УДК 621.383

МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНЫЕ ПЛЕНКИ ДЛЯ ЗАДНИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

А.В. Смирнов, М.И. Зимнухов

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова
РФ 428010, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Университетская, 38
тел.: +7 (8352) 58-30-36; e-mail: fizteh21@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.002

Заключение совета рецензентов: 07.10.15 Заключение совета экспертов: 12.10.15 Принято к публикации: 19.10.15

Синтезированы пленки Ag и Ag-sp1-C (линейно-цепочечный углерод) на подложках стекло-ZnO, проведено сравнение спектров отражения в красной и ближней ИК-области и показано увеличение отражения в случае применения углеродной пленки, что требует дальнейшего исследования данных материалов в качестве задних отражателей для tandemных кремниевых фотоэлектрических модулей. Отмечается незначительное изменение топологии поверхности и шероховатости поверхности слоя.

Ключевые слова: солнечные модули, задние отражатели, оксид цинка, линейно-цепочечный углерод, пленки серебра.

METAL-CARBON FILMS FOR BACK REFLECTORS OF PV MODULES

A.V. Smirnov, M.I. Zimnukhov

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov
38 Universitetskaya str., Cheboksary, Chuvash Republic, 428010 Russian Federation
ph.: +7 (8352) 58-30-36, e-mail: fizteh21@yandex.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.002

Referred 7 October 2015 Received in revised form 12 October 2015 Accepted 19 October 2015

Ag and Ag-LCC films (linear-chain carbon) were synthesized on glass-ZnO substrates, reflectance spectra in the red and near infrared regions were compared and an increase of reflection in the case of the carbon film was shown. All this requires further study of these materials as rear reflectors for tandem silicon photovoltaic modules. It is noticed a slight change in the surface topology and roughness of the surface layer.

Keywords: tandem type solar modules, zinc oxide, rear reflectors, carbon, silver film.

Смирнов Александр
Вячеславович
Alexander V. Smirnov

Сведения об авторе: инженер ЧГУ им. И.Н. Ульянова, председатель Ассоциации молодых физиков Чувашии.

Образование: Чувашский государственный университет.

Область научных интересов: углеродные нанотехнологии, солнечные энергоустановки, пленки серебра.

Публикации: 35.

Information about the author: engineer in CSU named after I.N. Ulyanov, chairman of the Association of Young Physicists of Chuvashia.

Education: Chuvash State University named after I.N. Ulyanov.

Research area: carbon nanotechnology, solar power, silver films.

Publications: 35.

Зимнухов Михаил Андреевич
Mikhail A. Zimnuhov

Сведения об авторе: магистрант СПбГЭТУ «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина).

Образование: Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова.

Область научных интересов: солнечная энергетика, углеродная электроника, компьютерное моделирование.

Публикации: 7.

Information about the author: undergraduate of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin).

Education: Chuvash State University named after I.N. Ulyanova.

Research area: solar energy, carbon electronics, computer simulation.

Publications: 7.

Введение

В последнее десятилетие наблюдается всплеск интереса научно-исследовательских групп к проблеме повышения эффективности тонкопленочных солнечных элементов tandemного типа (a -Si:H/ mc -Si, a -Si/ a -Si-Ge и др.) [6] не только по генерирующему слою, но и антибликовым покрытиям, новым типам прозрачных проводящих слоев для токосъема (AgO), задним отражателям (back reflectors) [1, 2].

Многокаскадные кремниевые солнечные модули имеют высокую эффективность преобразования с использованием слоев поглощения с различной шириной запрещенной зоны. Поскольку TCO (электропроводящий прозрачный оксид) играет важную роль в захвате и рассеянии света обратно в генерирующий слой [3], научно-исследовательские лаборатории России, США, Германии сосредоточены на разработке TCO с улучшенными параметрами прозрачности, рассеяния и электропроводимости.

Данная работа посвящена синтезу и исследованию материала, который в перспективе можно будет

применять в качестве заднего отражателя в tandemных солнечных модулях, серьезным недостатком которых остается плохое поглощение красных и ИК-фотонов в микрокристаллическом слое.

Объект исследования

Высокая отражательная способность в длинноволновом диапазоне со случайной шероховатостью (зависящая от технологических особенностей осаждения и температуры подложки) пленок Ag, Al и их соединений делают эти материалы перспективными в роли отражателей для модулей на основе гетеропереходов a -Si:H/ mc -Si:H. В настоящий момент [7] именно соединения ZnO/Al и ZnO/Ag нашли более широкое применение в промышленном производстве благодаря стабильности свойств в течение длительного времени и по некоторым данным могут увеличить квантовую эффективность и в конечном счете КПД модулей на 1,3 %.

Рис. 1. Внешняя квантовая эффективность тандема a -Si:H and μ c-Si [4]

Fig. 1. The external quantum efficiency of the tandem a -Si:H and μ c-Si [4]

Для повышения поглощения в области 500...700 нм, где наблюдается недостаточная квантовая эффективность для tandemных модулей (см. рис. 1), используется шероховатая отражающая поверхность из серебра и оксида цинка (Ag/ZnO). На рис. 2 представлена зависимость коэффициента отражения от волнового числа. Случайно шероховатая поверхность Ag/ZnO удлиняет путь фотонов в ближнем ИК, увеличивая поглощение в генерирующем слое, что удлиняет световой путь и приводит к повышению плотности тока и КПД солнечной панели.

Рис. 2. Спектр отражения ZnO и ZnO/Ag в длинноволновой области, полученный в [5]
Fig. 2. The reflectance spectrum of ZnO and ZnO/Ag in the long-wavelength region obtained in [5]

Методика эксперимента и полученные результаты

Напыление пленок серебра производилось в вакуумной установке УВР-3М при остаточном давлении около 10^{-3} Па методом терморезистивного испа-

рения на стеклянные подложки с осажденным оксидом цинка. Синтез пленок линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) осуществлялся на модернизированной вакуумной ионно-плазменной установке «Алмаз». На рисунках 3 и 4 показана зависимость показателя преломления n и показателя поглощения k от длины волны и типичная спектрограмма, полученная на UV-Vis спектрофотометре Lambda-25. Показатель преломления в красном и ближнем ИК-диапазоне оптического спектра практически не зависит от длины волны. Обращает на себя внимание, что пленка ЛЦУ проявляет хорошую адгезию к поверхности и может служить покрытием, защищающим металлическую поверхность от окисления.

Рис. 3. Зависимость показателя преломления n и показателя поглощения k от длины волны
Fig. 3. The dependence of the refractive index n and the absorption index k of wavelength

Рис. 4. Типичный спектр пропускания пленки ЛЦУ толщиной 100 нм
Fig. 4. The typical transmission spectrum of 100 nm thickness LCC film

На рис. 5–6 представлена зависимость коэффициента отражения для исследуемых структур, полученных на быстродействующем спектральном эллипсометре «Эллипс-1891» в диапазоне 350...900 нм.

Рис. 5. Спектр отражения пленки Ag на подложке стекло-ZnO

Fig. 5. Reflection spectrum of a film on Ag substrate glass-ZnO

Рис. 6. Спектр отражения пленки Ag-ЛЦУ на подложке стекло-ZnO

Fig. 6. Reflection spectrum of a film of Ag-LCC on the substrate glass-ZnO

Исходя из анализа рис. 6 и рис. 7, можно сделать вывод, что в целевом диапазоне длин волн (500...700 нм) наблюдается увеличение отражения в случае применения углеродной пленки.

Морфология поверхности и профиль получены на сканирующем зондовом микроскопе SolverNext в полуконтактном режиме в масштабе 10x10 мкм.

Рис. 7. Морфология поверхности слоя Ag-ЛЦУ / ZnO

Fig. 7. The surface morphology of Ag-LCC/ZnO layer

Рис. 8. Морфология поверхности Ag / ZnO

Fig. 8. The surface morphology of the Ag / ZnO

Исходя из анализа выбранного профиля поверхности образцов Ag/ZnO (рис. 7) и Ag-ЛЦУ/ZnO (рис. 8), можно сделать вывод, что углеродная пленка практически не изменяет высоту объектов, улучшая периодичность нанокластерных образований.

Выводы

Комплексным применением метода терморезистивного испарения в вакууме и ионно-плазменного метода изготовлены пленки Ag и Ag-ЛЦУ на стеклянных подложках с предварительно нанесенным слоем ZnO, предоставленных НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург). Исходя из сопоставления коэффициентов отражения в красной и ближней ИК области, сделан вывод о повышении коэффициента отражения в случае нанесения углеродной пленки, которая при этом почти не меняет шероховатость поверхности. Проведены первые исследования морфологии поверхности синтезированных пленок.

Работа выполнена в рамках стипендии Президента Российской Федерации на 2013–2015 (грант СП-4717.2013.1).

Список литературы

1. Iida H., Shiba N., Mishuku T., Karasawa H., Ito A., Yamanaka M., Hayashi Y. Efficiency of the a-Si:H Solar cell and grain size of SnO₂ transparent conductive film // *IEEE Electron Device Lett.* 1983. Vol. 4. P. 157–159.
2. Ferry V., Verschuuren M., Li H., Schropp R., Atwater H., Polman A. Improved red-response in thin film a-Si:H solar cells with soft-imprinted plasmonic back reflectors // *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol. 95. P. 183503–183505.
3. Wehrspohn R., Üpping J., Bielawny A., Beckers T., Lambertz A., Carius R. Tandem solar cells with integrated intermediate reflectors. 21 September 2010, SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.120108.003149.
4. Vanecek M. et. al. WCPEC-3, Osaka, 2004.

5. Zamiri R., Rebelo A., Zamiri G., Adnani A., Kuashal A., Belsleyd M.S., Ferreira J.M.F. Far-infrared optical constants of ZnO and ZnO/Ag nanostructures // *RSC Adv.* 2014. Vol. 4. P. 20902–20908.

6. Zhu H. et al. Study of silicon thin film solar cells with different back-reflectors // *Physica status solidi (a)*. 2013. Vol. 210, iss. 6. P. 1143–1148.

7. Yang J., Yan B., Yue G., Guha S. Light trapping in hydrogenated amorphous and nano-crystalline silicon thin film solar cells // *Materials Research Society*. Vol. 1153. DOI: <http://dx.doi.org/10.1557/PROC-1153-A13-02>.

References

1. Iida H., Shiba N., Mishuku T., Karasawa H., Ito A., Yamanaka M., Hayashi Y. Efficiency of the a-Si:H Solar cell and grain size of SnO₂ transparent conductive film. *IEEE Electron Device Lett.*, 1983, vol. 4, pp. 157–159 (in Eng.).
2. Ferry V., Verschuuren M., Li H., Schropp R., Atwater H., Polman A. Improved red-response in thin film a-Si:H solar cells with soft-imprinted plasmonic back reflectors. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 95, pp. 183503–183505 (in Eng.).
3. Wehrspohn R., Üpping J., Bielawny A., Beckers T., Lambertz A., Carius R. Tandem solar cells with integrated intermediate reflectors. 21 September 2010, SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.120108.003149 (in Eng.).
4. Vanecek M. et. al. WCPEC-3, Osaka, 2004 (in Eng.).
5. Zamiri R., Rebelo A., Zamiri G., Adnani A., Kuashal A., Belsleyd M.S., Ferreira J.M.F. Far-infrared optical constants of ZnO and ZnO/Ag nanostructures. *RSC Adv.*, 2014, vol. 4, pp. 20902–20908 (in Eng.).
6. Zhu H. et.al. Study of silicon thin film solar cells with different back-reflectors. *Physica status solidi (a)*, 2013, vol. 210, iss. 6, pp. 1143–1148 (in Eng.).
7. Yang J., Yan B., Yue G., Guha S. Light trapping in hydrogenated amorphous and nano-crystalline silicon thin film solar cells. *Materials Research Society*, vol. 1153. DOI: <http://dx.doi.org/10.1557/PROC-1153-A13-02> (in Eng.).

Транслитерация по ISO 9:1995