

4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.793.18

Оригинальная статья

Прозрачные проводящие слои с высокой подвижностью свободных носителей заряда на основе оксида индия, легированного вольфрамом

А.К. Ахмедов¹, А.Ш. Асваров², Э.К. Мурлиев¹, З.В. Шомахов³

¹Институт физики им. Х.И. Амирханова – обособленное подразделение
ФГБУН «Дагестанский федеральный исследовательский центр
Российской академии наук»

367015, Россия, Республика Дагестан, Махачкала, ул. М. Ярагского, 94

²Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса
кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт»
119333, Россия, Москва, Ленинский проспект, 59

³ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
shozamir@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.565

Аннотация: Повышение проводимости прозрачных проводящих слоев за счет увеличения подвижности свободных носителей заряда является одной из важнейших задач прозрачной электроники, так как ее решение способствует не только снижению тепловых потерь в слоях, но и расширению спектра используемого излучения в сторону ближней инфракрасной области. В настоящее время работы в этой области идут по нескольким направлениям, одним из которых является поиск новых составов слоев, позволяющих уменьшить количество вносимой примеси одновременно с увеличением эффективности ее ионизации. В настоящей работе исследовано влияние содержания кислорода в составе рабочего газа и температуры синтеза на морфологию и микроструктуру, электрические и оптические характеристики слоев, полученных при высокочастотном магнетронном распылении керамической мишени In_2O_3 с добавлением WO_3 на уровне 1 вес.%. Установлено, что максимальная подвижность ($59 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) и минимальное удельное сопротивление ($7,8 \times 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) достигаются в слоях, синтезированных при 300°C в атмосфере чистого аргона. Для сравнения, в идентичных условиях, были получены слои на основе твердого раствора оксидов индия и олова, широко используемого при формировании прозрачных электродов в различных оптоэлектронных приложениях. Показано, что слои на основе оксида индия, легированного вольфрамом, сохраняют приемлемую прозрачность в широком диапазоне спектра, вплоть до 2000 нм и поэтому предпочтительнее для использования в устройствах, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне, например, в преобразователях солнечной энергии или приборах ночного видения.

Ключевые слова: прозрачный электрод, оксид индия, легирование, магнетронное распыление, прозрачность, электропроводность.

1. Введение

Тонкопленочные прозрачные электроды на основе широкозонных оксидных материалов (TCO – transparent conductive oxides), характеризующиеся высокой электрической проводимостью и высокой оптической прозрачностью в видимом диапазоне спектра являются

неотъемлемой частью различных оптоэлектронных устройств [1-6]. При этом для большинства приложений предпочтительнее, чтобы высокая проводимость прозрачных электродов достигалась за счет увеличения подвижности носителей заряда, а не их концентрации, так как это способствует расширению диапазона прозрачности в сторону ближнего инфракрасного (БИК) диапазона. Такой подход особенно актуален при проектировании тонкопленочных солнечных элементов [7, 8].

Известно, что в вырожденных полупроводниках, каковыми являются слои ТСО, при концентрации носителей на уровне 10^{20} см^{-3} и более, основной вклад в снижение их подвижности (свыше 80%) вносят два механизма рассеяния: рассеяние на межзеренных границах (МЗГ) и рассеяние на ионизированной примеси, причем если при $n \leq 2 \times 10^{20}$ превалирует рассеяние на МЗГ, то при дальнейшем увеличении концентрации соотношение вкладов смещается в сторону рассеяния на ионах примеси [9]. Поэтому для получения поликристаллических слоев ТСО с высокой подвижностью в равной степени важно как снижение потенциальных барьеров на МЗГ, так и минимизация рассеяния на примеси.

Для снижения рассеяния на МЗГ необходимо принять меры к обеспечению высокой однородности осаждаемых слоев, подавлению процессов формирования самостоятельных барьерных фаз. Здесь также представляет интерес выбор, в качестве базовой системы – ионных оксидных материалов (например, CdO и In_2O_3), в которых дно зоны проводимости формируется в основном за счет прямого перекрытия внешних s -оболочек катиона [10]. Несомненным достоинством таких систем является то, что высокая степень перекрытия s -оболочек, а, следовательно, и высокая подвижность носителей заряда, характерная для совершенных кристаллических слоев, сохраняется и в разупорядоченном аморфном состоянии [10-12].

Очевидно, что для снижения рассеяния на примеси необходимо использовать материалы и технологии, обеспечивающие достижение высокой концентрации носителей заряда при минимальном ее внесении. Здесь в настоящее время ведутся поисковые работы по двум основным направлениям: разработка технологий, направленных на увеличение эффективности ионизации традиционно используемой примеси и использование в качестве примеси элементов с большей валентностью, ионы которых, при замещении катиона в узлах решетки базового оксида, могут дать в зону проводимости два и более электрона.

Определенный интерес представляет также резонансное легирование, когда состояния, соответствующие донорной примеси, в зоне проводимости не смешиваются с состояниями базового оксида, находятся

с ними в резонансе и, как следствие, минимально их возмущают. В качестве такой системы можно рассматривать оксид индия, легированный тугоплавкими переходными металлами [13]. В ряде экспериментальных работ показано, что слои ТСО на основе In_2O_3 , легированного Mo , Zr , Hf , Ti , характеризуются существенно более высокой подвижностью носителей заряда (более $100 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{с}$) нежели традиционные слои ТСО на основе оксидов индия и олова (ITO – indium-tin oxide) [14-16]. Однако, эти результаты получены при высоких температурах осаждения (более 500°C) или последующей термической обработке при высокой температуре, что ограничивает их применение в большинстве приложений, где максимальные температуры техпроцессов, как правило, ограничены на уровне 300°C .

2. Постановка задачи и объекты исследования

В настоящей работе исследовано влияние температуры синтеза и содержания кислорода в составе рабочего газа на структуру и свойства слоев в системе IWO ($In_2O_3:W$). Все рассматриваемые слои были получены методом высокочастотного магнетронного распыления на установке барабанного типа, оснащенной узлом нагрева и позиционирования подложек с индивидуальным заданием температуры каждого из четырех держателей подложек [17]. Распыляемая мишень диаметром 51 мм и толщиной 4 мм была получена методом искрового плазменного спекания порошковой смеси оксидов In и W в весовом соотношении 99/1.

Перед распылением рабочая камера откачивалась до остаточного давления 2×10^{-4} Па. Распыление проводилось в атмосфере чистого аргона и смеси $Ar-O_2$ с содержанием кислорода $\eta(O_2 / Ar) = 0,2\%$ и $0,4\%$. Давление рабочего газа в процессе распыления поддерживалось на уровне 0,5 Па при расходе $20 \text{ н.см}^3/\text{мин}$. Мощность разряда была стабилизирована на уровне 100 Вт. В качестве подложек на каждый держатель устанавливалось по одной пластине из боросиликатного стекла размерами $25 \times 25 \times 1,1$ мм для исследования оптических и электрических характеристик и, термически окисленного с поверхности кремния размерами $25 \times 10 \times 0,4$ мм для измерения толщины слоев и исследования их морфологии. Осаждение слоев при каждом составе рабочего газа происходило в едином цикле одновременно на четыре подложки, находящиеся при различной температуре T_b : 50, 100, 200 и 300°C . Скорость вращения барабана с подложками составляла 10 об/мин, а минимальное расстояние от мишени до подложки – 100 мм. Длительность процесса осаждения составляла 200 мин. Толщина слоев составляла около 400 нм.

3. Обсуждение результатов

Микрофотографии синтезированных слоев получены с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) SEM Leo-1450 (Карл Цейсс, Германия). Данные по электрическим характеристикам слоев были получены путем измерения эффекта Холла в геометрии Ван дер Пау. Данные по оптическому пропусканию слоев были получены с помощью спектрофотометра UV-3600 Shimadzu (Япония).

На рис. 1. приведены РЭМ-микрофотографии сколов слоев, синтезированных в различной газовой атмосфере при $T_b = 50^\circ\text{C}$ и 300°C . Можно видеть, что в общем случае слои, синтезированные при $T_b = 50^\circ\text{C}$, характеризуются более гладкой морфологией, по отношению к слоям, синтезированным при $T_b = 300^\circ\text{C}$, причем с ростом содержания кислорода в «горячих» слоях уменьшается размер структурных элементов, что связано с уменьшением длины миграции осаждаемых атомов на поверхности роста. С ростом содержания кислорода наблюдается также незначительное увеличение толщины слоев, обусловленное снижением реиспарения гемеоксида индия с поверхности роста.

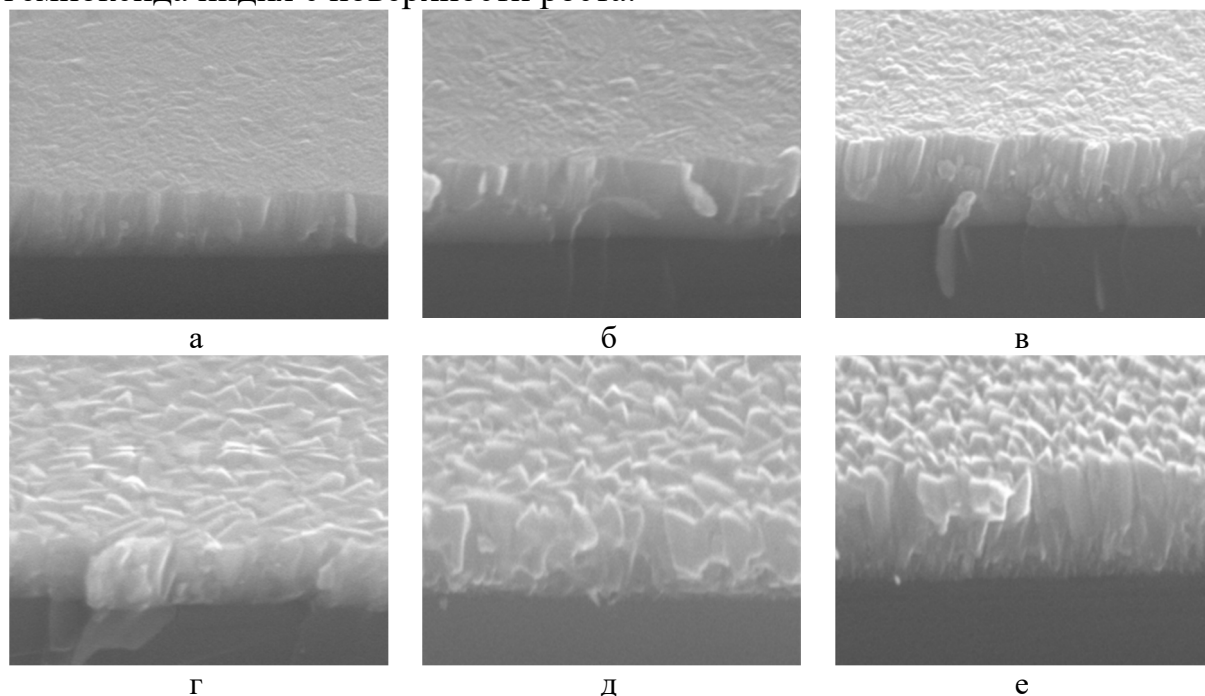


Рис. 1. РЭМ – микрофотографии сколов слоев IWO, синтезированных при $T_b = 50^\circ\text{C}$ (а, б, в) и $T_b = 300^\circ\text{C}$ (г, д, е) в атмосфере чистого аргона (а, г) и газовых смесей $\text{Ar}-\text{O}_2$ с $\eta = 0,2\%$ (б, д) и $\eta = 0,4\%$ (в, е).

На рис. 2 приведены зависимости электрических характеристик слоев IWO, полученных при осаждении в чистом аргоне ($\eta = 0\%$), а также в газовых смесях $\text{Ar}-\text{O}_2$ с $\eta = 0,2\%$ и $0,4\%$, от температуры синтеза T_b .

Можно видеть, что с ростом T_b до 200°C во всех слоях наблюдается

незначительное снижение концентрации свободных носителей заряда n . При дальнейшем увеличении T_b до 300°C , характер зависимости становится разнонаправленным – в слоях, полученных при $\eta \leq 0,2\%$, наблюдается рост концентрации n , а в слоях, полученных при $\eta = 0,4\%$, происходит дальнейшее снижение n .

Подвижность носителей заряда μ в интервале температур $T_b \leq 100^\circ\text{C}$ остается практически неизменной. Однако при дальнейшем увеличении T_b в слоях, осажденных в атмосфере с $\eta \leq 0,2\%$, наблюдается заметный рост подвижности, в то время как в слоях, осажденных в атмосфере с $\eta = 0,4\%$, подвижность μ продолжает снижаться.

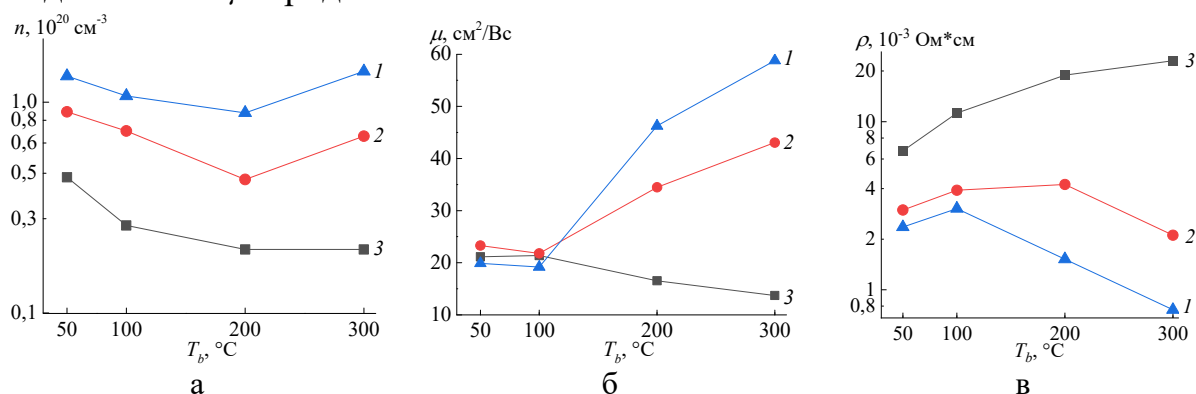


Рис. 2. Температурные зависимости концентрации носителей n (а), их подвижности μ (б) и удельного сопротивления ρ (в) слоев IWO, синтезированных в различной газовой атмосфере: 1 – $\eta = 0\%$, 2 – $\eta = 0,2\%$, 3 – $\eta = 0,4\%$.

Такой характер зависимостей n и μ может быть обусловлен влиянием нескольких конкурирующих процессов, преобладающих в том или ином температурном створе T_b . Мы полагаем, что в данном случае конкурирующими являются процесс окисления примеси на МЗГ и процесс замещения ионами примеси катионов в узле решетки матричного оксида. Причем ключевую роль в этих процессах наряду с температурой синтеза играет соотношение металл/кислород на поверхности роста, в значительной степени определяющее длину миграции осаждаемых атомов и, как следствие, структуру и свойства осаждаемых слоев. Мы полагаем, что при относительно низких температурах подложек ввиду ограниченной растворимости W в In_2O_3 примесь преимущественно локализуется на границах зерен в самостоятельной барьерной фазе в виде нейтральных комплексов $W-O_x$ [18]. При этом основным источником свободных электронов в низкотемпературных слоях ($T_b \leq 100^\circ\text{C}$) являются кислородные вакансии и, поэтому, увеличение содержания кислорода на поверхности роста приводит к снижению их концентрации.

С ростом T_b растет длина миграции осаждаемых атомов на

поверхности роста и как следствие эффективность замещения ионов In^{3+} ионами W^{6+} в узлах решетки In_2O_3 [19, 20]. Этот процесс также очень чувствителен к содержанию кислорода в составе рабочего газа. С увеличением температуры синтеза до 300°C этот процесс становится доминирующим при осаждении в атмосфере с малым содержанием кислорода ($\eta \leq 0,2\%$), способствуя росту концентрации свободных электронов. При этом растет и подвижность носителей заряда, что связано с заполнением ловушек на МЗГ и, как следствие, снижением потенциальных барьеров на МЗГ [21]. Однако, при дальнейшем увеличении содержания кислорода до $\eta = 0,4\%$ на первый план выходят процессы окисления примеси на МЗГ и снижения собственных кислородных вакансий в In_2O_3 , что подтверждается наблюдаемым снижением в слоях как n , так и μ .

На рис. 3 а представлены спектры оптического пропускания слоев IWO осажденных при 300°C , при различном содержании кислорода в составе рабочего газа. Все слои демонстрируют высокую прозрачность не только в видимой области, но и в БИК-диапазоне вплоть до 1500 нм . В диапазоне длин волн $\lambda = 1500\div 2500\text{ нм}$ наблюдается пологий спад коэффициента пропускания T , коррелирующий с концентрацией свободных электронов n . В спектрах слоя, синтезированного в атмосфере чистого аргона ($\eta = 0\%$) также можно отметить большой коротковолновой сдвиг края поглощения, обусловленный эффектом Бурштейна – Мосса.

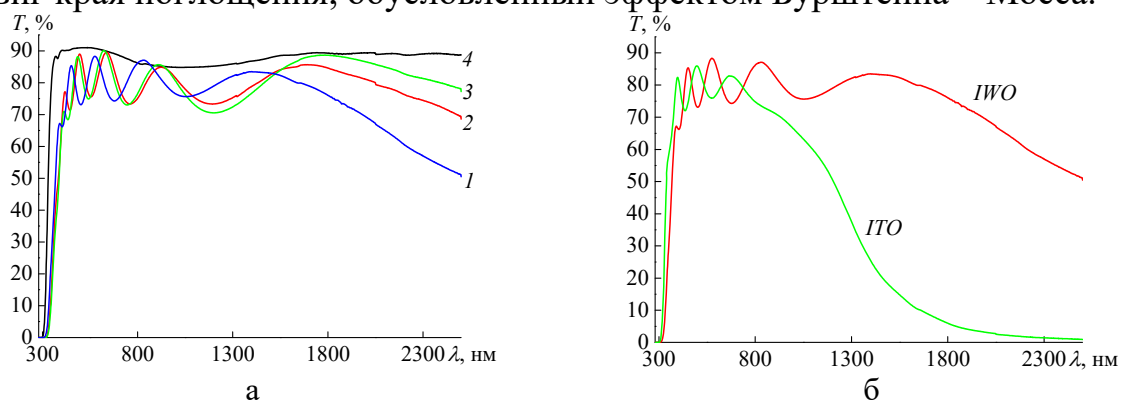


Рис. 3. а – спектры оптического пропускания слоев IWO, осажденных при $T_b = 300^\circ\text{C}$ в различной газовой атмосфере: 1 – $\eta = 0\%$, 2 – $\eta = 0,2\%$, 3 – $\eta = 0,4\%$ (кривая 4 – спектр пропускания стеклянной подложки); б – сравнительные спектры пропускания слоев IWO и ITO, осажденных при $T_b = 300^\circ\text{C}$ и $\eta = 0\%$.

Для сравнения в идентичных условиях в атмосфере чистого аргона был получен прозрачный проводящий слой на основе традиционного материала ITO аналогичной толщины (400 нм). На рис. 3 б представлены сравнительные спектры оптического пропускания пленок IWO и ITO, осажденных при 300°C в атмосфере чистого аргона. В видимом диапазоне

обе пленки демонстрируют высокое оптическое пропускание, однако в БИК-диапазоне оптическое пропускание пленки IWO существенно выше. В Таблице 1 обобщены электрические и оптические характеристики слоев IWO и ITO, полученных в идентичных условиях ($T_b = 300^\circ\text{C}$, $\eta = 0\%$).

Таблица 1. Сравнительные характеристики прозрачных проводящих слоев ITO и IWO, синтезированных при температуре подложек 300°C в атмосфере чистого аргона.

Слой	R_{surf} , Ом/кв.	T_{av} , %		φ , $\times 10^{-3} \Omega^{-1}$	
		$\lambda_1 = 400\div 700$ нм	$\lambda_2 = 400\div 2500$ нм	$\lambda_1 = 400\div 700$ нм	$\lambda_2 = 400\div 2500$ нм
ITO	4,9	89,26	39,16	65,5	0,017
IWO	19,5	88,23	84,73	14,7	9,8

Здесь важно отметить, что коэффициент качества φ для данных прозрачных проводящих слоев, характеризующего совокупность их электрических и оптических свойств и определяемый как $\varphi = T_{av}^{10} / R_{surf}$ (T_{av} – средний коэффициент пропускания слоя в выбранной области спектра, R_{surf} – поверхностное сопротивление), в видимом диапазоне спектра ($\lambda_1 = 400\div 700$ нм) для слоя ITO в 4,5 раза выше чем для слоя IWO. Однако в расширенном диапазоне, с захватом ближней БИК-области ($\lambda_2 = 400\div 2500$ нм), коэффициент качества φ , демонстрируемый слоем IWO, более чем в 550 раз выше, чем в ITO.

4. Заключение

Таким образом, исходя из вышеизложенного можно констатировать, что если для формирования прозрачных электродов в приложениях, предназначенных для работы в видимом диапазоне спектра предпочтительно использование слоев ITO, то для устройств, использующих более широкий спектральный диапазон с захватом ближней инфракрасной области, в частности для солнечных элементов, выгоднее использовать слой IWO.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ДФИЦ РАН (в части синтеза образцов) и НИЦ «Курчатовский институт» (в части исследования структуры и оптических свойств образцов).

Библиографический список:

1. **Шомахов, З.В.** Улучшение сенсорных характеристик бинарных и тройных оксидных наносистем / З.В. Шомахов, С.С. Налимова, А.А. Рыбина и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 879-887. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.879.
2. **Налимова, С.С.** Газочувствительные композитные наноструктуры на основе оксида цинка для детектирования паров органических растворителей / С.С. Налимова, З.В. Шомахов, К.В. Герасимова, К.Н. Пунегова, А.М. Гукетлов, Р.М. Калмыков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 678-687. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.678.
3. **Шомахов, З.В.** Наноструктуры стannата цинка для газовых сенсоров с высоким быстродействием / З.В. Шомахов, С.С. Налимова, Б.З. Шурдумов, А.И. Максимов, В.А. Мошников // Физико-химические

- аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 726-735. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.726.
4. **Minami, T.** Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes / T. Minami // *Semiconductors Science and Technology*. – 2005. – V. 20. – № 4. – P. S35-S44. DOI: 10.1088/0268-1242/20/4/004.
 5. **Liu, H.** Transparent conducting oxides for electrode applications in light emitting and absorbing devices / H. Liu, V. Avrutin, N. Izyumskaya, Ü. Özgür, H. Morkoç // *Superlattices and Microstructures*. – 2010. – V. 48. – I. 5. – P. 458-484. DOI: 10.1016/j.spmi.2010.08.011.
 6. **Stadler, A.** Transparent conducting oxides – an up-to-date overview / A. Stadler // *Materials*. – 2012. – V. 5. – I. 4. – P. 661-683. DOI: 10.3390/ma5040661.
 7. **Calnan, S.** High mobility transparent conducting oxides for thin film solar cells / S. Calnan, A.N. Tiwari // *Thin Solid Films*. – 2010. – V. 518. – I. 7. – P. 1839-1849. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.09.044.
 8. **Holman, Z.C.** Infrared light management in high-efficiency silicon heterojunction and rear-passivated solar cells // Z.C. Holman, M. Filipic, A. Descoeudres et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – V. 113. – I. 1. – P. 013107-1-013107-13. DOI: 10.1063/1.4772975.
 9. **Bikowski, A.** Analytical model of electron transport in polycrystalline, degenerately doped ZnO films / A. Bikowski, K. Ellmer // *Journal of Applied Physics*. – 2014. – V. 116. – I. 14. – P. 143704-1-143704-11. DOI: 10.1063/1.4896839.
 10. **Hosono, H.** Ionic amorphous oxide semiconductors: Material design, carrier transport, and device application / H. Hosono // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2003. – V. 352. – I. 9-20. – P. 851-858. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2006.01.073.
 11. **Akhmedov, A.K.** Transparent conductive indium zinc oxide films: temperature and oxygen dependences of the electrical and optical properties // A.K. Akhmedov, E.K. Murliev, A.S. Asvarov, A.E. Muslimov, V.M. Kanevsky // *Coatings*. – 2022. – V. 12. – I. 10. – Art. № 1583. – 12 p. DOI: 10.3390/coatings12101583.
 12. **Morales-Masis, M.** Low-temperature high-mobility amorphous iZO for silicon heterojunction solar cells / M. Morales-Masis, S.M. De Nicolas, J. Holovsky, S. De Wolf, C. Ballif // *IEEE Journal of Photovoltaics*. – 2015. – V. 5. – I. 5. – P. 1340-1347. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2450993.
 13. **Swallow, J.E.N.** Resonant doping for high mobility transparent conductors: the case of Mo-doped In₂O₃ / J.E.N. Swallow, B.A.D. Williamson, S. Sathasivam, et al. // *Materials Horizons*. – 2020. – V. 7. – I. 1. – P. 236-243. DOI: 10.1039/C9MH01014A.
 14. **Koida, T.** High-mobility transparent conductive Zr-doped In₂O₃ / T. Koida, M. Kondo // *Applied Physics Letters*. – 2006. – V. 89. – I. 8. – P. 082104-1-082104-3. DOI: 10.1063/1.2337281.
 15. **Hashimoto, R.** High mobility titanium-doped In₂O₃ thin films prepared by sputtering/post-annealing technique / R. Hashimoto, Y. Abe, T. Nakada // *Applied Physics Express*. – 2008. – V. 1. – № 1. – P. 015002-1-015002-3. DOI: 10.1143/APEX.1.015002.
 16. **Warm Singh, C.** High-mobility transparent conducting Mo-doped In₂O₃ thin films by pulsed laser deposition / C. Warm Singh, Y. Yoshida, D.W. Readey et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2004. – V. 95. – I. 7. – P. 3831-3833. DOI: 10.1063/1.1646468.
 17. **Akhmedov, A.K.** A multi-position drum-type assembly for simultaneous film deposition at different temperatures in a single sputter cycle – application to ITO thin films / A.K. Akhmedov, A. Sh. Asvarov, A.E. Muslimov, V.M. Kanevsky // *Coatings*. – 2020. – V. 10. – I. 11. – Art. № 1076. – 9 p. DOI: 10.3390/coatings10111076.
 18. **Txintxurreta, J.** Indium tin oxide thin film deposition by magnetron sputtering at room temperature for the manufacturing of efficient transparent heaters / J. Txintxurreta, E. G-Berasategui, R. Ortiz et al. // *Coatings*. – 2021. – V. 11. – I. 1. – Art. № 92. – 14 p. DOI: 10.3390/coatings11010092.
 19. **Kim, J.H.** Rapid thermal annealed WO₃ - doped In₂O₃ films for transparent electrodes in organic photovoltaics / J.H. Kim, Y.-H. Shin, T.-Y. Seong, S.-I. Na, H.-K. Kim // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2012. – V. 45. – № 39. – Art. № 395104. – 6 p. DOI: 10.1088/0022-3727/45/39/395104.
 20. **Newhouse, P.F.** High electron mobility W-doped In₂O₃ thin films by pulsed laser deposition / P.F. Newhouse, C.-H. Park, D.A. Keszler, J. Tate, P.S. Nyholm // *Applied Physics Letters*. – 2005. – V. 87. – I. 11. – P. 112108-1-112108-3. DOI: 10.1063/1.2048829.
 21. **Sommer, N.** Field emission at grain boundaries: modeling the conductivity in highly doped polycrystalline semiconductors / N. Sommer, J. Hüpkes, U. Rau // *Physical Review Applied*. – 2016. – V. 5. – I. 2. – P. 024009-1-024009-22. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.5.024009.

References:

1. Shomakhov Z.V., Nalimova S.S., Rybina A.A. et al. Uluchshenie sensornykh kharakteristik binarnykh i trojnykh oksidnykh nanosistem [Improving the sensor characteristics of binary and ternary oxide nanosystems],

- Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 879-887. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.692. (In Russian).
2. Nalimova S.S., Shomakhov Z.V., Gerasimova K.V. et al. Gazochuvstvitel'nye kompozitnye nanostruktury na osnove oksida tsinka dlya detektirovaniya parov organicheskikh rastvoritelej [Gas-sensitive composite nanostructures based on zinc oxide for detecting organic solvent vapors], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 879-887. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.678. (In Russian).
3. Shomakhov Z.V., Nalimova S.S., Shurdumov B.Z. Nanostruktury stannata tsinka dlya gazovykh sensorov s vysokim bystrodeystviem [Zinc stannate nanostructures for fast response gas sensors], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 726-735. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.726. (In Russian).
4. Minami T. Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes, *Semiconductors Science and Technology*, 2005, vol. 20, no. 4, pp. S35-S44. DOI: 10.1088/0268-1242/20/4/004.
5. Liu H., Avrutin V., Izyumskaya N., Özgür Ü., Morkoç H. Transparent conducting oxides for electrode applications in light emitting and absorbing devices, *Superlattices and Microstructures*, 2010, vol. 48, issue 5, pp. 458-484. DOI: 10.1016/j.spmi.2010.08.011.
6. Stadler A. Transparent conducting oxides – an up-to-date overview, *Materials*, 2012, vol. 5, issue 4, pp. 661-683. DOI: 10.3390/ma5040661.
7. Calnan S., Tiwari A.N. High mobility transparent conducting oxides for thin film solar cells, *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, issue 7, pp. 1839-1849. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.09.044.
8. Holman Z.C., Filipic M., Descoeudres A., De Wolf S., Smole F., Topic M., Ballif C. Infrared light management in high-efficiency silicon heterojunction and rear-passivated solar cells, *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, issue 1, pp. 013107-1-013107-13. DOI: 10.1063/1.4772975.
9. Bikowski A., Ellmer K. Analytical model of electron transport in polycrystalline, degenerately doped ZnO films, *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 116, issue 14, pp. 143704-1-143704-11. DOI: 10.1063/1.4896839.
10. Hosono H. Ionic amorphous oxide semiconductors: Material design, carrier transport, and device application, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, vol. 352, issue 9-20, pp. 851-858. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2006.01.073.
11. Akhmedov A.K., Murliev E.K., Asvarov A.S., Muslimov A.E., Kanevsky V.M. Transparent conductive indium zinc oxide films: temperature and oxygen dependences of the electrical and optical properties, *Coatings*, 2022, vol. 12, issue 10, art. no. 1583, 12 p. DOI: 10.3390/coatings12101583.
12. Morales-Masis M., De Nicolas S.M., Holovsky J., De Wolf S., Ballif C. Low-temperature high-mobility amorphous IZO for silicon heterojunction solar cells, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, vol. 5, issue 5, pp. 1340-1347. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2450993.
13. Swallow J.E.N., Williamson B.A.D., Sathasivam S. et al. Resonant doping for high mobility transparent conductors: the case of Mo-doped In₂O₃, *Materials Horizons*, 2020, vol. 7, issue 1, pp. 236-243. DOI: 10.1039/C9MH01014A.
14. Koida T., Kondo M. High-mobility transparent conductive Zr-doped In₂O₃, *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 89, issue 8, pp. 082104-1-082104-3. DOI: 10.1063/1.2337281.
15. Hashimoto R., Abe Y., Nakada T. High mobility titanium-doped In₂O₃ thin films prepared by sputtering/post-annealing technique, *Applied Physics Express*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 015002-1-015002-3. DOI: 10.1143/APEX.1.015002.
16. Warmsingh C., Yoshida Y., Readey D.W., et al. High-mobility transparent conducting Mo-doped In₂O₃ thin films by pulsed laser deposition, *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 95, issue 7, pp. 3831-3833. DOI: 10.1063/1.1646468.
17. Akhmedov A.K., Asvarov A. Sh., Muslimov A.E., Kanevsky V.M. A multi-position drum-type assembly for simultaneous film deposition at different temperatures in a single sputter cycle – application to ITO thin films, *Coatings*, 2020, vol. 10, issue 11, art. no. 1076, 9 p. DOI: 10.3390/coatings10111076.
18. Txintxurreta J., G-Berasategui E., Ortiz R. et al. Indium tin oxide thin film deposition by magnetron sputtering at room temperature for the manufacturing of efficient transparent heaters, *Coatings*, 2021, vol. 11, issue 1, art. no. 92, 14 p. DOI: 10.3390/coatings11010092.
19. Kim J.H., Shin Y.-H., Seong T.-Y., Na S.-I., Kim H.-K. Rapid thermal annealed WO₃ - doped In₂O₃ films for transparent electrodes in organic photovoltaics, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, vol. 45, art. no. 395104, 6 p. DOI: 10.1088/0022-3727/45/39/395104.
20. Newhouse P.F., Park C.-H., Keszler D.A., Tate J., Nyholm P.S. High electron mobility W-doped In₂O₃ thin films by pulsed laser deposition, *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 87, issue 11, pp. 112108-1-112108-3. DOI:

10.1063/1.2048829.

21. Sommer N., Hüpkens J., Rau U. Field emission at grain boundaries: modeling the conductivity in highly doped polycrystalline semiconductors, *Physical Review Applied*, 2016, vol. 5, issue 2, pp. 024009-1-024009-22. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.5.024009.

Original paper

High-mobility transparent conductive layers based on indium oxide doped with tungsten

A.K. Akhmedov¹, A.Sh. Asvarov², E.K. Murliev¹, Z.V. Shomakhov³

¹*Institute of Physics of the Dagestan Federal Research Center of RAS, Makhachkala, Russia*

²*Shubnikov Institute of Crystallography, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics,
National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

³*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.565

Abstract: Increasing the conductivity of transparent conductive layers by increasing the mobility of free charge carriers is one of the most important tasks of transparent electronics, since its solution contributes not only to the reduction of heat losses in the layers, but also to the expansion of the spectrum of the radiation used towards the near infrared region. Currently, work in this area is being carried out in some routes, one of which is the search for new layer's compositions that allow reducing the amount of impurity introduced while simultaneously increasing the efficiency of its ionization. In this paper, the influence of the oxygen content in the working gas and the deposition temperature on the morphology, microstructure, electrical, and optical characteristics of thin layers deposited by high-frequency magnetron sputtering of an ceramic target based on In₂O₃ with the addition of 1 wt.% WO₃ was investigated. It was found that the maximum mobility (59 cm²/V·s) and minimum specific resistance (7,8×10⁻⁴ Ohm·cm) are achieved in layers synthesized at 300°C in the pure argon atmosphere. For comparison, layers based on a solid solution of indium and tin oxides, widely used in the formation of transparent electrodes in various optoelectronic applications, were obtained under identical conditions. It was shown that layers based on indium oxide doped with tungsten retain acceptable transparency in a wide spectral range, up to 2000 nm, and are, therefore, preferable for use in devices operating in the near infrared range, for example, in solar energy converters or night vision devices.

Keywords: transparent electrode, indium oxide, doping, magnetron sputtering, transparency, electrical conductivity.

Ахмедов Ахмед Кадиевич – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Центра высоких технологий, Институт физики им. Х.И. Амирханова – обособленное подразделение ФГБУН «Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

Асваров Абил Шамсудинович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт»

Мурлиев Эльдар Камильевич – младший научный сотрудник Центра высоких технологий, Институт физики им. Х.И. Амирханова – обособленное подразделение ФГБУН «Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

Шомахов Замир Валериевич – к.ф.-м.н., директор института искусственного интеллекта и цифровых технологий Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова

Akhmed K. Akhmedov – Ph. D., Leading Researcher, Institute of Physics, Dagestan Federal Research Center of RAS

Abil Sh. Asvarov – Ph. D., Senior Researcher, Shubnikov Institute of Crystallography, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, National Research Center «Kurchatov Institute»

Eldar K. Murliev – Junior Researcher, Institute of Physics of the Dagestan Federal Research Center of RAS

Zamir V. Shomakhov – Ph. D., Director of the Institute of artificial intelligence and digital technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Поступила в редакцию/received: 20.08.2024; после рецензирования/revised: 23.09.2024; принята/accepted 25.09.2024