

06

## Формирование наноструктур SmS в матрице анодированного оксида алюминия

© Е.Б. Баскаков, С.И. Супельняк, Д.Н. Хмеленин

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия  
e-mail: baskakov.ras@gmail.com

Поступило в Редакцию 30 мая 2024 г.

В окончательной редакции 22 июля 2024 г.

Принято к публикации 6 августа 2024 г.

Матрицы из анодированного оксида алюминия с диаметром пор 40–140 нм и 60–210 нм изготовлены анодированием алюминия двухэтапным методом. Представлено распределение оксидных ячеек и пор матриц по диаметру. Установлено, что увеличение времени травления привело к росту статистического максимума среднего диаметра пор от 108 до 155 нм. Установлено, что увеличение диаметра пор в процессе травления сопровождается сохранением размеров оксидных ячеек и снижением средней толщины стенок ячеек. Методом магнетронного распыления получены наноструктуры SmS, образовавшиеся в порах матриц и уходящие на среднюю глубину 120 нм. Предположено образование проводящего канала в виде тонкого слоя SmS, соединяющего наноструктуры SmS и барьерный слой анодированного оксида алюминия. Измерено сопротивление наноструктур SmS в матрице анодированного оксида алюминия с Ni-металлизацией, которое составило 23 и 22  $\Omega$ .

**Ключевые слова:** анодированный оксид алюминия, сульфид самария, магнетронное напыление, наноструктуры.

DOI: 10.61011/JTF.2024.10.58861.196-24

### Введение

Электрохимическое анодирование чистого алюминия позволяет выращивать высокоупорядоченные пористые структуры анодированного оксида алюминия (АОА). К настоящему времени разными исследователями были подробно рассмотрены механизмы роста, влияние параметров процесса роста на морфологию АОА [1–3], их механические свойства [4] и структура [5,6]. Значительное количество работ по АОА посвящено контролируемому созданию упорядоченных пор, основанному на двух принципах: предварительном структурировании исходной подложки [7,8], приводящем к высокому упорядочиванию пор, и на широко используемой методике двухэтапного анодирования [9,10], которая также активно развивается в направлении дополнительной стимуляции механизмов самоорганизации [11–13]. Интерес к управлению конфигурацией пор АОА объясняется возможностью их использования в качестве матрицы для создания упорядоченных структур, таких, как наноточки, нанопроволоки, нанотрубки и мембраны [14–16], проявляющих особые свойства в сравнении с объемными или тонкопленочными материалами [17–19]. В частности, одномерные и двумерные наноструктуры демонстрируют зависимость теплопроводности, электропроводности и термоэлектрической добротности от характеристических размеров [20–23]. Использование матриц на основе пористого АОА обладает преимуществом, которое заключается в простоте создания упорядоченных пористых структур по сравнению с другими матрица-

ми, изготовленными путем литографии, молекулярно-лучевой эпитаксии, газо-фазового осаждения и трекового травления полимерных мембран [3]. Таким образом, работа над созданием структур с использованием матрицы АОА открывает путь как к качественному изменению свойств используемых материалов, так и к созданию новых устройств.

В настоящей работе рассмотрены особенности процесса осаждения сульфида самария (SmS) в поры АОА с целью получения наноструктур. SmS известен своим изоструктурным фазовым переходом полупроводник–металл [24], возникновением термоЭДС без принудительного создания градиента температуры (термовольтаическим эффектом) [25] и другими свойствами с перспективами практического применения [26]. Ранее проводимые работы по наноструктурированию объема SmS показали, что высокотемпературный отжиг приводит к увеличению размеров кристаллитов, снижению числа дефектных ионов Sm на границах зерен и энергии активации проводимости [27]. Наибольший результат по снижению межкристаллитных потенциальных барьеров наблюдается при 2300°С, что делает описанный метод достаточно энергозатратным.

Известно, что для тонких пленок, толщина которых сравнима с размером зерен, межзеренные потенциальные барьеры оказывают более существенное влияние на проводимость вдоль пленки, чем поперек нее [28]. Предполагается, что наноструктурирование SmS с применением матрицы АОА позволит создавать столбчатые структуры, прохождение носителей заряда вдоль

которых не будет сопровождаться значительным снижением подвижности и рассеянием на потенциальных межзеренных барьерах. Упорядоченные наноструктуры на основе SmS могут найти свое применение в создании термоэлектрогенераторов, датчиков кислорода и тензодатчиков.

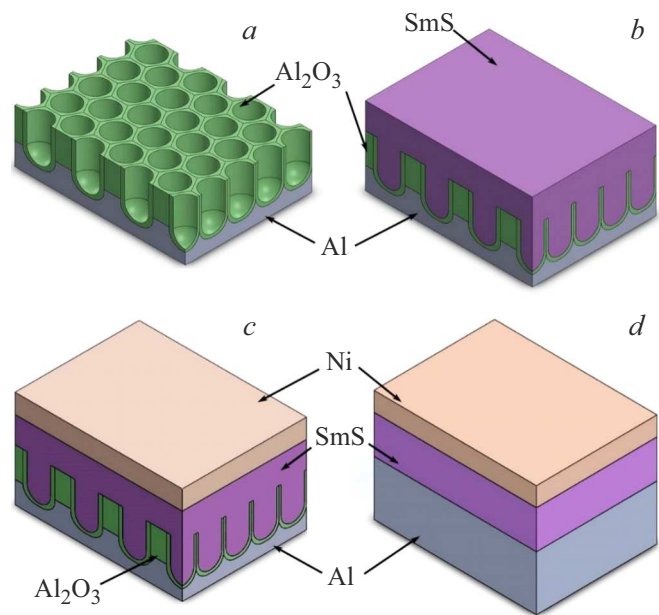
## 1. Материалы и методы

Матрицу из АОА изготавливали методом двухэтапного анодирования, основываясь на результатах известных исследований [29,30]. Исходные подложки представляли собой четыре диска толщиной  $80\ \mu\text{m}$  и диаметром  $19\ \text{mm}$ , вырезанных из технической алюминиевой фольги (содержание  $\text{Al} > 99.5\%$ , основные примеси —  $\text{Fe}$  и  $\text{Si} < 0.5\%$ ), которые отжигали в течение  $2\ \text{h}$  на воздухе при  $500^\circ\text{C}$  в муфельной печи СНОЛ 6/12-В. Отжиг проводили с целью рекристаллизации и гомогенизации состава зерен. Поверхность дисков очищали в изопропиловом спирте и промывали в дистиллированной воде. Два диска оставались в качестве контрольных образцов, а два других (образцы 1-й и 2-й серии) подвергали анодированию.

Первое анодирование для образцов 1-й и 2-й серии проводили с использованием  $0.5\ \text{N}$  раствора  $(\text{COOH})_2$  при  $85\ \text{V}$  в течение  $30\ \text{min}$  при температуре  $7\text{--}13^\circ\text{C}$ . Травление оксида алюминия осуществляли в водном растворе, содержащем  $1.8\ \text{g CrO}_3$  и  $7.1\ \text{g 85\% H}_3\text{PO}_4$  на  $100\ \text{ml}$  при  $85^\circ\text{C}$  в течение  $\sim 10\ \text{min}$ . Второе анодирование для образцов 1 и 2 серии проводили аналогично первому в течение  $25\ \text{min}$ . Образовавшийся второй слой оксида алюминия травлили в условиях, аналогичных первому травлению, в течение  $30\ \text{s}$  для образцов 1-й серии и  $90\ \text{s}$  для образцов 2-й серии. Полученные подложки промывали в дистиллированной воде.

Заполнение пор АОА (рис. 1, *a*) производили методом магнетронного напыления, который используется для получения тонких пленок SmS [31,32] и применяется при создании структур на основе матрицы АОА [33–35]. Напыление SmS и Ni для образцов 1-й и 2-й серии (рис. 1, *b, c*) и для контрольных образцов (рис. 1, *d*) производили последовательно на установке вакуумного напыления ВУП-5 при давлении  $5 \cdot 10^{-3}\ \text{Pa}$  в среде аргона. Напыление SmS осуществляли в течение  $10\ \text{min}$  при мощности  $88\ \text{W}$  и  $30\ \text{min}$  при  $72\ \text{W}$  для 1 и 2 серии с контрольными образцами соответственно. Напыление металлизации Ni для всех образцов производили при мощности  $114\ \text{W}$  в течение  $7\ \text{min}$ . Температура подложек во всех процессах составляла  $250^\circ\text{C}$ . Каждое напыление производили через трафареты таким образом, чтобы слой SmS осаждался на поверхность матрицы АОА, а Ni — на поверхность пленки SmS без попадания на торцы матрицы АОА.

Изображения поверхности пористого слоя АОА, склонов и срезов изготовленных структур были получены методом растровой электронной микроскопии



**Рис. 1.** Модельное представление создания исследуемых образцов 1-й и 2-й серии (*a–c*) и контрольного образца (*d*), где *a* — создание анодированного слоя на подложке Al; *b* — магнетронное напыление SmS в поры анодированного слоя; *c* — магнетронное напыление Ni-металлизации; *d* — магнетронное напыление SmS и Ni на подложку Al.

(РЭМ) с использованием автоэмиссионного растрового электронно-ионного микроскопа Scios FEI.

Рентгеновский микроанализ с картой распределения элементов срезов структур проводили методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с помощью приставки EDAX Octane Elect Super на микроскопе Scios FEI. Поперечные срезы структур для проведения микроанализа были получены с помощью пучка аргона на установке ионного травления Hitachi IM4000 Plus.

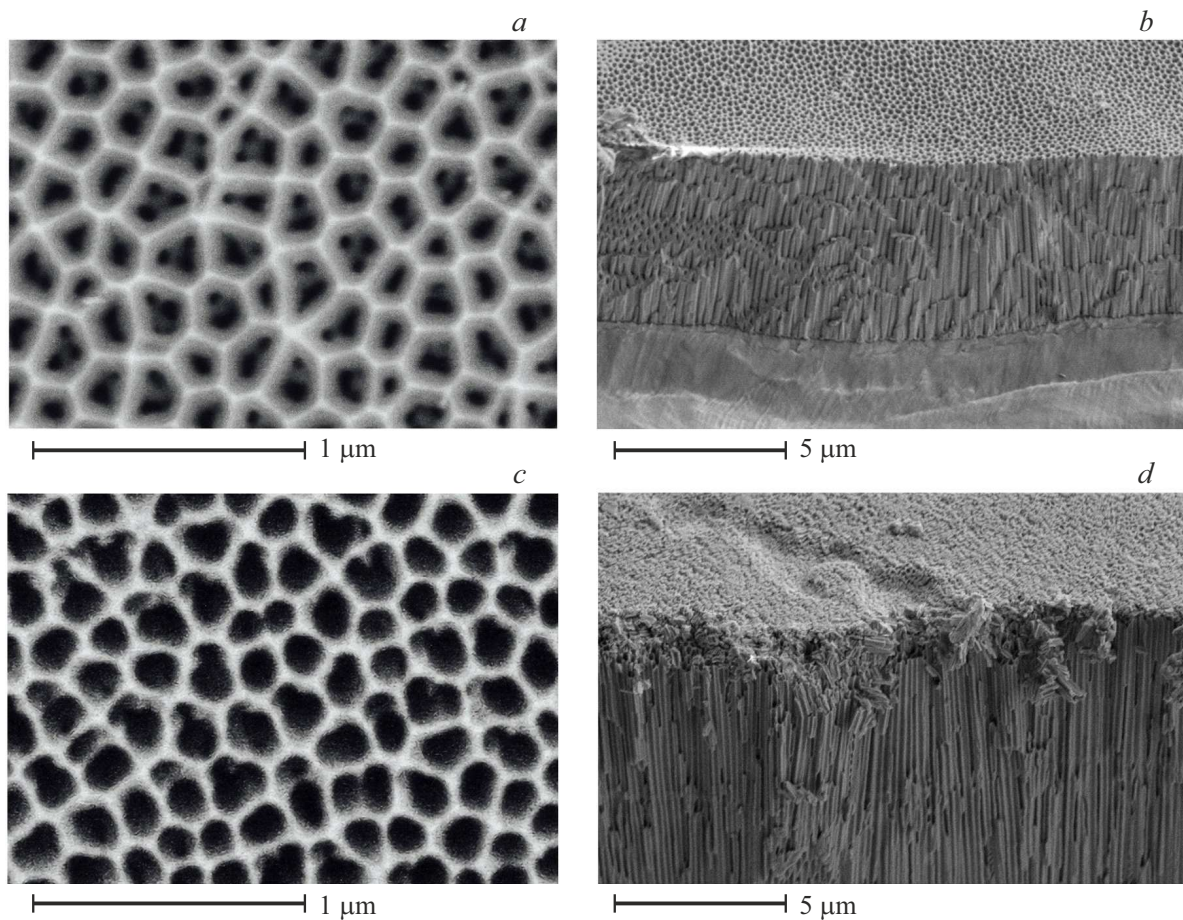
Цифровую обработку РЭМ изображений пор АОА с целью проведения количественного анализа [11,36,37] осуществляли через облачный сервис DLgram, основанный на технологиях глубокого обучения [38].

Измерение электрического сопротивления проводили на лабораторной установке, состоящей из мультиметра Tektronix DMM4040 и изоляционного предметного столика. Погрешность измерений не превышала  $1\%$ .

## 2. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены характерные РЭМ изображения нанопористого АОА, свидетельствующие о получении цилиндрических пор с диаметром  $40\text{--}140\ \text{nm}$  для 1-й серии и  $60\text{--}210\ \text{nm}$  для 2-й серии, расположенных перпендикулярно к поверхности алюминиевой подложки.

Наблюдаемые отличия в толщине пористого АОА для образцов 1-й и 2-й серии (рис. 2, *b, d*) объясняются нерав-



**Рис. 2.** РЭМ изображения пористого слоя анодированного  $\text{Al}_2\text{O}_3$  серия 1: *a* — вид сверху; *b* — скол подложки; серия 2: *c* — вид сверху; *d* — скол подложки.

номерной скоростью роста оксида по поверхности Al в процессе электрохимической реакции.

Для количественного и статистического анализа морфологии поверхности полученных образцов АОА был применен сервис распознавания однотипных объектов DLgram, с помощью которого вычисляли площадь выделенных объектов. На рис. 3 показан пример распознавания объектов матрицы АОА образца 1-й серии.

Для определения размеров пор и ячеек, учитывая их неправильную форму, рассчитывали проекционный диаметр—диаметр окружности с площадью, равной по площади проекции поры или ячейки [39]:

$$D_{pr} = (4 \cdot S_{pr}/\pi)^{1/2}.$$

Средние значения площади  $S_{pr}$  и проекционного диаметра  $D_{pr}$  оценивали как среднее арифметическое площадей и диаметров оксидных ячеек и пор в исследуемой области.

Результаты определения количества и размера оксидных пор и ячеек представлены на рис. 4. Для серии 2 доминирующий размер пор, сформированных в слое АОА, в 1.4 раза превышает диаметр пор серии 1. Установлено,

что увеличение времени травления привело к росту статистического максимума среднего диаметра пор от 108 до 155 nm для 1-й и 2-й серий соответственно, при этом само травление также является причиной статистического разброса диаметра пор и способствовало образованию крупной поры на месте 2–3 более мелких, что особенно хорошо наблюдается на изображениях РЭМ для 1-й серии (рис. 2, *a*). Отметим, что этап травления АОА в  $\text{CrO}_3$  и  $\text{H}_3\text{PO}_4$  сопровождается только увеличением диаметра пор. Статистический максимум среднего диаметра оксидных ячеек образцов оказался практически одинаковым (235 и 230 nm), а концентрация ячеек и пор идентична для обеих серий и составила  $26 \mu\text{m}^{-2}$ , что может свидетельствовать о стабильности применяемого метода получения АОА. Увеличение диаметра пор в процессе травления сопровождается сохранением размеров оксидных ячеек и снижением средней толщины стенок ячеек приблизительно от 60 до 30 nm для 1-й и 2-й серий соответственно.

Известно, что размеры пор и степень упорядоченности ячеек гексагонального типа в слое пористого АОА зависят от упорядоченной структуры поверхности алюминия, полученной в процессе первого ано-



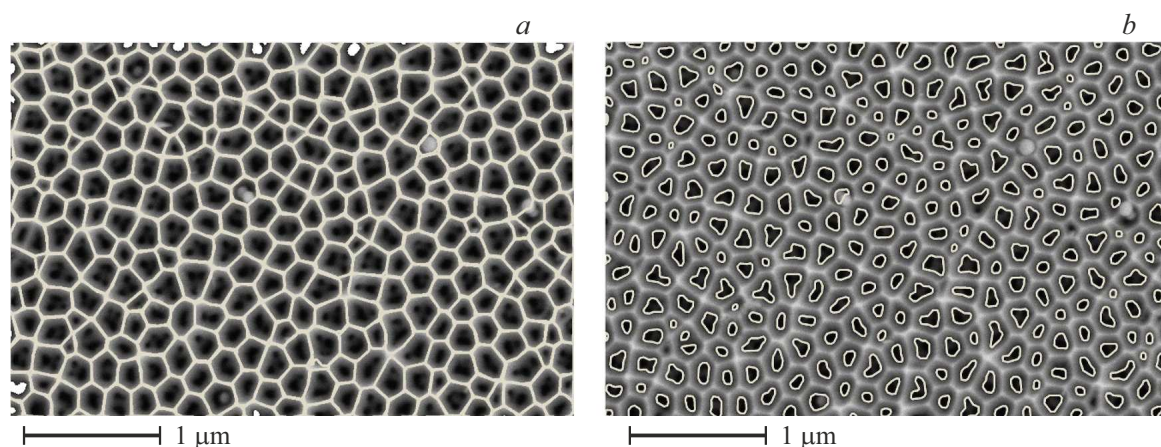


Рис. 3. РЭМ изображения с выделенными объектами для АОА 1-й серии: *a* — выделение оксидных ячеек; *b* — выделение пор.

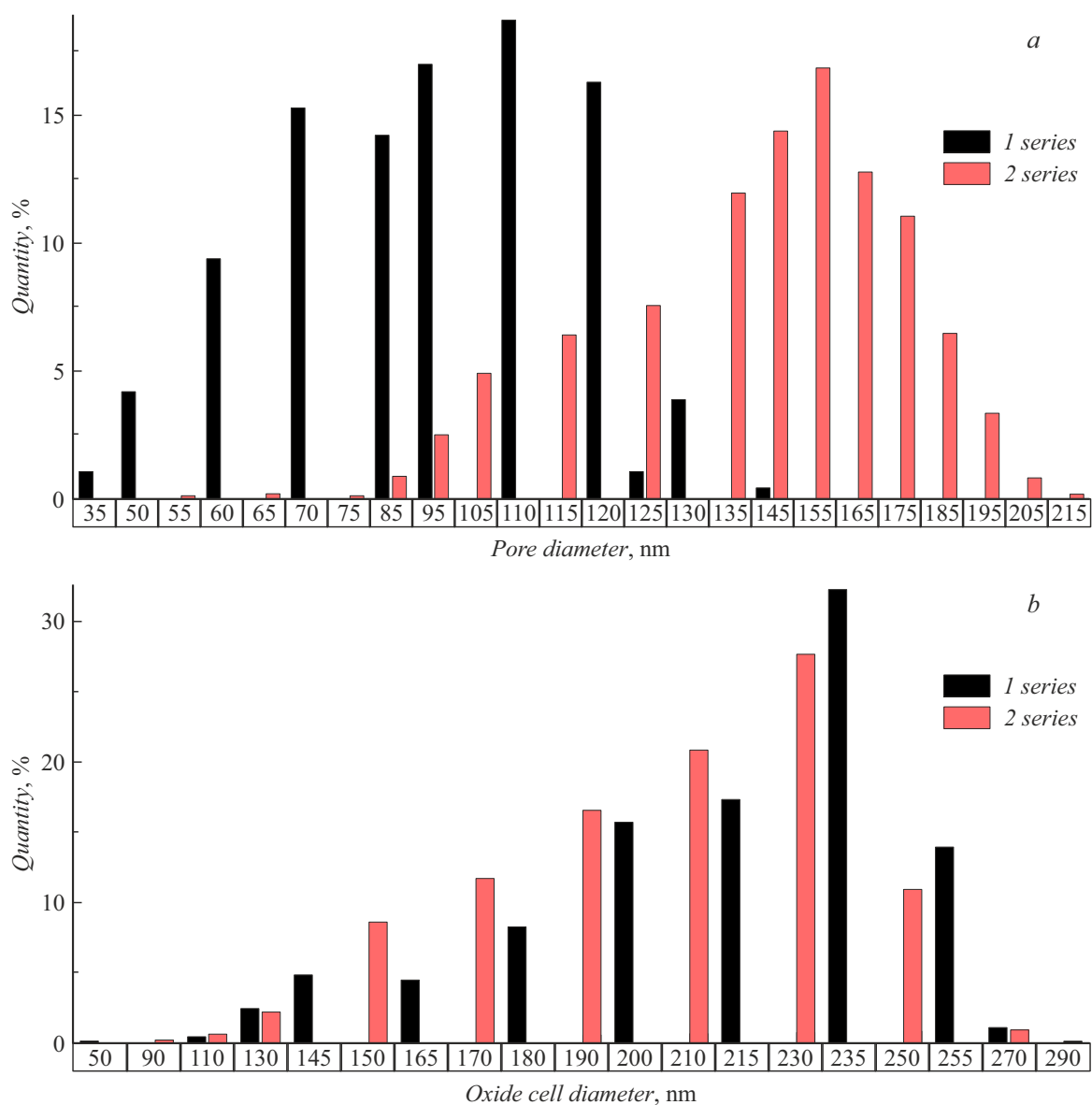
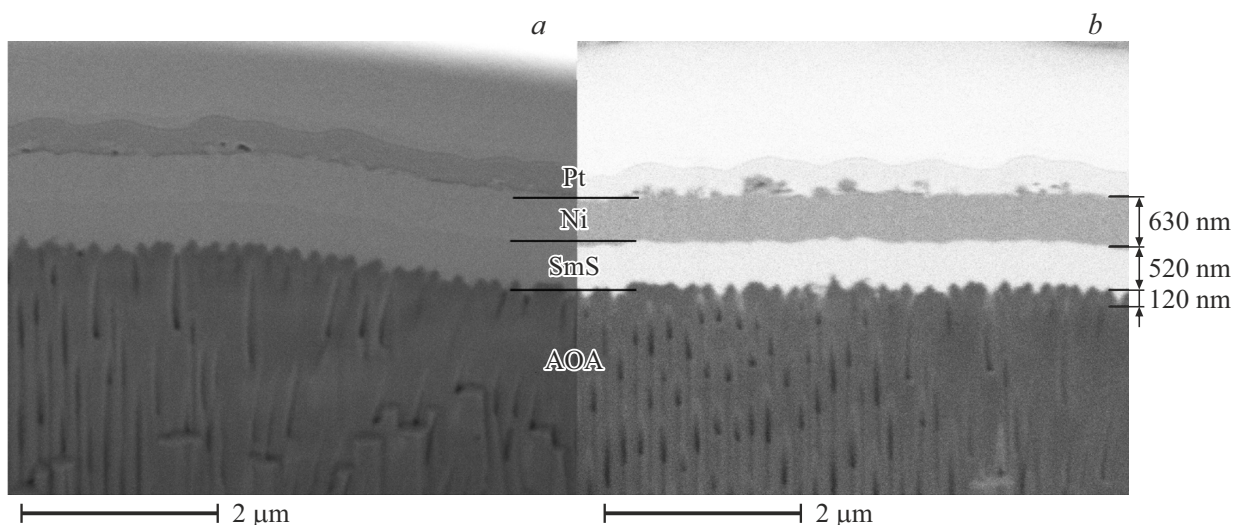


Рис. 4. Диаграммы распределения пор (*a*) и ячеек (*b*) АОА по размеру.



**Рис. 5.** РЭМ изображения среза структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SmS--Ni}$  образца 1-й серии, сделанных в режимах регистрации: *a* — вторичных электронов; *b* — обратнорассеянных электронов.

дирования [40]. Показано, что структура зависит от концентрации ионов в электролите, электрофизических характеристик подложки и температуры системы подложка–электролит [41,42]. Асимметричный характер распределения размеров ячеек (рис. 4, *b*) и стохастическое расположение пор (рис. 2) определяется характером массопереноса в растворе при анодировании алюминия и кинетикой диффузии реагентов в каналах оксидной пленки. Параметром, определяющим характер массопереноса, являлось напряжение анодирования в электролитической ячейке [42].

На рис. 5 показан срез структуры, характерной для образцов обеих серий с осажденными слоями SmS и Ni. Слой Pt использовался в качестве защитной маски для получения среза.

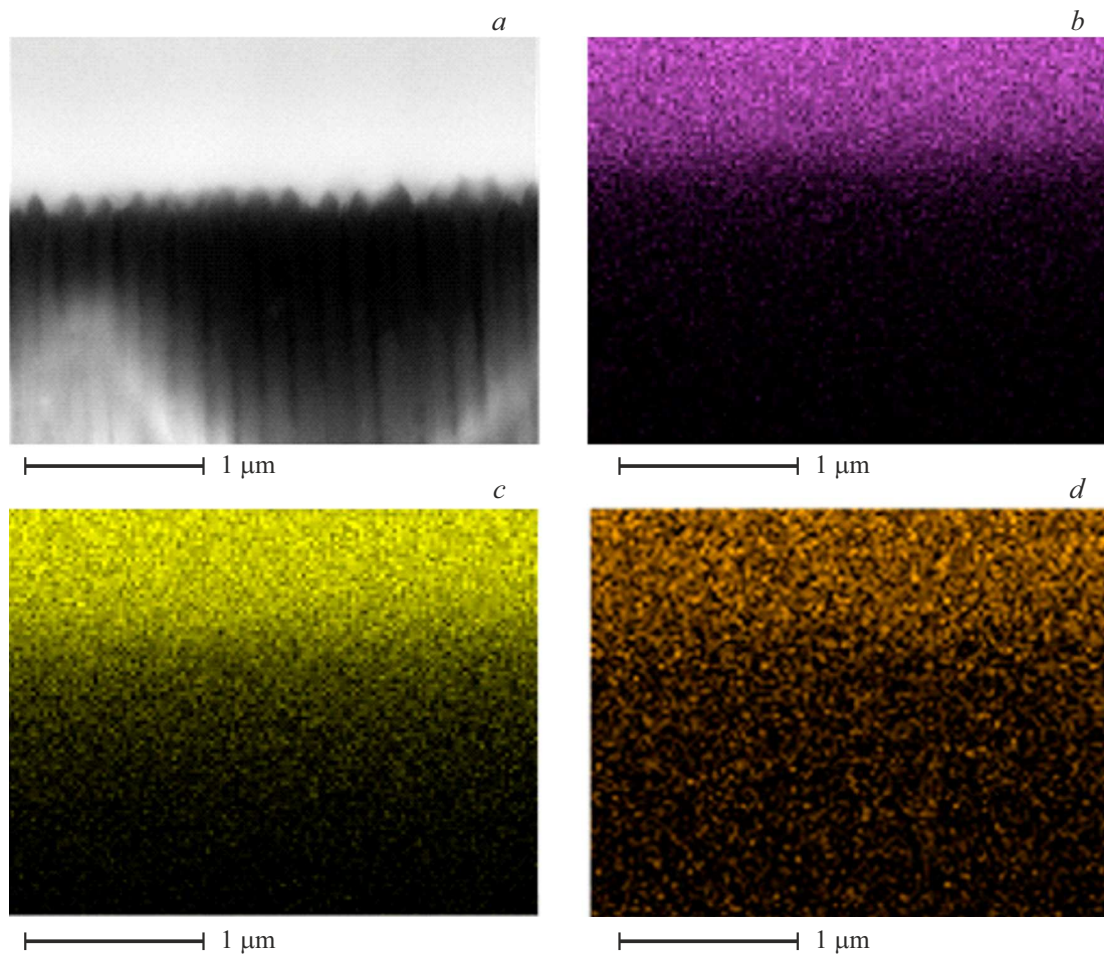
Средний размер оксидных ячеек, полученных из рис. 5, хорошо согласуется с данными, полученными при количественном анализе, и составил 210 нм. Изображение среза 1-й серии (рис. 5, *b*) свидетельствует о протравлении и заполнении сульфидом самария пор на среднюю глубину 120 нм с разбросом значений от 60 до 180 нм, и плавном переходе среднего диаметра от 90 до 70 нм.

Составленные по срезу АОА (рис. 6, *a*) карты распределения S (рис. 6, *b*) и Sm (рис. 6, *c*) для серии 2 не полностью соответствуют профилю структуры АОА, что может объясняться неоднородной конденсацией на поверхности среза удаляемых при проведении ионного травления материалов; это также подтверждается картой распределения Ni, который попал на срез АОА (рис. 6, *d*). В исследуемой части образца соотношение содержания at.% Sm к S составило 1:0.74, что указывает на недостаток S в составе пленки и является особенностью магнетронного распыления [43].

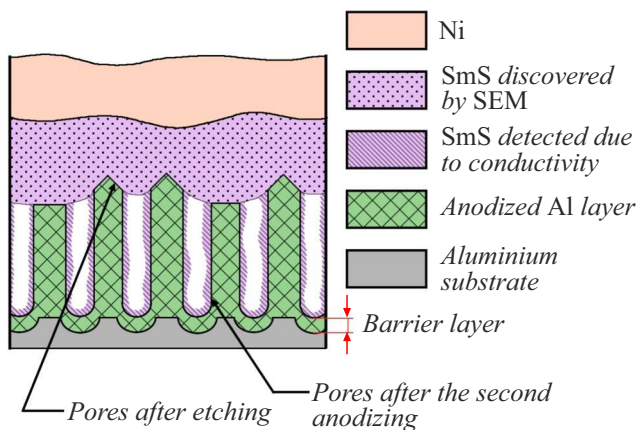
Таким образом, по данным, полученным с помощью электронной микроскопии, не удалось оценить заполнение сульфидом самария той части поры, которая не подверглась травлению (рис. 5), однако после напыления обсуждаемой структуры наблюдалась электрическая проводимость между подложкой и верхним контактом Ni, а сопротивление для серий 1 и 2 составило 23 и 22  $\Omega$  соответственно. При этом значения сопротивления контрольных образцов составило 1  $\Omega$  при времени напыления SmS 10 мин и 9  $\Omega$  при времени напыления 30 мин. Известно, что АОА является диэлектриком с удельным сопротивлением  $4 \cdot 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$  [44], при этом для матрицы АОА характерно наличие барьерного слоя толщиной в несколько десятков нм [3] (рис. 7). Поскольку барьерный слой достаточно тонкий по сравнению с толщиной полученной матрицы АОА, сравнение значений электрического сопротивления образцов серий 1 и 2 с контрольными дает основания полагать, что на поверхности стенок пор по всей глубине все же образовался слой SmS.

## Заключение

Сформированы наноструктуры сульфида самария с помощью нанопористых шаблонов из АОА, проведен анализ формы и размеров ячеек и пор оксидного слоя, а также слоя SmS. Подтверждено, что анодирование с использованием 0.5 N раствора  $(\text{COOH})_2$  при 85 V приводит к асимметричному характеру распределения размеров ячеек и стохастическому расположению пор. Обнаружено, что рост статистического максимума среднего диаметра пор происходит из-за увеличения времени травления. Показано, что средняя глубина заполнения пор сульфидом самария составила 120 нм при плавном изменении среднего диаметра от 90 до 70 нм. Установле-



**Рис. 6.** Изображения участка среза структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SmS-Ni}$  образца 2-й серии: *a* — РЭМ изображение, и карты распределения элементов для него: *b* — S; *c* — Sm; *d* — Ni.



**Рис. 7.** Модельное представление заполнения SmS структуры АОА.

но, что после напыления обсуждаемой структуры наблюдалась электрическая проводимость, что дает основания предположить, что на поверхности стенок пор по всей глубине образовался тонкий слой SmS.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику лаборатории электронной микроскопии В.В. Артемову за получение РЭМ изображений АОА и ведущему инженеру лаборатории роста кристаллов А.В. Безрукову за проведение магнетронного напыления тонких пленок SmS и Ni.

### Финансирование работы

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“. В части электронной микроскопии работа выполнена с использованием оборудования ЦКП „Структурная диагностика материалов“ КК „Кристаллография и фотоника“ НИЦ „Курчатовский институт“.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.



## Список литературы

- [1] J.W. Diggle, T.C. Downie, C.W. Goulding. *Chem. Rev.*, **69**, 385 (1969).
- [2] G.E. Thompson, G.C. Wood. *Treatise on Mater. Sci. Technol.*, **23**, 250 (1983). DOI: 10.1016/B978-0-12-633670-2.50010-3
- [3] G.D. Sulka. *Highly Ordered Anodic Porous Alumina Formation by Self-Organized Anodizing*. In A.Eftekhari (ed.). *Nanostructured Materials in Electrochemistry*, Ch.1 (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2008), DOI: 10.1002/9783527621507.ch1
- [4] C.E. Alvey. *The Mechanical Properties of Porous Anodic Oxide Films on Aluminium* (The University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, 1974)
- [5] F. Keller, M.S. Hunter, D.L. Robinson. *J. Electrochem. Society*, **100** (9), 411 (1953). DOI: 10.1149/1.2781142
- [6] J.P. O'sullivan, G.C. Wood. *Proceed. Royal Society of London. A. Mathem. Phys. Sci.*, **317** (1531), 511 (1970). DOI: 10.1098/rspa.1970.0129
- [7] H. Masuda, H. Yamada, M. Satoh, H. Asoh, M. Nakao, T. Tamamura. *Appl. Phys. Lett.*, **71** (19), 2770 (1997). DOI: 10.1063/1.120128
- [8] S. Shingubara, Y. Murakami, K. Morimoto, T. Takahagi. *Surf. Sci.*, **532**, 317 (2003). DOI: 10.1016/S0039-6028(03)00433-3
- [9] H.M.H. Masuda, M.S.M. Satoh. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1B), L126 (1996). DOI: 10.1143/JJAP.35.L126
- [10] X.Y. Han, W.Z. Shen. *J. Electroanalytical Chem.*, **655** (1), 56 (2011). DOI: 10.1016/j.jelechem.2011.02.008
- [11] C. Cheng, A.H.W. Ngan. *Nanotechnology*, **24** (21), 215602 (2013). DOI: 10.1088/0957-4484/24/21/215602
- [12] А.И. Воробьева, Е.А. Уткина. *Микроэлектроника*, **34** (3), 181 (2005). [A.I. Vorobyova, E.A. Outkina. *Russ. Microelectron.*, **34** (3), 147 (2005). DOI: 10.1007/s11180-005-0023-6]
- [13] S. Ono, M. Saito, H. Asoh. *Electrochim. Acta*, **51** (5), 827 (2005). DOI: 10.1016/j.electacta.2005.05.058
- [14] J. Liang, H. Chik, J. Xu. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, **8** (5), 998 (2002). DOI: 10.1109/JSTQE.2002.804238
- [15] В.М. Федосюк. *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*, **66** (1), 37 (2021). DOI: 10.29235/1561-8358-2021-66-1-37-46
- [16] H. Masuda, K. Fukuda. *Science*, **268** (5216), 1466 (1995). DOI: 10.1126/science.268.5216.1466
- [17] K.X. Wang, Z. Yu, V. Liu, M.L. Brongersma, T.F. Jaramillo, S. Fan. *Acs Photonics*, **1** (3), 235 (2014). DOI: 10.1021/ph4001026
- [18] S. McNamee, D. Wagner, E.M. Fiordaliso, D. Novog, R.R. LaPierre. *Nanotechnology*, **30** (7), 075401 (2018). DOI: 10.1088/1361-6528/aaf30a
- [19] K. Koshelev, S. Kruk, E. Melik-Gaykazyan, J.H. Choi, A. Bogdanov, H.G. Park, Y. Kivshar. *Science*, **367** (6475), 288 (2020). DOI: 10.1126/science.aaz3985
- [20] L.D. Hicks, T.C. Harman, X. Sun, M.S. Dresselhaus. *Phys. Rev. B*, **53** (16), R10493 (1996). DOI: 10.1103/PhysRevB.53.R10493
- [21] D. Li, Y. Wu, P. Kim, L. Shi, P. Yang, A. Majumdar. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (14), 2934 (2003). DOI: 10.1063/1.1616981
- [22] A. Stranz, Ü. Sökmen, J. Kähler, A. Waag, E. Peiner. *Sensors and Actuators A: Phys.*, **171** (1), 48 (2011). DOI: 10.1016/j.sna.2011.01.022
- [23] X. Zou, X. Chen, H. Huang, Y. Xu, W. Duan. *Nanoscale*, **7** (19), 8776 (2015). DOI: 10.1039/c5nr01892g
- [24] И.А. Смирнов, В.С. Оскотский. *УФН*, **124** (2), 241 (1978). DOI: 10.3367/UFNr.0124.197802b.0241 [I.A. Smirnov, V.S. Oskotskii. *Sov. Phys. Usp.*, **21**, 117 (1978). DOI: 10.1070/PU1978v021n02ABEH005517]
- [25] М.М. Казанин, В.В. Каминский, С.М. Соловьев. *ЖТФ*, **70** (5), 136 (2000). [M.M. Kazanin, V.V. Kaminskii, S.M. Solov'ev. *Tech. Phys.*, **45** (5), 659 (2000). DOI: 10.1134/1.1259698]
- [26] A. Sousanis, P.F. Smet, D. Poelman. *Materials*, **10** (8), 953 (2017). DOI: 10.3390/ma10080953
- [27] В.В. Каминский, С.А. Казаков, М.В. Романова, Н.В. Шаренкова, М.А. Гревцев. *ФТТ*, **57** (2), 264 (2015). [V.V. Kaminskii, S.A. Kazakov, M.V. Romanova, N.V. Sharenkova, M.A. Grevtsev. *Phys. Solid State*, **57** (2), 277 (2015). DOI: 10.1134/S106378341502016X]
- [28] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы: Теория и эксперимент* (Энергоатомиздат, М., 1987)
- [29] А.Ю. Степанова, И.В. Запорожкова, А.Н. Белов. *Вестник ВолГУ*, **10** (5), 114 (2011).
- [30] Д.О. Ильин. *Синтез и люминесцентные свойства нанопористых структур анодированного оксида алюминия* (Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, 2015)
- [31] В.И. Стрелов, Е.Б. Баскаков, Ю.Н. Бендрышев, В.М. Каневский. *Кристаллография*, **64** (2), 281 (2019). DOI: 10.1134/S0023476119020292 [V.I. Strelov, E.B. Baskakov, U.N. Bendryshev, V.M. Kanevskii. *Crystallography Reports*, **64** (2), 311 (2019). DOI: 10.1134/S1063774519020299]
- [32] В.Г. Бамбуров, О.В. Андреев, В.В. Иванов, А.Н. Воропай, А.В. Горшков, А.А. Полковников, А.Н. Бобылев. *ДАН*, **473** (6), 676 (2017).
- [33] Z. Fang, Y. Wang, X. Peng, X. Liu, C. Zhen. *Mater. Lett.*, **57** (26–27), 4187 (2003). DOI: 10.1016/S0167-577X(03)00287-8
- [34] N. Nuntawong, M. Horprathum, P. Eiamchai, K. Wong-Ek, V. Patthanasettakul, P. Chindaudom. *Vacuum*, **84** (12), 1415 (2010). DOI: 10.1016/j.vacuum.2009.12.020
- [35] W. Cheng, Y. Zhou, X. Guan, Y. Hui, S. Wang, X. Miao. *Mater. Manufacturing Processes*, **31** (2), 173 (2016). DOI: 10.1080/10426914.2015.1019130
- [36] Х.Т. Динь, Н.В. Лушпа, К.В. Чернякова, И.А. Врублевский. *Докл. БГУИР*, **4** (122), 79 (2019).
- [37] В.А. Мошников, Е.Н. Соколова, Ю.М. Спивак. *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*, **2**, 13 (2011).
- [38] A.V. Matveev, A.V. Nartova, N.N. Sankova, A.G. Okunev. *Microscopy Research and Technique*, **87** (5), 991 (2024). DOI: 10.1002/jemt.24480
- [39] А.В. Матвеев, М.Ю. Машуков, А.В. Нартова, А.Г. Окунев. *Тез. докл. Восемнадцатой Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2020* (М., Россия, 2020), с. 230.
- [40] H. Masuda, K. Fukuda. *Science*, **268** (5216), 1466 (1995). DOI: 10.1126/science.268.5216.1466
- [41] А.И. Воробьева, Е.А. Уткина, А.А. Ходин. *Микроэлектроника*, **36** (6), 437 (2007). [A.I. Vorobyova, E.A. Outkina, A.A. Khodin. *Russ. Microelectron.*, **36** (6), 384 (2007). DOI: 10.1134/S1063739707060054]

- [42] Е.О. Гордеева, И.В. Росляков, А.И. Садыков, Т.А. Сучкова, Д.И. Петухов, Т.Б. Шаталова, К.С. Напольский. *Электрохимия*, **54** (11), 999 (2018). DOI: 10.1134/S0424857018130194 [E.O. Gordeeva, I.V. Roslyakov, D.I. Petukhov, T.B. Shatalova, K.S. Napolskii, A.I. Sadykov, T.A. Suchkova. *Russ. J. Electrochem.*, **54** (11), 990 (2018). DOI: 10.1134/S1023193518130165]
- [43] Е.Б. Баскаков, В.И. Стрелов. *Кристаллография*, **66** (6), 925 (2021). DOI: 10.31857/S0023476121060059 [E.B. Baskakov, V.I. Strelov. *Crystallography Reports*, **66** (6), 1078 (2021). DOI: 10.1134/S1063774521060055]
- [44] Н.Д. Томашов, М.Н. Тюкина, Ф.П. Заливалов. *Толсто-слойное анодирование алюминия* (Машиностроение, М., 1966)