

**Ю. А. Крюков, Г. В. Цепилов**

## **Фотоэлектрические преобразователи на основе кристаллического кремния**

*Рассматривается проблема повышения конкурентоспособности вырабатываемой фотоэлектрическими электростанциями электрической энергии по сравнению с традиционными источниками. С использованием технологий люминесцентных и плазмонных покрытий, обработки приборных структур в магнитном поле обеспечивается увеличение КПД до 20 % для фотоэлектрических преобразователей на основе монокристаллического кремния.*

*Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи на основе кристаллического кремния, коэффициент полезного действия, выходные параметры, световые диодные характеристики.*

### **Об авторах**

**Крюков Юрий Алексеевич** — кандидат технических наук, проректор по информатизации и инновационной деятельности Государственного университета «Дубна».

**Цепилов Григорий Викторович** — начальник отдела ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ», г. Дубна, Московская область.

В настоящее время в результате повышения коэффициента полезного действия (КПД) промышленных образцов монокристаллических кремниевых фотоэлектрических преобразователей (Si-ФЭП) до 17—18 % при существенном снижении их стоимости китайские производители стали крупнейшими экспортерами фотоэлектрической продукции в мире [1]. Значительная часть предприятий, занимающихся промышленным выпуском фотоэлектрических модулей в России, в качестве исходных фотоэлектрических преобразователей использует приборные структуры китайского производства. Кроме того, на российском рынке самый большой сегмент импортных фотоэлектрических модулей также занимают изделия китайских производителей. При продаже ФЭП китайские изготовители кроме КПД указывают и выходные параметры: напряжение холостого хода ( $U_{ХХ}$ ), плотность тока короткого замыкания ( $J_{КЗ}$ ) и фактор заполнения световой ВАХ ( $FF$ ) которые измеряются при температуре 25 °С.

Однако в процессе эксплуатации Si-ФЭП в соответствии с величиной его КПД только незначительная часть солнечной энергии используется для генерации элек-

трической энергии. Большая часть солнечного излучения преобразуется в приборных структурах в тепло. Это приводит к повышению рабочей температуры Si-ФЭП, что обуславливает снижение их эффективности. В значительном числе работ проанализировано влияние температуры на эффективность монокристаллических Si-ФЭП, которые изготавливались в европейских странах и России (см., например, в [2—4]). При этом были установлены физические механизмы, приводящие к снижению КПД. В тоже время аналогичные исследования Si-ФЭП китайского производства за редким исключением не проводятся [5]. Таким образом, исследования влияния температуры на эффективность фотоэлектрических процессов в Si-ФЭП китайского производства следует считать актуальной научно-исследовательской задачей, имеющей большое практическое значение.

Для широкомасштабного использования фотоэлектрических электростанций в наземных условиях актуальным является обеспечение конкурентной способности вырабатываемой ими электрической энергии по сравнению с электрической энергией, вырабатываемой традиционными источниками.

Для решения этой задачи предлагается путем нанесения с помощью экономических химических технологий люминесцентных и

плазмонных покрытий и обработки фотоэлектрических преобразователей на основе монокристаллического кремния в магнитном поле обеспечить увеличение их КПД до 20 %. В качестве оптимального материала для создания люминесцентных покрытий для промышленных образцов кремниевых ФЭП выбраны слои, содержащие квантовые

точки PbS. Разработан оригинальный состав раствора для изготовления квантовых точек PbS методом *SILAR*, который отличается от известных аналогов тем, что в качестве анионного прекурсора используется щелочной раствор экономичного и химически стабильного химического реактива тиомочевины (рис. 1).

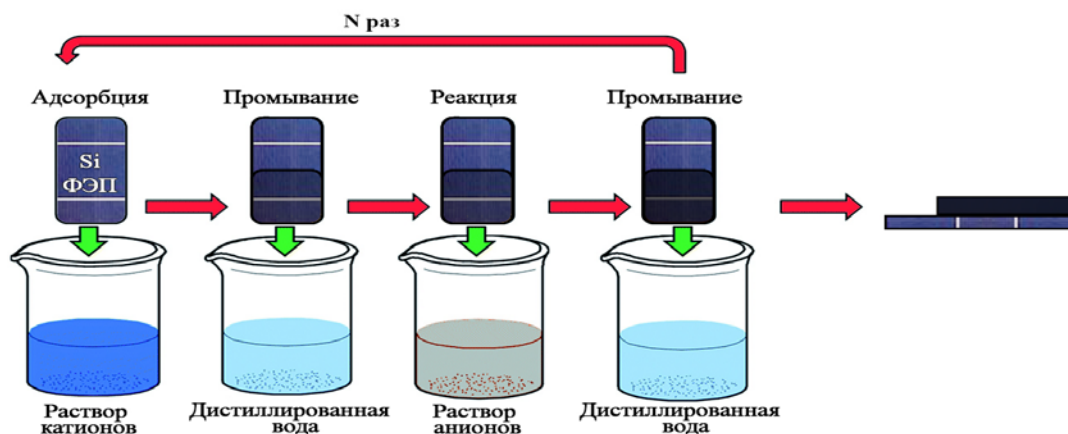


Рис. 1. Схема синтеза пленок сульфида свинца методом последовательной адсорбции и взаимодействия ионов (*SILAR*)

Для создания плазмонных покрытий для промышленных образцов кремниевых ФЭП рекомендованы наночастицы серебра. Анализ оптических свойств полученных слоев с наночастицами серебра показал их способность вызывать плазмонный резонанс. Разработан метод магнитной обработки промышленных образцов кремниевых ФЭП, который обеспечивает увеличение их эффективности до 2 относительных процентов за счет увеличения времени жизни носителей заряда генерированных под действием фотонов из коротковолновой видимой области. Проведенный численный расчет рабочих параметров ФЭП показал, что реализованные для промышленных образцов кремниевых приборных структур времена жизни неравновесных носителей заряда не ограничивают возможность увеличения их КПД свыше 20 %. Достигнутая величина последовательного и шунтирующего сопротивления не нуждаются в дальнейшей оптимизации. Показано, что увеличение плотности фототока на  $4 \text{ mA/cm}^2$  без изменения других диодных характеристик приводит к росту эффективности до 20,1 %. Установлено, что снижение на порядок плотности диодного

тока насыщения без изменения других диодных характеристик приводит к росту эффективности до 20,4 %. Одновременное увеличение плотности фототока и плотности диодного тока насыщения до указанных выше значений позволяет увеличить КПД до 23,1 %.

Особенностью разработанного на основе указанных выше ФЭП конструктивно-технологического решения фотоэлектрического модуля (ФЭМ) является наличие теплообменного блока, предназначенного для снижения рабочей температуры. Это связано с тем, что с ростом рабочей температуры установленное экспериментально относительное снижение коэффициента полезного действия кремниевых ФЭП составляет  $0.7 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ . Анализ выходных параметров показывает, что это обусловлено нетрадиционным снижением плотности тока короткого замыкания. С учетом рассчитанных перепадов температур в слоях ФЭМ при использовании теплообменного блока его перегрев относительно окружающей среды уменьшается до  $(10\text{--}12)^\circ\text{C}$ , что позволяет уменьшить потери КПД от перегрева более чем в два раза.

Для проведения исследовательских испытаний экспериментальных образцов ФЭМ путем измерения световой вольтамперной характеристики и её последующей

аналитической обработки разработан экспериментальный стенд импульсного облучения на основе ксеноновых ламп-вспышек (рис. 2).



Рис. 2. Стенд для проведения исследовательских испытаний ФЭМ

При проведении исследовательских испытаний экспериментальных образцов ФЭМ было получено, что для всех исследованных образцов была достигнута величина напряжения холостого хода не менее 37,5 В, величина тока короткого замыкания — не менее 8,25 А, величина максимальной мощности — не менее 262,8 Вт при напряжении в рабочей точке — не менее 32,0 В, что обеспечивает КПД фотоэлектрического модуля не менее 18 %.

#### **Заключение**

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что разработанный режим изготовления квантовых точек PbS методом последовательной адсорбции и реакции ионных слоев с использованием недорогих, доступных и химически стабильных компонентов позволяет получать на поверхности ФЭП слои квантовых точек с регулируемыми размерами и оптическими свойствами. Используя разработанный метод, изготовлены образцы покрытий с квантовыми точками PbS, которые наиболее интенсивно поглощают свет в ультрафиолетовой и сине-зеленой части солнечного спектра, что позволяет повысить эффективность ФЭП.

Проект реализуется в рамках выполнения прикладных научных исследований (проекта) по Соглашению о предоставлении

субсидии № 14.607.21.0076 от 20.10.2014 г. при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI60714X0076.

#### **Библиографический список**

1. Bye, G. Solar grade silicon: Technology status and industrial trends / G. Bye, B. Ceccaroli // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. — 2014. — V. 130. — P. 634—646.
2. Singh, P. Temperature dependence of solar cell performance — an analysis / P. Singh, N.M. Ravindra // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. — 2012. — V. 101. — P. 36—45.
3. Singh, P. Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell / P. Singh, S. N. Singh, M. Lal // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. — 2008. — V. 92. — P. 1611—1616.
4. Radziemska, E. Effect of temperature on dark current characteristics of silicon solar cells and diodes // *International Journal Energy Res.* — 2006. — V. 30, № 2. — P. 127—134.
5. Cai, W. The influence of environment temperatures on single crystalline and polycrystalline silicon solar cell performance / W. Cai [et al.] // *Physics, Mechanics & Astronomy*. — 2012. — V. 55, № 2. — P. 235—241.

*Поступила в редакцию  
22.12.15*