

## Формирование антиотражающей структуры на поверхности монокристаллического кремния ускоренными ионами Хе

© 2024 г. М. В. Зорина, М. С. Михайленко✉, А. Е. Пестов,  
А. А. Перекалов, Н. И. Чхало

*Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., 603087, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: [mikhaylenko@ipmras.ru](mailto:mikhaylenko@ipmras.ru)

**Аннотация.** Рассмотрено влияние ионно–пучкового травления на отражательные характеристики монокристаллического кремния. Исследована формирующаяся в процессе ионной обработки морфология поверхности. Обнаружено, что при нормальном падении ионов Хе на поверхность образца и низких энергиях ионов формируется регулярная ямочная структура с увеличением амплитуды неоднородностей в диапазоне пространственных частот  $0,025–0,5$  мкм<sup>-1</sup>, а при скользком падении ионов Хе и высоких энергиях — чешуйчатая топология с увеличением амплитуды неоднородностей в диапазоне пространственных частот  $0,025–10$  мкм<sup>-1</sup>. Предложена методика формирования на поверхности полированной пластины монокристаллического кремния с ориентацией (110) развитой регулярной структуры методом ионно–пучкового травления. Методика заключается в облучении поверхности образца из монокристаллического кремния широким квазипараллельным пучком моноэнергетических ионов Хе. Показано, что при обработке монокристаллического кремния пучком ускоренных ионов Хе при угле падения ионов  $70^\circ$  от нормали к поверхности и энергии ионов 1000 эВ в течение всего 30 мин на поверхности образца формируется развитый рельеф, уменьшающий отражение и обеспечивающий поглощение излучения с длинами волн в диапазоне 400—1000 нм  $>90$  %. Методика обеспечивает снижение коэффициента отражения больше чем у «черного» кремния, приготовленного по стандартной технологии на длинах волн 532 и 793 нм, а также в более широком диапазоне углов падения на длинах волн 532, 633 и 793 нм, что в перспективе позволит изготавливать солнечные электростанции без дорогостоящих поворотных опор и снизить их эксплуатационную себестоимость.

**Ключевые слова:** «черный» кремний, ионное травление, солнечный элемент, видимый свет, ИК–излучение, шероховатость

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075–15–2024–637.

**Для цитирования:** Зорина М.В., Михайленко М.С., Пестов А.Е., Перекалов А.А., Чхало Н.И. Формирование антиотражающей структуры на поверхности монокристаллического кремния ускоренными ионами Хе. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(4): 287—294. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202408.608>

# Formation of an antireflective structure on the surface of single-crystal silicon by accelerated Xe ions

M. V. Zorina, M. S. Mikhailenko✉, A. E. Pestov, A. A. Perekalov, N. I. Chkhalo

*Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences,  
7 Academicheskaya Str., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation*

✉ Corresponding author: mikhaylenko@ipmras.ru

**Abstract.** The paper studies the effect of ion-beam etching on the reflectivity characteristics of single-crystal silicon. The surface morphology formed during ion beam treatment was investigated and it was found that at normal incidence of Xe ions on the sample surface and low ion energies, a regular pit structure is formed with an increase in the amplitude of inhomogeneities in the spatial frequency range of  $0.025\text{--}0.5\ \mu\text{m}^{-1}$ , and at grazing incidence of Xe ions and high energies, a scaly topology is formed with an increase in the amplitude of inhomogeneities in the spatial frequency range of  $0.025\text{--}10\ \mu\text{m}^{-1}$ . Based on the study, a technique for forming a developed regular structure on the surface of a polished single-crystal silicon wafer with the (1 10) orientation using ion-beam etching is proposed. The technique consists in irradiating the surface of a single-crystal silicon sample with a wide quasi-parallel beam of monoenergetic Xe ions. It is shown that the treatment of monocrystalline silicon with a beam of accelerated Xe ions at an ion incidence angle of  $70^\circ$  and an ion energy of 1000 eV for only 30 min. forms a developed relief on the sample surface, reducing reflection and providing absorption of radiation with wavelengths in the wavelength range of 400–1000 nm by more than 90%. The technique provides a decrease in the reflection coefficient greater than that of black silicon prepared by standard technology at wavelengths of 532 and 793 nm, as well as in a wider range of incidence angles at wavelengths of 532, 633 and 793 nm, which in the future will allow the manufacture of solar power plants without expensive rotary supports and reduce their operating costs.

**Keywords:** “black” silicon, ion etching, solar cell, visible light, IR radiation, roughness

**Acknowledgments:** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement No. 075–15–2024–637.

**For citation:** Zorina M.V., Mikhailenko M.S., Pestov A.E., Perekalov A.A., Chkhalo N.I. Formation of an antireflective structure on the surface of single-crystal silicon by accelerated Xe ions. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(4): 287–294. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202408.608>

## Введение

Коэффициент полезного действия (КПД) серийных промышленных солнечных батарей составляет порядка 27 % для элементов из кристаллического кремния [1–3]. Одним из основных конкурентов на рынке производства солнечных элементов выступают тонкопленочные структуры из CdTe с КПД 22,5 % [4], в то же время на гетероструктурах GaInP/(Al)GaAs/Si удается получить КПД до 34,5 % [5, 6], а теоретический предел КПД кремниевых монокристаллических батарей — 29,4 % [7, 8]. Счет в индустрии в терминах эффективности идет на единицы и даже на десятки доли процента. Например, увеличение средней эффективности солнечной панели стандартного размера с 15 до 20 % привел к росту ее номинальной мощности с 250 до 370 Вт, т. е. в полтора раза. Один из спосо-

бов увеличения эффективности элемента — это уменьшение отражения от кремниевых пластин за счет модификации поверхности.

«Черный» кремний (b-Si) — это общепринятое название материала, который представляет собой Si с поверхностью, модифицированной таким образом, чтобы обеспечить низкую отражательную способность в видимом и/или инфракрасном диапазонах длин волн. В настоящее время прилагаются значительные усилия для снижения отражательной способности за счет сочетания геометрического текстурирования и просветляющих покрытий. Последние, однако, имеют резонансную структуру, которая ограничивает их эффективность узким диапазоном длин волн. Геометрическое текстурирование более гибкий инструмент, но оно проводится в основном за счет выращивания на поверхности игольчатой структуры [9, 10] или трав-

ления в химически активной плазме фторида серы с кислородом ( $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ ) [11, 12], которые являются сложными в реализации подходами, требующими специализированного оборудования. Поэтому поиск альтернативного метода геометрического текстурирования поверхности монокристаллического кремния является актуальной задачей.

Ранее авторами в работах [13, 14] было обнаружено пороговое поведение зависимости шероховатости поверхности монокристаллического кремния от энергии налетающих ионов Ar. При энергии ионов выше пороговой шероховатость сглаживается, а при энергии ионов ниже пороговой происходит значительное развитие шероховатости. Было показано, что при обработке поверхности монокристаллического кремния (100), (110) и (111) ионами Ar с энергией менее 450 эВ при нормальном их падении на поверхность образца формируется «ямочная» периодическая структура. Размах высот (PV) ямок практически линейно зависит от глубины (времени) травления. Формирование такого рельефа может быть использовано для текстурирования поверхности монокристаллического кремния, которое будет приводить к уменьшению коэффициента отражения Френеля. Однако, как показали эксперименты по исследованию отражательной способности подготовленных таким образом образцов, снижение отражения происходит в узком диапазоне длин волн и в значительно меньшей степени, чем у традиционной методики формирования черного кремния [15].

Ниже предложен простой в реализации метод текстурирования поверхности за счет травления поверхности монокристаллического кремния ускоренными ионами Хе.



## Образцы и методы исследования

В качестве экспериментальных образцов были выбраны стандартные кремниевые пластины для микроэлектронной промышленности [16]. Пластины разрезались на куски размером  $15 \times 15 \text{ мм}^2$  и подвергались ионной обработке в установке, подробно описанной в работе [17]. Обработка производилась ускоренными ионами Хе с энергией 300—1000 эВ с помощью технологического источника КЛАН-103М (Кауфман с накальным катодом, производства НТК «Платар»), обладающего квазипараллельным пучком с разбросом по энергии  $\pm 3 \text{ эВ}$  и расходимостью  $3^\circ$ , апертура источника — эллипс с полуосями 30 и 45 мм. Для контроля глубины травления использовался «свидетель» НТК «Платар» — аналогичный образец, который устанавливался рядом с обрабатываемым образцом, часть поверхности свидетеля закрывалась маской. Таким образом, в результате ионного травления на границе маски формировалась ступенька, высота которой измерялась на интерференционном микроскопе белого света SuperView W1.

Исследование топологии поверхности проводилось с помощью атомно-силовой микроскопии. Измерительный стенд, построенный на базе атомно-силового микроскопа Ntegra Prima (NT-MDT), и методика оценки величины шероховатости, основанная на построении PSD-функции подробно описаны в работах [18, 19].

Оценка значения коэффициента отражения от образца, подвергнутого ионной обработке,  $R_{ie}$  проводилась в сравнении с образцом черного кремния ( $R_{b-si}$ ), изготовленным по стандартной технологии (травление в химически активной плазме с предварительным микромаскированием за счет локального окисления). Исследования выполняли на нескольких длинах волн в диапазоне 532—793 нм на специализированном приборе (рефлектометре), конструкция которого описана в работе [20]. Схема и внешний вид прибора приведены на рис. 1.

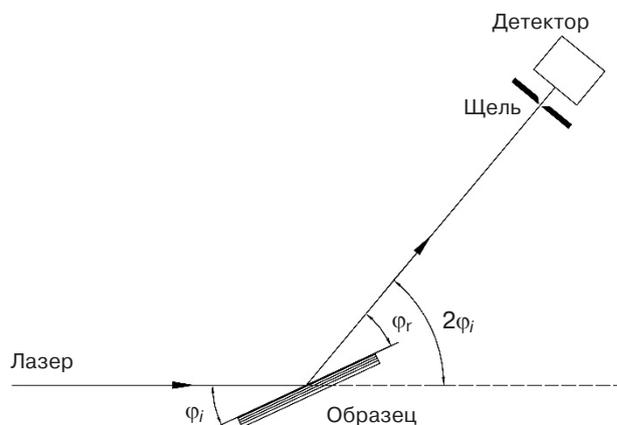


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) рефлектометра  
Fig. 1. External appearance (a) and diagram (b) of the reflectometer

В приборе реализована схема измерения коэффициента отражения, при которой угол падения  $\varphi_i$  излучения на образец всегда равен углу отражения  $\varphi_r$ . Рабочий диапазон углов падения составляет  $\varphi_i = 15^\circ \div 70^\circ$ .

Обработка поверхности осуществлялась по схеме, представленной на рис. 2. Образец закреплялся на предметном столике, который позволяет задавать угол падения ионов на поверхность от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Во всех экспериментах использовался инертный газ ксенон (Xe). Параметры ионного пучка: энергия ионов 300—1000 эВ, ток ионов 50 мА, время травления для всех образцов составляло 30 мин.

### Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что, как и для случая ионов Ag при нормальном падении ионов на поверхность, шероховатость поверхности в зависимости от энергии ионов ведет себя пороговым образом. Рельеф поверхности образцов развивается при энергии ионов ниже пороговой, которая для ионов Xe составила 850 эВ, а при энергии ионов выше 850 эВ заметно сглаживается. Кроме того, развитие шероховатости наблюдается при скользящем падении ионов на поверхность образца, что соответствует модели Брэдли—Харпера [21].

На рис. 3 представлены АСМ-изображения образцов, на которых наблюдалось наибольшее развитие рельефа. Образец 1 подвергался травлению при энергии ионов 400 эВ и нормальном угле падения ионов на поверхность, образец 2 обработан ионами с энергией 1000 эВ под углом падения  $70^\circ$  от нормали.

Как можно видеть из рис. 3, а на образце 1 наблюдается топология (ямки глубиной до 200 нм), схожая с топологией, наблюдавшейся в нашей предыдущей работе [15], для которой заметное снижение отражения происходило только для наиболее короткой длины волны (532 нм) и только в узком диапазоне углов падения. Такое поведение объясняется более узким диапазоном пространственных частот (см. рис. 3, б), в котором наблюдается развитие шероховатости. Для образца 2 шероховатость развивается в значительно более широком диапазоне пространственных частот (вплоть до  $10 \text{ мкм}^{-1}$ , см. рис. 3, з), что позволяет ожидать расширение спектрального диапазона и диапазона углов падения излучения на поверхность образца, для которых снижается коэффициент отражения.

Таким образом, для исследования коэффициентов отражения был выбран образец 2. Эксперименты проводились с использованием HeNe-лазера с длиной волны 633 нм и лазерных диодов с длинами волн 532 и 793 нм (все источники обладали неполяризованным излучением). Угловые зави-

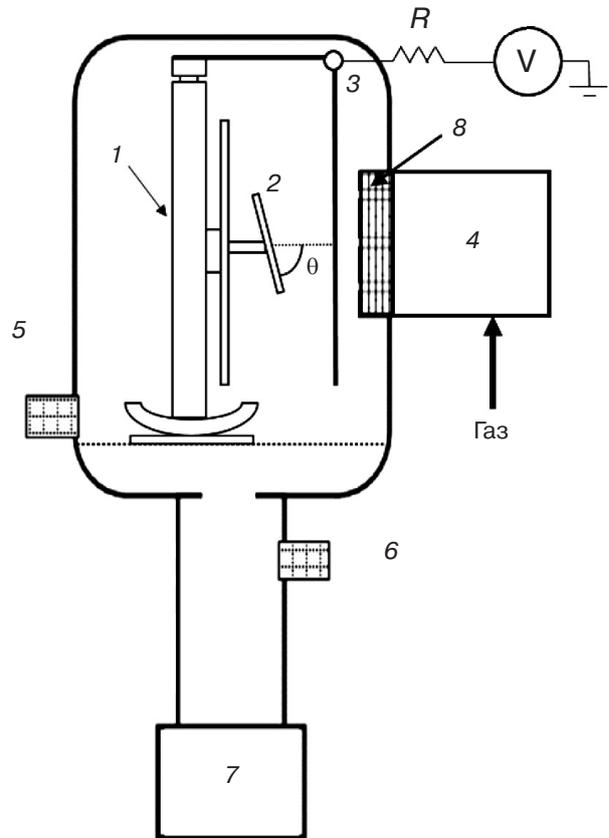


Рис. 2. Схема установки: 1, 2 — система позиционирования; 3 — заслонка, отделяющая пучок ионов от основного объема вакуумной камеры; 4 — источник ускоренных ионов КЛАН-103М; 5 — вакуумная лампа термодарного типа; 6 — вакуумная лампа магнито-разрядного типа; 7 — система откачки интегрального типа; 8 — ионно-оптическая система

Fig. 2. Installation diagram: (1), (2) positioning system, (3) shutter separating the ion beam from the main volume of the vacuum chamber, (4) source of accelerated ions KLAN-103M, (5) thermocouple-type vacuum tube, (6) magnetic-discharge-type vacuum tube, (7) integral-type pumping system, (8) ion-optical system

симости коэффициента отражения, измеренные на рефлектометре (см. рис. 1), представлены на рис. 4. Значения коэффициента отражения при угле скольжения  $70^\circ$  (близко к нормали) приведены в табл. 1.

Как можно видеть из данных табл. 1, на образце, подвергнутом ионно-пучковой обработке, наблюдается существенное снижение коэффициента

Таблица 1 / Table 1

**Коэффициенты отражения от исследованных образцов при  $\varphi_i = 70^\circ$**   
Reflection coefficients of the studied samples at  $\varphi_i = 70^\circ$

Образец	$\lambda = 532 \text{ нм}$	$\lambda = 633 \text{ нм}$	$\lambda = 793 \text{ нм}$
Ионное травление	0,8 %	0,8 %	0,6 %
b-Si	1,2 %	0,6 %	0,8 %

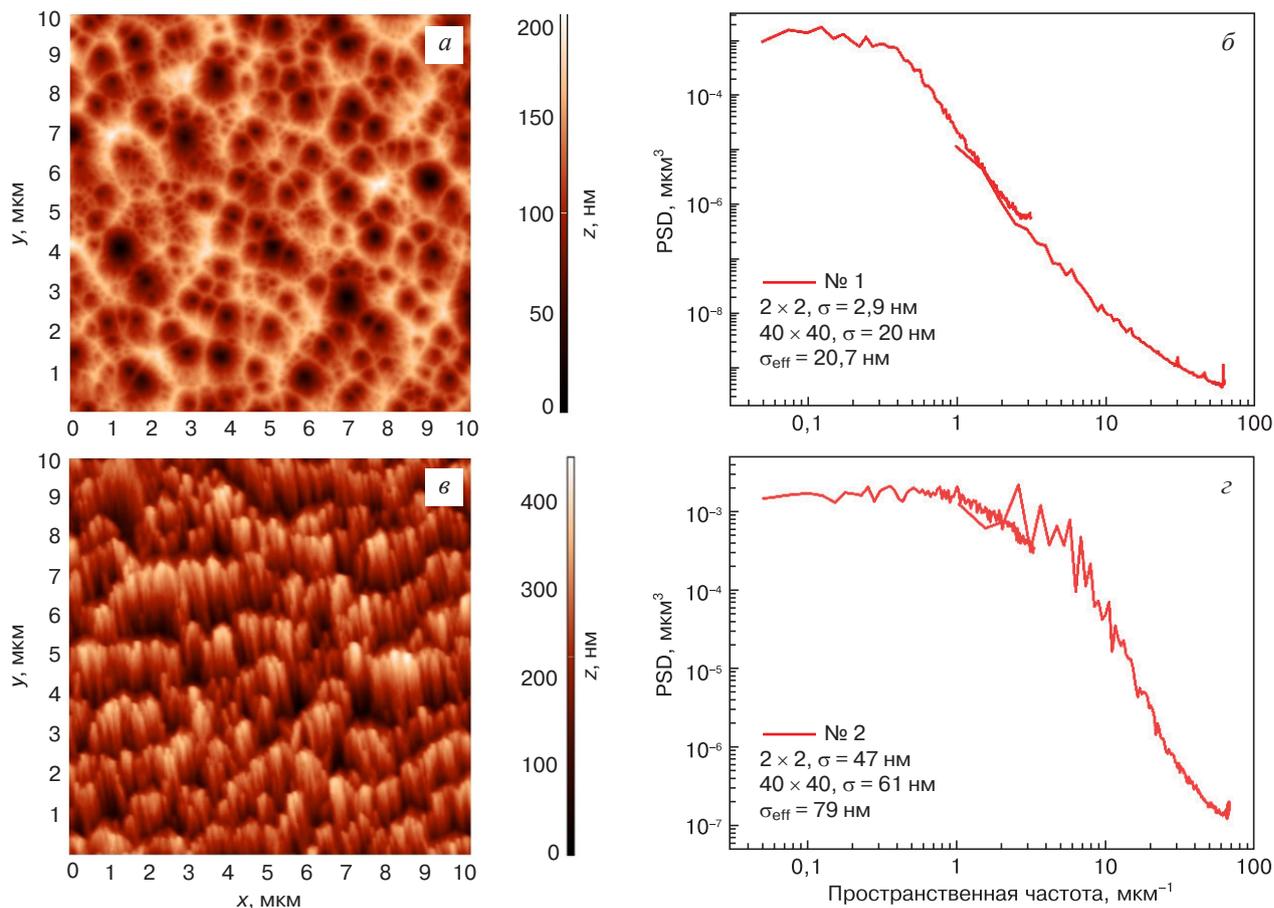


Рис. 3. АСМ–изображения (а, в) и соответствующие им спектры пространственных частот (б, г): а, б — образец 1, после травления под нормалью ионами с энергией 400 эВ; в, г — образец 2, после травления под углом 70° ионами с энергией 1000 эВ

Fig. 3. AFM images (a, b) and the corresponding spatial frequency spectra (b, r): a and b is sample 1, after etching under the normal with ions with an energy of 400 eV, b and r is sample 2, after etching at an angle of 70° with ions with an energy of 1000 eV

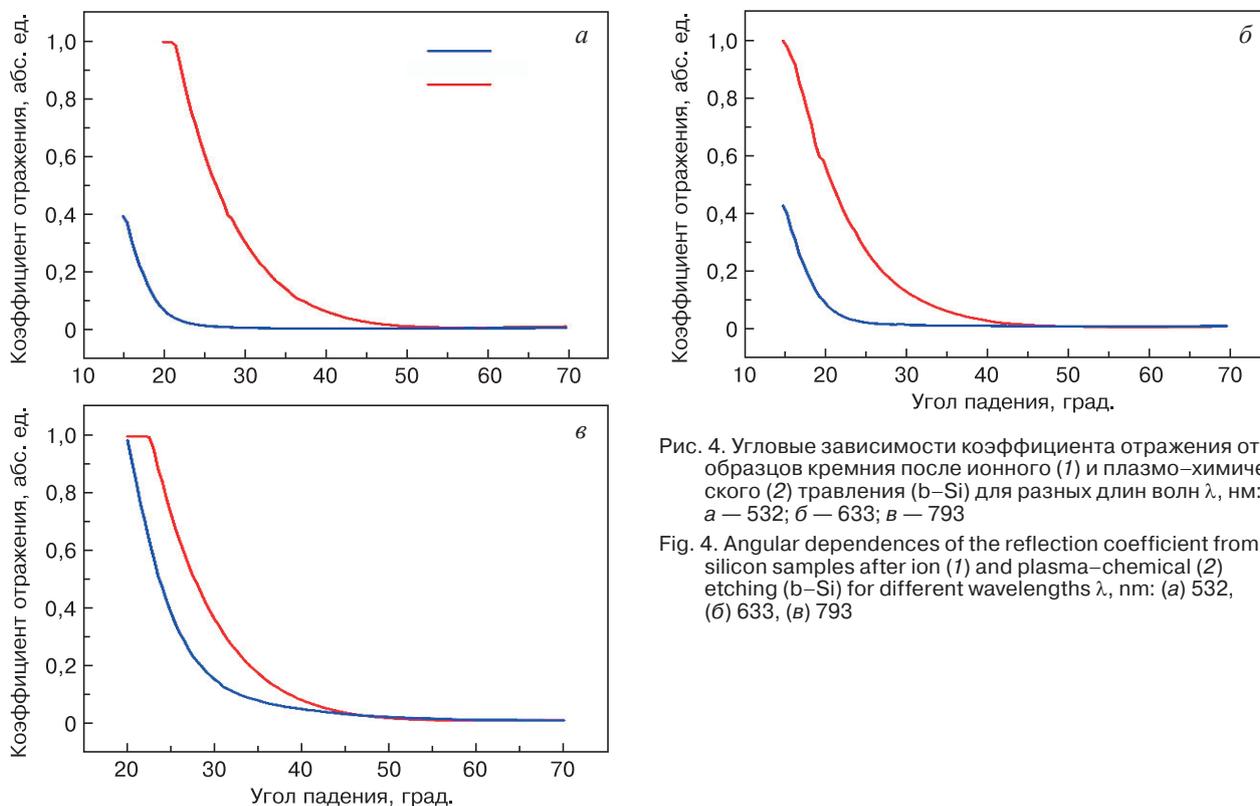


Рис. 4. Угловые зависимости коэффициента отражения от образцов кремния после ионного (1) и плазмо–химического (2) травления (b–Si) для разных длин волн  $\lambda$ , нм: а — 532; б — 633; в — 793

Fig. 4. Angular dependences of the reflection coefficient from silicon samples after ion (1) and plasma–chemical (2) etching (b–Si) for different wavelengths  $\lambda$ , nm: (a) 532, (b) 633, (b) 793

отражения в исследованном интервале длин волн. Более того, произошло значительное расширение углов падения излучения по сравнению с образцом, приготовленным по традиционной методике, для которого наблюдалось снижение отражательной способности. Лишь на длине волны 633 нм при углах, близких к нормали, для образца после ионно-пучкового травления наблюдается превышение коэффициента отражения по сравнению с образцом черного кремния ( $R_{ie} = 0,7\%$ ,  $R_{b-Si} = 0,6\%$ ). По-видимому, это связано со структурой текстурирования поверхности b-Si (SEM-изображение поверхности представлено на рис. 5), размер объектов которой наиболее оптимален на длине волны 633 нм.

На финальном этапе исследования было проведено измерение спектра поглощения образца на двухлучевом УФ-ИК спектрофотометре GENESYS 50 (область сканирования 190—1100 нм). Зависимость коэффициента поглощения от длины волны приведена на рис. 6.

Как можно видеть из рис. 6, поглощение более 90 % наблюдается в широком диапазоне длин волн от 300 до 1000 нм, что перекрывает основную часть спектра излучения Солнца на поверхности Земли.

Полученное значение поглощенной интенсивности позволяет рассматривать подготовленный таким образом материал и метод его получения в качестве перспективного для кремниевой технологии, в которой востребован так называемый черный кремний.

### Заключение

Предложен простой в реализации метод текстурирования поверхности монокристаллического кремния, позволяющий снижать отражательную способность материала (формирование так называемого черного кремния). Метод предполагает обработку поверхности материала параллельным пучком ускоренных ионов ксенона без применения специализированного оборудования, работающего с химически активными газами, или дополнительных процедур микромаскирования. Показано, что при обработке монокристаллического кремния с ориентацией (110) ускоренными ионами Xe с энергией 1000 эВ под углом  $70^\circ$  от нормали (или к поверхности) происходит развитие рельефа в широком диапазоне пространственных частот (от  $2,5 \cdot 10^{-2}$  до  $10 \text{ мкм}^{-1}$ ), что приводит к снижению коэффициента отражения на длинах волн 532 и 793 нм больше, чем для черного кремния, приготовленного по стандартной технологии с применением плазмохимического травления в смеси газов  $\text{SF}_6$  и  $\text{O}_2$ , лишь на длине волны 633 нм коэффициент от-

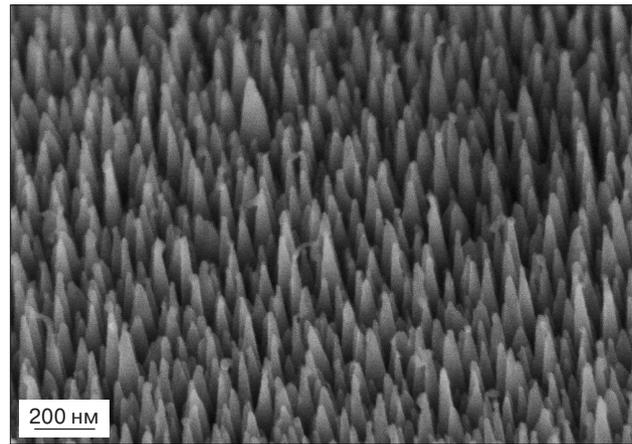


Рис. 5. SEM-изображение поверхности черного кремния  
Fig. 5. SEM image of black silicon surface

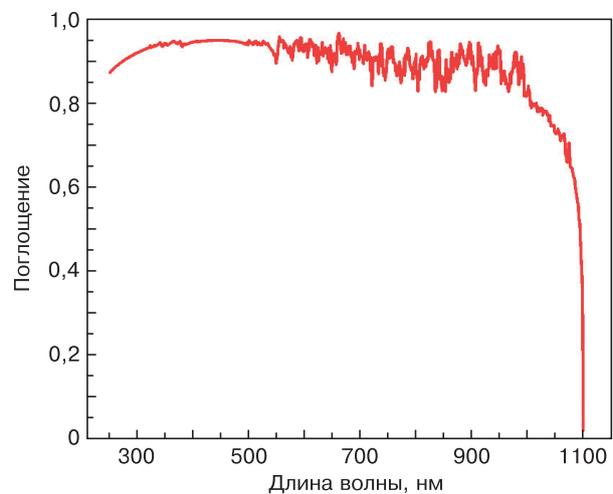


Рис. 6. Зависимость коэффициента поглощения образца 2 от длины волны

Fig. 6. Dependence of the absorption coefficient of sample 2 on the wavelength

ражения у стандартного b-Si незначительно ниже, чем у приготовленного по предложенной методике. Исследование спектральной зависимости коэффициента поглощения показало, что он больше 90 % во всем диапазоне длин волн от 300 до 1000 нм, что перекрывает основную часть спектра излучения Солнца на поверхности Земли.

Отдельно стоит отметить значительно более широкий диапазон углов падения (вплоть до  $20^\circ$  от поверхности), для которых наблюдается снижение коэффициента отражения, по сравнению со стандартным черным кремнием. Это особенно востребовано для России с ее низким надгоризонтным восходом Солнца, особенно в зимний период. Кроме того, такой широкий диапазон углов падения со сниженным коэффициентом отражения позволяет изготавливать солнечные элементы без дорогостоящих поворотных опор, что повысит их надежность и снизит их себестоимость, а также затраты на эксплуатационное обслуживание.

## Библиографический список / References

1. Green M.A., Dunlop E.D., Siefert G., Yoshita M., Kopidakis N., Bothe K., Hao, X. Solar cell efficiency tables (version 62). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2023; 31(7): 651—663. <https://doi.org/10.1002/pip.3646>
2. Andreani L.C., Bozzola A., Kowalczewski P., Liscidini M., Redorici L. Silicon solar cells: toward the efficiency limits. *Advances in Physics: X*. 2019; 4(1): 1548305. <https://doi.org/10.1080/23746149.2018.1548305>
3. Alarifi I.M. Advanced selection materials in solar cell efficiency and their properties — A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 81: 403—414. <https://doi.org/10.20944/preprints202102.0345.v1>
4. Марончук И.И., Саникович Д.Д., Давыдова Е.В., Табачкова Н.Ю. Теллурид кадмия для высокоэффективных солнечных элементов. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2023; 26(1): 17—25. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-17-25>
- Maronchuk I.I., Sanikovich D.D., Davydova E.V., Tabachkova N.Yu. Cadmium telluride for high-efficiency solar cells. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(1): 17—25. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-17-25>
5. Green M., Dunlop E., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2021; 29(1): 3—15. <https://doi.org/10.1002/pip.3371>
6. Li J., Aierken A., Liu Y., Zhuang Y., Yang X., Mo J.H., Fan R.K., Chen Q.Y., Zhang S.Y., Huang Y.M., Zhang Q. A brief review of high efficiency III–V solar cells for space application. *Frontiers in Physics*. 2021; 8: 631925. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.631925>
7. Chin X.Y., Turkay D., Steele J.A., Tabean S., Esvara S., Mensi M., Fiala P., Wolff Ch.M., Paracchino A., Artuk K., Jacobs D., Guesnay Q., Sahli F., Andreatta G., Boccard M., Jeangros Q., Ballif Ch. Interface passivation for 31.25%-efficient perovskite/silicon tandem solar cells. *Science*. 2023; 381(6653): 59—63. <https://doi.org/10.1126/science.adg0091>
8. Schäfer S., Brendel R. Accurate calculation of the absorptance enhances efficiency limit of crystalline silicon solar cells with lambertian light trapping. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2018; 8(4): 1156—1158. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2824024>
9. Небольсин В.А., Swaikat N., Воробьев А.Ю. Черный кремний: новый метод изготовления и оптические свойства. *Письма в ЖТФ*. 2018; 44(23): 16. <https://doi.org/10.21883/PJTf.2018.23.47004.17428>
- Nebol'sin V.A., Swaikat N., Vorob'ev A.Y. Black silicon: A new manufacturing method and optical properties. *Technical Physics Letters*. 2018; 44(12): 1055—1058. <https://doi.org/10.1134/S1063785018120313>
10. Kim M.S., Lee J.H., Kwak M.K. Surface texturing methods for solar cell efficiency enhancement. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2020; 21(7): 1389—1398. <https://doi.org/10.1007/s12541-020-00337-5>
11. Otto M., Algasinger M., Branz H., Gesemann B., Gimpel T., Fuchsels K., Käsebier T., Kontermann S., Koynov S., Li X., Naumann V., Oh J., Sprafke A.N., Ziegler J., Zilk M., Wehrspohn R.B. Black silicon photovoltaics. *Advanced Optical Materials*. 2015; 3(2): 147—164. <https://doi.org/10.1002/adom.201400395>
12. Addonizio M.L., Antonaia A. Textured p-type crystalline silicon surfaces obtained by multi-step plasma process for SHJ solar cells. *Vacuum*. 2023; 215: 112284. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.02.048>
13. Mikhailenko M.S., Pestov A.E., Chkhalo N.I., Zorina M.V., Chernyshev A.K., Salashchenko N.N., Kuznetsov I.I. Influence of ion-beam etching by Ar ions with an energy of 200–1000 eV on the roughness and sputtering yield of a single-crystal silicon surface. *Applied Optics*. 2022; 61(10): 2825—2833. <https://doi.org/10.1364/AO.455096>
14. Mikhailenko M.S., Pestov A.E., Chernyshev A.K., Zorina M.V., Chkhalo N.I., Salashchenko N.N. Study of the effect of neon ion energy on the surface roughness of the main cuts of monocrystalline silicon during ion etching. *Technical Physics*. 2023; 68(7): 975—979. <https://doi.org/10.61011/TP.2023.07.56648.114-23>
15. Zorina M.V., Kraev S.A., Lopatin A.Y., Mikhailenko M.S., Okhapkin A.I., Perekalov A.A., Pestov A.E., Chernyshev A.K., Chkhalo N.I., Kuznetsov I.I. On the formation of an anti-reflection layer on the surface of single-crystal silicon by ion-beam etching. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2023; 17(S1): S259—S264. <https://doi.org/10.1134/S1027451023070583>
16. TELECOM–STV. [http://www.telstv.ru/?page=en\\_silicon\\_wafers](http://www.telstv.ru/?page=en_silicon_wafers)
17. Chkhalo N.I., Kluev E.B., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Raskin D.G., Salashchenko N.N., Suslov L.A., Toropov M.N. Manufacturing of XEUV mirrors with a sub-nanometer surface shape accuracy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2009; 603: 62—65. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.160>
18. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V. Note: A stand on the basis of atomic force microscope to study substrates for imaging optics. *Review of Scientific Instruments*. 2015; 86(1): 016102. <https://doi.org/10.1063/1.4905336>
19. Chkhalo N.I., Churin S.A., Pestov A.E., Salashchenko N.N., Vainer Yu.A., Zorina M.V. Roughness measurement and ion-beam polishing of super-smooth optical surfaces of fused quartz and optical ceramics. *Optics Express*. 2014; 22(17): 20094—20106. <https://doi.org/10.1364/OE.22.020094>
20. Нечай А.Н., Перекалов А.А., Чхало Н.И., Салашченко Н.Н., Забродин И.Г., Касьяков И.А., Пестов А.Е. Модульная установка для формирования и исследования кластерных пучков инертных и молекулярных газов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2019; (9): 83—92. <https://doi.org/10.1134/S0207352819090099>
- Nechay A.N., Perekalov A.A., Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zabrodin I.G., Kaskov I.A., Pestov A.Ye. Modular device for the formation and study of cluster beams of inert and molecular gases. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2019; (9): 83—92. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0207352819090099>
21. Bradley R.M., Harper J.M.E. Theory of ripple topography induced by ion bombardment. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 1988; 6(4): 2390. <https://doi.org/10.1116/1.575561>

## Информация об авторах / Information about the authors

**Зорина Мария Владимировна** — научный сотрудник, Институт физики микроструктур Российской академии наук, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., 603087, Российская Федерация; e-mail: mzor@ipmras.ru

**Михайленко Михаил Сергеевич** — младший научный сотрудник, Институт физики микроструктур Российской академии наук, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., 603087, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2221-0047>; e-mail: mikhaylenko@ipmras.ru

**Пестов Алексей Евгеньевич** — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, Институт физики микроструктур Российской академии наук, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., 603087, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9653-5725>; e-mail: aepestov@ipmras.ru

**Перекалов Александр Алексеевич** — младший научный сотрудник, Институт физики микроструктур Российской академии наук, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., 603087, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3662-8388>; e-mail: perekalov@ipmras.ru

**Чхало Николай Иванович** — доктор физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт физики микроструктур Российской академии наук, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., 603087, Российская Федерация; e-mail: chkhalo@ipmras.ru

**Maria V. Zorina** — Researcher, Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, 7 Academicheskaya Str., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation; e-mail: mzor@ipmras.ru

**Mikhail S. Mikhailenko** — Junior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, 7 Academicheskaya Str., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2221-0047>; e-mail: mikhaylenko@ipmras.ru

**Alexey E. Pestov** — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory, Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, 7 Academicheskaya Str., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9653-5725>; e-mail: aepestov@ipmras.ru

**Alexander A. Perekalov** — Junior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, 7 Academicheskaya Str., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3662-8388>; e-mail: perekalov@ipmras.ru

**Nikolay I. Chkhalo** — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Department, Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, 7 Academicheskaya Str., Nizhny Novgorod 603950, Russian Federation; e-mail: chkhalo@ipmras.ru

*Поступила в редакцию 20.08.2024; поступила после доработки 15.11.2024; принята к публикации 26.11.2024  
Received 20 August 2024; Revised 15 November 2024; Accepted 26 November 2024*