

РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

RADIATION SEMICONDUCTOR PHYSICS

УДК 621.382.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ СИЛОВЫХ ДИОДОВ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ γ -КВАНТАМИ ^{60}Co

Тагаев Марат Баймуратович*, д.т.н., профессор кафедры Каракалпакского государственного университета имени Бердаха, Нукус, Каракалпакстан. e-mail: prof.tagaev@mail.ru

Абдикамалов Бахтияр Абдиразакович, профессор кафедры Каракалпакского государственного университета имени Бердаха, Нукус, Каракалпакстан. e-mail: bakh.abdik@gmail.com

Статов Виктор Анатолевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Каракалпакского государственного университета имени Бердаха, Нукус, Каракалпакстан. e-mail: victorstatov@gmail.com

Бекбергенев Сапарбай Ерназарович, к.ф.-м.н., доцент Каракалпакского государственного университета имени Бердаха, Нукус, Каракалпакстан. e-mail: BSaparbay@mail.ru

Аннотация. В работе исследована радиационная стойкость силовых диодов Шоттки Cr-Si при гамма-облучении. Показана стабильность их параметров в широком диапазоне доз и возможность радиационно-стимулированного управления коэффициентами неидеальности таких диодов.

Ключевые слова: кремний, барьер Шоттки, радиационные дефекты, надежность, силовой диод.

STUDY OF THE SCHOTTKY POWER DIODES DEGRADATION
UNDER ^{60}Co γ -IRRADIATION

Tagaev Marat Baymuratovich*, Dr. of Tech. Sc. (DSc), Professor of Karakalpak State University named after Berdakh, Nukus, Karakalpakstan. e-mail: prof.tagaev@mail.ru

Abdikamalov Bakhtiyar Abdurazakovich, Ph.D, Professor of Karakalpak State University named after Berdakh, Nukus, Karakalpakstan. e-mail: bakh.abdik@gmail.com

Statov Viktor Anatolievich, PhD, Senior Researcher of Karakalpak State University named after Berdakh, Nukus, Karakalpakstan. e-mail: victorstatov@gmail.com.

Bekbergenov Saparbay Ernazarovich, PhD, Senior Lecturer of Karakalpak State University named after Berdakh, Nukus, Karakalpakstan. e-mail: BSaparbay@mail.ru

Abstract. The study concerns resistance to gamma-radiation damage of the power Schottky diodes Cr-Si. These diodes demonstrate parameters stability in the wide range of irradiation doses. Also radiation-induced shift of the non-ideality factor n had been revealed.

Keywords: Silicon, Schottky barrier, gamma irradiation, reliability, power diodes.

1. Введение

Обеспечение радиационной стойкости и надежности изделий электронной техники является одной из важнейших задач при создании радиоэлектронной аппаратуры атомных электростанций, авиа-, космической и судовой техники, специальной медицинской и технологической аппаратуры и т. д. Широкое применение электронной техники в объектах народного хозяйства требует создания изделий не только большой степени интеграции и быстродействия, но и удовлетворяющих, в ряде случаев, очень жестким условиям эксплуатации (высокие температуры, а также высокоинтенсивные радиационные воздействия). В связи с вышеизложенным, обеспечение радиационной стойкости и надежности полупроводниковых приборов, используемых в радиоэлектронной технике, является актуальным как в физическом, так и в прикладном аспектах.

Из литературных данных известно, что электрофизические параметры контактов металл-полупроводник (высота барьера, сопротивление контактов, фактор идеальности и другие) и их устойчивость к радиационным воздействиям связаны с особенностями межфазных взаимодействий на границе раздела (ГР) фаз [1-3]. Используя активные внешние воздействия и металлические сплавы тугоплавких металлов, можно целенаправленно формировать ГР, обладающих специфическим интерметаллическим составом и структурой. Следовательно, с помощью этого можно изменять электрофизические параметры контакта металл-полупроводник [4,5].

В данном исследовании рассмотрены экспериментальные исследования стойкости барьерных контактов металл-кремний, используемых при создании силовых диодов Шоттки к активным воздействиям, а именно облучению γ -квантами.

Для целого ряда приборных приложений силовые диоды с барьером Шоттки имеют важные преимущества в сравнении с силовыми вентилями с $p-n$ -переходом. Это, прежде всего, малые величины прямого падения напряжения при рабочих режимах, что повышает КПД преобразования, и высокое быстродействие, позволяющее использовать их не только в силовых сетях на 50 и 400 Герц, но также и в высокочастотных импульсных преобразователях напряжения.

При этом основной проблемой на пути создания высоконадежных силовых диодов с барьером Шоттки является формирование контакта металл-полупроводник, стабильного в жестких условиях эксплуатации электротехнических устройств и устойчивого к кратковременным перегрузкам и различным внешним воздействиям, в том числе воздействию ионизирующей радиации. Для достижения этих параметров необходимо использовать полупроводник с высоким структурным совершенством и однородностью структурных и электрофизических параметров исходного материала. Последнему требованию наиболее полно отвечает монокристаллический кремний, а именно автоэпитаксиальные $n-n^+$ - структуры, совершенствование технологии которых позволило достичь высокого кристаллографического совершенства и низких концентраций нежелательных примесей. Следует отметить, что в целом серийные силовые кремниевые диоды демонстрируют хорошую устойчивость к радиации, причем главной причиной увеличения обратного тока является генерационно-рекомбинационная компонента, связанная с радиационными дефектами [6]. Тем не менее, для диодов с барьером Шоттки также следует принимать во внимание и влияние радиационных обработок на границу раздела металл-полупроводник, радиационно-стимулированную диффузию материала

металлизации в полупроводниковую матрицу, формирование силицидов и локальных оксидных наночастиц и связанные с этим изменения плотности поверхностных состояний, определяющих такие важные характеристики приборной структуры как высота барьера, эффекты накопления носителей, высокочастотные потери и аномальную отрицательную емкость, обнаруживаемые рядом исследователей на структурах Cr-Si [7-10].

2. Область исследования

Объектами данного экспериментального исследования являлись корпусированные малосерийные диодные структуры с барьерами Шоттки на основе хрома.

Экспериментальные исследования проводились с использованием ряда комплексных автоматизированных методик, в том числе для изучения электрофизических, структурных и рекомбинационных параметров диодов и поверхностно-барьерных структур.

3. Методика эксперимента

Барьер Шоттки формировался методом вакуумного напыления слоя хрома толщиной 70 нм с последующим доращиванием слоев меди (100 нм) и золота (3000 нм) электрохимическим осаждением и залуживанием мягкими припоями. Верхний контакт предназначен для припайки силового вывода к рабочей площадке. Омический контакт к n^+ -области формировался напылением слоев Pd-Cr-Cu последующим электрохимическим наращиванием слоев меди до необходимой толщины.

Использовалась планарная топология диодной структуры с барьером Шоттки на основе кремниевых эпитаксиальных $n-n^+$ -структур. Исследовались варианты создания диодов с обратным напряжением 100-200В и рабочей площадью до 100мм² для применения в сильноточных устройствах. Использовались эпитаксиальные структуры кремния с удельным сопротивлением $30 \pm 3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и толщиной $15 \pm 2 \text{ мкм}$. Удельное сопротивление подложечного n^+ -кремния составляло $0,003 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, толщина n^+ -подложки была $\sim 300 \text{ мкм}$.

Параметры обратной ветви ВАХ (обратный ток и напряжение лавинного пробоя) стабилизировались применением полевых обкладок. Они представляли собой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) структуру, включенную по периметру барьера Шоттки в форме охранного кольца. Для диодов барьером Шоттки полевая обкладка в планарной конструкции обеспечивает создание условий для контролируемого лавинного пробоя структуры и исключает появление резких (низковольтных) микроплазм (МП). При подаче обратного напряжения на диодную структуру под этим же напряжением находится защитная МДП-структура. Обеднение носителями происходит как в барьере Шоттки, так и в МДП-структуре.

На силовых диодах Шоттки Au-Cu-Cr- $n-n^+$ -Si и тестовых структурах Cr- $n-n^+$ -Si до и после облучения γ -квантами ^{60}Co в интервале доз 10^2 - $2 \cdot 10^6 \text{ Гр}$ и 10^3 - 10^5 Гр , соответственно, при интенсивности дозы 1 Гр/с были измерены прямые и обратные ветви ВАХ, вольтфарадные характеристики (ВФХ). Для силовых диодов Шоттки до и после облучения γ -квантами ^{60}Co до дозы $2 \cdot 10^6 \text{ Гр}$ были измерены зависимости заряда переключения Q от прямого тока при $V_{обр} = 10 \text{ В}$.

4. Экспериментальные результаты.

Электрофизические параметры диодов Шоттки Cr- $n-n^+$ -Si до и после облучения в диапазоне доз 10^3 - 10^5 Гр приведены в табл.1. Из представленных в ней данных видно, что

радиационная обработка образцов в диапазоне доз 10^3 – 10^5 Грей способствует изменению параметров барьера Шоттки: незначительным вариациям высоты барьера ϕ_B и увеличению фактора идеальности n . Последующая термообработка приводит к некоторому увеличению n при увеличении ϕ_B [3].

Заметим, что полученные в результате радиационных воздействий величины $\phi_B=0,60$ – $0,61$ эВ свидетельствуют об отсутствии на ГР силицидных фаз хрома. Это находится в хорошем соответствии с данными Оже-анализа. Необходимо также отметить, что ширина переходной области между пленкой хрома и подложкой из кремния практически остается без изменения (оценка проведена по концентрации хрома, определенной по интенсивности Оже-пиков как 86 и 14% от максимальной интенсивности Оже-пиков кремния).

Данные по изменению основных параметров исследуемой структуры в результате облучения приведены в таблице 1. Из нее видно, что высота барьера Шоттки соответствует величине 0,60–0,61 эВ (характерной для контакта, формируемого металлическим хромом [3]) и практически не изменяется во всем исследуемом диапазоне доз γ - радиации. Это обстоятельство может указывать на общую природу изменения n с дозой, связанную, скорее всего, с некоторым "размытием" переходного слоя в результате радиационно-стимулированного массопереноса металла из контакта в полупроводник.

Таблица 1

Электрофизические параметры (высота барьера ϕ_B и фактор идеальности n) тестовых структур Au–Cu–Cr– n - n^+ -Si силовых диодов Шоттки до и после облучения γ - квантами ^{60}Co

| Доза радиации, Грей | ϕ_B , эВ | n |
|----------------------|---------------|------|
| 0 (исходные образцы) | 0,61 | 1,23 |
| 10^2 | 0,61 | 1,25 |
| $5 \cdot 10^2$ | 0,61 | 1,28 |
| 10^3 | 0,61 | 1,23 |
| $5 \cdot 10^3$ | 0,60 | 1,31 |
| 10^4 | 0,60 | 1,30 |
| $5 \cdot 10^4$ | 0,61 | 1,31 |
| $2 \cdot 10^5$ | 0,60 | 1,35 |
| $4 \cdot 10^5$ | 0,60 | 1,35 |
| $8 \cdot 10^5$ | 0,60 | 1,37 |
| 10^6 | 0,60 | 1,36 |
| $2 \cdot 10^6$ | 0,60 | 1,36 |

5. Обсуждение результатов

Прямые и обратные ветви ВАХ силового диода Шоттки до и после облучения до дозы $2 \cdot 10^6$ Грей приведены на рис.1.

Видно, что после облучения ВАХ изменяется незначительно. Практически не изменяющийся после облучения начальный участок ВАХ свидетельствует о том, что после воздействия γ - радиации ϕ_B практически совпадает с исходной величиной. В то же время некоторое увеличение обратного тока можно объяснить, если принять во внимание

уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда. О последнем косвенно свидетельствует уменьшение заряда переключения в интервале измеряемых прямых токов I ($0 \div 20$ мА) в облученном до $2 \cdot 10^6$ Грей образце. Сохранение формы обратной ВАХ с некоторым ростом обратного тока может свидетельствовать о накоплении в области пространственного заряда радиационных дефектов, характерных для гамма-облучения кремния [10]. Также возможна перестройка существующих дефектных комплексов с участием кислорода (А-центров) [11,12] а также оксидных фаз на границе раздела металл-полупроводник [13-15]. На характеристики диода может влиять и пространственная перестройка заряженных глубоких центров, определяющая нестационарные характеристики, такие как время восстановления [16].

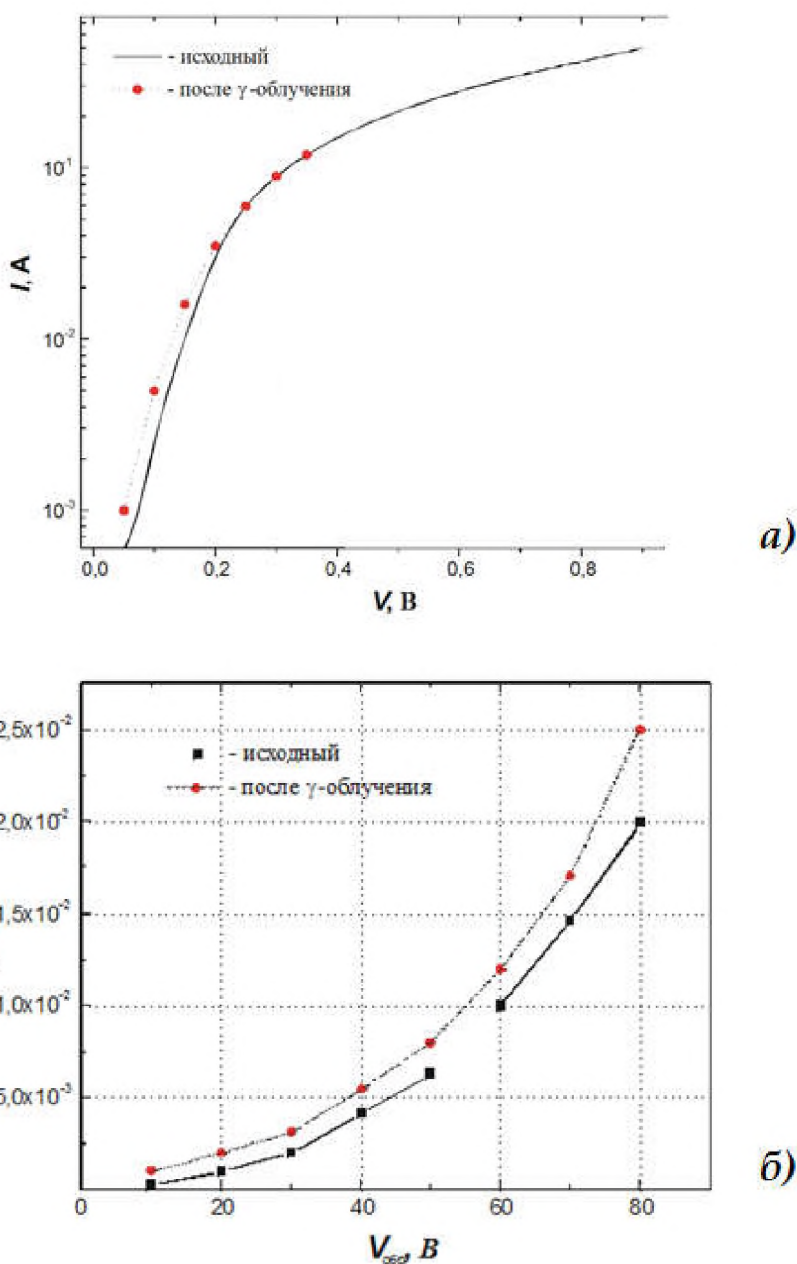


Рис. 1. Прямая ветвь ВАХ силового диода с барьером Шоттки до и после γ - облучения с дозой $2 \cdot 10^6$ Гр (а) и обратная ветвь ВАХ силового диода Шоттки до и после облучения γ -квантами ^{60}Co с дозой $2 \cdot 10^6$ Гр (б)

5. Заключение

Исследование радиационной стойкости силовых диодов Шоттки Cr-Si показало их высокую стабильность при гамма-облучении в широком диапазоне доз, без существенного ухудшения эксплуатационных характеристик. Также показана возможность радиационного стимулирования процессом управления коэффициентом неидеальности таких диодов.

Литература

1. Dmitruk N.L., Konakova R.V., Ismailov K.A., Pavlenko A.A., Tagaev M.B. ^{60}Co γ -radiation influence on back resistance restore time of Al- $n-n^+$ -Si Schottky power diodes / In.: Proc. 3rd International Seminar on power semiconductors. ISPS'96, 1996, Prague, pp.7-10.
2. Ismailov K.A., Konakova R.V., Torchinskaya T.V. The decreasing of deep recombination centers concentration under ionizing radiation in silicon IMPATT diodes / Abstracts of the Fourth "Lund" Int. Conf. on Deep Level Impurities in Semiconductors. Eger: 1983, Hungary, pp. 188-189.
3. Boltovets N.S., Belyaev A.A., Venger E.F., Kashin G.N., Konakova R.V., Lyapin V.G., Milenin V.V., Soloviev E.A., Tagaev M.B. Investigation of heat and radiation tolerance of Au-Cu-Cr-Si power Schottky diodes / Proc.4th International Seminar on Power Semiconductors, 1998, Prague, pp. 149-152.
4. Тагаев М.Б., Исмаилов К.А. Влияние γ -радиации ^{60}Co на время восстановления обратного сопротивления силовых диодов Шоттки Al- $n-n^+$ -Si // Доклады АН РУз, 1999, № 4. - С.81-83.
5. Тагаев М.Б., Исмаилов К.А., Камалов А.Б., Статов В.А. Влияние β и γ -радиации на электрофизические характеристики арсенидгаллиевых поверхностно-барьерных структур / Труды 14^{ой} Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. Крым. Алушта, 12-17 июня 2000. -С. 33-34.
6. Harris A.J., Frasca R.D. et al. Proton Irradiation of Silicon Schottky Barrier Power Diodes // IEEE Transactions on Nuclear Science. Volume 53, Issue 4, 2006, pp. 1995 – 2003
7. A. Bulgurcuoğlu A.E., Gökdemir P., Aydoğan P., Yılmaz D., Özdemir O., Kutlu K. Electrical and photovoltaic properties of Cr/Si Schottky diodes // International Journal of Hydrogen Energy. Volume 34, Issue 12, 2009, pp 5208-5212
8. Demircioglu Ö., Karataş Ş., Yıldırım N. Bakkaloglu Ö.F. Effects of temperature on series resistance determination of electrodeposited Cr/n-Si/Au-Sb Schottky structures // Microelectronic Engineering. Volume 88, Issue 9, 2011, pp. 2997-3002
9. Karataş Ş., Yıldırım N., Türütçü A. Electrical properties and interface state energy distributions of Cr/n-Si Schottky barrier diode // Superlattices and Microstructures. Volume 64, 2013, pp. 483-494
10. Srour J. R., Palko J. W. A Framework for Understanding Displacement Damage Mechanisms in Irradiated Silicon Devices // IEEE Transactions on Nuclear Science. V. 53, Issue 6, 2006. pp. 3610 – 3620
11. Bilkanab Ç., Gümüşç A., Altındala Ş. The source of negative capacitance and anomalous peak in the forward bias capacitance-voltage in Cr/p-Si Schottky barrier diodes (SBDs) // Materials Science in Semiconductor Processing. Volume 39, 2015, pp. 484-491
12. Dolgolenko A.P., Litovchenko P.G. et al Particularities of the formation of radiation defects in silicon with low and high concentrations of oxygen // Physica Status Solidi b Volume

243, Issue 8, 2006 pp. 1842-1852

13. Khuram A., Sohail A.K., MatJafri M.Z. ^{60}Co γ -irradiation Effects on Electrical Characteristics of Monocrystalline Silicon Solar Cell // *Int. J. Electrochem. Sci.*, V. 8, 2013. pp. 7831 – 7841

14. Vali I.P., Shettya P.K., Maheshaa M.G., Keshava R., Satheb V.G., Phaseb D.M., Choudhary R.J. Gamma irradiation effects on Al/n-Si Schottky junction properties // *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B*. V.436. 2018. pp. 191-197

15. Taşçıoğlu İ., Tataroğlu A., Özbay A., Altındal Ş. The role of ^{60}Co γ -ray irradiation on the interface states and series resistance in MIS structures // *Radiation Physics and Chemistry*. V.79, Issue 4, 2010, Pp. 457-461

16. Pashaev I.G. Study of the relaxation of the excess current in silicon Schottky diodes // *Semiconductors*. V. 48, Issue 10, 2014, pp 1391–1394

References

1. Dmitruk N.L., Konakova R.V., Ismailov K.A., Pavlenko A.A., Tagaev M.B. ^{60}Co γ -radiation influence on back resistance restore time of Al–n–n⁺-Si Schottky power diodes. *In.: Proc. 3rd International Seminar on power semiconductors. ISPS'96*, 1996, Prague, pp.7-10.

2. Ismailov K.A., Konakova R.V., Torchinskaya T.V. The decreasing of deep recombination centers concentration under ionizing radiation in silicon IMPATT diodes. *Abstracts of the Fourth Eund'Int. Conf. on Deep Level Impurities in Semiconductors*. Eger: 1983, Hungary, pp. 188-189.

3. Boltovets N.S., Belyaev A.A., Venger E.F., Kashin G.N., Konakova R.V., Lyapin V.G., Milenin V.V., Soloviev E.A., Tagaev M.B. Investigation of heat and radiation tolerance of Au–Cu–Cr–Si power Schottky diodes. *Proc.4th International Seminar on Power Semiconductors*. 1998, Prague, pp. 149-152.

4. Tagaev M.B., Ismailov K.A. *Vliyanie γ -radiatsii ^{60}Co na vremya vosstanovleniya obratnogo soprotivleniya silovykh diodov Shottki Al–n–n⁺-Si* [The effect of ^{60}Co γ radiation on the recovery time of the inverse resistance of the Schottky power diodes Al–n–n⁺-Si]. *Doklady AN Ruz* [Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan], 1999, no. 4. pp. 81-83. (In Russ.)

5. Tagaev M.B., Ismailov K.A., Kamalov A.B., Statov V.A. *Vliyanie β i γ - radiatsii na elektrofizicheskie kharakteristiki arsenidgallievykh poverkhnostno-bar'ernykh struktur* [The effect of β and γ radiation on the electrophysical characteristics of gallium arsenide surface-barrier structures]. *Trudy 14-oi Mezhdunarodnoi konferentsii po fizike radiatsionnykh yavlenii i radiatsionnomu materialovedeniyu* [Proceedings of the 14th International Conference on Physics of Radiation Phenomena and Radiation Materials Science]. Crimea, Alushta, June12-17, 2000, pp. 33-34. (In Russ.)

6. Harris A.J., Frasca R.D. et al. Proton Irradiation of Silicon Schottky Barrier Power Diodes. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. Volume 53, Issue: 4, 2006, pp. 1995 – 2003

7. A. Bulgurcuoğlu A.E., Gökdemir P., Aydoğan P., Yilmazer D., Özdemir O., Kutlu K. Electrical and photovoltaic properties of Cr/Si Schottky diodes. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 34, Issue 12, 2009, pp 5208-5212

8. Demircioglu Ö., Karataş Ş., Yıldırım N. Bakkaloglu Ö.F. Effects of temperature on series resistance determination of electrodeposited Cr/n-Si/Au–Sb Schottky structures. *Microelectronic Engineering*. Volume 88, Issue 9, 2011, pps 2997-3002

9. Karataşa Ş., Yildirim N., Türütçü A. Electrical properties and interface state energy distributions of Cr/n-Si Schottky barrier diode. *Superlattices and Microstructures*. Volume 64, 2013, pp. 483-494
 10. Srour J. R., Palko J. W. A Framework for Understanding Displacement Damage Mechanisms in Irradiated Silicon Devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. V. 53, Issue 6, 2006. pp. 3610 – 3620
 11. Bilkanab Ç., Gümüştürk A., Altındal Ş. The source of negative capacitance and anomalous peak in the forward bias capacitance-voltage in Cr/p-Si Schottky barrier diodes (SBDs). *Materials Science in Semiconductor Processing*. Volume 39, 2015, pp. 484-491
 12. Dolgolenko A.P., Litovchenko P.G. et al Particularities of the formation of radiation defects in silicon with low and high concentrations of oxygen. *Physica Status Solidi B*. Volume 243, Issue 8, 2006 pp. 1842-1852
 13. Khuram A., Sohail A.K., MatJafri M.Z. ⁶⁰Co γ -irradiation Effects on Electrical Characteristics of Monocrystalline Silicon Solar Cell. *Int. J. Electrochem. Sci*. V. 8, 2013. pp. 7831 – 7841
 14. Vali I.P., Shetty P.K., Mahesha M.G., Keshava R., Sathe V.G., Phasab D.M., Choudhary R.J. Gamma irradiation effects on Al/n-Si Schottky junction properties. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B*. V.436. 2018. pp. 191-197
 15. Taşçıoğlu İ., Tataroğlu A., Özbay A., Altındal Ş. The role of ⁶⁰Co γ -ray irradiation on the interface states and series resistance in MIS structures. *Radiation Physics and Chemistry*. V.79, Issue 4, 2010, Pp. 457-461
 16. Pashaev I.G. Study of the relaxation of the excess current in silicon Schottky diodes. *Semiconductors*. V. 48, Issue 10, 2014, pp 1391–1394
-

The text of the article was translated by Editorial Team of journal of "Semiconductor Physics and Microelectronics". For more information contact: ispm_uz@mail.ru

1. Introduction

Ensuring radiation resistance and reliability of electronic equipment products is one of the most important tasks in the creation of electronic equipment for nuclear power plants, aircraft, space and ship equipment, special medical and technological equipment, etc. The widespread use of electronic equipment in national facilities does not require the creation of products not only a large degree of integration and speed, but also satisfying, in some cases, very harsh operating conditions (high temperatures, as well as high-intensity radiation exposure). In connection with the foregoing, ensuring the radiation resistance and reliability of semiconductor devices used in electronic equipment is relevant in both physical and applied aspects.

From the literature data, it is known that the electrophysical parameters of metal-semiconductor contacts (barrier height, contact resistance, ideality factor, and others) and their resistance to radiation influences are associated with the features of interfacial interactions at the interface (IF) of phases [1-3]. Using active external influences and metal alloys of refractory metals, it is possible to purposefully form IFs with a specific intermetallic composition and structure. Therefore, using this, it is possible to change the electrophysical parameters of the metal-semiconductor contact [4,5].

This study examined experimental studies of the resistance of metal-silicon barrier contacts used to create Schottky power diodes to active influences, namely γ -ray irradiation.

For a variety of instrument applications, Schottky barrier power diodes have important advantages over p - n junction power valves. First of all, these are small values of direct voltage drop under operating conditions, which increases the conversion efficiency, and high speed, which allows them to be used not only in power networks at 50 and 400 Hz, but also in high-frequency pulse voltage converters.

At the same time, the main problem in creating highly reliable power diodes with a Schottky barrier is the formation of a metal-semiconductor contact, stable under harsh operating conditions of electrical devices and resistant to short-term overloads and various external influences, including the effects of ionizing radiation. To achieve these parameters, it is necessary to use a semiconductor with high structural perfection and uniformity of structural and electrophysical parameters of the starting material. Monocrystalline silicon, namely auto-epitaxial n - n^+ structures, the improvement of the technology of which has allowed to achieve high crystallographic perfection and low concentrations of undesirable impurities, most fully meets the last requirement. It should be noted that in general, serial silicon power diodes demonstrate good radiation resistance, and the main reason for the increase in the reverse current is the generation-recombination component associated with radiation defects [6]. Nevertheless, for diodes with a Schottky barrier, one should also take into account the effect of radiation treatments on the metal-semiconductor interface, radiation-induced diffusion of the metallization material into the semiconductor matrix, the formation of silicides and local oxide nanophases and the related changes in the density of surface states. They determinate such important characteristics of the instrument structure as the height of the barrier, effects of carrier accumulation, high-frequency losses and anomalous negative capacitance, discovered by a number of researchers on Cr-Si structures [7-10].

2. Field of research

The objects of this experimental study were packaged low-series diode structures with chromium-based Schottky barriers.

Experimental studies were carried out using a number of complex automated techniques, including for studying the electrophysical, structural, and recombination parameters of diodes and surface-barrier structures.

3. Experimental technique

The Schottky barrier was formed by vacuum deposition of a 70 nm thick chromium layer followed by the growth of copper (100 nm) and gold (3000 nm) layers by electrochemical deposition and tinning with soft solders. The upper contact is designed to solder the power output to the platform. An ohmic contact to the n^+ - region was formed by sputtering of Pd–Cr–Cu layers followed by electrochemical growth of copper layers to the required thickness.

The planar topology of the diode structure with a Schottky barrier based on silicon epitaxial $n-n^+$ structures was used. We investigated options for creating diodes with a reverse voltage of 100-200V and a working area of up to 100mm² for use in high-current devices. Silicon epitaxial structures with a resistivity of 30 ± 3 Ohm·sm and a thickness of 15 ± 2 μm were used. The resistivity of the substrate n^+ - silicon was 0,003 Ohm·sm, and the thickness of the n^+ - substrate was ~ 300 μm.

The parameters of the reverse branch of the VAC (reverse current and avalanche breakdown voltage) were stabilized by the use of field plates. They were a metal-insulator-semiconductor (MIS) structure, included along the perimeter of the Schottky barrier in the form of a guard ring. For diodes with a Schottky barrier, the field lining in a planar design provides the conditions for a controlled avalanche breakdown of the structure and eliminates the appearance of sharp (low-voltage) microplasmas (MP). When applying reverse voltage to the diode structure, the protective MIS structure is under the same voltage. Carrier depletion occurs both in the Schottky barrier and in the MIS structure.

On Schottky power diodes Au–Cu–Cr– $n-n^+$ -Si and test structures Cr– $n-n^+$ -Si before and after irradiation with ⁶⁰Co γ-quanta in the dose range of 10^2 – $2 \cdot 10^6$ Gr and 10^3 – 10^5 Gr, respectively, at an intensity doses of 1 Gr/s were measured direct and reverse branches of the VAC, volt-pharad characteristics (VPC). For Schottky power diodes before and after irradiation with ⁶⁰Co γ-quanta up to a dose of $2 \cdot 10^6$ Gr, the dependences of the switching charge Q on the direct current were measured at $V_{rev} = 10V$.

4. Experimental results

The electrophysical parameters of the Schottky Cr– $n-n^+$ -Si diodes before and after irradiation in the dose range 10^3 - 10^5 Gray are given in Table 1. From the data presented in it, it can be seen that radiation processing of the samples in the dose range 10^3 – 10^5 Gray contributes to a change in the parameters of the Schottky barrier: insignificant variations in the barrier height ϕ_B and an increase in the ideality factor n. Subsequent heat treatment leads to a slight increase in n with increasing ϕ_B [3].

Note that the values of $\phi_B=0,60$ – $0,61$ eV obtained as a result of radiation exposure indicate the absence of silicide phases of chromium on the GR. This is in good agreement with the Auger analysis. It should also be noted that the width of the transition region between the chromium film

and the silicon substrate remains practically unchanged (the estimate was carried out by the chromium concentration, determined by the Auger peak intensity as 86 and 14% of the maximum silicon Auger peak intensity).

The data on the changes in the main parameters of the investigated structure as a result of irradiation are shown in Table 1. It can be seen from it that the height of the Schottky barrier corresponds to a value of 0,60–0,61 eV (typical for a contact formed by metallic chromium [3]) and practically does not change the entire studied range of doses of γ - radiation. This circumstance may indicate the general nature of the change in n with the dose, most likely associated with some “blurring” of the transition layer as a result of radiation-stimulated mass transfer of the metal from the contact to the semiconductor.

Table 1

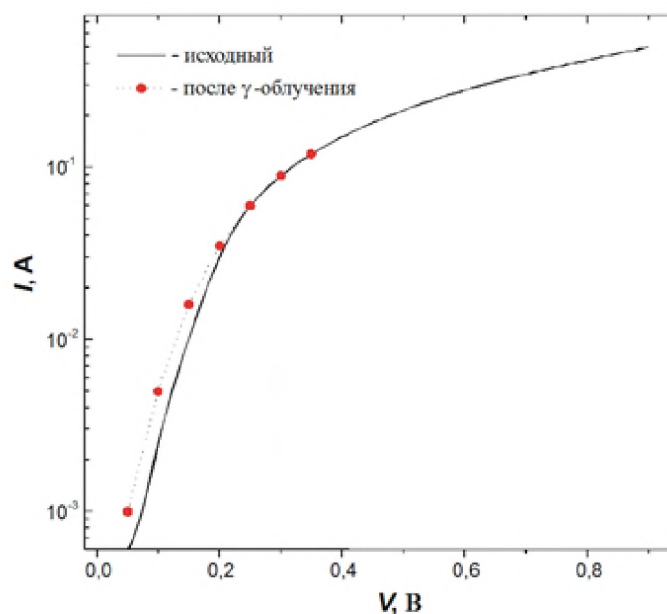
Electrophysical parameters (barrier height φ_B and ideality factor n) of test structures Au–Cu–Cr– n - n^+ -Si of Schottky power diodes before and after irradiation with γ - ^{60}Co quanta

| Radiation dose, Grey | φ_B, eV | N |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 0 (source samples) | 0,61 | 1,23 |
| 10^2 | 0,61 | 1,25 |
| $5 \cdot 10^2$ | 0,61 | 1,28 |
| 10^3 | 0,61 | 1,23 |
| $5 \cdot 10^3$ | 0,60 | 1,31 |
| 10^4 | 0,60 | 1,30 |
| $5 \cdot 10^4$ | 0,61 | 1,31 |
| $2 \cdot 10^5$ | 0,60 | 1,35 |
| $4 \cdot 10^5$ | 0,60 | 1,35 |
| $8 \cdot 10^5$ | 0,60 | 1,37 |
| 10^6 | 0,60 | 1,36 |
| $2 \cdot 10^6$ | 0,60 | 1,36 |

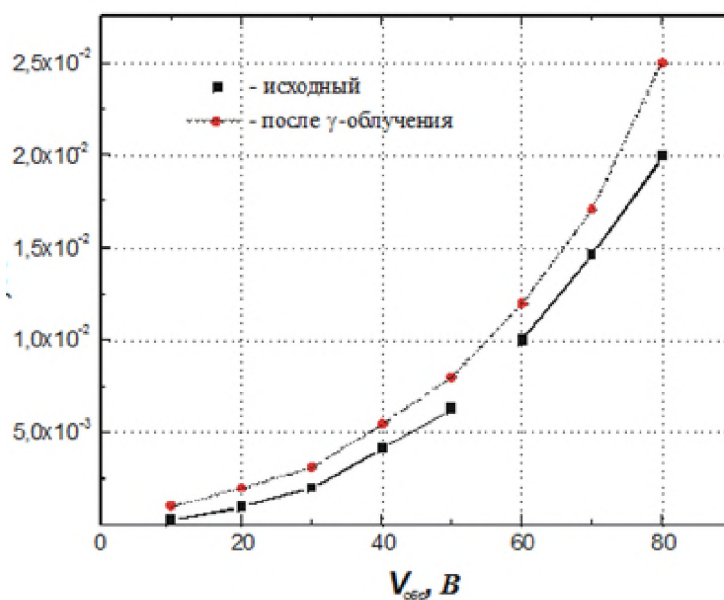
1. Results and discussion

The forward and reverse branches of the VAC of the Schottky power diode before and after irradiation to a dose of $2 \cdot 10^6$ Gray are shown in Fig. 1.

It is seen that after irradiation, the VAC changes insignificantly. The initial portion of the current – voltage characteristic, which is practically unchanged after irradiation, indicates that, after exposure to γ - radiation, φ_B practically coincides with the initial value. At the same time, a slight increase in the reverse current can be explained if we take into account the decrease in the lifetime of minority charge carriers. The latter is indirectly indicated by a decrease in the switching charge in the range of measured forward currents I ($0 \div 20$ mA) in the sample irradiated to $2 \cdot 10^6$ Gray. Preservation of the shape of the reverse VAC with a slight increase in the reverse current may indicate the accumulation in the space charge region of radiation defects characteristic of gamma irradiation of silicon [10]. It is also possible to rearrange existing defect complexes with the participation of oxygen (A centers) [11,12] and also oxide phases at the metal-semiconductor interface [13-15]. The spatial restructuring of charged deep centers, which determines non-stationary characteristics, such as recovery time, can also affect the characteristics of a diode [16].



a)



б)

Fig. 1. The direct branch of the VAC of the power diode with a Schottky barrier before and after γ - irradiation with a dose of $2 \cdot 10^6 \text{Gr}$ (a) and the reverse branch of the VAC of the power diode with a Schottky barrier before and after irradiation with γ -quanta ^{60}Co with a dose of $2 \cdot 10^6 \text{Gr}$ (b)

2. Conclusion

A study of the radiation resistance of Cr-Si Schottky power diodes showed their high stability under gamma irradiation in a wide range of doses, without a significant deterioration in performance. The possibility of radiation stimulation by the process of controlling the non-ideality coefficient of such diodes is also shown.