

Фотоэлектрические свойства структур на базе пористого кремния с одно- и двухслойными покрытиями

А.В. Дрондин¹, Н.В. Латухина², Д.А. Лизункова², В.Д. Паранин²

¹ ГНЦ РФ ФГУП «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша»
125438, Российская Федерация, г. Москва
ул. Онежская, 8

² Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

Исследованы спектральные зависимости коэффициента отражения и вольтамперные характеристики структур для ФЭП на базе пористого кремния с одно- и двухслойными покрытиями из сульфида цинка и фторида диспрозия. Показано, что ФЭП на основе структур с двухслойным покрытием обладают наибольшей эффективностью преобразования, что подтверждает пассивирующие свойства фторида диспрозия на различных типах рабочей поверхности.

Ключевые слова: пористый кремний, вольтамперные характеристики, коэффициент отражения, многослойные системы, фактор заполнения.

Введение

Фоточувствительные структуры на базе пористого кремния показали хорошие перспективы использования в солнечных элементах [1]. Наличие развитой пористой поверхности с наличием нанокристаллов кремния в порах расширяет спектр чувствительности СЭ и увеличивает общую эффективность преобразования. Однако актуальным становится вопрос просветляющих покрытий для такой поверхности.

Значительный коэффициент отражения света (40–45 %) от поверхности кремния в области спектральной чувствительности фотоэлектрических приборов (400–1100 нм) вызывает необходимость просветления рабочей поверхности кремниевого фотоэлектрического преобразователя. Перспективным материалом для просветления поверхности кремния являются фториды редкоземельных элементов [2]. Они обладают высокой прозрачностью в рабочей области спектра, 0,98 и 0,9, соответственно, и имеют оптимальный для кремния показатель преломления. Кроме того, пленки фторидов редкоземельных элементов обладают пассивирующими свойствами, что позволяет уменьшить скорость поверхностной рекомбинации. Показатель преломления пористого кремния зависит от его пористости и может сильно отличаться от значения для объ-

емного материала, как и коэффициент отражения от пористой поверхности [3]. Поэтому теряется смысл покрытия, просветляющего систему лишь для одной длины волны падающего света, и принципы выбора покрытия для пористой поверхности становятся другими. Более важными являются пассивирующие свойства фторидов РЗЭ, так как при анизотропном травлении количество рекомбинационных центров на поверхности кремния увеличивается. К тому же электрическое сопротивление пористого кремния существенно выше, чем у объемного материала, поэтому возникает необходимость еще одного слоя в покрытии, обладающего низким электрическим сопротивлением. В кремниевых солнечных элементах в качестве такого слоя используется оксид или сульфид цинка, диоксид титана.

В настоящей работе исследуются фотоэлектрические характеристики структур на базе пористого кремния и с одно- и двухслойным покрытием из DyF_3 и ZnS .

1. Методики эксперимента

Пористый кремний формировался методом электрохимического травления в ячейке вертикального типа в спиртовых растворах плавиковой кислоты на различных типах рабочей поверхности монокристаллов кремния: полированной, шлифованной и тестурированной [1].

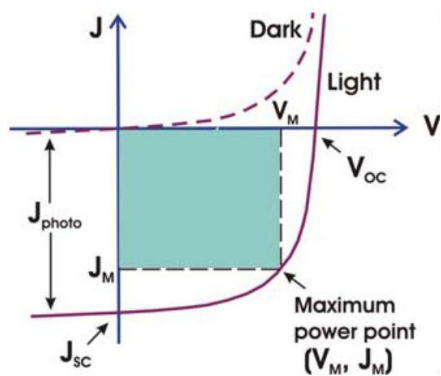


Рис. 1. График зависимости величины тока от приложенного напряжения в освещенном и неосвещенном образце. Индексы m говорят о значениях тока и напряжения, при которых мощность максимальна. Точки пересечения графика освещенного образца с осями координат – напряжение холостого хода и фототок

Пленки фторида диспрозия и сульфида цинка формировались на подложках методом термического испарения из молибденовой лодочки в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ – 10^{-5} Торр на установке типа ВУП-4. Слои фторида диспрозия и сульфида цинка получались методом термического испарения порошкообразного фторида или сульфида на подогретую подложку. Формирование n^+ слоя проводилось посредством диффузии фосфора при температуре 800–900 градусов Цельсия. Контакты к n^+ слою формировался в виде пленочной полоски алюминия через маску методом термического испарения алюминия в вакууме.

Спектральные зависимости коэффициента отражения света измерялись с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-2450 с приставкой 206-14046. Диапазон измерения составил 0,3–1 мкм, шаг измерения и спектральная ширина щели монохроматора – 2 нм, скорость сканирования – средняя. Угол падения излучения, имеющего эллиптическую поляризацию около 3:1 – 4:1, был равен 5° при апертуре не более $\pm 5^\circ$. Диаметр освещенной поверхности образца составлял 5–15 мм. Приемником излучения спектрофотометра Shimadzu UV-2450 является фотоэлектронный умножитель. Это обуславливает увеличение шумов измерения прибора в ближней инфракрасной области.

Для исследования световых ВАХ использовался имитатор солнечного излучения производства TS SpaceSystems, где источником излучения служит ртутная лампа ARRI. Измерения ВАХ проводились при мощности падающего излучения 1380 Вт/м^2 при термостатировании образцов при 29°C . Для обработки результатов испытаний использовалось программное обеспе-

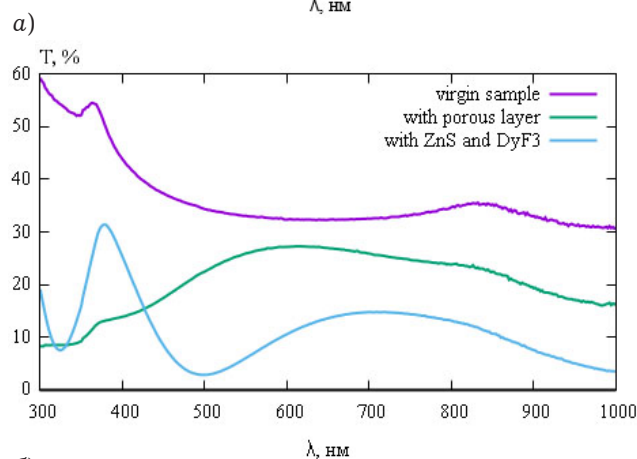
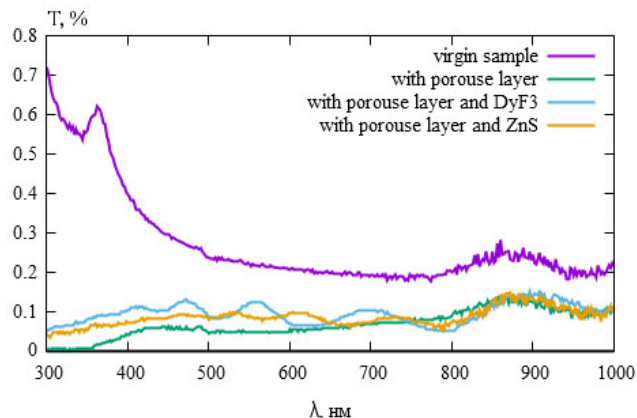


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента отражения от длины волны для образцов кремния с текстурированной (а) и полированной (б) поверхностью

чение Volthalla (версия 6.7.2). Программное обеспечение записывает в базу данных результаты измерений, находит точку максимальной мощности и высчитывает фактор заполнения по методу Монте-Карло.

Экстремальные значения упомянутых величин важны для определения фактора заполнения FF, который определяет эффективность преобразования энергии (fill-factor)

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}} \quad (1)$$

По данным фактора заполнения можно посчитать КПД солнечной батареи η по следующей формуле.

$$\eta = \frac{J_m V_m}{P_{sun}} = 100 J_{sc} V_{oc} \frac{FF}{P_{sun}} \quad (2)$$

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 2, а, б приведены графики спектральной зависимости коэффициента отражения для диапазона длин волн от 300 нм до 1000 нм образцов кремния с текстурированной (а) и полированной (б) поверхностью. Регистрируемый

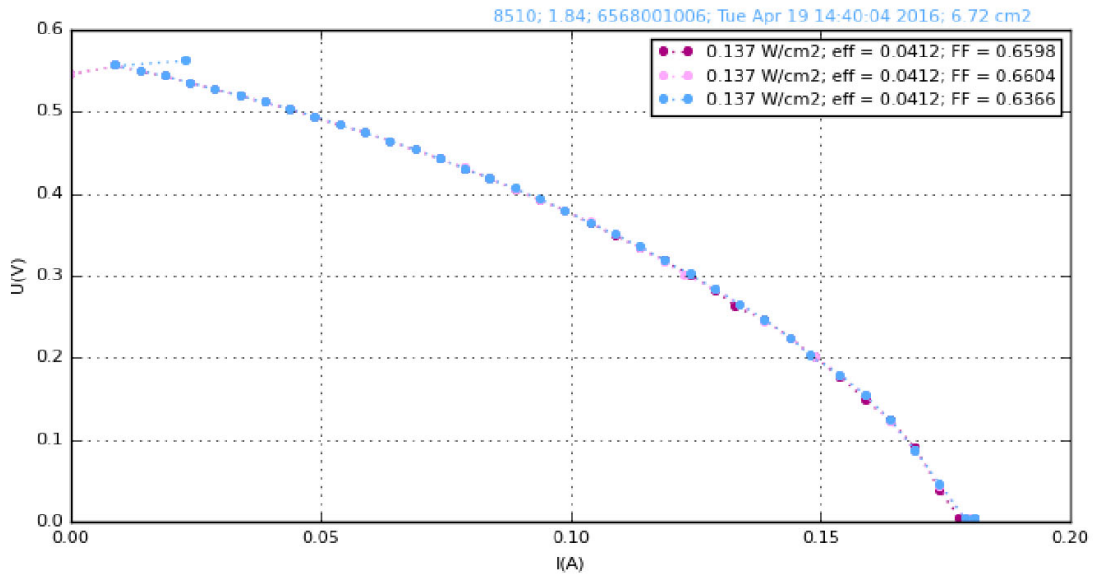


Рис. 3. ВАХ образца ФЭП с полированной поверхностью и покрытием DyF₃, с пористым слоем

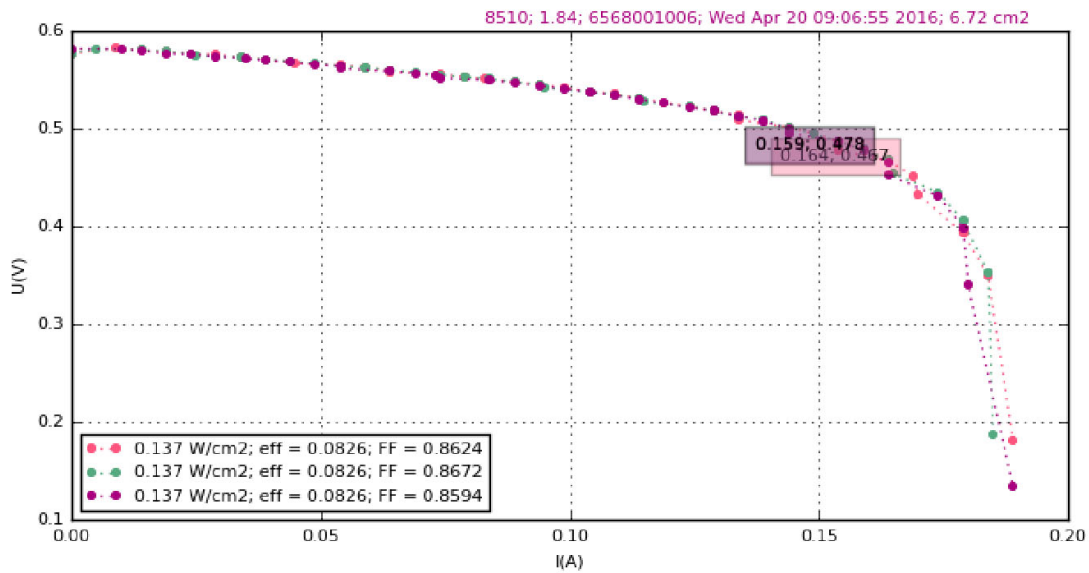


Рис. 4. ВАХ образца ФЭП с полированной поверхностью и покрытием ZnS, с пористым слоем

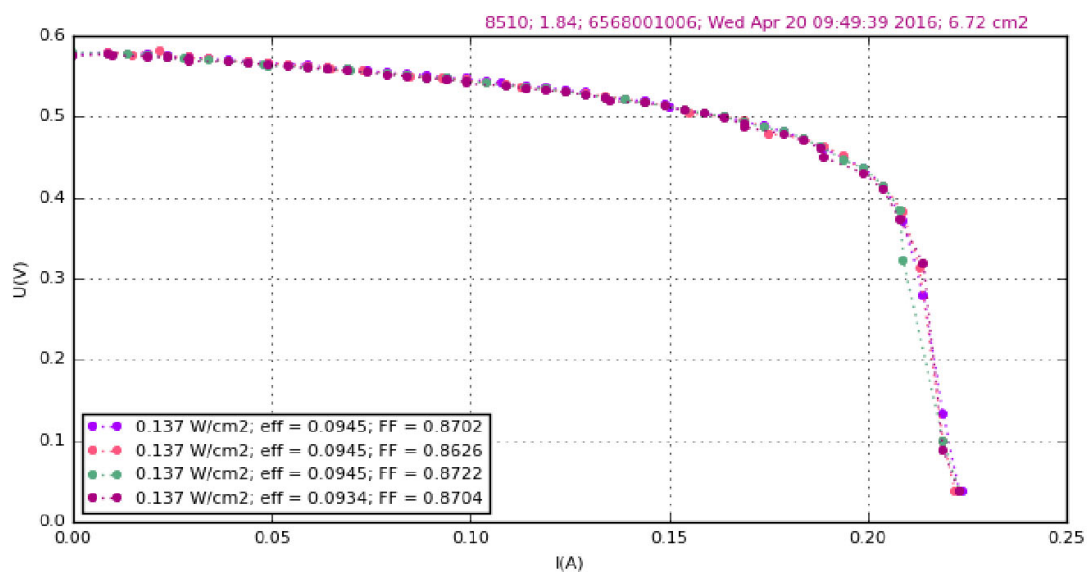


Рис. 5. ВАХ образца ФЭП с полированной поверхностью и двойным покрытием ZnS и DyF₃, с пористым слоем

коэффициент отражения исходного материала без пористого слоя для текстурированной поверхности изменяется от 0.7 % до 0.25 % в диапазоне от 0.3 мкм до 0.55 мкм и остается примерно на этом уровне вплоть до 1 мкм. Создание пористого слоя увеличивает рассеяние излучения, что выражается в снижении регистрируемого коэффициента отражения до 0.05–0.15 % во всем исследуемом спектральном диапазоне. Последующее нанесение пленки DyF_3 или ZnS немного увеличивает измеряемый коэффициент отражения в коротковолновой части спектра за счет частичного заполнения пор, снижения шероховатости поверхности и уменьшения эффекта рассеяния.

Исследование влияния двухслойного покрытия на отражающие свойства рабочей поверхности проводилось на полированных пластинах кремния, где коэффициент отражения существенно выше. Для полированных пластин (рис. 2, б) коэффициент отражения исходного материала без пористого слоя и без нанесенной пленки составляет в среднем 60–35 % в диапазоне от 0.3–0.45 мкм и около 35 % в остальном спектральном диапазоне. После формирования пористого слоя, рассеивающего падающее излучение, регистрируемый коэффициент отражения значительно падает. Особенно сильно это проявляется в коротковолновой части спектра ввиду более выраженного рассеяния [4]. При нанесении двухслойного покрытия DyF_3 и ZnS , коэффициент отражения приобретает осциллирующий характер, обусловленный интерференционными свойствами покрытия.

Световые ВАХ фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), изготовленных на структурах с различными покрытиями, приведены на рис. 3–5. Проведенные исследования ВАХ ФЭП показали, что пленки фторида диспрозия обладают пассивирующими свойствами, тем самым, увеличивая фактор заполнения для образцов полированного кремния без пористого слоя (0.83–0.84). Образцы с просветляющей пленкой из сульфида цинка обладали меньшим фактором заполнения (0.68–0.72). Для пористых структур ситуация была обратная, образцы с сульфидом цинка показывали больший фактор заполнения. Это можно объяснить компенсацией потери носителей заряда в обедненном слое свободными электронами из пленки ZnS , поскольку сульфид цинка является полупроводником n-типа.

Наибольший фактор заполнения показали структуры с двойным покрытием (0.87). В этом случае проявляется и дополнительное легирующее свойство покрытия ZnS , и пассивирующее свойство покрытия DyF_3 [5].

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показывают в целом положительное воздействие покрытий на фотоэлектрические свойства структур с пористым слоем на рабочей поверхности кремниевой подложки. Однослойные покрытия как ZnS , так и DyF_3 заметно снижают коэффициент отражения от пористой поверхности, но не дают максимального фотоэлектрического эффекта. Наиболее эффективной проявила себя фоточувствительная структура с двойным покрытием, в котором слой ZnS , как полупроводник n-типа проводимости, обеспечивает подлегирование чувствительного слоя, а слой DyF_3 – играет роль пассивирующей рабочую поверхность. Благодаря высокой прозрачности покрытий в исследуемом спектральном диапазоне двойное покрытие также обладает высокой прозрачностью. Однако следует отметить, что вопрос оптимальной толщины покрытий для пористой поверхности требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Efficient silicon solar cells for space and ground-based aircraft / N. Latukhina [et al.] // Procedia Engineering. 2015. Vol. 104. № 31. P. 157–161.
2. Просветляющие и пассивирующие свойства пленок оксидов и фторидов редкоземельных элементов / Ю.А. Аношин [и др.] // Журнал технической физики. 1994. Т. 64. № 10. С. 118–123.
3. Nanocrystalline silicon and silicon carbide optical properties / N. Latukhina [et al.] // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the International Conference Information Technology and Nanotechnology. Session Computer Optics and Nanophotonics. Samara, Russia. 24–27 April 2017. Vol. 1900. P. 84–89.
4. Особенности процесса воздействия лазерного излучения на тонкие пленки молибдена / А.В. Волков [и др.] // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 4. С. 101–105.
5. Латухина Н.В., Лизункова Д.А. Электрофизические свойства структур с диэлектрическими пленками фторидов РЗЭ и слоем пористого кремния // Физика диэлектриков (Диэлектрики–2017): материалы XIV Международной конференции. Санкт-Петербург, 29 мая – 2 июня 2017. Т. 1. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2017. С. 224–226.

Structures based on porous silicon with single- and double-layer coatings photoelectric properties

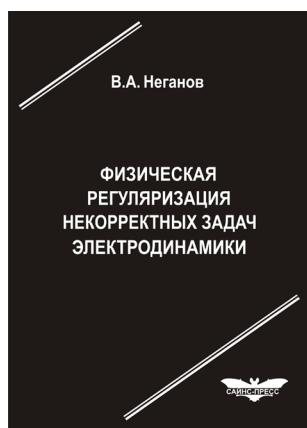
A.V. Drondin, N.V. Latukhina, D.A. Lizunkova, V.D. Parandin

The spectral dependences of the reflection coefficient and the current-voltage characteristics of structures for solar cells based on porous silicon with single- and double-layer coatings from zinc sulphide and dysprosium fluoride are investigated. It is shown that solar cells based on double-layered structures have the highest conversion efficiency, which confirms the passivating properties of dysprosium fluoride on different types of working surface.

Keywords: porous silicon, current-voltage characteristics, reflection coefficient, multilayer systems, filling factor.

Неганов, В.А.

Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.



ISBN 978-5-88070-161-2

УДК 537.87

ББК 32.84

Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.