

# **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СЛОИ ДЛЯ ГИБКОЙ ПРОЗРАЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

А.Х. Абдуев, В.В. Беляев, Д.В. Генералов, Д.В. Николаева, В.В. Саенко, Е.А. Сметанин, Хань Ци

## **АННОТАЦИЯ**

Исследованы процессы низкотемпературного синтеза функциональных слоев для устройств гибкой прозрачной электроники. Изучены процессы зарождения, коалесценции и роста слоев в условиях, далеких от равновесных. Рассмотрены особенности зарождения и формирования функциональных слоев на гибких полимерных носителях (подложках). Проанализированы пути формирования слоев на полимерных носителях с сохранением требуемых эксплуатационных характеристик слоев. Рассмотрены ожидаемые устойчивости синтезируемых гибких структур к требованиям по числу изгибов и стабильности структур, синтезированных без принудительного нагрева, к испытаниям damp heat.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

ПРОЗРАЧНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ, ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, МАГНЕТРОННЫЙ СИНТЕЗ

## **FUNCTIONAL THIN FILMS FOR FLEXIBLE TRANSPARENT ELECTRONICS**

A.Kh. Abduev, V.V. Belyaev, D.V. Generalov, D.V. Nikolaeva, V.V. Saenko, E.A. Smetanin, Qi Han

## **ABSTRACT**

The processes of low-temperature synthesis of functional layers for flexible transparent electronics devices are investigated. The processes of nucleation, coalescence and growth of layers in conditions far from equilibrium have been studied. The features of the origin and formation of functional layers on flexible polymer carriers (substrates) are considered. The ways of forming layers on polymer carriers while maintaining the required performance characteristics of the layers are analyzed. The expected stability of synthesized flexible structures to the requirements for the number of bends and stability of structures synthesized without forced heating to damp heat tests are considered.

## **KEYWORDS**

TRANSPARENT ELECTRODES, PERIODIC STRUCTURES, MAGNETRON SYNTHESIS

## **ВВЕДЕНИЕ**

Становление прозрачной электроники нового поколения диктует необходимость разработки новых технологий, обеспечивающих формирование слоев с заданными характеристиками на поверхности гибких полимерных носителей. Это влечет за собой требование низкотемпературного формирования функциональных слоев на гибких полимерных носителях с относительно невысокими температурами деструкции [1,2,3]. При этом возникает необходимость снижения температур синтеза слоев для предотвращения деструкции полимерных подложек.

Развитие прозрачной электроники создает новые возможности синтеза легких гибких смартфонов, дисплеев, иных систем отображения информации. Оптимальным решением данной задачи на сегодняшний день стали электроды на основе трехслойных структур «оксид/металл/оксид». Достоинством этих материалов является достижение рекордно низких сопротивлений при синтезе без принудительного нагрева. Как показывают исследования, слои проявляют высокую устойчивость к изгибам [4].

Важным компонентом прозрачной электроники являются системы отображения информации. В перспективе создание гибких гаджетов наиболее предпочтительно на основе активноматричных структур технологии активной матрицы органических светодиодов (AMOLED) [5]. В отличие от LCD (liquid crystal display) они не нуждаются в подсветке. На рис. 1 приведена энергетическая зонная структура OLED. В приведенной «гетероструктуре» рекомбинация на границе слоев HTL и ETL обеспечивает высокую эффективность излучения.

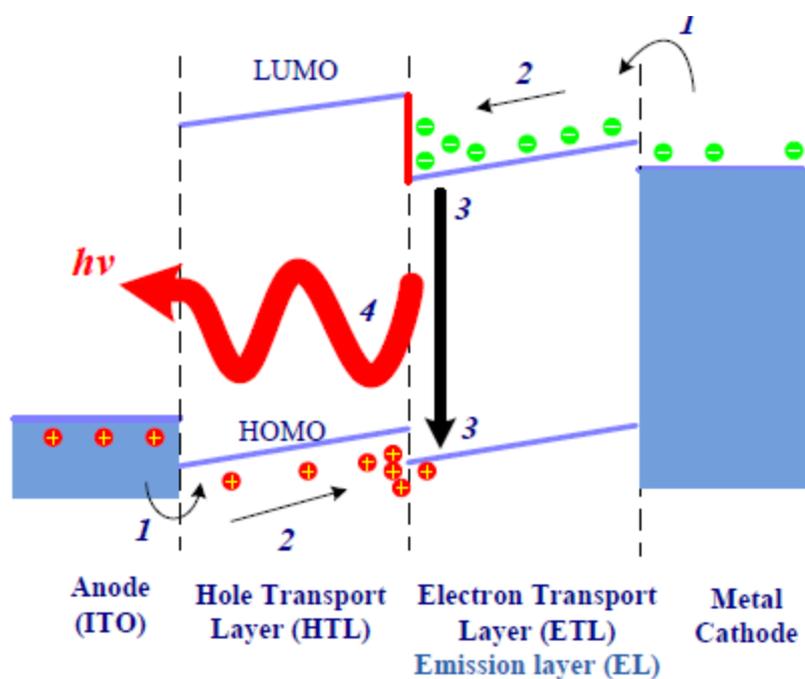


Рис. 1. Энергетическая диаграмма OLED структуры [5]

Активные исследования процессов синтеза трехслойных структур «оксид/металл/оксид» привели к разработке оптимальных для гибкой электроники прозрачных электродов на основе структур ITO/Ag/ITO (Ellmer). Минимальные сопротивления этих слоев достигались при температурах  $(100-250)^{\circ}\text{C}$ . Создание прозрачных трехслойных структур оксид/металл/оксид создало возможность синтеза без принудительного нагрева прозрачных электродов с аномально низкими сопротивлениями в окрестностях  $3 \text{ Ом}/\square$  [6]

## СЛОИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ. МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ

В [7,8] предполагается, что в структуре ITO/Ag/ITO слой серебра может служить источником электронов для слоя ITO. Соответствующая диаграмма барьера Ag/ITO приведена на рис. 2. Отмечается также, что подвижность носителей заряда возрастает по

мере увеличения времени осаждения Ag. Увеличение подвижности авторы объясняют уменьшением рассеяния на интерфейсных областях между металлическим и оксидным слоями. Данная модель представляется логичной и обоснованной.

Для проведения сравнительного анализа на рис. 3 показана зонная диаграмма барьера ZnO/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Проанализируем условия и механизмы транспорта носителей в данных структурах.

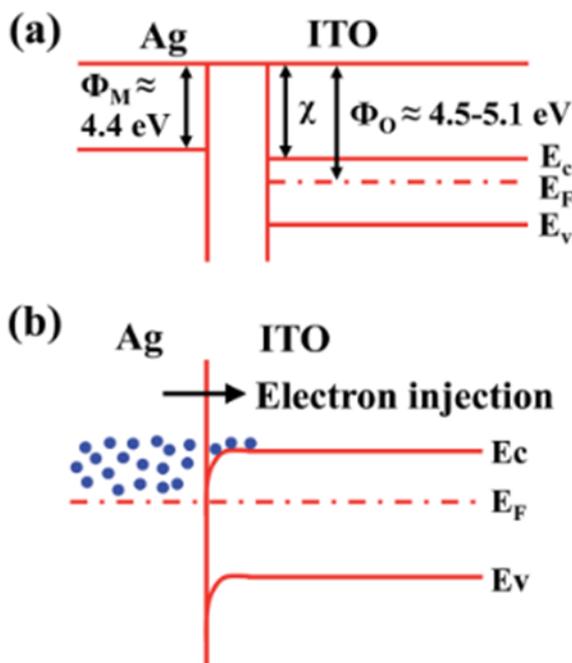


Рис. 2. Схематические диаграммы структур энергетических полос ITO и Ag: (a) до контакта и (b) после контакта

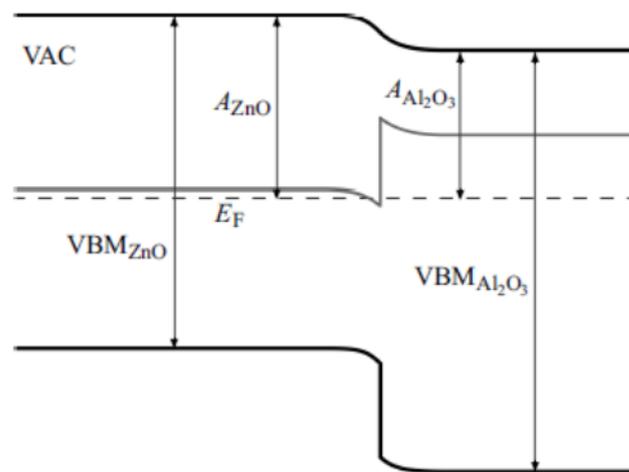


Рис. 3. Зонная диаграмма структуры ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Изгиб зон Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обусловленный адсорбированными из атмосферы ионами кислорода, при малой толщине слоя в построении диаграммы не учитывался

В [9] сообщалось о возрастании электропроводности системы наностержневой оксида цинка ZnO в  $10^5$  раз при атомно-слоевом осаждении тонкого диэлектрического слоя оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Авторы интерпретируют полученные результаты на основании предположения о формировании на границе слоев потенциальной ямы с электронным газом. Мы исходим из предположения, что формирование потенциальной ямы на границе ZnO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обусловлено формированием кислородных вакансий цинка и частичным окислением атомов алюминия на границе слоев в процессе синтеза. Формирование на границе Ag – ITO слоев с дефицитом кислорода представляется весьма вероятным. Известно, что при магнетронном синтезе структур поверхность роста подвергается воздействию магнетронной плазмы, приводящему к формированию дефицита кислорода [10].

Одним из перспективных путей низкотемпературного формирования функциональных слоев с требуемыми характеристиками является переход от наноструктурированных функциональных слоев к аморфным. Так, широкое практическое применение в активноматричных структурах МДП систем отображения информации

нашло формирование каналов в активноматричных структурах на основе сложного состава IGZO (In-Ga-Zn-O) [11].

Еще одним многообещающим видом функциональных слоев для гибкой прозрачной электроники являются структуры с модулированным легированием или многослойные структуры (рис. 4) [12]. В частности, Коэн и Барнетт [13] провели моделирование потенциальных распределений мультислоев ZnO/ZnMgO/ZnMgO:Al и распределений электронной плотности, которые генерируются в результате переноса заряда от легирующего слоя (ZnMgO:Al) к транспортному слою (ZnO). На основе этих расчетов авторы пришли к выводу, что модуляционно-легированные структуры с такой системой слоев возможны с подвижностью до  $145 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при средней плотности носителей  $3,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Подход модуляции-легирования можно использовать для улучшения свойств ТСО.

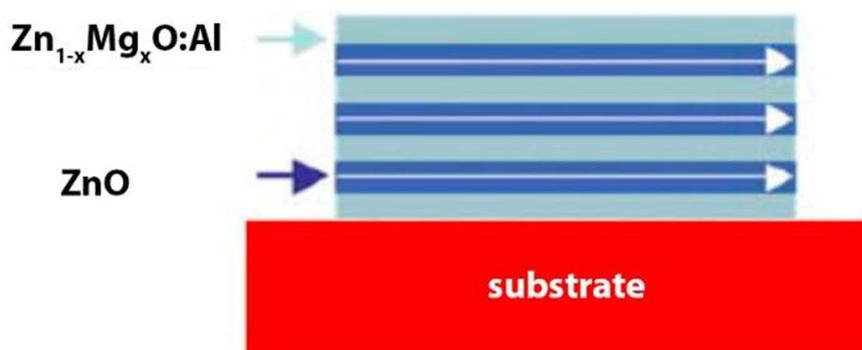


Рис. 4. Транспорт носителей в модуляционно-легированной пленке, состоящей из чередующихся легированных пленок  $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O:Al}$  и нелегированных пленок ZnO

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены пути поиска оптимальных структур, составов и технологий для создания элементной базы прозрачной электроники.

На основании выполненного изучения можно сделать вывод, что функциональные слои прозрачной электроники могут базироваться на аморфных материалах и структурах с модулированным легированием или на многослойных периодических структурах.

Работа была выполнена в рамках гранта РФФ 22-19-00157.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. Ёсиока, Т. Савада, Т. Абе. Новые высококачественные материалы подложек для эластичной электроники // Технологии в электронной промышленности. 2015, 8(84), 42-43. URL: <https://rucont.ru/efd/451361>.
2. Lixia Li, Lijing Han, Haiqing Hu, Ruoyu Zhang. A review on polymers and their composites for flexible electronics. Mater. Adv., 2023, 4, 726-746. DOI: 10.1039/D2MA00940D.
3. W.A. MacDonald, M. K. Looney, D. MacKerron, R. Eveson, R. Adam, K. Hashimoto, K. Rakos. Latest advances in substrates for flexible electronics. Journal of the Society for Information Display 15(12). doi.org/10.1889/1.2825093.

4. J. Lewis, S. Grego, B. Chalamala, E. Vick, D Temple. Highly flexible transparent electrodes for organic light-emitting diode-based displays. APPL. PHYS. LETTERS, 2004, 85, 16 18.
5. J. Lewis, S. Grego, B. Chalamala, E. Vick, D Temple. Highly flexible transparent electrodes for organic light-emitting diode-based displays. APPL. PHYS. LETTERS, 2004, 85, 16 18.
6. S. Kim, S. Yoon, P. Song. Characteristics of ITO/Ag/ITO Hybrid Layers Prepared by Magnetron Sputtering for Transparent Film Heaters. Journal of the Optical Society of Korea. Vol. 20, No. 6, December 2016, pp. 807-812. doi.org/10.3807/JOSK.2016.20.6.807.
7. Chia-Ching Wu. Highly flexible touch screen panel fabricated with silver-inserted transparent ITO triple-layer structures. RSC Adv., 2018, 8, 11862 -11870. DOI: 10.1039/c7ra13550e.
8. A. Klöppel, W. Kriegseisa, B. Meyera et al. Dependence of the electrical and optical behaviour of ITO-silver-ITO multilayers on the silver properties. Thin Solid Films 365(1):139-146. DOI:10.1016/S0040-6090(99)00949-9.
9. A. Ryabko, D. Mazing, A. Bobkov et al. // Physics of the Solid State, 2022, Vol. 64, No. 11. DOI: 10.21883/PSS.2022.11.54187.408.
10. Кибис Л.С. Исследование методом фотоэлектронной спектроскопии металлических п окисленных наночастиц серебра и палладия. АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Новосибирск 2011/
11. Ho. Ning, X. Zeng, H. Zhang. Transparent flexible IGZO thin film transistors fabricated at room temperature. Membranes 2022, 12, 29. doi.org/10.3390/membranes12010029.
12. Klaus Ellmer. Transparent Conductive Zinc Oxide. Basics and Applications. Springer. Berliin. 452.
13. D.J. Cohen et al. J. Appl. Phys. Predicted electrical properties of modulation-doped ZnO-based transparent conducting oxides 2005, 98, 053705; doi: 10.1063/1.2035898.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдуев Аслан Хаджимуратович – кандидат физико-математических наук (ORCID: 0000-0002-3948-1206). Государственный университет просвещения, Московская обл. e-mail: a\_abduev@mail.ru

Беляев Виктор Васильевич. - доктор технических наук, профессор (ORCID: 0000-0003-0553-9358). Государственный университет просвещения, Московская обл. e-mail: belyaev-vv@rudn.ru

Генералов Дмитрий Владимирович – аспирант (ORCID: 0009-0009-5481-3713). Российский университет дружбы народов, г. Москва. e-mail: 1042200024@rudn.ru

Николаева Дарья Владимировна – аспирант (ORCID: 0009-0000-0481-1933). Российский университет дружбы народов, г. Москва. e-mail: 1042200022@rudn.ru

Саенко Владимир Владимирович – аспирант (ORCID: 0009-0009-1529-165X). Российский университет дружбы народов, г. Москва. e-mail: vvsenko@mail.ru

Сметанин Егор Александрович - аспирант (ORCID: 0009-0003-9237-8624). Российский университет дружбы народов, г. Москва. e-mail: tujh98@mail.ru

Хань Ци – студент (ORCID: 0009-0001-8878-5943). Российский университет дружбы народов. г. Москва. e-mail: 1132224216@rudn.ru