

УДК 535.21

## РАЗРАБОТКА ДВОЙНОГО ПРОЗРАЧНОГО ВЕРХНЕГО ЭЛЕКТРОДА ДЛЯ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Иванов В.С. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – к.ф.-м.н., Гец Д.С.

(Университет ИТМО)

**Введение.** Развитие перовскитных солнечных элементов (СЭ) началось в 2009 году, когда впервые были синтезированы устройства, активным материалом в которых были галогенидные перовскиты [1]. Перовскиты – это класс материалов, обладающих общей кристаллической структурой  $ABX_3$ . В прошлом году был достигнут новый рекорд эффективности преобразования энергии в таких устройствах – 26.1% [2]. Таким образом, они, как и кремниевые СЭ, приблизились к максимальному теоретическому значению эффективности – пределу Шокли-Квиссера. Для перовскитных СЭ его значение составляет чуть выше 30%. Методом получения более эффективных устройств является синтез tandemных солнечных элементов. В них две или более ячейки связаны, при этом у каждой активный материал обладает своим значением ширины запрещенной зоны, что позволяет поглощать более широкую часть спектра. Такими устройствами могут быть пары перовскит/кремний, перовскит/CIGS или перовскит/перовскит [3].

Для того, чтобы tandemная система работала, необходимо, чтобы верхняя ячейка была прозрачной по отношению к нижней, то есть ширина запрещенной зоны верхнего каскада должна быть больше, чем у нижнего. Кроме того, так как перовскитные солнечные элементы состоят из ряда слоев, то все они должны быть прозрачными для фотонов. В стандартной структуре в качестве одного из электродов используется металл. Таким образом, основной проблемой в процессе синтеза перовскитных солнечных элементов для применения в tandemных системах является введение прозрачного электрода.

Существует ряд материалов, которые могут быть использованы как прозрачные электроды в перовскитных солнечных элементах. Среди них: тонкий (меньше 10 нм) слой металла, углеродные нанотрубки, а также – прозрачные проводящие оксиды [4]. Среди последних материалов особенно выделяется оксид индия-олова (ITO), который обычно используется в качестве нижнего электрода в перовскитных СЭ. Процесс его нанесения – магнетронное напыление – происходит при высоких температурах, что может привести к разрушению слоев, входящих в состав устройства [5]. Для их защиты обычно вводится дополнительный неорганический слой методом атомно-слоевого осаждения, что значительно увеличивает стоимость производства. В данной работе предложен метод напыления ITO в условиях комнатной температуры, – это значительно снижает урон от ионов, позволяя использовать дополнительный слой, нанесенный методом центрифугирования.

**Основная часть.** В данной работе используется следующая инвертированная структура солнечного элемента: стеклянная подложка с нанесенным на нее специальной схемой слоем ITO, дырочный транспортный слой – полимер РТАА, активный материал – перовскит  $MAPbI_3$ , электронный транспортный материал РСВМ, защитный слой, нанесенный методом центрифугирования –  $ZnO$ , а также двойной полупрозрачный электрод – нанесенный при комнатной температуре слой ITO и специальная схема серебра для повышения проводимости. Ранее были найдены оптимальные условия нанесения защитного слоя – наночастиц  $ZnO$ . В ходе данной работы был проведен поиск оптимальных условий нанесения оксида индия-олова при комнатной температуре. Также была продумана и реализована схема нанесения двойного полупрозрачного электрода ITO/Ag. Серебро наносилось методом термического напыления таким образом, чтобы в устройстве оставались прозрачные области, при этом проводимость увеличилась.

Двумя ключевыми параметрами для оценки качества нанесения слоя ITO на стекле были спектр пропускания устройств и их сопротивление. При этом следующие параметры изменялись в ходе экспериментов: потоки газов носителей (кислород и аргон), мощность

мишени, скорость прохода подложек, а также количество проходов. Первые два параметра влияли на структуру формирующегося слоя, в то время как последние два – на толщину.

**Выводы.** В ходе работы были получены пленки ИТО методом магнетронного напыления, обладающие пропусканием в видимой и ИК областях более 85%. При этом сопротивление не превышало 50 Ом/см<sup>2</sup>. Были синтезированы полупрозрачные перовскитные солнечные элементы с выбранной структурой, обладающие эффективностью преобразования энергии 11,5%. В дальнейшем планируются работы по увеличению эффективности получаемых устройств, а также использованию их в тандемных системах перовскит/CIGS.

#### **Список использованных источников:**

1. Kojima A., Teshima K., Shirai Y., Miyasaka T. Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells // *J. Am. Chem. Soc.* – 2009. – 131, 17, 6050-6051.
2. Szabo G., Park N-G., Angelis F., Kamat P. Are Perovskite Solar Cells Reaching the Efficiency and Voltage Limits? // *ACS Energy Lett.* – 2023. – 8, 9, 3829-3831.
3. Wang Z., Song Z., Yan Y., Liu S., Yang D. Perovskite – a Perfect Top Cell for Tandem Devices to Break the S-Q Limit // *Adv. Sci.* – 2019. – 6, 7, 1801704.
4. Morales-Masis M., Wolf S., Woods-Robinson R., Ager J., Ballif C. Transparent Electrodes for Efficient Optoelectronics // *Adv. Electronic Mat.* – 2017. – 3, 5, 1600529.
5. Aydin E., Altinkaya C., Smirnov Y. et al. Sputtered transparent electrodes for optoelectronic devices: Induced damage and mitigation strategies // *Matter* – 2021 – 4, 3549-3584.

Иванов В.С. (автор)

Подпись

Гец Д.С. (научный руководитель)

Подпись