

Влияние гибридного покрытия из пористого кремния и квантовых точек WS_2 и MoS_2 на электрические характеристики фоточувствительных структур

Н.А. Полуэктова , Д.А. Шишкина , Д.П. Григорьев 

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

Аннотация – Обоснование. В данной статье рассматривается исследование влияния гибридного покрытия квантовых точек и слоя пористого кремния на вольт-амперную характеристику фоточувствительных структур. Объектом исследования стали кремниевые солнечные элементы с пористым слоем и квантовыми точками WS_2 и MoS_2 . Повышение энергетической эффективности солнечных батарей является актуальной задачей в связи с высоким спросом на альтернативные виды источников энергии. Квантовые точки благодаря свойствам наноразмерных структур в сочетании со слоем микро- и нанопор могут способствовать повышению КПД. **Цель.** Создание фоточувствительных структур с пористым кремнием и квантовыми точками и последующее исследование их вольт-амперных характеристик для выявления характера взаимодействия квантовых точек с пористыми структурами. **Методы.** Применялись эмпирические и аналитические методы. **Результаты.** Получены вольт-амперные характеристики фоточувствительных структур. Выявлена зависимость повышения значений тока насыщения от времени травления и глубины залегания квантовых точек. **Заключение.** Гибридное покрытие из пористого кремния и квантовых точек WS_2 и MoS_2 оказывает положительное влияние на электрические характеристики солнечных элементов. Однако требуются дальнейшие исследования зависимости повышения эффективности солнечных элементов от объема наносимых квантовых точек.

Ключевые слова – солнечный элемент; пористый кремний; квантовые точки; КПД; электрохимическое травление.

Введение

Применение кремниевых фоточувствительных структур актуально благодаря ширине запрещенной зоны кремния, равной 1,12 эВ, а также меньшей стоимости сырья. Области их использования весьма разнообразны: квантовая криптография [1], диагностика инфекций методом фотометрии [2], неинвазивный мониторинг концентрации глюкозы [3], солнечная энергетика [4] и др. Учитывая высокий спрос на альтернативные источники энергии, особый интерес представляет применение фоточувствительных структур на основе кремния в качестве солнечных элементов. За счет вышеперечисленных свойств материала они выигрывают в соотношении цены и энергетической эффективности у других типов солнечных элементов [5]. Однако кремниевые солнечные элементы требуют повышения коэффициента полезного действия (КПД), максимальные значения которого составляют 20–25 % только при соблюдении особых условий эксплуатации, в частности обеспечения падения солнечного излучения на поверхность панелей под углом 90° , что требует эксплуатации дорогостоящего оборудования.

Существуют более выгодные способы повышения эффективности кремниевых фоточувствительных структур. Одним из таких способов является создание специальных слоев на рабочей поверхности элементов. Например, антиотражающие покрытия на основе соединений оксида алюминия и кремния (Al_2O_3 и SiO_2) [6], алмазоподобного углерода [7], поливинилбутирала и наночастиц серебра (ПВБ-Ag) [8], а также пористого кремния [9] позволяют расширить спектр пропускаемого излучения. Кроме того, покрытия из пористого кремния способствуют повышению радиационной стойкости структур [10] и увеличивают площадь рабочей поверхности за счет своей морфологии [11]. Однако повысить эффективность пористого кремния можно путем добавления в него квантовых точек [12–14]. В данной работе показано исследование влияния гибридного покрытия квантовых точек и пористого кремния на вольт-амперную характеристику фоточувствительных структур.

1. Методика эксперимента

Создание экспериментальных образцов проходило в несколько этапов.

Таблица 1. Состав диффузанта
 Table 1. Composition of the diffusant

Раствор 1		Раствор 2	
Вещество	Кол-во, мл	Вещество	Кол-во, мл
C ₂ H ₅ OH	3,5	C ₂ H ₅ OH	23,5
HNO ₃	0,625	H ₃ PO ₄	3
(C ₂ H ₅ O) ₄ Si	8,75	–	–

Таблица 2. Данные о типе травления и нанесении суспензий с квантовыми точками
 Table 2. Data on the type of etching and application of quantum dot suspensions

№ образца	1	2	3	4
Время травления, мин	10	10	5	5
Материал квантовых точек	MoS ₂	WS ₂	MoS ₂	WS ₂

Первым этапом была предварительная подготовка кремниевых пластин с проводимостью р-типа размером 25 × 25 мм. Сначала пластины проходили очистку в ультразвуковой ванне на протяжении 10 мин и трижды промывались в бидистиллированной воде для удаления большей части пыли загрязнений. Затем была проведена очистка от возможных оставшихся частиц жира и пыли в кипящем растворе аммиака (NH₃), перекиси водорода (H₂O₂) и бидистиллированной воды в соотношении 1:1:4 соответственно. Кипячение проводилось на протяжении 7 мин, после чего образцы также трижды промывались в бидистиллированной воде и просушивались на фильтровальной бумаге.

Вторым этапом было проведение диффузии для создания р-п-перехода. Для этого на одну сторону кремниевых пластин, которая впоследствии будет рабочей, методом центрифугирования наносился диффузانت.

Состав диффузантов приведен в табл. 1.

После просушки пластины помещались в диффузионную печь на 40 мин при температуре 1000 °С. Остывшие образцы промывались сначала в плавиковой кислоте (HF) для снятия окисла, затем – в бидистиллированной воде для удаления его остатков.

Третьим этапом создания фоточувствительных структур было электрохимическое анодное травление в вертикальной ячейке [15]. Электролитом служил раствор плавиковой кислоты и этилового спирта в соотношении 1:1. Процесс травления проводился при плотности тока $j = 10$ мА/см² на протяжении 5 и 10 мин для двух групп образцов, соответственно. По окончании процесса образцы промывались в бидистиллированной воде и просушивались на фильтровальной бумаге.

Четвертым этапом было нанесение металлических контактов методом термического испарения в вакууме. В качестве материала для контактов был выбран алюминий. Контактная сетка на рабочей стороне фоточувствительных структур наносилась через маску. На тыльной стороне – сплошной контакт.

Завершающим, пятым этапом создания солнечных элементов было нанесение квантовых точек [16]. Для этого порошки микрочастиц дисульфида вольфрама (WS₂) и дисульфида молибдена (MoS₂) смешивались с изопропиловым спиртом (C₃H₈O) в соотношении 50 мг : 50 мл на протяжении 4 часов с помощью ультразвука. При такой обработке размер квантовых точек составлял порядка 6 мкм [17]. Полученные суспензии дважды наносились на изготовленные ранее фоточувствительные структуры методом адсорбции. В табл. 2 приведены данные о нанесении суспензий с разными материалами на образцы, анализ исследования которых будет представлен далее.

2. Результаты

Для оценки пористости фоточувствительных структур (P) после этапов предварительной подготовки и травления измерялись массы и толщины пластин. Расчет пористости производился по следующей формуле:

$$P = \frac{\Delta m}{\rho S d} 100 \%,$$

где Δm – разность масс, измеренных до и после травления; $\rho = 2,33$ г/см³ – плотность кремния; $S = 6,25$ см² – площадь пористого слоя; d – толщина пористого слоя.

Данные об изменении масс и толщин образцов, а также результаты расчета пористости представлены в табл. 3.

Таблица 3. Данные замеров массы и толщины структур. Результаты расчета пористости
Table 3. Data of measurements of mass and thickness of structures. Results of calculation of porosity

№	Δm , г	d , мкм	P , %
1	0,010	20	34,3
2	0,010	22	31,2
3	0,009	19	30,9
4	0,005	18	28,7

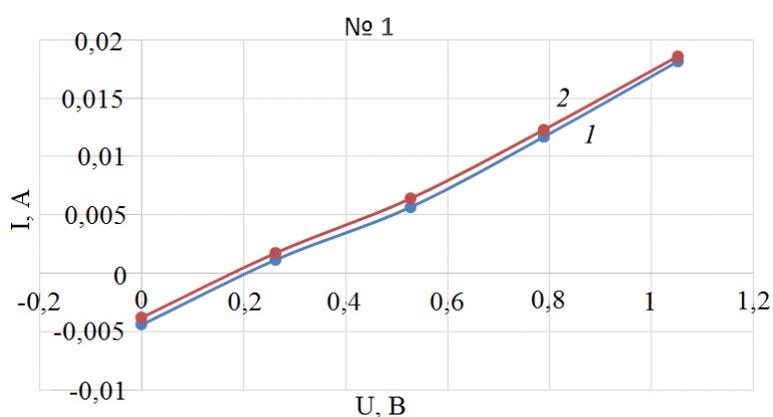


Рис. 1. ВАХ образца № 1 после этапа травления (1) и сразу после первого нанесения квантовых точек (2)
Fig. 1. I-V curve of sample #1 after the etching stage (1) and immediately after the first application of quantum dots (2)

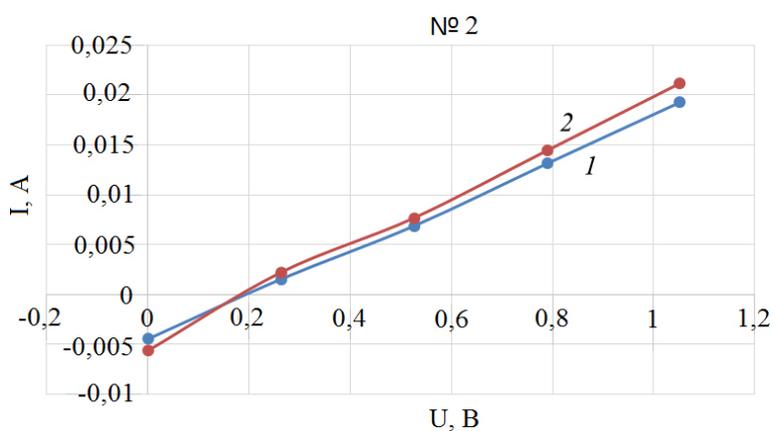


Рис. 2. ВАХ образца № 2 после этапа травления (1) и сразу после первого нанесения квантовых точек (2)
Fig. 2. I-V curve of sample #2 after the etching stage (1) and immediately after the first application of quantum dots (2)

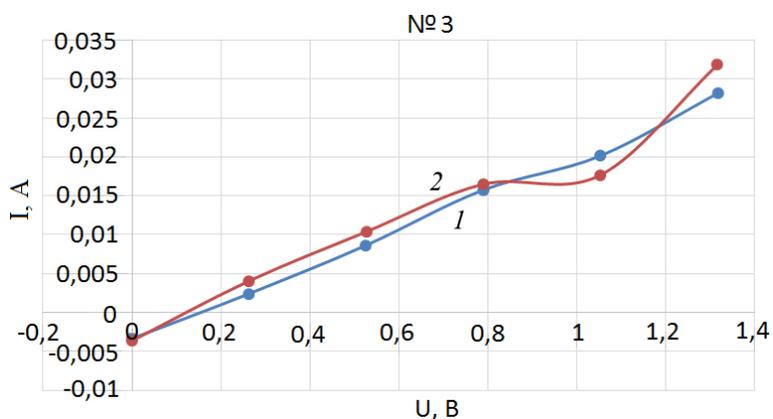


Рис. 3. ВАХ образца № 2 после этапа травления (1) и сразу после первого нанесения квантовых точек (2)
Fig. 3. I-V curve of sample #2 after the etching stage (1) and immediately after the first application of quantum dots (2)

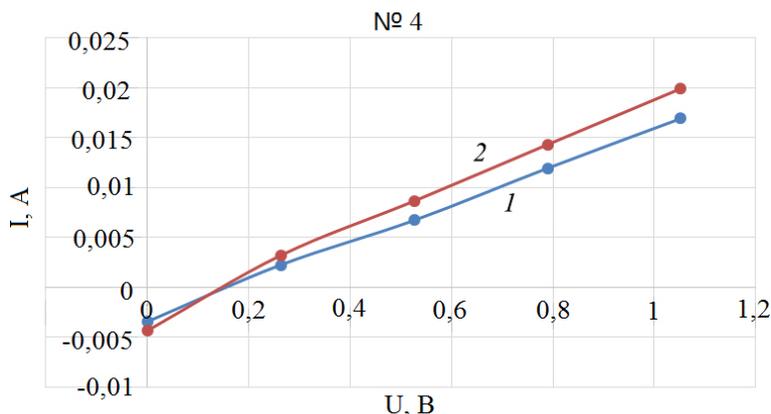


Рис. 4. ВАХ образца № 2 после этапа травления (1) и сразу после первого нанесения квантовых точек (2)
Fig. 4. I-V curve of sample #2 after the etching stage (1) and immediately after the first application of quantum dots (2)

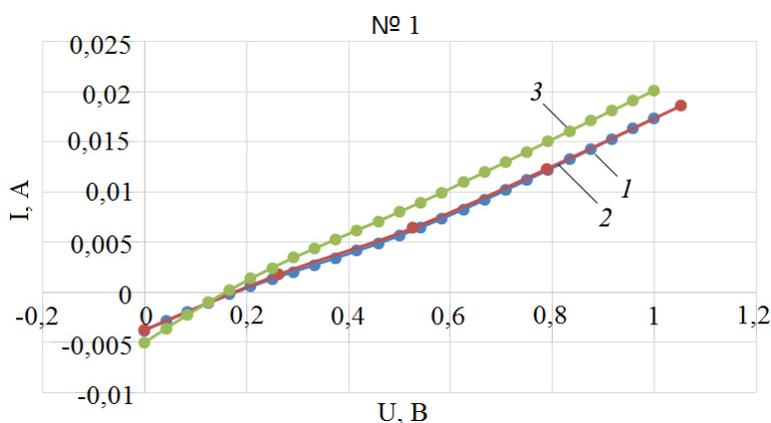


Рис. 5. ВАХ образца № 1 через день после первого нанесения квантовых точек (1), сразу после первого нанесения квантовых точек (2) и сразу после второго нанесения квантовых точек (3)
Fig. 5. I-V curve of sample #1 one day after the first application of quantum dots (1), immediately after the first application of quantum dots (2), and immediately after the second application of quantum dots (3)

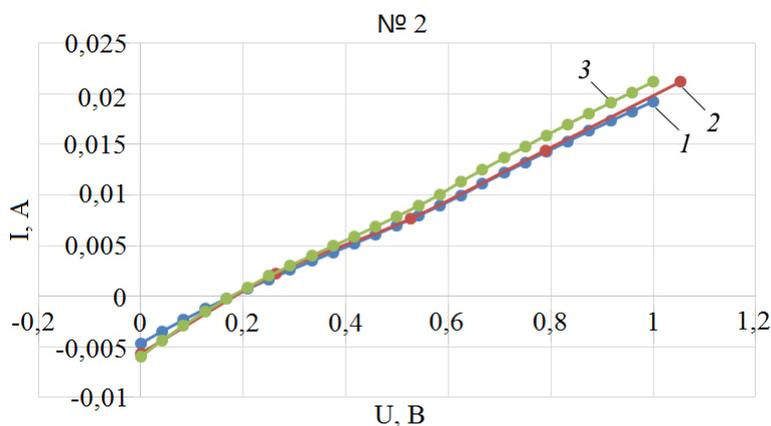


Рис. 6. ВАХ образца № 2 через день после первого нанесения квантовых точек (1), сразу после первого нанесения квантовых точек (2) и сразу после второго нанесения квантовых точек (3)
Fig. 6. I-V curve of sample #2 one day after the first application of quantum dots (1), immediately after the first application of quantum dots (2), and immediately after the second application of quantum dots (3)

В результате электрохимического травления были получены фоточувствительные структуры преимущественно с высокой пористостью 28–34%, что положительно сказывается на их антиотражающих свойствах.

Для оценки влияния квантовых точек на электрические характеристики солнечных элементов с пористым кремнием были сняты показания тока при контролируемом повышении напряжения.

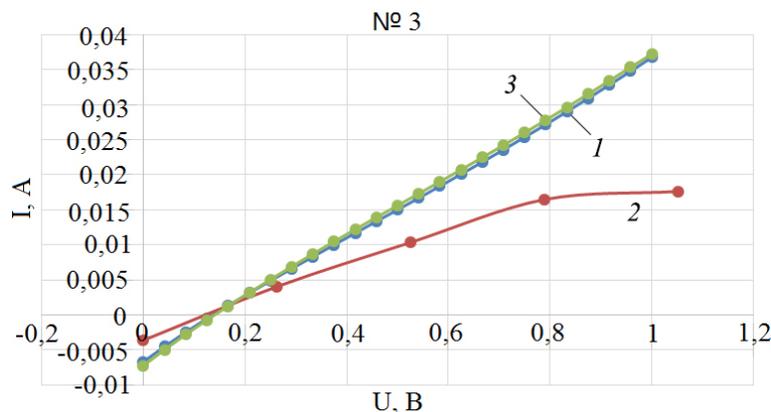


Рис. 7. ВАХ образца № 3 через день после первого нанесения квантовых точек (1), сразу после первого нанесения квантовых точек (2) и сразу после второго нанесения квантовых точек (3)

Fig. 7. I-V curve of sample #3 one day after the first application of quantum dots (1), immediately after the first application of quantum dots (2), and immediately after the second application of quantum dots (3)

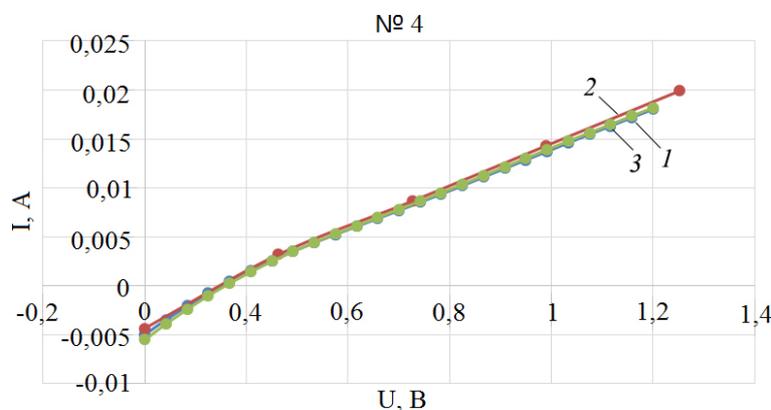


Рис. 8. ВАХ образца № 4 через день после первого нанесения квантовых точек (1), сразу после первого нанесения квантовых точек (2) и сразу после второго нанесения квантовых точек (3)

Fig. 8. I-V curve of sample #4 one day after the first application of quantum dots (1), immediately after the first application of quantum dots (2), and immediately after the second application of quantum dots (3)

На рис. 1–4 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) фоточувствительных структур до нанесения квантовых точек и сразу после первого нанесения.

Из графиков видно, что нанесение квантовых точек поспособствовало повышению значений тока у всех образцов. Снижение значения тока образца № 3, соответствующее значению 1,13 В, можно объяснить сбоем измерительного оборудования, что подтверждается дальнейшими исследованиями.

На рис. 5–8 приведены ВАХ образцов с квантовыми точками. Измерения проводились сразу после первого нанесения, через день после первого нанесения и после второго нанесения квантовых точек, проводившегося через день после первого нанесения.

Анализируя полученные графики можно заключить, что эффект от введения квантовых точек в

поры сохраняется со временем. Кроме того, структуры со временем травления, равным 10 мин, показали повышение тока насыщения, в то время как образцы со временем травления 5 мин практически не отреагировали на введение квантовых точек в поры. Такое явление можно объяснить более глубоким залеганием точек в порах образцов № 1 и № 2.

Заключение

Анализ вольт-амперных характеристик созданных фоточувствительных структур с гибридным покрытием из пористого кремния и квантовых точек WS₂ и MoS₂ показывает положительное влияние на выходные характеристики солнечных элементов. Однако требуются дальнейшие исследования зависимости повышения эффективности солнечных элементов от объема наносимых квантовых точек.

Список литературы

1. Применение кремниевых лавинных фотодиодов для регистрации одиночных фотонов в установке по квантовой криптографии / Д.Б. Третьяков [и др.] // Фотоника 2021: тез. докл. Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых). Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. Новосибирск: СО РАН, 2021. С. 113. DOI: <https://doi.org/10.34077/RCSF2021-113>
2. Анисько Ю.А., Щербакова Е.Н., Анисько Л.А. Применение фотометрии в диагностике инфекции COVID-19 // Новые направления развития приборостроения: мат. 15-й Межд. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов. Минск, 20–22 апреля 2022 г. Минск: БНТУ, 2022. С. 117. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/111788>
3. Спектрометрический метод и оптический сенсор повышения точности неинвазивного мониторинга концентраций крови / А. Зильгарева [и др.] // Вестник КазАТК. 2023. Т. 126, № 3. С. 335–342. DOI: <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-126-3-335-342>
4. Шульгина И.С. Солнечные элементы с графеном и углеродными нанотрубками на кремнии // Актуальные научные исследования: сб. ст. IV Межд. науч.-практ. конф. Пенза, 20 февраля 2022 г. Пенза: Наука и просвещение, 2022. С. 86–90. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48014853>
5. Федченко А.Я. Фотоэлектрическая солнечная энергия // Актуальные вопросы современной науки и образования: сб. ст. X Межд. науч.-практ. конф. Пенза, 20 мая 2021 г. Пенза: Наука и просвещение, 2021. С. 10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45827818>
6. Оптические характеристики антиотражающих покрытий на основе $Al_2O_3-SiO_2$ для кремниевых солнечных элементов / С.Х. Сулейманов [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 87, № 4. С. 667–671. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43818140>
7. Нусупов К.Х., Бакранова Д.И., Наурызбекова Ш.А. Антиотражающие покрытия на основе алмазоподобного углерода для кремниевых солнечных батарей // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. 2021. Т. 17, № 3. С. 80–84. URL: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/article/view/190>
8. Корчагин В.Н., Сысоев И.А. Исследование функциональных покрытий на основе поливинилбутирала и наночастиц серебра для солнечных элементов // Computational Nanotechnology. 2020. Т. 7, № 1. С. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2020-7-1-19-25>
9. Васин А.В., Рыбин Н.Б. Исследование пористого кремния, перспективного в качестве антиотражающего покрытия ФЭП // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022: сб. тр. V Межд. науч.-техн. форума. Рязань, 2–4 марта 2022 г. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2022. С. 117–121. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49271473>
10. Ерофеев А.С., Шишкин И.А., Латухина Н.В. Деградация солнечных элементов на базе пористого кремния // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета. 2020. Т. 16, № 1. С. 267–272. URL: <https://journals.ssau.ru/smus/article/download/9294/8540>
11. Исследование оптических свойств фоточувствительных структур пониженной размерности на основе кремния / Н.А. Полуэктова [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 3. С. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.3.16-23>
12. Корчагин В.Н., Сысоев И.А., Бобров А.А. Функциональные покрытия для солнечных элементов на основе поливинилбутирала и углеродных квантовых точек // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. 2023. Т. 130, № 1. С. 58–70. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2023.1\(130\).58-70](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2023.1(130).58-70)
13. Квантовые точки сульфида свинца: получение и практическое использование / Т.Г. Данилина [и др.] // Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии: Межвузовский сб. науч. труд. XIV Всероссийской конф. молод. учен. с межд. участием. Саратов, 1–31 октября 2020 г. Саратов: Саратовский источник, 2020. С. 19–20. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44299626>
14. Рябко А.А. Физико-технологические основы формирования гибридных наносистем «Наностержни оксида цинка–коллоидные квантовые точки»: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2022. 16 с.
15. Исследование электрических свойств фоточувствительных структур пониженной размерности на основе кремния с покрытиями из фторидов редкоземельных элементов / Н.А. Полуэктова [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 4. С. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.67-73>
16. Синтез и изучение ДПП для применения в фотодетекторах / А.Р. Рымжина [и др.] // XXI Всероссийская молодежная самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы, посвященная 300-летию РАН: сб. тез. Самара, 14–18 ноября 2023 г. М.: Тривант, 2023. С. 259–260. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61200077>
17. A systematic review on 2D MoS_2 for nitrogen dioxide (NO_2) sensing at room temperature / S. Kumar [et al.] // Materials Today Communications. 2023. Vol. 34. P. 105045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105045>

Информация об авторах

Полуэктова Наталья Алексеевна, аспирант кафедры наноинженерии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: физика полупроводников, методы создания, моделирования и исследования микро- и наноструктур, фотовольтаика.

E-mail: natapolivekt37@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4189-6192>

SPIN-код (eLibrary): 5791-7785

AuthorID (eLibrary): 1240561

Шишкина Дарья Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: пористый кремний, кремниевые нанонити, оптические покрытия, фотоэлектрические преобразователи, биомедицина.

E-mail: daria.lizunkova@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4118-1429>

SPIN-код (eLibrary): 5722-5240

AuthorID (eLibrary): 904558

ResearcherID (WoS): AAG-4607-2020

Григорьев Данил Павлович, аспирант кафедры радиоэлектронных систем, младший научный сотрудник института космического приборостроения ИКП 214 Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: электронные устройства детектирования космических микрочастиц. Обработка сигналов на базе нейронных сетей. Разработка прикладного программного обеспечения для вычислительных ядер на базе ПЛИС и устройств космической научной аппаратуры.

E-mail: grigorev.dp@ssau.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8413-379X>

SPIN-код (eLibrary): 3058-3584

AuthorID (eLibrary): 1111119

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2024, vol. 27, no. 4, pp. 94–101

DOI 10.18469/1810-3189.2024.27.4.94-101

UDC 629.7.064.56

Original Research

Received 14 June 2024

Accepted 15 July 2024

Published 28 December 2024

The effect of a hybrid coating of porous silicon and WS₂ and MoS₂ quantum dots on the electrical characteristics of photosensitive structures

Natalia A. Poluektova , Daria A. Shishkina , Danil P. Grigoriev 

Samara National Research University

34, Moskovskoye shosse,

Samara, 443086, Russia

Abstract – Background. This paper examines the effect of the hybrid coating of quantum dots and porous silicon on the volt-ampere characteristic of photosensitive structures. The object of the study was silicon solar cells with a porous layer and WS₂ and MoS₂ quantum dots. Increasing the energy efficiency of solar panels is an urgent task due to the high demand for alternative energy sources. Quantum dots, due to the properties of nanoscale structures, in combination with a layer of micro- and nanopores, can contribute to increased efficiency. **Aim.** Creation of photosensitive structures with porous silicon and quantum dots and subsequent investigation of their volt-ampere characteristics to identify the nature of the interaction of quantum dots with porous structures. **Methods.** Empirical and analytical methods were used in this work. **Results.** The volt-ampere characteristics of photosensitive structures are obtained. The dependence of the increase in saturation current values on the etching time and the depth of the quantum dots is revealed. **Conclusion.** The hybrid coating of porous silicon and WS₂ and MoS₂ quantum dots has a positive effect on the electrical characteristics of solar cells. However, further research is required on the dependence of increasing the efficiency of solar cells on the volume of applied quantum dots.

Keywords – solar cell; porous silicon; quantum dots; efficiency; electrochemical etching.

✉ grigorev.dp@ssau.ru (Danil P. Grigoriev)

 © Natalia A. Poluektova et al., 2024

References

1. D. B. Tretyakov et al., “Application of silicon avalanche photodiodes for recording single photons in a quantum cryptography facility,” in *Fotonika 2021: tez. dokl. Rossiyskoy konferentsii i shkoly molodykh uchenykh po aktual'nykh problemam poluprovodnikovoy fotoelektroniki (s uchastiem inostrannykh uchenykh)*, Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021, p. 113, doi: <https://doi.org/10.34077/RCSP2021-113>. (In Russ.)
2. Yu. A. Anis'ko, E. N. Shcherbakova, and L. A. Anis'ko, “Application of photometry in the diagnosis of COVID-19 infection,” in *Novye napravleniya razvitiya priborostroeniya: mat. 15-y Mezhd. nauch.-tekhn. konf. molodykh uchenykh i studentov*, Minsk, Apr. 20–22, 2022, p. 117, url: <https://rep.bntu.by/handle/data/111788>. (In Russ.)
3. A. Zil'garaeva et al., “Spectrometric method and optical sensor to improve the accuracy of non-invasive monitoring of blood concentrations,” *Vestnik KazATK*, vol. 126, pp. 335–342, 2023, doi: <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-126-3-335-342>. (In Russ.)
4. I. S. Shul'gina, “Solar cells with graphene and carbon nanotubes on silicon,” in *Aktual'nye nauchnye issledovaniya: sb. st. IV Mezhd. nauch.-prakt. konf.*, Penza, Feb. 20, 2022, pp. 86–90, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48014853>. (In Russ.)

5. A. Ya. Fedchenko, "Photovoltaic solar energy," *Aktual'nye voprosy sovremennoy nauki i obrazovaniya: sb. st. X Mezhd. nauch.-prakt. konf.*, Penza, May 20, 2021, p. 10, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45827818>. (In Russ.)
6. S. Kh. Suleymanov et al., "Optical characteristics of anti-reflection coatings based on $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ for silicon solar cells," *Zhurnal prikladnoy spektroskopii*, vol. 87, no. 4, pp. 667–671, 2020, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43818140>. (In Russ.)
7. K. Kh. Nusupov, D. I. Bakranova, and Sh. A. Nauryzbekova, "Diamond-like carbon based anti-reflective coatings for silicone solar batteries," *Vestnik Kazakhstansko-Britanskogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 17, no. 3, pp. 80–84, 2021, url: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/article/view/190>. (In Russ.)
8. V. N. Korchagin and I. A. Sysoev, "Study of functional coatings based on polyvinyl butyral and silver nanoparticles for solar cells," *Computational Nanotechnology*, vol. 7, no. 1, pp. 19–25, 2020, doi: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2020-7-1-19-25>. (In Russ.)
9. A. V. Vasin and N. B. Rybin, "Study of porous silicon, promising as an anti-reflection coating for solar cells," in *Sovremennyye tekhnologii v nauke i obrazovanii – STNO-2022: sb. tr. V Mezhd. nauch.-tekhn. foruma*, Ryazan', March 2–4, 2022, pp. 117–121, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49271473>. (In Russ.)
10. A. S. Erofeev, I. A. Shishkin, and N. V. Latukhina, "Degradation of solar cells based on porous silicon," *Vestnik molodykh uchennykh i spetsialistov Samarskogo universiteta*, vol. 16, no. 1, pp. 267–272, 2020, url: <https://journals.ssau.ru/smus/article/download/9294/8540>. (In Russ.)
11. N. A. Poluektova et al., "Investigation of electrical properties of photosensitive structures of reduced dimension based on silicon," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 16–23, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.3.16-23>. (In Russ.)
12. V. N. Korchagin, I. A. Sysoev, and A. A. Bobrov, "Functional coatings for solar cells based on polyvinyl butyral and carbon quantum dots," *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yaroslava Mudrogo*, vol. 130, no. 1, pp. 58–70, 2023, doi: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2023.1\(130\).58-70](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2023.1(130).58-70). (In Russ.)
13. T. G. Danilina et al., "Lead sulfide quantum dots: production and practical use," in *Sovremennyye problemy teoreticheskoy i eksperimental'noy khimii: Mezhvuzovskiy sb. nauch. trud. XIV Vserossiyskoy konf. molod. uchen. s mezhd. uchastiem*, Saratov, Oct. 1–31, 2020, pp. 19–20, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44299626>. (In Russ.)
14. A. A. Ryabko, "Physical and technological basis for the formation of hybrid nanosystems "Zinc oxide nanorods–colloidal quantum dots"," Cand. Tech. Sciences dissertation abstract, Saint Petersburg, 2022. (In Russ.)
15. N. A. Poluektova et al., "Investigation of electrical properties of photosensitive structures of reduced dimension based on silicon coated with rare earth fluorides," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 67–73, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.67-73>. (In Russ.)
16. A. R. Rymzhina et al., "Synthesis and study of TMDs for use in photodetectors," in *XXI Vserossiyskaya molodezhnaya samarskaya konkurs-konferentsiya po optike, lazernoy fizike i fizike plazmy, posvyashchennaya 300-letiyu RAN: sb. tez.*, Samara, Nov. 14–18, 2023, pp. 259–260, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61200077>. (In Russ.)
17. S. Kumar et al., "A systematic review on 2D MoS_2 for nitrogen dioxide (NO_2) sensing at room temperature," *Materials Today Communications*, vol. 34, p. 105045, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105045>.

Information about the Authors

Natalia A. Poluektova, postgraduate student of the Department of Nanoengineering, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: semiconductor physics, methods of creation, modeling and research of micro- and nanostructures, photovoltaics.

E-mail: natapolivekt37@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4189-6192>

SPIN-code (eLibrary): 5791-7785

AuthorID (eLibrary): 1240561

Daria A. Shishkina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the Department of Nanoengineering, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: porous silicon, silicon nanowires, optical coatings, photovoltaic converters, biomedicine.

E-mail: daria.lizunkova@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4118-1429>

SPIN-code (eLibrary): 5722-5240

AuthorID (eLibrary): 904558

ResearcherID (WoS): AAG-4607-2020

Danil P. Grigoriev, postgraduate student of the Department of Radioelectronic Systems, junior researcher at the Space Instruments Engineering Institute (IKP-214), Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: devices for detecting cosmic microparticles. Signal processing based on neural networks. Development of application software for FPGA-based computing cores and devices of space scientific equipment.

E-mail: grigorev.dp@ssau.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8413-379X>

SPIN-code (eLibrary): 3058-3584

AuthorID (eLibrary): 1111119