

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-10-60-67

УДК 546.3-126:544.2

Исследование морфологии и состава поверхности наноструктурированной плёнки олова на пористом кремнии

КСЕНИЯ БОРИСОВНА КИМ¹✉, АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ ЛЕНЬШИН²,
СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ЧЕРНЕНКО³, САБУХИ ИЛИЧ ОГЛЫ НИФТАЛИЕВ⁴,
АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ ЧУКАВИН⁵

^{1, 2, 3, 4}Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

⁵Удмуртский федеральный исследовательский центр УРО РАН, Ижевск, Россия

¹kmkseniya@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5564-8267>

²lenshinas@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>

³sergey.x173@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0005-4323-9163>

⁴sabukhi@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

⁵andrey_chukawin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9590-9238>

Аннотация

Предмет исследования. Пористый кремний представляет собой перспективный материал для создания новых оптоэлектронных и сенсорных устройств, способных улучшить множество технологий и повысить их эффективность. Он может быть использован в различных приложениях, таких как светодиоды, фотодетекторы, солнечные батареи, датчики и другие устройства, которые требуют высокой эффективности поглощения и испускания света, а также высокой чувствительности к оптическим величинам окружающей среды. Осаждение частиц олова на пористый кремний открывает широкие возможности для разработки новых нанокompозитных материалов с индивидуальными свойствами для широкого спектра применений. Одним из методов, используемых для осаждения плёнки олова, является вакуумно-термическое испарение. Это метод позволяет получить высококачественные тонкие слои с хорошей воспроизводимостью и контролируемые свойствами. **Цель работы.** Установить влияние олова, осаждённого термическим методом, на строение и состав пористого кремния. **Метод.** Пористый кремний получен анодированием пластин монокристаллического кремния (марки КЭФ с ориентацией 100). Используя атомно-силовую микроскопию, фотолюминесцентную, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию, были получены сведения о форме, составе и характеристиках исходного образца, а также об образце с нанесённым оловом. **Основные результаты.** Полученные данные показали, что при применении вакуумно-термического испарения олово осаждается на поверхности пористого слоя в виде островковой плёнки и замедляет окисление пористого слоя. В составе нанокompозитов пористого кремния с осаждённым оловом присутствуют фазы диоксида олова, субоксида/монооксида олова и металлического олова. Применение вакуумно-термического метода для получения плёнок олова на пористом кремнии ведёт к изменению формы и положению полосы спектра фотолюминесценции и частично способствует повышению её интенсивности. **Практическая значимость.** Таким образом, разработанная в ходе исследования методика может быть успешно использована для производства композитных материалов с улучшенными характеристиками.

Ключевые слова: пористый кремний, олово, вакуумно-термическое испарение, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, фотолюминесценция

Благодарность: работа поддержана Российским научным фондом, проект РНФ № 22-73-00154.

Ссылка для цитирования: Ким К.Б., Леншин А.С., Черненко С.С., Нифталиев С.И., Чукавин А.И. Исследование морфологии и состава поверхности наноструктурированной плёнки олова на пористом кремнии // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 60–67. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-60-67>

Коды OCIS: 040.0040, 160.1890, 240.0310.

Study of the morphology and surface composition of a nanostructured tin film on porous silicon

KSENIA B. KIM^{1✉}, ALEXANDER S. LENSIN², SERGEI S. CHERNENKO³,
SABUKHI ILIC OGLY NIFTALIEV⁴, ANDREY I. CHUKAVIN⁵

^{1, 2, 3, 4}Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

²Voronezh State University, Voronezh, Russia

⁵Udmurt Federal Research Center URO RAS, Izhevsk, Russia

¹kmkseniya@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5564-8267>

²lenshin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>

³sergey.x173@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0005-4323-9163>

⁴sabukhi@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

⁵andrey_chukawin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9590-9238>

Abstract

Study subject. Porous silicon is a material with great potential for creating optoelectronic and sensor devices that can enhance various technologies and improve their efficiency. It finds applications in light-emitting diodes, photodetectors, solar cells, sensors, and other devices that require high light absorption and emission efficiency, as well as sensitivity to the optical values of the environment. The deposition of tin particles on porous silicon has potential for developing new nanocomposite materials with customised properties for various applications. Vacuum-thermal evaporation is a commonly used method for depositing oxide films. This method produces high-quality thin layers with good reproducibility and controllable properties. **Purpose of the work.** The aim of this study was to investigate the impact of thermally deposited tin on the structure and composition of porous silicon. **Method.** Porous silicon was created by anodizing monocrystalline silicon plates (KEF (silicon electronic phosphorus) grade with orientation 100). The original and tin-anodized samples were analyzed using atomic force microscopy, photoluminescence, and X-ray photoelectron spectroscopy to determine their shape, composition, and characteristics. **Main results.** The following section presents the main findings. According to the results, tin was deposited on the surface of the porous layer as an island film through vacuum-thermal evaporation. This deposition inhibited the oxidation of the porous layer. The nanocomposites of porous silicon with deposited tin consist of tin dioxide, tin suboxide/monoxide, and metallic tin. The application of the vacuum-thermal method to obtain tin films on porous silicon alters the shape and position of the photoluminescence spectrum band and partially increases its intensity. **Practical significance.** This technique can be used to produce composite materials with improved characteristics.

Keywords: porous silicon, tin, vacuum-thermal evaporation, X-ray photoelectron spectroscopy, photoluminescence

Acknowledgment: the work was supported by the Russian Science Foundation, RSF project № 22-73-00154.

For citation: Kim K.B., Lenshin A.S., Chernenko S.S., Niftaliev S.I., Chukavin A.I. Study of the morphology and surface composition of a nanostructured tin film on porous silicon [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. T. 91. № 10. P. 60–67. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-60-67>

OCIS codes: 040.0040, 160.1890, 240.0310.

ВВЕДЕНИЕ

Датчики, созданные на основе пористого кремния (por-Si), представляют собой перспективные устройства, способные успешно обнаруживать и измерять различные физические и химические характеристики. Пористый кремний обладает уникальными свойствами, такими как большая площадь поверхности, высокая пористость и механическая стабильность, что делает его привлекательным материалом для создания датчиков.

Датчики на основе пористого кремния могут быть использованы для измерения таких параметров, как температура, давление, влажность, концентрация газов, pH-уровень и других величин. Механизм действия датчиков основан на взаимодействии между анализируемым веществом и поверхностью пористого материала, приводящие к изменению электрических, оптических или других сигналов, которые можно измерить и интерпретировать.

Преимущества датчиков на основе пористого кремния включают их высокую чувствительность, быстрый отклик, широкий диапазон измеряемых параметров, возможность интеграции с другими электронными устройствами и низкую стоимость производства. Кроме того, такие датчики обладают устойчивостью к агрессивной среде и могут быть применены в различных областях, включая промышленность, медицину, окружающую среду, сельское хозяйство и другие [1].

Пористый кремний можно функционализировать, нанося на его поверхность различные активные плёнки, тем самым расширяя сферу применения полученных структур [2–4]. Изменения в структуре пористого кремния могут вызывать изменения в его электрических свойствах, например, проводимости, что позволяет использовать его для обнаружения газов, влажности и других параметров. Датчики из пористого кремния имеют широкий спектр применений, и требования к ним могут различаться в зависимости от конкретной задачи. Однако, в общем случае, следующие требования могут быть применимы к датчикам из пористого кремния: чувствительность, селективность, скорость реагирования, динамический диапазон и надёжность. Также они должны быть стойкими к воздействию внешних факторов, таких как темпе-

ратура, влажность, агрессивные химические среды и механические воздействия [5].

Одним из способов улучшения свойств пористого кремния является осаждение олова на его поверхности, приводящее к увеличению доступной поверхности для химических и физических взаимодействий. Функционализирование поверхности пористого кремния оловом улучшает электрические свойства материала, что важно для электронных и сенсорных устройств. Осаждение олова на поверхности пористого кремния может улучшить адгезию плёнки и обеспечить стабильное соединение между оловом и подложкой по сравнению с кристаллическим кремнием. В процессе осаждения можно контролировать толщину плёнки олова, настраивая свойства материала под конкретные цели [6]. Нанесение олова на пористый кремний расширяет функциональные возможности материала, делая его более универсальным и полезным для множества приложений.

Осаждение олова может выполняться различными методами, такими как химическое осаждение из раствора (электрохимическое осаждение), физическое осаждение (например, методом распыления) или химическое осаждение из газовой фазы. Выбор метода зависит от конкретных требований и характеристик процесса. В настоящей работе получен композитный материал, состоящий из пористого кремния с нанесённой вакуумно-термическим способом плёнкой олова (por-Si-Sn). Данный метод позволяет контролировать толщину и проницаемость плёнки олова, а также обеспечивает высокую адгезию к поверхности кремния [7–9].

Таким образом, целью работы является установление влияния олова, осаждённого термическим методом, на строение и состав пористого кремния.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подложки пористого кремния получали из монокристаллического кремния (КЭФ 100; 0,2 Ом·см) [10]. Вакуумно-термическим методом на подложку пористого кремния напыляли плёнку олова, толщина полученной плёнки — около 200 нм. Процесс проводили на установке ВУП-4 ($P = 0,5 \times 10^{-4} - 10^{-3}$ мм.рт.ст., $v = 3-5$ нм/с), время осаждения состав-

ляло 1 мин. Морфологию образцов исследовали на атомно-силовом микроскопе (SOLVER P47 PRO). С помощью программного обеспечения NOVA проводили анализ морфологии поверхности. На спектрально-люминесцентном комплексе с использованием монохроматора МДР-4 ($\lambda = 405$ нм) изучали фотолуминесцентные свойства исходного образца por-Si и нанокompозита por-Si-Sn. В соответствии с методикой [11], на спектрометре SPECS получены обзорные спектры рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и спектры остаточных уровней для пористого кремния и пористого кремния с осаждённым оловом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 1 представлены изображения поверхности пористого кремния и пористого кремния с осаждёнными частицами олова, полученные на атомно-силовом микроскопе. Наблюдается, что поверхность образца пористого кремния (рис. 1а) имеет более выраженную шероховатость (70 нм) по сравнению (до 45 нм) с образцом пористого кремния с осаждёнными частицами олова (рис. 1б).

Анализ обзорных спектров XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) позволяет исследовать химический состав поверхности материала (рис. 2, табл. 1). В данном случае, проведённый анализ указывает на наличие

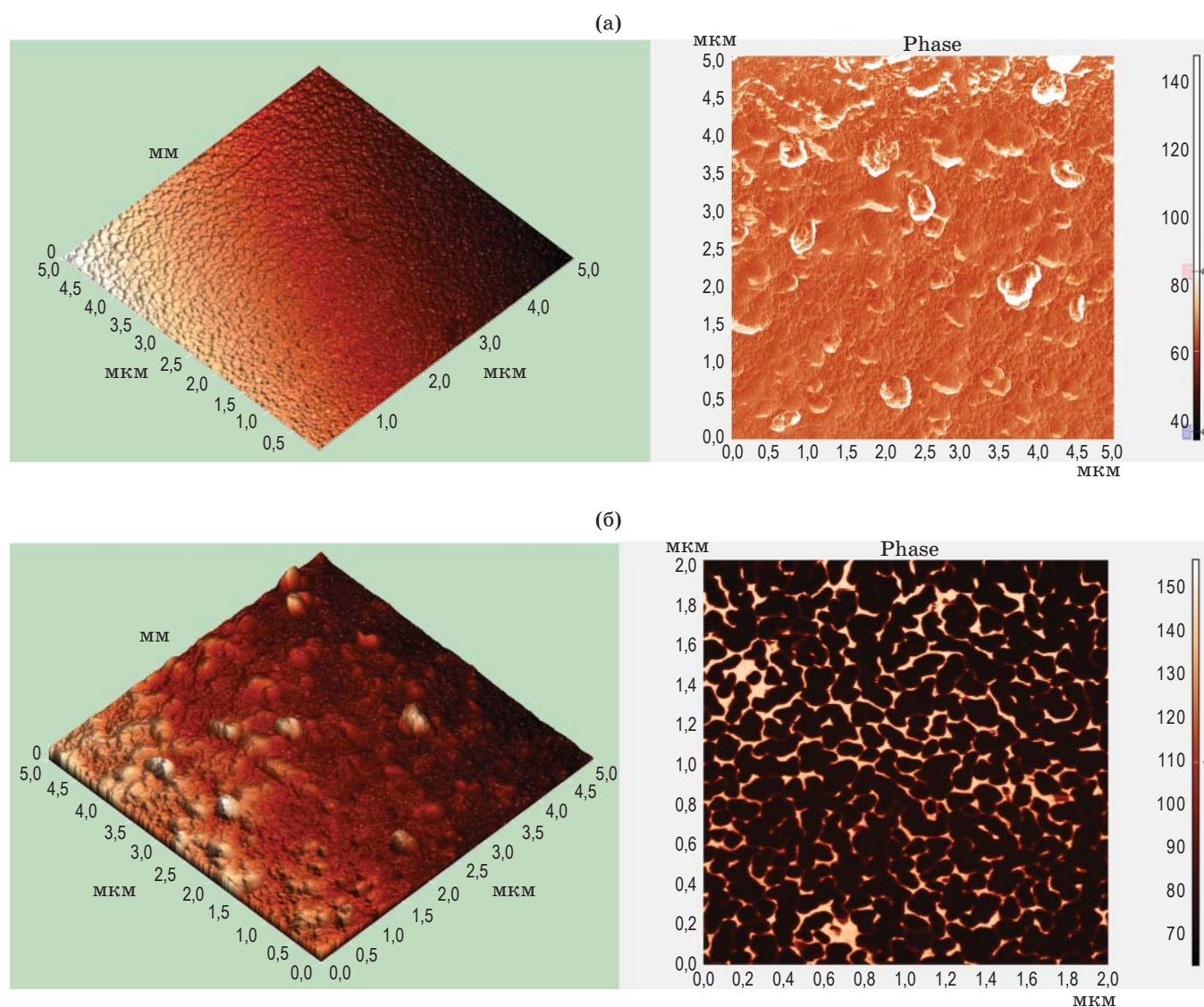


Рис. 1. Морфологии поверхности образцов, полученные с помощью АСМ. (а) por-Si, (б) por-Si-Sn

Fig. 1. Surface morphologies of the samples obtained by AFM. (а) por-Si, (б) por-Si-Sn

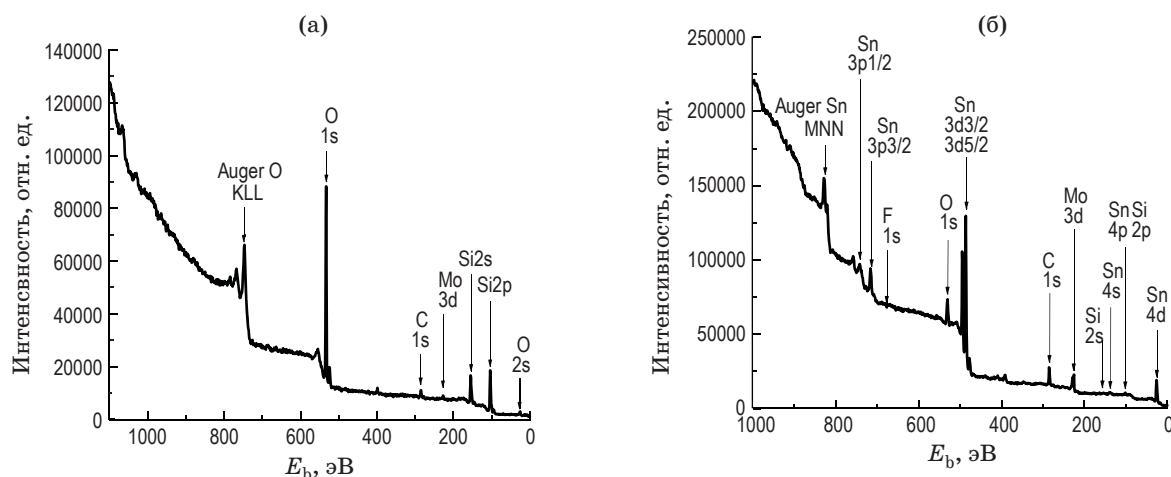


Рис. 2. Обзорные XPS-спектры. (а) por-Si, (б) por-Si-Sn

Fig. 2. Survey XPS — spectra of (a) por-Si, (б) por-Si-Sn

Спектры XPS por-Si и por-Si-Sn
XPS spectra of por-Si and por-Si-Sn

Элемент	E_b , эВ	Элемент	E_b , эВ
por-Si		por-Si-Sn	
Si 2p	99–104	Sn 4d	24–27
Si 2s	150–155	Sn 4p	85–86
O 1s	530–533	Sn 3d	482–492
C 1s	285	Sn 3p	714–717
Mo 3d	229–231		

некоторого количества естественных углеводородных загрязнений на образцах пористого кремния и пористого кремния с добавлением олова. Обзорные спектры XPS показывают кривые, соответствующие основным уровням следующих элементов. Для дополнительного анализа полученных спектров XPS была использована база данных основных уровней различных элементов. Главная цель изучения XPS-спектров состоит в определении наличия различных компонентов в образцах, их химического состояния и взаимосвязи. Кроме того, анализ формы и интенсивности пиков в спектрах XPS может предоставить дополнительную информацию о фазовом составе материалов.

Исследование XPS-спектров Si 2p позволяет провести более подробный анализ химической структуры поверхности пористого кремния. Результаты анализа указывают на присутствие «мезопористого» кремния на об-

разце пористого кремния (рис. 3а). Кроме того, обнаружено присутствие других форм кремния на поверхности пористого кремния, включая неокисленный кремний (аморфный/кристаллический) с пиковым значением энергии связи 99,5 эВ. Также обнаружены субоксиды кремния с пиками при энергиях связи от 100,5 до 103,0 эВ и диоксиды кремния с пиком при энергии связи 103,5 эВ. Описанные исследования подтверждаются ранее полученными результатами [11, 12]. Стоит отметить, при проведении повторных измерений этих же образцов с течением времени (30 дней) наблюдается изменение в составе поверхностного пористого слоя, а именно, увеличивается доля оксидных фаз. Наноккомпозит пористого кремния с осаждённым оловом (рис. 3б) имеет примерно такой же состав, что и исходная подложка por-Si (элементарный кремний 99,5 эВ и субоксид кремния 101,5 эВ).

Следует отметить, что на поверхности образцов с осаждённым оловом кремний в меньшей степени окислен по сравнению с исходным пористым кремнием. Это показывается соотношением интенсивностей особенностей Si 2p спектра 103,5 эВ к 99,5 эВ ($I_{SiO_2}/I_{Si} \approx 4$) (рис. 4). Так для пористого кремния с осаждённой плёнкой это соотношение $I_{SiO_2}/I_{Si} \approx 4$, а для исходного пористого — 6.

На рис. 5 представлены спектры рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии основных уровней Sn 3d фольги, которая является эталоном металлического олова. Исследование формы и положения спектра Sn 3d5/2 с по-

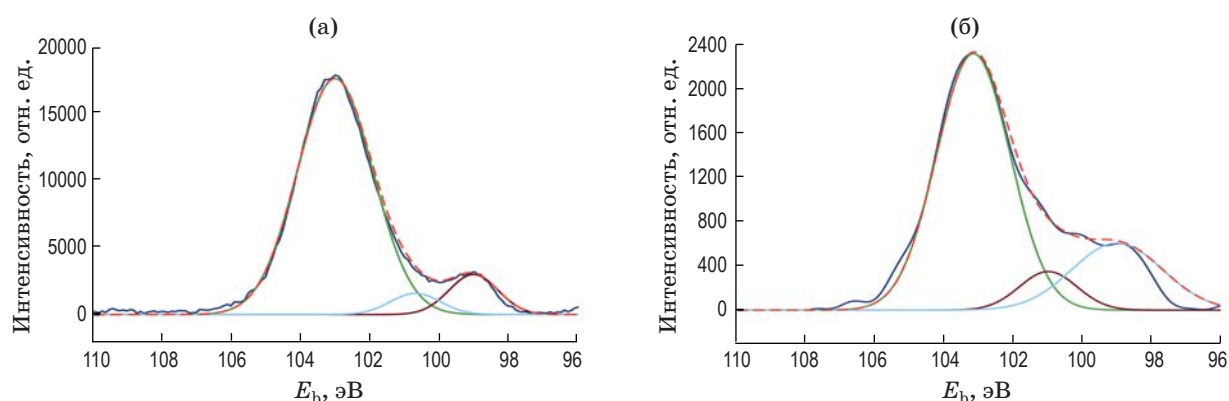


Рис. 3. XPS Si 2p спектры с разложением на компоненты: por-Si(a), por-Si-Sn (б)

Fig. 3. XPS Si 2p spectra with decomposition into components (a) por-Si, (б) por-Si-Sn

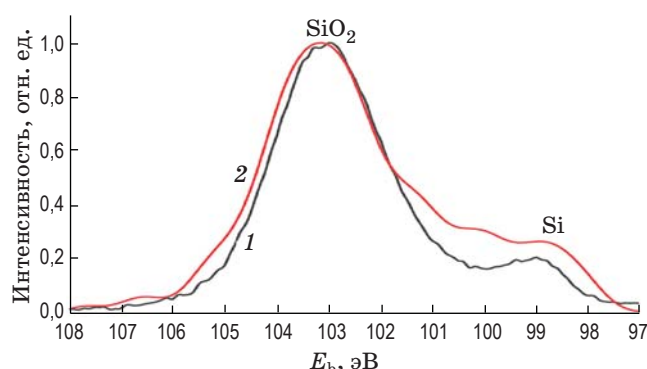


Рис. 4. Объединённые XPS Si 2p спектры исходного por-Si (1) и por-Si-Sn (2)

Fig. 4. Combined XPS Si 2p spectra of the original por-Si (1) and por-Si-Sn (2)

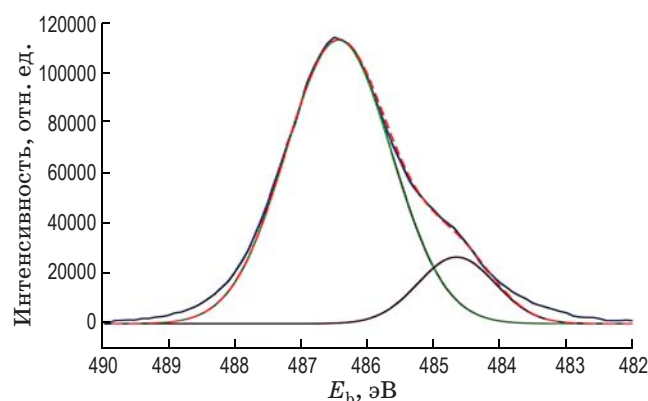


Рис. 5. Эталонные спектры XPS Sn 3d5/2 фольги олова с разложением на компоненты

Fig. 5. Reference spectra of XPS Sn 3d5/2 tin foil with component decomposition

следующим его разложением на компоненты позволяет провести анализ состояния поверхностного слоя фольги. Полученные результаты свидетельствуют о наличии двух основных компонентов в поверхностном слое фольги. Первая компонента соответствует металлическому олову и имеет характеристическую энергию связи приблизительно равную 485,0 эВ. Вторая компонента соотносится с естественным оксидом олова (SnO_x), где значение x примерно равно 2, и обладает энергией связи в диапазоне 486,5–487,0 эВ.

На рис. 6 представлены спектры фотолюминесценции (ФЛ) образцов por-Si и por-Si-Sn. Стоит отметить, что для образцов исходного por-Si высокоинтенсивный максимум фотолюминесценции располагается в области от 600 до 750 нм, а для нанокомпозита por-Si-Sn максимум сдвигается в область от 550 до 650 нм.

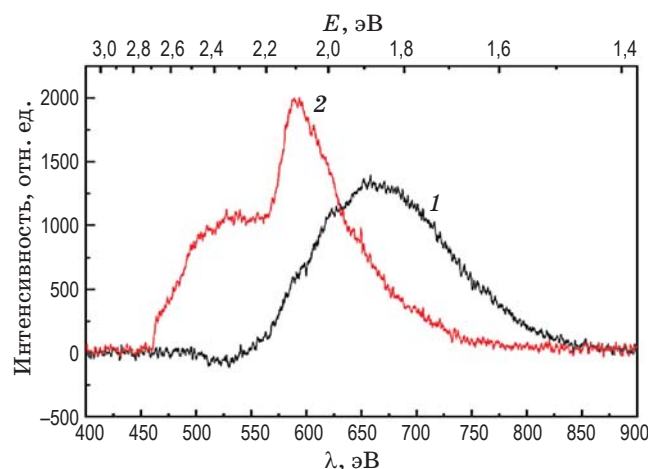


Рис. 6. Спектры фотолюминесценции образцов исходного por-Si (1) и композита por-Si-Sn (2)

Fig. 6. Photoluminescence spectra of samples of initial por-Si (1) and por-Si-Sn (2) composite

Влияние технологических параметров процедуры вакуумно-термического осаждения на изменение положения пика фотолюминесценции в композитных материалах *por-Si* и *por-Si-Sn* можно исключить, учитывая, что образцы находились в одной и той же камере во время осаждения.

Существенное влияние на фотолюминесцентные свойства образцов пористого кремния (*por-Si*) при возбуждении излучением с длиной волны 405 нм [13] могут оказывать различные факторы. Плёнка, находящаяся на поверхности пористого кремния, может отражать часть входящего возбуждающего излучения, это приводит к уменьшению его проникновения в глубину образца и, следовательно, к изменению свойств фотолюминесценции. Введение металла в поры пористого кремния может привести к локальному перераспределению заряда и экранированию экситонов. При введении олова в пористый кремний может происходить сокращение количества нанокристаллов кремния и уменьшение их среднего размера. Такое замещение может привести к изменению размеров и распределения нанокристаллов кремния, что, в свою очередь, может сказаться на фотолюминесцентных свойствах образца [14]. Для кремниевых наноструктур с низкой интенсивностью фотолюминесценции (ФЛ) возможно усиление роли центров излучательной рекомбинации дефектных оксидов кремния SiO_x . Пик ФЛ таких дефектных оксидов кремния обычно приходится на область 500–550 нм (2,4–2,2 эВ), что может быть характеристикой ФЛ образца [13]. Таким образом, наличие олова и дефектных оксидов кремния в композитном слое из

пористого кремния и олова может вносить значимые изменения в фотолюминесцентные свойства образца.

ВЫВОДЫ

Получение композитных материалов на основе пористого кремния и олова при помощи вакуумно-термического испарения является многообещающим методом для создания новых материалов с контролируемыми свойствами. Исследования показали, что этим методом можно создать тонкую плёнку олова, которая будет равномерно распределена по поверхности пористого слоя кремния в виде островковой плёнки. Это приводит к замедлению процесса окисления пористого слоя и, следовательно, к его сохранению в более стабильном состоянии. Нанокompозиты пористого кремния с осаждённым оловом содержат фазы субоксида/монооксида, диоксида олова и металлического олова. Осаждение плёнки олова на поверхность пористого кремния приводит к изменению формы и положения спектра фотолюминесценции, а также в некоторой степени увеличивает его интенсивность. Это свидетельствует о влиянии осаждённого олова на оптические свойства композитных материалов.

Таким образом, разработанная методика вакуумно-термического испарения олова является важным шагом в создании композитных материалов с улучшенными свойствами. Результаты исследования позволяют применять этот метод для получения наноструктурированных композитов, обладающих потенциалом для применения в различных областях, таких как электроника, оптика и сенсорика.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sazzad H.A., Prattusha Bhattacharjee, Sarower Kabir et al. Review of new developments in different types of sensors over the past 15 years // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier Science BV. January 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00043-1>
2. Леньшин А.С., Ким К.Б., Агапов Б.Л., Кашкаров В.М., Лукин А.Н., Нифталиев С.И. Структура и состав композита пористого кремния с осажденной медью // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023. Т. 25. № 3. С. 359–366. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11259>
3. Grigor'ev L.V., Mikhailov A.V. Optical and photoluminescence properties of ytterbium-doped porous silicon subjected to laser-stimulated oxidation // *Journal of Optical Technology*. 2016. V. 83. № 12. P. 787–793. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000787>
4. Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S. Electrochemical deposition of indium into oxidized and unoxidized porous silicon // *Thin Solid Films*. 2021. V. 734. P. 138860. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138860>
5. V. 25. Т. 2. P. 359–366. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11259>

5. Alwan A.M., Yousif A.A., Abed H.R. High sensitivity and fast response at the room temperature of $\text{SnO}_2/\text{CuO}/\text{PSi}$ nanostructures sandwich configuration NH_3 gas sensor // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2190. P. 20086. <https://doi.org/10.1063/1.5138572>
6. Pinto A.H., Nogueira A.E., Dalmaschio C.J., Frigini I.N., Almeida J. C., Ferrer M.M., Berengue O.M., Gonçalves R. A., Mendonça V. R. Doped tin dioxide (d-SnO_2) and its nanostructures: Review of the theoretical aspects, photocatalytic and biomedical applications // Solids. 2022. V. 3. P. 327–360. <https://doi.org/10.3390/solids3020024>
7. Рябцев С.В. Электрофизические и оптические свойства различных наноструктур оксида олова // Дисс. док. физ.-мат. наук. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2011. 274 с.
Ryabtsev S.V. Electrophysical and optical properties of various nanoforms of tin oxide [in Russian] // PhD thesis in Physics and Mathematics. Voronezh: Voronezh State University, 2011. 274 p.
8. Nasir E.M., Naji I.S. Structural and optical properties of $\text{Pb}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ thin films prepared by vacuum evaporation technique // Aust. J. Basic & Appl. Sci. 2015. V. 9. № 20. P. 364–371.
9. Abegunde O.O., Akinlabi E.T., Oladijo O.P., Akinlabi S., Ude A.U. Overview of thin film deposition techniques // AIMS Materials Science. 2019. V. 6. T. 2. P. 174–199. <https://doi.org/10.3934/matrics.2019.2.174>
10. Lenshin A.S., Seredin P.V., Kashkarov V.M., Minakov D.A. Origins of photoluminescence degradation in porous silicon under irradiation and the way of its elimination // Materials Science in Semiconductor Processing. 2017. V. 64. T. 71. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.03.020>
11. Lenshin A.S., Kashkarov V.M., Domashevskaya E.P., Bel'tyukov A.N., Gil'mutdinov F.Z. Investigations of the composition of macro-, micro- and nanoporous silicon surface by ultrasoft X-ray spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy // Applied Surface Science. 2015. V. 359. P. 550–559. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.10.140>
12. Леньшин А.С., Кашкаров В.М., Турищев С.Ю., Смирнов М.С., Домашевская Э.П. Влияние естественного старения на фотолюминесценцию пористого кремния // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. № 2. С. 150–152.
Lenshin A.S., Kashkarov V.M., Turishchev S.Yu., Smirnov M.S., Domashevskaya E.P. The influence of natural aging on the photoluminescence of porous silicon // Journal of Technical Physics. 2012. T. 82. № 2. P. 150–152.
13. Терехов В.А., Териуков Е.И., Ундалов Ю.К., Паринова Е.В., Спиринов Д.Е., Середин П.В., Минаков Д.А., Домашевская Э.П. Состав и оптические свойства аморфных пленок SiO_xH с нанокластерами кремния // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. № 2. С. 212–217.
Terekhov V.A., Terukov E.I., Undalov Yu.K., Parinova E.V., Spirin D.E., Seredin P.V., Minakov D.A., Domashevskaya E.P. Composition and optical properties of amorphous SiO_xH films with silicon nanoclusters // Physics and technology of semiconductors. 2016. V. 50. № 2. P. 212–217.
14. Turishchev S., Lenshin A., Domashevskaya E., Kashkarov V., Terekhov V., Pankov K., Khoviv D. Evolution of nanoporous silicon phase composition and electron energy structure under natural ageing // Phys. Status Solidi. 2009. V. 6. P. 1651–1655. <https://doi.org/10.1002/pssc.200881015>

АВТОРЫ

Ксения Борисовна Ким — канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры неорганической химии и химической технологии Воронежского государственного университета инженерных технологий, Воронеж, 394036, Россия; Scopus ID: 57192105561; <https://orcid.org/0000-0001-5564-8267>; kmkseniya@yandex.ru

Александр Сергеевич Леньшин — доктор физ.-мат. наук, доцент кафедры физики, теплотехники и теплоэнергетики Воронежского государственного университета инженерных технологий, Воронеж, 394036, Россия; ведущий научный сотрудник Воронежского государственного университета, Воронеж, 394018, Россия; Scopus ID: 55665516500; <https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>; lenshinas@mail.ru

Сергей Сергеевич Черненко — аспирант кафедры физики, теплотехники и теплоэнергетики Воронежского государственного университета инженерных технологий, Воронеж, 394036, Россия; Scopus ID: 58286929900; <https://orcid.org/0009-0005-4323-9163>; sergey.x173@mail.ru

Сабухи Илич оглы Нифталиев — доктор хим. наук, заведующий кафедрой, профессор кафедры неорганической химии и химической технологии Воронежского государственного университета инженерных технологий, Воронеж, 394036, Россия; Scopus ID: 6603451208; <https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>; sabukhi@gmail.com

Андрей Игоревич Чукавин — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник Удмуртского федерального исследовательского центра, Ижевск, 426067, Россия; Scopus ID: 56872959600; <https://orcid.org/0000-0002-9590-9238>; andrey_chukawin@mail.ru

AUTHORS

Ksenia B. Kim — PhD in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Inorganic Chemistry and Chemical Technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, 394036, Russia; Scopus ID: 57192105561; <https://orcid.org/0000-0001-5564-8267>; kmkseniya@yandex.ru

Alexander S. Lenshin — D.Sci. in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics, Heat Engineering and Heat Power Engineering, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, 394036, Russia; Leading Researcher, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russia; Scopus ID: 55665516500; <https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>; lenshinas@mail.ru

Sergey S. Chernenko — Postgraduate Student, Department of Physics, Heat Engineering and Thermal Power Engineering, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, 394036, Russia; Scopus ID: 58286929900; <https://orcid.org/0009-0005-4323-9163>; sergey.x173@mail.ru

Sabukhi Ilich oglu Niftaliev — D.Sci. in Chemical Sciences, Professor, Head of Department, Department of Inorganic Chemistry of Chemistry and Chemical Technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, 394036, Russia; Scopus ID: 6603451208; <https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>; sabukhi@gmail.com

Andrey I. Chukavin — PhD in Physics and Mathematics, Research Associate, Udmurt Federal Research Center, Izhevsk, 426067, Russia; Scopus ID: 56872959600; <https://orcid.org/0000-0002-9590-9238>; andrey_chukawin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.11.2023

Одобрена после рецензирования 11.03.2024

Принята к печати 30.08.2024

The article was submitted to the editorial office 09.11.2023

Approved after review 11.03.2024

Accepted for publication 30.08.2024