

## Структурные и оптические характеристики ультрафиолетовых 4H-SiC-детекторов, облученных ионами аргона

© Е.В. Калинина, М.Ф. Кудояров, И.П. Никитина, Е.В. Иванова, 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 13 июля 2020 г.  
В окончательной редакции июля 2020 г.  
Принята к публикации июля 2020 г.

Представлены результаты исследования влияния облучения тяжелыми ионами Ar на структурные и оптические характеристики 4H-SiC. Показано, что в результате уже однократного облучения ионами Ar с энергией 53 МэВ, флюенсом  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  в структуре карбида кремния преобладают как минимум две мощные локальные области с отрицательной деформацией. Наряду с этим в структуре наблюдается также область с положительной деформацией. Формирование локализованных кластеров с отрицательной и положительной деформациями наряду с ненарушенной матрицей сопровождается образованием дефектов линейного типа, частично снимающих напряжения в структуре. Предполагается, что возникающая сложная дефектная структура при облучении ионами Ar обеспечивает эффект геттерирования точечных дефектов и приводит к значениям квантовой эффективности ультрафиолетовых 4H-SiC-фотоприемников на уровне исходных образцов.

**Ключевые слова:** карбид кремния, облучение ионами Ar, квантовая эффективность.

DOI: 10.21883/FTP.2020.11.50096.9481

### 1. Введение

Современное развитие космонавтики, изучение планет и их спутников, исследование межзвездного и межпланетного пространства, а также диагностика „озоновых дыр“ обуславливают интерес к обнаружению электромагнитного излучения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне 200–400 нм. Поскольку значительная часть УФ излучения поглощается в верхних слоях атмосферы, его эффективное наблюдение возможно только с борта ракет и космических аппаратов в космосе с его повышенной радиационной активностью. В дополнение к космическим применениям надежное количественное измерение этого коротковолнового излучения актуально в таких научных областях, как метрология, радиационный контроль ускорителей частиц (таких, как синхротроны и токамак) и эксперименты по фотоионизации в атомной физике и физике твердого тела.

Работа в таких сложных условиях требует применения „видимо-слепых“ и радиационно стойких к частицам высоких энергий детекторов. Перспективным полупроводником для создания УФ фотоприемников является 4H-SiC (ширина запрещенной зоны  $E_g = 3.23 \text{ эВ}$ ), не чувствительный к видимому и инфракрасному излучению, т.е. „видимо-слепой“. Это исключает необходимость применения светофильтров, что намного облегчает оптическую аппаратуру. Чрезвычайно низкие значения генерационных токов позволяют работать с детекторами на основе 4H-SiC без принудительного охлаждения даже при повышенных температурах, что намного снижает габариты и энергозатраты аппаратуры.

Многочисленные исследования подтвердили высокую радиационную стойкость материала 4H-SiC и приборов на его основе при облучении электронами, нейтронами и легкими ионами в широком интервале их масс и энергий [1–6]. В частности, УФ 4H-SiC-фотоприемники на основе барьеров Шоттки с Cr выдерживали облучение протонами с энергией 15 МэВ флюенсами до  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . При этом наблюдалось увеличение фотопроводимости в интервале 200–400 нм за счет эффекта геттерирования радиационных точечных дефектов [7].

Самостоятельный интерес представляют исследования радиационной стойкости УФ детекторов при облучении тяжелыми ионами высоких энергий в условиях высокого уровня ионизационных потерь и высокой скорости генерации радиационных дефектов. Облучение ионами высоких энергий с массой  $> 50 \text{ а.е.м.}$  моделирует структурные повреждения в полупроводниках, создаваемых фрагментами ядерного деления, фатальными для полупроводниковой электроники. Радиационная стойкость 4H-SiC-выпрямителей на основе ионно-легированных  $p^+ - n$ -переходов подтверждена при облучении тяжелыми ионами Kг и Вi [8,9]. Ультрафиолетовые 4H-SiC-фотоприемники на основе ионно-легированных  $p - n$ -переходов и Cr-барьеров Шоттки исследовались при облучении ионами Хе с энергией 167 МэВ [10]. Такие детекторы выдерживали облучение ионами Хе флюенсом  $6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  с уменьшением фоточувствительности в 2 раза по сравнению с исходным. Никакие другие полупроводники не выдерживают облучения тяжелыми ионами, которые образуют треки в объеме материала.

Целью настоящей работы являлось исследование структурных и оптических характеристик 4H-SiC-детек-

торов, облученных ионами аргона с энергией 53 МэВ, флюенсом  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

## 2. Методика эксперимента

Фотоприемники на основе 4H-SiC были сформированы на эпитаксиальных слоях, полученных методом CVD (chemical vapor deposition), толщиной 5 мкм и с концентрацией нескомпенсированных доноров  $N_d - N_a = (1-50) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , выращенных на  $n^+$ -4H-SiC-подложках с  $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Базовые контакты Cr/Al, так же как и Cr-барьеры Шоттки на CVD-слоях диаметром 8 мм и толщиной 20 нм, были сформированы термовакуумным напылением.

Фотодиодные структуры были облучены при температуре 25°C ионами Ar с энергией 53 МэВ, флюенсом  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Флюенс определялся по полному заряду пучка ионов Ar, приносимого на облучаемую мишень. Облучение осуществлялось пучком, сфокусированным в линию, при сканировании по координате, перпендикулярной этой линии, что обеспечивало равномерность плотности дефектов на поверхности образца не хуже 7%.

Для исследования структурных преобразований в 4H-SiC под влиянием облучения тяжелыми ионами Ar применялась рентгенодифракционная методика [7], которая позволяет детально изучить изменения интенсивности отражения рентгеновских лучей на „хвостах“ двухкристалльных кривых качания, чувствительных к наличию точечных дефектов в структуре. Измерения на симметричном отражении (0008) проводились на двухкристалльном спектрометре, собранном на базе промышленного дифрактометра ДРОН-3. В качестве монохроматора использовался бездислокационный кристалл 6H-SiC, выращенный методом Лели. В данной работе шаг сканирования в направлении  $2\omega$  составлял  $0.005^\circ$ .

Спектры катодолюминесценции (CL) пленок получены при температуре 77 К, энергии электронов 10 кэВ, токе электронного пучка 100 нА, диаметре электронного пучка 5 мкм и нормированы на интенсивность донорно-акцепторного перехода. Измерения проводились спектрометрами оригинальной конструкции [11].

Спектры квантовой эффективности образцов измерялись методом сравнения с помощью монохроматора на базе спектрофотометра СФ-16. Источником УФ излучения непрерывного спектра в диапазоне длин волн 220–400 нм являлась дейтериевая лампа ДДС-30. Регистрация токов велась с помощью пикоамперметра Keithley 6485.

В качестве вторичного стандарта чувствительности использовался фотодиод SPD-100UV, калиброванный в диапазоне 40–400 нм в Институте метрологии РТВ (г. Берлин) [12].

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

## 3. Результаты эксперимента

### 3.1. Рентгеновские измерения

Ранее нами проводились исследования оптических и структурных свойств ультрафиолетовых 4H-SiC-фотоприемников с Cr-барьерами Шоттки, подвергнутых многократному протонному воздействию [7]. Было показано, в частности, что многократное облучение протонами приводило к постепенному увеличению концентрации дефектов вакансионного типа с формированием на определенном этапе локальных областей с отрицательной деформацией решетки. Такое изменение структуры с увеличением количества актов облучения сопровождалось на первых этапах резким снижением квантовой эффективности, а на этапе образования локализованных областей с высокой концентрацией дефектов вакансионного типа приводило к практически полному ее восстановлению. Это позволило высказать предположение о функции напряженных кластеров с высокой концентрацией вакансионных дефектов как эффективных геттеров для формирующихся в процессе облучения простых дефектов, так называемый „эффект геттерирования“ в 4H-SiC [13,14].

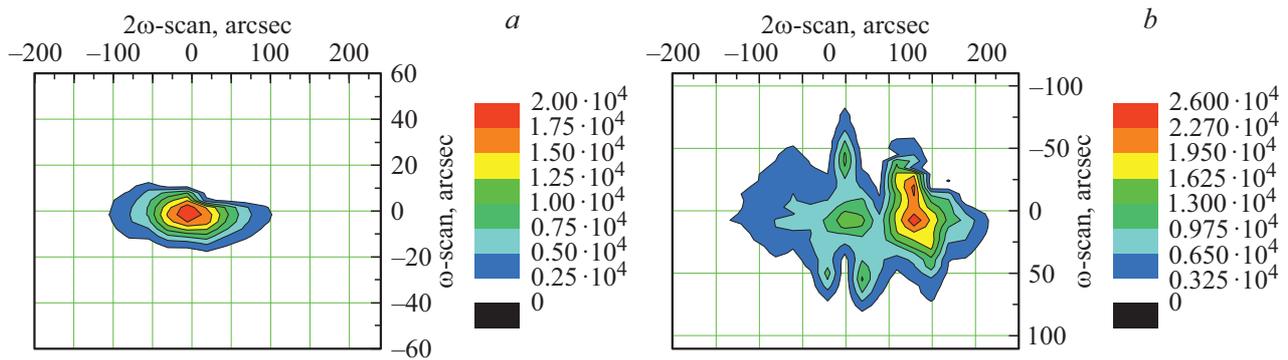
Согласно расчетам по программе SRIM, пробег ионов Ar с энергией 53 МэВ составляет  $\sim 10$  мм и можно считать распределение радиационных дефектов однородным по толщине в пределах 5 мкм CVD-слоя.

На рис. 1 представлены картины распределения интенсивности отражения рентгеновских лучей вблизи узла обратной решетки на отражении (0008) 4H-SiC до и после облучения ионами Ar.

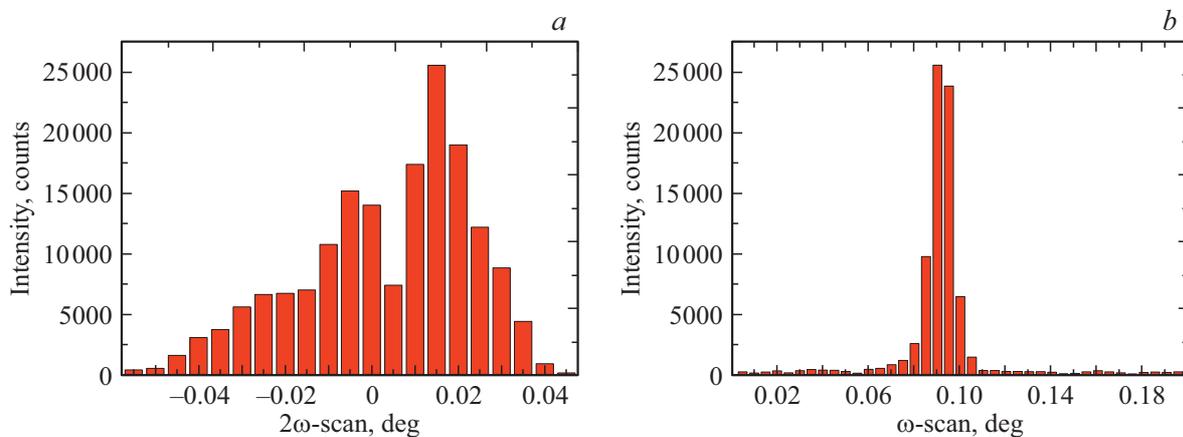
В результате облучения в структуре 4H-SiC формируется сложная картина структурных преобразований. В первую очередь необходимо отметить, что преобладающими компонентами структуры становятся, как минимум, две мощных локализованных области с отрицательной деформацией. Кроме того, наблюдается появление локальной области с положительной деформацией. Напряжения, возникающие на границах исходной матрицы и между кластерами точечных дефектов, по-видимому, частично снимаются за счет образования дефектов линейного типа, что отражается на картине распределения в появлении дополнительных максимумов в направлении  $\omega$ -сканирования.

Для наглядной демонстрации появления дополнительных интенсивных пиков отражения при  $\omega$ -сканировании как вдоль  $2\omega$ -, так и вдоль  $\omega$ -направления были построены гистограммы изменения максимальных интенсивностей отражения раздельно в двух направлениях сканирования (рис. 2).

На рис 2, а наблюдается появление дополнительного мощного максимума интенсивности со стороны больших брэгговских углов, что означает возникновение в структуре 4H-SiC после облучения области с отрицательной деформацией при  $2\omega = 0.015^\circ$  (т.е. насыщенной дефектами вакансионного типа). Из рис. 2, б видно, что в результате облучения формируются как минимум



**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-слое (a) и после облучения ионами Ag с энергией 53 МэВ, флюенсом  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (b).



**Рис. 2.** Зависимость максимальной интенсивности отражения после облучения ионами Ag 4H-SiC от двойного брэгговского угла при  $\omega = 0$  (a) и зависимость максимальной интенсивности отражения от брэгговского угла при  $2\omega = 0.015^\circ$  (в области с отрицательной деформацией) (b).

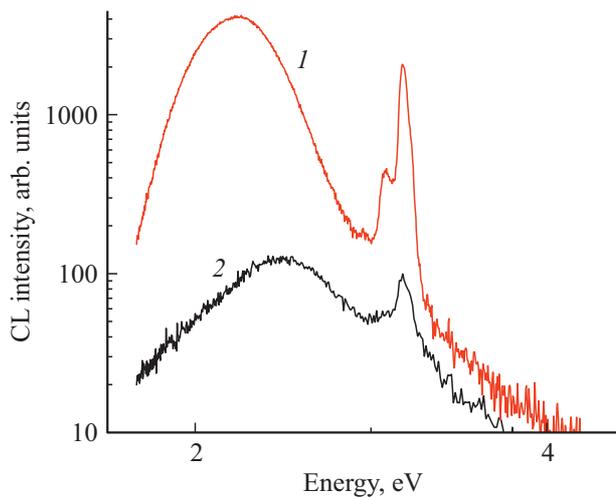
две разделенные между собой области с отрицательной деформацией ( $\omega = 0.005^\circ$ ), что свидетельствует о появлении дефектов линейного типа между ними.

Полученные результаты структурных исследований позволяют заключить, что основным изменением в структуре исходного 4H-SiC после облучения ионами Ag с указанными выше энергией и флюенсом является формирование вакансионных кластеров. Возникающие напряжения на границах ненарушенной матрицы и кластеров могут частично сниматься за счет образования дефектов линейного типа.

### 3.2. Католюминесценция

Данные измерений CL образцов 4H-SiC, облученных ионами Ag, согласуются с рентгеновскими исследованиями. В исходных образцах наблюдалась интенсивная полоса с пиком при 3.17 эВ, индуцированная рекомбинацией свободного экситона с участием поперечного оптического фона (FE-TO) в политипе 4H-SiC (рис. 3, кривая 1) [15].

Наличие двух пиков экситонного спектра в исходном образце указывает на образование экситона, предположительно связанного с дефектом вакансионного типа ( $V_{\text{Si}}$ ) [16]. Широкий спектр экситонов характерен для непрямозонных полупроводников. Также в исходном образце наблюдается широкая дефектная полоса с максимумом при 2.2 эВ, которая является типичной для SiC и обусловлена присутствием глубоких уровней в запрещенной зоне [17]. После облучения ионами аргона интенсивность пика при 3.17 эВ и его полуширина заметно уменьшаются (рис. 3, кривая 2). Уменьшение полуширины экситонного спектра связывают с повышением кристаллического качества. Дефектная полоса при 2.2 эВ трансформируется в спектр с максимумом при 2.6 эВ, так называемый дефектный центр  $D_1$  — комплекс вакансионной природы [18]. Большая ширина спектра с максимумом при 2.6 эВ указывает на введение большого числа различных радиационных дефектов. Некоторые из этих дефектов были компенсирующего типа, на что указывает увеличение дифференциального сопротивления структур в  $\sim 10$  раз, согласно измерениям вольт-амперных характеристик.

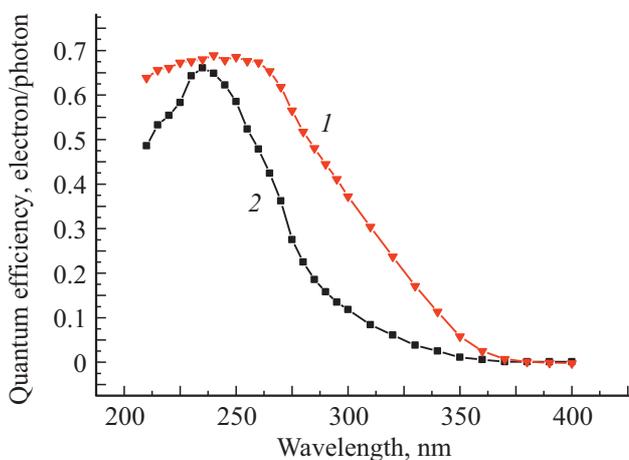


**Рис. 3.** Спектры катодолуминесценции исходного образца 4H-SiC с концентрацией  $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в CVD-слое (1) и после облучения ионами Ar с энергией 53 МэВ, флюенсом  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (2).

### 3.3. Спектральные измерения

Сложные процессы структурной перестройки 4H-SiC в процессе облучения ионами Ar с энергией 53 МэВ, флюенсом  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  нашли отражение в спектрах фоточувствительности УФ фотоприемников с Si-барьерами Шоттки (рис. 4).

Облучение ионами Ar практически вызвало незначительное уменьшение величины квантовой эффективности в максимуме спектра квантовой эффективности на длине волны 235 нм. Сравнение полученных результатов структурных исследований (рентгеновские, CL) с результатами измерения квантовой эффективности позволяет предположить, что в случае даже однократного облучения тяжелыми ионами Ar флюенсом  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$



**Рис. 4.** Спектры квантовой эффективности 4H-SiC-фотоприемников с Si-барьерами Шоттки: исходных образцов с  $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (1) и после облучения ионами Ar с энергией 53 МэВ, флюенсом  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (2).

формирующиеся кластеры точечных дефектов и дефекты линейного типа на границах между кластерами и ненарушенной матрицей работают как эффективные стоки для безызлучательных центров. В этом случае имеет место „эффект геттерирования“, что мы наблюдали и в случае облучения 4H-SiC протонами [7]. При этом в объеме 4H-SiC количество точечных дефектов вакансионного типа уменьшается, диффузионная длина неравновесных носителей тока возрастает, что приводит к значениям квантовой эффективности, соизмеримым со значениями в исходных образцах.

Изменения в спектральных кривых наблюдались только в длинноволновой части спектра, которая определяется непрямыми переходами [19]. Их влияние на фотопроводимость определяется широким спектром радиационных дефектов, вводимых при облучении ионами Ar, согласно измерениям CL (рис. 3, кривая 2).

## 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 рентгеновским исследованиям, в результате облучения формируются вакансионные кластеры. Возникающие напряжения на границах ненарушенной матрицы и кластеров могут частично сниматься за счет образования дефектов линейного типа.

Кластеры вакансионного типа и дефекты линейного типа, формируемые при облучении 4H-SiC ионами Ar, являются стоками для простых дефектов. Наблюдаемый эффект геттерирования обеспечивает значения квантовой эффективности 4H-SiC-фотоприемников на уровне исходных образцов 0.67%.

Длинноволновая часть спектра квантовой эффективности 4H-SiC-фотоприемников после облучения ионами Ar определяется непрямыми переходами, их количество и природа характеризуются уширением спектральной кривой катодолуминесценции.

### 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] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, F. Nava. Appl. Phys. Lett., **85** (17), 3780 (2004).
- [2] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev. Appl. Phys. Lett., **110**, 083503 (2017).
- [3] L. Storasta, F.H.C. Carisson, S.G. Shidhara, A. Aberg, J.P. Bergman, A. Hallén, E. Jznzen. Mater. Sci. Forum, **353–356**, 431 (2001).

- [4] D.M. Martin, H. Kortegaard Nielsen, P. Leveque, A. Hallén. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (10), 1704 (2004).
- [5] Е.В. Калинина, Г.Ф. Холуянов, Д.В. Давыдов, А.М. Стрельчук, А. Hallén, А.О. Константинов, В.В. Лучинин, А.Ю. Никифоров. *ФТП*, **37** (10), 1260 (2003).
- [6] X.D. Chen, S. Fung, C.C. Ling, C.D. Beling. *J. Appl. Phys.*, **94** (5), 3004 (2003).
- [7] Е.В. Калинина, Г.Н. Виолина, И.П. Никитина, М.А. Яговкина, Е.В. Иванова, В.В. Забродский. *ФТП*, **53** (6), 856 (2019).
- [8] Е.В. Калинина, Г.Ф. Холуянов, Г.А. Онушкин, Д.В. Давыдов, А.М. Стрельчук, А.О. Константинов, А. Hallén, А.Ю. Никифоров, В.А. Скуратов, К. Navancsak. *ФТП*, **38** (10), 1223 (2004).
- [9] Е.В. Калинина, В.Г. Коссов, Р.Р. Яфаев, А.М. Стрельчук, Г.Н. Виолина. *ФТП*, **44** (6), 807 (2010).
- [10] Е.В. Калинина, А.А. Лебедев, Е. Богданова, В. Berenquie, L. Ottaviani, Г.Н. Виолина, В.А. Скуратов. *ФТП*, **49** (4), 550 (2015).
- [11] M.V. Zamoryanskaya, S.G. Konnikov, A.N. Zamoryanskii. *Instrum. Exp. Techn.*, **4**, 477 (2004).
- [12] A. Gottwald, U. Kroth, M. Richter, H. Schoppe, G. Ulm. *Meas. Sci. Technol.*, **21**, 125101 (2010).
- [13] F.L. Wong, N.W. Cheung, P.K. Chu. *Appl. Phys. Lett.*, **152**, 889 (1988).
- [14] В.А. Перевошиков, В.Д. Скупов. *Геттерирование примесей и дефектов в полупроводниках* (Н. Новгород, Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2020) ч. 1, гл. 3.
- [15] M. Ikeda, H. Matsunami. *Phys. Status Solidi A*, **58**, 657 (1980).
- [16] A. Fissel, W. Richter, J. Furthmüller, F. Bechstedt. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2512 (2001).
- [17] Ю.А. Водаков, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, М.Г. Рамм, В.И. Соколов. *ФТП*, **20**, 2153 (1986).
- [18] 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.
- [19] T.V. Blank, Y.A. Goldberg, O.V. Konstantinov. *Nuclear Instr. Meth. A*, **509**, 109 (2003).

Редактор Л.В. Шаронова

## Structural and optical characteristics of 4H-SiC UV detectors irradiated with argon ions

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

Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The paper presents results of a study of the effect of irradiation with heavy Ar ions on the structural and optical characteristics of 4H-SiC. It has been shown that as a result of already one-time irradiation with Ar ions with energy of 53 MeV and fluence of  $1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ , at least two powerful local regions with negative deformation prevail in the structure of the silicon carbide. Along with this, a region with positive deformation is also observed in the structure. The formation of localized clusters with negative and positive deformations, along with the undisturbed matrix, is accompanied by the formation of linear type defects that partially relieve stresses in the structure. It is assumed that the resulting complex defect structure upon irradiation with Ar ions provides the effect of gettering of point defects and leads to the quantum efficiency of 4H-SiC UV photodetectors at the level of the initial samples.