

Облучение ионами аргона диодов Шоттки на основе 4H-SiC

© А.М. Стрельчук, Е.В. Калинина, М.Ф. Кудояров, М.Я. Патрова

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

E-mail: anatoly.strelchuk@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 8 июля 2024 г.

Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Исследовано влияние облучения ионами аргона с энергией 53 МэВ в диапазоне доз $(1-7) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ на вольт-амперные характеристики диодов Шоттки Cr/SiC(4H) с уровнем легирования эпитаксиального слоя $\sim 10^{14} - 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В характеристиках диодов как до облучения, так и после него обнаружены и обсуждаются эффекты, затрудняющие интерпретацию результатов, оценку радиационной стойкости диодов и подтверждающие влияние дефектов эпитаксиального слоя на характеристики диодов. Дана верхняя оценка величины пороговой дозы облучения D_{th} ($\sim 6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$) ионами Ar^{8+} с энергией 53 МэВ.

Ключевые слова: SiC, диод Шоттки, облучение Ar^{8+} , IV характеристики, шунты, дефекты.

DOI: 10.61011/FTP.2024.09.59309.6576A

1. Введение

Известно, что на основе SiC возможно создание многих типов полупроводниковых приборов. Кроме того, уже в ранних исследованиях полупроводниковый SiC рассматривался как перспективный материал для работы в условиях облучения. Для большинства эффективных приборов необходим умеренно или слабо легированный SiC ($(N_d - N_a) \sim 10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$), ставший доступным со второй половины 1990-х гг. Тогда было установлено, что наиболее чувствительной к облучению является прямая вольт-амперная характеристика диода [1]. Параметром, отражающим радиационную стойкость, может быть выбрано последовательное сопротивление (R_s) диода. Это сопротивление до некоторой пороговой дозы облучения D_{th} практически не меняется, а при превышении D_{th} резко растет на 10 и более порядков примерно в соответствии со степенной зависимостью $R_s \sim D^m$ с показателем степени $m \sim (7-15)$ (см. [2] и ссылки в ней). Были установлены пороговые дозы для некоторых типов облучения. Например, при облучении SiC с уровнем легирования $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ электронами с энергией 0.9 МэВ $D_{th} \sim 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, а протонами с энергией 15 МэВ $D_{th} \sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Облучение более тяжелыми ионами также представляет интерес, в частности в работе [3] (см. [3] и ссылки в ней) исследовались УФ-детекторы на основе SiC при облучении ионами аргона. В настоящей работе представлено исследование вольт-амперных характеристик (IVs) диодов Шоттки Cr/SiC(4H) при облучении ионами аргона.

2. Объекты и методы исследования

Диоды Шоттки формировались на основе двух коммерческих эпитаксиальных слоев 4H-SiC: 1) N585, толщиной 5 мкм с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ — четыре диода

(#1, 12, 20, 33) и 2) #729-15, толщиной 9 мкм с $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ — один диод N26. Слои выращивались газофазной эпитаксией на n^+ -4H-SiC-подложках с $N_d - N_a > 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Омический контакт Cr/Al к подложке и барьерный контакт Cr к эпитаксиальному слою (толщина Cr < 0.1 мкм) создавались термическим напылением в вакууме (см. [3] и ссылки в ней). Диаметр диодов Шоттки составлял 8 мм. Диоды облучались при температуре 25°C ионами Ar^{8+} с энергией 53 МэВ дозой/флюэнсом $(1-7) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В настоящей работе термины доза и флюэнс равноприменимы, поскольку облучение проводится пучком, перпендикулярным мишени и с указанной энергией. В статье используется термин доза. Доза определялась по полному заряду пучка ионов аргона, приносимого на облучаемую мишень; обеспечивалась равномерность плотности дефектов на поверхности образца не хуже 7%. Первое облучение 4 диодов на слое N585 осуществлялось 4 разными дозами: $D1 = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (#20), $D2 = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (#12), $D3 = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (#1), $D5 = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (#33); затем все 4 диода дополнительно еще раз облучались дозой $D1 = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Один диод #26 на слое #729-15 последовательно облучался 4 раза суммарной дозой: $D1 = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, $D5 = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, $D6 = 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и $D7 = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. До облучения ($D0$) и после каждого облучения при комнатной температуре измерялись IVs с использованием прижимного зонда с помощью пикоамперметра Keithley 6485 в диапазоне токов $10^{-12} - 2 \cdot 10^{-2} \text{ А}$. Последовательное дифференциальное сопротивление R_s в исходных и облученных диодах определялось при комнатной температуре из IVs при прямом смещении и (если не оговорено иначе) максимальных измеряемых токах (10–20 мА) или напряжениях (10 В).

3. Результаты исследования и обсуждение результатов

До облучения при прямом смещении диоды на эпитаксиальном слое #585 характеризуются экспоненциальной (до области влияния R_s диода) зависимостью тока от напряжения $I = I_0 \exp(qV/nkT)$, с коэффициентом идеальности $n = 1.1–1.5$ (рис. 1, *a*). IVs за одним исключением заметно сдвинуты друг относительно друга (до 0.2 В по напряжению или до 3 порядков по току). При относительно больших токах R_s всех диодов до облучения находится в пределах 20–30 Ом. В этой области токов IVs также заметно сдвинуты друг относительно друга, при этом характер сдвига не соответствует (и даже противоположен) характеру сдвига при малых токах (рис. 1, *a*, см. вставку). В результате облучения близкая к экспоненциальной зависимость тока от напряжения при малых токах сохраняется, n после облучения составляет $n = 2.4–3$, IVs смещаются в сторону больших напряжений (рис. 1, *b*). Также облучение приводит к росту R_s диодов, однако характер зависимости R_s от дозы облучения не монотонен (рис. 1, *b*, см. вставку). После минимальной дозы облучения ($D1$) R_s оказывается самым большим по величине ($\sim 3 \cdot 10^4$ Ом) и, например, в сто раз превосходит R_s ($\sim 3.6 \cdot 10^2$ Ом) при дозе $D3$. Повторное облучение дозой $D1$ диодов #20, 12 и 33 на слое #585 (исходно облученных дозами $D1$, $D2$ и $D5$) практически не сказывается на величине R_s этих диодов, а диода #1 (исходно облученного дозой $D3$) увеличилось с $R_s \sim 3.6 \cdot 10^2$ Ом до $R_s \sim 1.5 \cdot 10^4$ Ом.

Выше приведены значения R_s , рассчитанные по результатам первого (тестового, с относительно большим шагом по напряжению) или второго (с малым шагом) измерений IVs при прямом смещении диода. На практике число измерений IVs оказывается значительно большим. Так, кроме измерений при прямом смещении, все диоды характеризуются и при обратном смещении, причем с варьированием величины предельного обратного напряжения. Кроме того, представляет интерес исследование IVs как при прямом, так и при обратном смещении при подсветке различными источниками света, в некоторых случаях желателен контроль IVs в зависимости от силы прижима зонда или от места установки зонда на поверхности металла и т.д. Таким образом, общее количество измерений IVs одного диода может достигать 10–20 и более измерений. В некоторых случаях IVs хорошо воспроизводятся, но не всегда. Так, например, при измерении IVs диода #1 (облученного дозой $D3 + D1$) при обратном смещении около 80 В ток в процессе измерения стал резко уменьшаться. Повторное измерение обратной IV характеристики показало, что, например, при обратном напряжении 30 В ток уменьшился с 1 мА до 1.5 нА. Измерение после этого прямых IVs показало, что при малых напряжениях характеристика изменилась мало, при больших ток уменьшился и R_s при 10 В выросло с $R_s \sim 1.5 \cdot 10^4$ Ом (см. выше) до $R_s \sim 3 \cdot 10^6$ Ом. Еще один пример такого

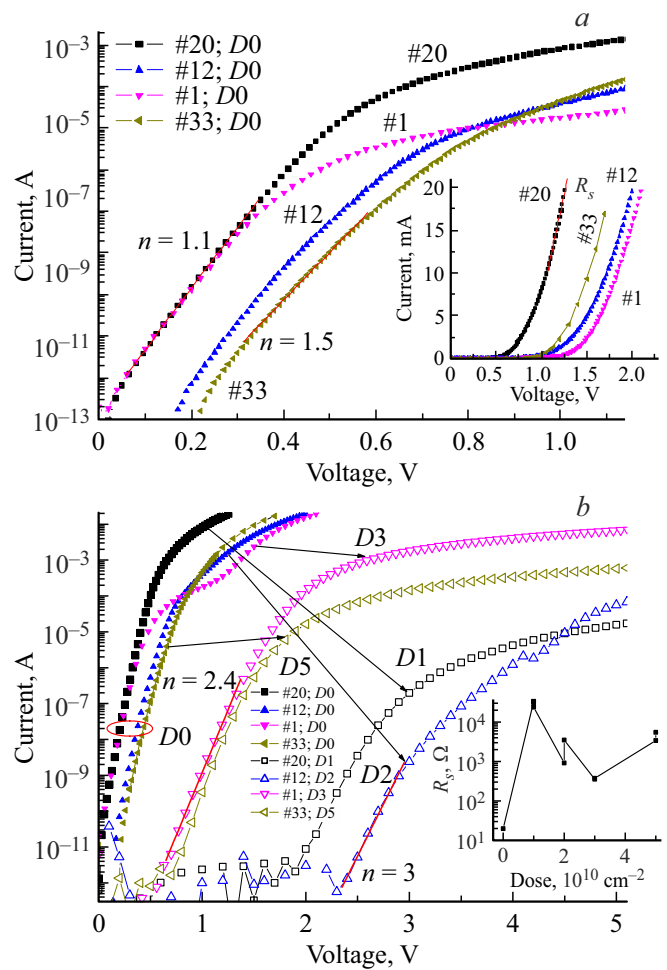


Рис. 1. Прямые вольт-амперные характеристики 4 диодов Шоттки (#1, 12, 20, 33) на слое #585 до облучения ($D0$) (*a*) и после облучения Ag^{8+} дозами $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($D1$), $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($D2$), $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($D3$), $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($D5$) (*b*). На вставках — IV характеристики в линейном масштабе (*a*), зависимость последовательного сопротивления R_s от дозы облучения (*b*). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

рода представлен на рис. 2, *a* для диода N33, исходно облученного дозой $D5$ и затем повторно облученного дозой $D1$, т.е. суммарно получившего дозу $D6$ ($D6 = 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$). Пять последовательных измерений прямой IV характеристики $D6(1–5)$ (и шесть измерений обратной IV характеристики до -10 В) были воспроизводимы (и, в частности, показали неизменность R_s после облучения дозами $D5$ и $D6$), однако шестое измерение прямой IV характеристики ($D6(6)$) показало, что характеристика не только изменилась при малых напряжениях (до 4 В), но и изменялась непосредственно в процессе шестого измерения при напряжениях 8–10 В (отмечено значком (X): прямой ток в несколько этапов уменьшился на ~ 4 порядка). Последующие измерения прямой IV характеристики (седьмое измерение $D6(7)$ и десятое $D6(10)$) показали, что характеристика от-

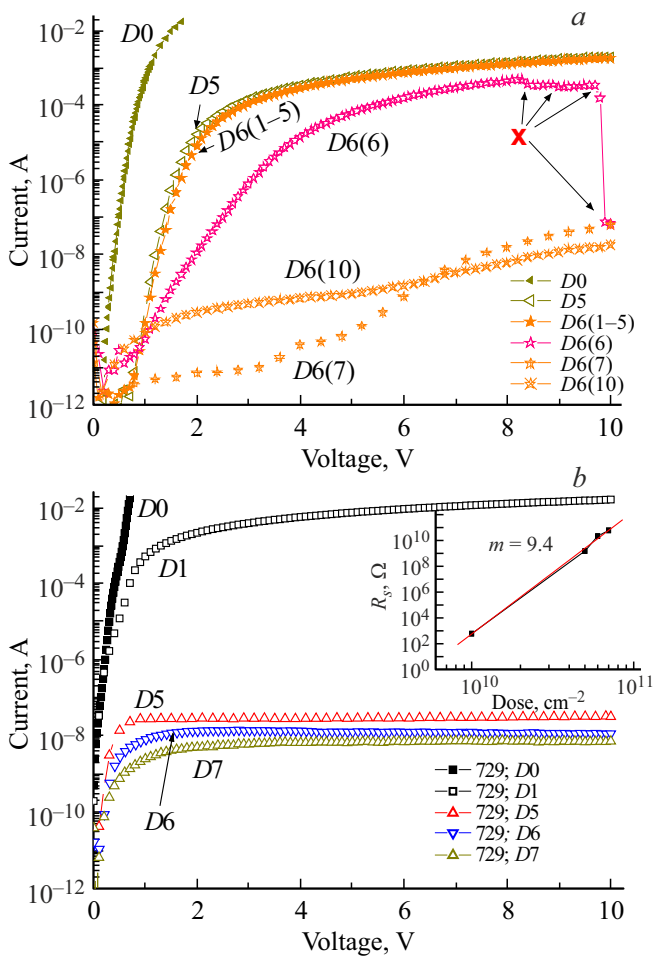


Рис. 2. Прямые вольт-амперные характеристики диода Шоттки (#33) на слое #585 до облучения ($D0$) и после облучения Ar^{8+} дозами $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($D5$) и $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($D6$) (в скобках указаны номера измерений; значком (X) отмечены напряжения, при которых наблюдалась нестабильность с необратимым уменьшением тока) (a) и диода Шоттки (#26) на слое #72915 до облучения ($D0$) и после облучения Ar^{8+} дозами $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($D1$), $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($D5$), $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($D6$) и $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($D7$) (b). На вставке b — зависимость последовательного сопротивления R_s диода #72915-26 от дозы облучения.

носителем стабилизировалась и величина R_s стала составлять $\sim 10^8 \text{ Ом}$.

Облучение диода #26, сформированного на поверхности сильно легированного эпитаксиального слоя #729-15, показало, что облучение приводит к монотонному росту R_s от 4 Ом до облучения ($D0$) до $\sim 600 \text{ Ом}$ после первой дозы облучения ($D1$) и затем до $\sim 10^9 - 5 \cdot 10^{10} \text{ Ом}$ при больших дозах облучения (рис. 2, b). Зависимость R_s от дозы можно представить как степенную $R_s \sim D^m$ с показателем степени $m \sim 9-10$ (рис. 2, b , см. вставку). Следует отметить, что в некоторых случаях в прямой IV характеристике проявляется более или менее выраженная N -образность (рис. 2, b , кривая $D6$; в этом случае сопротивление диода

определялось не как дифференциальное, а делением напряжения на ток при 10 В).

Эффекты, наблюдаемые в диодах до облучения при малых токах, аналогичны эффектам, по-видимому, впервые представленным в 1996 г. в двух работах, а именно: 1 — разброс IV_s идентичных диодов Шоттки и 2 — шунтирование основного диода паразитным (см. [4] и ссылки в ней). Позднее шунтирование основного диода паразитным наблюдалось также в работах [5–9] (см. также ссылки в [4]). В настоящей работе наблюдаются оба указанных эффекта (эффекты 1 и 2 по классификации [4]), а также переход 1 эффекта во 2 с учетом данных при больших токах (рис. 1, a). Как в $p-n$ -структурах [1], так и в диодах Шоттки [2] (см. также [10–14]), IV_s при малых токах в области экспоненциальной зависимости тока от напряжения оставались почти неизменными в отличие от эффектов, наблюдаемых в диодах на основе слоя #585 в данной работе. Этот факт, а также разброс (вместо монотонного роста) R_s идентичных диодов на слое #585 после облучения (эффект 4 в [4]) свидетельствуют о проявлении дефектов полупроводника в IV_s диодах (см. [2,4]). Нестабильность IV_s , обнаруженная в данной работе (см. эффект 3 в [4]), вызвана, вероятно, частичной деградацией паразитных диодов, шунтирующих основной диод. В диоде на основе сильно легированного слоя #72915 R_s монотонно растет уже начиная с дозы $\sim 6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Отметим, что и в диодах на слое #585 последовательное сопротивление имеет величину $R_s \sim 10^{12} \text{ Ом}$ для диодов #20 и 12 после облучения даже минимальными дозами $D1$ и $D2$, если оценивать R_s не при 10 В, а при $U < 2 \text{ В}$, т.е. до проявления избыточных токов, видимо, обусловленных дефектами (рис. 1, b).

Таким образом, дозу $\sim 6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ в рамках данного эксперимента можно принять как верхнюю оценку величины пороговой дозы облучения D_{th} ионами Ar^{8+} с энергией 53 МэВ диодов Шоттки на основе SiC с уровнем легирования $\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

4. Заключение

Исследование вольт-амперных характеристик диодов Шоттки Cr/SiC(4H) диаметром 8 мм с уровнем легирования эпитаксиального слоя $\sim 10^{14} - 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и влияния облучения ионами аргона с энергией 53 МэВ обнаружило значительный разброс IV_s диодов как до облучения, так и после него, обусловленный, по-видимому, дефектами эпитаксиального слоя, затрудняющий интерпретацию результатов и оценку радиационной стойкости диодов. Дана верхняя оценка величины пороговой дозы облучения D_{th} ($\sim 6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$) ионами Ar^{8+} с энергией 53 МэВ.

Финансирование работы

Исследование поддержано Российским научным фондом, проект № 22-12-00003.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.M. Strel'chuk, A.A. Lebedev, V.V. Kozlovski, N.S. Savkina, D.V. Davydov, V.V. Solov'ev, M.G. Rastegaeva. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., В **147**, 74 (1999).
- [2] А.М. Стрельчук, В.В. Козловский, А.А. Лебедев. ФТП, **52**, 1651 (2018).
- [3] Е.В. Калинина, М.Ф. Кудояров, И.П. Никитина, Е.В. Деметьева, В.В. Забродский. ФТП, **56**, 254 (2022).
- [4] А.М. Стрельчук, Е.В. Калинина. Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки, **16**, 83 (2023). DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.161.212>
- [5] D. Defives, O. Noblanc, C. Dua, C. Brylinski, M. Barthula, F. Meyer. Mater. Sci. Eng., **B61-62**, 395 (1999).
- [6] D. Defives, O. Noblanc, C. Dua, C. Brylinski, M. Barthula, V. Aubry-Fortuna, F. Meyer. IEEE Trans. Electron Dev., **46**, 449 (1999).
- [7] M.L. Bolen, M.A. Capano. J. Electron. Mater., **38**, 574 (2009).
- [8] M. Nakamura, Y. Hashino, T. Furusho, H. Kinoshita, H. Shio-mi, M. Yoshimoto. Mater. Sci. Forum, **600-603**, 967 (2009).
- [9] П.А. Иванов, Н.Д. Ильинская, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, А.В. Афанасьев, В.А. Ильин. ФТП, **47**, 83 (2013).
- [10] H. Ohyama, K. Takakura, T. Watanabe, K. Nishiyama, K. Shigaki, T. Kudou, M. Nakabayashi, S. Kuboyama, S. Matsuda, C. Kamezawa, E. Simoen, C. Claeys. J. Mater. Sci.: Mater. Electron., **16**, 455 (2005).
- [11] L.Y. Liu, T.L. Shen, A. Liu, T. Zhang, S. Bai, S.R. Xu, P. Jin, Y. Hao, X.P. Ouyang. Diamond Relat. Mater., **88**, 256 (2018).
- [12] S. Ganiyev 1, M. Azim Khairi, D. Ahmad Fauzi, Y. Abdullah, N.F. Hasbullah. ФТП, **51**, 1721 (2017).
- [13] P. Hazdra, S. Popelka, A. Schoner. IEEE Trans. Electron Dev., **65**, 4483 (2018).
- [14] R.L. Gao, X. Du, W.Y. Ma, B. Sun, J.L. Ruan, X. Ouyang, H. Li, L. Chen, L.Y. Liu, X.P. Ouyang. Sensors Actuators A: Physical, **333**, 113241 (2022).

Редактор Г.А. Оганесян

Irradiation with argon ions of Schottky diodes based on 4H-SiC

A.M. Strel'chuk, E.V. Kalinina, M.F. Kudoiarov,
M.Ya. Patrova

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The effect of irradiation with argon ions with an energy of 53 MeV in the dose range $(1-7) \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ on the current-voltage characteristics of Schottky diodes Cr/SiC(4H) with the doping level of the epitaxial layer $(1 \text{ and } 30) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ has been studied. In the characteristics of diodes both before and after irradiation, effects have been discovered and discussed that make it difficult to interpret the results, assess the radiation resistance of diodes and confirm the influence of epitaxial layer defects on the characteristics of diodes. An upper estimate of the threshold dose of irradiation (up to 10^{10} cm^{-2}) with Ar^+ ions with an energy of 53 MeV is given.