

06;07;13

## Эффективное просветляющее покрытие для солнечных элементов на основе сплава окислов $\text{TiO}_2$ и $\text{SiO}_2$

© С.Х. Сулейманов, В.Г. Дыскин, М.У. Джанклыч, Н.А. Кулагина

Институт материаловедения Научно-производственного объединения  
„Физика–Солнце“ АН Республики Узбекистан, Ташкент  
E-mail: dyskin@uzsci.net

Поступило в Редакцию 15 октября 2012 г.

В солнечной печи мощностью 3 kW получен сплав смеси окислов  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ . Установлено, что пленки сплава  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ , нанесенные на поверхность стеклянных и кремниевых пластин, обладают высокой механической прочностью и адгезией, прозрачны в области чувствительности солнечных элементов и могут быть использованы в качестве антиотражающего покрытия. Показано, что добавление  $\text{TiO}_2$  к  $\text{SiO}_2$  улучшает оптические свойства покрытия.

Пленки на основе смеси материалов являются эффективными просветляющими покрытиями для монокристаллических и поликристаллических кремниевых солнечных элементов (СЭ) [1–5]. Применение смесей в качестве пленкообразующих материалов для антиотражающих покрытий перспективно потому, что, изменяя компоненты смеси, их концентрацию, технологию нанесения, можно изменять оптические постоянные антиотражающего покрытия и наносить покрытия, удовлетворяющие как оптическим, так и эксплуатационным требованиям [1–3]. Напыление пленочных покрытий на основе смеси осуществляют или из двух испарителей, или из спрессованных таблеток смеси. Так как компоненты смеси имеют разную температуру испарения, то для получения воспроизводимых результатов выполняются пробные напыления, количество которых можно значительно уменьшить, если изменить технологию напыления — вместо смеси использовать сплавленные на солнечной печи композиционные материалы [4,5].

Цель данной работы — изучение фазового состава, оптических характеристик плавленого композиционного материала на основе оксидов  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  и возможности применения его в качестве антиотражающего покрытия кремниевых СЭ.

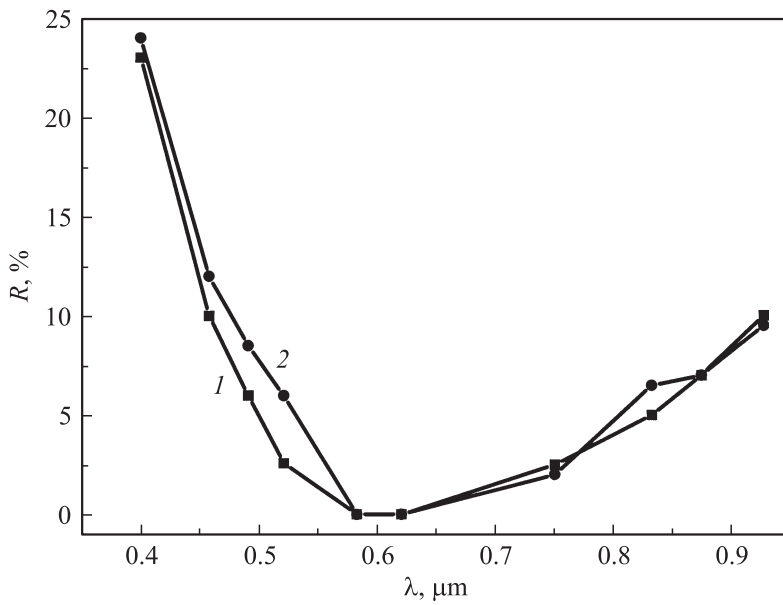
Выбор состава смеси обусловлен тем, что оксиды кремния и титана химически стабильны и механически прочны, имеют хорошую адгезию к кремнию. В области спектральной чувствительности СЭ прозрачны не только покрытия из этих оксидов, но и покрытие из их смеси, полученное совместным испарением из двух лодочек [6].

Солнечная печь — чистый источник нагрева в окислительной среде, характеризующийся большой скоростью нагрева и высокой температурой. На солнечной печи за короткое время можно получить расплав композиционного материала, в котором все реакции взаимодействия идут в жидкой фазе, вследствие чего достигается высокая однородность расплава.

Смесь оксидов плавилась на солнечной печи мощностью 3 kW при плотности лучистого потока  $\sim 800 \text{ W/cm}^2$ . Шихта для плавки готовилась мокрым смешиванием компонент, а затем высушивалась. Концентрация компонент шихты  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  составляла 10–90 wt.% (TS1090) и моль:моль (TSMМ). Из шихты прессовались таблетки весом 5 g, которые плавилась в фокальной зоне печи на охлаждаемой водой подложке. После полного расплавления таблетки расплав выдерживался еще в течение 2 min, а затем со скоростью  $\sim 100^\circ\text{C/s}$  охлаждался на подложке. После охлаждения образец переворачивали, и процесс плавки повторялся. Водяное охлаждение и тонкая гарнисажная прослойка из обрабатываемого материала исключали взаимодействие подложки с расплавом и обеспечивали высокую чистоту расплава, выбранная скорость охлаждения обеспечивала высокую степень однородности расплава.

Рентгенофазовые исследования выполнены на дифрактометре ДРОН-УМ 1. Установлено, что в зависимости от концентрации исходных компонент плавленные материалы имеют разную кристаллическую структуру. При максимальном содержании оксида кремния TS1090 материал кристаллоаморфный. При соотношении исходных компонент шихты моль:моль полученный материал имеет поликристаллическую структуру в виде закристаллизованных оксидов  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ , а также твердого раствора  $n\text{TiO}_2 \cdot m\text{SiO}_2$ .

На установке УВН-71П-3 термическим испарением порошка сплава в вакууме  $6.65 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$  наносили покрытия на кремниевые и стеклянные пластинки. Спектры пропускания для области  $0.4\text{--}1.1 \mu\text{m}$  измерены с помощью спектрофотометра Perkin Elmer Lambda EZ150. Коэффициенты пропускания обоих образцов почти не отличаются и изменяются



Спектральный коэффициент отражения системы антиотражающее покрытие  $\text{TiO}_2$ :  $\text{SiO}_2$  — кремний: 1 — TS1090, 2 — TSMМ.

в пределах от 84 до 87%, т.е. покрытия можно считать прозрачными. Коэффициенты отражения измерены с помощью фотометра ФО-1. Результаты измерений спектров отражения представлены на рисунке.

Интересно сравнить эффективности антиотражающих покрытий из разных материалов. Так как напряжение холостого хода СЭ не зависит от характеристик антиотражающего покрытия, то в качестве критерия для сравнения было выбрано относительное изменение плотности тока

$$\gamma = \left(1 - \frac{J_0}{J}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

$J_0$  — плотность тока СЭ без покрытия,  $J$  — плотность тока СЭ с покрытием. Значение  $J$  вычисляли по формуле [3]

$$J = \frac{q}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda E(\lambda) Q(\lambda) (1 - R(\lambda)) d\lambda, \quad (2)$$

Увеличение плотности генерируемого тока кремниевым СЭ с антиотражающими покрытиями из разных материалов

| Покрывтие                      | $J$ , мА/см <sup>2</sup> | $\gamma$ , % |
|--------------------------------|--------------------------|--------------|
| TS1090                         | 39.7                     | 29.3         |
| ZnS                            | 36.6                     | 23.2         |
| SiO <sub>2</sub>               | 35.5                     | 20.8         |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | 37.6                     | 25.3         |

$q$  — заряд электрона,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света в вакууме,  $E(\lambda)$  — стандартный спектр прямого потока солнечного излучения AM1.5,  $R(\lambda)$  — коэффициент отражения,  $\lambda_2 = 1.11 \mu\text{m}$  — верхняя граница чувствительности СЭ, соответствует ширине запрещенной зоны кремния при комнатной температуре,  $\lambda_1 = 0.4 \mu\text{m}$ , так как при сборке солнечных батарей СЭ приклеиваются к стеклу, пропускание которого при  $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$  резко уменьшается, а эффективность преобразования падает. Так как сравниваются антиотражающие покрытия, то квантовый выход  $Q(\lambda)$  принимался равным единице, т.е. считалось, что каждый квант света производит одну электронно-дырочную пару. При численном интегрировании (2) использовались измеренные значения  $R(\lambda)$  и данные [7] (область спектра  $0.4\text{--}0.927 \mu\text{m}$ ), а для неизмеренной области спектра ( $0.95\text{--}1.1 \mu\text{m}$ ) значение  $R(\lambda)$  экстраполировалось полиномом шестой степени. Значение плотности тока для СЭ без покрытия  $\sim 28.1 \text{ mA/cm}^2$ , для покрытия TS1090  $\sim 39.7 \text{ mA/cm}^2$ , для покрытия TSMМ  $\sim 39.2 \text{ mA/cm}^2$ . Результаты вычисления по формуле (1) представлены в таблице. Видно, что применение антиотражающих покрытий увеличивает плотность тока на 20–30%. По сравнению с антиотражающими покрытиями ZnS, SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> композиционные покрытия TiO<sub>2</sub>:SiO<sub>2</sub> увеличивают плотность тока на 5–11%, т.е. являются более эффективными. Следует отметить, что композиционные покрытия на основе оксидов TiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>, нанесенные на поверхность стеклянных и кремниевых пластинок, обладают высокой механической прочностью (не царапаются стальной иглой) и хорошей адгезией (не отрываются от поверхности клейкой лентой).

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

добавление TiO<sub>2</sub> к SiO<sub>2</sub> улучшает оптические свойства антиотражающего покрытия;

покрытия на основе сплава оксидов  $TiO_2$  и  $SiO_2$  обладают высокой механической прочностью и хорошей адгезией к кремнию;

покрытия на основе сплава оксидов  $TiO_2$  и  $SiO_2$  более эффективные, чем традиционно используемые антиотражающие покрытия  $ZnS$ ,  $SiO_2$  и  $Si_3N_4$ ;

покрытие TS1090 может быть использовано в качестве антиотражающего покрытия для кремниевых СЭ.

## Список литературы

- [1] Егоров В.Н., Чистый И.Л., Гусынин В.Ф. // ОМП. 1986. № 8. С. 4–6.
- [2] Дыскин В.Г., Газиев У.Х. // Гелиотехника. 1993. № 4. С. 59–63.
- [3] Клой Н.И., Литовченко В.Г., Лукьянов А.Н. и др. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 122–126.
- [4] Suleimanov S., Dyskin V., Djanklich M., Dudko O., Kulagina N. Development of Coatings for Solar Energy Systems // Green Ventures. International Partnership Forum. Potsdam, Germany, 2012, June 13–15. P. 188.
- [5] Сулейманов С.Х., Джанклыч М.У., Дыскин В.Г., Сеттарова З.С., Кулагина Н.А., Турсунов М.Н. // Гелиотехника. 2010. № 4. С. 64–66.
- [6] Корницкий У.Н., Ощепков С.И., Уласюк В.Н., Хоменко В.М. // ОМП. 1988. № 1. С. 36–38.
- [7] Bouhafs D., Moussi A., Chikouche A., Ruiz J.M. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 1998. V. 52. P. 31–38.