

07

## Исследование методов пассивации и защиты каскадных солнечных элементов

© А.В. Малевская, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.М. Андреев

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

E-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2020 г.

В окончательной редакции 14 мая 2020 г.

Принято к публикации 6 июля 2020 г.

Проведены исследования методов пассивации и защиты  $p-n$ -переходов в местах их выхода на боковую поверхность меза-структуры и герметизации каскадных солнечных элементов на основе гетероструктуры GaInP/GaAs/Ge. Выполнены исследования защитных покрытий на основе слоев нитрида кремния и силикона путем анализа темновых вольт-амперных характеристик солнечных элементов. Проведена оценка распределения электролюминесценции.

**Ключевые слова:** каскадный солнечный элемент, меза-структура, пассивирующие и защитные покрытия.

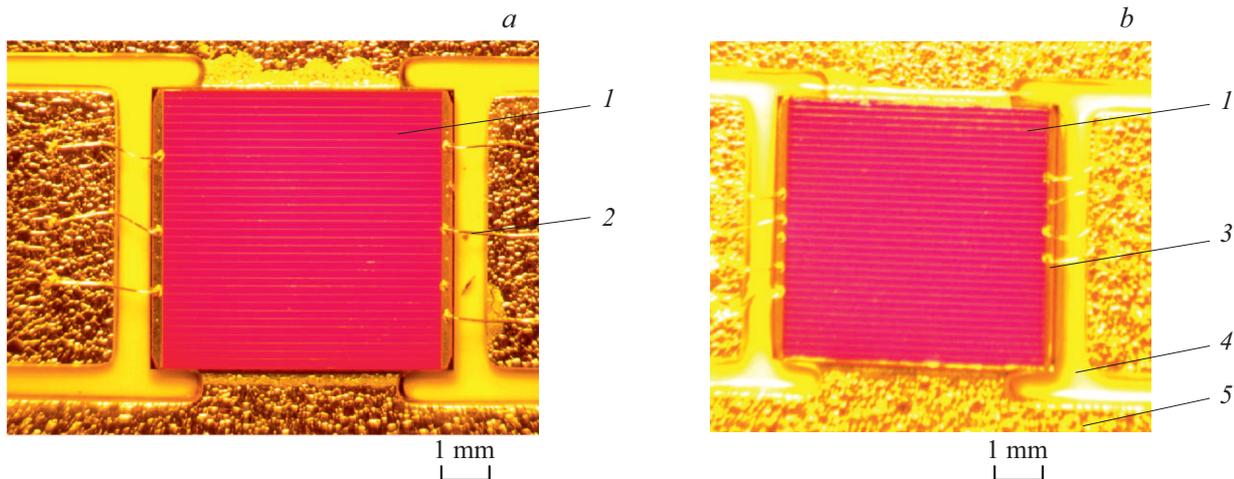
DOI: 10.21883/PJTF.2020.19.50043.18375

Каскадные солнечные элементы (КСЭ) широко используются в наземной и космической солнечной энергетике [1]. Рекордные значения КПД 47% (AM 1.5) получены для шестикаскадных солнечных элементов  $A_3B_5$  при 140-кратном концентрировании ( $C$ ) [2]. Агрессивное воздействие факторов окружающей среды (дождь, ветер, град, перепад температур) может приводить к деградации солнечных элементов в процессе их эксплуатации в составе солнечных батарей [3]. Для защиты КСЭ от воздействий факторов окружающей среды можно проводить пассивацию  $p-n$ -переходов в местах их выхода на боковую поверхность меза-структуры путем нанесения защитных покрытий, например, на основе пленок нитрида кремния, а также выполнять герметизацию фронтальной области элемента прозрачными диэлектрическими покрытиями на основе силикона. Силикон, используемый в концентраторной фотовольтаике, должен обеспечивать высокую прозрачность, устойчивость к термоциклированию, хорошую адгезию и механическую прочность под воздействием концентрированного солнечного излучения (при  $C < 1000$ ) в течение всего срока эксплуатации КСЭ. Обзор силиконов, используемых для защиты солнечных элементов, приведен в [4]. В работах [5,6] рассмотрены различные параметры деградации силиконовых герметиков под воздействием концентрированного солнечного излучения (при  $C < 1000$ ), термоциклирования при повышенных (до  $+240^\circ\text{C}$ ) и пониженных (до  $-40^\circ\text{C}$ ) температурах, а также при повышенной влажности. На основании этих испытаний сделаны выводы о возможности использования силиконовых герметиков для КСЭ. В настоящей работе проведены исследования методов пассивации и защиты  $p-n$ -переходов по боковой поверхности меза-структуры и герметизации КСЭ.

Постростовая технология изготовления КСЭ на основе гетероструктуры GaInP/GaAs/Ge включает этапы

формирования омических контактов, антиотражающего покрытия и разделения гетероструктуры на чипы КСЭ. Операция разделения осуществляется путем травления слоев гетероструктуры и германиевой подложки [7]. Непосредственно после этапа формирования меза-структуры для защиты  $p-n$ -переходов по боковой поверхности мезы от воздействия факторов окружающей среды (пыли, влажности, перепадов температур) осуществляется пассивация  $p-n$ -переходов. В качестве материала пассивирующего диэлектрического слоя выбрана пленка нитрида кремния толщиной 100–150 nm, выращенного методом плазмохимического осаждения при пониженном давлении с использованием высокочастотной плазмы. Использование нитрида кремния обусловлено его высокими барьерными характеристиками для диффузии молекул воды и кислорода, низкой скоростью окисления и высокой химической стойкостью.

Для увеличения степени защиты КСЭ проведена разработка технологии герметизации элементов после их монтажа на теплоотводящую плату с использованием силикона марки Elastosil® S690 и защитного покровного стекла толщиной 130–170  $\mu\text{m}$  (производитель Levenhuk, США). Разработанная технология герметизации КСЭ включает дозированное нанесение силикона, позиционирование покровного стекла строго над фоточувствительной областью и контролируемый прижим стекла (рис. 1, *a, b*). Размер покровного стекла задается в четком соответствии с площадью фоточувствительной области, токоотводящие проволоки остаются не закрытыми защитным стеклом, что обеспечивает улучшение теплоотвода от КСЭ за счет снижения площади материала с низкой теплопроводностью, примыкающего к элементу. При прижме стекла происходит растекание силикона на область омического контакта и боковую разделительную мезу, что обеспечивает защиту контактов, включая места пайки токоотводящей золотой проволоки,



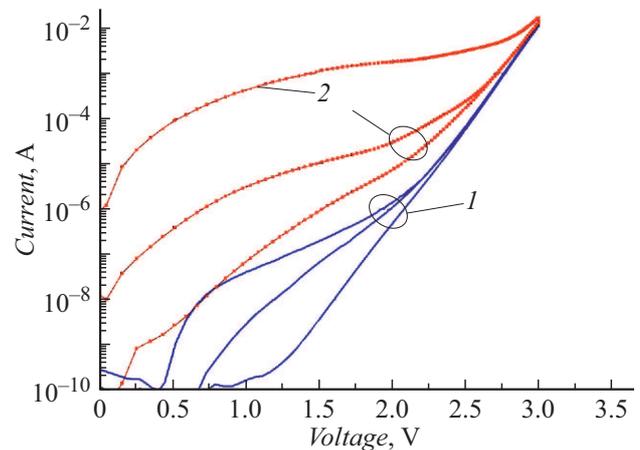
**Рис. 1.** Фотографии распределения электролюминесценции КСЭ на теплоотводящей плате. 1 — КСЭ, 2 — золотая проволока, 3 — защитное стекло, 4 — силикон, 5 — теплоотводящая плата. *a* — до герметизации, *b* — после герметизации КСЭ.

и герметизацию *p-n*-переходов в местах их выхода на боковую поверхность меза-структуры. Также при прижиме стекла происходит уменьшение толщины слоя силикона над фоточувствительной областью до  $2\text{--}5\ \mu\text{m}$ , что обеспечивает улучшение теплоотвода от элемента. КСЭ предназначен для работы при высоких степенях концентрирования солнечного излучения (более 500 крат) и плотности фототока более  $10\ \text{A}/\text{cm}^2$ , а снижение теплоотвода и нагрев элемента приводили бы к падению эффективности преобразования солнечного излучения в электроэнергию.

Стекло защищает солнечные элементы от частиц пыли и сопутствующих механических повреждений. Силикон обеспечивает надежную герметизацию КСЭ, защищает фронтальную область элементов, а также выполняет функцию адгезива для приклеивания защитного стекла. Стекло и силикон имеют близкие коэффициенты преломления, что позволяет исключить дополнительные потери на отражение излучения от границы стекло–силикон.

Для анализа качества герметизации проведены исследования распределения электролюминесценции по поверхности до и после герметизации образцов КСЭ. Равномерное свечение КСЭ по всей фронтальной поверхности свидетельствует об отсутствии дефектов и утечек тока как при монтаже КСЭ на плату (рис. 1, *a*), так и при проведении процесса герметизации КСЭ путем нанесения слоя силикона и механического прижима защитного стекла (рис. 1, *b*).

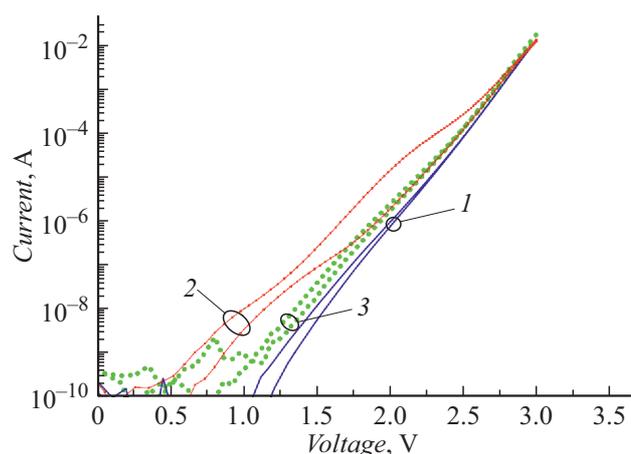
Для анализа качества и стойкости пассивирующего покрытия на основе нитрида кремния и процесса герметизации КСЭ силиконом были проведены испытания по термоциклированию элементов при повышенной влажности 85% и перепадах температур от  $-40$  до  $+85^\circ\text{C}$ . На темновых вольт-амперных характеристиках КСЭ без защитных покрытий наблюдается значительное увеличение токов утечки при значениях тока в диапазоне



**Рис. 2.** Темновые вольт-амперные характеристики КСЭ без защитного покрытия до проведения процесса термоциклирования при повышенной влажности (1) и после термоциклирования (2).

$10^{-10}\text{--}10^{-2}\ \text{A}$  на большом количестве (более 25%) исследованных образцов после проведения термоциклирования (рис. 2). На КСЭ с защитным покрытием  $\text{Si}_3\text{N}_4$  отмечается появление незначительных токов утечки (менее  $10^{-4}\ \text{A}$ ) на некоторых (менее 15%) элементах после проведения термоциклирования (рис. 3). Возрастание тока утечки может происходить из-за небольшой толщины слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $100\text{--}150\ \text{nm}$ ), что приводит к снижению стойкости при длительном термоциклировании. Однако в рабочем диапазоне токов (более  $10^{-4}\ \text{A}$ ) КСЭ утечки не наблюдается, что свидетельствует о возможности использования защитного покрытия в технологии изготовления солнечных элементов.

На вольт-амперных характеристиках КСЭ после их герметизации силиконом практически не наблюдается изменения токов утечки после проведения испытания по



**Рис. 3.** Темновые вольт-амперные характеристики КСЭ до проведения процесса термоциклирования при повышенной влажности (1), после термоциклирования КСЭ с покрытием  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (2) и с герметизацией силиконом (3).

термоциклированию, что указывает на высокое качество и стойкость силиконового покрытия к воздействию факторов окружающей среды.

Проведена разработка технологии защиты КСЭ пассивацией  $p-n$ -переходов путем плазмохимического осаждения пленок нитрида кремния. Разработана технология герметизации КСЭ путем нанесения слоя силикона и защитного покровного стекла. Результаты испытаний на стойкость покрытий показали отсутствие деградации КСЭ в рабочем диапазоне токов (более  $10^{-4}$  А) при повышенной влажности и значительных перепадах температур.

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-30035).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D.* // Concentrator photovoltaics / Eds A. Luque, V. Andreev. Springer Ser. in Optical Sciences. 2007. V. 130. P. 25–50.
- [2] *Green M.A., Dunlop E.D., Levi D.H., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Ho-Baillie A.W.Y.* // Prog. Photovol.: Res. Appl. 2019. V. 27. N 7. P. 565–575. DOI: 10.1002/pip.3171
- [3] *Honnurvali M.Sh., Gupta N., Keng Goh, Umar T., Nazeema N.* // Int. J. Sustainable Energy Development (IJSED). 2017/18. V. 6. N 2. P. 335–343. DOI: 10.20533/ijсед.2046.3707.2017.0043
- [4] *Velderrain M.* // AIP Conf. Proc. 2011. V. 1407. N 1. P. 79–83. DOI: 10.1063/1.3658299

- [5] *Eltermann F., Roeder K., Wiesenfarth M., Wilde J., Bett A.W.* // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1447. N 1. P. 276–280. DOI: 10.1063/1.4753885
- [6] *Wiesenfarth M., Dörsam T., Eltermann F., Hornung T., Siefer G., Steiner M., Riesen S., Neubauer M., Boos A., Wanka S., Gombert A., Bett A.W.* // AIP Conf. Proc. 2015. V. 1679. N 1. P. 100007. DOI: 10.1063/1.4931554
- [7] *Малевакая А.В., Ильинская Н.Д., Андреев В.М.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 24. С. 14–16. DOI: 10.21883/PJTF.2019.24.48795.17953