

аудандармен салыстырғанда екі-үш есе көп екенін көрсетті. Бұл өз кезегінде облыс аумағында орналасқан өнеркәсіптік кәсіпорындар мен қалаішілік көліктерден шығатын газдардың көптігімен түсіндіріледі.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

- 1 Гроздова Н.Б. Деревья, кустарники и лианы / Н.Б. Гроздова, В.И. Некрасов, Д.А. Глоба-Михайленко // Лесная промышленность. - 1986. –С. 349.
- 2 Гусев В. И. Определитель поврежденных лесных, декоративных и плодовых деревьев и кустарников / В.И. Гусев. - М.: Лесная промышленность, 1984.-С. 472.
- 3 Демидчик В.В., Соколик А.И., Юрин В.М. Токсичность избытка меди и толерантность к нему растений/ В.В. Демидчик, А.И. Соколик, В.М. Юрин // Успехи современной биологии. 2001, Т.1, №5. - С. 511-525.
- 4 Antonyuk E. D. Growing seedlings of Cossack juniper in containers / E.D. Antonyuk.–M.: Forestry, 1991. - No. 12.-P. 24-26.
- 5 Zaitsev G.N. Methodology of biometric calculations. Mathematical statistics in experimental botany/ G.N. Zaitsev - M.: Nauka, 1973. – P. 89-132.

УДК 538.9

## ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛЁНОК ФОТОАКТИВНОГО СЛОЯ НА ИХ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Абишева А.К.**, Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан  
**Рысқұл А.К.**, Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан  
**Қайыржан М.**, Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан  
**Мұздыбай Ғ.А.**, Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан  
**Серик А.**, Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан

Рабочие параметры органического солнечного элемента определяются рядом факторов, одним из важнейших из которых является толщина фотоактивного слоя. Она существенно влияет на эффективность устройства, поскольку для полимерных материалов характерны малая длина диффузии экситонов (<10 нм) и низкая подвижность носителей заряда (<10<sup>-1</sup> см<sup>2</sup>/В·с) [1]. В научной литературе отмечается, что оптимальные значения толщины активного слоя и характеристики устройства зависят от используемого полимера и конфигурации структуры [2–4]. В рамках нашего исследования была использована архитектура солнечного элемента FTO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO<sub>3</sub>/Ag. Инвертированная структура данного устройства выделяется повышенной стабильностью по сравнению с другими типами органических солнечных элементов, что обуславливает высокий интерес к ней со стороны исследователей.

В научной литературе ранее исследовалось воздействие толщины плёнки P3HT:PCBM на основные характеристики органических солнечных элементов [5, 6]. В данной работе рассматривается влияние толщины плёнок фотоактивного слоя на их морфологические и оптические характеристики. На рисунке 1 показаны изображения поверхности плёнок P3HT:PCBM, осаждённых на стеклянные подложки при различных скоростях вращения.

Шероховатость поверхности (Ra) плёнок P3HT:PCBM была оценена по данным атомно-силовой микроскопии (АСМ). Плёнка, полученная при 2000 об/мин, имеет шероховатость поверхности около 1,76 нм. Плёнка, осаждённая при 1500 об/мин, показала большую шероховатость по сравнению с предыдущей. Дальнейшее снижение скорости центрифугирования до 1000 об/мин привело к формированию плёнки с ещё большей шероховатостью поверхности, достигающей значения 2,49 нм. При 500 об/мин шероховатость резко возросла до 6,12 нм и оказалась максимальной среди всех образцов. Зависимость шероховатости поверхности от скорости центрифугирования представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Данные, характеризующие морфологию плёнок P3HT:PCBM

Скорость напыления, об/мин	Толщина, нм	Ширина запрещённой зоны, эВ	Шероховатость, нм
500	210	1,94	6,12
1000	170	2,14	2,49
1500	110	1,97	2,22
2000	85	2,01	1,76

Толщина плёнок измерялась методом АСМ. Толщина определялась по глубине царапин, намеренно нанесённых на плёнки P3HT:PCBM. Как и ожидалось, с увеличением скорости центрифугирования толщина плёнки уменьшается. Согласно данным АСМ, при 500, 1000, 1500 и 2000 об/мин толщина плёнок P3HT:PCBM составляет приблизительно 210, 170, 110 и 85 нм соответственно.

Было доказано, что эффективность органических солнечных элементов может быть повышена за счёт улучшения оптического поглощения [7]. Для повышения светопоглощения солнечного элемента был проведён эксперимент по измерению спектров поглощения плёнок при различной толщине фотоактивного материала.

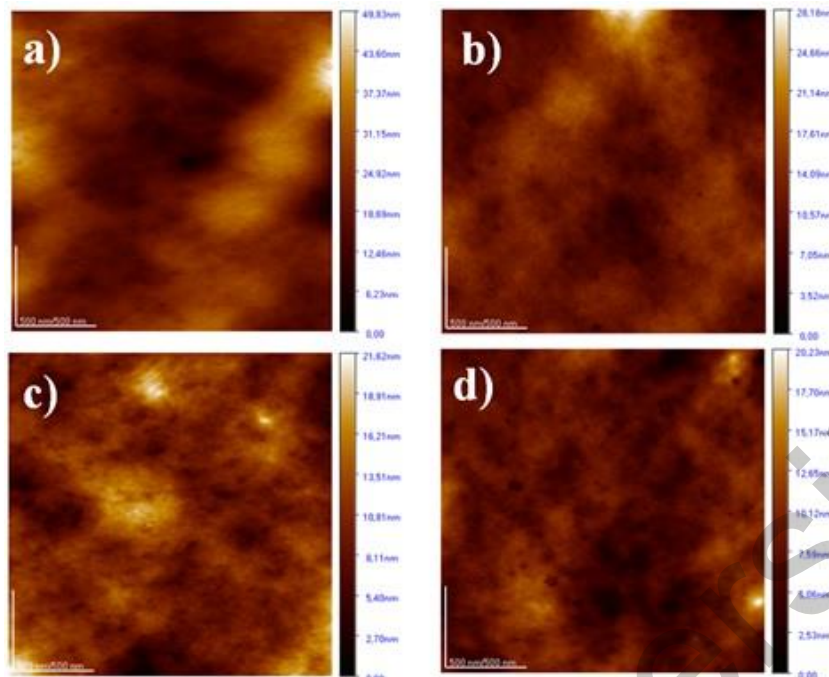


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности фотоактивных слоёв различной толщины: а) 210 нм, б) 170 нм, в) 110 нм, д) 85 нм.

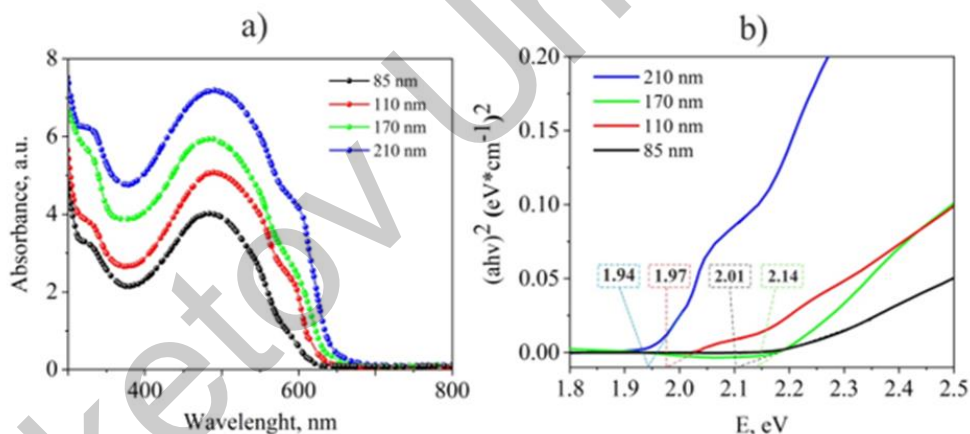


Рисунок. 2. Спектры поглощения (а) и графики Така (б) смеси РЗНТ:РСВМ различной толщины.

На рисунке 2а представлены измеренные спектры оптического поглощения. С увеличением толщины плёнок их поглощение значительно возрастает. Чётко прослеживается тенденция к увеличению поглощения при переходе от более тонкой плёнки толщиной 85 нм (чёрная кривая) к более толстой плёнке толщиной 210 нм (синяя кривая). Полученные результаты также указывают на более эффективное поглощение фотонов за счёт увеличения плотности числа носителей заряда и, следовательно, генерации зарядов. Согласно рисунку, активный слой хорошо работает в области ближнего УФ и видимого света, особенно в диапазоне от 300 до 650 нм. Плечо поглощения около ~330 нм связано с РСВМ, а основной пик на больших длинах волн обусловлен поглощением РЗНТ [8]. Пик при ~490 нм соответствует межзонным переходам, связанным с  $\pi$ - $\pi^*$  переходами между разрешёнными наивысшей занятой молекулярной орбиталью (НОМО) и наинизшей свободной молекулярной орбиталью (LUMO) системы РЗНТ:РС60ВМ. Наличие пиков около 600 нм, наблюдаемых во всех образцах, свидетельствует о хорошо упорядоченной структуре полимерной молекулы. На рисунке 2б представлены графики Таука, по которым была оценена ширина запрещённой зоны ( $E_g$ ) РЗНТ:РСВМ. В таблице 1 приведены рассчитанные значения  $E_g$  для плёнок различной толщины. Эти данные показывают, что уменьшение толщины приводит к расширению  $E_g$  с 1,94 эВ до 2,14 эВ.

В результате изучения морфологии было установлено, что плёнка, полученная при вращении подложки со скоростью 500 об/мин, продемонстрировала максимальное значение шероховатости. Были измерены спектры поглощения плёнок РЗНТ:РСВМ. Показано, что поглощение плёнок увеличивается с ростом их толщины.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bauer G.H., Würfel P. Quantum Solar Energy Conversion and Application to Organic Solar Cells / G.H. Bauer, P. Würfel // Organic Photovoltaics / C.J. Brabec, V. Dyakonov, J. Parisi, N.S. Sariciftci (eds). — Berlin, Heidelberg : Springer, 2003. — Vol. 60 : Springer Series in Materials Science. — P. 85–108. — DOI: 10.1007/978-3-662-05187-0\_4.
2. Zhang X., Zheng D., Xing S., Wang H., Huang J., Yu J. Precisely control the morphology and crystallization of temperature-dependent aggregation bulk heterojunction by using co-solvent system for optimized light intensity distribution and its effect on thick active layer polymer solar cells // Solar Energy. — 2017. — Vol. 147. — P. 106–112.
3. Brabec C.J., Shaheen S.E., Fromherz T., Padinger F., Hummelen J.C., Dhanabalan A., Janssen R.A.J., Sariciftci N.S. Organic photovoltaic devices produced from conjugated polymer/methanofullerene bulk heterojunctions // Synthetic Metals. — 2001. — Vol. 121, Issues 1–3. — P. 1517–1520.
4. Moulé A.J., Bonekamp J.B., Meerholz K. The effect of active layer thickness and composition on the performance of bulk-heterojunction solar cells // J. Appl. Phys. — 2006. — Vol. 100. — P. 094503.
5. Igbokwe E.E., Asiegbe A.D., Nnanna L.A. The optimization of P3HT:PCBM thin film thickness for organic solar cells // Journal of Chemical Society of Nigeria. — 2023. — Vol. 48, No. 6.
6. Zhao D.W., Tan S.T., Ke L., Liu P., Kyaw A.K.K., Sun X.W., Lo G.Q., Kwong D.L. Optimization of an inverted organic solar cell // Solar Energy Materials and Solar Cells. — 2010. — Vol. 94, Issue 6. — P. 985–991.
7. Brown P.J., Thomas D.S., Köhler A., Wilson J.S., Kim J.-S., Ramsdale C.M., Siringhaus H., Friend R.H. Effect of interchain interactions on the absorption and emission of poly(3-hexylthiophene) // Phys. Rev. B. — 2003. — Vol. 67. — P. 064203.
8. Ramani R., Alam S. A comparative study on the influence of alkyl thiols on the structural transformations in P3HT/PCBM and P3OT/PCBM blends // Polymer. — 2013. — Vol. 54, Issue 25. — P. 6785–6792.

UDC 53.09

## SIMULATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF HIGH-EFFICIENCY HIT SOLAR CELLS BASED ON P-TYPE AND N-TYPE CRYSTALLINE SILICON SUBSTRATES

**Aimaganbetov K.P.**, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

**Kishkenbayev M.P.**, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

**Tokmoldin N.S.**, Institute of Physics and Astronomy, University of Potsdam, Potsdam, Germany

**Yerezhep D.E.**, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

### Abstract

This paper presents numerical simulation and comparative analysis of solar cells with a heterojunction on thin amorphous silicon (HIT) based on crystalline silicon substrates with p- and n-type conductivity. The study focuses on the influence of substrate thickness, dopant concentration, interface quality, and layer architecture on the key photovoltaic parameters: open-circuit voltage ( $V_{oc}$ ), short-circuit current density ( $J_{sc}$ ), fill factor (FF), and power conversion efficiency ( $\eta$ ). Simulations were performed using the AFORS-HET software, which accounts for carrier transport and recombination processes. The results demonstrate that n-type silicon-based devices exhibit higher  $V_{oc}$  and FF values, reduced sensitivity to light-induced (LID) and potential-induced degradation (PID), and deliver 1.5–2% higher efficiency compared to p-type devices under identical conditions. Optimization of the substrate thickness (100–200  $\mu\text{m}$ ) and doping concentration ( $10^{15}$ – $10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ ) enables achieving conversion efficiencies above 25%. Literature reports further confirm the potential of n-type silicon, where record efficiencies exceeding 26% have already been achieved. Therefore, the implementation of n-type silicon in HIT architectures represents the most promising pathway for the development of high-efficiency and stable photovoltaic devices.

**Keywords:** HIT solar cells; crystalline silicon; p-type; n-type; simulation; AFORS-HET.

### Introduction

The efficiency of silicon solar cells largely depends on the materials, device design, and fabrication process. Crystalline silicon (c-Si), which can be either p-type or n-type, serves as the foundation of most solar cells. Despite the technological maturity of silicon-based photovoltaics, research efforts continue to focus on improving efficiency.

Heterojunction solar cells with an intrinsic thin amorphous silicon layer (HIT) are among the most promising technologies for improving the conversion of solar energy into electricity [1]. Laboratory efficiencies above 25% have been achieved [2], making them competitive with conventional p–n junction cells. A key factor in HIT performance is the choice of silicon substrate. While p-type silicon remains widely used due to its availability and mature processing, it suffers from light-induced degradation (LID) and potential-induced degradation (PID), which reduce long-term stability. By contrast, n-type silicon offers higher resistance to LID and PID, as well as better thermal stability and higher potential efficiency. This makes a comparative study of p- and n-type HIT devices critical for optimizing next-generation photovoltaic modules.

Recent studies have highlighted the importance of wafer thickness, doping profiles, layer architecture, and contact materials in achieving both efficiency and cost-effectiveness. Sai et al. [3] demonstrated that ultrathin wafers (30–50  $\mu\text{m}$ ) with light-trapping schemes retain strong absorption and high short-circuit currents, with  $V_{oc}$  exceeding 0.76 V and stable fill factors (0.85–0.87). Maximum calculated efficiencies of 28.4% were reached at ~100  $\mu\text{m}$  thickness, while fabricated cells