюенсом $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ становилась незначительной (рис. 3, кривая 3). В то же время дефектная полоса 2.2 эВ, наблюдаемая в исходном образце, трансформировалась в спектр с максимумом при 2.6 эВ, так называемый D_1 — дефектный центр вакансионной природы [12].

Этот радиационный дефектный центр наблюдался и ранее в 4H- и 6H-SiC после облучения нейтронами, электронами, легкими и тяжелыми ионами [13]. Интенсивность этого центра уменьшалась с увеличением флюенса ионов Ar для структур с концентрациями в CVD слое $N_d - N_a = (1 - 50) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Большая ширина спектра D_1 свидетельствует о введении при облучении ионами Ar большого числа радиационных дефектов, которые в зависимости от флюенсов по-разному влияли на процессы компенсации CVD слоя, а также на процессы фотопроводимости Cr/4H-SiC-фотоприемника. Некоторые из них носили компенсирующий характер, о чем свидетельствует повышение дифференциального сопротивления фотоприемников после первого облучения ионами Ar в десятки раз, а после второго облучения в сотни раз, в зависимости от концентрации $N_d - N_a$ в исходных образцах.

3.3. Спектральные измерения

Процессы структурных перестроек в 4H-SiC CVD эпитаксиальных слоях после облучения ионами Ar с энергией 53 МэВ различными флюенсами, выявленные в рентгеновских и CL исследованиях, отразились в спектрах фоточувствительности Cr/4H-SiC-фотоприемников (рис. 4).

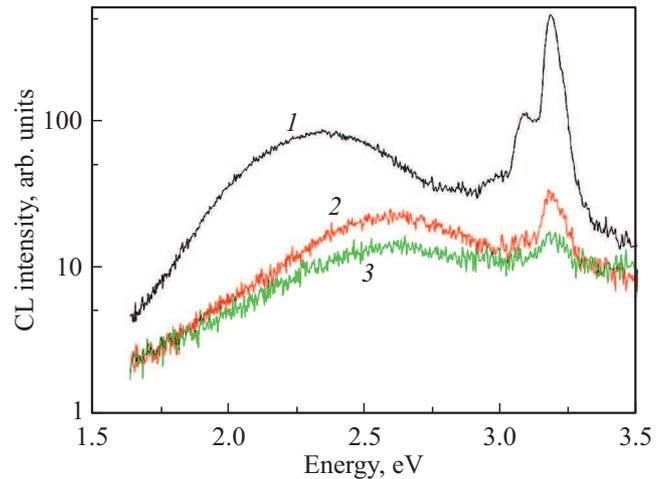


Рис. 3. Спектры католюминесценции исходного образца 4H-SiC с концентрацией $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в CVD эпитаксиальном слое (1), после облучения ионами Ar с энергией 53 МэВ флюенсами $1 \cdot 10^{10}$ (2) и $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (3).

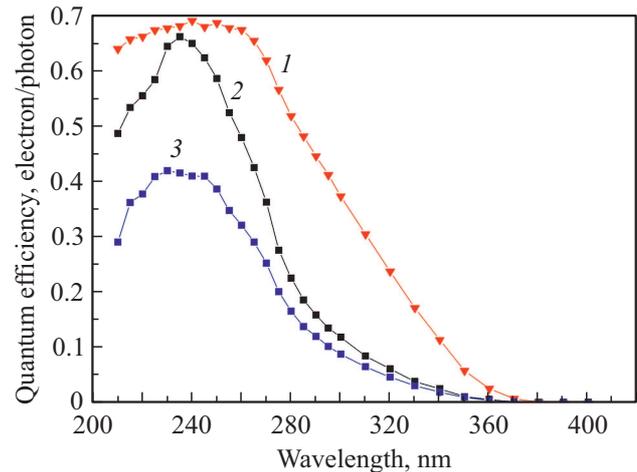


Рис. 4. Спектры квантовой эффективности Cr/4H-SiC-фотоприемников исходных с концентрацией $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в CVD эпитаксиальном слое (1), после облучения ионами Ar с энергией 53 МэВ флюенсами $1 \cdot 10^{10}$ (2) и $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (3).

Как отмечалось в работе [1], после первого облучения ионами Ar флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ значения квантовой эффективности Cr/4H-SiC-фотоприемников практически оставались на уровне исходных образцов за счет „эффекта геттерирования“ простых радиационных дефектов кластерными образованиями. Наблюдаемый эффект способствовал уменьшению количества простых радиационных дефектов вакансионного типа, росту времени жизни неравновесных носителей тока и, как следствие, значениям фотопроводимости Cr/4H-SiC-фотоприемников на уровне исходных образцов. Однако после повторного облучения ионами Ar флюенсом $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ наблюдалось уменьшение квантовой эффективности детекторных структур. Эффект согласуется с данными, полученными при X-ray исследовании — распадом кластерных

образований, возросшим числом простых радиационных дефектов вакансионного типа и межузельных атомов, что привело к уменьшению времени жизни носителей тока, отвечающих за фотопроводимость.

Значительные изменения в спектральных кривых наблюдаются в длинноволновой области, которая определяется непрямыми переходами в 4H-SiC [14]. Они имеют одинаковый характер после первого и второго облучения ионами Ar, что может свидетельствовать об их одинаковой природе.

4. Заключение

Облучение 4H-SiC ионами Ar с энергией 53 МэВ флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ приводит к сложным структурным изменениям. Согласно X-ray исследованиям, в результате облучения образуются кластеры SiC, обогащенные как вакансиями, так и межузельными атомами, которые являются стоками для простых дефектов.

Наблюдаемый „эффект геттерирования“ после первого облучения ионами Аргона флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ обеспечивает квантовую эффективность УФ-детекторов 4H-SiC на уровне исходных образцов 0.67%.

Повторное облучение 4H-SiC ионами Ar суммарным флюенсом $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ разрушило кластерные образования, привело к ослаблению „геттерирующего эффекта“ простых радиационных дефектов, к уменьшению времени жизни носителей заряда и уменьшению квантовой эффективности.

Длинноволновая часть спектра квантовой эффективности УФ-фотоприемников Cr/4H-SiC после облучения ионами Ar определяется непрямыми переходами; их количество и характер характеризуются уширением спектра CL с максимумом 2.6 эВ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.В. Калинина, М.Ф. Кудояров, И.П. Никитина, Е.В. Дементьева, В.В. Забродский. ФТП, **54** (11), 1244 (2020).
- [2] C. Hemmingsson, N.T. Son, O. Kordina, J.P. Bergman, E. Janzén, J.L. Lindström. J. Appl. Phys., **81**, 6155 (1997).
- [3] V. Nagest, J.W. Farmer, R.F. Davis, H.S. Kong. Appl. Phys. Lett., **50**, 1138 (1987).
- [4] D.M. Martin, H. Kortegaard Nielsen, P. Leveque, A. Hallén. Appl. Phys. Lett., **84**, 1704 (2004).
- [5] Е.В. Калинина, В.Г. Коссов, Р.Р. Яфаев, А.М. Стрельчук, Г.Н. Виолина. ФТП, **44** (6), 807 (2010).
- [6] Е.В. Калинина, А.А. Лебедев, Е. Богданова, В. Berenquier, L. Ottaviani, Г.Н. Виолина, В.А. Скуратов. ФТП, **49** (4), 550 (2015).
- [7] Е.В. Калинина, Г.Н. Виолина, И.П. Никитина, М.Я. Яговкина, Е.В. Иванова, В.В. Забродский. ФТП, **53** (6), 856 (2019).
- [8] F.L. Wong, N.W. Cheung, P.K. Chu. Appl. Phys. Lett., **152**, 889 (1988).

- [9] В.А. Перевошиков, В.Д. Скупов. Геттерирование примесей и дефектов в полупроводниках (Н. Новгород, Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2002) ч. 1, гл. 3.
- [10] M. Ikeda, H. Matsunami. Phys. Status Solidi A, **58**, 657 (1980).
- [11] Ю.А. Водаков, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, М.Г. Рамм, В.И. Соколов. ФТП, **20**, 2153 (1986).
- [12] W.J. Choyke. In: Proc. Int. Conf. on Radiation Effects in Semiconductors (IOP Conf. Proc. Institute of Physics and Physical Society, London, 1977) p. 58.
- [13] Е.В. Калинина, Г.Ф. Холуянов, Г.А. Онушкин, Д.В. Давыдов, А.М. Стрельчук, А.О. Константинов, А. Hallen, А.Ю. Никифоров, В.А. Скуратов, К. Havancsak. ФТП, **38** (10), 1223 (2004).
- [14] T.V. Blank, Y.A. Goldberg, O.V. Konstantinov. Nucl. Instrum Meth. Phys. Res. A, **509**, 109 (2003).

Редактор Г.А. Оганесян

Irradiation with argon ions of Cr/4H-SiC-photodetectors

E.V. Kalinina, M.F. Kudoyarov, I.P. Nikitina, E.V. Dementyeva, V.V. Zabrodskii

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of the effect of irradiation with Ar ions on the structural, electrophysical and optical characteristics of the ultraviolet Cr/4H-SiC photodetectors in the spectral range of 200–400 nm are presented. After a single irradiation with 53 MeV Ar ions with a fluence of $1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, the quantum efficiency of the photodetectors practically remained at the level of the initial samples due to the „gettering effect“ of simple radiation defects by cluster formations. The observed effect promoted a decrease in the number of simple radiation defects of the vacancy type, an increase in the lifetime of current carriers, and, as a consequence, unchanged values of the photoconductivity of Cr/4H-SiC photodetectors. After repeated irradiation of the photodetectors with Ar ions with a total fluence of $2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, the decay of clusters was observed, the formation of a significant number of simple defect centers, which led to a decrease in the lifetime of current carriers and, as a consequence, to a decrease in photoconductivity of Cr/4H-SiC photodetectors.