ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2024. Том 91. № 11. С. 100–106
OPTICHESKII ZHURNAL. 2024. V. 91. № 11. P. 100–106
Научная статья
Research Article

Оптический журнал
Оптическое материаловедение и технологии
Optical materials science and technology

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-11-100-106
УДК 538.9

Влияние режимов травления на пористость слоев и фотолюминесценцию многослойного пористого кремния

А. С. Леньшин[1]✉, Я. А. Пешков[2], О. В. Черноусова[3], С. В. Канныкин[4], М. В. Гречкина[5], Д. А. Минаков[6], Д. С. Золотухин[7], Б. Л. Агапов[8]

[1, 2, 4, 5, 6, 7, 8]Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия
[1, 3]Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

[1]*lenshinas@mail.ru* *https://orcid.org/0000-0002-1939-253X*
[2]*tangar77@mail.ru* *https://orcid.org/0000-0003-0939-0466*
[3]*byollval@mail.ru* *https://orcid.org/0000-0002-8198-574X*
[4]*skannykin@gmail.com* *https://orcid.org/0000-0001-8756-5722*

Аннотация

Предмет исследования. Многослойные образцы пористого кремния, сформированные при варьируемых технологических параметрах электрохимического травления. **Цель работы.** Экспериментальное исследование способов формирования многослойного пористого кремния и разработка методики тонкой настройки свойств его поверхности и объема для использования в устройствах наноэлектроники. **Метод.** Морфология поверхности изучалась методами атомной силовой и растровой электронной микроскопии. Пористость поверхностного слоя анализировалась методом рентгеновской рефлектометрии. Электронная структура поверхности исследовалась методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии. Оптические свойства представлены спектрами фотолюминесценции. **Основные результаты.** Установлено, что при использовании методики ступенчатого увеличения тока электрохимического анодирования на подложке монокристаллического кремния образуются многослойные структуры с различной морфологией, составом поверхности и показателями пористости по слоям. Отмечается, что на фотолюминесценцию влияет преимущественно состав верхнего слоя. Особое внимание отведено обсуждению эффектов, возникающих в результате постепенного увеличения плотности тока при сохранении полного времени травления. **Практическая значимость.** Полученные результаты исследования влияния режимов травления на морфологию и оптические свойства пористого кремния послужат основой для разработки устройств наноэлектроники на основе пористых структур.

Ключевые слова: структуры пористого кремния, наноструктуры, рефлектометрия

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-72-10007.

Ссылка для цитирования: Леньшин А.С., Пешков Я.А., Черноусова О.В., Канныкин С.В., Гречкина М.В., Минаков Д.А., Золотухин Д.С., Агапов Б.Л. Влияние режимов травления на пористость слоев и фотолюминесценцию многослойного пористого кремния // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 11. С. 100–106. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-100-106

Коды OCIS: 160.4236, 300.6250

Influence of etching modes on the porosity of layers and photoluminescence of multilayer porous silicon

A. S. Lenshin[1]✉, Ya. A. Peshkov[2], O. V. Chernousova[3], S. V. Kannykin[4], M. V. Grechkina[5], D. A. Minakov[6], D. S. Zolotukhin[7], B. L. Agapov[8]

[1, 2, 4, 5, 6, 7, 8]Voronezh State University, Voronezh, Russia
[1, 3]Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

[1]lenshinas@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1939-253X
[2]tangar77@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-0939-0466
[3]byollval@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8198-574X
[4]skannykin@gmail.com https://orcid.org/0000-0001-8756-5722

Abstract

The subject of the study. Multilayer samples of porous silicon formed with varying technological parameters of electrochemical etching. **Goal of the work.** Experimental study of methods for forming multilayer porous silicon and development of technology for fine-tuning the properties of its surface and volume for use in nanoelectronic devices. **Method.** The surface morphology was studied by atomic force and scanning electron microscopy. The porosity of the surface layer was analyzed by X-ray reflectometry. The electronic structure of the surface was studied by ultrasoft X-ray emission spectroscopy. Optical properties are represented by photoluminescence spectra. **Main results.** It was found that with a stepwise increase in the electrochemical anodizing current, multilayer structures with different morphologies, surface compositions, and layer porosity values are formed on a single-crystalline silicon substrate. In this case, photoluminescence is mainly affected by the composition of the upper layer. Special attention is paid to the discussion of the effects resulting from a gradual increase in current density while maintaining the overall etching time. **Practical significance.** The study results of the etching modes effect on the morphology and optical properties of porous silicon will serve as the basis for the development of nanoelectronics devices based on porous structures.

Keywords: porous silicon, multilayer nanostructures, X-ray reflectivity

Acknowledgment: the work was done with the financial support of the RSF grant № 19-72-10007.

For citation: Lenshin A.S., Peshkov Ya.A., Chernousova O.V., Kannykin S.V., Grechkina M.V., Minakov D.A., Zolotukhin D.S., Agapov B.L. Influence of etching modes on the porosity of layers and photoluminescence of multilayer porous silicon [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 11. P. 100–106. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-11-100-106

OCIS codes: 160.4236, 300.6250

ВВЕДЕНИЕ

Образцы пористого кремния (ПК) представляют собой сложный многокомпонентный материал, состав и функциональные характеристики которого находятся в сильной зависимости от его пористости [1–3]. При различных условиях формирования ПК может иметь достаточно большую площадь удельной поверхности пор, высокую реакционную способность и интенсивную фотолюминесценцию в видимом диапазоне спектра [4, 5]. Применение многостадийных режимов формирования слоя ПК на монокристаллическом кремнии также может быть перспективно для прецизионной настройки его функциональных свойств с целью дальнейшего формирования на поверхности ультратонких слоев материалов наноэлектроники, таких как структуры типа A3B5 и пленки оксидов металлов. На структурах ПК созданы прототипы различных оптических сенсоров, газовых сенсоров и сенсоров влажности [6, 7].

Целью данной работы являются экспериментальное исследование способов формирования многослойного ПК и разработка методики тонкой настройки свойств его поверхности и объема для использования в устройствах наноэлектроники.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы ПК были получены электрохимическим травлением (ЭХТ) пластин монокристаллического кремния КЭФ (100) в растворе плавиковой кислоты и изопропилового спирта [8]. Варьирование пористости образцов проводилось ступенчатым изменением плотности тока в процессе ЭХТ, раствор травления не изменялся. Структуры многослойного ПК с различными значениями показателя пористости формировались изменением плотности тока электрохимического анодирования при одном и том же общем времени травления (табл. 1). Средняя плотность тока ЭХТ в процессе травления составляла 35 мА/см^2.

Среди методов расчета пористости поверхностного слоя кремния особое место занимает рентгеновская рефлектометрия (РР) [9], которая позволяет измерить пористость поверхностного слоя образца, определяющего многие функциональные свойства ПК.

В работах [10, 11] выявлено, что показатель пористости также зависит от глубины анализа и от выдержки образца на атмосфере. Исследования были проведены через полгода после получения образцов. Для измерения пористости образцов ПК методом РР использован рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA в геометрии Брегга–Брентано (Cu Kα). Положение критического угла полного внешнего отражения (ПВО) пропорционально среднему значению электронной плотности среды [12]. Поэтому, зная критический угол ПВО ПК $\theta_{c\text{-}PS}$ и кремниевой подложки $\theta_{c\text{-}Si}$, можно вычислить показатель пористости по формуле $P = [1 - (\theta_{c\text{-}PS}/\theta_{c\text{-}Si})2]100\%$ [13]. Глубина проникновения рентгеновского излучения в ПК вблизи критического угла составляет несколько десятков нанометров [10, 12].

Морфология поверхности изучалась методами атомно-силовой (АСМ) и растровой электронной (РЭМ) микроскопии. Обработка и анализ изображений проводились в программах Gwyddion и ImageJ. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) записаны с помощью волоконно-оптического спектрометра *Ocean Optics* USB4000-VIS-NIR при комнатной температуре; источник возбуждения – лазерный диод с излучением длиной волны 405 нм.

Ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия (УМРЭС) используется для изучения электронного строения частично аморфных и разупорядоченных систем [14]. Спектры Si $L_{2,3}$ ПК получены на рентгеновском спектрометре РСМ-500. Глубина анализа образцов составляла 60 нм, что сопоставимо с глубинами анализа методами РР и ФЛ. При моделировании спектров Si $L_{2,3}$ образцов ПК использовались спектры эталонов a-Si:H, c-Si, SiO_x ($x \approx 1{,}3$) и SiO_2 [14]. Погрешность моделирования не превышала 10%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изображения поверхности ПК, полученные методом АСМ (рис. 1), показывают, что на поверхности однослойного ПК формируются частицы со средним размером 10–12 нм. При этом переключение на многостадийный режим травления приводит к заметному росту размера частиц на поверхности ПК до 17–19 нм, но среднеквадратическая шероховатость почти не меняется (около 3 нм).

На рис. 2 представлены изображения, полученные методом РЭМ, образцов ПК при одностадийном и многостадийном ЭХТ. При полной, приблизительно одинаковой, толщине пористого слоя образцов около 10 мкм, полученных

Таблица 1. Технологические параметры получения и результаты изучения морфологии образцов ПК
Table 1. Technological parameters of obtaining and results of studying the morphology of porous silicon samples

Номер образца	Тип и сопротивление подложки Si	Плотность тока ЭХТ по стадиям, мА/см^2	Время травления по стадиям, мин	Средний размер частиц ПК, нм	Среднеквадратическая шероховатость, нм
1	КЭФ, 0,2	35	4	12	2,6
2	КЭФ, 0,2	20/50	2/2	17	3,5
3	КЭФ, 0,2	20/30/40/50	1/1/1/1	19	3,2

многостадийным ЭХТ, на их сколах наблюдаются слои ПК с изменяющейся от поверхности к объему морфологией, просматриваются границы между слоями.

Значение критического угла ПВО для рентгеновских лучей от кремниевой подложки оказалось $\theta_{c\text{-}Si} \approx 0{,}22°$ (рис. 3), что совпадает

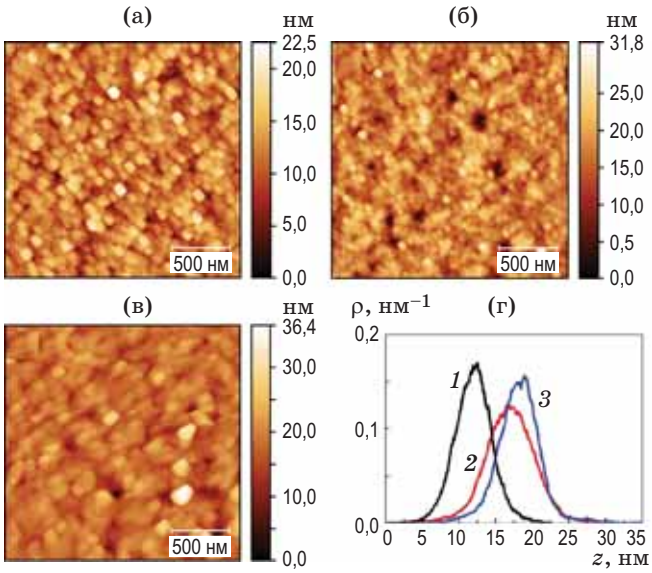


Рис. 1. Полученные методом АСМ изображения поверхности образцов ПК при плотностях тока ЭХТ 35 (а), 20/50 (б), 20/30/40/50 (в) мА/см^2. Распределение наночастиц кремния по размерам при плотностях тока ЭХТ 35 (*1*), 20/50 (*2*), 20/30/40/50 (*3*) мА/см^2 (г)

Fig. 1. Atomic-force microscopy images of the porous silicon samples surface prepared at (а) 35, (б) 20/50, (в) 20/30/40/50 mA/cm^2. (г) Silicon nanoparticles size distribution at current densities of electrochemical etching (*1*) 35, (*2*) 20/50, (*3*) 20/30/40/50 mA/cm^2

с литературными данными [13]. Профиль, полученный методом РР, однослойного образца № 1 (табл. 1) по своей форме схож с профилем подложки, так как кривая РР имеет только один критический угол, определяющий электронную плотность ПК. Однако кривые РР образцов № 2 и № 3 (табл. 1) существенно отличаются от однослойного образца и имеют ряд особенностей. До первого критического угла рентгеновское излучение полностью отражается от поверхности образца. После прохождения первого критического угла рентгеновские лучи проникают в поверхностный слой ПК, что позволяет определить его пористость. Впоследствии лучи начинают отражаться от глубинного слоя и кривая интенсивности начинает расти. Однако по достижении второго критического угла, определяющего пористость глубинного слоя, кривая интенсивности начинает экспоненциально падать. Такая картина иллюстрирует возникновение двуслойной структуры со слоями различной пористости в образцах № 2 и № 3, что хорошо согласуется с данными образцов, полученными методом РЭМ (рис. 2).

Анализ данных РР ПК (рис. 3а) показал, что пористость однослойного образца № 1 составляет 25%. Замена режима травления на двустадийный с ростом плотности тока от 20 до 50 мА/см^2 (образец № 2) приводит к образованию дополнительного приповерхностного пористого слоя с $P \approx 65\%$, а показатель пористости более глубоко залегающего слоя близок к пористости однослойного образца и составляет 23%. Увеличение количества этапов ЭХТ до четырех (образец № 3) с более медленным

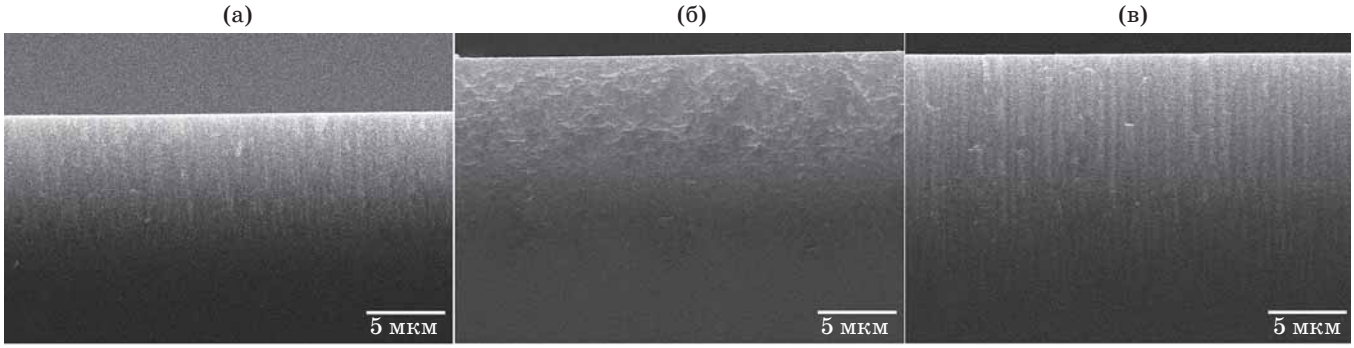


Рис. 2. Полученные методом РЭМ изображения сколов образцов ПК при плотностях тока ЭХТ 35 (а), 20/50 (б), 20/30/40/50 (в) мА/см^2

Fig. 2. Scanning electron microscopy cross-section images of porous silicon samples prepared at current densities of electrochemical etching (а) 35, (б) 20/50, (в) 20/30/40/50 mA/cm^2

изменением плотности тока (табл. 1) также приводит к образованию двуслойной пористой структуры (без учета подложки). Верхний слой имеет пористость 55%, что существенно меньше, чем у ПК, полученного двустадийным ЭХТ, при этом пористость более глубокого слоя оказалась около 2%, т.е. она почти не отличается от пористости более глубоких слоев предыдущих образцов.

Спектры ФЛ (рис. 3б) демонстрируют возможные механизмы ее возникновения в ПК. Так, в спектре однослойного образца с наименьшей пористостью около 25% наблюдается несколько особенностей. В области от 450 до 550 нм появляется пик низкой интенсивности, соответствующий люминесценции нестехиометрического оксида SiO_x, в диапазоне длин волн от 550 до 800 нм — более интенсивный пик. Этот эффект хорошо коррелирует с нашим предыдущим исследованием, в котором было показано, что в интервале пористости от 14 до 32% происходит переход к квантово-размерному механизму появления ФЛ [15]. Образцы, полученные при многостадийном ЭХТ, с высокопористыми верхними слоями демонстрируют значительно более интенсивную ФЛ в диапазоне длин волн от 600 до 800 нм. Положение пика с центром на 700 нм обычно ассоциируется с люминесценцией нанокристаллов в столбцах ПК (размер люминесцирующих нанокристаллов обычно 2–4 нм). При этом, чем выше пористость поверхностного слоя ПК, тем интенсивней пик ФЛ.

На рис. 4 изображены спектры Si $L_{2,3}$ образцов ПК, полученные методом УМРЭС при глубине анализа 60 нм. Результаты моделирования фазового состава ПК с использованием спектров эталонов представлены в табл. 2.

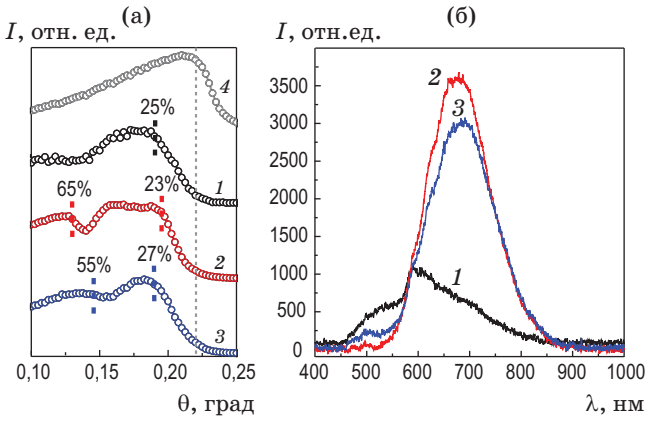


Рис. 3. Кривые РР (а) и спектры ФЛ (б) кристаллического кремния (*4*) и многослойного ПК (*1–3*)

Fig. 3. (a) X-ray reflectometry curves and (б) photoluminescence spectra of crystalline silicon (*4*) and multilayer porous silicon (*1–3*)

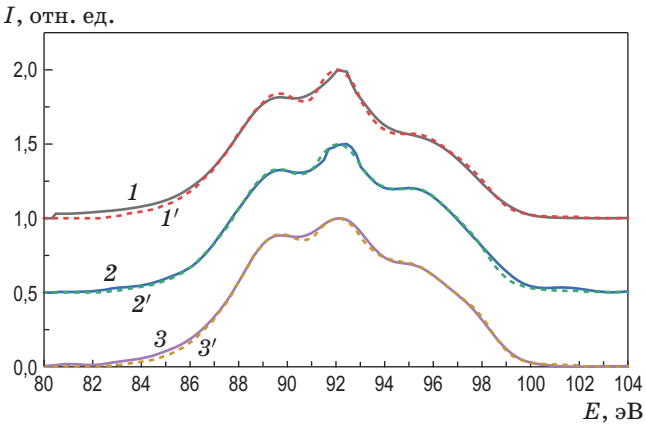


Рис. 4. Полученные методом УМРЭС Si $L_{2,3}$ экспериментальные (*1–3*) и модельные (*1′–3′*) спектры образцов многослойного ПК при плотностях тока ЭХТ 35 (*1*), 20/50 (*2*), 20/30/40/50 (*3*) мА/см^2

Fig. 4. Ultrasoft X-ray emission Si $L_{2,3}$ (*1–3*) experimental and (*1′–3′*) simulated spectra of multilayer porous silicon prepared at etching current densities (*1*) 35, (*2*) 20/50, (*3*) 20/30/40/50 mA/cm^2

Таблица 2. Результаты моделирования фазового состава образцов по данным УМРЭС при глубине анализа 60 нм

Table 2. Results of modeling the phase composition of samples according to X-ray ultrasoft emission spectroscopy data at an analysis depth of 60 nm

Номер образца	c-Si, %	a-Si:H,/Si_{lc}, %	SiO_x, %	SiO_2, %	Погрешность, %
1	85	5	0	10	8
2	67	12/1	13	7	7
3	58	12/15	0	15	4

Исследования методом УМРЭС состава ПК с различными коэффициентами пористости показали, что после длительного хранения на атмосфере образцы ПК содержат фазы кристаллического, аморфного и разупорядоченного кремния, а также субоксида и диоксида кремния. Образец с низким показателем пористости (менее 30%) близок по составу к кристаллическому кремнию, их спектры на 90% совпадают со спектром эталонного c-Si [12], у образцов многослойного ПК с пористостью верхнего слоя 55 и 65% доля оксида в составе растет с показателем пористости.

Процентное соотношение неокисленных фаз к окисленным в образцах уменьшалось от 90/10 до 80/20. Это объясняется большей площадью поверхности пор, подвергшейся окислению при выдерживании образцов на атмосфере. При этом бóльшая пористость поверхностного слоя и более окисленная поверхность наблюдаются у образцов, полученных более резким изменением плотности тока ЭХТ.

Данные хорошо коррелируют с качественными результатами, которые были получены на начальных стадиях естественного старения ПК, а также для микро-, мезо- и нанопористого кремния в работах [14, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе установлено, что при многостадийном увеличении тока электрохимического анодирования на подложке монокристаллического кремния образуются многослойные структуры с различными морфологией, составом поверхности и показателем пористости по слоям. При этом показатель пористости верхнего слоя можно менять в достаточно широких пределах. У образцов многослойного ПК доля оксида в составе поверхности растет с показателем пористости. Показано, что на характеристики многослойного ПК преимущественно влияют строение и состав верхнего слоя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Canham L. Handbook of porous silicon. CH.: Springer, 2014. 733 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05744-6
2. Pacholski C. Photonic crystal sensors based on porous silicon // Sensors. 2013. V. 13. P. 4694. https://doi.org/10.3390/s130404694
3. Moretta R. Porous silicon optical devices: Recent advances in biosensing applications // Sensors. 2021. V. 21. P. 1336. https://doi.org/10.3390/s21041336
4. Ян Д.Т. Люминесцентные свойства пористого кремния // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 7. С. 21–26. Yan D.T. Luminescence properties of porous silicon // J. Opt. Technol. 2013. V. 80. № 7. P. 421–425. https://doi.org/10.1364/JOT.80.000421
5. Григорьев Л.В., Михайлов А.В. Оптические и фотолюминесцентные свойства пористого кремния, легированного иттербием при лазерно-стимулированном окислении // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 12. С. 98–106.
   Grigoriev L.V., Mikhailov A.V. Optical and photoluminescent properties of porous silicon doped with ytterbium under laser-stimulated oxidation // J. Opt. Technol. 2016. V. 83. № 12. P. 787–793. https://doi.org/10.1364/JOT.83.000787
6. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1046. https://doi.org/10.1063/1.103561
7. Seredin P.V., Lenshin A.S. Structural, optical and morphological properties of hybrid heterostructures on the basis of GaN grown on compliant substrate por-Si(111) // Appl. Surface Sci. 2019. V. 476. P. 1049. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.239
8. Lenshin A.S. Features of the two-stage formation of macroporous and mesoporous silicon structures // Condensed Matter and Interphases. 2021. V. 23. P. 41. https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3300
9. Asgharizadeh S.T. X-ray reflectometry characterization of porous silicon films prepared by a glancing-angle deposition method // Phys. Rev. B. 2009. V. 79. P. 125405. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.125405
10. Servidori M. Influence of the electrolyte viscosity on the structural features of porous silicon // Solid State Commun. 2001. V. 118. P. 85. https://doi.org/10.1016/S0038-1098(01)00036-9
11. Балагуров Л.А., Павлов В.Ф., Петрова Е.А. и др. Исследование пористого кремния и его старения методами полного внешнего отражения рентгеновских лучей и инфракрасной спектроскопии // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. № 8. С. 957–960.
    Balagurov L.A., Pavlov V.F., Petrova E.A., et al. Total external X-ray reflection and infrared spectroscopy study of porous silicon and its aging // Semiconductors. 1997. V. 31. P. 815. https://doi.org/10.1134/1.1187259
12. Lenshin A.S. X-ray reflectivity investigation of multilayer macroporous silicon structures // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1984. P. 012018. http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1984/1/012018
13. Buttard D. X-ray reflectivity investigation of thin p-type porous silicon layers // Solid State Commun. 1998. V. 109. P. 1. https://doi.org/10.1016/S0038-1098(98)00531-6
14. Lenshin A.S. Investigations of the composition of macro-, micro- and nanoporous silicon surface by ultrasoft X-ray spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy // Appl. Surface Sci. 2015. V. 359. P. 550. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.10.140
15. Lenshin A.S. Investigation of the relationship between porosity and luminescent properties of porous silicon // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2023. V. 98. P. 36. https://doi.org/10.1051/epjap/2023230001

АВТОРЫ

Александр Сергеевич Леньшин — доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Россия; Scopus ID: 55665516500; https://orcid.org/0000-0002-1939-253X; lenshinas@mail.ru

Ярослав Анатольевич Пешков — лаборант-исследователь, Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Россия; Scopus ID: 57203168083; https://orcid.org/0000-0003-0939-0466; tangar77@mail.ru

Ольга Валентиновна Черноусова — кандидат химических наук, преподаватель первой категории, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, 394036, Россия; Scopus ID: 57218881258; https://orcid.org/0000-0002-8198-574X; byollval@mail.ru

Сергей Владимирович Канныкин — кандидат физико-математических наук, доцент Воронежского государственного университета, Воронеж, 394018, Россия; Scopus ID: 25960926200; https://orcid.org/0000-0001-8756-5722; svkannykinn@gmail.com

Маргарита Владимировна Гречкина — ведущий инженер Воронежского государственного университета, Воронеж, 394018, Россия; https:// orcid.org/ 0000-0002-7873-8625; grechkina_m@mail.ru

Дмитрий Анатольевич Минаков — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Россия; https://orcid.org/0000-0002-3956-196X; minakov@phys.vsu.ru

Дмитрий Сергеевич Золотухин — лаборант-исследователь, Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Россия; https://orcid.org/0000-0002-9645-9363; zolotuhin@phys.vsu.ru

Борис Львович Агапов — кандидат технических наук, инженер, Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Россия; https://orcid.org/0000-0002-08829-0411; b.agapov2010@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12.11.2023
Одобрена после рецензирования 01.03.2024
Принята к печати 30.09.2024

AUTHORS

Alexandr Lenshin — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russia; Scopus ID: 55665516500; https://orcid.org/0000-0002-1939-253X; lenshinas@mail.ru

Yaroslav Peshkov — Research Laboratory Assistant, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russia; Scopus ID: 57203168083; https://orcid.org/0000-0003-0939-0466; tangar77@mail.ru

Olga Chernousova — PhD (Chemistry), Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, 394036, Russia; Scopus ID: 57218881258; https://orcid.org/0000-0002-8198-574X; byolval@mail.ru

Sergey Kannykin — PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russia; Scopus ID: 25960926200; https://orcid.org/0000-0001-8756-5722; svkannykin@gmail.com

Margarita Grechkina — Lead Engineer, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russia; https:// orcid.org/ 0000-0002-7873-8625; grechkina_ma@mail.ru

Dmitriy Minakov — PhD (Physics and Mathematics), Researcher, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3956-196X; minakov@phys.vsu.ru

Dmitriy Zolotukhin — Research Laboratory Assistant, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russia; https://orcid.org/0000-0002-9645-9363; zolotuhin@phys.vsu.ru

Boris Agapov — PhD (Engineering), Engineer, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russia; https://orcid.org/0000-0002-08829-0411; b.agapov2010@yandex.ru

The article was submitted to the editorial office 12.11.2023
Approved after review 01.03.2024
Accepted for publication 30.09.2024