

Исследование оптических свойств фоточувствительных структур пониженной размерности на основе кремния

Н.А. Полуэктова , Д.А. Шишкина , А.Н. Базанов,
Р.А. Перебалин, И.А. Шишкин , Н.В. Латухина 

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

Аннотация – В данной работе предлагается метод снижения потерь энергии фоточувствительных структур на основе нанокристаллического кремния с применением пассивирующих покрытий из фторида диспрозия. Поскольку данный материал обладает хорошими оптическими и фотоэлектрическими свойствами, то при получении структур Si/DyF₃ диэлектрическая пленка позволяет снизить количество рекомбинационных центров и увеличить поглощение света. Показаны методики создания и исследования фоточувствительных структур с покрытиями. Описана методика определения толщины покрытия фторида диспрозия за счет интерференции света. Приведены результаты исследования спектров фоточувствительности и коэффициента отражения полученных фоточувствительных структур. Показано положительное влияние наноструктур кремния, а также пленок фторида диспрозия на спектры фоточувствительности структур. С помощью полученных данных планируется улучшение имеющейся технологии создания фоточувствительных структур на основе пористого кремния с целью большего повышения их выходных характеристик.

Ключевые слова – фоточувствительные структуры; оптические покрытия; пористый кремний; фторид диспрозия.

Введение

В настоящее время кремний и арсенид галлия чаще всего применяются для изготовления фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Несмотря на более высокие эксплуатационные характеристики арсенид-галлиевых ФЭП, кремний остается фаворитом в выборе сырья для производства, что объясняется широким распространением кремниевого сырья, а также наличием качественно разработанной технологии создания самого материала и приборов на его основе. Вследствие этого кремниевые ФЭП выгоднее в производстве за счет своей дешевизны по сравнению с арсенид-галлиевыми.

Характеристики кремниевых ФЭП с нанокристаллическим кремнием существенно выше, КПД структур на его основе может составлять 25–27 %. Это возможно в связи с реализацией квантово-размерных эффектов, увеличивающих поглощение вблизи ультрафиолетовой части диапазона. В качестве нанокристаллического материала может использоваться пористый кремний, по причине того что стенки его пор представляют собой хаотичную систему наноразмерных кристаллов. Кроме реализации квантово-размерных эффектов сравнительно большое количество пор позволяет увеличить площадь поглощающей поверхности ФЭП.

Одной из проблем ФЭП являются потери, связанные с отражением света, падающего на его по-

верхность. Решить эту проблему помогают разного рода просветляющие покрытия, благодаря им увеличивается поглощение солнечного элемента и, следовательно, уменьшаются отражение и потери [1–2].

В просветляющих покрытиях для солнечных элементов уменьшение отражения происходит вследствие интерференции лучей, отраженных от границ пленка – воздух и пленка – подложка. Для нормального падения показатель преломления просветляющей пленки n_2 должен быть равен квадратному корню из произведения значений показателей преломления n_3 и n_1 двух сред, граничащих с пленкой (подложка и покровный материал) $n_2 = (n_3 n_1)^{1/2}$. Далее для уменьшения отражения необходимо подобрать правильную толщину пленки. Разность хода лучей Δ при нормальном падении света на плоскую поверхность равняется удвоенной оптической толщине пленки: $\Delta = 2n_2 h_2$, где h_2 – геометрическая толщина пленки. Взаимное уничтожение интенсивности отраженных лучей при нормальном падении возможно, если: $\Delta = 2n_2 h_2 = \lambda/2$, отсюда $n_2 h_2 = \lambda/4$, где λ – длина волны излучения, для которого выполняется условие минимального отражения.

В работах [3–5] в качестве антиотражающих пленок для кремниевых ФЭП применяются алмазоподобные покрытия, пленки из оксидов кремния и гафния и слои наноструктурированного крем-

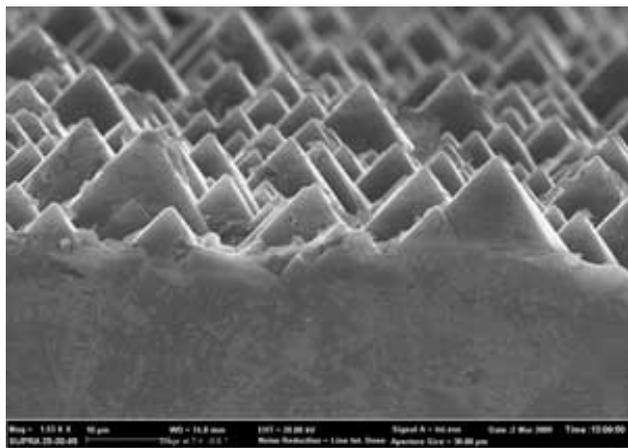


Рис. 1. Текстурированная поверхность (вид сбоку)
 Fig. 1. Textured surface (side view)

ния. В работе [6] авторы используют пористый кремний в качестве рабочего слоя солнечного элемента, что увеличивает его эффективность. При этом возникает новая проблема, связанная с появлением дополнительных центров рекомбинации. Для блокировки этих центров пористый кремний можно стабилизировать использованием специальных пассивирующих покрытий.

Подобрать оптимальную толщину слоя для шероховатой поверхности пористого кремния ранее не представлялось возможным, поскольку физика нанесения покрытия работает только для планарных структур, а в случае сложных поверхностей появляются неточности в расчетах оптимальной толщины покрытия.

В качестве стабилизирующих покрытий предлагается применять пленки фторида диспрозия, поскольку он обладает наиболее подходящими значениями показателя преломления и коэффициента прозрачности [7].

В данной работе приведены результаты исследования характеристик фоточувствительных структур с пористым слоем и покрытием фторида диспрозия различной толщины.

1. Методика эксперимента

Основой фоточувствительных структур были пластины монокристаллического кремния с текстурированной поверхностью и готовым *p-n*-переходом (рис. 1).

Далее методом анодного электрохимического травления на *n*-типе был сформирован пористый слой на всех образцах [8]. Травление проводилось в растворе плавиковой кислоты и этилового спирта в соотношении 1:1. Плотность тока составляла 10 мА/см². Толщина пористого слоя на каждой пластине была 10 мкм.

Таблица. Масса и толщина пленки DyF₃
 Table. DyF₃ film weight and thickness

№ образца	Масса DyF ₃ , г	Толщина пленки DyF ₃ , мкм
1	0,1	0,37
2	0,09	0,29
3	0,08	0,27
4	0,07	0,17
5	0,06	0,11
6	0,05	0,096
7	0,04	0,089
8	0,03	0,06
9	0,02	0,025
10	–	–
11	0,01	0,019
12	–	–
13	–	–
14	0,05	0,1

Алюминиевые контакты были нанесены методом термического испарения в вакууме с двух сторон: на *p*-сторону был нанесен сплошной контакт, на *n*-сторону – контакт в виде гребенки. Покрытие также наносилось методом термического испарения порошкообразного фторида диспрозия.

2. Методика определения толщины покрытия

Для определения толщины покрытия фторида диспрозия применяется цветовой метод [9]. Данный метод используется для экспресс-контроля толщины пленок SiO₂ и Si₃N₄ до 1,5 и 0,33 мкм соответственно. Точность определения толщины пленки данным методом 100–200 Å.

Вычисление толщины пленки фторида диспрозия осуществлялось по формуле

$$S_{\text{DyF}_3} = S_{\text{SiO}_2} \frac{n_{\text{DyF}_3}}{n_{\text{SiO}_2}}, \quad (1)$$

где S_{DyF_3} – толщина пленки фторида диспрозия, S_{SiO_2} – толщина пленки оксида кремния.

Соотношение показателей преломления DyF₃ и SiO₂ составляет 1,08 (Показатель преломления фторида диспрозия и оксида кремния – 1,6 и 1,48, соответственно [9]).

3. Методика исследования

Для исследования характеристик полученных образцов были проведены измерения спектров

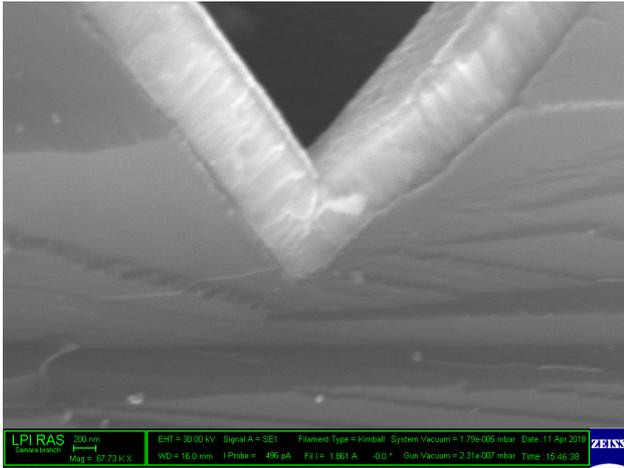


Рис. 2. РЭМ поперечного зеркального скла структуры возле стыка пирамид с пленкой фторида диспрозия
Fig. 2. SEM of a transverse mirror cleavage of the structure near the junction of pyramids with a film of dysprosium fluoride



Рис. 3. Схематическое изображение структуры
Fig. 3. Schematic representation of the structure

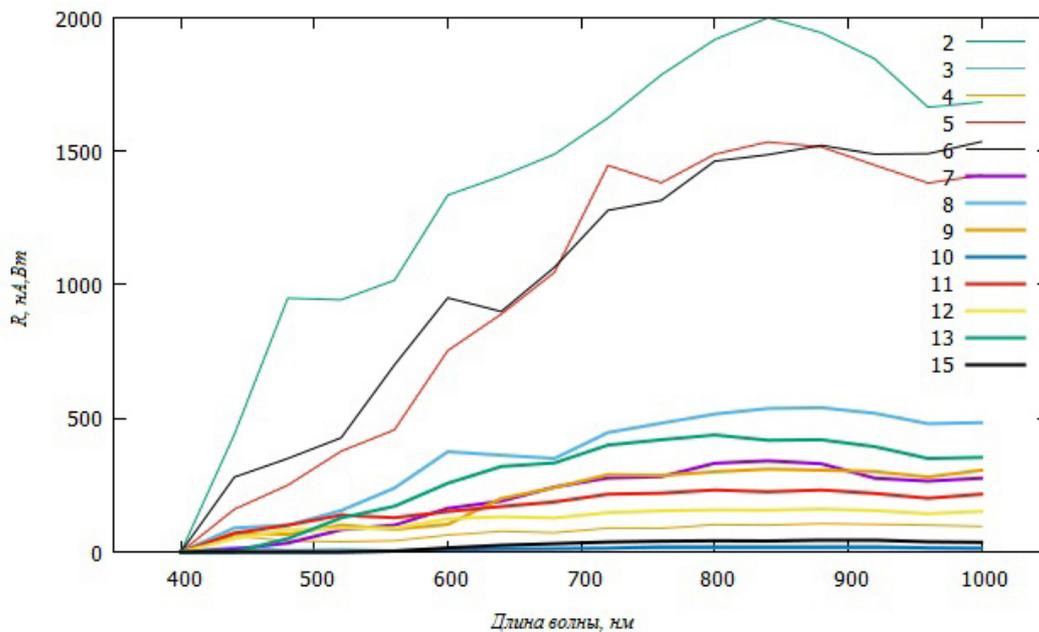


Рис. 4. Спектры фоточувствительности образцов 2-15
Fig. 4. Spectra of photosensitivity of samples 2-15

фоточувствительности и спектров коэффициента отражения.

Измерения спектров фоточувствительности проводились с помощью монохроматора МДР-3. Источником служила ксеноновая дуговая лампа марки ДКСЭЛ-100.

Для вычисления фоточувствительности применялась формула

$$R_{\lambda} = \frac{I_{ph}}{P}. \quad (2)$$

Измерения спектров отражения проводились на спектрофотометре Shimadzu UV-2450 в диапазоне от 190 до 1000 нм с шагом 0,5 нм.

4. Результаты

Далее представлены РЭМ (рис. 2) и схематическое изображение структуры с пленкой фторида диспрозия (рис. 3).

Поскольку покрытия из фторида диспрозия обладают пассивирующим эффектом, для тонких пленок может быть достаточно много открытых центров рекомбинации, что приводит к уменьшению фоточувствительности до значений образцов без покрытий (рис. 6).

Покрытие фторида диспрозия было нанесено равномерно по всей поверхности пирамиды. Однако очень тонкие пленки могут обладать дефек-

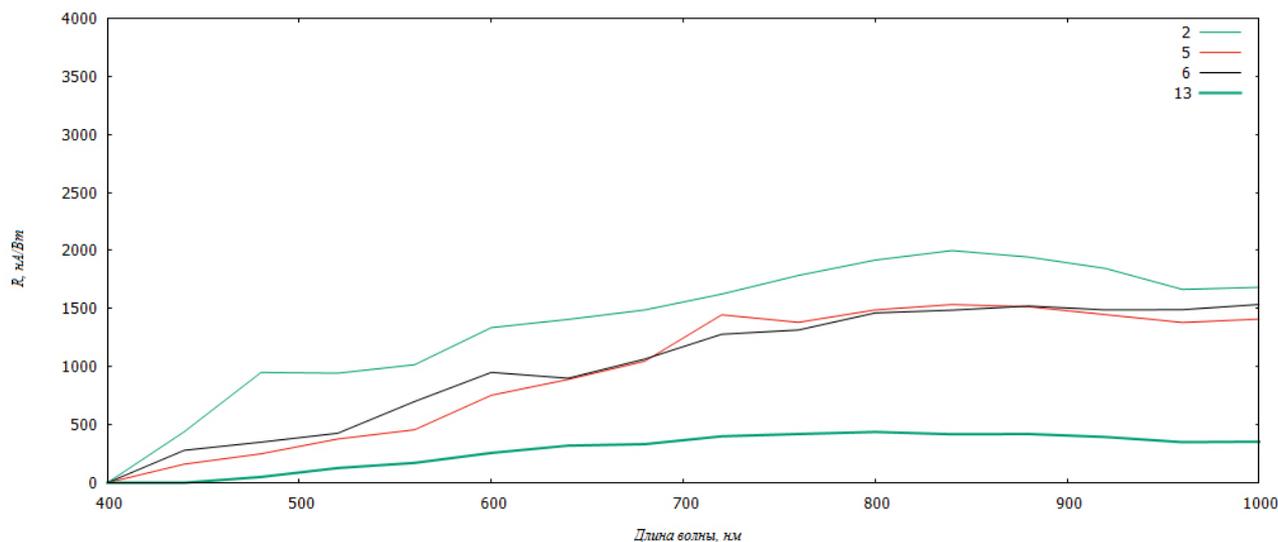


Рис. 5. Спектры фоточувствительности образцов 2, 5, 6 и 13
Fig. 5. Photosensitivity spectra of samples 2, 5, 6, and 13

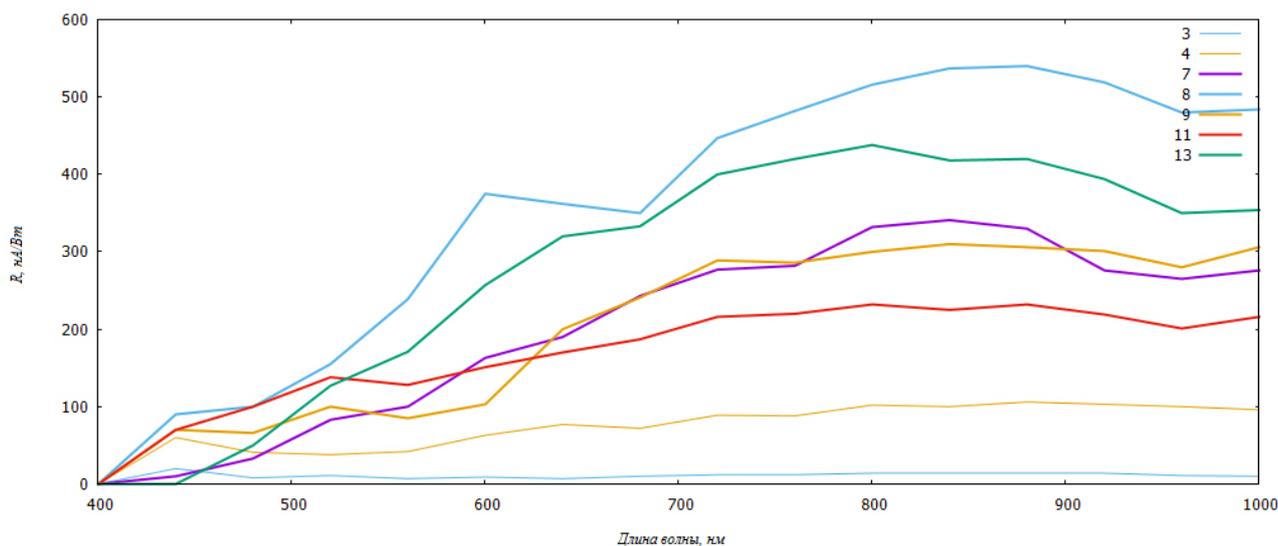


Рис. 6. Спектры фоточувствительности образцов 3, 4, 7-9, 11 и 13
Fig. 6. Photosensitivity spectra of samples 3, 4, 7-9, 11, and 13

тами и «рваться» о вершины пирамид, нарушая равномерность и влияя на свойства полученных структур.

На рис. 4 приведены спектры фоточувствительности образцов 2–15.

Из анализа графиков видно, что фоточувствительность структур сильно зависит от покрытия. Большинство образцов с покрытием (№ 1–9, 11, 14) имеют более высокую фоточувствительность, чем образцы без покрытия (№ 10, 12, 13, 15). Наилучшие характеристики – у образцов со средней толщиной покрытия – порядка 0,096–0,29 мкм (образцы № 2, 5, 6). Данные образцы обладают и малыми коэффициентами отражения (рис. 5). Образцы с меньшей толщиной покрытия (менее 0,1

мкм) имеют меньшую фоточувствительность. Следует отметить положительное влияние пористого слоя на фоточувствительность. Образцы с пористым слоем (№ 12 и 13) обладают более высокими характеристиками, чем образец без пористого слоя (№ 15). Для более корректного сравнения на рис. 5 показаны спектры фоточувствительности образцов 2, 5 и 6 (0,29 мкм, 0,11 мкм и 0,089 мкм) в сравнении с 13.

Наиболее эффективной оказалась толщина пленки 0,1 мкм, позволившая значительно увеличить фоточувствительность образца. Наибольшей фоточувствительностью обладает образец № 14, превышающий показатели других образцов более чем в десятки раз (20 000 нА/Вт от 700 до 850 нм).

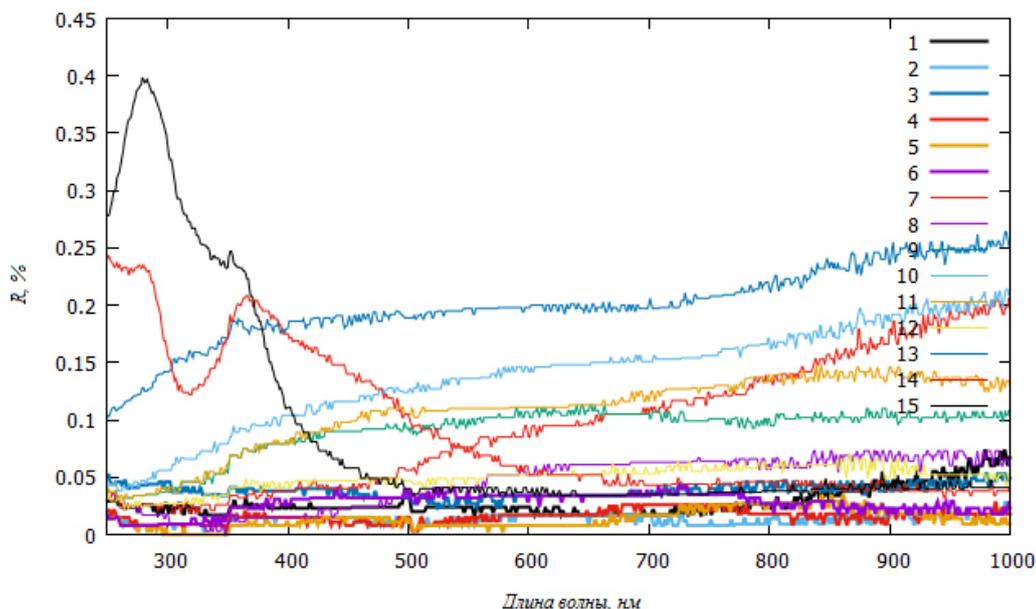


Рис. 7. Спектральные характеристики коэффициента отражения образцов 1–15
Fig. 7. Spectral characteristics of the reflection coefficient of samples 1–15

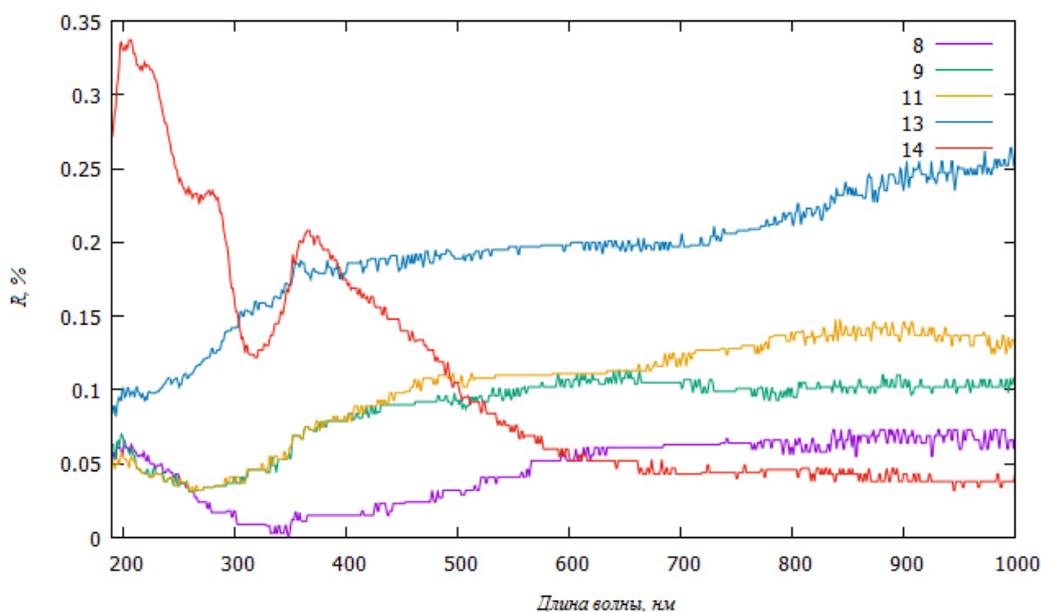


Рис. 8. Спектры коэффициента отражения образцов 8, 9, 11, 14 и 13
Fig. 8. Reflectance spectra of samples 8, 9, 11, 14, and 13

На рис. 7 показаны спектры коэффициента отражения образцов 1–15 в диапазоне длин волн 250–1000 нм.

Все структуры с покрытием имеют меньшее отражение (1–9, 11), чем образцы без покрытия (10, 12, 13). С уменьшением толщины покрытия падает коэффициент отражения. Имеются пики в коротковолновой части спектра, что может быть связано с интерференционными эффектами покрытия на пирамидальной поверхности (рис. 1). Различные коэффициенты отражения при одинаковых толщинах пористого слоя структур можно

объяснить влиянием неконтролируемых факторов, возникающих при изготовлении пористого кремния [10].

На рис. 8 приводятся спектры коэффициента отражения образцов 8, 9, 11 и 14 в сравнении с 13.

Анализ графиков выявляет, что пленки фторида диспрозия в целом снижают коэффициент отражения из-за уменьшения эффекта рассеяния. Образцы 2 и 4 с толщинами пленок 0,29 мкм и 0,17 мкм соответственно показывают наиболее равномерное снижение коэффициента отражения во всем исследуемом спектре. А образцы 8, 9, 11

и 14 (толщины пленок равны 0,06 мкм, 0,025 мкм, 0,019 мкм и 0,055 мкм), наоборот, обнаруживает повышение коэффициента отражения в коротковолновой части спектра и приближение характеристик этих образцов к характеристикам образца с пористым слоем. Это говорит о том, что уменьшение толщины пленок (менее 0,1 мкм) негативно сказывается на характеристиках структур.

Заключение

Таким образом, в работе выявлено значительное влияние пленок фторида диспрозия на спек-

тральные характеристики фоточувствительных структур. Исследование показало, что существует оптимальный диапазон толщин покрытия (0,1–0,29 мкм), позволяющий заметно повысить фоточувствительность структур. Одновременно с этим для ряда образцов наблюдается небольшое повышение отражения в коротковолновой области (порядка 0,2 %) и снижение коэффициента отражения структур в длинноволновой области. Из серии образцов наилучшими характеристиками обладает образец № 14 с толщиной пленки 0,11 мкм.

Список литературы

1. Upconversion in solar cells / W.G. Van Sark [et al.] // *Nanoscale Research Letters*. 2013. Vol. 8, no. 1. P. 81. DOI: <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-81>
2. Enhancing silicon solar cell efficiency by modifying the solar spectrum / C. Strumpel [et al.] // *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*. 2006. P. 87–90. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCPEC.2006.279370>
3. Тонкие просветляющие покрытия для солнечных элементов / А.М. Назаров [и др.] // *Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2017): мат. 12-й Международной конференции*. 2017. С. 466–468.
4. Изучение пленок оксида кремния и оксида гафния для создания просветляющих покрытий / Н.Р. Чарыкулыева [и др.] // *Молодежь в науке – 2016: сб. мат. Международной конференции молодых ученых*. 2017. С. 355–359.
5. Фотоэлектрические свойства структур на базе пористого кремния с одно- и двухслойными покрытиями / А.В. Дрондин [и др.] // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2017. Т. 20, № 4. С. 50–54. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7074>
6. Многослойные фоточувствительные структуры на основе пористого кремния и соединений редкоземельных элементов: исследования спектральных характеристик / Н.Ю. Кирсанов [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51, № 3. С. 367–371. DOI: <https://doi.org/10.21883/FTP.2017.03.44209.8377>
7. Рожков В.А., Петров А.И., Шалимова М.Б. Просветляющие покрытия из фторидов лантана, самария и диспрозия для кремниевых фотоэлектрических приборов // *Известия вузов. Физика*. 1994. № 4. С. 7–10.
8. Shishkin I.A., Lizunkova D.A., Latukhina N.V. The process of pore formation on a textured silicon substrate during electrochemical etching: 3D model // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1745, no. 1. P. 012004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1745/1/012004>
9. Шалимова М.Б. Эффект переключения проводимости с памятью и фотоэлектрические явления в слоистых структурах на основе пленочных фторидов РЗЭ: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Самара, 1997. 19 с.
10. Влияние неконтролируемых факторов на свойства пористого кремния / Н.В. Латухина [и др.] // *Актуальные проблемы физики твердого тела*. 2018. Т. 3. С. 63–65.

References

1. Van Sark W.G. et al. Upconversion in solar cells. *Nanoscale Research Letters*, 2013, vol. 8, no. 1, p. 81. DOI: <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-81>
2. Strumpel C. et al. Enhancing silicon solar cell efficiency by modifying the solar spectrum. *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 2006, pp. 87–90. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCPEC.2006.279370>
3. Nazarov A.M. et al. Thin antireflective coatings for solar cells. *Vzaimodeystvie izlucheniya s tverdyim telom (VITT-2017): mat. 12-y Mezhdunarodnoy konferentsii*, 2017, pp. 466–468. (In Russ.)
4. Charykulyeva N.R. et al. Study of films of silicon oxide and hafnium oxide for the creation of antireflection coatings. *Molodezh' v nauke – 2016: sb. mat. Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh*, 2017, pp. 355–359. (In Russ.)
5. Drondin A.V. et al. Structures based on porous silicon with single and double-layer coatings photoelectric properties. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2017, vol. 20, pp. 50–54. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7074> (In Russ.)
6. Kirsanov N.Yu. et al. Multilayer Photosensitive Structures Based on Porous Silicon and Rare-Earth Compounds: Studies of Spectral Characteristics. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 367–371. DOI: <https://doi.org/10.21883/FTP.2017.03.44209.8377> (In Russ.)
7. Rozhkov V.A., Petrov A.I., Shalimova M.B. Antireflection coatings from lanthanum, samarium and dysprosium fluorides for silicon photovoltaic devices. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 1994, no. 4, pp. 7–10. (In Russ.)
8. Shishkin I.A., Lizunkova D.A., Latukhina N.V. The process of pore formation on a textured silicon substrate during electrochemical etching: 3D model. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1745, no. 1, p. 012004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1745/1/012004>

9. Shalimova M.B. The Effect of Conductivity Switching with Memory and Photoelectric Phenomena in Layered Structures Based on Film Rare-Earth Fluorides. *Avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Samara, 1997, 19 p.* (In Russ.)
10. Latukhina N.V. et al. Influence of uncontrolled factors on the properties of porous silicon. *Aktual'nye problemy fiziki tverdogo tela, 2018, vol. 3, pp. 63–65.* (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2022, vol. 25, no. 3, pp. 16–23

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.3.16-23

Received 9 June 2022

Accepted 11 July 2022

Investigation of electrical properties of photosensitive structures of reduced dimension based on silicon

Natalia A. Poluektova , Daria A. Shishkina , Alexander N. Bazanov,
Roman A. Perebalin, Ivan A. Shishkin , Natalya V. Latukhina 

Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse,
Samara, 443086, Russia

Abstract – In this paper, we propose a method for reducing the energy loss of photosensitive structures based on nanocrystalline silicon using passivating coatings of dysprosium fluoride. Since this material has good optical and photoelectric properties, when preparing Si/DyF₃ structures, the dielectric film makes it possible to reduce the number of recombination centers and increase light absorption. Methods for creating and studying photosensitive structures with coatings are shown. A technique for determining the thickness of a dysprosium fluoride coating due to light interference is described. The results of studying the photosensitivity spectra and the reflectance of the obtained photosensitive structures are presented. The positive effect of silicon nanostructures, as well as dysprosium fluoride films on the photosensitivity spectra of the structures, is shown. With the help of the data obtained, it is planned to improve the existing technology for creating photosensitive structures based on porous silicon in order to increase their output characteristics.

Keywords – photosensitive structures; optical coatings; porous silicon; dysprosium fluoride.

Информация об авторах

Полуэктова Наталья Алексеевна, 1997 г. р., аспирант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия, профиль 01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики.

Область научных интересов: создание и исследования фоточувствительных структур на основе кремния.

E-mail: natarolivekt37@gmail.com

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

Шишкина Дарья Александровна, 1991 г. р., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель 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>

Базанов Александр Николаевич, 1999 г. р., магистрант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия, специальность 03.04.01 Прикладные математика и физика.

Область научных интересов: оптические покрытия для солнечных элементов.

E-mail: vosovsky@list.ru

Перебалин Роман Андреевич, 1999 г. р., магистрант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия, специальность 03.04.01 Прикладные математика и физика.

Область научных интересов: наноструктуры кремния для фотовольтаики.

E-mail: gsamylifemanager@gmail.com

Шишкин Иван Александрович, 1996 г. р., аспирант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия, профиль 01.04.07 Физика конденсированного состояния.

Область научных интересов: наноструктуры кремния, моделирование характеристик, COMSOL Multiphysics, оптические покрытия, фотоэлектрические преобразователи, биомедицина.

E-mail: shishkinivan9@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8413-9661>

Латухина Наталья Виленовна, 1955 г. р., доцент кафедры физики твердого тела и неравновесных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: пористый кремний, светоизлучающие диоды, оптические покрытия, фотоэлектрические преобразователи, биомедицина.

E-mail: natalat@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-0562>

Information about the Authors

Natalia A. Poluektova was born in 1997, postgraduate student of Samara National Research University, Samara, Russia, specialty Instruments and Methods of Experimental Physics.

Research interests: creation and research of photosensitive structures based on silicon.

E-mail: natapolivekt37@gmail.com

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

Daria A. Shishkina was born in 1991, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior lecturer 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>

Alexander N. Bazanov was born in 1999, Master's Degree student of Samara National Research University, Samara, Russia, specialty Applied Mathematics and Physics.

Research interests: silicon nanostructures for photovoltaics.

E-mail: vosovsky@list.ru

Roman A. Perebalin was born in 1999, Master's Degree student of Samara National Research University, Samara, Russia, specialty Applied Mathematics and Physics.

Research interests: optical coatings for solar cells.

E-mail: gsamylifemanager@gmail.com

Ivan A. Shishkin was born in 1996, postgraduate student of Samara National Research University, Samara, Russia, specialty Condensed Matter Physics.

Research interests: silicon nanostructures, modeling of characteristics, COMSOL Multiphysics, optical coatings, photovoltaic converters, biomedicine.

E-mail: shishkinivan9@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8413-9661>

Natalya V. Latukhina was born in 1955, associate professor of the Department of Solid State Physics and Nonequilibrium Systems, Samara National Research University, Samara, Russia.

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

E-mail: natalat@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-0562>