

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 535.211

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.4.777-785>

Микроструктуры на поверхности кремния для повышения эффективности солнечных элементов, сформированные мощным световым импульсом

Б.Ф. Фаррахов

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань, Россия

bulat_f@mail.ru

Аннотация

Определено влияние режимов ионной имплантации ионами As^+ , Mn^+ , In^+ и импульсного светового отжига на механизм формирования рекристаллизованных рельефных периодических микроструктур из расплавленной фазы на поверхности кремниевой (Si) пластины для применения их в солнечной энергетике.

Ключевые слова: солнечная энергетика, кремний, импульсное световое облучение, ионная имплантация, коэффициент отражения

Благодарности. Автор выражает благодарность Р.И. Баталову за подготовку и предоставление некоторых образцов для экспериментов.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Фундаментальные основы молекулярного конструирования, физико-химического анализа строения и функциональных свойств новых интеллектуальных систем и материалов для современных наукоемких технологий в области биомедицины, катализа, энергетики,nano- и оптоэлектроники». Руководители: А.А. Карасик, С.М. Хантимеров. Номер регистрации в ЕГИСУ 122011800132-5.

Для цитирования: Фаррахов Б.Ф. Микроструктуры на поверхности кремния для повышения эффективности солнечных элементов, сформированные мощным световым импульсом // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2025. Т. 167, кн. 4. С. 777–785.

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.4.777-785>.

ORIGINAL ARTICLE

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.4.777-785>

Microstructures on silicon surface produced by a powerful light pulse to enhance solar cell efficiency

B.F. Farrakhov

*Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center,
Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia*

bulat_f@mail.ru

Abstract

The effects of implanting As^+ , Mn^+ , In^+ ions and pulsed light annealing on the formation of recrystallized relief periodic microstructures from the molten phase on the surface of a silicon (Si) plate for their potential application in solar energy conversion was studied.

Keywords: solar energy, silicon, pulsed light irradiation, ion implantation, reflection coefficient

Acknowledgments. R.I. Batalov is gratefully acknowledged for preparing and providing some samples used during the experiments. This study was carried out as part of the state assignment “Fundamentals of molecular design, physicochemical analysis of structure and functional properties of new intelligent systems and materials for modern high-tech technologies in biomedicine, catalysis, energy, and nano- and optoelectronics” (headed by A.A. Karasik and S.M. Khantimerov; state registration no. 122011800132-5 in the Integrated National Information System Database).

For citation: Farrakhov B.F. Microstructures on silicon surface produced by a powerful light pulse to enhance solar cell efficiency. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2025, vol. 167, no. 4, pp. 777–785. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.4.777-785>. (In Russian)

Введение

Солнечная энергетика занимает в мире все более значительное положение в производстве электричества. Она является возобновляемым источником энергии, в том числе не оказывающим вредного воздействия на экологию [1]. По оценкам исследовательской компании BloombergNEF [2, 3], к концу 2024 года мощность глобальных солнечных электростанций достигла около 1500 ГВт, в то время как к началу 2023 года она составляла всего 200 ГВт и продолжает демонстрировать стремительный рост. Первостепенными для

текущего и будущего развития этой отрасли являются удешевление, упрощение производства и улучшение технических характеристик преобразователей световой энергии в электрическую. В статье рассмотрен вариант улучшения физических свойств и технических характеристик названного процесса.

Инженеры и ученые реализуют различные методы совершенствования параметров солнечных элементов для увеличения их коэффициента полезного действия (КПД). Как известно, общая эффективность солнечного элемента зависит от нескольких аспектов, среди которых: состав полупроводника, температура, контакты и металлизация, тип прозрачивающего покрытия, концентрация легирующего вещества и топология слоев элемента, а также герметизация. Кремний (Si) является основным полупроводником, который используется для производства фотоэлектрических элементов, поскольку он широко распространен в природе, технологии его обработки досконально отработаны, а энергетическая ширина полосы поглощения совместима с большей частью солнечного спектра. В настоящее время производство многих солнечных элементов основано на производстве мульти-/микро-/поликристаллического и монокристаллического кремния (c-Si), причем последний отличается наибольшей эффективностью. Одними из наиболее перспективных направлений в повышении КПД являются создание направленного рассеивания и увеличение площади поверхности, что равносильно снижению коэффициента отражения поверхности или увеличению поглощательной способности солнечных элементов. Увеличение площади поверхности достигается за счет текстурирования, т. е. формирования на поверхности фотоэлементов уникальных рельефных структур, отличающихся различными формами, размерами и плотностями [4].

Сегодня известны различные методы текстурирования поверхности полупроводников для их использования в оптоэлектронике [2–8]. Для c-Si-элементов также разработано множество технологий обработки поверхности. Среди них на сегодняшний день вызывают наибольший интерес методы создания такихnanoструктур, как нанонити и нанопроволоки [7, 8], и рельефных микроструктур, образующихся при ионной имплантации (ИИ) и импульсном световом облучении (ИСО) [9, 10]. Ниже в дополнение к ранее опубликованным результатам [11] рассмотрен новый подход к выбору режимов ИИ и ИСО с целью более эффективного микроструктурирования поверхности c-Si.

1. Эксперимент

В качестве образцов для исследования были использованы пластины c-Si марки КДБ-1 с кристаллографической ориентацией поверхности (100).

ИИ проводилась на ускорителе ИЛУ-3 ионами As^+ с энергией $E = 50 \text{ кэВ}$ и дозой $D = 3.12 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, а также ионами Mn^+ с энергией $E = 30 \text{ кэВ}$ и дозой $D = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Также образец Si (100) был последовательно имплантирован ионами In^+ и As^+ с энергией $E = 30 \text{ кэВ}$ и дозами по $D = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

ИСО образцов проводилось импульсами секундных длительностей излучением галогенных ламп накаливания на установке Импульс-6 с плотностью мощности излучения ламп $w = 20 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ при различных длительностях импульса.

Модифицированные поверхности образцов Si анализировались на оптическом микроскопе МБС-9. Сформированные структуры регистрировались на цифровую камеру. Отражательная способность сформированных структур измерялась с использованием зондирования лучей полупроводниковых лазеров мощностью $P = 5 \text{ мВт}$, с диаметром пучка 1.1 мм, под углом 45° к нормали образца на длинах волн $\lambda_b = 405 \text{ нм}$, $\lambda_g = 532 \text{ нм}$

и $\lambda_r = 650$ нм. Плоскость поляризации была выставлена параллельно поверхности образца. Регистрация интенсивности отраженных лучей выполнялась фотодиодом ФД-24К и цифровым мультиметром.

Профили распределения ионов по толщине образца были рассчитаны с помощью программы TRIM (Transport of Ions in Matter), которая является ядром пакета программ SRIM-2013. Эта программа была разработана Ф.Ц. Джеймсом и П.Б. Йохеном в 1983 году и постоянно совершенствовалась [12]. TRIM основана на методе моделирования Монте-Карло, а именно, на приближении бинарных столкновений со случайным выбором параметра удара следующего сталкивающегося иона. Программа моделирует все процессы взаимодействия налетающей частицы и атомов мишени. В качестве входных параметров задаются тип иона и энергия (в диапазоне 10 эВ – 2 ГэВ) и материал одного или нескольких слоев мишени.

Программа SRIM позволяет с высокой точностью моделировать: ионизационные потери энергии частиц в веществе, энергетические спектры ядер отдачи, 3D-траектории частиц с учетом многократных столкновений с атомами, процессы имплантации ионных примесей в вещество. Она позволяет вычислять электронную останавливающую способность любого иона в любом материале (включая газообразные мишени) на основе усредняющей параметризации широкого спектра экспериментальных данных.

2. Результаты и обсуждение

Были сформированы слои с различными типами примеси, их концентрацией и распределением по глубине. Глубины распределения внедренной примеси, рассчитанные на программе SRIM-2013, представлены на рис. 1. Формируются слои n-типа и электрически нейтральный слой в p-типа Si путем ИИ ионами Mn^+ и As^+ с распределениями примеси на глубинах $d = 800$ Å, $d = 640$ Å. При последовательной ИИ акцепторными и донорными ионами In^+ и As^+ формируется суммарный слой с глубиной распределения $d = 540$ Å (рис. 1).

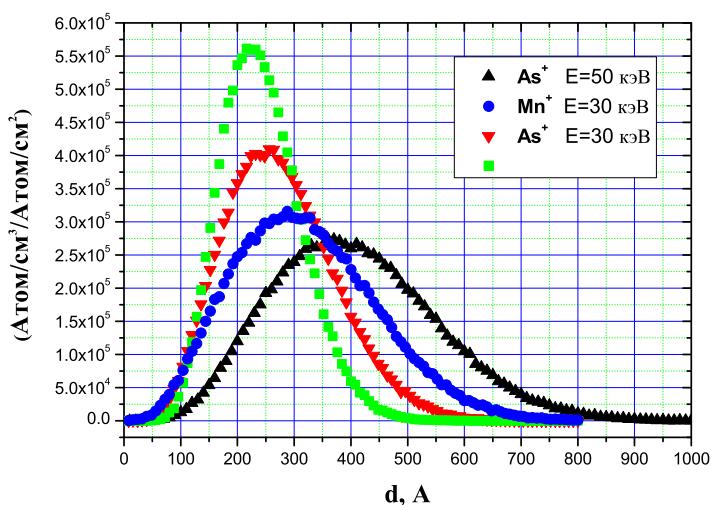


Рис. 1. Глубина распределения ионов после ИИ в Si ионов As^+ с энергией $E = 50$ кэВ, ионов Mn^+ с энергией $E = 30$ кэВ и последовательно ионами In^+ и As^+ с энергиями по $E = 30$ кэВ

Fig. 1. Ion distribution profile after Si implantation with As^+ ions with an energy $E = 50$ keV, Mn^+ ions with an energy $E = 30$ keV, as well as sequential implantation with In^+ and As^+ ions with an energy $E = 30$ keV each

На рис. 2 (а, б, в) показаны микрофотографии структур на поверхности Si-образцов, полученных после ИСО с плотностью мощности $w = 20 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ и длительностью 6 с на установке Импульс-6. Видно, что мощные световые импульсы галогенных ламп приводят к образованию рельефных поверхностей различной формы и плотности. Ранее нами было показано, что локальные области плавления образуются на ростовых дефектах монокристаллического Si или на дефектах, введенных ИИ [9]. Если на Si, имплантированном ионами As^+ , наблюдаются фигуры правильной формы и с относительно упорядоченным расположением (рис. 2 а), то в других случаях видны случайно расположенные микрофигуры совершенно неправильной формы. Вероятно, что вклад в удлиненную форму микроструктур на рис. 2 в внесла именно ИИ ионами In^+ . То, что условия ИСО для всех образцов были абсолютно идентичными и энергии для ионов Mn^+ и In^+ были одинаковыми, позволяет предположить, что ключевую роль в формировании дает именно атомная масса имплантируемых элементов. Существенную роль играют процессы рекристаллизации Si в течение светового импульса до достижения образцом температуры локального плавления.

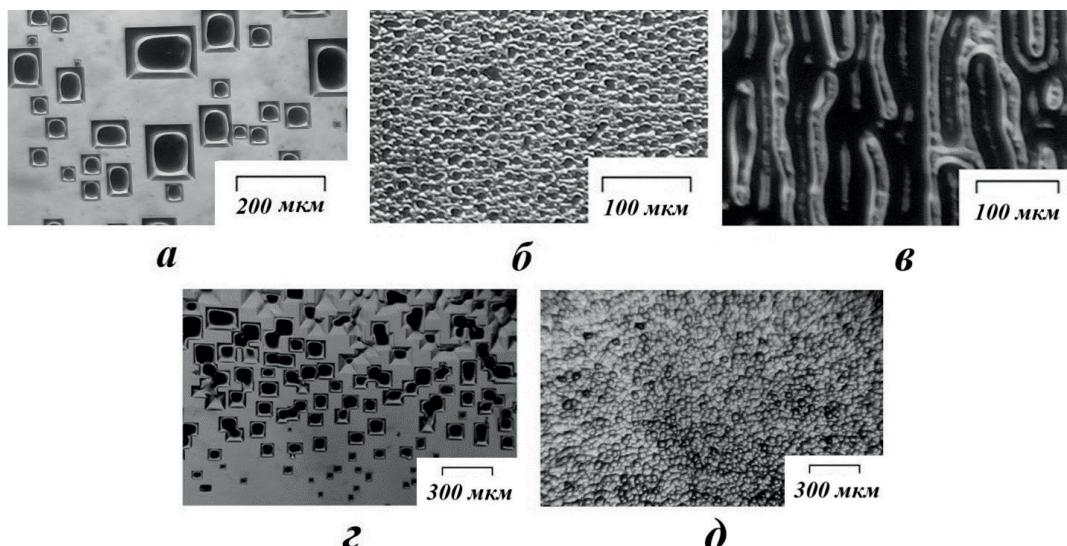


Рис. 2. Микрофотографии поверхности ионно-имплантированного Si (100) (а – ионами As^+ с энергией имплантации $E = 50 \text{ кэВ}$ и дозой $D = 3.1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, б – ионами Mn^+ с энергией имплантации $E = 30 \text{ кэВ}$ и дозой $D = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, в – ионами In^+ и As^+ последовательно с энергиями имплантации $E = 30 \text{ кэВ}$ и дозами $D = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ для каждого) после ИСО длительностью $t = 6 \text{ с}$. Для сравнения представлены фотографии, полученные нами ранее после обработки на установке УОЛ.П-1: неимплантированного Si КДБ-1 (100) при плотности мощности светового импульса $w = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ и длительностях 70 мс (г) и 90 мс (д) (поверхность перед ИСО была отшлифована) [11]

Fig. 2. Micrographs of ion-implanted Si (100) surface (a – As^+ ions with an implantation energy $E = 50 \text{ keV}$ at a dose $D = 3.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, b – Mn^+ ions with an implantation energy $E = 30 \text{ keV}$ at a dose $D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, c – In^+ and As^+ ions sequentially with an implantation energy $E = 30 \text{ keV}$ at a dose $D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ after the pulsed light annealing for $t = 6\text{s}$. For comparison, micrographs of non-implanted Si KDB-1 (100) obtained earlier after the pulsed light annealing in the UOL.P-1 setup at a power density $w = 1200 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ and $t = 70 \text{ ms}$ (d) and 90 ms (e) (the surface was sanded before annealing) [11]

Для модифицированных Si-образцов были измерены коэффициенты отражения R_{ang} под углом к соответствующим поверхностям структур и проведено их сравнение со значениями для исходных поверхностей R_{ini} (которые были до структурирования). Результаты измерений представлены в табл. 1. Сравнение микрофотографий на рис. 2 показывает, что на изменение R_{ang} оказали существенное влияние формы рельефных структур. Это можно ясно увидеть при сопоставлении микрофотографии на рис. 2 б, 2 д. Данные структуры внесли заметный вклад в уменьшение коэффициента отражения.

Табл. 1. Коэффициент отражения поверхности Si до и после формирования рельефных структур
Table 1. Reflection coefficient of Si surface before and after the formation of relief structures

Рисунок	Ион / Е, кэВ / D, см ⁻²	λ , нм	R_{ini}	R_{ang}	$(R_{ini} - R_{ang}) / R_{ini} \times 100, \%$
2 а	$As^+ / 50 / 3.1 \times 10^{15}$	405	0.46	0.46	0
		532	0.36	0.35	1
		630	0.34	0.31	3
2 б	$Mn^+ / 30 / 2 \times 10^{16}$	405	0.46	0.46	0
		532	0.36	0.34	2
		630	0.34	0.33	1
2 в	$In^+ \text{ и } As^+ /$ по 30 / по 2×10^{16}	405	0.46	0.46	0
		532	0.36	0.34	2
		630	0.34	0.30	4
2 г	без ИИ	405	0.46	0.43	3
		532	0.36	0.32	4
		630	0.34	0.27	7
2 д	без ИИ	405	0.46	0.45	1
		532	0.36	0.33	3
		630	0.34	0.28	6

Заключение

Показано, что ИИ различными ионами позволяет получать различные морфологические состояния на изначально гладких поверхностях полупроводниковых подложек, в частности, Si. Некоторые из образуемых микроструктур представляют интерес для разработки компонентов солнечной энергетики. Использованные ионы и режимы ИСО позволили снизить коэффициент отражения поверхности Si на 4 %.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The author declares no conflicts of interest.

Литература

1. Королева Д.А., Шайдаков В.В., Целищев В.А. Солнечная энергетика: учеб. пособие. Вологда.: Инфра-Инженерия, 2023. 140 с.
2. Upadhyay R., Tripathi M., Pandey A. Surface modification of semiconductor photoelectrodes for better photoelectrochemical performance // High Energy Chem. 2013. V. 47, No 6. P. 308–314. <https://doi.org/10.1134/S0018143913060106>.
3. Guijarro N., Prevot M.S., Sivula K. Surface modification of semiconductor photoelectrodes // Phys. Chem. Chem. Phys. 2015. V. 17, No 24. P. 15655–15674. <https://doi.org/10.1039/C5CP01992C>.
4. de Lima Monteiro D.W., Honorato F.P., de Oliveira Costa R.F., Salles L.P. Surface texturing with hemispherical cavities to improve efficiency in silicon solar cells // Int. J. Photoenergy. 2012. V. 2012, No 1. Art. 743608. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/743608>.
5. Lee H.-S., Suk J., Kim H., Kim J., Song J., Jeong D.S., Park J.-K., Kim W.M., Lee D.-K., Choi K.J., Ju B.-K., Lee T.S., Kim I. Enhanced efficiency of crystalline Si solar cells based on kerfless-thin wafers with nanohole arrays // Sci. Rep. 2018. V. 8, No 1. Art. 3504. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-21381-2>.
6. Fedorenko L., Medvid A. Laser-induced nano-structuring of semiconductors and metals in near surface layers by nanosecond pulses // Adv. Mater. Res. 2018. V. 1117. P. 9–14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1117.9>.
7. Stepanov A.L., Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Rogov A.M., Konovalov D.A., Nuzhdin V.I., Valeev V.F. Incoherent-light pulse annealing of nanoporous germanium layers formed by ion implantation // Vacuum. 2021. V. 186. Art. 110060. <http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110060>.
8. Гаврилова Т.П., Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Хантимеров С.М., Нуздин В.И., Рогов А.М., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А., Степанов А.Л. Изменение состояния поверхности моно-кристаллического германия в результате имплантации ионами серебра и отжига световыми импульсами // ЖТФ. 2022. Т. 92, вып. 12. С. 1827–1832. <https://dx.doi.org/10.21883/JTF.2022.12.53750.159-22>.
9. Фаттахов Я.В., Баязитов Р.М., Хайбуллин И.Б., Львова Т.Н., Еремин Е.А. Плавление полупроводников при быстром однородном нагреве оптическим излучением // Изв. РАН. Сер. физ. 1995. Т. 59, № 12. С. 136–142.
10. Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Галляутдинов М.Ф. Оптическая дифракционная методика контроля твердофазной рекристаллизации и нагрева имплантированных полупроводников при импульсном световом отжиге // ПТЭ. 2019. № 2. С. 93–98. <https://dx.doi.org/10.1134/S0032816219020083>.
11. Фаррахов Б.Ф., Фаттахов Я.В., Степанов А.Л. Модификация поверхности кремния мощными световыми импульсами // Изв. РАН. Сер. физ. 2024. Т. 88, № 7. С. 1099–1103. <https://doi.org/10.31857/S0367676524070158>.
12. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. New York, NY: Pergamon Press, 1985. 321 p.

References

1. Koroleva D.A., Shaidakov V.V., Tselischev V.A. *Solnechnaya energetika: ucheb. posobie* [Solar Energy: A Study Guide]. Moscow, Infa-Inzh., 2023. 140 p. (In Russian)
2. Upadhyay R., Tripathi M., Pandey A. Surface modification of semiconductor photoelectrodes for better photoelectrochemical performance. *High Energy Chem.*, 2013, vol. 47, no. 6, pp. 308–314. <https://doi.org/10.1134/S0018143913060106>.
3. Guijarro N., Prevot M.S., Sivula K. Surface modification of semiconductor photoelectrodes. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2015, vol. 17, no. 24, pp. 15655–15674. <https://doi.org/10.1039/C5CP01992C>.
4. de Lima Monteiro D.W., Honorato F.P., de Oliveira Costa R.F., Salles L.P. Surface texturing with hemispherical cavities to improve efficiency in silicon solar cells. *Int. J. Photoenergy*, 2012, vol. 2012, no. 1, art. 743608. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/743608>.
5. Lee H.-S., Suk J., Kim H., Kim J., Song J., Jeong D.S., Park J.-K., Kim W.M., Lee D.-K., Choi K.J., Ju B.-K., Lee T.S., Kim I. Enhanced efficiency of crystalline Si solar cells based on kerfless-thin wafers with nanohole arrays. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, no. 1, art. 3504. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-21381-2>.
6. Fedorenko L., Medvid A. Laser-induced nano-structuring of semiconductors and metals in near surface layers by nanosecond pulses. *Adv. Mater. Res.*, 2018, vol. 1117, pp. 9–14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1117.9>.
7. Stepanov A.L., Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Rogov A.M., Konovalov D.A., Nuzhdin V.I., Valeev V.F. Incoherent-light pulse annealing of nanoporous germanium layers formed by ion implantation. *Vacuum*, 2021, vol. 186, art. 110060. <http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110060>.
8. Gavrilova T.P., Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Khantimerov S.M., Nuzhdin V.I., Rogov A.M., Valeev V.F., Konovalov D.A., Stepanov A.L. Change in the surface state of the single-crystal germanium as a result of implantation with silver ions and annealing with light pulses. *Tech. Phys.*, 2022, vol. 67, no. 12, pp. 1586–1591. <http://dx.doi.org/10.21883/TP.2022.12.55194.159-22>.
9. Fattakhov Ya.V., Bayazitov R.M., Khaibullin I.B., L'vova T.N., Eremin E.A. Melting of semiconductors with rapid homogeneous heating by optical radiation. *Izv. Ross. Akad. Nauk. Ser. Fiz.*, 1995, vol. 59, no. 12, pp. 136–142. (In Russian)
10. Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Galyautdinov M.F. An optical diffraction method for controlling the solid-phase recrystallization and heating of implanted semiconductors during pulse light annealing. *Instrum. Exp. Tech.*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 226–231. <https://doi.org/10.1134/S0020441219020076>.
11. Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Stepanov A.L. Modification of the implanted silicon surface by a powerful light pulse. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.*, 2024, vol. 88, no. 7, pp. 1122–1125. <https://doi.org/10.1134/S1062873824707189>.
12. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. *The Stopping and Range of Ions in Solids*. New York, NY, Pergamon Press, 1985. 321 p.

Информация об авторах

Булат Фасимович Фаррахов, младший научный сотрудник, Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук»

E-mail: *bulat_f@mail.ru*

Author Information

Bulat F. Farrakhov, Junior Researcher, Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences

E-mail: *bulat_f@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.06.2025

Принята к публикации 22.08.2025

Received June 30, 2025

Accepted August 22, 2025