



Получено: 30.07.2024 г. | Принято: 12.08.2024 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.6.338.344>

Научная статья

СТАБИЛЬНОСТЬ СВОЙСТВ И МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУР В УСЛОВИЯХ ТЕСТА "ВЛАЖНОЕ ТЕПЛО"

А.Х.Абдуев¹, к.ф.м.н., доц., ORCID: 0000-0002-3948-1206 / a_abduev@mail.ru

А.К.Ахмедов², к.ф.м.н., вед. науч. сотр., ORCID: 0000-0002-9466-9842

Э.К.Мурлиев², мл. науч. сотр., ORCID: 0009-0009-7742-8527

А.Ш.Асваров², к.ф.м.н., ст. науч. сотр., ORCID: 0000-0001-6426-5006

Аннотация. Исследована стабильность поверхностного сопротивления и оптического пропускания трехслойных структур ITO/Ag/ITO, GZO/Al/GZO, а также тонкопленочной периодической структуры IZO с модулированным по толщине содержанием кислорода при 1000-часовых испытаниях в условиях влажности 85% и температуры 85 °С. Проведен анализ механизмов деградации структур в зависимости от состава и свойств единичных слоев.

Ключевые слова: гибкая прозрачная электроника, прозрачные электроды, структуры "оксид/металл/оксид", тестирование "влажное тепло"

Для цитирования: А.Х. Абдуев, А.К. Ахмедов, Э.К. Мурлиев, А.Ш. Асваров. Стабильность свойств и механизмы деградации многослойных прозрачных проводящих структур в условиях теста "влажное тепло". НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17. № 6. С. 338-344. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.6.338.344>.

Received: 30.07.2024 | Accepted: 12.08.2024 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.6.338.344>

Original paper

STABILITY OF PROPERTIES AND DEGRADATION MECHANISMS OF MULTILAYER TRANSPARENT CONDUCTIVE STRUCTURES DURING THEIR "DAMP HEAT" TESTING

A.K.Abduev¹, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Docent, ORCID: 0000-0002-3948-1206 / a_abduev@mail.ru

A.K.Akhmedov², Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, ORCID: 0000-0002-9466-9842

E.K.Murliiev², Junior Researcher, ORCID: 0009-0009-7742-8527

A.S.Asvarov², Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, ORCID: 0000-0001-6426-5006

Abstract. The sheet resistance stability and optical transparency of three-layer structures ITO/Ag/ITO, GZO/Al/GZO, as well as thin-film periodic structure IZO with thickness-modulated oxygen content was studied during 1000-hour tests under conditions of 85% humidity and 85 °C temperature. The analysis of the degradation mechanisms of the structures depending on composition and properties of individual layers was performed.

¹ Государственный университет просвещения, Москва, Россия / Federal State University of Education, Moscow, Russia

² Институт физики, Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, г. Махачкала, Россия / Institute of physics, Dagestan Research Center of RAS, Makhachkala, Russia



Keywords: flexible transparent electronics, transparent electrodes, "oxide/metal/oxide" structures, damp heat testing

For citation: A.K. Abduiev, A.K. Akhmedov, E.K. Murliev, A.S. Asvarov. Stability of properties and degradation mechanisms of multilayer transparent conductive structures during their "damp heat" testing. NANOINDUSTRY. 2024. Vol. 17. No. 6. PP. 338–344. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.6.338.344>.

ВВЕДЕНИЕ

Прозрачные проводящие слои на основе широкозонных оксидных материалов, характеризующиеся высокой электропроводностью и высоким оптическим пропусканием в видимом диапазоне спектра получили широкое распространение при формировании прозрачных электродов в различных оптоэлектронных приложениях [1–3]. Однако новые более жесткие требования, предъявляемые к функциональным характеристикам слоев, стоимости и экологичности материалов и технологий, используемых в интенсивно развивающейся индустрии гибкой прозрачной электроники, активизировали исследования, направленные на поиск новых перспективных материалов и технологических решений по различным направлениям [4, 5]. В процессе разработки прозрачных электродов для гибких устройств был пройден большой путь от использования однородных оксидных слоев [6] до трехслойных структур типа "оксид/металл/оксид" [7] и, наконец, к поиску новых архитектур на основе сверхрешеток и структур с модулированным легированием [8].

Трехслойные структуры ITO/Ag/ITO, осажденные на полимерных носителях без принудительного нагрева, получили широкое распространение благодаря высокой проводимости при относительно малой толщине, определяющей минимальный радиус изгиба, что весьма критично для устройств гибкой электроники [9, 10]. В то же время перспективность использования в качестве прозрачных электродов многослойных периодических структур и структур с модулированным легированием видится в возможности снижения рассеяния на ионах примеси [11].

Коммерциализация новых разработок в области функциональных слоев прозрачной электроники требует проведения всестороннего тестирования стабильности их характеристик по установленным стандартам. Одним из важнейших тестов в индустрии функциональных слоев прозрачной электроники является так называемый тест "влажное тепло" (damp heat test), предполагающий 1000-часовые испытания при температуре 85 °C и относительной

INTRODUCTION

Transparent conducting layers based on wide-gap oxide materials characterised by high electrical conductivity and high optical transmittance in the visible range of the spectrum have been widely used in production of transparent electrodes in various optoelectronic applications [1–3]. However, the novel and more stringent requirements for layer functional performance, cost and environmental friendliness of materials and technologies used in the intensively developing flexible transparent electronics industry have intensified research aimed at finding new promising materials and technological solutions in various fields [4, 5]. The transparent electrodes design for flexible devices has travelled a long way from the use of homogeneous oxide layers [6] to three-layer oxide/metal/oxide type structures [7] and finally to the search for new architectures based on superlattices and modulated doped structures [8].

Three-layer ITO/Ag/ITO structures deposited on polymer carriers without forced heating have become widespread due to their high conductivity and relatively small thickness determining the minimum bending radius, which is very critical for flexible electronics devices [9, 10]. At the same time, the prospect of using multilayer periodic structures and structures with modulated doping as transparent electrodes is in possibility of reducing the scattering on impurity ions [11].

The commercialisation of new developments in the field of transparent electronics functional layers requires extensive testing of their performance stability against established standards. One of the most important tests in the transparent electronics functional layer industry is the so-called damp heat test, which involves 1000 hours of testing at temperature of 85 °C and a relative humidity of 85%. Such tests make it possible to establish the factors affecting layer characteristics stability, mechanisms of their degradation, and, based on the obtained data, to develop recommendations for their protection.

In the present work, comparative studies of surface resistance stability and optical transmittance of three-layer ITO/Ag/ITO, GZO/Al/GZO, and thin-film periodic IZO ($\text{In}_2\text{O}_3 + \text{ZnO}$ (10 weight %)) structures with thickness-modulated oxygen content have been carried out during 1000-hour tests at 85 °C and 85% relative



влажности 85%. Такие испытания позволяют установить факторы, влияющие на стабильность характеристик слоев, механизмы их деградации, а также, на основе полученных данных, выработать рекомендации по их защите.

В настоящей работе проведены сравнительные исследования стабильности поверхностного сопротивления и оптического пропускания трехслойных структур ITO/Ag/ITO, GZO/Al/GZO, а также тонкопленочной периодической структуры IZO ($\text{In}_2\text{O}_3 + \text{ZnO}$ (10 вес. %)) с модулированным по толщине содержанием кислорода при 1000-часовых испытаниях при температуре 85 °C и относительной влажности 85%. Проведен анализ механизмов деградации структур в зависимости от состава и свойств единичных слоев.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все тестируемые тонкопленочные структуры были осаждены на стеклянных и кремниевых подложках методом высокочастотного магнетронного распыления мишеней соответствующего состава на установке барабанного типа, оснащенной двумя диаметрально расположенными распылительными магнетронами. Трехслойные структуры ITO/Ag/ITO и GZO/Al/GZO были получены путем последовательного низкотемпературного ($T \leq 50$ °C) осаждения слоев в атмосфере чистого (99.999%) аргона. Тонкопленочные периодические структуры высокой проводимости с модулированным содержанием кислорода IZO были получены по методике, приведенной в [12].

Блок-схема стенда для проведения 1000-часового теста "влажное тепло" при температуре 85 °C и относительной влажности 85% приведена в [13].

Для измерения поверхностного сопротивления проводящих структур был использован ИУС-3 (Россия). Данные просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) по толщине, микроструктуре и составу синтезированных структур были получены с помощью электронного микроскопа TEM Tecnai Osiris FEI (США). Данные по оптическому пропусканию образцов были получены с помощью спектрофотометра UV-3600 Shimadzu (Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.1 приведена фотография внешнего вида тестируемых структур до и после тестирования. Видно, что периодическая структура IZO не демонстрирует видимых изменений, в то

humidity. The degradation mechanisms of the structures depending on composition and properties of single layers have been analysed.

RESEARCH METHODS

All tested thin-film structures were deposited on glass and silicon substrates by high-frequency magnetron sputtering of targets of appropriate composition on a drum-type machine equipped with two diametrically arranged sputtering magnetrons. Three-layer ITO/Ag/ITO and GZO/Al/GZO structures were obtained by sequential low-temperature ($T \leq 50$ °C) deposition of the layers in pure (99.999%) argon atmosphere. Thin-film periodic structures of high conductivity with modulated oxygen content of IZO were prepared by the technique given in [12].

The block diagram of the test bench for 1000-hour wet heat test at 85 °C and 85% relative humidity is given in [13].

SII-3 (Standards Information Index, Russia) was used to measure surface resistivity of the conductive structures. Transmission electron microscopy (TEM) data on the thickness, microstructure and composition of the synthesised structures were obtained using a TEM Tecnai Osiris FEI electron microscope (USA). Optical transmittance data of the samples were obtained using a UV-3600 Shimadzu spectrophotometer (Japan).

RESULTS

Fig.1 shows a photograph of the tested structures appearance before and after testing. It can be seen that the periodic IZO structure shows no visible changes, while the other structures clearly show signs of degradation, mainly at the edges of the samples.

Table 1 shows data on surface resistivity changes and optical transmittance of the studied thin-film structures during 1000-hour testing. The minimum increase in surface resistivity (4.26%) is observed in the periodic IZO structure with modulated oxygen content along the thickness, while the optical transmittance in it remains practically unchanged. At the same time, the resistivity increase in the ITO/Ag/ITO and GZO/Al/GZO three-layer structures is significantly higher at 33 and 22%, respectively.

Fig.2 shows comparative TEM-micrographs of the initial structures and maps of oxygen distribution in them before testing. It can be seen that the oxide layers in the three-layer structures have a similar block morphology, while the metal layers have significant differences. The Ag layer (Fig.2, a) shows clearer interface boundaries with oxide layers and more complete nucleation coalescence with the formation of a continuous layer with respect to the Al layer (Fig.2, b). At the same time, the metallic aluminium layer (Fig.2, b1),



Таблица 1. Изменение поверхностного сопротивления R_s и среднего оптического пропускания в видимом диапазоне T трехслойных структур ITO/Ag/ITO, GZO/Al/GZO и периодической структуры IZO с модулированным содержанием кислорода по толщине в процессе 1000-часового тестирования. В скобках приведены данные по относительному изменению поверхностного сопротивления $(\Delta R_s/R_{s0}) \times 100\%$

Table 1. Variation of surface resistivity R_s and average optical transmittance in the visible range T of three-layer ITO/Ag/ITO, GZO/Al/GZO and periodic IZO structures with modulated oxygen content in thickness during 1000-hour testing. The data on the relative change in surface resistivity $(\Delta R_s/R_{s0}) \times 100\%$ are given in brackets

Структура Structure		ITO/Ag/ITO		GZO/Al/GZO		IZO	
		R_s , Ом/квadrat Ohm/square	T , %	R_s , Ом/квadrat Ohm/square	T , %	R_s , Ом/квadrat Ohm/square	T , %
Исходные значения Initial values		4,41	80,74	91	54,24	8,21	83,52
Длительность тестирования t , ч Test duration t , h	100	4,38 (- 0,68%)	81,54	93 (2,20%)	51,96	8,22 (0,12%)	83,10
	200	4,55 (3,17%)	74,22	98 (7,69%)	53,01	8,22 (0,12%)	84,13
	300	5,07 (14,97%)	73,10	101 (10,99%)	54,13	8,41 (2,44%)	83,23
	400	5,34 (21,09%)	73,14	102 (12,09%)	55,25	8,42 (2,56%)	83,51
	500	5,79 (31,29%)	73,30	104 (14,29%)	55,79	8,42 (2,56%)	83,22
	600	5,78 (31,07%)	72,34	105 (15,38%)	55,62	8,46 (3,05%)	83,06
	700	5,75 (30,39%)	71,63	106 (16,48%)	55,74	8,50 (3,53%)	82,81
	800	5,77 (30,84%)	69,36	107 (17,58%)	55,71	8,48 (3,29%)	82,25
	900	5,84 (32,43%)	69,19	109 (19,78%)	55,90	8,53 (3,89%)	82,40
	1000	5,87 (33,11%)	68,97	111 (21,98%)	56,60	8,56 (4,26%)	84,22

время как на остальных структурах явно видны следы деградации, преимущественно по краям образцов.

В табл.1 приведены данные по изменению поверхностного сопротивления и оптического пропускания исследуемых тонкопленочных структур в процессе 1000-часового тестирования. Минимальное увеличение поверхностного сопротивления (4,26%) наблюдается в периодической структуре IZO с модулированным содержанием кислорода по толщине, при этом оптическое пропускание в ней остается практически неизменным. В то же время рост сопротивления в трехслойных структурах ITO/Ag/ITO и GZO/Al/GZO существенно выше и составляет 33 и 22% соответственно.

На рис.2 приведены сравнительные ПЭМ-микротографии исходных структур и карты

unlike the silver layer (Fig.2, a1) contains a significant amount of oxygen not only in the interface region, but also in the layer volume.

The cross section of the initial IZO sample with thickness-modulated oxygen content has a dense homogeneous structure (Fig.2, c). The integral distribution of oxygen in this structure is also quite homogeneous (Fig.2, c1). The amplitude of oxygen modulation in the original structure was about 0.4% and its pitch was about 6 nm. Both of these parameters are beyond the threshold resolution of the energy dispersive microanalysis method used, so we can only observe integral distribution in the corresponding map (Fig.2, c1).

DISCUSSION

Joint analysis of the obtained results suggests the following mechanisms of structure degradation.

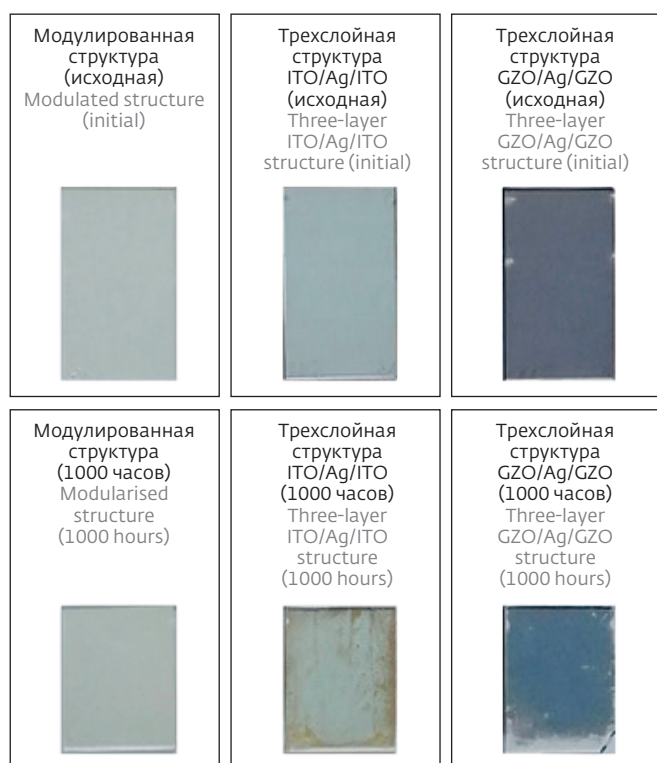


Рис.1. Внешний вид тестируемых структур до (верхний ряд) и после 1000-часового тестирования на "влажное тепло" (нижний ряд)

Fig.1. Photos of tested structures before (top line) and after 1000 hours of damp-heat testing (bottom)

распределения кислорода в них до начала тестирования. Видно, что оксидные слои в трехслойных структурах имеют сходную блочную морфологию, при этом металлические слои имеют существенные различия. Слой Ag (рис.2а) демонстрирует более четкие границы интерфейсов с оксидными слоями и более полную коалесценцию зародышей с формированием сплошного слоя по отношению к слою Al (рис.2б). При этом слой металлического алюминия (рис.2б1), в отличие от слоя серебра (рис.2а1), содержит значительное количество кислорода не только в области интерфейсов, но и в объеме слоя.

Поперечный срез исходного образца IZO с модулированным по толщине содержанием кислорода имеет плотную однородную структуру (рис.2с). При этом интегральное распределение кислорода в структуре также достаточно однородно (рис.2с1). Амплитуда модуляции кислорода в исходной структуре составляла около 0.4%, а ее шаг – около 6 нм. Оба этих параметра находятся за порогом разрешения использованного метода энергодисперсионного

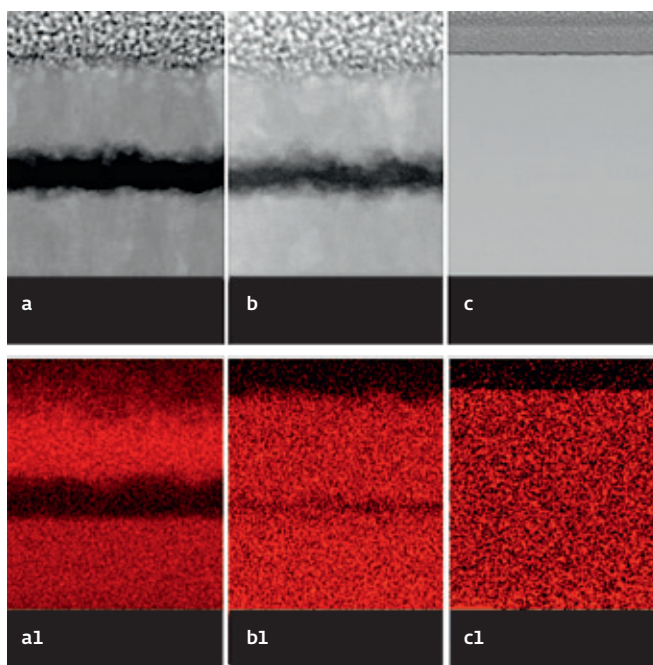


Рис.2. ПЭМ-микрофотографии поперечных срезов (а, b, с) и карты распределения кислорода (а1, b1, с1) для многослойных структур ITO/Ag/ITO (а и а1), GZO/Al/GZO (b и b1) и периодической структуры IZO (с и с1) соответственно

In three-layer ITO/Ag/ITO structures, diffusion of oxygen and water vapour occurs mainly along the metal-oxide interfaces, with partial delamination of the structure, which reduces its optical transmission and accelerates its further degradation and destruction. Darkening of the edge regions of the structure can also be associated with the intake of sulphur compound vapours from the atmosphere into the interlayer region with subsequent formation of silver sulphide film in the interfaces area.

In GZO/Al/GZO structures, the initial aluminium layer is already partially oxidized at grain boundaries and in the area of interlayer interfaces, so resistance of the initial GZO/Al/GZO structure is significantly higher than that of the ITO/Ag/ITO structure. We believe that due to high chemical activity of aluminium, its oxidation during three-layer structure formation occurs in several processes: oxidation in the gas phase by residual oxygen in the chamber, oxidation from the surface by oxygen of the sputtered GZO target during deposition of the upper oxide layer, and oxidation at the interfaces due to interaction with adjacent oxide layers. The oxide layer on the boundaries of aluminium grains reduces their electrical percolation, preventing excitation of planar surface plasmons at the metal-oxide boundaries



микроанализа, поэтому на соответствующей карте (рис.2с1) мы можем наблюдать только интегральное распределение.

ОБСУЖДЕНИЕ

Совместный анализ полученных результатов позволяет предположить следующие механизмы деградации структур.

В трехслойных структурах ИТО/Ag/ИТО диффузия кислорода и паров воды происходит преимущественно по интерфейсам метал-оксид, при этом происходит частичное расслоение структуры, снижающее ее оптическое пропускание и ускоряющее ее дальнейшую деградацию и разрушение. Потемнение краевых областей структуры может также быть связано и с поступлением из атмосферы в межслоевую область паров сернистых соединений с последующим формированием в области интерфейсов пленки сульфида серебра.

В структурах GZO/Al/GZO исходный слой алюминия уже частично окислен по границам зерен и в области межслоевых интерфейсов, поэтому сопротивление исходной структуры GZO/Al/GZO существенно выше сопротивления структуры ИТО/Ag/ИТО. Мы полагаем, что в виду высокой химической активности алюминия его окисление в процессе формирования трехслойной структуры происходит в нескольких процессах: окисление в газовой фазе остаточным кислородом в камере, окисление с поверхности кислородом распыляемой мишени GZO при осаждении верхнего оксидного слоя и окисление на интерфейсах вследствие взаимодействия с прилегающими оксидными слоями. Наличие оксидного слоя на границах зерен алюминия

and, consequently, reducing optical transmittance of the structure [14]. At the same time, the dense oxide layer on the boundaries of aluminium grains during the tests prevents further diffusion of oxygen and water vapour, slowing down the structure degradation.

The IZO thin-film periodic structure with thickness-modulated oxygen content showed better stability of surface resistance and optical transmittance. The oxygen modulation effect in this structure is about 13% [12]. The relative resistance growth after 1000-hour testing was about 4%, which indicates high stability of the modulated oxygen state. We believe that high density and homogeneity of the periodic structure of IZO prevent rapid diffusion of atmospheric oxygen and water vapour through the pores and grain boundaries, and the main mechanism of oxygen diffusion in the structure under the test conditions remains a much slower vacancy mechanism.

CONCLUSIONS

The studies have shown that the degradation mechanism of the multilayer structure depends on a number of factors: microstructure, density and chemical resistance of single layers, mutual adhesion of adjacent layers and differences in their temperature coefficients of expansion, and the interlayer interfaces.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Тележка сервисная электрическая для чистых помещений



127474, г. Москва, Дмитровское ш., д. 60 Тел.: (495) 585-88-15, (495) 274-01-02 E-mail: aseps5858815@gmail.com www.aseptica.biz



снижает их электрическую перколяцию, препятствуя возбуждению на границах металл-оксид плоских поверхностных плазмонов и, как следствие, уменьшает оптическое пропускание структуры [14]. В то же время плотный оксидный слой на границах зерен алюминия в процессе тестовых испытаний препятствует дальнейшей диффузии кислорода и паров воды, замедляя процесс деградации структуры.

Тонкопленочная периодическая структура IZO с модулированным по толщине содержанием кислорода показала лучшую стабильность поверхностного сопротивления и оптического пропускания. Эффект модуляции кислорода в данной структуре составляет около 13% [12]. Относительный рост сопротивления после 1000-часового тестирования составил около 4%, что свидетельствует о высокой стабильности модулированного состояния кислорода. Мы полагаем, что высокая плотность и однородность периодической структуры IZO препятствуют быстрой диффузии атмосферного кислорода и паров воды по порам и границам зерен, а основным механизмом диффузии кислорода в структуре в условиях данного теста остается значительно более медленный вакансионный механизм.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что механизм деградации многослойной структуры зависит от ряда факторов: микроструктуры, плотности и химической стойкости единичных слоев, взаимной адгезии прилегающих слоев и различия их температурных коэффициентов расширения, структуры межслоевых интерфейсов.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Stadler A. Transparent conducting oxides—an up-to-date overview // *Materials*. 2012. Vol. 5. P. 661.
2. Liu H., Avrutin V., Izyumskaya N., Özgür Ü., Morkoç H. Transparent conducting oxides for electrode applications in light emitting and absorbing devices // *Superlattices Microst.*, 2010. Vol. 48. P. 458.
3. Calnan S., Tiwari A.N. High mobility transparent conducting oxides for thin film solar cells // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518. P. 1839.
4. Hamers R.J. Flexible electronic futures // *Nature*. 2001. Vol. 412. P. 489.
5. Liu Y., Pharr M., Salvatore G.A. Lab-on-skin: a review of flexible and stretchable electronics for wearable health monitoring // *ACS Nano*. 2017. Vol. 11. P. 9614.
6. Minami T. New n-Type Transparent Conducting Oxides // *MRS Bulletin*. 2000. Vol. 25. P. 38.
7. Afre R.A., Sharma N., Sharon M., Sharon M. Transparent conducting oxide films for various applications: A review // *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 2018. Vol. 53. P. 79.
8. Morales-Masis M., De Wolf S., Woods-Robinson R., Ager J.W., Ballif C. Transparent Electrodes for Efficient Optoelectronics // *Adv. Electron. Mater.*, 2017. Vol. 3. P. 1600529.
9. Sibin K.P., Srinivas G., Shashikala H.D., Arjun D., Sridhara N., Sharma A.K., Barshilia H.C. Highly transparent and conducting ITO/Ag/ITO multilayer thin films on FEP substrates for flexible electronics applications // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 172. P. 277.
10. Rozati S.M., Ziabari S.A.M. A review of various single layer, bilayer, and multilayer TCO materials and their applications // *Materials chemistry and physics*. 2022. Vol. 292. P. 126789.
11. Robbins J.J., Wolden C.A. High mobility oxides: Engineered structures to overcome intrinsic performance limitations of transparent conducting oxides // *Applied Physics Letters*. 2003. Vol. 83. P. 3933.
12. Akhmedov A.K., Abduev A.K., Murliev E.K., Belyaev V.V., Asvarov A.S. Transparent Conducting Amorphous IZO Thin Films: An Approach to Improve the Transparent Electrode Quality // *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 3740.
13. Ахмедов А.К. Структура и свойства прозрачных проводящих слоев на основе оксида цинка полученных методом магнетронного распыления нестехиометричных мишеней. Дисс. к.ф.-м.н., 2016. 01.04.07. С. 93.
14. Jeong J., Kim H. Low resistance and highly transparent ITO-Ag-ITO multilayer electrode using surface plasmon resonance of Ag layer for bulk-heterojunction organic solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009. Vol. 93. P. 1801.



РОССИЙСКИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ САММИТ

02-04 ОКТЯБРЯ 2024
МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО



ОРГАНИЗАТОРЫ



12 000+

уникальных участников



30+

стран присутствия



16 000+

кв. м выставки



230+

компаний-участников



23

зала



200+

научных мероприятий

НА ПРАВАХ РЕКЛАМЫ

www.rds Summit.ru