

06

Гетероструктурные солнечные элементы на основе монокристаллического кремния с контактной сеткой, напечатанной на принтере методом струйной печати

© С.Н. Аболмасов¹, А.С. Абрамов^{1,2}, Г.А. Иванов¹,
Е.И. Теруков^{1,2}, К.В. Емцев¹, И.А. Няпшаев^{1,2}, А.А. Базелей¹,
С.П. Губин³, Д.Ю. Корнилов³, С.В. Ткачев³, В.П. Ким³,
Д.А. Рындин³, В.И. Левченкова³

¹ НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике, Санкт-Петербург

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

³ ООО „АкКо Лаб“, Москва

E-mail: I.Nyapshaev@hevelsolar.com

Поступило в Редакцию 23 июня 2016 г.

Представлены результаты по формированию токособирающей системы для кремниевых гетероструктурных солнечных элементов методом струйной печати. Проведено сравнение характеристик полученных солнечных элементов с образцами, которые были изготовлены с использованием метода стандартной трафаретной печати.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.01.44092.16380

Электрические контакты определяют „лицо“ солнечного элемента (СЭ). Лицевая контактная сетка кремниевого СЭ, как правило, имеет Н-форму, контактные полоски (fingers) которой разделены небольшим зазором ($\sim 2-3$ mm) и соединены между собой 2–4 общими токосъемными шинами (busbars). В настоящее время в промышленности доминирует технология трафаретной печати лицевой контактной сетки, используемая при изготовлении подавляющего большинства всех кремниевых СЭ, которая основана на нанесении металлосодержащей пасты через трафарет с последующим впеканием или отверждением в зависимости от типа технологии фотоэлектрических преобразователей [1]. Несмотря на то что такая технология отличается сравнительной простотой и экономичностью, ее существенным недостатком является

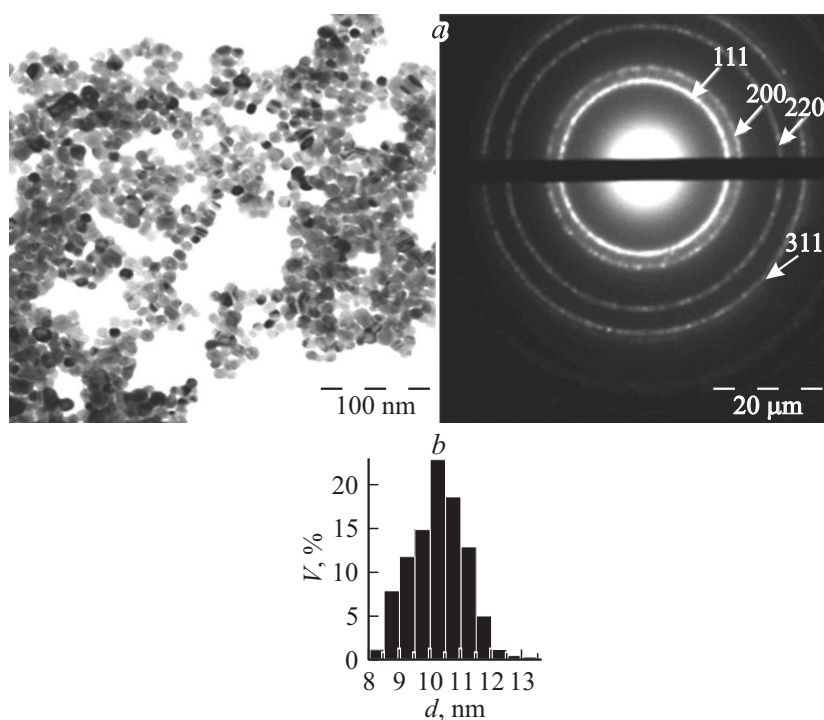


Рис. 1. Характеризация серебряных наночастиц по форме и размерам: *a* — ПЭМ-микрофотография и соответствующая микроэлектроннограмма дисперсии серебряных наночастиц; *b* — гистограмма распределения Ag-наночастиц по размерам.

непригодность в применении к тонким СЭ, роль которых будет возрастать исходя из мотивов снижения стоимости СЭ, поскольку стоимость кремниевой пластины составляет более 50% общей стоимости СЭ [2]. Технология вакуумного напыления контактов требует использования процесса фотолитографии, что усложняет технологический процесс и вряд ли пригодно для массового производства [3]. Таким образом, поиск простых и рентабельных технологий изготовления высокоэффективных контактов к СЭ является актуальной задачей.

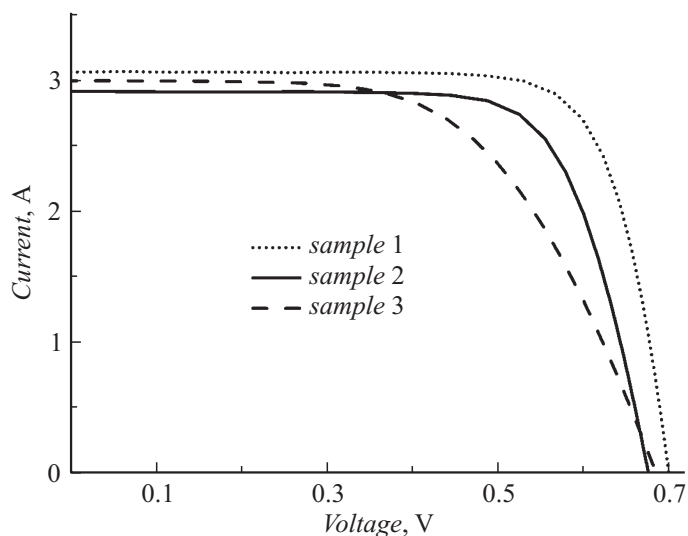


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики гетероструктурных кремниевых СЭ с различными контактными сетками.

В качестве альтернативы стандартной трафаретной печати может использоваться технология струйной печати (Inkjetprint). За рубежом довольно интенсивно ведутся исследования в этом направлении (см., например, работы [1,4]), тогда как в России данная тематика развивается не очень активно. В этой статье представлены результаты по применению разрабатываемой нами технологии струйной печати лицевой контактной сетки на гетероструктурном кремниевом СЭ [5] серебряными наночернилами на основе высококонцентрированной дисперсии наночастиц серебра. Достоинствами данной технологии являются: 1) бесконтактный метод нанесения, 2) возможность печати узких ($\sim 20 \mu\text{m}$) контактных полосок [6].

Гетероструктурный кремниевый СЭ состоит из структурированной кремниевой подложки *n*-типа (в данной работе применялись монокристаллические пластины, полученные методом Чохральского), покрытой тонкими слоями собственного и легированного аморфного кремния и двух (лицевой и тыльной) токособирающих систем, в

Параметры гетероструктурных кремниевых СЭ

Образец №	I_{sc} , А	V_{oc} , V	P_{mpp} , W	FF, %	E_{ff} , %
1	3.1	0.700	1.6	76.8	17.8
2	2.9	0.676	1.4	73.0	15.6
3	3.0	0.685	1.2	58.6	13.0

состав которых входят: нанесенные методом магнетронного распыления слои прозрачного проводящего оксида индия-олова (ITO), который с лицевой стороны одновременно является просветляющим проводящим покрытием и на поверхность которого нанесена металлическая сетка, изготовленная в данном случае как методом стандартной трафаретной печати (SP), так и методом струйной печати с помощью принтера. Тыльный контакт формировался путем магнетронного напыления пленки серебра с подслоем ITO. Печать лицевой контактной сетки производилась на установке Fujifilm Dimatix (минимальный размер элемента, возможный при печати на данном принтере, составляет 20×20 ($L \times W$) μm , минимальный размер капли — 1 pl.

Ниже представлена спецификация применяемых для печати серебряных наночернил [7]: наночастицы серебра (15–20 wt %), этиленгликоль (в качестве растворителя и стабилизатора). Согласно результатам просвечивающей электронной микроскопии (рис. 1, *a, b*), серебряные частицы имеют сферическую форму и довольно узкое распределение частиц по размерам 10 ± 2 nm.

Для проверки применимости технологии струйной печати для нанесения контактных сеток на поверхность гетероструктурных кремниевых СЭ были изготовлены в одном процессе три образца СЭ размером 100×100 mm. На одном из образцов, используемом в качестве референсного, была нанесена контактная сетка с четырьмя токосъемными шинами стандартным методом трафаретной печати с использованием сетки 325 mesh шириной токосъемных шин 2 mm и шириной контактных полосок 100 μm . На двух образцах была проведена печать контактной сетки методом Inkjet с разным количеством проходов. Рисунок для печати был использован точно такой же, как при печати через трафарет.

По световым вольт-амперным характеристикам (рис. 2) были определены параметры полученных гетероструктурных СЭ: плотность тока

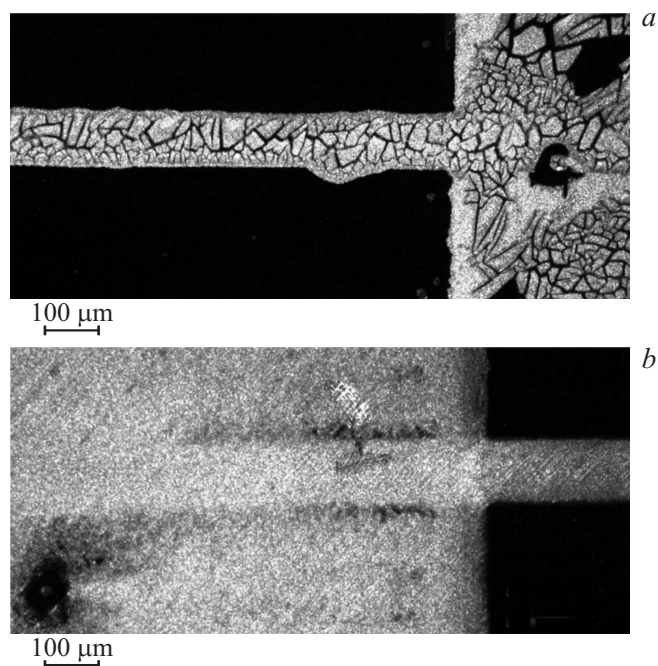


Рис. 3. Контактные дорожки образцов: *a* — образец № 3 с растресканными дорожками; *b* — образец № 2 с низкой проводимостью.

короткого замыкания (I_{sc}), напряжение холостого тока (V_{oc}), мощность в рабочей точке (P_{mpp}), фактор заполнения (FF) и эффективность (E_{ff}).

В таблице представлены параметры гетероструктурных СЭ, полученных методом трафаретной печати (образец № 1) и методом принтерной печати (образцы № 2 и 3). Отличие последних двух образцов заключается в количестве проходов принтера при печати контактных полосок и токосъемных шин. В первом случае число проходов составляло 7, а во втором — 12. После печати сушка чернил производилась при температуре 190°C в течение 20 min.

Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что на данном этапе исследований образцы СЭ с контактной сеткой, напечатанной методом струйной печати, уступают по характеристикам

образцу с контактной сеткой, полученной методом трафаретной печати. Анализ рисунка токосъемных шин, полученных методом струйной печати, свидетельствует на данный момент о низком качестве контактов. Для одного из образцов это проявляется в высоком электрическом сопротивлении за счет низкой высоты контакта, а для второго образца — в растрескивании контактных дорожек (рис. 3). Последнее связано с неоптимальными режимами сушки, причем на СЭ с большим количеством проходов этот эффект проявляется сильнее.

Тем не менее проведенные эксперименты с использованием метода струйной печати для формирования лицевой контактной сетки гетероструктурных СЭ на кремнии продемонстрировали, на наш взгляд, хорошие результаты и показали, что существует большое поле деятельности для оптимизации данной технологии.

Работа выполнялась по проекту Министерства образования и науки РФ № 4.607.21.0075 (RFMEFI60714X0075).

Список литературы

- [1] *Green M.A.* // Nat. Energy. 2016. V. 1. P. 1.
- [2] Photovoltaics Report. Freiburg, December 11, 2012. www.ise.fraunhofer.de
- [3] *Унтила Г.Г.* и др. // ФТП. 2005. Т. 39. В. 11. С. 1393.
- [4] *Hermans J.P.* et al. // Proc. 29th PVSEC. Amsterdam, Netherlands. 2014.
- [5] *Abolmasov S.N.* et al. // Proc. 31th PVSEC. Hamburg, Germany. 2015.
- [6] *Kaydanovaetal T.* // Solar Program Review Meeting. Denver, Colorado, USA. 2003.
- [7] *Губин С.П.* и др. // ИОНХ РАН. М., 2006. С. 154.