Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 621.892

Оригинальная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.А. Кравцов^{1,2}, О.В. Девицкий^{1,2}, Д.С. Кулешов², А.С. Пашенко¹

¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»

344006, Россия, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

²ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

355017, Ставрополь, ул. Пушкина, 1

sanya-kravtsov@ya.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.617

Аннотация: В рамках работы на кремниевых солнечных элементах были получены полимерные функциональные покрытия с наночастицами серебра. Размер наночастиц, использовавшихся для создания покрытий составил ~100 нм. Впервые была исследована микроструктура полученных покрытий методом сканирующей электронной микроскопии. Было показано, что наночастицы имеют достаточно высокую и равномерную плотность распределения в покрытии. В покрытиях, полученных с помощью метода осушения присутствуют единичные дефекты в виде отсутствия пленки. Данные дефекты предположительно обусловлены перепадами микрорельефа на поверхности солнечных элементов и могут быть устранены путем повторного нанесения пленки. Проведенные экспериментальные исследования квантового выхода фотопреобразователей показали, что функциональные покрытия на основе полимеров с наночастицами серебра позволяют существенно улучшить характеристики кремниевых солнечных элементов.

Ключевые слова: солнечные элементы, наночастицы серебра, функциональные покрытия, микроструктура, поливинилбутираль, морфология, плазмонный резонанс, увеличение эффективности, квантовый выход.

1. Введение

Солнечная энергетика на сегодняшний день является одной из самых динамично развивающихся отраслей альтернативной чистой энергетики благодаря относительной дешевизне фотопреобразователей и значительному прогрессу в области технологии в течение последних 20 лет. Усилия исследователей в данной области направлены на увеличение эффективности солнечных элементов. Наиболее перспективными направлениями являются оптимизация конструкции солнечных элементов и применение новых материалов [1-3]. Дешевым и эффективным подходом для улучшения характеристик фотопреобразователей является модификация их поверхности [4]. Преимущество данного способа заключается в том, что такие покрытия не требуют внесения изменений в конструкцию и технологию изготовления солнечных элементов. В рамках данного подхода можно выделить методы текстурирования поверхности, нанесение антиотражающих покрытий, использование функциональных покрытий [1, 5, 6]. Увеличение эффективности преобразования солнечного

света за счет функциональных покрытий особенно актуально для тонкопленочных солнечных элементов, поскольку их собственное поглощение относительно невелико [7].

Антиотражающие покрытия наиболее широко используются для модификации солнечных элементов. Прирост эффективности солнечных элементов с антиотражающим покрытием достигается за счет уменьшения потерь на отражение солнечного излучения. Подавляющее большинство произведенных солнечных элементов имеет заводское антиотражающее покрытие. Прирост поглощения за счет использования антиотражающих покрытий в среднем составляет 10–20 % и может достигать 30 % [8].

Текстурирование позволяет увеличить поглощение излучения в активном слое фотопреобразователя за счет многократного переотражения и увеличения длины пути лучей [9]. Для кремниевых солнечных элементов наиболее распространенным вариантом текстурирования является создание пирамидообразных структур на поверхности. Данная модификация способна увеличить поглощение солнечных лучей фотопреобразователем на ~5–15 % [9].

К функциональным покрытиям относятся так называемые up- и down- конверсионные преобразующие покрытия [10]. Их принцип работы основан на преобразовании части спектра солнечного излучения, не участвующего в генерации электронно-дырочных пар, в излучение с длинами волн в пределах спектральной характеристики фотопреобразователя.

Особое место среди функциональных покрытий занимают покрытия на основе наночастиц, и в частности наночастиц серебра [1, 11-16]. За счет явления поверхностного плазмонного резонанса наночастицы серебра могут вносить существенный вклад в процессе разделения зарядов за счет электромагнитного поля. Кроме того, массив наночастиц на поверхности солнечного элемента, аналогично текстурированным покрытиям, позволяет увеличить эффективную длину пути солнечных лучей, в результате чего возрастает эффективность преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию.

В рамках данной работы на высокоэффективных кремниевых солнечных элементах были получены полимерные функциональные покрытия на основе поливинилбутирала с наночастицами серебра (ПВБ-Ag), исследована микроструктура полученных покрытий и показана их эффективность.

2. Материалы и методы

В качестве исходных экспериментальных образцов были взяты высокоэффективные кремниевые солнечные элементы производства

корпорации SunPower с эффективностью преобразования солнечного излучения 22 %. Образцы ФЭП имели размер 125×20 мм, на фронтальной поверхности отсутствовала контактная сетка.

Для нанесения на них полимерных функциональных покрытий с наночастицами серебра был приготовлен пленкообразующий раствор. Пленкообразующий раствор представлял собой смесь двух растворов – золя серебра в изопропиловом спирте и раствора поливинилбутираля в изопропиловом спирте. Золь серебра был получен методом химического восстановления боргидридом натрия [14].

Покрyтия ПВБ- Ag на солнечных элементах были получены методом «осушения». Подробная процедура получения покрытий представлена в работах [16-18].

Спектры поглощения золя серебра в диапазоне длин волн от 320 до 600 нм были измерены на спектрофотометре СФ-56. Размер наночастиц серебра в золе был оценен методом фотонно-корреляционной спектроскопии на приборе Photocor Complex. Микрофотографии образцов солнечных элементов с покрытием ПВБ- Ag были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA3-LMH с системой определения элементного состава AZtecEnergy Standard/X-max20(standard). Для получения микрофотографий использовались режимы контрастной топографии (SE-детектор) и полевой эмиссии (FE-SEM). Исследование спектральных характеристик образцов проводили на лабораторной экспериментальной установке путем измерения внешнего квантового выхода (EQE) в диапазоне от 300 до 1200 нм.

3. Обсуждение результатов

Известно, что физические и оптические свойства наночастиц серебра находятся в сильной зависимости от морфологии и размеров. Так, например, в работе [11] показано, что при увеличении размера наночастиц от 20 до 60 нм происходит сдвиг полосы оптического поглощения, соответствующей квадрупольному плазмонному резонансу, с 370 до 450 нм, при дальнейшем увеличении размера наночастиц появляются дополнительные полосы поглощения на 600–700 нм, связанные с дипольным резонансом. Таким образом варьируя размер наночастиц можно изменять их спектр поглощения в достаточно широких пределах. Кроме того, существуют работы, в которых путем моделирования показано, что существует оптимальное соотношение плотности распределения наночастиц по поверхности солнечного элемента и размера наночастиц, при котором достигается наибольшее увеличение эффективности фотопреобразователя за счет переотражения и рассеяния

света на наночастицах [13]. Указывается, что оптимальный размер наночастиц – около 100 нм.

Рис. 1. Спектр поглощения золя серебра (а), и гистограмма распределения гидродинамических радиусов наночастиц серебра (б).

Рис.2. SE-SEM (а) и FE-SEM (б) снимки солнечного элемента с покрытием ПВБ- Ag

В рамках данной работы были получены наночастицы серебра в форме золя, которые затем были исследованы методами спектрофотометрии и фотонно-корреляционной спектроскопии (см. рис. 1). Исследования показали, что максимум поглощения наночастиц находится около 438 нм (см. рис. 1 а), что приблизительно соответствует размеру частиц около 100 нм. Гистограмма распределения

гидродинамических радиусов наночастиц подтверждает результаты спектрофотометрии. Средний радиус наночастиц серебра составляет около 50 нм (см. рис. 1 б).

Далее золь наносеребра использовался для получения пленкообразующего раствора, который затем наносился на солнечные элементы. На рис. 2 представлены результаты исследования пленок ПВБ-Ag методом сканирующей электронной микроскопии.

На микрофотографии в режиме контрастной топологии видно, что поверхность солнечного элемента является текстурированной (см. рис. 2 а). Рельеф поверхности представлен массивом из неупорядоченных пирамид с шириной основания от 500 нм до 2 мкм. На поверхности исследуемого образца присутствует множество наночастиц серебра, видимых на снимке в виде белых точек. Наночастицы распределены равномерно по поверхности всего исследуемого участка. Распределение частиц носит неупорядоченный характер. Также на микрофотографии присутствует участок с дефектом покрытия. На данном участке отсутствует покрытие, о чем можно судить по большей контрастности и резкости изображения на месте дефекта. Более детально рассмотреть структуру дефекта можно на FE-SEM изображении (см. рис. 2 б). На микрофотографии хорошо видны края пленки ПВБ-Ag и также заметно, что без пленки изображение поверхности солнечного элемента более резкое, – полимерная пленка на микрофотографии создает некий эффект «размытия» изображения. Подобные дефекты на поверхности образца присутствуют в малом количестве и предположительно обусловлены колебаниями микрорельефа поверхности солнечных элементов. Нанесение дополнительного слоя покрытия позволит решить проблему образования подобного рода дефектов.

Рис. 3. EDS-спектр покрытия ПВБ-Ag на солнечном элементе.

Далее для количественной оценки наночастиц серебра на поверхности солнечных элементов был проведен энергодисперсионный элементный анализ образцов. На рис. 3 представлены результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Расшифровка спектра приведена в Таблице 1.

Присутствие элементов *Si* и *N* связано с тем, что заводское антиотражающее текстурированное покрытие солнечного элемента выполнено из нитрида кремния. Большая доля углерода (47 ат. %) и присутствие кислорода (1,02 ат. %) объясняется присутствием полимера поливинилбутирала. Доля серебра составляет лишь 0,15 ат. % или 0,03 ат. %.

Таблица 1. Расшифровка EDS-спектра покрытия ПВБ- Ag на солнечном элементе.

Элемент	Тип линии	Содержание элемента, вес. %	Содержание элемента, атом. %
<i>C</i>	К серия	28,60	47,71
<i>N</i>	К серия	1,41	2,02
<i>O</i>	К серия	0,82	1,02
<i>Si</i>	К серия	69,02	49,23
<i>Ag</i>	L серия	0,15	0,03

Эффект покрытия ПВБ- Ag оценивался путем сравнения двух солнечных элементов из одной партии аналогичных по своим характеристикам. На один из солнечных элементов было нанесено покрытие. На рис. 4 представлены результаты измерения внешнего квантового выхода солнечного элемента с покрытием ПВБ- Ag и образца сравнения.

Рис.4. Спектральная зависимость внешнего квантового выхода (EQE – external quantum output).

Для образца с нанесенным полимерным покрытием с наночастицами серебра наблюдается значительный прирост внешнего квантового выхода в видимой и ближней ИК области спектра. Увеличение EQE в интервале 450–1000 нм составляет порядка 10%. Формы спектральных зависимостей достаточно близки, поэтому можно сделать предположение, что увеличение внешнего квантового выхода достигается за счет увеличения поглощаемого солнечными элементами излучения вследствие переотражения и рассеяния света на наночастицах [1].

4. Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что функциональные покрытия на основе полимеров с наночастицами серебра являются простым и эффективным способом улучшения характеристик кремниевых солнечных элементов. Процесс получения данных покрытий экономичен и не требует изменения технологии изготовления самих солнечных элементов, в то время как прирост квантового выхода в видимом и ближнем ИК диапазоне составляет 10%. Покрытия, нанесенные на солнечный элемент в один цикл имеют единичные дефекты в виде локального отсутствия покрытия. Подобных дефектов можно избежать путем повторного нанесения покрытия на поверхность солнечных элементов.

Публикация подготовлена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра Южного научного центра РАН на 2020 год (номер госрегистрации АААА-А19-119040390081-2).

Библиографический список

1. **Enrichi, F.** Plasmonic enhanced solar cells: Summary of possible strategies and recent results / F. Enrichi, A. Quandt, G.C. Righini // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – V. 82. – Part 3. – P. 2433-2439. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.094.
2. **Kamat, P.V.** Quantum dot solar cells. The next big thing in photovoltaics / P.V. Kamat // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. – 2013. – V. 4. – I. 6. – P. 908-918. DOI: 10.1021/jz400052e.
3. **Xing, Y.** A review of concentrator silicon solar cells / Y.Xing, P. Xan, S. Wang, et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 51. – P. 1697-1708. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.035.
4. **Richard, B.S.** The role of polymers in the luminescence conversion of sunlight for enhanced solar cell performance / B.S. Richard, A. Shalav // *Synthetic Metals*. – 2005. – V. 154. – I. 1-3. – P. 61-64. DOI: 10.1016/j.synthmet.2005.07.021.
5. **Richards, B.S.** Enhancing the performance of silicon solar cells via the application of passive luminescence conversion layers / B.S. Richards // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2006. – V. 90. – I. 15. – P. 2329-2337. DOI: 10.1016/j.solmat.2006.03.035.
6. **Cui, H.** A novel silver nanoparticle assisted texture as broadband antireflection coating for solar cell applications / H. Cui, S. Pillai, P. Campbell, M. Green // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2013. – V. 109. – P. 233-239. DOI: 10.1016/j.solmat.2012.11.009.

7. **Singh, G.** Plasmon enhanced light trapping in thin film *GaAs* solar cells by *Al* nanoparticle array / G.Singh, S.S.Verma // *Physics Letters A*. – 2019. – V. 383. – I. 13. – P. 1526-1530. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.02.008.
8. **Swatowska, B.** The role of antireflective coatings in silicon solar cells - The influence on their electrical parameters / B. Swatowska, T. Stapinski, K. Drabczyk, P. Panek // *Optica Applicata*. – 2011. – V. 41. – № 2. – P. 487-492.
9. **Chen, B.** Blade-coated perovskites on textured silicon for 26 %-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells / B.Chen, Z.J. Yu, S.Manzoor, et al. // *Joule*. – 2020. – V. 4. – I. 4. – P. 850-864. DOI: 10.1016/j.joule.2020.01.008.
10. **Day, J.** Improving spectral modification for applications in solar cells: A review / J. Day, S. Senthilarasu, T.K. Mallick // *Renewable Energy*. – 2019. – V. 132. – P. 186-205. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.101.
11. **Singh, G.** Design and analysis of thin film *GaAs* solar cells using silver nanoparticle plasmons / G. Singh, S.S. Verma // *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*. – 2019. – V. 37. – Art. № 100731. – 8 p. DOI: 10.1016/j.photonics.2019.100731.
12. **Tabrizi, A.A.** Efficiency improvement of a silicon-based thin-film solar cell using plasmonic silver nanoparticles and an antireflective layer / A.A. Tabrizi, A. Pahlavan // *Optics Communications*. – 2020. – V. 454. – Art. № 124437. – 8 p. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.124437.
13. **Starowicz, Z.** Influence of *Ag* nanoparticles microstructure on their optical and plasmonic properties for photovoltaic applications / Z. Starowicz, A. Kędra, K. Berent, et al. // *Solar Energy*. – 2017. – V. 158. – P. 610-616. DOI: 10.1016/j.solener.2017.10.020.
14. **Lunin, L.S.** Synthesis and study of thin *TiO₂* films doped with silver nanoparticles for the antireflection coatings and transparent contacts of photovoltaic converters / L.S. Lunin, M.L. Lunina, A.A. Kravtsov, I.A. Sysoev, A.V. Blinov // *Semiconductors*. – 2016. – V. 50. – I. 9. – P. 1231-1235. DOI: 10.1134/S1063782616090141.
15. **Lunin, L.S.** Effect of the *Ag* nanoparticle concentration in *TiO₂ – Ag* functional coatings on the characteristics of *GaInP/GaAs/Ge* photoconverters / L.S. Lunin, M.L. Lunina, A.A. Kravtsov, et al. // *Semiconductors*. – 2018. – V. 52. – I. 8. – P. 993-996. DOI: 10.1134/S1063782618080122.
16. **Lunin, L.S.** Polymer films with silver nanoparticles improve the spectral characteristics of photovoltaic converters / L.S. Lunin, O.V. Devitskii, A.A. Kravtsov, A.S. Pashchenko // *Technical Physics Letters*. – 2020. – V. 46. – I. 1. – P. 98-101. DOI: 10.1134/S1063785020010265.
17. **Девицкий, О.В.** Влияние концентрации наночастиц серебра в пленках поливинилбутерала на характеристики кремниевых солнечных элементов / О.В. Девицкий, А.А. Кравцов, И.А. Сысоев // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2019. – № 5. – С. 214-223. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-5-214-223.
18. **Девицкий, О.В.** Исследование функциональных покрытий поливинилбутирала с наночастицами серебра для фотоэлектрических преобразователей / О.В. Девицкий, А.А. Кравцов // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2019. – Вып. 11. – С. 574-581. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.574.

References:

1. **Enrichi, F.** Plasmonic enhanced solar cells: Summary of possible strategies and recent results / F. Enrichi, A. Quandt, G.C. Righini // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

- 2018. – V. 82. – Part 3. – P. 2433-2439. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.094.
2. **Kamat, P.V.** Quantum dot solar cells. The next big thing in photovoltaics / P.V. Kamat // The Journal of Physical Chemistry Letters. – 2013. – V. 4. – I. 6. – P. 908-918. DOI: 10.1021/jz400052e.
3. **Xing, Y.** A review of concentrator silicon solar cells / Y.Xing, P. Xan, S. Wang, et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 51. – P. 1697-1708. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.035.
4. **Richard, B.S.** The role of polymers in the luminescence conversion of sunlight for enhanced solar cell performance / B.S. Richard, A. Shalav // Synthetic Metals. – 2005. – V. 154. – I. 1-3. – P. 61-64. DOI: 10.1016/j.synthmet.2005.07.021.
5. **Richards, B.S.** Enhancing the performance of silicon solar cells via the application of passive luminescence conversion layers / B.S. Richards // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2006. – V. 90. – I. 15. – P. 2329-2337. DOI: 10.1016/j.solmat.2006.03.035.
6. **Cui, H.** A novel silver nanoparticle assisted texture as broadband antireflection coating for solar cell applications / H. Cui, S. Pillai, P. Campbell, M. Green // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2013. – V. 109. – P. 233-239. DOI: 10.1016/j.solmat.2012.11.009.
7. **Singh, G.** Plasmon enhanced light trapping in thin film *GaAs* solar cells by *Al* nanoparticle array / G.Singh, S.S.Verma // Physics Letters A. – 2019. – V. 383. – I. 13. – P. 1526-1530. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.02.008.
8. **Swatowska, B.** The role of antireflective coatings in silicon solar cells - The influence on their electrical parameters / B. Swatowska, T. Stapinski, K. Drabczyk, P. Panek // Optica Applicata. – 2011. – V. 41. – № 2. – P. 487-492.
9. **Chen, B.** Blade-coated perovskites on textured silicon for 26 %-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells / B.Chen, Z.J. Yu, S.Manzoor, et al. // Joule. – 2020. – V. 4. – I. 4. – P. 850-864. DOI: 10.1016/j.joule.2020.01.008.
10. **Day, J.** Improving spectral modification for applications in solar cells: A review / J. Day, S. Senthilarasu, T.K. Mallick // Renewable Energy. – 2019. – V. 132. – P. 186-205. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.101.
11. **Singh, G.** Design and analysis of thin film *GaAs* solar cells using silver nanoparticle plasmons / G. Singh, S.S. Verma // Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications. – 2019. – V. 37. – Art. № 100731. – 8 p. DOI: 10.1016/j.photonics.2019.100731.
12. **Tabrizi, A.A.** Efficiency improvement of a silicon-based thin-film solar cell using plasmonic silver nanoparticles and an antireflective layer / A.A. Tabrizi, A. Pahlavan // Optics Communications. – 2020. – V. 454. – Art. № 124437. – 8 p. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.124437.
13. **Starowicz, Z.** Influence of Ag nanoparticles microstructure on their optical and plasmonic properties for photovoltaic applications / Z. Starowicz, A. Kędra, K. Berent, et. al. // Solar Energy. – 2017. – V. 158. – P. 610-616. DOI: 10.1016/j.solener.2017.10.020.
14. **Lunin, L.S.** Synthesis and study of thin *TiO₂* films doped with silver nanoparticles for the antireflection coatings and transparent contacts of photovoltaic converters / L.S. Lunin, M.L. Lunina, A.A. Kravtsov, I.A. Sysoev, A.V. Blinov // Semiconductors. – 2016. – V. 50. – I. 9. – P. 1231-1235. DOI: 10.1134/S1063782616090141.
15. **Lunin, L.S.** Effect of the Ag nanoparticle concentration in *TiO₂* – Ag functional coatings on the characteristics of *GaInP/GaAs/Ge* photoconverters / L.S. Lunin, M.L. Lunina, A.A. Kravtsov, et al. // Semiconductors. – 2018. – V. 52. – I. 8. – P. 993-996. DOI: 10.1134/S1063782618080122.

16. **Lunin, L.S.** Polymer films with silver nanoparticles improve the spectral characteristics of photovoltaic converters / L.S. Lunin, O.V. Devitskii, A.A. Kravtsov, A.S. Pashchenko // Technical Physics Letters. – 2020. – V. 46. – I. 1. – P. 98-101. DOI: 10.1134/S1063785020010265.
17. **Devitsky, O.V.** Vliyanie kontsentratsii nanochastits serebra v plenках polivinilbuteralya na kharakteristiki kremnievykh solnechnykh ehlementov [Influence of concentration of silver nanoparticles in polyvinyl butteral films on characteristics of silicon solar elements] / O.V. Devitsky, A.A. Kravtsov, I.A. Sysoev // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. – 2019. – № 5. – P. 214-223. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-5-214-223. (In Russian).
18. **Devitsky, O.V.** Issledovanie funktsional'nykh pokrytii polivinilbutiralya s nanochastitsami serebra dlya fotoehlektricheskikh preobrazovatelei [Study of functional coatings of polyvinyl butyral with silver nanoparticles for photovoltaic converters] / O.V. Devitsky, A.A. Kravtsov // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2019. – I. 11. – P. 574-581. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.574. (In Russian).

Original paper

THE MICROSTRUCTURE OF POLYMER FUNCTIONAL COATINGS WITH SILVER NANOPARTICLES FOR SOLAR CELLS

A.A. Kravtsov^{1,2}, O.V. Devitskiy^{1,2}, D.S. Kuleshov², A.S. Pashchenko¹

¹*Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of The Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russia*

²*North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.617

Abstract: Within the framework of this study, functional polymer coatings with silver nanoparticles were obtained on the surface of silicon solar cells. The size of the nanoparticles used to create the coatings was ~100 nm. For the first time, the microstructure of the obtained coatings was investigated by scanning electron microscopy. It was shown that nanoparticles have a sufficiently high and uniform distribution density in the coating. In the coatings obtained using the drying method, that there are single defects in the form of the absence of a film. These defects are presumably due to differences in microrelief on the surface of solar cells and can be eliminated by reapplying the film. Experimental studies of the quantum yield of photoconverters have shown that functional coatings based on polymers with silver nanoparticles can significantly improve the characteristics of silicon solar cells.

Keywords: solar cells, silver nanoparticles, functional coatings, microstructure, polyvinyl butyral, morphology, plasmon resonance, efficiency increase, quantum yield.

Кравцов Александр Александрович – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», научный сотрудник научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Девицкий Олег Васильевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», старший научный сотрудник научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Кулешов Дмитрий Сергеевич – инженер научно-исследовательской лаборатории физико-химических методов анализа научно-лабораторного комплекса чистых зон ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Пащенко Александр Сергеевич – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»

Aleksandr A. Kravtsov – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Nanoheterostructures for Microwave Electronics and Photonics, Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and Researcher of the Scientific and Educational Center for Photovoltaics and Nanotechnology North Caucasus Federal University

Oleg V. Devitskiy – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Nanoheterostructures for Microwave Electronics and Photonics, Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and Senior Researcher of the Scientific and Educational Center for Photovoltaics and Nanotechnology North Caucasus Federal University

Dmitry S. Kuleshov – Engineer of the research laboratory of physical and chemical methods of analysis of the scientific laboratory complex of clean zones of the North Caucasus Federal University

Alexander S. Pashchenko – Ph. D., Leading Researcher of the Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Nanoheterostructures for Microwave Electronics and Photonics, Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

Поступила в редакцию/received: 15.09.2020; после рецензирования/revised: 05.10.2020; принята/accepted 15.10.2020.