

## Гибкие солнечные модули на основе аморфного гидрогенизированного кремния

© Г.М. Аблаев<sup>†‡¶</sup>, А.С. Абрамов<sup>†\*</sup>, И.А. Няпшаев<sup>†\*</sup>, У.К. Vygranenko<sup>#</sup>,  
R. Yang<sup>\*</sup>, А.У. Sazonov<sup>\*</sup>, М.З. Шварц<sup>†\*</sup>, Е.И. Теруков<sup>†\*</sup>

<sup>†</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup> ООО „НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе“,  
194064 Санкт-Петербург, Россия

<sup>‡</sup> Санкт-Петербургский Академический университет —  
научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>#</sup> CTS-UNINOVA,  
2829-516 Caparica, Portugal

<sup>\*</sup> University of Waterloo,  
N2L 3G1 Waterloo, Canada

(Получена 27 октября 2014 г. Принята к печати 6 ноября 2014 г.)

Солнечные модули на легких гибких полимерных подложках обладают рядом несомненных преимуществ, как для наземных, так и для космических применений, по сравнению с солнечными модулями, сформированными на стекле. В данной работе представлены изготовленные тонкопленочные солнечные модули на полимерных подложках толщиной 100 мкм. Каждый модуль с размерами 10 × 10 см состоит из 72 прямоугольных ячеек, представляющих собой  $n-i-p$ -структуру из  $a\text{-Si:H}$ . Представлены вольт-амперные характеристики изготовленных модулей. Методами инфракрасной термометрии выявлены токи утечки и дефекты полученных структур.

### 1. Введение

В настоящее время интенсивно разрабатываются различные технологии создания тонкопленочных солнечных элементов. Основными полупроводниками, которые применяются для производства тонкопленочных солнечных элементов, являются кремний, твердые растворы  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ,  $\text{CdTe}$ . Технологии формирования функциональных слоев и материалы, из которых они изготовлены, имеют характерные для каждого из них достоинства и недостатки. Отметим, что хорошо развита технология изготовления кремниевых тонкопленочных солнечных элементов на стеклянных подложках. Тонкопленочные кремниевые солнечные элементы имеют ряд существенных достоинств перед солнечными элементами на основе других материалов и технологий. В частности, имеется возможность наносить слои из аморфного, поликристаллического, микрокристаллического кремния и, следовательно, формировать многокаскадные ячейки. Функциональные слои формируются методом плазмохимического газофазного осаждения (PECVD). Возможно нанесение слоев на поверхность большой площади (до  $6\text{ м}^2$ ). Температура нанесения слоев не превышает  $300^\circ\text{C}$ , что позволяет использовать полимерные подложки.

По сравнению с тонкопленочными кремниевыми солнечными модулями, сформированными на стекле, модули на гибких полимерных подложках обладают рядом несомненных преимуществ:

— существенно меньшая стоимость производства полимерных подложек;

— возможность использования технологии „roll-to-roll“, что позволяет производить сотни метров солнечных элементов в течение одного процесса;

— малый вес;

— меньшая подверженность механическим повреждениям;

— простота и дешевизна установки и транспортировки модулей.

Подобные солнечные батареи могут быть закреплены на предметах, имеющих сложную, не гладкую поверхность, в том числе и на одежде [1,2]. Кроме того, легкие гибкие солнечные модули на полимерных подложках очень привлекательны для аэрокосмических применений благодаря более высокому отношению вырабатываемой мощности к весу по сравнению с традиционными фото voltaическими элементами на основе кристаллических Si и GaAs [3].

Использование полимерных подложек накладывает ограничение на температурный режим осаждения. Температура подложки не должна превышать  $200^\circ\text{C}$  [4,5]. В этом случае производительность модуля будет ниже, поскольку оптимальный температурный режим для формирования тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей на основе  $a\text{-Si:H}$  находится в диапазоне  $220\text{--}300^\circ\text{C}$  [6]. Более низкие температуры процессов приводят к уширению оптической щели поглощающей среды ( $i$ -слой), что приводит к уменьшению тока короткого замыкания. Для компенсации этого эффекта и для увеличения поглощения света активным полупроводниковым слоем подложки могут быть текстурированы. В работе [7] представлены солнечные однопереходные

<sup>¶</sup> E-mail: gani.ablay@gmail.com

элементы на основе  $a\text{-Si:H}$  на текстурированной полиэтиленнафталатовой (ПЭН, PEN) подложке с начальной эффективностью 8.8%.

Традиционно кремниевые тонкопленочные солнечные элементы освещаются с  $p$ -стороны, что позволяет увеличить сбор носителей с малой подвижностью (дырки), поскольку им нужно преодолеть меньшее расстояние для достижения  $p$ -слоя. Таким образом, при освещении  $p$ -стороны мы имеем больший ток короткого замыкания [8].

В данной работе представлено подробное описание структуры и формирования солнечных модулей на основе  $a\text{-Si:H}$  конфигурации  $n-i-p$  на гибкой PEN-подложке толщиной 100 мкм [9]. Конфигурация  $n-i-p$  позволяет использовать подложки из непрозрачных материалов (металлическая фольга, полимерные пленки). В ходе эксплуатации засветка происходит со стороны  $n-i-p$ -структуры, состоящей из последовательно нанесенных слоев, разделенных с помощью масок в процессе нанесения слоев, при этом оптические свойства подложки не влияют на спектр поглощаемого модулем излучения.

## 2. Методика эксперимента

На рис. 1 представлен изготовленный солнечный модуль конфигурации  $n-i-p$  на гибкой PEN-подложке с размерами  $10 \times 10$  см.

Солнечный модуль имеет 72 солнечные ячейки, сформированные в виде матрицы  $9 \times 8$ .

Структура модуля представлена на рис. 2. Ячейки состоят из нижнего контактного слоя Al/Cr,  $n-i-p$ -структуры из  $a\text{-Si:H}$  и верхнего прозрачного контактного слоя ZnO:Al. Для уменьшения сопротивления эмиттера на ZnO:Al симметрично нанесены два алюминиевых полосковых контакта шириной 0.3 мм.

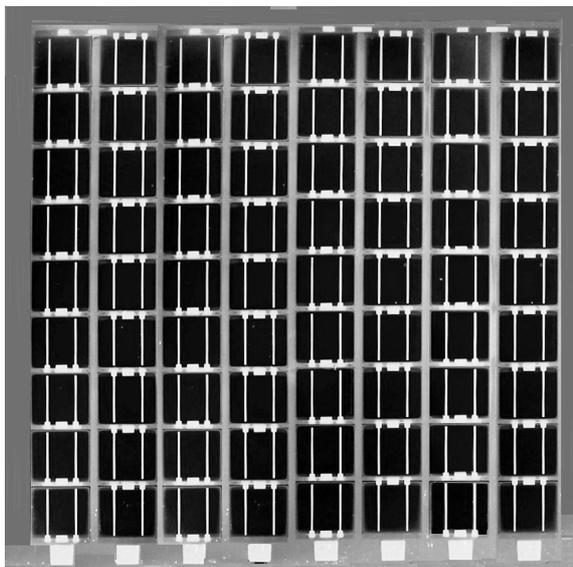


Рис. 1. Солнечный модуль на PEN-подложке.

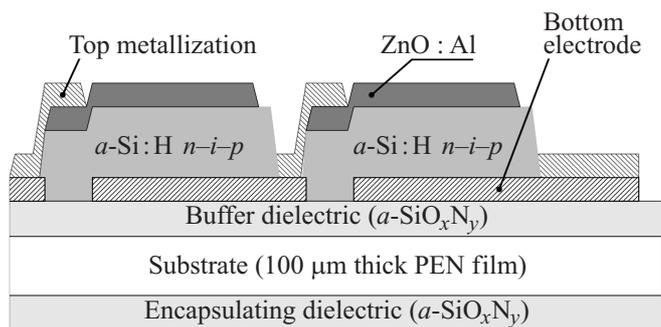


Рис. 2. Структура модуля — вид в разрезе.

Функционально слои выполняют следующие роли:

- металлический подслой необходим для обеспечения наилучшего токосъема и в качестве тыльного отражателя солнечного модуля;
- $n-i-p$ -структура преобразует оптическое излучение в электричество;
- фронтальный слой прозрачного проводящего оксида служит для обеспечения токосъема с  $n-i-p$ -структуры;
- задний инкапсулирующий слой  $a\text{-SiO}_x\text{N}_y$  предназначен для защиты от влаги и кислорода;
- передний буферный слой  $a\text{-SiO}_x\text{N}_y$  необходим для улучшения адгезии.

Процесс изготовления солнечного модуля начинается с промывки полимерных подложек в изопропаноловой ванне. После сушки на подложку наносятся задний инкапсулирующий и передний буферный  $\text{SiO}_x\text{N}_y$  слои в реакторе PECVD при температуре  $\sim 140^\circ\text{C}$ . После достижения давления ниже  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр производится распыление 200 нм Al в Ar-плазме при давлении 5 мТорр на подложку с предварительно закрепленной на ней маской № 1. Затем при схожих параметрах процесса напыляется буферный слой Cr ( $\sim 20$  нм).

Формирование  $n-i-p$ -структуры осуществляется в кластерном реакторе PlasmalabPro 100 PECVD Cluster System, частота 13.56 МГц. Осаждение легированных и нелегированных слоев проводится в разных камерах для предотвращения загрязнения.

Осаждение  $n-i-p$ -структуры ( $n$ -слой 25 нм,  $i$ -слой 300 нм,  $p$ -слой 15 нм) проводится с использованием следующих газовых смесей:  $\text{SiH}_4 + \text{H}_2 + \text{PH}_3$ ,  $\text{SiH}_4 + \text{H}_2$ ,  $\text{SiH}_4 + \text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{B}_2\text{H}_6$ . При этом были выдержаны следующие соотношения потоков газов:  $[\text{H}_2]/([\text{H}_2] + [\text{SiH}_4]) = 75\%$ ,  $[\text{PH}_3]/[\text{SiH}_4] = 1\%$ ,  $[\text{B}_2\text{H}_6]/[\text{SiH}_4] = 1\%$  и  $[\text{CH}_4]/[\text{SiH}_4] = 67\%$ . Осаждение осуществлялось при температуре  $150^\circ\text{C}$ , давлении 600 мТорр и плотности мощности высокочастотной (ВЧ) плазмы  $22 \text{ мВт/см}^2$ .

Формирование верхнего контактного слоя ZnO:Al толщиной 170 нм производилось распылением через маску № 2 в Ar-плазме при давлении 4 мТорр, 80 Вт ВЧ мощности, и температуре подложки  $150^\circ\text{C}$ . Поверхностное сопротивление слоя составило  $60 \text{ Ом/см}^2$ .

Маска № 3 используется в установке реактивного ионного травления для формирования отдельных ячеек. Структура  $n-i-p$  из  $a\text{-Si:H}$  выборочно травится в плазме  $\text{SF}_6$  при давлении 60 мТорр, потоке газа 15 ссст, и ВЧ мощности 50 Вт. Время травления 90 с. После процедуры сухого травления, слой Al толщиной 150 нм распыляется через маску № 3 при тех же параметрах процесса, что и при формировании нижнего металлического слоя, обеспечивая последовательное соединение ячеек.

### 3. Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлена спектральная зависимость квантовой эффективности. Значения квантовой эффективности для света с длиной волны  $> 550$  нм невысоки, поскольку, как мы уже отметили выше, температуры процессов осаждения были ниже оптимальных, что привело к уширению оптической щели  $i$ -слоя.

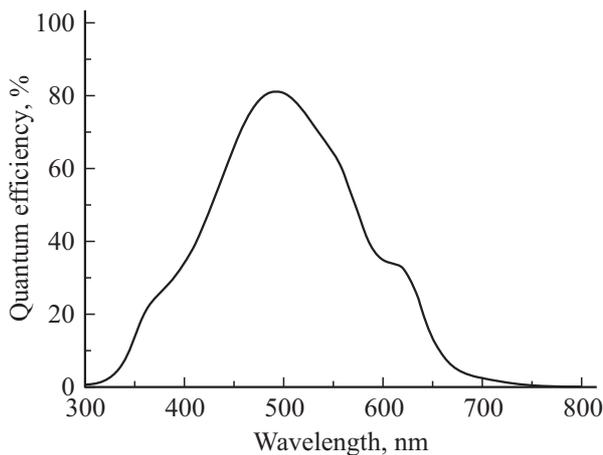


Рис. 3. Спектральная зависимость внешнего квантового выхода.

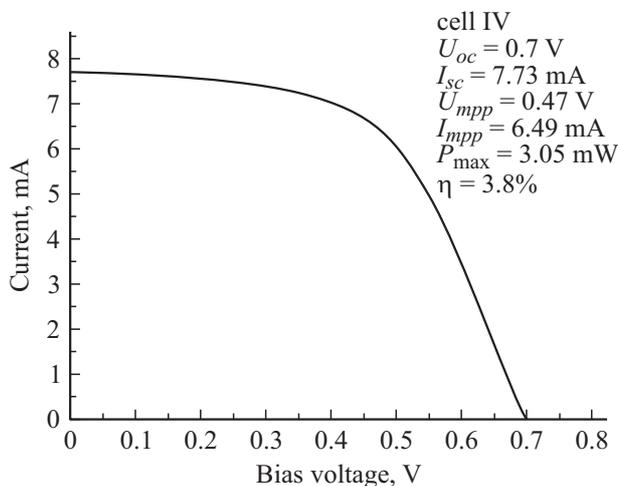


Рис. 4. Световая ВАХ одной ячейки.

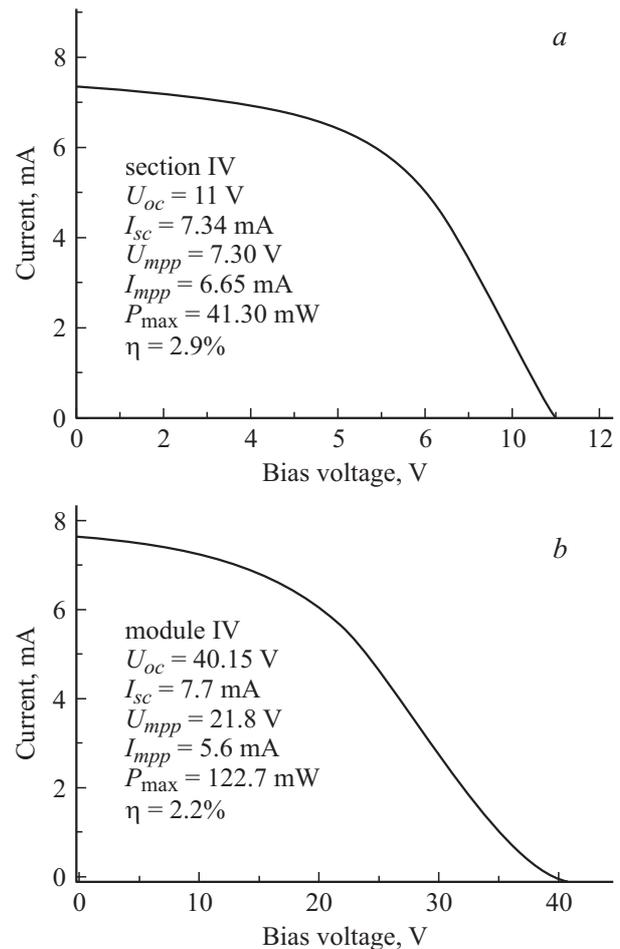


Рис. 5. ВАХ одной секции модуля, состоящей из 18 последовательно соединенных ячеек (a), и модуля, состоящего из 4 таких секций (b).

Были исследованы световые вольт-амперные характеристики (ВАХ) ячейки, секции из 18 ячеек и модуля из 4 секций. Измерения проводились при стандартном освещении AM1.5G от имитатора солнечного излучения.

На рис. 4 представлена ВАХ одной ячейки изготовленного модуля и приведены напряжение холостого хода  $U_{oc}$ , ток короткого замыкания  $I_{sc}$ , КПД  $\eta$ , максимальная вырабатываемая мощность  $P_{max}$ , напряжение и ток в точке максимальной мощности —  $U_{mpp}$  и  $I_{mpp}$  соответственно. Фотоактивная площадь ячейки  $0.8 \text{ cm}^2$ . По методике, описанной в [10], из ВАХ одной ячейки были получены следующие значения для последовательного и шунтирующего сопротивлений:  $R_s = 28.9 \text{ Ohm}$ ,  $R_{sh} = 1754 \text{ Ohm}$ . В перспективе, для увеличения фактора заполнения ВАХ и КПД ячейки необходимо понизить последовательное сопротивление и увеличить шунтирующее. Для этого нужно увеличить эффективность токосъема и устранить токи утечки.

На рис. 5 представлены ВАХ одной секции изготовленного модуля, состоящей из 18 последовательно соединенных ячеек, и модуля, состоящего из 4 таких секций. Размеры модуля составляют  $10 \times 10$  см. Более низ-

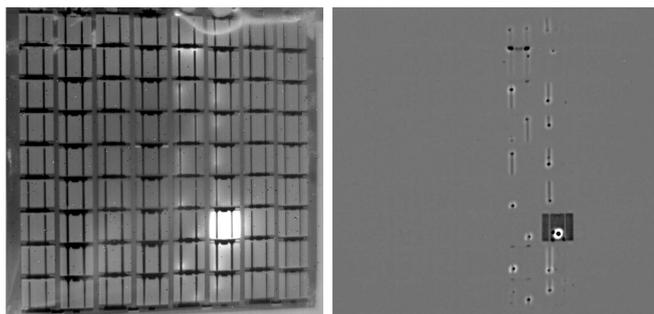


Рис. 6. Термографические снимки одной секции модуля (№ 3) с приложенным прямым смещением.

кий КПД секции (2,9%) по сравнению с КПД ячейки (3,8%) обусловлен снижением всех выходных параметров. Это связано с увеличением активной площади приборной структуры, что в свою очередь увеличивает вероятность формирования макродефектов, обусловленных недостаточной степенью чистоты лабораторного помещения для изготовления приборных структур фотоэлектрических преобразователей. Кроме того увеличивается последовательное сопротивление, обусловленное соединением ячеек в секции.

Производительность полученных модулей оказалась невысокой,  $\sim 2,6\%$ , что объясняется присутствием ячеек с паразитными сопротивлениями.

С помощью методов инфракрасной (ИК) термографии можно выявить наличие шунтирующих сопротивлений и токов утечки. На рис. 6 представлены ИК снимки, полученные с помощью установки Thermosensorik TDL 640-XL. Для обнаружения шунтов и токов утечки на секцию модуля № 3 подано напряжение прямого смещения. При протекании тока через структуру шунтирующие сопротивления начинают нагреваться, что видно на термографических снимках.

#### 4. Заключение

Были изготовлены тонкопленочные солнечные модули из  $a$ -Si:H размерами  $10 \times 10$  см на PEN-подложках толщиной 100 мкм. Представлены вольт-амперные характеристики изготовленных модулей при стандартном освещении AM1.5G от имитатора солнечного излучения. Методами ИК термометрии были выявлены токи утечки и дефекты полученных структур, которые значительно влияют на производительность модулей.

Необходимо дальнейшее улучшение параметров модулей, которого можно достичь уменьшением токов утечки и повышением эффективности токосъема.

#### Список литературы

[1] Y. Ichikawa, T. Yoshida, T. Noma, H. Sakai, K. Harashima. *Sol. Energy Mater. Solar Cells*, **66**, 107 (2001).

- [2] M.B. Schubert, R. Merz. *Phil. Mag.*, **89**, 2623 (2009).  
 [3] K. Beernink, S. Guha et al. *NASA/CP-214494*, 54 (2007).  
 [4] T. Söderström, F.-J. Haug, V. Terrazzoni-Daudrix, C. Ballif. *J. Appl. Phys.*, **103**, 114 509 (2008).  
 [5] J.K. Rath, M. Brinza, Y. Liu, A. Borreman, R.E.I. Schropp. *Sol. Energy Mater. Solar Cells*, **94**, 1534 (2010).  
 [6] J. Poortmans, V. Arkhipov. *Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications* (John Wiley & Sons Ltd, 2006) chap. 5.  
 [7] F.-J. Haug, T. Söderström, M. Python, V. Terrazzoni-Daudrix, X. Niquille, C. Ballif. *Sol. Energy Mater. Solar Cells*, **93**, 884 (2009).  
 [8] *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, ed. by A. Luque, S. Hegedus (J. Wiley and Sons, 2003).  
 [9] Y. Vygranenko, A. Khosropour, R. Yang, A. Sazonov, A. Kosarev, A. Abramov, E. Terukov. *Can. J. Phys.*, doi 10.1139/cjp-2013-0566.  
 [10] C. Zhang, J. Zhang, Y. Hao, Z. Lin, C. Zhu. *J. Appl. Phys.*, **110**, 064504 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

### Hydrogenated amorphous silicon photovoltaic modules on flexible polymer substrates

G.M. Ablayev<sup>+‡</sup>, A.S. Abramov<sup>+\*</sup>, I.A. Nyapshaev<sup>+\*</sup>, Y.K. Vygranenko<sup>#</sup>, R. Yang<sup>•</sup>, A.Y. Sazonov<sup>•</sup>, M.Z. Shvarts<sup>+\*</sup>, E.I. Terukov<sup>+\*</sup>

<sup>+</sup> Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>\*</sup> Research and Development Center for Thin Film Technologies in Energetics under Ioffe Institute LLC, 194064 St. Petersburg, Russia

<sup>‡</sup> Saint Petersburg Academic University — Nanotechnology Research and Education Centre, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>#</sup> CTS-UNINOVA, 2829-516 Caparica, Portugal

<sup>•</sup> University of Waterloo, N2L 3G1 Waterloo, Canada

**Abstract** Solar cells on lightweight and flexible substrates have advantages over the glass- or wafer-based photovoltaic devices in both terrestrial and space applications. Here, we report on development of amorphous silicon thin film photovoltaic modules fabricated on 100  $\mu\text{m}$  thick plastic substrates. The  $10 \times 10$  cm<sup>2</sup> area module consists of 72 rectangular cells, which are  $a$ -Si:H  $n-i-p$  structures. Current-voltage characteristics are presented and analysed. Leakage currents and defects were visualized using infrared imaging.