

Исследование электрических свойств фоточувствительных структур пониженной размерности на основе кремния с покрытиями из фторидов редкоземельных элементов

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

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

Аннотация – В данной работе рассмотрено влияние пористого кремния и пленок фторида диспрозия на вольт-амперные характеристики фоточувствительных структур пониженной размерности на основе кремния. Описаны процессы создания и исследования полученных фоточувствительных структур. Приведены вольт-амперные характеристики структур до и после нанесения покрытия. В исследовании обнаружено положительное влияние пористого кремния и покрытия фторида диспрозия на вольт-амперные характеристики структур как с пористым кремнием, так и без него. Получены значения оптимальной толщины покрытия фторида диспрозия для пористых фоточувствительных структур. Показано, что покрытия фторида диспрозия оказывают не всегда положительное влияние на такие параметры фоточувствительных структур, как ток короткого замыкания и напряжение холостого хода, поскольку это связано с неравномерностью нанесения пленки на поверхность структуры.

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

Введение

В настоящее время исследования в сфере технологий создания фоточувствительных структур на основе кремния с целью улучшения их характеристик и повышения коэффициента полезного действия (КПД) являются актуальными в силу широкого использования фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в качестве солнечных батарей в различных сферах человеческой деятельности.

Особый интерес представляют ФЭП, рабочий слой которых состоит из нанокристаллического кремния [1]. Исследование полученных структур показывает лучшие фотоэлектрические характеристики по сравнению с ФЭП без наноструктур за счет увеличения поглощающей поверхности и расширения спектральной чувствительности, обусловленного квантово-размерным эффектом в нанокристаллах.

Однако КПД таких солнечных элементов можно еще повысить путем нанесения антиотражающих покрытий на основе соединений редкоземельных элементов, позволяющих снизить потери не только за счет снижения отражения, но и за счет уменьшения токов рекомбинации [2]. Для кремниевых солнечных элементов по своим оптическим характеристикам (показатель преломления, коэффициент прозрачности) наиболее подходящими являются фториды редкоземельных элементов,

которые к тому же обладают пассивирующими свойствами [3]. В данной работе показаны результаты исследования электрических свойств фоточувствительных структур со слоем наноструктурированного кремния и покрытием фторида диспрозия различной толщины.

1. Методики эксперимента

1.1. Методика изготовления образцов

В данной работе использовались пластины монокристаллического кремния с готовым *p-n*-переходом, имеющие поверхностную структуру, состоящую из правильных четырехгранных пирамидок, расположенных плотно друг к другу. Это позволяет увеличить количество света, поглощаемого поверхностью за счет уменьшения рассеяния света и увеличения площади взаимодействия.

Методом анодного электрохимического травления на *n*-типе был сформирован пористый слой на всех образцах [4]. Травление проводилось в спиртовом растворе плавиковой кислоты. Плотность тока составляла 10 мА/см². Толщина пористого слоя – около 10 мкм.

Алюминиевые контакты наносились в два этапа на установку ВУП-4: на *p*-сторону был нанесен сплошной контакт, на *n*-сторону – контакт в виде гребенки.

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

Процесс напыления покрытия осуществлялся путем термического испарения в вакууме порошкообразного фторида диспрозия, масса которого предварительно измерялась. Покрытие напылялось на часть подложки поверх контактов, так что на одной пластине были расположены структура с покрытием и без него, что удобно для сравнения их характеристик.

1.2. Методика определения толщины покрытия

Для определения толщины покрытия фторида диспрозия применялся цветовой метод [5]. Данный метод используется для экспресс-контроля толщины пленок SiO₂ и Si₃N₄ до 1,5 и 0,33 мкм соответственно. Он основан на окрашивании пленок разных толщин в различные цвета за счет интерференции в них одной из составляющих белого цвета, длина волны которой кратна толщине пленки. Точность определения толщины пленки данным методом 100–200 Å. Вычисление толщины пленки фторида диспрозия осуществлялось по формуле

$$S_{\text{DyF}_3} = S_{\text{SiO}_2} \frac{n_{\text{DyF}_3}}{n_{\text{SiO}_2}},$$

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

Результаты измерения толщин пленок фторида диспрозия приведены в таблице.

2. Методика исследования

В качестве имитатора солнечного излучения была использована ртутная лампа. Мощность па-

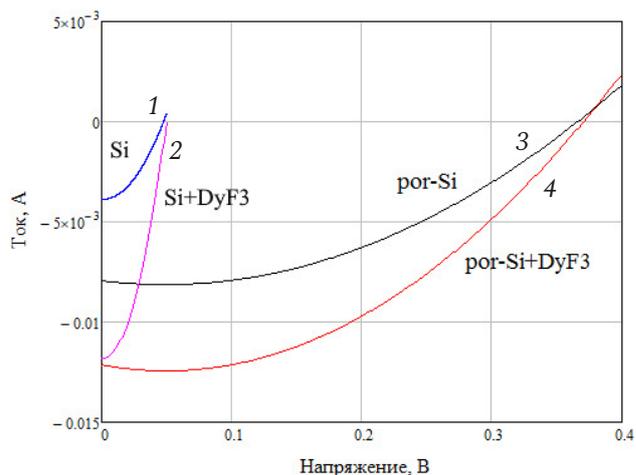


Рис. 1. ВАХ образца № 15 без пористого слоя (исх. – 1, с покрытием – 2) и образца № 8 с пористым слоем (пористый – 3, пористый с покрытием – 4)

Fig. 1. VCV of sample No. 15 without a porous layer (original – 1, coated – 2) and sample No. 8 with a porous layer (porous – 3, porous coated – 4)

дающего излучения составила 1000 Вт/м². Были исследованы световые вольтамперные характеристики полученных пластинок.

Для обработки результатов измерений использовалось программное обеспечение Matlab, при помощи него были построены графики вольтамперных характеристик, полученные данные были аппроксимированы методом наименьших квадратов.

3. Анализ результатов

3.1. Влияние покрытия

На рис. 1 представлены ВАХ четырех структур: на подложке кремния, не подвергнутого травлению (Si), Si с нанесенным слоем просветляющего покрытия из фторида диспрозия (Si + DyF₃), пористого кремния, полученного путем травления той же подложки (por-Si), и этого por-Si с нанесенной пленкой фторида диспрозия (por-Si + DyF₃).

Сравнение графиков показывает, что покрытия оказывают существенное влияние на ток короткого замыкания как образцов без пористого слоя (ток увеличивается примерно в 3 раза), так и образцов с пористым слоем (увеличение вдвое). Это связано с более активной генерацией носителей зарядов в фоточувствительных структурах, вызванной в результате уменьшения рекомбинационных центров. Из рисунка также видно положительное влияние создания пористого слоя, что увеличивает и ток короткого замыкания почти вдвое, и напряжение холостого хода примерно в 6 раз.

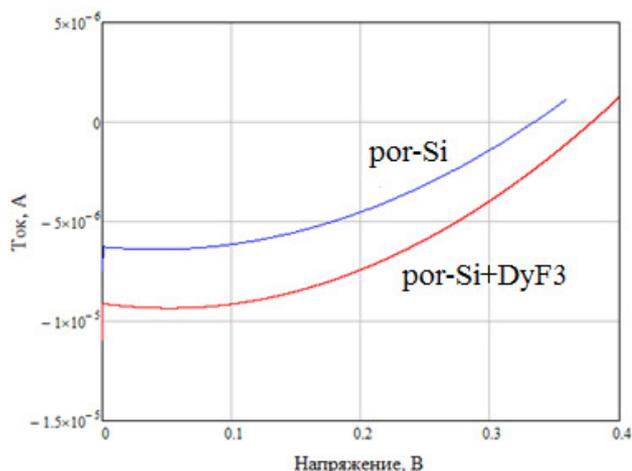


Рис. 2. ВАХ образца № 1 до и после нанесения пленки фторида диспрозия толщиной 0,37 мкм
 Fig. 2. CVC of sample No. 1 before and after deposition of a film of dysprosium fluoride with a thickness of 0,37 μm

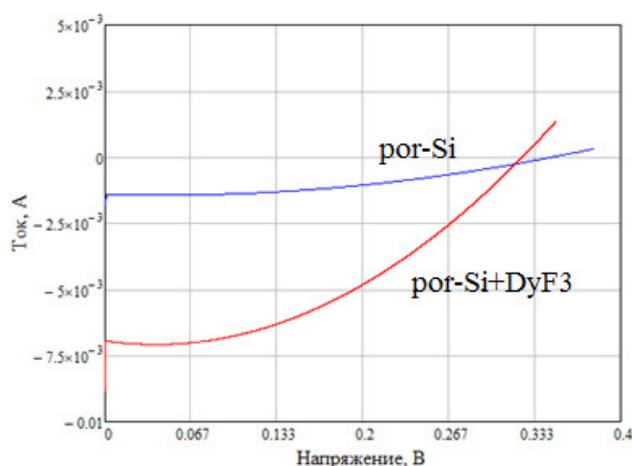


Рис. 5. ВАХ образца № 5 до и после нанесения пленки фторида диспрозия толщиной 0,11 мкм
 Fig. 5. CVC of sample No. 5 before and after deposition of a film of dysprosium fluoride with a thickness of 0,11 μm

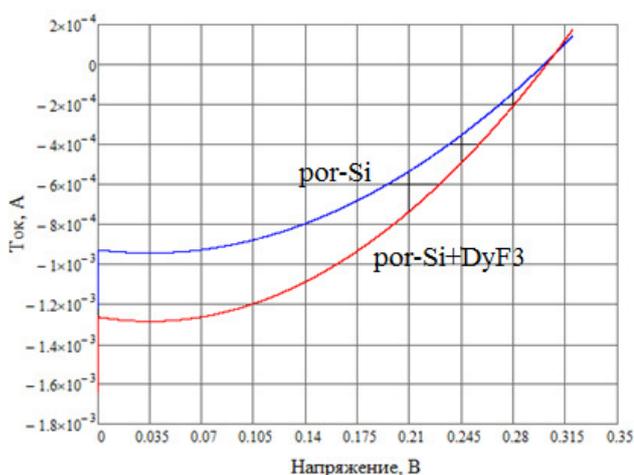


Рис. 3. ВАХ образца № 2 до и после нанесения пленки фторида диспрозия толщиной 0,29 мкм
 Fig. 3. CVC of sample No. 2 before and after deposition of a film of dysprosium fluoride with a thickness of 0,29 μm

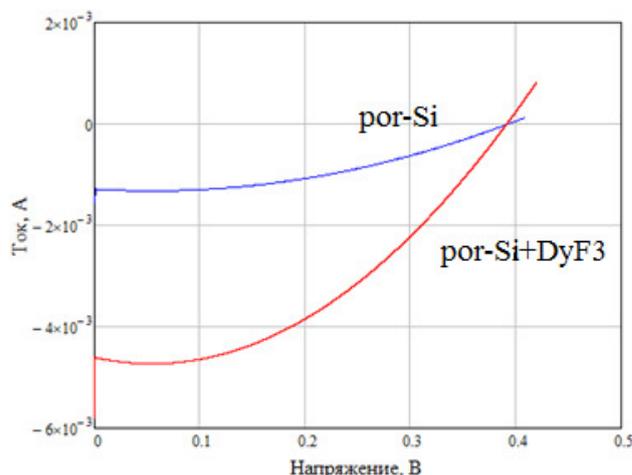


Рис. 6. ВАХ образца № 6 до и после нанесения пленки фторида диспрозия толщиной 0,096 мкм
 Fig. 6. CVC of sample No. 6 before and after deposition of a film of dysprosium fluoride with a thickness of 0,096 μm

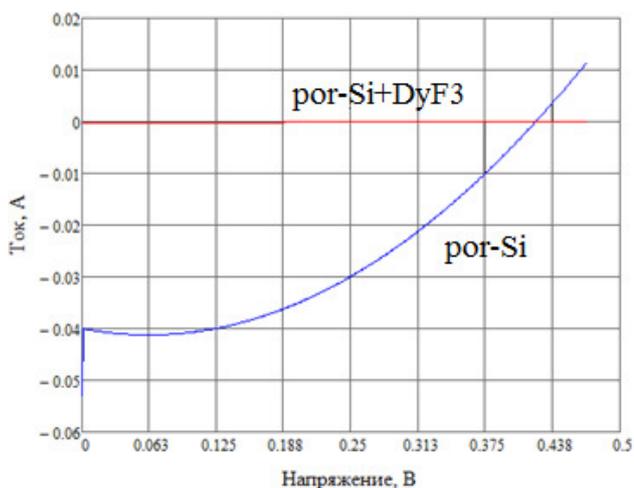


Рис. 4. ВАХ образца № 4 до и после нанесения пленки фторида диспрозия толщиной 0,17 мкм
 Fig. 4. CVC of sample No. 4 before and after deposition of a film of dysprosium fluoride with a thickness of 0,17 μm

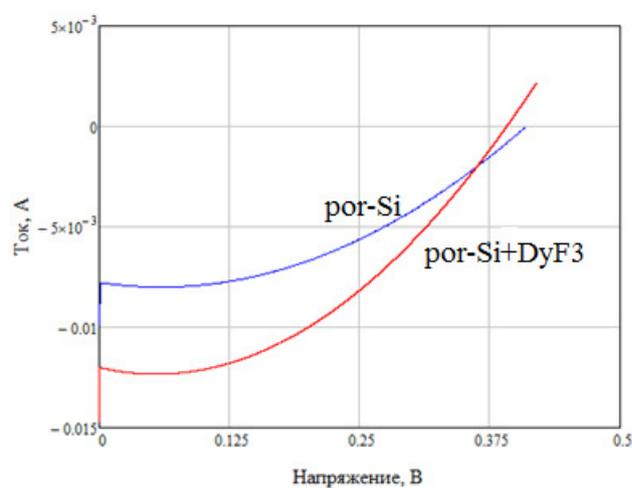


Рис. 7. ВАХ образца № 7 до и после нанесения пленки фторида диспрозия толщиной 0,089 мкм
 Fig. 7. CVC of sample No. 7 before and after deposition of a film of dysprosium fluoride with a thickness of 0,089 μm

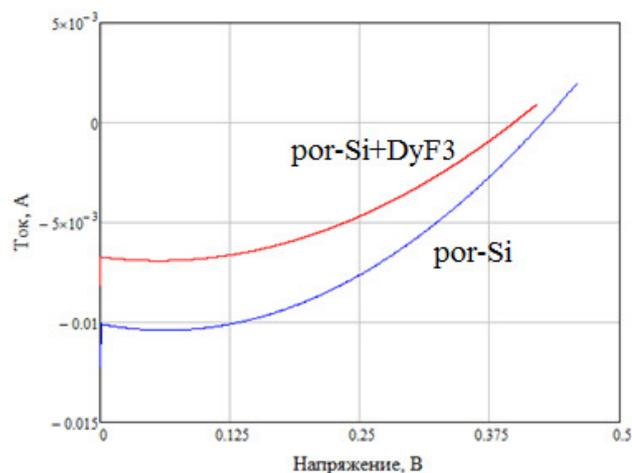


Рис. 8. ВАХ образца № 8 до и после нанесения пленки фторида диспрозия толщиной 0,06 мкм
Fig. 8. CVC of sample No. 8 before and after deposition of a film of dysprosium fluoride with a thickness of 0,06 μm

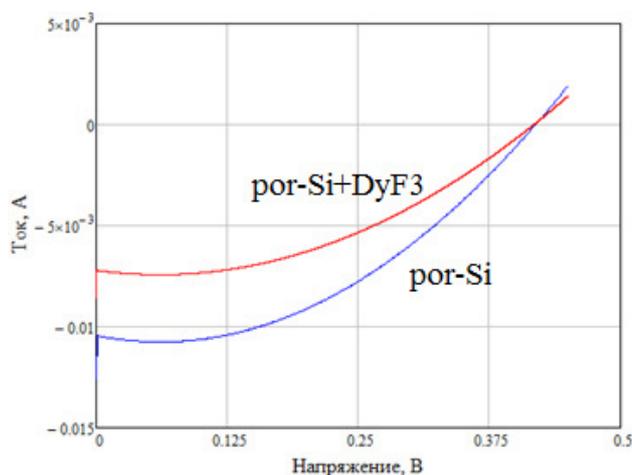


Рис. 9. ВАХ образца № 9 до и после нанесения пленки фторида диспрозия толщиной 0,025 мкм
Fig. 9. CVC of sample No. 9 before and after deposition of a film of dysprosium fluoride with a thickness of 0,025 μm

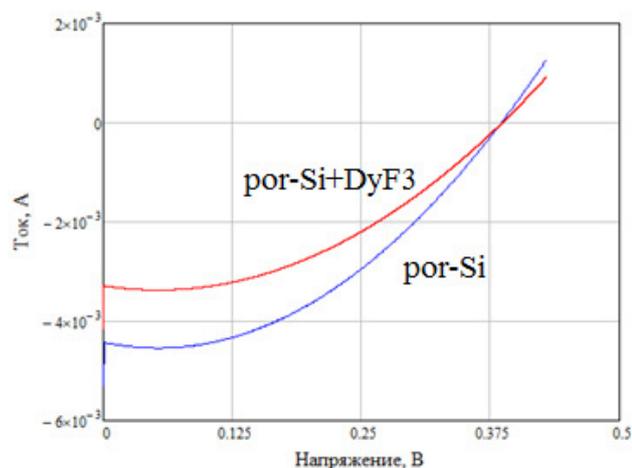


Рис. 10. ВАХ образца № 11 до и после нанесения пленки фторида диспрозия толщиной 0,019 мкм
Fig. 10. CVC of sample No. 11 before and after deposition of a film of dysprosium fluoride with a thickness of 0,019 μm

3.2. Влияние толщины покрытия на ВАХ структур с пористым слоем

На рис. 2–10 изображены ВАХ образцов, имеющих и пористый слой, и слой фторида диспрозия.

Сравнительный анализ графиков на рис. 2–10 показывает, что влияние покрытия на ВАХ структур зависит от толщины. Структуры с толщинами покрытий от 0,096 мкм (№ 6) до 0,37 мкм (№ 1) демонстрируют положительное влияние покрытия: увеличение тока короткого замыкания составляет от 30 % (№ 6) до более чем 200 % (№ 4). Структуры с более тонкими покрытиями, от 0,025 мкм (№ 9) до 0,089 мкм (№ 7), демонстрируют примерно 30 %-ное уменьшение тока короткого замыкания. Это может быть связано с тем, что более тонкие слои не образуют сплошного покрытия и не полностью блокируют центры рекомбинации, а также тем, что при напылении DyF_3 проникает в крупные поры и препятствует токопереносу или блокирует контакты. Последний фактор может объяснить и практически полное исчезновение фототока в образце № 2. Исключение составляет образец № 11 с покрытием толщиной 0,019 мкм, демонстрирующий примерно 30 %-ное увеличение тока. Его пример показывает, что и тонкая пленка может образовать сплошное покрытие при отсутствии крупных пор.

Таким образом, можно сделать вывод, что нанесение просветляющего покрытия положительно влияет на генерируемый образцом фототок, что подтверждает теоретические сведения. Однако следует учесть, что не любые толщины пленок будут положительно влиять на характеристики образцов.

Заключение

Пористый кремний демонстрирует более высокие электрические характеристики в сравнении с монокристаллическим, что доказывает перспективность его применения в фоточувствительных структурах.

Из полученных данных можно сделать вывод, что наибольшим увеличением КПД после напыления пленки DyF_3 обладает образец № 4 с толщиной покрытия 0,17 мкм.

Список литературы

1. Shishkina D.A., Poluektova N.A., Shishkin I.A. Photovoltaic characteristics of structures with porous silicon obtained by various technological plans // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2086, no. 1. P. 012102. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2086/1/012102>
2. Эксплуатационные характеристики фотоэлектрических преобразователей на базе пористого кремния, участвующих в летном эксперименте на МКА «Аист-2д» / А.С. Гуртов [и др.] // XIV Королевские чтения: международная молодежная научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения академика С.П. Королева, 75-летию КуАИ-СГАУ-СамГУ-Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного. Самара, 2017. С. 503.
3. 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.
4. 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>
5. Шалимова М.Б. Эффект переключения проводимости с памятью и фотоэлектрические явления в слоистых структурах на основе пленочных фторидов РЗЭ: специальность 01.04.10 «Физика полупроводников»: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Самара, 1997. 19 с.

References

1. Shishkina D.A., Poluektova N.A., Shishkin I.A. Photovoltaic characteristics of structures with porous silicon obta. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2086, no. 1, p. 012102. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2086/1/012102>
2. Gurtov A.S. et al. Operational characteristics of photoelectric converters based on porous silicon, participating in the flight experiment on the SSC «Aist-2d». *XIV Korolevskie chteniya: mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya, posvyashchennaya 110-letiyu so dnya rozhdeniya akademika S.P. Koroleva, 75-letiyu KuAI-SGAU-SamGU-Samarskogo universiteta i 60-letiyu so dnya zapuska pervogo iskusstvennogo*, Samara, 2017, p. 503. (In Russ.)
3. 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.)
4. 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>
5. Shalimova M.B. *The Effect of Conductivity Switching with Memory and Photoelectric Phenomena in Layered Structures Based on Film Rare Earth Fluorides*: Specialty 01.04.10 «Physics of Semiconductors»: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Samara, 1997, 19 p. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2022, vol. 25, no. 4, pp. 67–73

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.4.67-73

Received 21 January 2022
Accepted 22 February 2022

Investigation of electrical properties of photosensitive structures of reduced dimension based on silicon coated with rare earth fluorides

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

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

Abstract – In this paper, we consider the effect of porous silicon and dysprosium fluoride films on the current-voltage characteristics of low-dimensional photosensitive structures based on silicon. The processes of creating and studying the resulting photosensitive structures are described. The current-voltage characteristics of the structures before and after coating are given. The study found a positive effect of porous silicon and dysprosium fluoride coating on the current-voltage characteristics of structures both with and without porous silicon. Values of the optimal thickness of the dysprosium fluoride coating for porous photosensitive structures are obtained. It is shown that dysprosium fluoride coatings do not always have a positive effect on such parameters of photosensitive structures as short-circuit current and open-circuit voltage, since this is due to the non-uniformity of film deposition on the surface of the structure.

Keywords – photosensitive structures; 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.

Область научных интересов: фотоэлектрические преобразователи, нанокристаллический кремний.

E-mail: natapolivekt37@gmail.com

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

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

Перебакин 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>

Рогожина Галина Андреевна, 1988 г. р., доцент кафедры физики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: пористый кремний, светоизлучающие диоды, биомедицина.

E-mail: ssau@ssau.ru

Information about the Authors

Natalia A. Poluektova was born in 1997, postgraduate student of Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: photovoltaic converters, monocrystalline 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>

Galina A. Rogozhina was born in 1988, associate professor of the Department of Physics, Samara National Research University, Samara, Russia.

Research interests: porous silicon, light-learning diodes, biomedicine.

E-mail: ssau@ssau.ru

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисл. акад. Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П.

ISBN 978-5-88070-222-0

УДК 621.396.67

ББК 32.845

Современная теория
и практические применения
антенн

Издательство «Радиотехника»
Москва, 2009

Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.