

УДК 661.847.2:621.793.18

## ПРОЗРАЧНЫЕ ПРОВОДЯЩИЕ СЛОИ НА ОСНОВЕ ZnO, ПОЛУЧЕННЫЕ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ КОМПОЗИТНОЙ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ZnO:Ga–Zn: ЧАСТЬ 2

© 2021 г. А. Х. Абдуев<sup>а</sup>, А. К. Ахмедов<sup>а</sup>, А. Ш. Асваров<sup>а, б, \*</sup>, А. Э. Муслимов<sup>б</sup>, В. М. Каневский<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, 367015 Россия

<sup>б</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: abil-as@list.ru

Поступила в редакцию 23.02.2020 г.

После доработки 30.03.2020 г.

Принята к публикации 07.04.2020 г.

Исследовано влияние кислорода в составе рабочего газа на процесс осаждения, микроструктуру и функциональные свойства прозрачных проводящих слоев ZnO:Ga, полученных методом магнетронного распыления композитной металлокерамической мишени ZnO:Ga–Zn. Показано, что с ростом содержания кислорода уменьшается доля избыточного цинка в потоке реагентов, и наблюдаемые изменения микроструктуры слоев ZnO:Ga и их электрических и оптических свойств обусловлены уменьшением дефицита кислорода в них. В целом, с увеличением содержания кислорода в рабочей камере наблюдалось повышение эффективности использования распыленного материала металлокерамической мишени. Однако прозрачные проводящие слои ZnO:Ga с удельной проводимостью  $\sigma > 10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , приемлемой для практического использования, были получены при содержании кислорода менее 3%.

**Ключевые слова:** ZnO, пленка, прозрачный электрод, магнетронное распыление, мишень, керамика, металлокерамика, структура, проводимость, коэффициент пропускания.

DOI: 10.31857/S1028096021010039

### ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных методов формирования функциональных слоев на основе оксида цинка наиболее широкое применение нашли две разновидности магнетронного распыления – распыление керамической мишени в атмосфере инертного газа и реактивное распыление металлической мишени [1, 2]. Если принять во внимание достоинства и недостатки, присущие методу магнетронного распыления керамических мишеней (высокая стабильность процесса, высокое качество слоев, высокая стоимость мишени, низкая скорость роста) и методу реактивного распыления металлической мишени (высокая скорость роста, низкая стоимость мишени, низкая стабильность процесса и сложность его контроля), то разработка высококачественного способа формирования с большой скоростью высококачественных слоев ZnO функционального назначения представляет значительный прикладной интерес [3].

В свою очередь, в ходе исследования процесса формирования и свойств слоев при магнетронном распылении металлокерамической мишени

было обнаружено, что избыточный цинк в потоке реагентов при создании условий, препятствующих его активному встраиванию в растущий слой, способствуют улучшению структурных и функциональных характеристик прозрачных проводящих слоев ZnO:Ga [4]. Было показано, что значительная часть избыточного цинка, формирующегося при распылении металлокерамической мишени с содержанием металлической фазы 20 мас. %, перестает встраиваться в растущий слой при нагреве подложки до 200°C и выше.

Однако очевидно, что эффективность использования распыленного в среде инертного газа материала металлокерамической мишени для формирования слоя ZnO:Ga на нагретой подложке будет заметно ниже, чем в случае традиционной керамической мишени, так как металлический компонент металлокерамической мишени не встраивается в растущий слой. В связи с вышесказанным представляет интерес исследование процессов, происходящих при распылении металлокерамической мишени в присутствии контролируемого количества кислорода в рабочей камере

**Таблица 1.** Условия осаждения слоев ZnO:Ga

| Слой      | Тип мишени | $T_{\text{подл}}, ^\circ\text{C}$ | $Y_{\text{O}_2}, \%$ | $t, \text{мин}$ |
|-----------|------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|
| К-200-0   | К          | 200                               | 0                    | 60              |
| МК-200-0  | МК         | 200                               | 0                    |                 |
| МК-200-1  |            |                                   | 1                    |                 |
| МК-200-3  |            |                                   | 3                    |                 |
| МК-200-5  |            |                                   | 5                    |                 |
| МК-200-10 |            |                                   | 10                   |                 |

Примечание.  $T_{\text{подл}}$  – температура подложки,  $Y_{\text{O}_2}$  – содержание кислорода,  $t$  – длительность осаждения.

В настоящей работе проведено исследование процесса осаждения, микроструктуры и функциональных свойств прозрачных проводящих слоев ZnO:Ga, полученных методом магнетронного распыления композитной металлокерамической мишени ZnO:Ga–Zn при различном содержании кислорода в рабочем газе аргоне. Полученные результаты сопоставлены с характеристиками слоев ZnO:Ga, осажденных при распылении традиционной керамической мишени в среде аргона.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Детальное описание процесса изготовления металлокерамической мишени и условий магнетронного напыления слоев ранее было представлено в [4]. Для исследования влияния кислорода осаждение слоев на нагретые до  $200^\circ\text{C}$  подложки проводили путем распыления металлокерамической (МК) мишени при рабочем давлении 0.1 Па и плотности тока разряда  $3 \text{ мА/см}^2$  с использованием в качестве рабочего газа подготовленных газовых смесей Ar–O<sub>2</sub> с содержанием кислорода  $Y_{\text{O}_2} = P_{\text{O}_2}/(P_{\text{Ar}} + P_{\text{O}_2})$  от 0 до 10%. Дополнительно для сравнения был синтезирован слой ZnO:Ga с использованием традиционной керамической (К) мишени в среде аргона ( $Y_{\text{O}_2} = 0\%$ ) и идентичных условиях. В табл. 1 обобщены данные об условиях напыления тонкопленочных образцов.

Для определения эффективности использования материала распыляемой мишени после каждого цикла напыления мишень снимали с магнетронного распылительного узла и путем взвешивания на аналитических весах ОНАУСПА114С регистрировали потерю массы мишени  $\Delta m$  за одинаковые промежутки времени напыления. После этого полученные данные сопоставляли с данными о толщинах соответствующих слоев  $d$ . Эффективность использования мишеней  $\epsilon$  оценивали как отношение  $d/\Delta m$ .

Морфологию поверхности, толщину и химический состав слоев, выращенных на подложках окисленного кремния, определяли с использова-

нием растрового электронного микроскопа Leo-1450 (Carl Zeiss), оснащенного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром (EDX IN-CA Energy-250, Oxford Instruments). Микроструктуру, электрические и оптические характеристики исследовали на тонкопленочных образцах, осажденных на стеклянные подложки. Рентгеноструктурные исследования проводили на порошковом дифрактометре Empyrean Series 2 (PANalytical) с источником CuK $\alpha$ -излучения ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ). Электрическое сопротивление слоев измеряли стандартным четырехзондовым методом (ИУС-3, Россия), концентрацию и подвижность свободных носителей определяли методом Холла при комнатной температуре. Оптические спектры пропускания в диапазоне от 250 до 1650 нм регистрировали при комнатной температуре с использованием спектрофотометра UV-3600 (Shimadzu).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

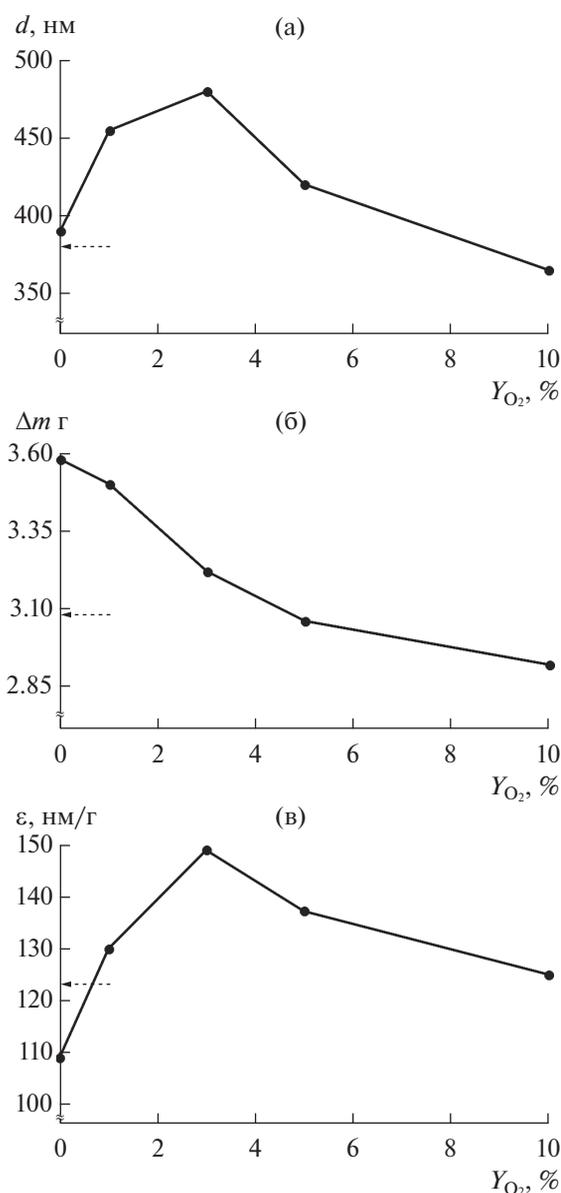
Как было отмечено выше, эффективность использования материала мишени  $\epsilon$  в случае роста на подложку, нагретую до  $200^\circ\text{C}$ , будет заметно ниже в случае мишени МК, чем в случае традиционной мишени К при распылении в чистом аргоне, так как металлический компонент мишени МК не встраивается в растущий слой ZnO:Ga. Очевидно, что при добавлении в рабочий газ кислорода эффективность использования распыленного материала мишени МК и скорость роста слоев на подложке должна повышаться за счет окисления свободного цинка в зоне эрозии, в газовой фазе и на нагретой поверхности роста.

На рис. 1а можно видеть, что при содержании кислорода  $Y_{\text{O}_2}$  до 5% наблюдается более высокая скорость роста слоев при распылении мишени МК по сравнению со скоростью роста слоя К-200-0, полученного при распылении мишени К в среде аргона. Максимальная скорость роста слоев достигается при  $Y_{\text{O}_2} = 3\%$ . В то же время с ростом содержания кислорода от 0 до 10% потеря массы  $\Delta m$  мишени МК монотонно уменьшается во всем диапазоне, и при  $Y_{\text{O}_2} > 5\%$  она опускается ниже уровня, соответствующего случаю распыления мишени К в среде Ar (рис. 1б). В соответствии с наблюдаемыми зависимостями скоростей распыления мишени и роста слоев (рис. 1в) можно заключить, что если при распылении в среде Ar ( $Y_{\text{O}_2} = 0\%$ ) эффективность использования материала мишени МК  $\epsilon$  была ниже, чем мишени К, то при добавлении в рабочий газ кислорода эффективность использования распыленного материала мишени МК значительно улучшается и превосходит значение, характерное для мишени К.

Очевидно, что механизм распыления металлического компонента мишени МК в присутствии

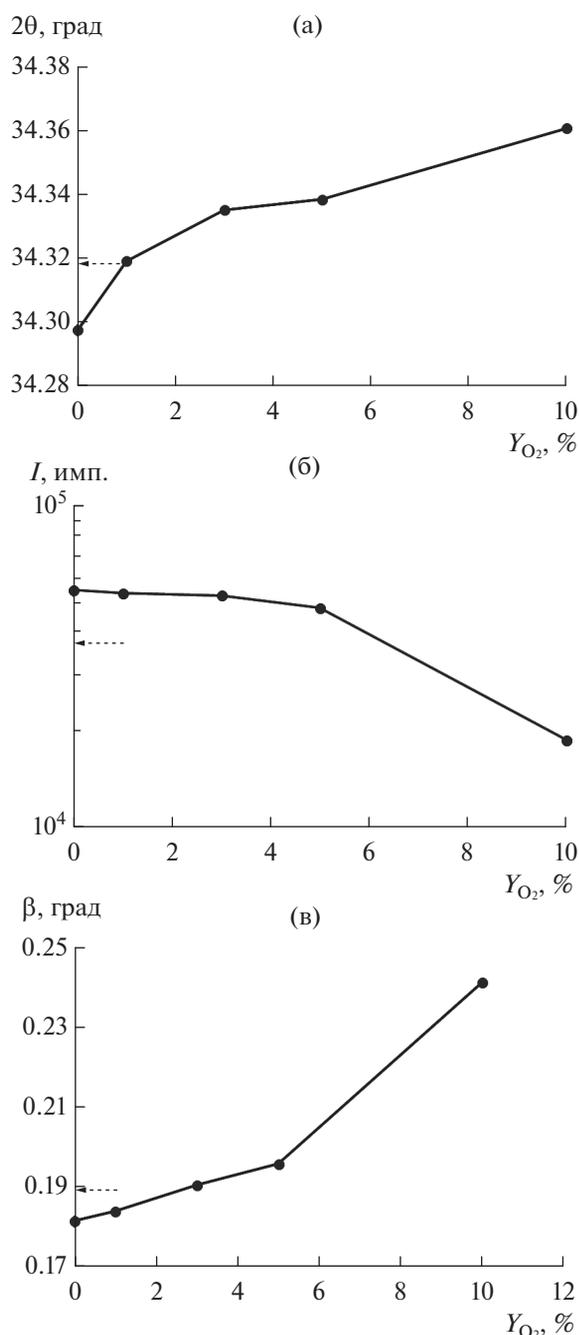
кислорода в рабочем газе можно описать процессами, происходящими при реактивном распылении металлической мишени в присутствии газо-окислителя. При малом содержании кислорода в камере значительная часть реакционного газа адсорбируется на внутренних поверхностях рабочей камеры, и распыление металлической мишени протекает в металлической моде [5]. Окисление металла происходит главным образом вблизи нагретой подложки и непосредственно на ней. При увеличении содержания кислорода скорость распыления снижается из-за увеличения степени окисления поверхности металлической мишени в зоне эрозии, и распыление переходит в режим оксидной моды, т.е. механизмы распыления окисленной поверхности мишени и роста слоев на подложке становятся аналогичными механизмам распыления и осаждения с использованием керамической мишени. Дополнительным фактором, обуславливающим снижение скорости распыления мишени (скорости осаждения слоя), является снижение в системе парциального давления аргона, ионы которого значительно эффективнее распыляют мишень, чем ионы кислорода.

Как показали проведенные рентгеноструктурные исследования, введение в систему дополнительного кислорода не влияло на присущую слоям ZnO ярко выраженную аксиальную текстуру [6]. Как и в случае распыления в чистом аргоне, на дифрактограммах присутствовали только два рефлекса – 002 и 004 – фазы ZnO. На рис. 2 представлены зависимости углового положения  $2\theta$  рефлекса 002 ZnO, его интенсивности  $I$  и интегральной ширины  $\beta$  от содержания кислорода в камере. Для сравнения штриховой стрелкой отмечены значения, наблюдаемые в слое К-200-0. Можно видеть, что заметные изменения интенсивности  $I$  и интегральной ширины  $\beta$  рефлекса 002 ZnO наблюдаются при содержании кислорода до  $Y_{O_2} > 5\%$ , а угловое положение монотонно сдвигается с ростом содержания  $O_2$  в область больших углов  $2\theta$  до значения  $34.36^\circ$ , приближаясь к стандартному значению для свободной от напряжений кристалла ZnO ( $2\theta_0 = 34.42^\circ$ ). Из характера зависимостей интенсивности и интегральной ширины можно сделать вывод, что при содержании кислорода  $Y_{O_2} \leq 5\%$  избыточный цинк все еще присутствует в потоке реагентов к подложке, но его концентрация снижается. Как видно из рис. 2 и табл. 2, снижение избытка цинка у поверхности роста приводит к уменьшению концентрации собственных дефектов в растущих слоях, связанных с частичным внедрением цинка в кристаллическую решетку ZnO. Это в свою очередь приводит к наблюдаемому сдвигу  $2\theta$  от  $34.30^\circ$  до  $34.34^\circ$ , соответствующему уменьшению параметра кристаллической решетки  $c$  от 0.5224 до 0.5217 нм [7]. При  $Y_{O_2} = 10\%$  металлический



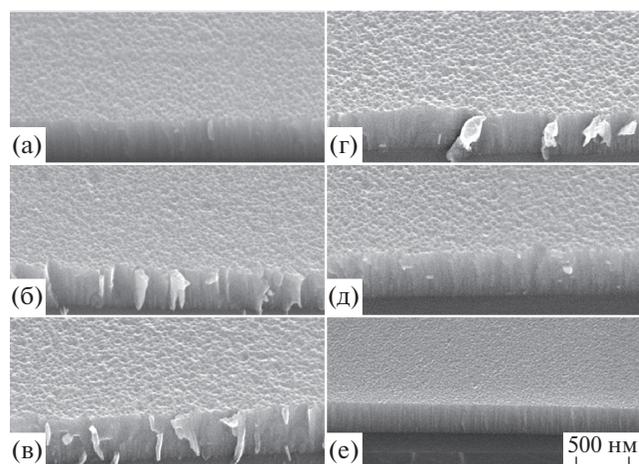
**Рис. 1.** Зависимости толщины слоев  $d$  (а), потери массы мишени  $\Delta m$  (б) и эффективности использования материала мишени  $\epsilon$  (в) от содержания кислорода в составе рабочего газа  $Y_{O_2}$ . Пунктирными стрелками указаны значения, соответствующие случаю распыления мишени К в среде чистого аргона (образец К-200-0).

компонент мишени МК полностью окисляется в приповерхностном слое в зоне эрозии мишени, и соотношение цинк/кислород в потоке реагентов становится меньше единицы. В слое МК-200-10 концентрация дефектов типа “межузельный цинк” и “вакансия кислорода” минимальна. Наблюдаемое небольшое отклонение параметра  $c = 0.5214$  нм от табличного значения ( $c_0 = 0.5207$  нм) связано, по-видимому, с присутствием в слоях сжимающих макронапряжений [8].



**Рис. 2.** Зависимости углового положения  $2\theta$  (а), интенсивности  $I$  (б) и интегральной ширины  $\beta$  (в) рефлекса 002 ZnO от содержания кислорода в составе рабочего газа  $Y_{O_2}$ . Пунктирными стрелками указаны значения, соответствующие случаю распыления мишени К в среде чистого аргона (образец К-200-0).

Результаты оценки размеров нанокристаллитов  $D_{002}$  и величины микроискажений  $\Delta d/d$  в них для слоев, синтезированных при распылении мишени МК в присутствии кислорода (табл. 2), показывают, что с ростом  $Y_{O_2}$  до 5% средний размер кристаллитов остается почти неизменным, а при



**Рис. 3.** РЭМ-изображения слоев ZnO:Ga, напыленных при различном содержании кислорода в рабочем газе  $Y_{O_2}$ : а – К-200-0; б – МК-200-0; в – МК-200-1; г – МК-200-3; д – МК-200-5; е – МК-200-10.

дальнейшем увеличении концентрации кислорода до 10% уменьшается до 70 нм. В то же время величина микроискажений  $\Delta d/d$  внутри нанокристаллитов уменьшается от 0.19 до 0.17% при увеличении концентрации кислорода до 5%, а затем увеличивается до 0.24% при максимальной концентрации кислорода. Такой характер зависимостей также свидетельствует об уменьшении соотношения цинк/кислород в потоке реагентов к подложке и переключении механизма распыления металлокерамической мишени на оксидную моду при  $Y_{O_2} > 5\%$ .

Исследование слоев методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) показало (рис. 3), что при низких концентрациях кислорода  $Y_{O_2} \leq 3\%$  морфология поверхности слоев мало отличается от морфологии слоев К-200-0 и МК-200-0, а при дальнейшем росте  $Y_{O_2}$  наблюдается тенденция к сглаживанию рельефа поверхности. Согласно данным рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии соотношение Zn/O с увеличением содержания кислорода приближается к единице, а соотношение Ga/Zn уменьшается от 0.033 для  $Y_{O_2} = 0\%$  до 0.025 для  $Y_{O_2} = 10\%$ . Уменьшение содержания галлия в слоях с ростом  $Y_{O_2}$  обусловлено тем, что в исходной мишени МК соотношение Ga/Zn с учетом вносимой металлической фазы было ниже, чем в мишени К, где соотношение Ga/Zn закладывали на уровне 0.031.

На рис. 4 представлены спектры оптического пропускания слоев ZnO:Ga, полученных при распылении мишени МК при изменении концентрации кислорода от 0 до 10%. Средний коэффициент оптического пропускания  $T$  всех слоев в видимой области спектра выше 90%. Присутствие

интерференционных полос во всех спектрах свидетельствует об однородности всех слоев и относительной гладкости границ разделов. Можно видеть, что с ростом концентрации кислорода наблюдается сдвиг края поглощения в длинноволновую область и увеличение прозрачности в ближней инфракрасной области ( $\lambda > 1000$  нм). На вставке рис. 4а приведены построенные для различных концентраций кислорода зависимости  $(\alpha hv)^2 = f(hv)$ , где  $\alpha$  – коэффициент поглощения, а  $hv$  – энергия фотонов. Зависимости от содержания кислорода оптической ширины запрещенной зоны  $E_g$ , определенной в результате экстраполяции прямолинейных участков на ось энергии, приведены на рис. 4б. Можно видеть, что ширина запрещенной зоны монотонно уменьшается от значения 3.66 эВ в отсутствие кислорода (слой МК-200-0) до 3.22 эВ при максимальной концентрации кислорода (слой МК-200-10) [9]. Высокое значение  $E_g$  для слоев, синтезированных при распылении мишени МК в среде чистого аргона, можно объяснить эффектом Бурштейна–Мосса. Как отмечалось выше, слои МК-200-0 характеризуются высокой концентрацией свободных носителей ( $n > 10^{21}$  см<sup>-3</sup>), обусловленной как примесным легированием, так и собственными дефектами донорного типа. Очевидно, что с ростом  $Y_{O_2}$  концентрация свободных носителей должна снижаться, этим можно объяснить наблюдаемую зависимость  $E_g$  от содержания кислорода в камере в ходе распыления.

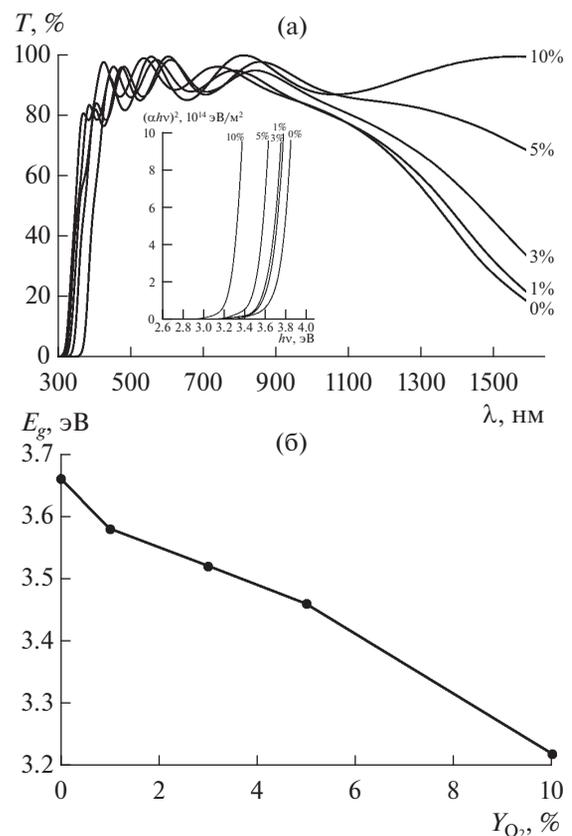
Действительно, как показали исследования электрических характеристик слоев (рис. 5а), с увеличением концентрации кислорода в рабочей камере наблюдается рост удельного сопротивления  $\rho$  более чем на два порядка величины. Это обусловлено в первую очередь уменьшением концентрации свободных носителей  $n$  с ростом  $Y_{O_2}$  (рис. 5б). На рис. 5г приведен график зависимости  $E_g$  от  $n^{2/3}$ . Можно видеть, что все точки достаточно хорошо ложатся на прямую линию. Это подтверждает то, что сдвиг края оптического поглощения связан с эффектом Бурштейна–Мосса [10], а не с макронапряжениями в слоях [11, 12] или другими причинами [13, 14].

Если концентрация носителей уменьшается монотонно с ростом  $Y_{O_2}$ , то падение холловской подвижности наблюдается в слоях, синтезированных при  $Y_{O_2} > 3\%$  (рис. 5в). Известно, что в полукристаллических проводящих материалах двумя основными причинами рассеяния свободных носителей являются внутризеренное рассеяние на ионизированных примесях и рассеяние носителей на границах зерен [15]. В материалах на основе широкозонных оксидов регулируется на ионизированных примесях регулируется концентрацией вносимой примеси. При высоких уровнях легирования помимо увеличения рассеяния на

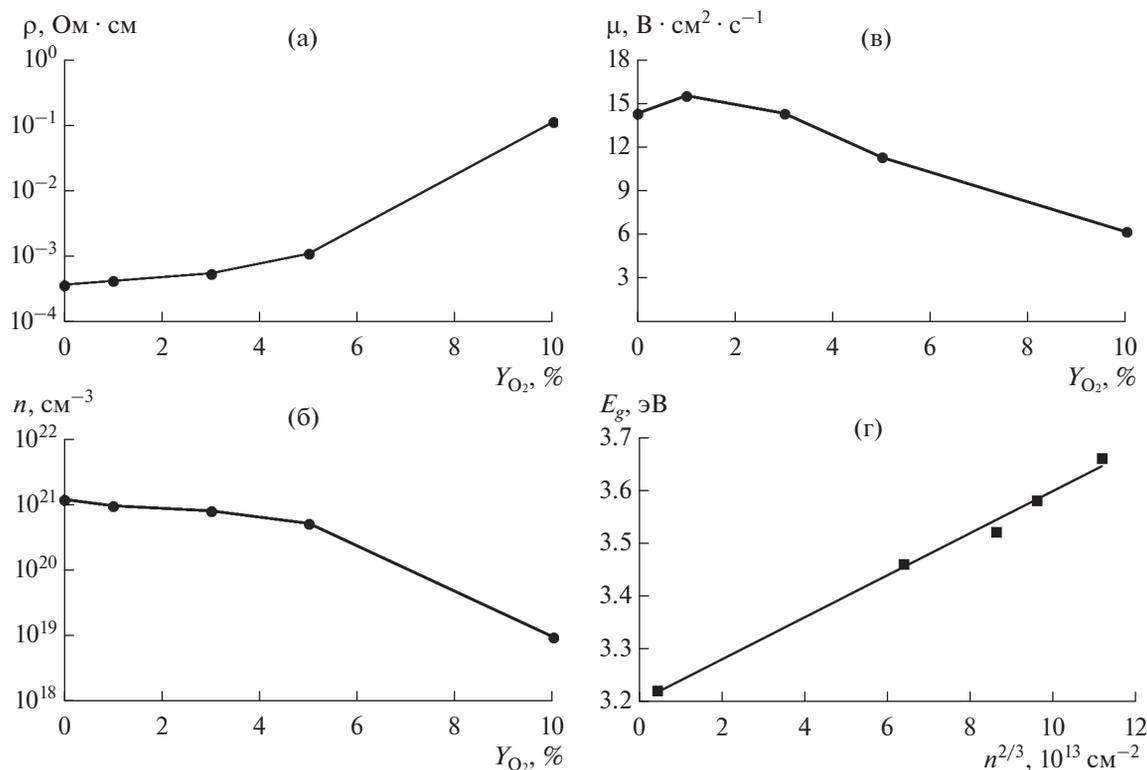
**Таблица 2.** Вычисленные из характеристик рефлексов 002 ZnO и 004 ZnO параметр кристаллической решетки  $c$ , средний размер нанокристаллитов  $D_{002}$  и величины микроискажений  $\Delta d/d$

| Слой      | $c$ , нм | $D_{002}$ , нм | $\Delta d/d$ , % |
|-----------|----------|----------------|------------------|
| К_200_0   | 0.5221   | 80             | 0.18             |
| МК_200_0  | 0.5224   | 82             | 0.19             |
| МК_200_1  | 0.5222   | 81             | 0.19             |
| МК_200_3  | 0.5220   | 80             | 0.18             |
| МК_200_5  | 0.5217   | 78             | 0.17             |
| МК_200_10 | 0.5214   | 70             | 0.24             |

примесных центрах может наблюдаться рост рассеяния и на границах зерен из-за сегрегации на них примесного материала и увеличения числа границ (снижение среднего размера кристаллитов) [16]. Однако основным фактором, влияю-



**Рис. 4.** Спектры оптического пропускания слоев ZnO:Ga, напыленных с использованием мишени МК при различном содержании кислорода в рабочем газе  $Y_{O_2}$  (а), на вставке представлены зависимости  $(\alpha hv)^2 = f(hv)$  для данных слоев. Зависимость оптической ширины запрещенной зоны от содержания кислорода в рабочем газе  $Y_{O_2}$  (б).



**Рис. 5.** Зависимости удельного сопротивления (а), концентрации свободных носителей  $n$  (б) и холловской подвижности  $\mu$  (в) слоев ZnO:Ga, напыленных с использованием мишени МК, от содержания кислорода в рабочем газе  $Y_{O_2}$ . График зависимости оптической ширины запрещенной зоны  $E_g$  от  $n^{2/3}$  для слоев ZnO:Ga, напыленных с использованием мишени МК при температуре подложки 200°C (г).

щим на рассеяние на границах зерен, является их состояние, а именно степень обеднения кислородом поверхности нанокристаллитов, обеспечивающая снижение потенциальных барьеров для носителей заряда на границах контактирующих зерен [17, 18]. Справедливо полагать, что при концентрации кислорода  $Y_{O_2} \leq 3\%$  в формируемом потоке реагентов к подложке сохраняется избыток цинка относительно кислорода, что приводит к формированию слоев с низким рассеянием носителей на межзеренных границах из-за формирования на поверхности зерен, обедненных кислородом, тонких слоев. В свою очередь, наблюдаемый максимум подвижности при  $Y_{O_2} = 1\%$  можно объяснить снижением вклада рассеяния на ионизированных примесях в результате уменьшения концентрации собственных донорных дефектов внутри кристаллитов и примесных дефектов  $Ga_{Zn}$  [19], что подтверждается данными энергодисперсионного анализа.

Известно, что электрические характеристики прозрачных проводящих слоев на основе ZnO, полученных при магнетронном распылении керамических мишеней, очень чувствительны даже к малому содержанию кислорода в рабочем газе [20, 21]. Таким образом, использование металло-

керамической мишени позволяет осуществлять рост прозрачных проводящих слоев на основе оксида цинка с высокой скоростью и с приемлемыми электрическими характеристиками ( $\rho \leq 5.5 \times 10^{-4}$  Ом·см,  $n \geq 8.0 \times 10^{20}$   $cm^{-3}$  и  $\mu \geq 14$   $V \cdot cm^2 \cdot c^{-1}$ ) при содержании кислорода в составе рабочего газа  $Y_{O_2}$  до 3% и представляет прикладной интерес.

## ВЫВОДЫ

Сравнительные исследования процессов осаждения, микроструктуры, электрических и оптических свойств прозрачных проводящих слоев на основе ZnO, полученных методом магнетронного распыления традиционной керамической мишени ZnO:Ga в среде аргона и металлокерамической мишени ZnO:Ga–Zn в среде с различным содержанием кислорода в рабочем газе, показали следующее. Добавление в состав рабочего газа контролируемого количества кислорода приводит к более эффективному использованию распыленного материала металлокерамической мишени. Скорость осаждения слоев заметно увеличивается по сравнению со случаем использования керамической мишени. Оптические и электрические характеристики слоев ZnO:Ga, полученных с применением металлокерамической мишени при

температуре подложки 200°C и содержании кислорода в рабочей камере до 3%, по своим функциональным характеристикам пригодны для использования в качестве прозрачных электродов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках Государственных заданий ДФИЦ РАН и ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН и частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-12099 мк, 19-07-00537а) с использованием оборудования ДФИЦ РАН и ЦКП ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН при поддержке Минобрнауки России (проект RFMEFI62119X0035).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mereu R.A., Le Donne A., Trabattoni S. et al.* // J. Alloys Compd. 2015. V. 626. P. 112. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.11.150>
2. *Ye W., Fang K.* // Surf. Engin. 2020. V. 36. № 1. P. 49. <https://doi.org/10.1080/02670844.2018.1555214>
3. *Zhou L., Fan Q., Simões R., Neto V.* // MRS Commun. 2015. V. 5. № 2. P. 327. <https://doi.org/10.1557/mrc.2015.32>
4. *Абдуев А.Х., Ахмедов А.К., Асваров А.Ш. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 1. С. 87. <https://doi.org/10.31857/S1028096021010027>
5. *Safi I.* // Surf. Coat. Technol. 2000. V. 127. P. 203.
6. *Абдуев А.Х., Ахмедов А.К., Асваров А.Ш. и др.* // Кристаллография. 2020. Т. 65. № 3. С. 489. <https://doi.org/10.31857/S0023476120030029>
7. *Fairose S., Ernest S., Daniel S.* // Sens. Imaging. 2018. V. 19. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s11220-017-0184-5>
8. *Sarma B., Sarma B.K.* // J. Alloys Compd. 2018. V. 734. P. 210. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.028>
9. *Zhu H., Hüpkes J., Bunte E., Huang S.M.* // Appl. Surf. Sci. 2010. V. 256. № 14. P. 4601. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.02.057>
10. *Juhnevica I., Masonkina M., Mezinskis G., Gabrene A.* // Mater. Sci. Appl. Chem. 2015. V. 31. P. 33. <https://doi.org/10.7250/msac.2015.006>
11. *Li Y.F.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 021915. <https://doi.org/10.1063/1.2757149>
12. *Mohanty B.Ch., Jo Y.H., Yeon D.H. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 062103. <https://doi.org/10.1063/1.3202399>
13. *Liu H., Zeng F., Lin Y. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. P. 181908. <https://doi.org/10.1063/1.4804613>
14. *Shan F.K., Kim B.I., Liu G.X. et al.* // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. P. 4772. <https://doi.org/10.1063/1.1690091>
15. *Minami T., Miyata T., Tokunaga H.* // Phys. Stat. Sol. A. 2018. V. 216. № 5. P. 1700783. <https://doi.org/10.1002/pssa.201700783>
16. *Mo G., Tang Z., He H. et al.* // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2019. V. 30. P. 12804. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01646-w>
17. *Hu Y.M., Li J.Y., Chen N.Y. et al.* // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. № 8. P. 085302. <https://doi.org/10.1063/1.4977104>
18. *Nguyen V.H., Bellet D., Masenelli B., Muñoz-Rojas D.* // ACS Appl. Nano Mater. 2018. V. 1. № 12. P. 6922. <https://doi.org/10.1021/acsanm.8b01745>
19. *Ellmer K.* // J. Phys. D. 2000. V. 33. P. R17. <http://iopscience.iop.org/0022-3727/33/4/201>
20. *Guo T., Dong G., Liu Q. et al.* // Superlatt. Microstr. 2013. V. 64. P. 552. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.10.026>
21. *Hong J.S., Matsushita N., Kim K.H.* // Semicond. Sci. Technol. 2014. V. 29. P. 075007. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/29/7/075007>

## ZnO-Based Transparent Conductive Layers Deposited by Magnetron Sputtering of a Composite Cermet Target ZnO:Ga–Zn: Part 2

A. Kh. Abduev<sup>1</sup>, A. K. Akhmedov<sup>1</sup>, A. Sh. Asvarov<sup>1,2,\*</sup>, A. E. Muslimov<sup>2</sup>, V. M. Kanevsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Amirkhanov Institute of Physics, Dagestan Federal Research Center of Russian Academy of Sciences, Makhachkala, 367015 Russia*

<sup>2</sup>*Shubnikov Institute of Crystallography, Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics”, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia*

\*e-mail: [abil-as@list.ru](mailto:abil-as@list.ru)

The effect of oxygen content in the working gas mixture on the deposition process, microstructure, and functional properties of transparent conductive ZnO:Ga layers obtained by magnetron sputtering of a ZnO:Ga–Zn composite cermet target is studied. With an increase in the oxygen content, the portion of excess zinc in the reagent flow is shown to decrease, and the observed changes in the microstructure of ZnO:Ga layers and their electrical and optical properties are due to a decrease in oxygen deficiency in them. In general, with an increase in the oxygen content in the working chamber, an increase in the efficiency of using the sputtered material of the cermet target is observed. However, transparent conductive ZnO:Ga layers with a specific conductivity  $\sigma > 10^3 \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ , acceptable for practical use, have been obtained at an oxygen content of less than 3%.

**Keywords:** ZnO, film, transparent electrode, magnetron sputtering, target, ceramics, cermet, structure, conductivity, transmittance.