УДК 621.383.51 EDN BTZZCD

Технология получения сенсибилизированных солнечных элементов DSSC с уменьшенной толщиной TiO_2-фотоанода

С.С. Шарипбаев*

Наманганский государственный технический университет, 160115, Наманган, Узбекистан

*E-mail: sharipbayev1999@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена технология изготовления сенсибилизированных красителем солнечных элементов DSSC с уменьшенной толщиной фотоанода на основе диоксида титана TiO_2. Описаны подготовка прозрачной проводящей FTO-подложки, приготовление пасты из TiO_2 P25, формирование однослойного покрытия методом спин-коатинга, термическая обработка, адсорбция красителя Ruthenizer 535 и сборка ячейки с жидким электролитом. В качестве контрэлектрода применено FTO-стекло с платиновым или графитовым слоем, а герметизация выполнена полимерным уплотнителем Surlyn. Фотоэлектрические характеристики определены при освещении AM1.5G с плотностью мощности 100 мВт/см²; дополнительно использованы электрохимическая импедансная спектроскопия, SEM и AFM. Получено равномерное TiO_2-покрытие толщиной около 10 мкм с размером наночастиц 20-30 нм. Для исследованных элементов зафиксированы плотность тока короткого замыкания до 9,53 мА/см², напряжение холостого хода до 0,693 В и коэффициент заполнения 0,538. Максимальная эффективность преобразования энергии составила 6,5 %, что в работе сопоставлено с характеристиками традиционных двухслойных структур. Показано, что однослойный фотоанод упрощает технологический процесс и может способствовать снижению внутреннего сопротивления и рекомбинационных потерь. Полученные результаты подтверждают перспективность подхода для гибких и прозрачных фотоэлектрических устройств.

Ключевые слова: DSSC, диоксид титана (TiO_2), однослойный фотоанод, спин-коатинг, Ruthenizer 535, вольт-амперные характеристики.

Для цитирования: Шарипбаев, С. С. Технология получения сенсибилизированных солнечных элементов DSSC с уменьшенной толщиной TiO_2-фотоанода / С. С. Шарипбаев // Модернизация, Инновации, Прогресс (MIP ENGINEERING-VII-2026): материалы VII Всероссийской (национальной) научной конференции (Красноярск, 11–12 сентября 2026 г.). – Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений, 2026. – Т. 20. – С. 368-372. – EDN: BTZZCD.

Technology for fabricating dye-sensitized solar cells (DSSC) with reduced TiO_2 photoanode thickness

S.S. Sharipbayev*

Namangan State Technical University, 160115, Namangan, Uzbekistan

*E-mail: sharipbayev1999@mail.ru

Abstract. A fabrication technology for dye-sensitized solar cells (DSSC) with a reduced-thickness titanium dioxide (TiO_2) photoanode is considered. Preparation of a transparent conductive FTO substrate, formulation of a P25 TiO_2 paste, deposition of a uniform single layer by spin coating, thermal treatment, adsorption of Ruthenizer 535 dye, and assembly of a cell with a liquid electrolyte are described. Photovoltaic characteristics were measured under AM1.5G illumination at a power density of 100 mW/cm²; electrochemical impedance spectroscopy, SEM, and AFM were additionally used. A uniform TiO_2 coating with a thickness of about 10 μm and nanoparticle sizes of 20-30 nm was obtained. The investigated cells demonstrated a short-circuit current density of up to 9.53 mA/cm², an open-circuit voltage of up to 0.693 V, and a fill factor of 0.538. The maximum reported power conversion efficiency was 6.5%, which was compared in the study with conventional two-layer structures. It is shown that a single-layer photoanode simplifies the fabrication process and may reduce internal resistance and recombination losses. The results indicate the potential of this approach for flexible and transparent photovoltaic devices.

Keywords: DSSC, titanium dioxide (TiO_2), single-layer photoanode, spin coating, Ruthenizer 535, current-voltage characteristics.

For citation: Sharipbayev, S. S. Technology for fabricating dye-sensitized solar cells (DSSC) with reduced TiO_2 photoanode thickness / S. S. Sharipbayev // Modernization, Innovations, Progress (MIP ENGINEERING-VII-2026): Proceedings of the VII All-Russian

(National) Scientific Conference (Krasnoyarsk, September 11–12, 2026). – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Regional Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations, 2026. – Vol. 20. – P. 368-372. – EDN: BTZZCD.

1. Введение

В последние годы наблюдается рост интереса к разработке альтернативных источников энергии, в частности солнечных элементов нового поколения. Традиционные кремниевые солнечные панели обладают высокой эффективностью, однако их производство требует значительных энергетических затрат и экономических вложений. В связи с этим сенсибилизированные красителем солнечные элементы (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSC) рассматриваются как привлекательная альтернатива благодаря простоте конструкции, относительно низкой стоимости производства и способности работать при низкой освещённости [1, 2].

Особое внимание уделяется фотоанодам на основе диоксида титана (TiO_2), обеспечивающим транспорт электронов. В классических конструкциях DSSC применяется двухслойная система TiO_2, состоящая из плотного и пористого слоёв, что усложняет технологический процесс и повышает себестоимость изготовления.

2. Постановка задачи (Цель исследования)

Цель исследования заключается в разработке и экспериментальной оценке DSSC на основе упрощённой однослойной структуры TiO_2-фотоанода. Рассматривается возможность уменьшения технологической сложности при сохранении требуемых фотоэлектрических характеристик. В исходной работе предполагается, что однослойный фотоанод способен улучшить перенос носителей заряда и уменьшить число рекомбинаций [3].

3. Методы и материалы исследования

3.1. Подготовка и нанесение TiO_2-фотоанода

В исследовании применялись прозрачные проводящие подложки на основе FTO-стекла. В качестве активного материала использовался диоксид титана марки P25 [4, 5]. Паста TiO_2 готовилась смешиванием 0,5 г порошка TiO_2, 2 мл HNO_3, 0,4 мл полиэтиленгликоля и 2 капель Triton X-100. Смесь подвергалась ультразвуковой обработке для диспергирования частиц.

Нанесение TiO_2 на подложку выполнялось методом спин-коатинга при скорости 3000 об/мин с формированием однослойного равномерного покрытия. Образцы подвергались термической обработке при 450 °C в течение 30 минут. После охлаждения их помещали в

раствор красителя Ruthenizer 535 на основе этанола. Адсорбция проводилась при 40 °C в течение 24 часов с предварительной ультразвуковой обработкой для более равномерного распределения молекул красителя по поверхности TiO_2.

3.2. Сборка солнечного элемента

Контрэлектрод изготавливался на основе FTO-стекла с нанесением слоя платины или графита. Между анодом и катодом помещался жидкий электролит, содержащий полиэтиленоксид (PEO), этиленкарбонат (EC), пропиленкарбонат (PC), йодид тетрапропиламмония (TPAI) и йод (I_2). Герметизация устройства выполнялась с использованием полимерного уплотнителя Surlyn.

3.3. Фотоэлектрические измерения

Фотоэлектрические характеристики ячеек тестировались с использованием солнечного симулятора AM1.5G при плотности мощности 100 мВт/см². Измерялись плотность тока короткого замыкания (Jsc), напряжение холостого хода (Voc), коэффициент заполнения (FF) и общая эффективность преобразования энергии (η). Дополнительно проводился анализ методом электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) для оценки ионной проводимости электролита и внутреннего сопротивления элементов.

4. Полученные результаты

Применение однослойной структуры TiO_2 позволило получить плотность тока короткого замыкания Jsc до 9,53 мА/см² и напряжение холостого хода Voc до 0,693 В при коэффициенте заполнения FF = 0,538. В исходной работе эффективность преобразования энергии указана на уровне 6,5 %, что на 130 % выше по сравнению с использованными для сопоставления двухслойными системами DSSC.

Вольт-амперные характеристики солнечного элемента с активной площадью 0,2 см² измерялись с помощью прибора «Metrohm Autolab Potentiostat/Galvanostat PGSTAT 128N» при плотности мощности излучения солнечного симулятора 1000 Вт/м². Полученные фотовольт-амперные характеристики исследованных DSSC представлены на рисунке 1.

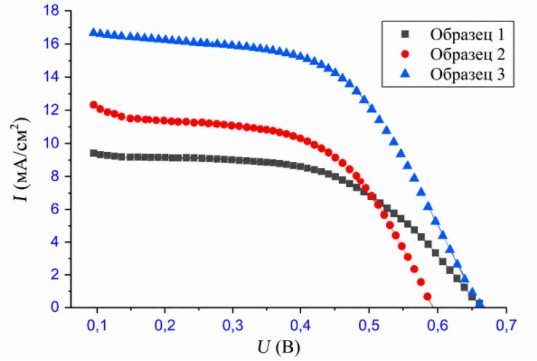

Рисунок 1. Фотовольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводниковых краситель-сенсибилизированных солнечных элементов (DSSC).

SEM-изображения показали равномерное покрытие TiO_2 толщиной порядка 10 мкм с наночастицами размером 20-30 нм. По данным атомно-силовой микроскопии (AFM) поверхность характеризуется низкой шероховатостью, что в работе связывается с эффективной адсорбцией красителя и хорошим контактом между слоями. Анализ ЭИС подтвердил снижение внутреннего сопротивления и повышение ионной проводимости, что положительно повлияло на характеристики фотоэлектрической ячейки.

5. Выводы

Разработка однослойного фотоанода на основе TiO_2 позволила упростить технологический процесс изготовления DSSC и снизить количество технологических операций. Однослойная структура в проведённом исследовании связана со снижением рекомбинации электронов и увеличением скорости переноса носителей заряда; максимальная заявленная эффективность преобразования энергии составила 6,5 %. Рассмотренная технология имеет потенциал применения в гибких и прозрачных солнечных элементах для автономных энергетических систем, носимой электроники и интеграции в строительные конструкции.

Список литературы

1. Dye-sensitized solar cells / A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun [et al.] // Chemical Reviews. – 2010. – Vol. 110, No. 11. – P. 6595-6663. – https://doi.org/10.1021/cr900356p. – EDN: OBQOTF.
2. O'Regan, B. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films / B. O'Regan, M. Grätzel // Nature. – 1991. – Vol. 353. – P. 737-740.

3. Zhang, Q. Nanostructured photoelectrodes for dye-sensitized solar cells / Q. Zhang, G. Cao // Nano Today. – 2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 91-109. – https://doi.org/10.1016/j.nantod.2010.12.007. – EDN: OKQHJX.
4. Aram, E. Improvement of ionic conductivity and performance of quasi-solid-state DSSC using PEO/PMMA gel electrolyte / E. Aram, M. Ehsani, H. A. Khonakdar // Thermochimica Acta. – 2015. – Vol. 615. – P. 61-67. – https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.07.006.
5. Grätzel, M. Dye-sensitized solar cells / M. Grätzel // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. – 2003. – Vol. 4, No. 2. – P. 145-153. – https://doi.org/10.1016/S1389-5567(03)00026-1.