

## Оригинальная статья

УДК 537.87

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-10-16

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР С ПОРИСТЫМ КРЕМНИЕМ

© 2024 г. А. Д. Кузьмин, **Н. В. Латухина**, Н. А. Полуэктова, П. Д. Тишин, Д. А. Услин, И. А. Шишкин, Д. А. Шишкина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, ул. Московское шоссе, 34)

**Аннотация.** Актуальность работы обоснована стремительным ростом развития космической отрасли в последние годы, в частности, развитием технологии солнечных элементов, предназначенных для питания летательных аппаратов на околоземной орбите или за ее пределами. Важным является изучение вопроса деградации солнечных элементов на основе пористого кремния. Он зарекомендовал себя как более стойкая к облучению структура. Приведен сравнительный анализ вольтамперных характеристик фоточувствительных структур на базе пористого кремния с *p-n* переходом с покрытием фторида эрбия и без него до и после облучения электронами с энергией 6 МэВ, а также спустя три месяца нахождения на хранении для фиксации изменений, которые могут происходить с течением времени. Структуры получены методом электрохимического травления в спиртовом растворе плавиковой кислоты методом двухступенчатого металл-стимулированного химического травления. Полученные результаты показывают, что итог воздействия излучения электронами на фоточувствительные структуры зависит как от параметров самой структуры, так и от параметров излучения. Облучение электронами инициирует в структурах процессы образования легирующих центров и центров рекомбинации. Показано, что облучение структур приводит к конкурирующим процессам в пористых структурах (увеличение носителей заряда, образование радиационных дефектов типа пар Френкеля). Нанесенная тонкая пленка фторида эрбия на пористый слой оказывает заметное положительное влияние на характеристики и параметры структур благодаря пассивирующим свойствам этого материала.

**Ключевые слова:** солнечные элементы, фоточувствительный преобразователь, радиационная стойкость, радиационные дефекты, пористый кремний

**Для цитирования:** Кузьмин А.Д., Латухина Н.В., Полуэктова Н.А., Тишин П.Д., Услин Д.А., Шишкин И.А., Шишкина Д.А. Влияние облучения на фотоэлектрические свойства структур с пористым кремнием. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):10–16. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-10-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-10-16)

## Original article

## INFLUENCE OF RADIATION ON PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF STRUCTURES WITH POROUS SILICON

© 2024 A. D. Kuzmin, **N. V. Latukhina**, N. A. Poluektova, P. D. Tishin, D. A. Uslin, I. A. Shishkin, D. A. Shishkina

Samara National Research University (34 Moskovskoe shosse str., Samara, 443086, Russian Federation)

**Abstract.** The relevance of the work is justified by the rapid growth in the development of the space industry in recent years, in particular, the development of solar cell technology designed to power aircraft in near-Earth orbit or beyond. It is important to study the degradation of porous silicon-based solar cells. It has proven itself to be a

more radiation-resistant structure. A comparative analysis of the current-voltage characteristics of photosensitive structures based on porous silicon with a p-n junction coated with and without erbium fluoride is presented before and after irradiation with electrons with an energy of 6 MeV, as well as after three months of storage to record changes that may occur over time. The structures were obtained by electrochemical etching in an alcoholic solution of hydrofluoric acid by two-stage metal-stimulated chemical etching. The results obtained show that the result of the effect of electron radiation on photosensitive structures depends both on the parameters of the structure itself and on the radiation parameters. Electron irradiation initiates the formation of alloying centers and recombination centers in structures. It is shown that irradiation of structures leads to competing processes in porous structures (an increase in charge carriers, the formation of radiation defects such as Frenkel pairs). The applied thin film of erbium fluoride on the porous layer has a noticeable positive effect on the characteristics and parameters of structures due to the passivating properties of this material.

**Keywords:** solar cells, photosensitive transducer, radiation resistance, radiation defects, porous silicon

**For citation:** Latukhina N.V., Poluektova N.A., Tishin P.D., Uslin D.A., Shishkin I.A., Shishkina D.A. Influence of radiation on photovoltaic properties of structures with porous silicon. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):10–16. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-10-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-10-16)

### Введение

Пористый кремний (ПК) показал себя как перспективный материал для различных областей оптоэлектроники [1; 2]. Изучение деградации структур на основе пористого кремния под действием ионизирующего излучения является крайне актуальной задачей, так как эти структуры имеют большую перспективу для применения в солнечных элементах [3; 4], в том числе они предназначены для работы в условиях космического пространства [5]. Пористая поверхность имеет низкий коэффициент отражения, поэтому слой пористого кремния используется как антиотражающее покрытие для солнечных элементов [7; 8], а наличие нанокристаллов на стенках пор расширяет спектральный диапазон фоточувствительности структур в коротковолновую область [9]. Высокая пористость обуславливает уникальные свойства ПК, к которым относится значительная радиационная стойкость [10]. Проведены исследования влияния на свойства пористого кремния рентгеновского излучения [11], гамма-излучения [12], облучения электронами [13], ионами ксенона и аргона [14], которые показывают более высокую устойчивость ПК к этим воздействиям по сравнению с монокристаллическим кремнием. Поскольку на эти процессы могут накладываться процессы естественного старения, их исследование представляет практический интерес [15 – 17]. Модифицирование поверхности ПК [18], а также использование специальных покрытий позволяют увеличить его устойчивость к деградационным процессам [19; 20].

В настоящей работе проводили исследования деградации фоточувствительных структур двух

типов: с пористым слоем, изготовленным различными методами; с пористым слоем и покрытием из фторида эрбия ( $\text{ErF}_3$ ).

### Методы и принципы исследования

Структуру с пористым слоем получали на пластинах монокристаллического кремния *p*-типа проводимости с полированной или текстурированной поверхностями.

Для получения пористого кремния применяли два метода. Первую группу изготавливали методом электрохимического травления в спиртовом растворе плавиковой кислоты при плотности тока  $10 \text{ mA/cm}^2$  и времени травления 10 мин. При этом способе травления поры образуются преимущественно в углублениях рельефа на стыках пирамид (рис. 1, *a*) [21]. Вторую группу образцов получали двухступенчатым металл-стимулированным химическим травлением (МСХТ), в котором катализатором служили наночастицы серебра. Удаление частиц металла с поверхности осуществляли с помощью азотной кислоты. При таком травлении растворению подвергаются и стенки пирамид (рис. 1, *б*).

Для получения фоточувствительных структур на образцах формировался *p-n*-переход диффузией фосфора из пленки фосфорного диффузанта для *n*-типа на пористом слое и борного диффузанта с тыльной стороны для *p*-типа. Контакты из алюминия и покрытия из фторида эрбия изготавливали методом термического испарения в вакууме. Фторид эрбия наносили на часть поверхности пористого слоя методом термического испарения в вакууме. Схематичное изображение образца с контактами и покрытием приведено на рис. 1, *в*.

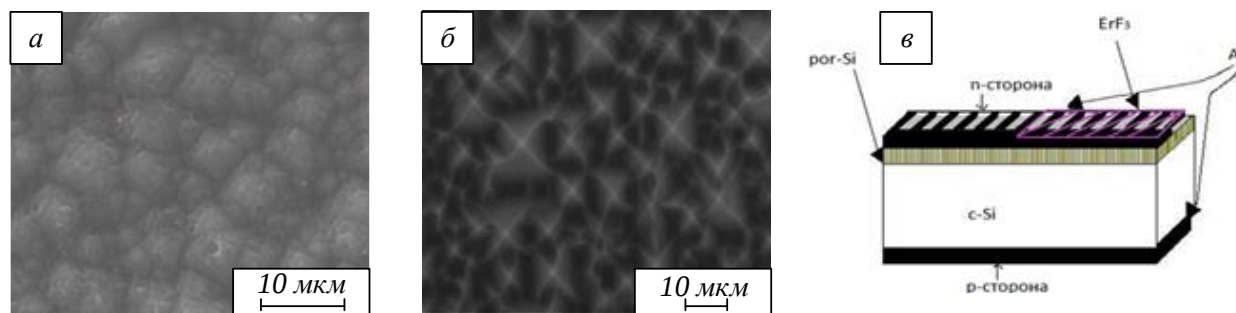


Рис. 1. РЭМ-изображение текстурированной поверхности с пористым слоем, изготовленным методом МСХТ (а) и электрохимическим травлением (б); схематичное изображение структуры с  $p$ - $n$ -переходом, контактами и покрытием (в)  
Fig. 1. SEM image of a textured surface with a porous layer produced by MSCE (a) and electrochemical etching (b); schematic representation of a structure with a  $p$ - $n$  junction, contacts and coating (c)

Облучение электронами с энергией 6 МэВ проводили на линейном ускорителе TrueBeam STX. Образцы получили дозу облучения от 60 до 120 Гр. Измеряли вольтамперные характеристики (ВАХ) до и после облучения при освещенности имитатором солнечного излучения, мощность излучения на поверхности образца составляла 300 Вт/м<sup>2</sup>.

Облучение структур с пористым слоем или кремниевыми нанонитями проводили с помощью линейного ускорителя фирмы Varian. На экспериментальные образцы, расположенные на расстоянии 5 – 7 см от крайней кромки выравнивающего аппликатора из сплава Вуда, попадали электроны, энергия которых составляла 6 МэВ, скорость дозы выдачи составляла 1000 МЕ/мин (мониторные единицы/мин), время облучения – 20 мин. Размер статического терапевтического поля, формируемого многолепестковым коллиматором, составлял от 0,5 × 0,5 см до 30 × 30 см.

Измерения вольтамперных характеристик проводили с помощью стенда KEITHLEY 2450 и повторили через три и шесть месяцев после облучения.

### Основные результаты

Измерения ВАХ показали, что облучение электронами оказывает на образцы разнонаправленное влияние; прослеживается зависимость изменений от пористости структуры (чем больше пористость, тем заметнее изменения как в худшую, так и в лучшую сторону). На структуры с пористым слоем без покрытия облучение электронами оказывает незначительное отрицательное влияние. Для структур с покрытием действие облучения может приводить как к увеличению (на 40 – 50 %) тока короткого замыкания, так и к его уменьшению примерно на ту же величину. На рис. 2 приведены ВАХ одного из образцов с пористым слоем, полученным электрохимическим травлением. На рассматриваемые структуры облучение оказало положительное влияние. Измерены ВАХ до и после облучения, и спустя три месяца после облучения. При-

ведены ВАХ для образцов с покрытием из фторида эрбия и без него.

Разнонаправленное влияние облучения можно объяснить конкурирующими процессами в пористом слое. С одной стороны, облучение электронами увеличивает количество свободных носителей заряда, что приводит к увеличению тока. С другой стороны, под воздействием электронов в кремнии возможно образование радиационных дефектов типа пар Френкеля (вакансия и междоузельный ион), которые служат рекомбинационными центрами для носителей заряда и приводят к уменьшению тока короткого замыкания. Суммарное действие этих противоположных факторов проявляется по-разному для образцов с разным типом исходной поверхности и пористостью.

Подтверждением наличия этих эффектов могут служить ВАХ образцов, полученных МСХТ, демонстрирующие зависимость тока от полученной дозы облучения (рис. 3). У образца, который облучался в течение 10 мин, ток вдвое уменьшился, а у образца со временем облучения 20 мин – увеличился почти в пять раз, это можно объяснить накоплением свободных носителей заряда.

В образцах с покрытием большее влияние на ВАХ оказывают процессы, протекающие в самом покрытии и на границе раздела пористого слоя с пленкой фторида эрбия. Нанесение покрытия из фторида эрбия на пористый слой оказывает заметное положительное влияние на характеристики и параметры образцов благодаря пассивирующим свойствам этих материалов. Ток короткого замыкания и фактор заполнения ВАХ возрастают в несколько раз. Уменьшение тока короткого замыкания после облучения электронами у образцов с покрытием можно объяснить депассивацией границы раздела и увеличением количества рекомбинационных центров.

Благодаря чрезвычайно развитой поверхности (до 1000 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>) пористого кремния с течением времени происходит уменьшение концентрации как легирующих, так и рекомбинацион-

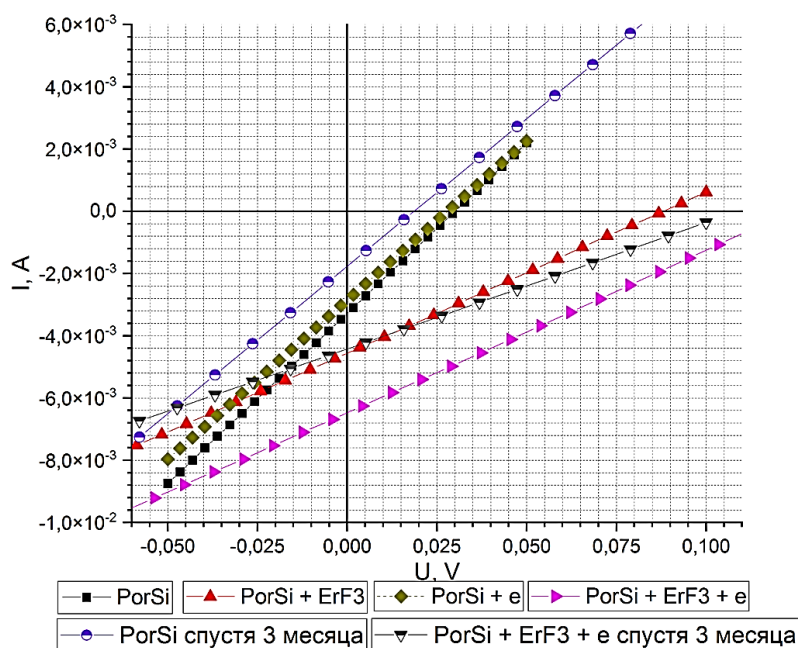


Рис. 2. ВАХ образца с пористым кремнием и покрытием  $\text{ErF}_3$  до и после облучения электронами, спустя три месяца после воздействия электронами

Fig. 2. Current-voltage characteristics of a sample with porous silicon and  $\text{ErF}_3$  coating before and after electron irradiation; 3 months after exposure to electrons

ных центров за счет присутствия на стенках пор нанокристаллов, границы которых могут выступать как область эффективного стока с последующей аннигиляцией радиационных дефектов. Для многих структур характеристики с течением времени возвращаются к исходным значениям. На эти процессы накладывается процесс естественного старения кремния, связанный с образованием оксидов кремния в порах. Его эффект менее заметен для структур с покрытием, так как в этом случае поверхность пористого слоя пассивирована фторидом эрбия.

### Выводы

Результат воздействия излучения на фоточувствительные структуры зависит как от структуры, так и от излучения. Облучение электронами инициирует в структурах процессы образования легирующих центров и центров рекомбинации. Суммарное действие этих факторов определяет результат воздействия облучения на структуру, который может выражаться как в увеличении, так и в уменьшении фототока в зависимости от преобладания того или иного фактора. При увеличении времени облучения эффект радиационного леги-

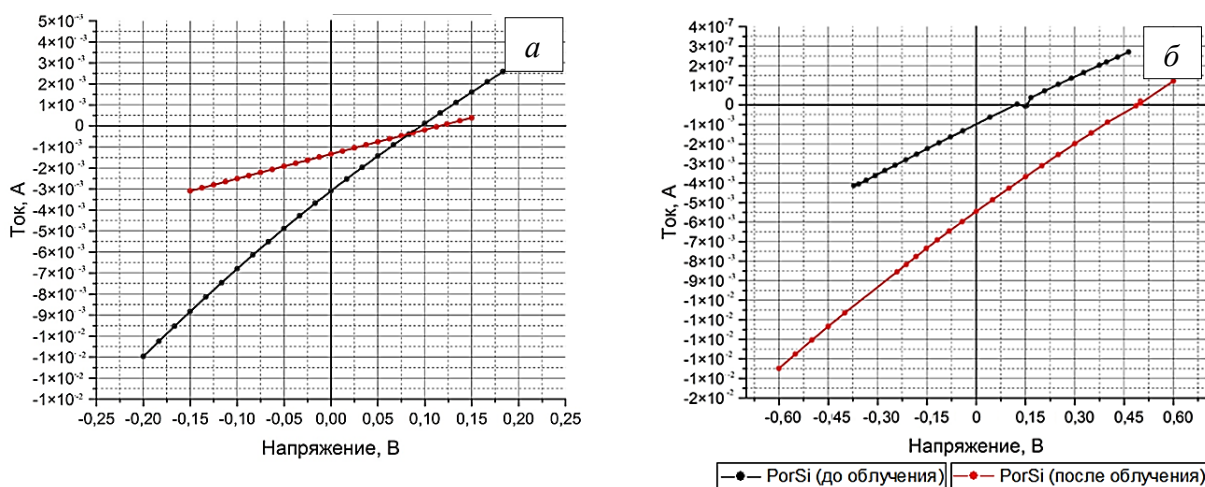


Рис. 3. ВАХ образцов, изготовленных МСХТ до и после облучения в течение 10 (а) и 20 мин (б)

Fig. 3. Current-voltage characteristics of samples prepared by MSCE before and after irradiation for 10 (a) and 20 minutes (б)

рования оказывается преобладающим. Чем больше пористость структуры, тем заметнее результат воздействия, так как развитая свободная поверхность пористого кремния обеспечивает ускоренную рекомбинацию радиационных эффектов. Покрытие из фторида эрбия на пористом слое оказывает заметное положительное влияние на характеристики и параметры структур благодаря пассивирующим свойствам этого материала. Преобладающим в структурах становится эффект радиационного легирования, поскольку рекомбинационные центры на поверхности пассивированы ионами эрбия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Latukhina N.V., Lizunkova D.A., Rogozhina G.A., Zhiltsov I.M., Stepykhova M.V., Chepurnov V.I. Multilayer nanostructures based on porous silicon for optoelectronics. *Photonics*. 2018;12 (5(73)):508–511.
- Хамзин Э.Х., Нестеров Д.А., Латухина Н.В. и др. Пористый кремний допированный эрбием для оптоэлектрических приложений. В кн.: *Международная конференция. Физика*. Санкт-Петербург, 2023:160–161.
- Latukhina N.V., Shishkina D.A., Rogozhina G.A. etc. Multilayer structure based porous silicon for solar cells. *AIP Conference Proceedings*. 2020;2276.
- Latukhina N.V., Lizunkova D.A., Rogozhina G.A., Shishkin I.A. Multilayer structure based on porous silicon for solar cells. In: *Proceedings of International Conference on Advanced Materials 6th and 7th March*, 2019. 2019:169–172.
- Latukhina N., Rogozin A., G. Puzyrnaya, Lizunkova D., Gurtov A., Ivkov S. Efficient Silicon Solar Cells for Space and Ground-Based Aircraft. *Procedia Engineering*. 2015;104 (31):157–161.
- Shishkin I.A., Lizunkova D.A., Latukhina N.V. Simulation of current-voltage and power-voltage characteristics of «space» porous silicon solar cells. In: *6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures*, 2019:299–300.
- Диханбаев К.К., Икрамова С.Б., Мырзалы Е.Б., Жайлыбаев И.Т., Тереахмет С. Солнечный элемент с покрытием из мультикристаллического пористого кремния. *Новости науки Казахстана*. 2022;1(152):71–77. <http://doi.org/10.53939/1560-5655.2022-1-71>
- Hyukyong Kwon, Jaedoo Lee, Minjeong Kim, and Soohong Lee. Investigation of Antireflective Porous Silicon Coating for Solar Cells. In: *International Scholarly Research Network ISRN Nanotechnology*. 2011;716409. <http://doi.org/10.5402/2011/716409>
- Кирсанов Н.Ю., Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Рогожина Г.А., Степихова М.В. Многослойные фоточувствительные структуры на основе пористого кремния и соединений редкоземельных элементов: исследования спектральных характеристик. *ФТП*. 2017;51 (3):367–371.
- Ушаков В.В. и др. Радиационная стойкость пористого кремния. *ФТП*. 1997;31(9): 1126–1129. <http://doi.org/10.1134/1.1187143>
- Ерофеев А.С. Латухина Н.В. Деградиционные процессы в пористом кремнии. *Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета*. 2020;(16):267–272.
- Белобровая О.Я., Галушка В.В., Исмаилова В.С., Полянская В.П., Сидоров В.И., Терин Д.В., Машков А.А. Влияние малых доз гамма-излучения на оптические свойства наноструктурированного кремния, полученного методом металл-стимулированного химического травления in situ. *Известия Саратовского университета. Нов. сер. Сер. Физика*. 2020;20(4):288–298. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-4-288-298>
- Алиев Б.А. Влияние электронного облучения на спектр фотолюминесценции пористого кремния. *Вестник Карагандинского государственного университета. Серия Физика*. 2010;59(3):4–7.
- Балакшин Ю.В., Кожемяко А.В., Евсеев А.П., Миннебаев Д.К., Емад М.Е. Влияние параметров облучения ионами ксенона и аргона на дефектообразование в кремнии. *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2020;3:23–29.
- Леньшин А.С., Кашкаров В.М., Туришев С.Ю., Смирнов М.С., Домашевская Э.П. Влияние естественного старения на фотолюминесценцию пористого кремния. *Письма в ЖТФ*. 2011;37(17):1–8.
- Tishin P.D., Shishkina D.A., Shishkin I.A. etc. Investigation of degradation characteristics of photosensitive structures with porous silicon. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2022;15(3.3):82–85. <https://doi.org/10.18721/JPM.153.315>
- Услин Д.А., Латухина Н.В. Анализ процессов деградации солнечных элементов на основе пористого кремния. *Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета*. 2021;(1(18)):174–176.
- Smerdov R.S., Spivak Yu.M., Moshnikov V.A. Nanostructures based on functionalized porous silicon for promising solar energy systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1400:055014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055014>

19. Латухина Н.В. и др. Влияние покрытий, содержащих ионы РЗЭ, на фотоэлектрические характеристики структур на основе пористого кремния. *Автометрия*. 2022;58(6):90–97. <http://dx.doi.org/10.15372/AUT20220611>
  20. Latukhina N.V., Nesterov D.A., Poluektova N.A. etc. Effect of Rare Earth Coatings on Photoelectric Characteristics of Porous Silicon Structures. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2022;58(6(6)):626–632.
  21. Shishkin I.A., Shishkina D.A., Latukhina N.V. The process of pore formation on a textured silicon substrate during electrochemical etching: 3D model. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1745(1).
- REFERENCES**
1. Latukhina N.V., Lizunkova D.A., Rogozhina G.A., Zhiltsov I.M., Stepykhova M.V., Chepurnov V.I. Multilayer nanostructures based on porous silicon for optoelectronics. *Photonics*. 2018; 12(5(73)):508–511.
  2. Khamzin E.Kh., Nesterov D.A., Latukhina N.V. etc. Porous silicon doped with erbium for optoelectric applications. In: *International Conference of Physics*. St. Petersburg, 2023:160–161. (In Russ.).
  3. Latukhina N.V., Shishkina D.A., Rogozhina G.A. etc. Multilayer structure based porous silicon for solar cells. *AIP Conference Proceedings*. 2020;2276.
  4. Latukhina N.V., Lizunkova D.A., Rogozhina G.A., Shishkin I.A. Multilayer structure based on porous silicon for solar cells. In: *Proceedings of International Conference on Advanced Materials 6th and 7th March*, 2019. 2019:169–172.
  5. Latukhina N., Rogozin A., G. Puzymaya, Lizunkova D., Gurtov A., Ivkov S. Efficient Silicon Solar Cells for Space and Ground-Based Aircraft. *Procedia Engineering*. 2015;104(31):157–161.
  6. Shishkin I.A., Lizunkova D.A., Latukhina N.V. Simulation of current-voltage and power-voltage characteristics of «space» porous silicon solar cells. In: *6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures*, 2019:299–300
  7. Dikhanbaev K.K., Ikramova S.B., Myrzaly E.B., Zhailybaev I.T., Te-reakhmet S. A solar cell coated with multicrystalline porous silicon. *Novosti nauki Kazakhstana*. 2022;1(152): 71–77. (In Russ.). <http://doi.org/10.53939/1560-5655.2022-1-71>
  8. Hyukyong Kwon, Jaedoo Lee, Minjeong Kim, and Soohong Lee. Investigation of Antireflective Porous Silicon Coating for Solar Cells. In: *International Scholarly Research Network ISRN Nanotechnology*. 2011;716409. <http://doi.org/10.5402/2011/716409>
  9. Kirsanov N.Yu., Latukhina N.V., Lizunkova D.A., Rogozhina G.A., Ste-pikhova M.V. Multilayer photosensitive structures based on porous silicon and compounds of rare earth elements: studies of spectral characteristics. *FTP*. 2017;51(3):367–371. (In Russ.).
  10. Ushakov V.V. etc. Radiation resistance of porous silicon. *FTP*. 1997;31(9):1126–1129. (In Russ.). <http://doi.org/10.1134/1.1187143>
  11. Erofeev A.S. Latukhina N.V. Degradation processes in porous silicon. *Vestnik molodykh uchenykh i spetsialistov Samarskogo universiteta*. 2020;(16):267–272. (In Russ.).
  12. Belobrovaya O.Ya., Galushka V.V., Ismailova V.S., Polyanskaya V.P., Sidorov V.I., Terin D.V., Mashkov A.A. The effect of low doses of gamma radiation on the optical properties of nanostructured silicon obtained by metal-stimulated chemical etching in situ. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Nov. ser. Ser. Fizika*. 2020;20(4):288–298. (In Russ.). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-4-288-298>
  13. Aliev B.A. The effect of electron irradiation on the photoluminescence spectrum of porous silicon. *Vestnik Karagandinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Fizika*. 2010;59(3):4–7. (In Russ.).
  14. Balakshin Yu.V., Kozhemyako A.V., Evseev A.P., Minnebaev D.K., Emad M.E. Influence of parameters of irradiation with xenon and argon ions on defect formation in silicon. *VMU. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*. 2020;3:23–29. (In Russ.).
  15. Len'shin A.S., Kashkarov V.M., Turishchev S.Yu., Smirnov M.S., Domashevskaya E.P. The effect of natural aging on photoluminescence of porous silicon. *Pis'ma v ZhTF*. 2011;37(17):1–8. (In Russ.).
  16. Tishin P.D., Shishkina D.A., Shishkin I.A. etc. Investigation of degradation characteristics of photosensitive structures with porous silicon. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2022; 15(3.3):82–85. <https://doi.org/10.18721/JPM.153.315>
  17. Uslin D.A., Latukhina N.V. Analysis of the degradation processes of solar cells based on porous silicon. *Vestnik molodykh uchenykh i spetsialistov Samarskogo universiteta*. 2021; (1(18)):174–176. (In Russ.).
  18. Smerdov R.S., Spivak Yu.M, Moshnikov V.A. Nanostructures based on functionalized porous silicon for promising solar energy systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1400:055014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055014>

19. Latukhina N.V. etc. The effect of coatings containing REE ions on the photovoltaic characteristics of structures based on porous silicon. *Avtometriya*. 2022;58(6):90–97. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15372/AUT20220611>
20. Latukhina N.V., Nesterov D.A., Poluektova N.A. etc. Effect of Rare Earth Coatings on Photoelectric Characteristics of Porous Silicon Structures. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2022;58(6(6)):626–632.
21. Shishkin I.A., Shishkina D.A., Latukhina N.V. The process of pore formation on a textured silicon substrate during electrochemical etching: 3D model. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1745(1):

#### Сведения об авторах

**Андрей Дмитриевич Кузьмин**, студент, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** gukul99@gmail.com

**Наталья Виленовна Латухина**, к.т.н., доцент кафедры физики твердого тела и неравновесных систем, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** natalat@yandex.ru  
**ORCID:** 0000-0003-2651-0562  
**SPIN-код:** 8643-8020

**Наталья Алексеевна Полуэктова**, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** natapolivekt37@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0003-4189-6192  
**SPIN-код:** 5791-7785

**Павел Дмитриевич Тишин**, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** tishin.pavel1999@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0002-9420-1852  
**SPIN-код:** 7729-7454

**Дмитрий Андреевич Услин**, студент, учебный мастер кафедры физики твердого тела и неравновесных систем, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** uslin720@gmail.com  
**ORCID:** 0009-0000-7430-7265  
**SPIN-код:** 6350-0740

**Дарья Александровна Шишкина**, к.ф.-м.н., доцент кафедры нанотехнологий, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** daria.lizunkova@yandex.ru  
**ORCID:** 0000-0003-4118-1429  
**SPIN-код:** 5722-5240

**Иван Александрович Шишкин**, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** shishkinivan9@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0002-8413-9661  
**SPIN-код:** 2233-8550

#### Information about the authors

**Andrey D. Kuzmin**, student, Samara National Research University  
**E-mail:** gukul99@gmail.com

**Natalia V. Latukhina**, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Solid State Physics and Nonequilibrium Systems, Samara National Research University  
**E-mail:** natalat@yandex.ru,  
**ORCID:** 0000-0003-2651-0562  
**SPIN-код:** 8643-8020

**Natalia A. Poluektova**, graduate student, Samara National Research University  
**E-mail:** natapolivekt37@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0003-4189-6192  
**SPIN-код:** 5791-7785

**Pavel D. Tishin**, graduate student, Samara National Research University  
**E-mail:** tishin.pavel1999@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0002-9420-1852  
**SPIN-код:** 7729-7454

**Dmitry A. Uslin**, student, teaching master of the Department of Solid State Physics and Nonequilibrium Systems, Samara National Research University  
**E-mail:** uslin720@gmail.com,  
**ORCID:** 0009-0000-7430-7265  
**SPIN-код:** 6350-0740

**Daria A. Shishkina**, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of nanoengineering, Samara National Research University  
**E-mail:** daria.lizunkova@yandex.ru  
**ORCID:** 0000-0003-4118-1429  
**SPIN-код:** 5722-5240

**Ivan A. Shishkin**, graduate student, Samara National Research University  
**E-mail:** shishkinivan9@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0002-8413-9661  
**SPIN-код:** 2233-8550

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
 The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 13.05.2024  
 После доработки 11.06.2024  
 Принята к публикации 24.06.2024

Received 13.05.2024  
 Revised 11.06.2024  
 Accepted 24.06.2024