

УДК 621.315.592

Структурные свойства пленок ZnO:Al, полученных золь-гель методом

© Е.П. Зарецкая*[¶], В.Ф. Гременок*, А.В. Семченко⁺, В.В. Сидский⁺, Р.Л. Юшканес*

* Научно-практический центр Национальной академии наук Белоруссии по материаловедению, 220072 Минск, Белоруссия,

⁺ Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, 246699 Гомель, Белоруссия

[¶] Государственный научно-исследовательский институт „Центр по физическим и технологическим наукам“, ЛТ-01108 Вильнюс, Литва

(Получена 12 января 2015 г. Принята к печати 5 февраля 2015 г.)

Пленки ZnO:Al получены золь-гель осаждением с применением различного типа реагентов при температурах 350–550°C. Методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифракции, комбинационного рассеяния света и оптического пропускания исследована зависимость структурных, морфологических и оптических свойств ZnO:Al покрытий от условий осаждения. Определены оптимальные условия получения слоев ZnO:Al с преимущественной ориентацией в направлении [001] и низкой шероховатостью поверхности. Полученные слои имеют коэффициент оптического пропускания до 95% в широком спектральном диапазоне и могут быть использованы в приборах оптоэлектроники.

1. Введение

Оксид цинка — широкозонный полупроводник ($E_g = 3.37$ эВ), обладающий уникальным сочетанием оптических, акустических и электрических свойств, широко применяется в ряде оптоэлектронных устройств, таких как преобразователи поверхностно акустических волн (ПАВ), солнечные элементы, оптические волноводы, лазерные отражатели, широкополосные фильтры, жидкокристаллические дисплеи [1–4]. Для улучшения проводимости ZnO легируют алюминием (ZnO:Al), галлием и индием [5–7]. Наибольшее внимание уделяется легированному алюминии оксиду цинка ZnO:Al, имеющему прозрачность $\sim 90\%$ в видимом и ИК-диапазоне и удельное сопротивление порядка $10^{-2} - 10^{-4}$ Ом·см, для применения в фотовольтаических приборах в качестве прозрачного проводящего контакта. ZnO:Al имеет более высокую стабильность к водородной плазме по сравнению с другими прозрачными проводящими оксидами и, кроме того, может быть использован в качестве эффективного антиотражающего покрытия (коэффициент преломления ~ 1.89) [8]. Пленки ZnO:Al получают методами магнетронного испарения [9], электронно-лучевого напыления [10], химического и золь-гель осаждения [11–14]. Особый интерес представляет исследование возможностей получения ZnO:Al пленок с управляемыми физическими характеристиками, используя золь-гель осаждение [15–17]. Этот метод имеет ряд преимуществ для промышленного применения, обусловленных простотой технологического процесса осаждения покрытий большой площади, низкой стоимостью используемого оборудования и широким спектром применяемых реагентов.

В зависимости от условий осаждения пленки ZnO:Al, полученные золь-гель осаждением, имеют различную микроструктуру, определяющую их электрические и оптические параметры. Основной задачей является получение пленок ZnO с ориентацией [001] при низких температурах. Согласно опубликованным данным, основное влияние на ориентацию в направлении [001] при использовании золь-гель осаждения оказывает состав и концентрация растворителей, температура спекания и отжига [18,19].

Цель данного исследования состоит в выявлении зависимости структурных и оптических характеристик пленок ZnO:Al от режимов осаждения золь-гель методом и выбор оптимальных условий формирования ZnO:Al высокого кристаллического качества.

2. Методика эксперимента

2.1. Нанесение покрытий

Осаждение ZnO:Al покрытий осуществлялось нанесением золь методом центрифугирования (spin-coating). Для приготовления пленкообразующего раствора требовалось количество ацетата цинка и нитрата алюминия заливали абсолютным изопропиловым спиртом (диметилформамидом, либо 2-метоксиэтанолом в зависимости от вида золь) и перемешивали в ультразвуковой ванне в течение 30 мин до получения гомогенного раствора. Для созревания раствор выдерживали при температуре окружающей среды (22 ± 2)°C в течение 2–3 дней. В качестве катализатора использовался моноэталамин, уменьшающий срок созревания растворов до двух дней и обеспечивающий их стабильность в течение месяца. После нанесения затравочного слоя золь толщиной ~ 50 нм на подложки из стекла и монокристаллического кремния

[¶] E-mail: ezaret@ifftp.bas-net.by

их помещали в термостат и нагревали с интервалом 20°C до температуры 350°C в течение 10 мин. Процесс нанесения и сушки повторялся до получения необходимой толщины покрытия. Общая толщина пленок ZnO:Al после цикла нанесения, рассчитанная по данным растровой электронной микроскопии, составляла ~ 330 нм. На заключительной стадии процесса подложки с нанесенным покрытием подвергались отжигу с поэтапным (шаг 20°C) нагреванием до 550°C .

2.2. Методы исследования

Фазовый состав и кристаллическая структура осажденных слоев исследовались методом рентгеновского фазового анализа (РФА) с использованием дифрактометра D8 Advance (Bruker AXS) на $\text{CuK}\alpha$ излучении ($\lambda = 0.1542$ нм) и фильтрованным многослойным Ni/графитовым монохроматором при напряжении на трубке 40 кВ и токе 40 мА. Рентгенограммы измеряли при скользящем падении (GIXRD) в режиме сканирования с шагом 0.04° (в масштабе 2θ) и временем счета 5 с. Угол падения первичного пучка составил $\omega = 0.5^\circ$. Для регулировки дифрактометра использовался сертифицированный стандарт SRM 606 (LaB6 порошок) от NIST (National Institute of Standards and Technology, США). Идентификация фаз осуществлялась сравнением экспериментально установленных межплоскостных расстояний d с данными JCPDS (Joint Council for Powder Diffraction Standards, 2013). Микроструктурные характеристики пленок исследовались методом электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе H-800 (Hitachi, Япония) с разрешением 0.2 нм. Элементный состав материала пленок определялся с помощью энергодисперсионного микрорентгеновского анализатора „INCA 350“ фирмы „Oxford Instruments“ (Великобритания) с разрешением 1 мкм^3 и чувствительностью 0.1 ат.%.

Топография поверхности слоев ZnO:Al исследовалась с помощью высокоразрешающего атомно-силового микроскопа (АСМ) SOLVER Pro 47 (производство фирмы „NT-MDT“). Спектры пропускания пленок ZnO исследовались в диапазоне длин волн 0.19–3.00 мкм на спектрофотометре Cary-500 Scan (UV-Vis-NiR Spectrometer, Varian, США).

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) регистрировались на спектрометре Nanofinder High End. В качестве источника возбуждения использовался твердотельный лазер с длиной волны 473 нм. Все измерения проводились при $T = 293$ К в геометрии обратного рассеяния в спектральном диапазоне от 150 до 3000 см^{-1} .

3. Экспериментальные результаты

3.1. Структурные свойства ZnO:Al слоев, полученных в различных реагентах

Полученные во всех типах растворителей ZnO:Al покрытия различной толщины (150–330 нм) обладали

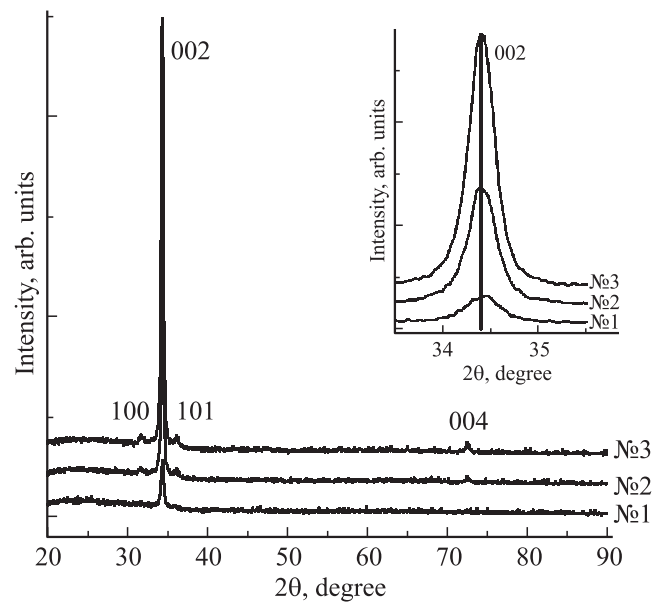


Рис. 1. Рентгенограммы ZnO:Al покрытий, полученных золь-гель осаждением из растворов на основе: № 1 — 2-метоксизэтанола, № 2 — диметилформамида, № 3 — изопропилового спирта.

высокой адгезией к подложкам из стекла и кремния, были физически стабильными и не отслаивались при нагревании свыше 550°C .

Согласно данным РФА ZnO:Al пленки являются поликристаллическими, однофазными и имеют гексагональную структуру вюрцита (рис. 1). На дифрактограммах ZnO:Al слоев проявляется доминирующий рефлекс от плоскости (002) ZnO при 34.37° , рефлексы незначительной интенсивности от плоскостей (100), (101) и рефлекс (004) при 72.62° от плоскости (002) 2-го порядка отражения. Угловое положение пиков согласуется с JCPDS-данными для номинально чистого оксида цинка (JCPDS, № 36-1451). Независимо от типа исходных реагентов, используемых для осаждения пленок ZnO:Al, посторонние фазы, такие как Al, Al_2O_3 , в пленках не выявлены. Это указывает на то, что Al^{3+} ионы, замещающие ионы цинка Zn^{2+} , не нарушают гексагональную структуру вюрцита ZnO.

Существенным фактором, влияющим на структурное упорядочение слоев, является выбор реагентов. Пленки ZnO:Al, полученные осаждением из ацетата цинка и нитрата алюминия в растворе диметилформамида (серия № 1), не имеют выраженной текстуры. Дифрактограммы этих слоев характеризуются очень низкой интенсивностью рефлекса (002) и большим значением его полуширины ($\text{FWHM} = 0.42^\circ$), что свидетельствует о малом размере зерен пленкообразующих покрытий (см. вставку на рис. 1).

Пленки ZnO:Al, полученные осаждением из ацетата цинка и нитрата алюминия в растворе — метоксизэтанола и моноэталамина (серия № 2), имеют более высокую интенсивность рефлекса (002) и меньшее значение

полуширины ($\text{FWHM} = 0.36^\circ$). Наиболее выраженной текстурой в направлении [001] характеризуются пленки ZnO:Al, полученные осаждением из ацетата цинка и нитрата алюминия в растворе изопропилового спирта и моноэтаноламина (серия № 3). Полуширина рефлекса (002) этих слоев снижается до 0.21° (см. вставку на рис. 1), а фактор преимущественной ориентации в направлении [001], рассчитанный из соотношения $I_{[001]} = I_{(002)} / (I_{(100)} + I_{(101)} + I_{(110)})$ возрастает от 2.07 (серия № 2) до 5.05, что является показателем улучшения структуры и увеличения размеров зерен.

Результаты исследования спектров КРС полученных покрытий хорошо согласуется с данными РФА. Согласно теории групп в ZnO, кристаллизующемся в гексагональной структуре вюрцита с пространственной симметрией C_{6v} , существует набор фононных мод: $1A_1(\text{TO}) + 1A_1(\text{LO}) + 2B_1 + 1E_1(\text{TO}) + 1E_1(\text{LO}) + 2E_2$ [20]. Среди них две моды симметрии B_1 не являются активными в спектрах КРС [21]. Фононные моды в ZnO наблюдаются на следующих частотах: $E_{2(\text{low})} = 101 \text{ см}^{-1}$, $E_{2(\text{high})} = 437 \text{ см}^{-1}$, $A_1(\text{TO}) = 380 \text{ см}^{-1}$, $A_1(\text{LO}) = 574 \text{ см}^{-1}$, $E_1(\text{TO}) = 407 \text{ см}^{-1}$ и $E_1(\text{LO}) = 583 \text{ см}^{-1}$. При падении луча строго нормально к поверхности ZnO слоя должны наблюдаться только колебания $A_1(\text{LO})$, $E_{2(\text{low})}$ и $E_{2(\text{high})}$, тогда как другие моды запрещены согласно правилам отбора. Известно, что интенсивность и частотное положение моды $E_{2(\text{high})}$ в значительной степени зависит от напряжений кристаллической решетки ZnO [22]. С другой стороны, исследование спектральных характеристик колебания $A_1(\text{LO})$ предоставляет возможность получить информацию не только о химическом составе полученных покрытий ZnO:Al, но и наличии посторонних фаз и областей с локальной упорядоченностью кристаллической решетки.

В соответствии с данными работы [20] все полосы, наблюдаемые на спектрах КРС полученных покрытий (рис. 2), могут быть отнесены к рассеянию на фонах оксида цинка. В спектрах КРС всех исследованных пленок ZnO:Al (серии № 1–3) наблюдаются высокочастотная мода $E_{2(\text{high})}$ в диапазоне $427\text{--}439 \text{ см}^{-1}$ и мода $A_1(\text{LO})$ в диапазоне $575\text{--}582 \text{ см}^{-1}$. Мода на частоте 330 см^{-1} является колебанием 2-го порядка и обусловлена в основном колебаниями атомов Zn [23]. Разрешенные $E_{2(\text{high})}$ и $A_1(\text{LO})$ моды связаны с колебаниями атомов кислорода в совершенном кристалле ZnO и локальными колебаниями собственных дефектов решетки, таких как вакансии кислорода, катионы в междоузлиях [23].

Спектральное положение, интенсивность и полуширина (FWHM) колебаний $E_{2(\text{high})}$ и $A_1(\text{LO})$ существенно различаются для ZnO:Al покрытий, полученных в различных реагентах. По отношению к стандарту ZnO наблюдаемые для образцов серий № 1–2 моды $E_{2(\text{high})}$ и $A_1(\text{LO})$ смещены в низкочастотную область. Значительный красный сдвиг ($\Delta\omega \approx 8 \text{ см}^{-1}$) моды $E_{2(\text{high})}$ связан с разупорядочением кристаллической решетки,

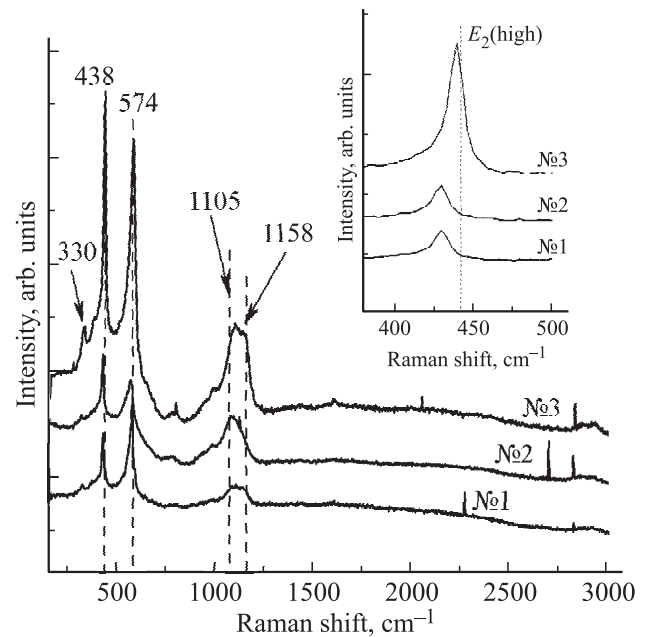


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния света ZnO:Al покрытий, полученных золь-гель осаждением из растворов на основе: № 1 — 2-метоксиэтанола, № 2 — диметилформамида, № 3 — изопропилового спирта.

неоднородным распределением примеси Al и указывает на наличие в этих покрытиях напряжений сжатия [24].

С улучшением кристаллического качества покрытий ZnO:Al моды $E_{2(\text{high})}$ и $A_1(\text{LO})$ сдвигаются в высокочастотную область. Одновременно возрастает интенсивность этих колебаний и уменьшается их полуширина (для моды $E_{2(\text{high})}$ до 8 см^{-1} , для моды $A_1(\text{LO})$ до 10 см^{-1}). Полоса колебания $E_{2(\text{high})}$ на спектрах КРС пленок ZnO:Al серии № 3 является симметричной (см. вставку на рис. 2), что указывает на процесс упорядочения кристаллической решетки [22]. Для серии покрытий ZnO:Al, полученных в растворе изопропилового спирта и моноэтаноламина (№ 3), положение колебаний $E_{2(\text{high})}$ и $A_1(\text{LO})$ смещается к стандарту ZnO. Это означает, что покрытия этой серии практически не имеют напряжений.

Тот факт, что мода $E_{2(\text{high})}$, обусловленная колебаниями атомов кислорода в кристаллической решетке ZnO, подвержена большему воздействию условий получения, чем мода $E_{2(\text{low})}$, приписываемая колебаниям подрешетки Zn, предполагает, что дефекты в подрешетке кислорода являются доминирующими. Увеличение интенсивности моды $E_{2(\text{high})}$ с улучшением кристаллического качества покрытий указывает на упорядочение анионной подрешетки кислорода в сформированных слоях при оптимальном выборе реагентов и условий осаждения.

Следует отметить, что мода $A_1(\text{LO})$ при 574 см^{-1} в спектрах КРС полученных покрытий является асимметричной (рис. 3, a). Согласно [25], асимметрия моды

$A_1(LO)$, наблюдаемая в легированных алюминием и галлием пленках ZnO, приписывается локальным разупорядочениям кристаллической решетки, создаваемым вакансиями кислорода и Zn в междоузлиях. Следовательно, можно заключить, что возрастание интенсивности колебания при 557 см^{-1} в спектрах КРС образцов серии № 3 обусловлено более высокой концентрацией алюминия Al^{3+} в этих слоях по сравнению с образцами серий № 1, 2.

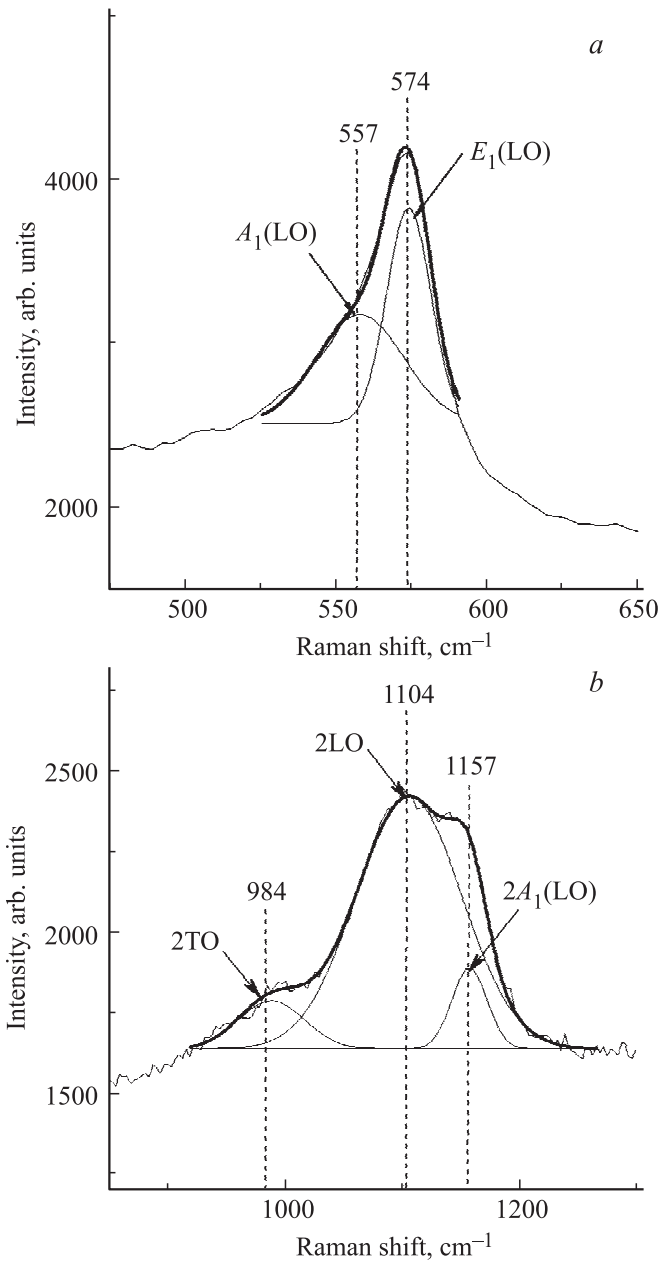


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния света ZnO:Al покрытий, полученных золь-гель осаждением из раствора на основе изопропилового спирта (серия № 3): *a* — гауссова аппроксимация фоновной моды $A_1(LO)$; *b* — гауссова аппроксимация фоновной моды 2LO.

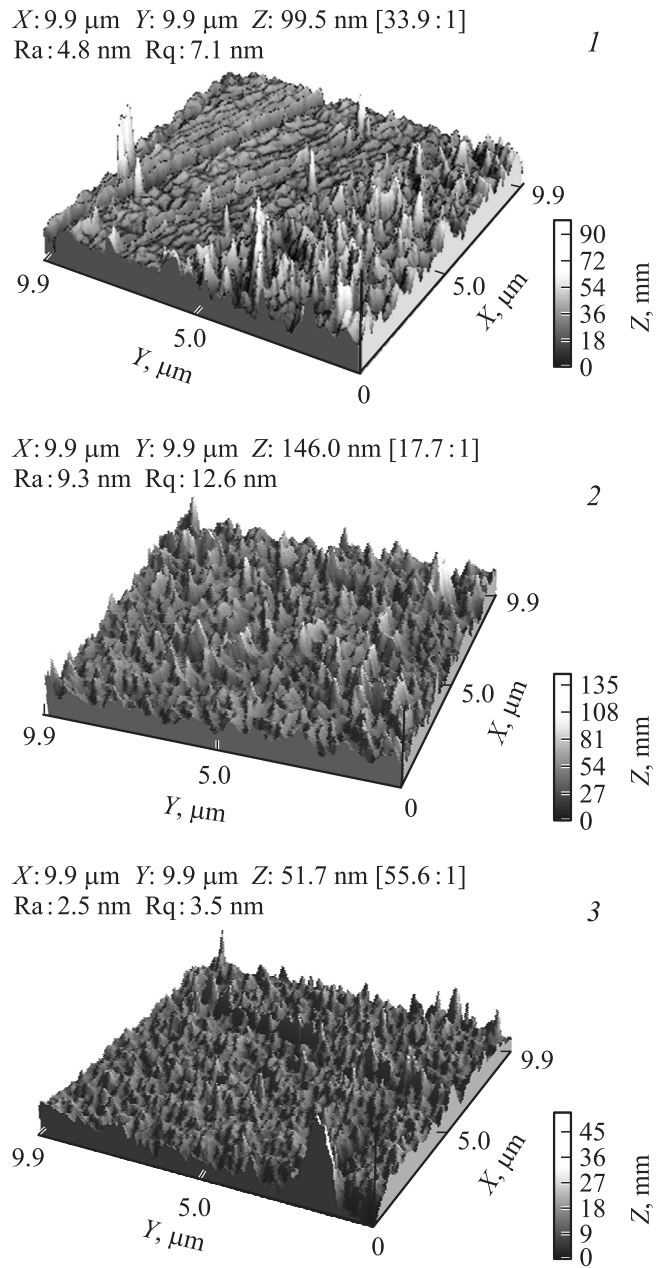


Рис. 4. АСМ изображения ZnO:Al покрытий, полученных золь-гель осаждением из растворов на основе: № 1 — 2-метоксиэтанола, № 2 — диметилформамида, № 3 — изопропилового спирта.

С другой стороны, в высокочастотной области спектров КРС (в области частот 1154 см^{-1}) наблюдается широкий асимметричный пик, соответствующий суперпозиции мод LO и содержащий вклад от мод 2-го порядка $2E_1(LO)$ при 1104 см^{-1} и $2A_1(LO)$ при 1157 см^{-1} в точке Γ зоны Бриллюэна (рис. 3, *b*) [22]. Упорядочение кристаллической структуры покрытий сопровождается увеличением интенсивности $2A_1(LO)$ и $2E_1(LO)$ мод и их сдвигом в высокочастотную область до 1140 см^{-1} для образцов серии № 1, 2 и до 1154 см^{-1} для образцов

серии № 3. Спектры КРС покрытий ZnO:Al с высокой преимущественной ориентацией в направлении [001] (серия № 3) характеризуются четким разрешением мод $2A_1(LO)$ и $2E_1(LO)$.

Следует отметить, что в колебательных спектрах всех полученных покрытий ZnO:Al проявляются только линии, соответствующие фундаментальным колебаниям основного соединения ZnO со структурой вюрцита. Каких-либо дополнительных колебаний, связанных с наличием фаз с другим типом симметрии, не проявляется. Это свидетельствует об отсутствии локальных структурных образований и хаотическом распределении дефектов.

Данные РФА и спектроскопии КРС хорошо согласуются с исследованием морфологии поверхности полученных покрытий методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для сравнения топографии пленок ZnO:Al, осажденных на подложки монокристаллического кремния с использованием различных растворителей, были выбраны участки поверхности с площадью 98.287 мкм^2 . Как видно из приведенных АСМ-изображений (рис. 4), покрытия, полученные во всех типах реагентов, являются сплошными, без видимых пор и проколов и сформированы пирамидальными кристаллитами с одинаковым направлением роста, перпендикулярным подложке. Наименьшей шероховатостью поверхности характеризуются слои ZnO:Al, полученные с применением в качестве растворителя изопропилового спирта (шероховатость 4.3 нм, средний размер зерна 19.3 нм). Использование метоксиэтанола и демитилформамида в качестве растворителей не оказывает существенного влияния на топографию поверхности ZnO:Al, но более „гладкими“ являются слои, полученные в растворе демитилформамида (шероховатость 6.5 нм).

3.2. Влияние отжига на свойства ZnO:Al слоев

Проведение рекристаллизации ZnO:Al слоев, полученных в растворе изопропилового спирта и моноэтаноламина ($\text{HO}-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{NH}_2$) (серия № 3), в температурном интервале от 350 до 600°C выявляет улучшение структуры с повышением температуры отжига (рис. 5). На вставке рис. 5 приведено изменение полуширины рефлекса (002) в зависимости от температуры рекристаллизации. С увеличением температуры отжига от 350 до 500°C полуширина рефлекса (002) уменьшается от 0.4° до 0.16°, а фактор преимущественной ориентации $I_{[001]}$ этих слоев в направлении [001] возрастает от 0.49 до 1.37, что указывает на формирование слоя ZnO:Al с текстурой вдоль оси c гексагональной структуры. При повышении температуры отжига до 600°C наблюдается обратная тенденция — фактор преимущественной ориентации в направлении [001] снижается до 1.23. Размер зерна полученных покрытий, оцененный из полуширины рефлекса (002) по формуле Шерера $D \approx 0.9\lambda/\beta \cos \theta$ ($\lambda = 0.1542 \text{ нм}$, β — значение полуширины рефлекса в радианах), возрастает от 8.1

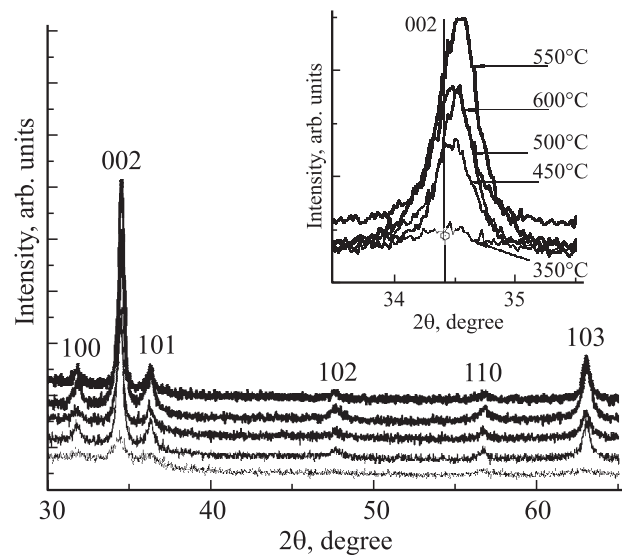


Рис. 5. Рентгенограммы ZnO:Al покрытий, полученных золь-гель осаждением из растворов на основе изопропилового спирта (№ 3), подвергнутых рекристаллизационному отжигу. На вставке приведен рефлекс от плоскости (002) в увеличенном масштабе.

до 21.0 нм при увеличении температуры отжига от 350 до 500°C и затем снижается до 16.5 нм при дальнейшем повышении температуры до 600°C. Наилучшей кристаллической структурой обладают образцы, отожженные при температурах 500–550°C. Параметры решетки осажденных ZnO:Al слоев (в пределах погрешности измерений) незначительно меньше номинально чистого оксида цинка:

— параметры решетки ZnO согласно JCPDS № 00-036-1451: $a = 3.24982 \text{ Å}$, $c = 5.20661 \text{ Å}$;

— усредненные параметры решетки осажденных ZnO:Al слоев: $a = 3.231(69) \text{ Å}$, $c = 5.185(39) \text{ Å}$.

Введение легирующей примеси Al в ZnO осуществляется как замещением ионами Al^{3+} ионов Zn^{2+} в решетке ZnO, так и формированием межузельных Al дефектов. Поскольку ионный радиус Al^{3+} (0.53 Å) меньше, чем у Zn^{2+} (0.74 Å), замещение $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Zn}^{2+}$ должно приводить к уменьшению параметров решетки. С другой стороны, предполагается, что межузельные дефекты Al должны увеличивать параметры решетки. Наблюдаемое уменьшение параметров решетки легированных ZnO:Al слоев объясняется увеличением концентрации алюминия при увеличении температуры отжига с доминирующим механизмом статистического замещения $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Zn}^{2+}$. Исследование элементного состава ZnO:Al пленок показало, что содержание алюминия в этих слоях составляет примерно 0.4%.

Все полученные ZnO:Al слои имеют коэффициент оптического пропускания свыше 80% в видимой области спектра (рис. 6). Однако ZnO:Al слои, отожженные при температурах рекристаллизации свыше 500°C, характеризуются увеличением пропускания до 95% в спек-

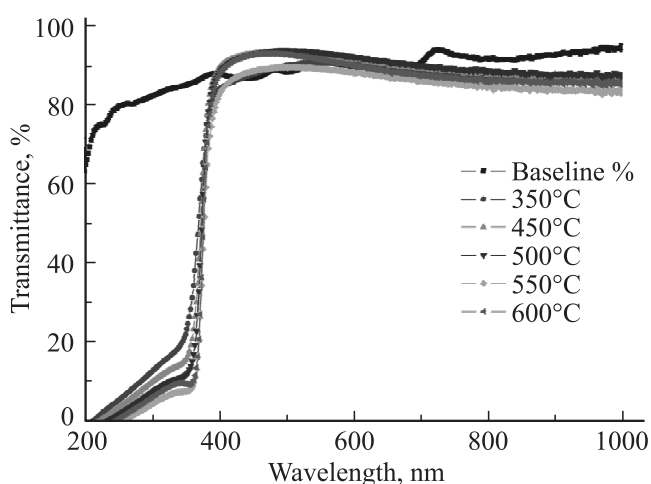


Рис. 6. Спектры оптического поглощения ZnO:Al покрытий, полученных золь-гель осаждением из растворов на основе изопропилового спирта (серия № 3), подвергнутых рекристаллизации при температурах 350, 450, 500, 550 и 600°C.

тральной области 400–800 нм, а также более резким краем поглощения в области 380 нм, что очень близко к значению собственной ширины запрещенной зоны ZnO (3.2 эВ).

Из приведенных данных следует, что наиболее целесообразным температурным режимом отжига является интервал от 450 до 500°C, что значительно ниже приводимых в литературе значений 500–800°C [19].

4. Заключение

В результате проведенных исследований отработаны режимы нанесения золь-гель методом однофазных поликристаллических пленок ZnO:Al со структурой вюрцита с использованием растворителей различного типа. Исследование структурно-морфологических характеристик показывает, что оптимальным реагентом для получения ZnO:Al слоев с высокой преимущественной ориентацией в направлении [001] и наименьшей шероховатостью поверхности (4.3 нм) является изопропиловый спирт. Из анализа спектров комбинационного рассеяния света всех исследуемых покрытий выявлено, что ZnO:Al слои характеризуются отсутствием локальных структурных образований и хаотическим распределением дефектов. ZnO:Al слои, полученные при оптимальном выборе условий осаждения, имеют более высокую степень упорядочения анионной подрешетки. Показано, что рекристаллизация ZnO:Al слоев при температуре отжига 450–550°C позволяет получить покрытия высокого структурного качества с коэффициентом оптического пропускания до 95% в спектральной области 400–800 нм, пригодные для применения в приборах оптоэлектроники.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Т14-АРМ).

Список литературы

- [1] S. Iwatsubo. *Vacuum*, **80**, 708 (2006).
- [2] S. Calnan, A. Tiwari. *Thin Sol. Films*, **518**, 1839 (2010).
- [3] P. Görrn, T. Rabe, T. Riedl, W. Kowalsky, F. Galbrecht, U. Scherf. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 161 113 (2006).
- [4] C.H. Ahn, H. Kim, H.K. Cho. *Thin Sol. Films*, **519**, 747 (2010).
- [5] T. Tynell, H. Yamauchi, M. Karppinen, R. Okazaki, I. Terasaki. *J. Vac. Sci. Technol.*, A **31**, 01A109 (2013).
- [6] M. Snure, A. Tiwari. *J. Appl. Phys.*, **101**, 124912 (2007).
- [7] C.H. Ahn, J.H. Kim, H.K. Cho. *J. Electrochem. Soc.*, **159**, H384 (2012).
- [8] D.-W. Kang, J.-Y. Kwon, J. Shim, H.-M. Lee, M.-K. Han. *Sol. Energy Mater. Solar Cells*, **101**, 308 (2012).
- [9] Weifeng Yang, Zhengyun Wu, Zhuguang Liu, Aisuo Pang, Yu-Li Tu, Zhe Chuan Feng. *Thin Sol. Films*, **519**, 31 (2010).
- [10] Shan Peng Cao, Fei Ye, Bo Hou, Ai Yan Xu. *Thin Sol. Films*, **545**, 205 (2013).
- [11] Y.Y. Chen, J.R. Yang, S.L. Cheng, M. Shiojiri. *Thin Sol. Films*, **545**, 183 (2013).
- [12] C. Weigand, R. Crisp, C. Ladam, T. Furtak, R. Collins, J. Grepstad, H. Weman. *Thin Sol. Films*, **545**, 124 (2013).
- [13] I. Volintiru, M. Creatore, B.J. Kniknie, C.I.M.A. Spee, M.C.M. van de Sanden. *J. Appl. Phys.*, **102**, 043 709 (2007).
- [14] Verma, F. Khan, D. Kumar, M. Kar, B.C. Chakravarty, S.N. Singh, M. Husain. *Thin Sol. Films*, **518**, 2649 (2010).
- [15] A.M.P. Santos, E.J.P. Santos. *Thin Sol. Films*, **516**, 6210 (2008).
- [16] K.S. Hwang, B.A. Kang, J.H. Jeong, Y.S. Jeon, B.H. Kim. *Current Appl. Phys.*, **7**, 421 (2007).
- [17] D. Guo, K. Sato, S. Hibino, T. Takeuchi, H. Bessho, K. Kato. *Thin Sol. Films*, **550**, 250 (2014).
- [18] H. Segawa, H. Sakurai, R. Izumi, T. Hayashi, T. Yano, S. Shibata. *J. Mater. Sci.*, **46**, 3537 (2011).
- [19] M. Ohyaama, H. Kosuka, T. Yoko. *Thin Sol. Films*, **306**, 78 (1997).
- [20] T. Damen, S. Porto, B. Tell. *Phys. Rev.*, **142**, 570 (1966).
- [21] C.A. Arguello, D.L. Rousseau. *S.P.S. Porto. Phys. Rev.*, **181**, 1351 (1969).
- [22] R. Cuscó, E. Alarcón-Lladó, J. Ibáñez, L. Artús, J. Jiménez, B. Wang, M.J. Callahan. *Phys. Rev. B* **75**, 165 202 (2007).
- [23] J. Serrano, F.J. Manjon, A.H. Romero, F. Widulle, R. Lauck, M. Cardona. *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 055 510 (2003).
- [24] Yanqiu Huang, Meidong Liu, Zhen Li, Yike Zeng, Shaobo Liu. *Mater. Sci. Engin. B*, **97**, 111 (2003).
- [25] Israel Lorite, Laura Villaseca, Pilar Díaz-Carrasco, Mercedes Gabás, José Luis Costa-Krämer. *Thin Sol. Films*, **548**, 657 (2013).

Редактор А.Н. Смирнов

Structural properties of ZnO:Al films obtained by sol-gel deposition

*E.P. Zaretskaya**, *V.F. Gremenok**, *A.V. Semchenko⁺*,
V.V. Sidsky⁺, *R.L. Juskenas[•]*

* State Scientific and Production Association
„Scientific-Practical Materials Research Centre
of the National Academy of Sciences of Belarus,
220072 Minsk, Belarus

+ Fracisk Skorina Gomel State University,
246019 Gomel, Belarus

• State Research Institute Center
for Physical Sciences and Technology
LT-01108 Vilnius, Lithuania

Abstract ZnO:Al thin films were obtained by sol-gel deposition using different reagents as the starting material at temperatures 350–550°C. The dependence of structural, morphological and optical properties of ZnO:Al coatings on the deposition conditions was investigated using atomic-force microscopy, X-ray diffraction, Raman spectroscopy and optical absorption measurements. Optimal regimes fabrication of high-oriented in [001] direction ZnO:Al thin films with low surface roughness were found. Obtained ZnO:Al films have optical transmittance up to 95% in a wide spectral region and can be used in optoelectronic devices.