



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-17-25>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 544.653

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, СФОРМИРОВАННОГО НА СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫХ ПЛАСТИНАХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ТИПА ПРОВОДИМОСТИ

У. П. ЛОПАТО, Д. Д. ЛАПУТЬКО, Н. Л. ГРЕВЦОВ, В. П. БОНДАРЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 14.02.2024*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** С помощью сканирующей электронной микроскопии изучены структуры поверхности и внутренних областей пористого кремния, полученного анодированием сильнолегированных пластин монокристаллического кремния электронного типа проводимости в растворе фтористоводородной кислоты при различных плотностях тока. Установлено, что на поверхности пористого кремния имеются поры темно-серого и светло-серого цветов, отличающиеся размерами и плотностью расположения. Поры темно-серого цвета имеют большие размеры, а их плотность примерно в 5–10 раз меньше, чем плотность светло-серых пор. Показано, что поры светло-серого цвета представляют собой неразвившиеся поры небольшой глубины, а темно-серые являются входными отверстиями глубоких пор бутылкообразной формы, проходящих от поверхности вглубь монокристалла. Эквивалентные диаметры светло-серых пор на поверхности пористого кремния составляют 12–15 нм и практически не зависят от плотности анодного тока. При этом эквивалентные диаметры темно-серых пор и средние расстояния между их центрами увеличиваются по линейному закону от 15 до 35 нм на поверхности и от 35 до 120 нм для внутренних областей пористого кремния при увеличении плотности тока от 30 до 90 мА/см<sup>2</sup>. Средняя толщина элементов кремниевого скелета на поверхности составляет около 3 нм и увеличивается до 5–6 нм во внутренних областях пористого кремния. Задавая плотность анодного тока, можно получать слои пористого кремния с различными структурными параметрами. Результаты исследований имеют практическую значимость для формирования композитных материалов на основе пористого кремния, который используется как пористая матрица для осаждения металлов и полупроводников.

**Ключевые слова:** сканирующая электронная микроскопия, анализ изображений, электрохимическое анодирование, плотность анодного тока, пористый кремний, плотность пор, эквивалентный диаметр.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность Д. В. Жигулину за проведение измерений с использованием сканирующей электронной микроскопии. Исследования выполнены в рамках решения задач проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т23М-040 и грантов Министерства образования Республики Беларусь для магистрантов.

**Для цитирования.** Особенности структуры пористого кремния, сформированного на сильнолегированных пластинах монокристаллического кремния электронного типа проводимости / У. П. Лопато [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 17–25. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-17-25>.

## STRUCTURAL FEATURES OF POROUS SILICON FORMED ON HEAVILY DOPED PLATES OF SINGLE-CRYSTAL SILICON WITH ELECTRON CONDUCTIVITY

ULYANA P. LOPATO, DIANA D. LAPUTKO, NIKITA L. GREVTSOV,  
VITALY P. BONDARENKO

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 14.02.2024*

**Abstract.** Using scanning electron microscopy, the structures of the surface and internal regions of porous silicon obtained by anodizing heavily doped plates of single-crystal silicon with electron conductivity in a hydrofluoric acid solution at different current densities were studied. It is found that the porous silicon surface has dark gray and light gray pores, which differ in size and surface distribution density. Dark gray pores possess larger sizes, and their density is about 5–10 times less than that of light gray pores. Based on the cross-section imagery, it is shown that light gray pores correspond to underdeveloped channels of small depth, while dark gray pores are the entrance points of deep bottle-shaped channels passing from the surface into the depth of the silicon wafer. The equivalent diameters of light gray pores on the surface of porous silicon are 12–15 nm and are practically independent of the anodic current density. At the same time, the equivalent diameters of dark gray pores and average distances between their centers increase linearly from 15 to 35 nm on the surface and from 35 to 120 nm in the volume of porous silicon when the current density is increased from 30 to 90 mA/cm<sup>2</sup>. The average thickness of silicon skeleton elements is about 3 nm on the surface and increases to 5–6 nm in the volume. By setting the density of the anode current, it is possible to obtain layers of porous silicon with different structural parameters. The obtained research results have practical significance for the formation of composite materials based on porous silicon, which can be used as a porous matrix for the deposition of metals and semiconductors.

**Keywords:** scanning electron microscopy, image analysis, electrochemical anodizing, anodic current density, porous silicon, pore density, equivalent diameter.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The authors are grateful to D. V. Zhigulin for conducting scanning electron microscopy measurements. The research was conducted as part of task No T23M-040 for the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, as well as Master's Student grants provided by the Ministry of Education of the Republic of Belarus.

**For citation.** Lopato U. P., Laputko D. D., Grevtsov N. L., Bondarenko V. P. (2024) Structural Features of Porous Silicon Formed on Heavily Doped Plates of Single-Crystal Silicon with Electron Conductivity. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 17–25. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-17-25> (in Russian).

### Введение

Пористый кремний (ПК) открыт в 1956 г. при проведении экспериментов по электрохимической полировке монокристаллического кремния [1]. Изначально ПК считался побочным продуктом, мешающим получению блестящей поверхности полируемого монокристалла кремния. Интерес к данному материалу появился в начале 70-х годов прошлого века, когда было предложено использовать ПК для формирования областей диэлектрической изоляции интегральных схем [2]. С этой целью ПК подвергался высокотемпературному окислению, что приводило к образованию окисленного ПК с электрофизическими свойствами, подобными двуокиси кремния. Для данной цели знать структурные параметры пористых слоев не требовалось, в связи с чем исследования структуры ПК практически не выполнялись.

В начале 80-х годов прошлого века стали активно проводиться работы по использованию ПК как буферного слоя для осаждения эпитаксиальных слоев кремния [3, 4]. Этот подход разрабатывался для изготовления структур кремния на изоляторе и был доведен до индустриального производства фирмой Canon (Япония) [5]. Учеными Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР) совместно со специалистами Римского университета La Sapienza были проведены исследования, в которых определены такие структурные параметры ПК, как плотность и размеры пор на поверхности в зависимости от режимов формирования,

что было необходимо для получения эпитаксиальных слоев кремния на пористой поверхности [6]. Впоследствии ПК успешно использовался как буферный слой для формирования на кремниевых пластинах гетероэпитаксиальных слоев GaAs, PbS, InSb и GaN [7]. Для применения ПК как буферного слоя, на поверхности которого формируются эпитаксиальные слои, требовались данные только о структурных параметрах поверхностных областей ПК, в связи с чем глубоких исследований структуры объема ПК не производилось.

Ситуация коренным образом изменилась в начале 1990-х годов после опубликования работы L. T. Canham [8], где впервые предлагалось рассматривать ПК как материал, в котором элементы скелета кремния, разделяющие поры, являются наноразмерными кристаллитами и проявляют квантовые размерные эффекты, приводящие в том числе к интенсивной видимой люминесценции света. Данная статья привела к лавинообразному увеличению количества публикаций, посвященных исследованию процессов формирования ПК и изучению его свойств. Для подтверждения наблюдаемых размерных эффектов было произведено большое количество исследований внутренней структуры ПК и получены данные о влиянии размеров элементов кремниевого скелета на его люминесцентные свойства. К сожалению, несмотря на большой объем выполненных исследований, соответствующие данные относились в основном к характеристике размеров элементов кремниевого скелета и практически не затрагивали вопросов корректного определения параметров внутренних областей (объема) ПК [9].

В современных исследованиях ПК часто рассматривается в качестве матрицы для создания композитных материалов путем заполнения каналов пор различными металлами и полупроводниками [10]. Этот подход позволяет формировать в кремниевых пластинах области композитных материалов со свойствами, не присущими исходной подложке. Так, учеными БГУИР и Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» (МИЭТ) разработана методика заполнения каналов пор ПК германием [11, 12]. Термообработка композитов такого рода позволяет формировать пленки сплава кремний-германий, известного как эффективный высокотемпературный термоэлектрический материал. Преобразователи на основе сплавов кремний-германий применяются, в частности, на космических аппаратах для длительных миссий [13].

Для успешного синтеза композитных материалов на основе ПК необходимы воспроизводимые и надежные данные о структуре как поверхностных, так и внутренних областей пористого слоя. Структура поверхностных областей непосредственно определяет саму возможность введения материалов в объем пор, а структура объема – итоговую форму и количественное соотношение компонентов после заполнения каналов материалом-«гостем». Настоящая статья направлена на устранение имеющегося пробела в характеристике структурных параметров ПК и посвящена комплексному исследованию как внутренних, так и поверхностных областей пористого слоя в зависимости от режимов его формирования.

### Методика проведения эксперимента

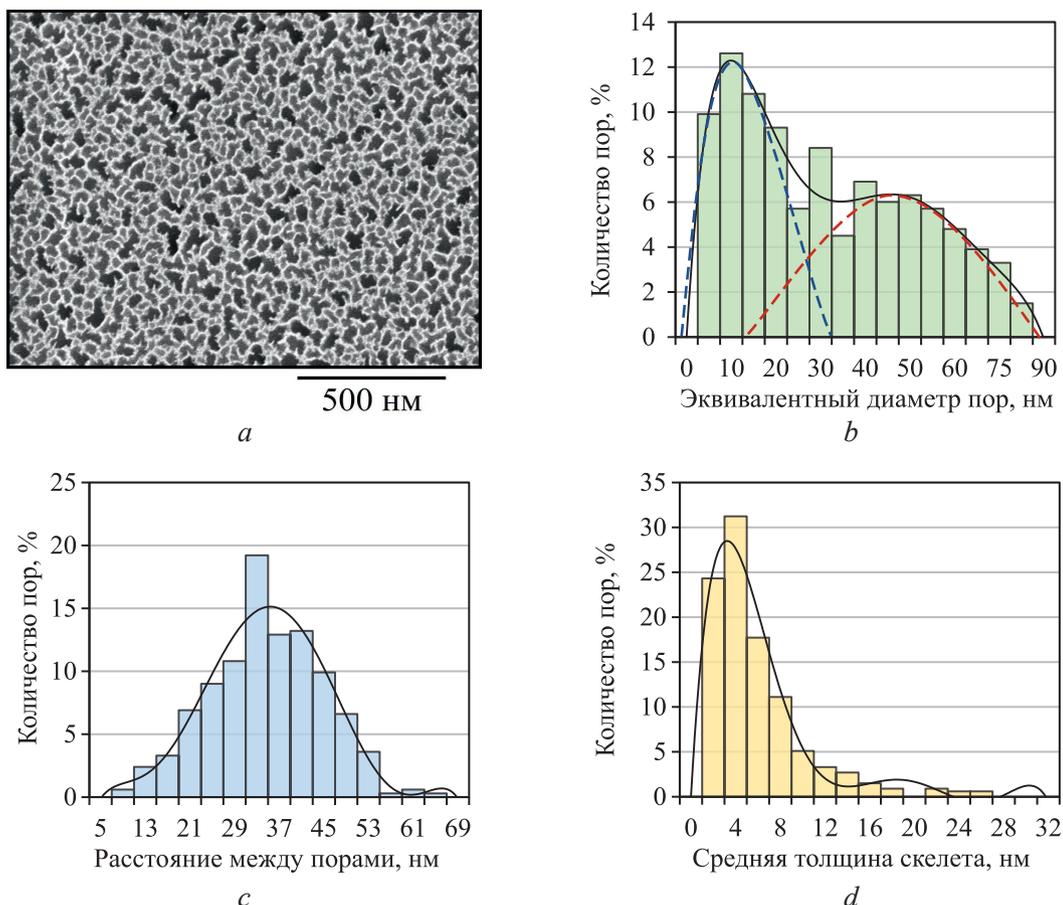
В качестве подложек использовались сильнолегированные кремниевые пластины КЭС 0,01 (100), позволяющие получать однородные слои ПК с широким спектром пористости путем анодирования при различных плотностях тока (от 30 до 90 мА/см<sup>2</sup>). Анодирование производилось в фторопластовой электрохимической ячейке с платиновым контрэлектродом с использованием электролита, содержащего фтористоводородную кислоту (45 %), три части деионизированной воды и одну часть изопропилового спирта. Время обработки варьировалось для достижения схожей толщины слоев ПК (2,5–3,0 мкм) при всех используемых значениях плотности тока. Для анализа структуры внутренних областей верхняя часть слоя ПК удалялась химически путем коррозионного осаждения меди с ее последующим травлением в 20%-ном растворе HNO<sub>3</sub>.

Структура образцов изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S-4800. Полученные СЭМ-изображения были проанализированы с использованием программного комплекса ImageJ, позволяющего установить основные геометрические параметры объектов, различимых на изображениях поверхности. Толщина боковых стенок пор (ширина скелета) оценивалась с использованием расширения для ImageJ, созданного авторами [14], в составе которого расстояние  $d$  между границами двух соседних пор с координатами  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$  опре-

деляется как  $d = 2 \cdot ((y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2)^{1/2} - (D_1/2 + D_2/2)$ , где  $D_1, D_2$  – эквивалентные диаметры двух пор, вычисленные из их площадей в предположении, что они имеют круглую форму. Учитывая приближение по форме поры, этот метод дает точные результаты для круглых пор, однако в достаточной мере применим и к структурам, рассматриваемым в данной статье. На основании полученных значений подготовлены гистограммы распределения пор по размерам, среднему расстоянию до центров соседних пор и средней ширине скелета.

### Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1, *a* представлено СЭМ-изображение поверхности слоя ПК, полученного при плотности тока  $90 \text{ mA/cm}^2$  в течение 45 с. Входные отверстия каналов пор имеют неправильную форму, отличающуюся от круглой, и многие из них соединены друг с другом. В программном комплексе ImageJ была проведена оценка цвета пор по шкале градации серого. Часть пор имеет темно-серый цвет, оставшиеся – светло-серый. При этом поры темно-серого цвета обладают наибольшими размерами. Элементы кремниевого скелета между порами имеют белый или светло-серый цвет. В результате анализа снимка поверхности установлены значения плотности расположения всех пор (число пор на единицу площади), плотности темно-серых и светло-серых пор в отдельности, а также построены гистограммы распределения пор по эквивалентным диаметрам (рис. 1, *b*), среднему расстоянию между центрами пор (рис. 1, *c*) и средней толщине элементов кремниевого скелета (рис. 1, *d*). На изображениях количество пор указано в процентах от общего количества пор на анализируемом снимке.

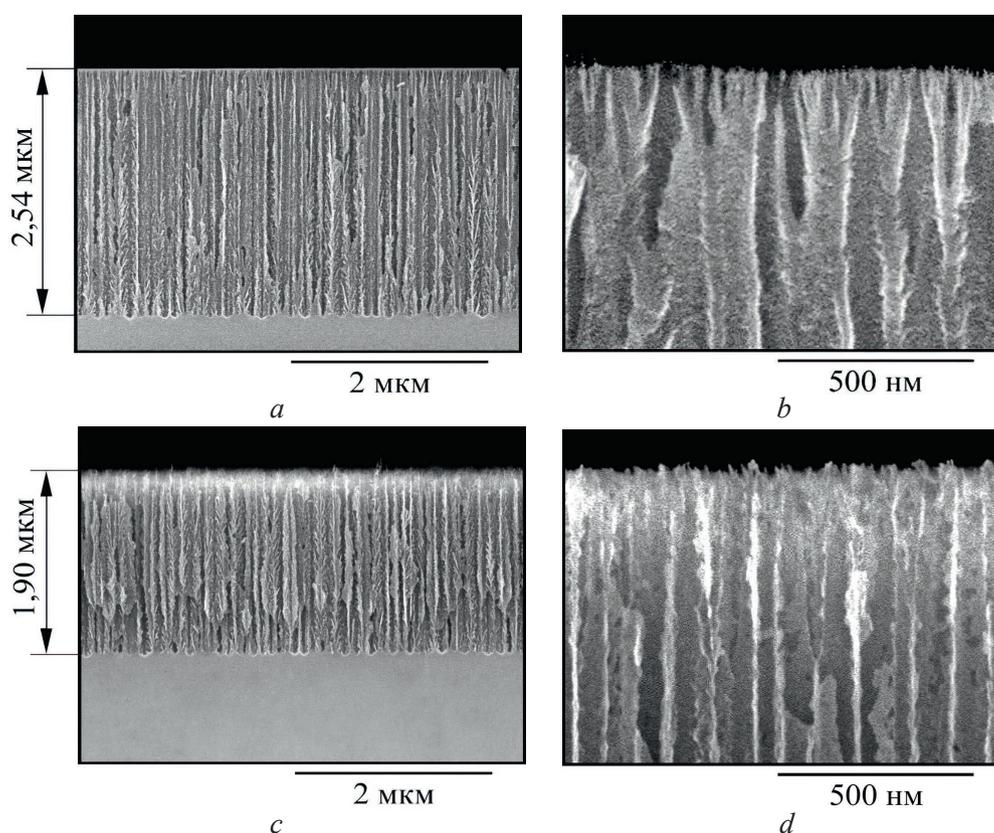


**Рис. 1.** СЭМ-изображение поверхности образца пористого кремния, полученного анодированием при плотности тока  $90 \text{ mA/cm}^2$  в течение 45 с (*a*), и гистограммы распределения: *b* – эквивалентных диаметров пор; *c* – средних значений расстояния до центров соседних пор; *d* – толщины кремниевого скелета

**Fig. 1.** SEM image of the surface of a porous silicon sample obtained by anodizing at a current density of  $90 \text{ mA/cm}^2$  for 45 s (*a*) and distribution histograms: *b* – equivalent pore diameters; *c* – average values of the distance to the centers of neighboring pores; *d* – thickness of the silicon skeleton

Плотность всех пор на СЭМ-изображении составила  $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , темно-серых –  $8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , светло-серых –  $6,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Как видно из рис. 1, *b*, гистограмма распределения пор по эквивалентным диаметрам состоит из двух распределений. Графическое разделение гистограммы (пунктирные линии) позволяет определить положения максимумов этих распределений, находящихся на 12 и 48 нм. Правое плечо первого распределения уширено в сторону больших диаметров пор, а второе распределение представляется симметричным. Разумно полагать, что первое распределение характеризует поры светло-серого цвета, а второе – темно-серого. Распределение пор по расстоянию между их центрами (рис. 1, *c*) имеет симметричный вид с максимумом на 35 нм. Распределение по толщине элементов кремниевого скелета несимметрично и уширено в сторону больших значений. Средняя толщина элементов скелета (рис. 1, *d*) составляет 5–6 нм, при этом имеются элементы скелета толщиной 10–16 и даже 18–26 нм.

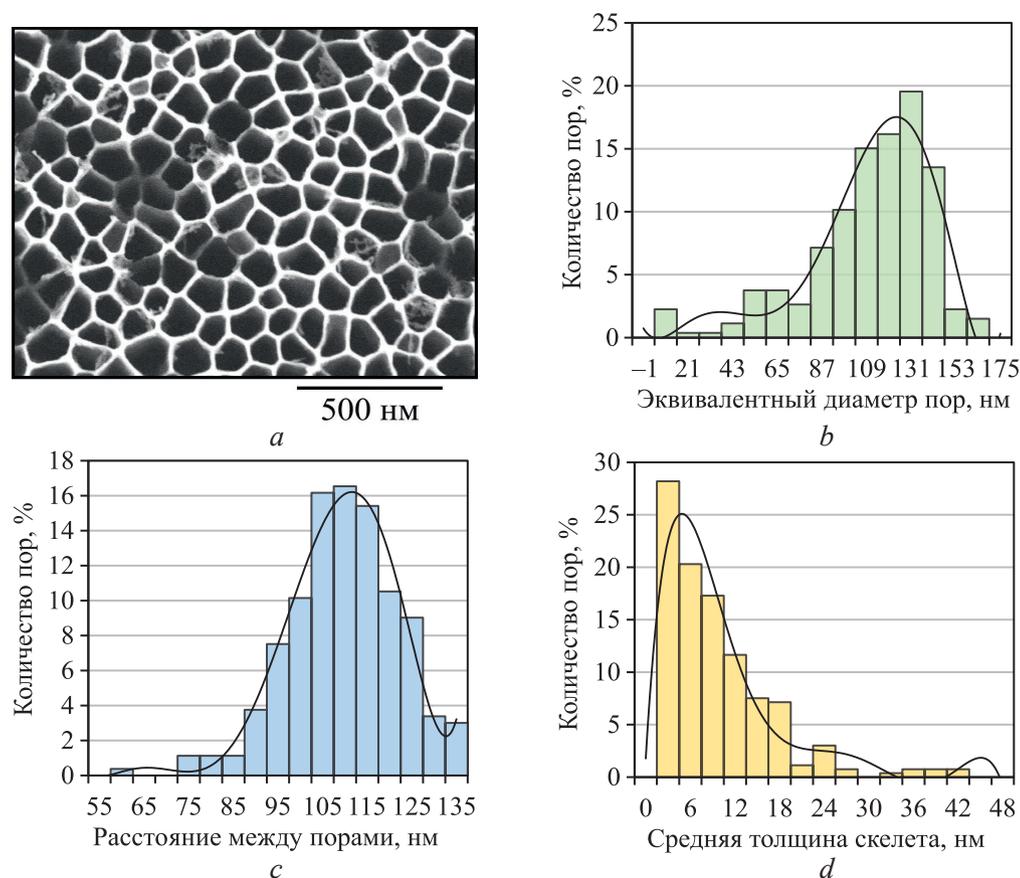
Для определения формы каналов пор проанализированы СЭМ-изображения сколов представленного ранее образца – полученные снимки с различным увеличением приведены на рис. 2. Как видно из рис. 2, *a*, *b*, исходный слой ПК имеет толщину 2,54 мкм. Каналы пор направлены перпендикулярно поверхности и имеют шероховатые стенки. В приповерхностной области есть «неразвившиеся» поры длиной 0,3–0,5 мкм, которые на снимке поверхности (рис. 1, *a*) имеют светло-серый цвет. На сколе хорошо наблюдаются поры, проходящие от поверхности на всю глубину пористого слоя – они соответствуют темно-серым порам на изображении поверхности. На основании данных снимков можно заключить, что темно-серые поры имеют бутылкообразную форму. Длина приповерхностных «горлышек» с меньшим по сравнению с основным объемом диаметром составляет 0,1–0,3 мкм.



**Рис. 2.** СЭМ-изображения скола образца пористого кремния, полученного анодированием при плотности тока  $90 \text{ мА/см}^2$  в течение 45 с до (*a*, *b*) и после (*c*, *d*) удаления поверхностного слоя  
**Fig. 2.** SEM images of a cleavage of a porous silicon sample obtained by anodizing at a current density of  $90 \text{ mA/cm}^2$  for 45 s before (*a*, *b*) and after (*c*, *d*) the removal of the surface layer

Корректно определить диаметры пор по изображению скола непросто из-за сложной формы пор и особенностей раскалывания образца. Скол образца монокристаллического кремния с ориентацией поверхности (100) получается практически «зеркальным», однако не все поры в пористом слое разделяются точно по центру, что затрудняет корректное определение их геометрических параметров. Для более точного изучения структуры внутренних областей верхнюю

часть слоя ПК удаляли методом коррозионного осаждения меди с последующим травлением. Данный метод заключается в иммерсии (погружении) исходного ПК в раствор для осаждения, где протекают окислительно-восстановительные реакции между кремниевым скелетом и ионами металла из раствора. В результате происходит процесс восстановления ионов металла, сопряженный с растворением скелета ПК, т. е. имеет место замещение атомов материала подложки атомами осаждаемого металла. Изображения скола образца ПК после такой обработки приведены на рис. 2, *c*, *d*, а изображение поверхности – на рис. 3. Толщина слоя ПК после травления уменьшилась до 1,90 мкм, что говорит об удалении верхнего поверхностного слоя толщиной 0,64 мкм. Поры на сколе имеют форму цилиндров с шероховатыми стенками.



**Рис. 3.** СЭМ-изображение поверхности образца пористого кремния, полученного анодированием при плотности тока  $90 \text{ mA/cm}^2$  в течение 45 с после удаления поверхностного слоя (*a*), и гистограммы распределения: *b* – эквивалентных диаметров пор;

*c* – средних расстояний до центров соседних пор; *d* – толщины кремниевого скелета

**Fig. 3.** SEM image of the surface of a porous silicon sample obtained by anodization at a current density of  $90 \text{ mA/cm}^2$  for 45 s after the removal of the surface layer (*a*) and distribution histograms:

*b* – equivalent pore diameters; *c* – average distances to the centers of neighboring pores;

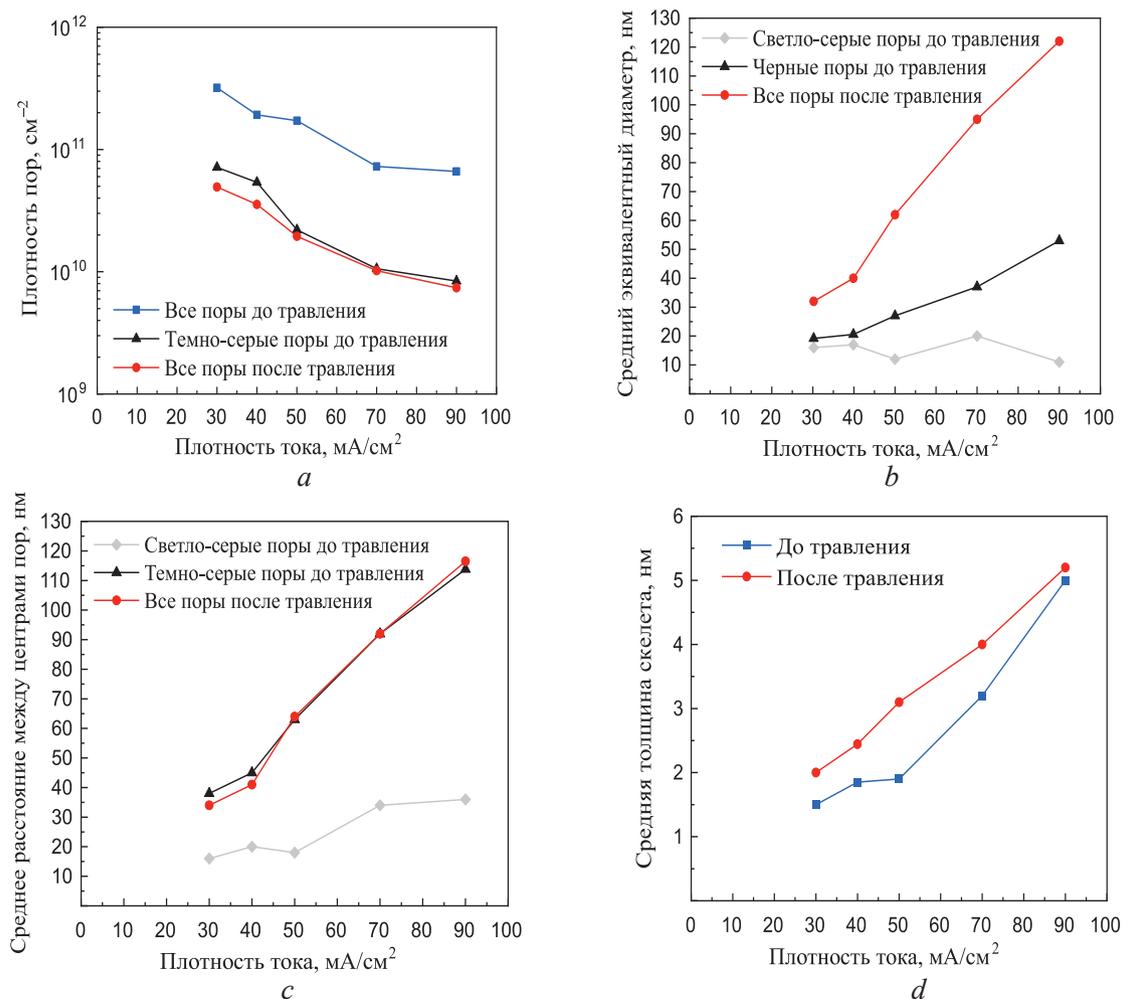
*d* – thickness of the silicon skeleton

Анализ изображения скола позволяет произвести оценку плотности пор по его длине, в рассматриваемом случае составляющей  $1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, поверхностная плотность при данном методе расчета будет равна  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , что в достаточной мере соответствует значению плотности темно-серых пор, полученному при анализе рис. 1.

Как видно из представленного на рис. 3, *a* изображения поверхности, поры в объеме слоя имеют более упорядоченный размер и выраженную многоугольную форму, с наибольшей вероятностью связанную с использованием подложки с ориентацией (100). При этом характерного для исходной поверхности разделения пор на светло-серые и темно-серые не наблюдается: все поры имеют одинаковый темно-серый цвет, а разделяющие их элементы кремниевого скелета – белый или светло-серый. По аналогии с представленными ранее результатами произведен анализ геометрических параметров пор, видимых на рис. 3. Плотность расположения пор составила  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Распре-

деление пор по эквивалентным диаметрам имеет один выраженный максимум (рис. 3, *b*). Левое плечо уширено в сторону меньших диаметров, а среднее значение диаметра составляет 120 нм. Распределение средних значений расстояния между центрами каналов пор симметричное и имеет максимум при 110 нм (рис. 3, *c*). Распределение толщины элементов кремниевого скелета, напротив, несимметрично и уширено в сторону больших величин, при этом максимум приходится на 5–6 нм (рис. 3, *d*). Наблюдаются также элементы скелета толщиной 10–26 и даже 30–42 нм. Распределение толщины элементов скелета для образца после удаления верхнего слоя ПК хорошо совпадает с аналогичным распределением для элементов скелета исходного образца ПК (рис. 1, *d*).

По описанной выше методике изучены образцы ПК, полученные при плотностях анодного тока 30, 40, 50 и 70  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . Результаты анализа структурных параметров образцов приведены в виде зависимостей плотности пор (рис. 4, *a*), средних эквивалентных диаметров (рис. 4, *b*), расстояний между центрами пор (рис. 4, *c*) и толщины элементов скелета (рис. 4, *d*) от плотности тока. Как видно из совокупности полученных данных, увеличение плотности тока приводит к уменьшению плотности пор на поверхности как для исходных образцов ПК до травления, так и для поверхности образцов с удаленным верхним слоем.



**Рис. 4.** Зависимости ряда структурных параметров слоев пористого кремния от плотности тока анодирования до и после удаления приповерхностного слоя (до и после травления): *a* – плотность расположения пор на поверхности; *b* – средний эквивалентный диаметр поры; *c* – среднее расстояние между центрами соседних пор; *d* – средняя толщина элементов кремниевого скелета между порами

**Fig. 4.** Dependences of a number of structural parameters of porous silicon layers on the anodizing current density before and after the removal of the surface layer (before and after etching): *a* – density of pores on the surface; *b* – average equivalent pore diameter; *c* – average distance between the centers of adjacent pores; *d* – average thickness of the silicon skeleton elements between pores

Так, при увеличении плотности тока от 30 до 90 мА/см<sup>2</sup> наблюдается пятикратное уменьшение плотности всех пор (темно-серых и светло-серых) на поверхности исходного ПК. При этом плотность темно-серых пор по сравнению с плотностью светло-серых на образцах обоих типов при 90 мА/см<sup>2</sup> уменьшается в 8–10 раз, а при более низких плотностях тока – в 4 раза (рис. 4, *a*). Из рис. 4, *b* видно, что эквивалентный диаметр светло-серых пор на поверхности исходных образцов ПК составляет порядка 12–15 нм и практически не зависит от плотности тока. Диаметр же темно-серых пор увеличивается по линейному закону от 15 до 50 нм в исследованном диапазоне плотностей анодного тока. Диаметр пор на поверхности ПК после травления верхнего слоя также увеличивается по линейному закону в пределах от 30 до 120 нм.

Из рис. 4, *c* видно, что у исходных образцов ПК показатели среднего расстояния между центрами всех пор незначительно увеличиваются от 15 до 35 нм в исследованном диапазоне плотностей тока. Анализируя расстояния между темно-серыми порами на поверхности исходного ПК и порами в объеме пористого материала, можно заметить, что соответствующие зависимости практически идентичны, а значения расстояний в обоих случаях варьируются от 35 до 120 нм. Этот результат является дополнительным фактором, указывающим на то, что темно-серые поры на поверхности исходных образцов ПК соответствуют входным отверстиям глубоких каналов пор.

Как видно на рис. 4, *d*, толщина элементов скелета в исходных образцах ПК при малых плотностях анодного тока (30–50 мА/см<sup>2</sup>) составляет всего 1,5–2,0 нм и увеличивается до 5,0 нм при увеличении плотности тока до 90 мА/см<sup>2</sup>. Толщина элементов скелета образцов ПК после травления примерно на 0,5–1,0 нм больше, чем у исходных образцов ПК в диапазоне плотностей тока 30–70 мА/см<sup>2</sup>. При плотности тока 90 мА/см<sup>2</sup> толщины элементов скелета примерно одинаковы и составляют 5 нм для исходных образцов ПК и образцов с удаленным верхним слоем.

## Заключение

1. Структурные параметры слоев пористого кремния, полученного анодированием сильнолегированных пластин монокристаллического кремния электронного типа проводимости в растворе на основе фтористоводородной кислоты, определяются в первую очередь плотностью анодного тока. На основе анализа электронных изображений поверхности установлено, что на поверхности пористого кремния имеются поры темно-серого и светло-серого цветов, отличающиеся размерами и поверхностной плотностью. Поры темно-серого цвета имеют большие размеры, а их плотность в 5–10 раз меньше, чем плотность светло-серых пор.

2. Поры светло-серого цвета представляют собой неразвившиеся каналы небольшой глубины, а темно-серые поры на поверхности являются входными отверстиями длинных бутылкообразных пор, проходящих от поверхности вглубь монокристалла кремния. Установлено, что эквивалентные диаметры светло-серых пор на поверхности пористого кремния составляют 12–15 нм и практически не зависят от плотности анодного тока. Диаметры темно-серых пор и расстояния между их центрами определяются плотностью анодного тока и увеличиваются по линейному закону от 15 до 35 нм для поверхностных областей пористого кремния и от 35 до 120 нм для внутренних областей пористого кремния при увеличении плотности анодного тока от 30 до 90 мА/см<sup>2</sup>. Толщина элементов скелета пористого кремния при плотностях анодного тока 30–50 мА/см<sup>2</sup> составляет 1,5–2,0 нм и увеличивается до 5,0 нм при плотности тока анодирования 90 мА/см<sup>2</sup>. Во всем диапазоне использованных плотностей тока толщина элементов скелета во внутренних областях пористого кремния на 0,5–1,0 нм больше, чем у элементов скелета на поверхности пористого кремния. При плотности тока 90 мА/см<sup>2</sup> толщины элементов скелета во внутренних областях пористого кремния и на поверхности практически одинаковы и составляют 5 нм.

3. Полученные данные о структурных параметрах слоев пористого кремния и их зависимости от режимов анодирования имеют важное значение для формирования композитных материалов на основе пористого кремния при использовании последнего в качестве пористой матрицы для заполнения металлами и другими полупроводниками.

## Список литературы / References

1. Uhlir A. (1956) Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon. *Bell Syst. Tech. J.* 35, 333–338. <http://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1956.tb02385.x>.

- Labunov V. A., Bondarenko V. P., Borisenko V. E. (1978) Porous Silicon in Semiconductor Electronics. *Foreign Electronics Technology*. (15) (in Russian).
- Konaka S., Tabe M., Sakai T. (1982) A New Silicon on Insulator Structure Using a Silicon Molecular Beam Epitaxial Growth on Porous Silicon. *Appl. Phys. Lett.* 41, 86–88. <https://doi.org/10.1063/1.93298>.
- Labunov V. A., Bondarenko V. P., Glinenko L. K., Basmanov I. N. (1983) Process of Formation of Porous Silicon and Autoepitaxy on Its Surface. *Sov. J. Microelectron.* 12, 11–15.
- Yonehara T., Sakaguchi K. (2001) ELTRAN: Novel SOI Wafer Technology. *JSAP Int.* 4, 10–16.
- Lamedica G., Balucani M., Bondarenko V., Franchina L., Dolgyi L., Yakovtseva V., et al. (2000) Investigation of Morphology of Porous Silicon Formed on  $n^+$ -Type Silicon. *J. Porous Mat.* 7, 23–26. <https://doi.org/10.1023/A:1009627412800>.
- Chubenko E., Redko S., Dolgyi A., Bandarenka H., Bondarenko V. (2016) Porous Silicon as Substrate for Epitaxial Films Growth. *Porous Silicon: Opto- and Micro-Electronic Applications*. CRC Press, Taylor and Francis Group, USA. 141–162.
- Canham L. T. (1990) Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers. *Appl. Phys. Lett.* 57, 1046–1048. <http://dx.doi.org/10.1063/1.103561>.
- Martin-Palma K. J., Costa V. T. (2018) Microscopy of Porous Silicon. *Springer International Publishing AG, Part of Springer Nature*. 572–583. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71381-6\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71381-6_41).
- Chubenko E., Redko S., Dolgyi A., Bandarenka H., Prischepa S., Bondarenko V. (2016) Porous Silicon as Host and Template Material for Composites and Hybrid Materials. *Porous Silicon: Opto- and Microelectronic Applications*. CRC Press, Taylor and Francis Group, USA. 181–205.
- Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S. (2021) Electrochemical Deposition of Indium onto Oxidized and Unoxidized Porous Silicon. *Thin Solid Films*. 734 (138860). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138860>.
- Gavrilin I. M., Grevtsov N. L., Pavlikov A. V., Dronov A. A., Chubenko E. B., Bondarenko V. P., et al. (2022) A New Approach for Producing of Film Structures Based on SiGe. *Mater. Lett.* 313 (131802). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131802>.
- Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S., et al. (2024) Composition-Adjustable Silicon-Germanium Alloy Films Based on Porous Silicon Matrices. *Materials. Today Communications*. 38 (107886). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107886>.
- Haeri Morteza, Haeri Mohammad (2015) ImageJ Plugin for Analysis of Porous Scaffolds Used in Tissue Engineering. *Software Metapapers*. 3 (1). <https://doi.org/10.5334/jors.bn>.

#### Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

#### Сведения об авторах

**Лопато У. П.**, магистрант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Лапутько Д. Д.**, магистрант, БГУИР

**Гревцов Н. Л.**, науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Материалы и структуры нанoeлектроники» (НИЛ 4.3), БГУИР

**Бондаренко В. П.**, зав. НИЛ 4.3, БГУИР

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-54  
E-mail: ulya.lopato@mail.ru  
Лопато Ульяна Павловна

#### Information about the authors

**Lopato U. P.**, Master's Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Laputko D. D.**, Master's Student, BSUIR

**Grevtsov N. L.**, Researcher at the Scientific Research Laboratory "Materials and Structures of Nanoelectronics" (Lab. 4.3), BSUIR

**Bondarenko V. P.**, Head of the Lab. 4.3, BSUIR

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-54  
E-mail: ulya.lopato@mail.ru  
Lopato Ulyana Pavlovna