

УДК 661.847.2; 621.315.592

**ВЛИЯНИЕ ИСХОДНЫХ НАНОСЛОЕВ ЦИНКА,
ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ,
НА СВОЙСТВА СИНТЕЗИРУЕМЫХ НА ИХ ОСНОВЕ
ТЕРМИЧЕСКИМ ОКИСЛЕНИЕМ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА**

© 2025 В. В. Томаев^{1, 4, *}, В. А. Полищук², Н. Б. Леонов³

¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 24-26/49

² Государственный университет морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова, 198035, Россия, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

³ Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии, 198504, Россия, Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский проспект, 26

*e-mail: tvaza@mail.ru

Поступила в редакцию 11.11.2024

После доработки 09.01.2025

Принята к публикации 27.02.2025

Изучены морфология, особенности структуры и оптические свойства пленок оксида цинка различной толщины, синтезированных посредством термического окисления в атмосфере воздуха поликристаллических слоев цинка толщиной 10, 20, 40, 50, 60, 80 нм, полученных методом магнетронного напыления на стеклянных подложках. Проанализировано влияние толщины исходных слоев и размеров кристаллов цинка на характеристики кристаллической структуры и свойства получаемых пленок оксида цинка, а также закономерности приближения его оптической ширины запрещенной зоны и параметров кристаллической решетки к значениям для объемных кристаллов ZnO с увеличением толщины пленки.

Ключевые слова: цинк, оксид цинка, магнетронное напыление, термическое окисление в атмосфере воздуха, тонкие пленки, параметры кристаллической решетки, оптическая ширина запрещенной зоны

DOI: 10.31857/S0132665125010139, **EDN:** EBDCUD

ВВЕДЕНИЕ

Оксид цинка (ZnO), являясь широкозонным полупроводником ($E_g = 3.37\text{--}3.40$ эВ) и имея энергию связи экситона 60 мэВ при комнатной температуре [1], обладает уникальными оптическими и электрофизическими свойствами, которые подтверждаются в работах как фундаментального [2–5], так и прикладного характера [6, 7].

Высокая химическая инертность и устойчивость оксида цинка к атмосферному воздействию позволяют успешно использовать его в качестве прозрачных

проводящих покрытий в видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра, электрических контактов, буферных слоев для тонкопленочных солнечных элементов, устройств отображения информации и др. [8, 9] и ряда других перспективных применений, что нашло отражение в ряде недавних исследований [6, 10, 11].

В отличие от других полупроводников (например, GaN и ZnSe, имеющих энергию связи экситона 25 и 20 мэВ соответственно), эффективное экситонное излучение в ZnO обеспечивается даже при температурах выше комнатной [12–16].

В настоящее время микро- и наноструктуры оксида цинка различной морфологии получают с использованием ряда методов, к числу которых относятся химическое осаждение из газовой фазы [17], магнетронное распыление [18], термическое напыление [19], выращивание из водного раствора [20], электролитическое осаждение [21], металлоорганический синтез из газовой фазы [22], молекулярно-лучевая эпитаксия [23], золь-гель-синтез [24], импульсная лазерная абляция [25] и др. Анализ показывает, что все перечисленные методы дают большой разброс по основным свойствам в получаемых наноструктурах ZnO, связанный, в первую очередь, с различными условиями синтеза.

Тонкие металлические и полупроводниковые пленки отличаются широким разнообразием структурных характеристик [26]. Регулируя условия осаждения и последующей обработки, структура образующихся пленок может изменяться от предельно неупорядоченного мелкодисперсного аморфного конденсата до монокристаллического состояния. Явления изменения кристаллической решетки под влиянием поверхностного давления, перехода пленок из аморфного в кристаллическое состояние и зависимости температуры фазовых переходов от размера кристаллитов описываются на основе представлений о фазовом размерном эффекте [27]. Кроме того, ограничение размера кристаллитов приводит к появлению особых электрических свойств, связанных с классическим и квантовым размерными эффектами [28]. Изучение этих эффектов позволяет получить информацию о свойствах электронов проводимости и их поведении в образцах ограниченных размеров, что, в свою очередь, можно использовать для исследования состояния поверхности тонкопленочных металлических и полупроводниковых пленок.

Учитывая это, отметим, что до сих пор остается нерешенным ряд вопросов как в отношении разработки технологий изготовления пленок с заданными и воспроизводимыми свойствами, так и в области понимания процессов, происходящих в структуре ZnO под влиянием различных факторов.

Поскольку пленки ZnO могут быть получены на подложках различной природы, свойства пленок могут в значительной степени зависеть от материала подложки, качества поверхности, температуры синтеза, наличия дефектов и т. д.

Целью работы является исследование морфологии, структуры и оптических свойств тонких пленок ZnO, получаемых методом магнетронного напыления слоев цинка различной толщины с последующим термическим нагревом в атмосфере воздуха.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходные пленки Zn наносились на стеклянные покровные стекла толщиной 200 нм и площадью 20×20 мм методом магнетронного напыления на установке Q150TS/E/ES (Quorum Technologies, Lewes, Великобритания) при постоянном давлении аргона Ar, равном $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.

В качестве источника атомов при напылении использовалась мишень из Zn (99.99%) диаметром 57 мм и толщиной 0.5 мм. Расстояние между мишенью и подложкой, которая закреплена на вращающемся с постоянной скоростью столике составляет 5 см. Перед напылением поверхность мишени защищали металлической шторкой, а поверхность подложки подвергали плазменной очистке. Толщину пленки измеряли встроенным измерителем, который расположен максимально близко к поверхности подложки. Пары металлического цинка во время напыления осаждаются одновременно как на поверхность измерителя, так и на поверхность подложки. Регистрируемая при этом толщина пленки на подложке $h_{\text{эф}}$ (эффективная толщина пленки – высота, которую имела бы пленка, если бы весь напыляемый металл был равномерно распределен на всей поверхности измерителя) определялась по формуле

$$h_{\text{эф}} = m/dS, \quad (1)$$

где m – масса осажденного металла, d – плотность материала металла, S – площадь, занимаемая пленкой на поверхности измерителя.

Фактически определяли значение изменения массы вещества на всей поверхности при напылении (равное массе осажденного металла m), а далее по формуле (1) рассчитывали значение эффективной толщины пленки $h_{\text{эф}}$.

В процессе напыления задавались либо толщина напыления, либо время напыления.

На следующем этапе с целью полного окисления пленки цинка [29] проводили термообработку в программируемой муфельной печи Snol 12/1200 LSC01 в атмосфере воздуха при 360 °C в течение 30 мин.

МОРФОЛОГИЯ ПЛЕНОК ZN И ZNO

С помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Zeiss Merlin получены изображения поверхности исходных тонких пленок (рис. 1а–в) с толщиной 10, 60, 80 нм соответственно и окисленных в атмосфере воздуха при 360 °C в течение 30 мин пленок Zn (рис. 2а–в) с толщиной исходных пленок Zn 10, 60, 80 нм соответственно.

Для более правильного восприятия всех СЭМ-изображений, представленных на рис. 1 и 2, площади сканирования (600 × 600 нм) и кратность увеличения (масштаб линейки – 100 нм) приведены для всех рассматриваемых пленок к одинаковым значениям (нормированы).

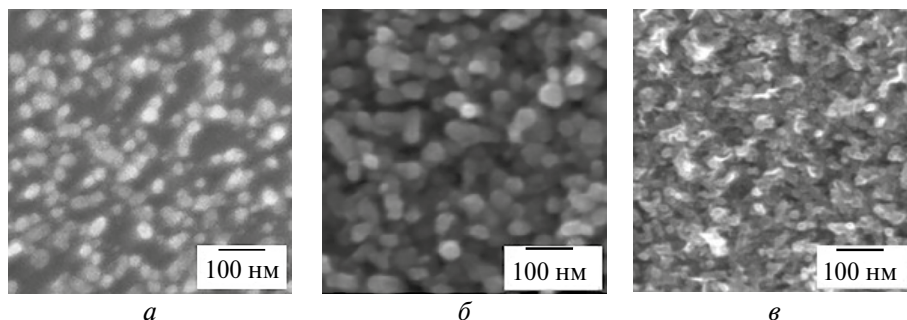


Рис. 1. Форма и распределение частиц для исходных пленок Zn на площади 600 × 600 нм по данным СЭМ при толщине слоя 10 (а), 60 (б) и 80 (в) нм.

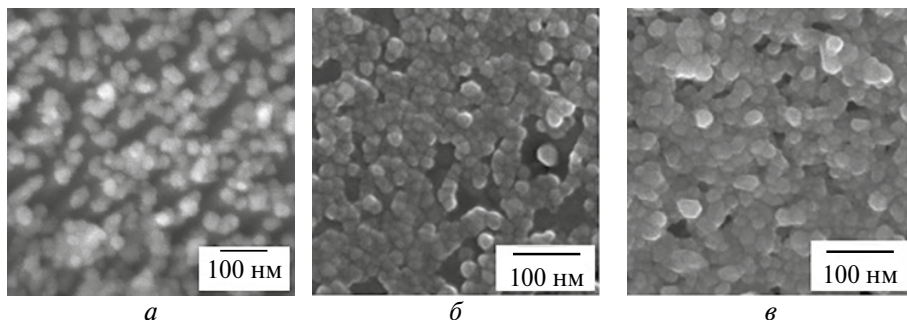


Рис. 2. Форма и распределение частиц для окисленных пленок ZnO на площади 600×600 нм по данным СЭМ при толщине исходного слоя Zn 10 (а), 60 (б) и 80 (в) нм.

Оценка размера кристаллов пленок Zn. Из рис. 1а–в следует, что с увеличением толщины пленок 10, 60, 80 нм, размер кристаллов увеличивается и составляет соответственно величины: ~ 10 –13, ~ 19 –23, ~ 26 –30 нм.

На рис. 1 можно также заметить, что увеличение толщины пленки способствует увеличению плотности покрытия поверхности пленки кристаллами Zn, то есть с увеличением толщины пленки сплошность покрытия поверхности частицами цинка увеличивается.

На рис. 2 можно заметить, что увеличение толщины пленки ZnO способствует увеличению плотности покрытия поверхности пленки кристаллами ZnO.

Оценка размера кристаллов пленок ZnO. Из рис. 2а–в следует, что с увеличением толщины окисленных в атмосфере воздуха при 360°C в течение 30 мин (которые были сформированы из исходных пленок Zn с толщиной соответственно 10, 60, 80 нм) размер кристаллов увеличивается и составляет соответственно ~ 17 –21, ~ 27 –33, ~ 35 –45 нм.

Из общих соображений можно предположить, что если окисление пленки цинка в результате термического воздействия в атмосфере воздуха при 360°C в течение 30 мин полное, то оно должно приводить к превращению слоя Zn в двухфазное соединение ZnO, в котором соотношение атомов цинка и кислорода в процентном отношении должно составлять 50:50. Тогда, в процессе окисления пленки цинка, с учетом прибавки эквивалентного количества атомов кислорода в общий объем пленки цинка, объем вновь образованной элементарной ячейки ZnO и, соответственно, толщина вновь образованной пленки ZnO должны увеличиться. Эти же наблюдения можно отнести к процессам, связанным с динамикой изменения размеров исходных частиц Zn и окисленных частиц ZnO на поверхности и в объеме исследуемых пленок.

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Спектры пропускания и поглощения пленок оксида цинка толщиной 10, 20, 40, 50, 60, 80 нм измеряли с использованием спектрофотометра СФ-56 (ЛОМО, Санкт-Петербург) относительно канала сравнения, в который помещали стекло. Результаты этих измерений представлены на рис. 3.

На полученных спектрах можно выделить два основных участка, соответствующие фундаментальному (250–400 нм) и слабому (400–600 нм) поглощению. В целом характер наблюдаемых спектров пропускания можно объяснить постепенным изменением толщины пленок ZnO и соответствующим изменением морфологии поверхности.

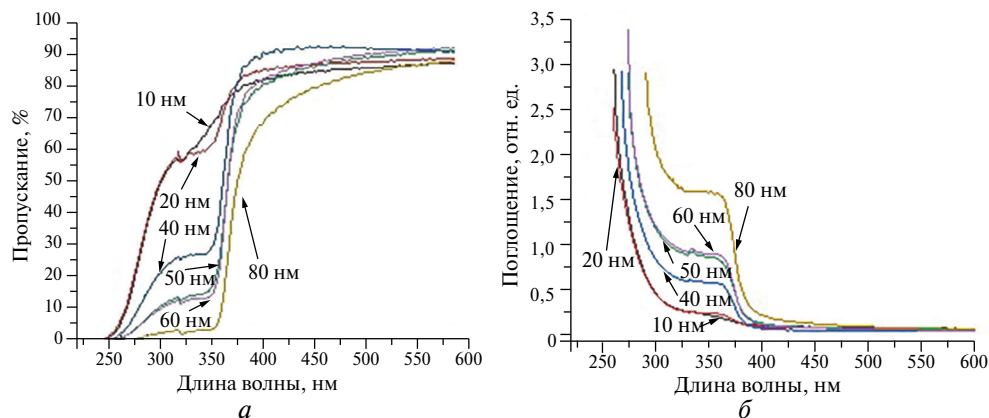


Рис. 3. Спектры пропускания (а) и поглощения (б) слоев ZnO при толщине исходных слоев Zn 10–80 нм.

На спектрах пропускания пленок ZnO (рис. 3а) в области слабого поглощения в видимой области спектра средний коэффициент пропускания T расположен в диапазоне 80–91%.

Из полученных результатов также следует, что край оптического пропускания в ультрафиолетовой области спектра для пленок ZnO с толщиной 10 и 20 нм составляет 275 нм, а для пленки толщиной 80 нм — 375 нм.

Для количественной оценки ширины запрещенной зоны E_g перейдем от спектров пропускания к спектрам поглощения. Оптическая плотность связана с коэффициентом пропускания выражением

$$D = \lg(100/T), \quad (1)$$

где T — коэффициент пропускания (выраженное в процентах отношение интенсивности I светового потока, прошедшего через вещество или материал, к интенсивности падающего потока I_0). Коэффициент поглощения $\alpha(\lambda)$ определяется как оптическая плотность, отнесенная к слою материала, и рассчитывался по уравнению [30]

$$\alpha = -\ln T/d, \quad (2)$$

где d — толщина исследуемой пленки.

Различный характер поведения спектров поглощения в исследуемых пленках можно объяснить различием в толщине оптического слоя.

Сравнительный анализ полученных спектров показывает, что с увеличением толщины пленок их поглощение закономерно возрастает, при этом в УФ-области (275–375 нм) толщина пленок оказывает значительно более сильное влияние на их светопропускание, чем в видимом диапазоне (400–600 нм). Это соответствует внутривозбуждениям в ZnO, которые должны быть сильнее выражены в ультрафиолетовой области спектра, и полностью согласуется с величиной E_g объемных кристаллов ZnO [1].

В области сильного поглощения, которая примыкает к ультрафиолетовой области спектра, для прямозонного полупроводника ZnO [30] оптическая ширина запрещенной зоны E_g связана с коэффициентом поглощения α уравнением Тауца [31, 32]

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2}, \quad (3)$$

где α — коэффициент поглощения, $h\nu$ — энергия падающего фотона; A — постоянная, зависящая от природы оптических переходов, E_g — ширина запрещенной зоны.

Зависимость выражения $(\alpha h\nu)^2$ от энергии фотонов $h\nu$ на основании уравнения Тауца в области сильного поглощения имеет линейный вид. Соответствующие зависимости для всех пленок ZnO в рассматриваемом диапазоне энергий представлены на рис. 4.

Оценка ширины запрещенной зоны E_g пленок. Для всех графиков, приведенных на рис. 4, экстраполяция касательных в областях сильного поглощения к оси абсцисс (где $\alpha = 0$) позволила определить значения энергетического зазора E_g . На рис. 5 приведены значения ширины запрещенной зоны E_g для толщин окисленных пленок ZnO, у которых толщина исходных пленок Zn составляла: 20, 40, 50, 60, 80 нм соответственно.

Видно, что в пределах точности эксперимента ширина запрещенной зоны практически не зависит от толщины исходной пленки в диапазоне от 80 до 40 нм и составляет 3.254–3.255 эВ, что близко к табличным значениям для объемного материала 3.30 эВ [1].

При уменьшении толщины пленки ZnO, у которой исходная пленка Zn составляла 20 нм, оценка по методу Тауца по данным, представленным на рис. 4, дает гораздо меньшее значение и составляет 3.230 эВ. Можно считать, что такая разница в оценке ширины запрещенной зоны для пленок, у которых исходная пленка Zn составляла меньше 40 нм, может быть связана с меньшей плотностью покрытия поверхности пленок, более высокой дефектностью, другими факторами.

Оценка ширины запрещенной зоны по методу Тауца для еще более тонких пленок ZnO, сформированных из исходных пленок Zn толщиной 10 нм, характеризуется нестабильными значениями, поэтому, на рис. 5 для обсуждения результатов она не приводилась.

Рентгенофазовый анализ. Анализ структуры и фазового состава всех пленок осуществлялся рентгеновским дифрактометром SmartLab 3 (Rigaku MiniFlex II). Материал анода — стандартная отпаянная рентгеновская трубка: $\text{CuK}\alpha_1$ ($\lambda = 0.154056$ нм). Зарегистрированные пики и основной из них (002) соответствуют пикам гексагонального ZnO [29–32].

На дифрактограммах пленок ZnO, представленных на рис. 6, в диапазоне углов 2θ 20–60° отчетливо наблюдается пик, соответствующий плоскости (002) гексагональной структуры вюрцита ZnO, который относится к пространственной группе

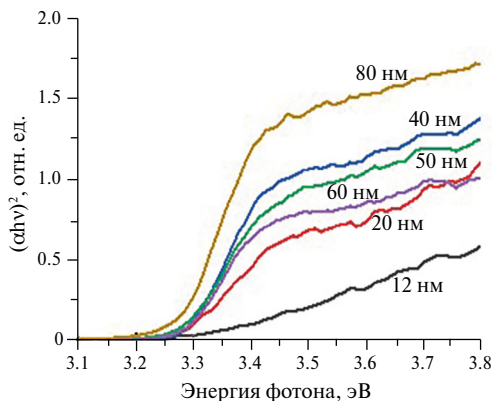


Рис. 4. Спектры пропускания пленок ZnO в координатах Тауца.

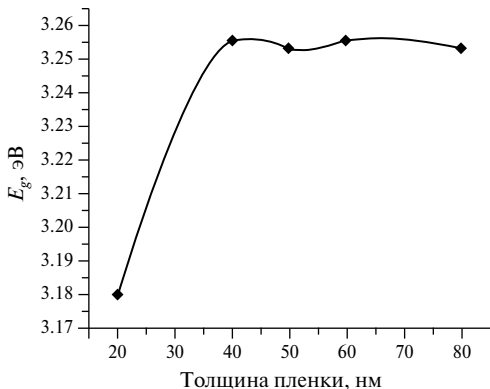


Рис. 5. Зависимость ширины запрещенной зоны E_g от толщины пленки ZnO.

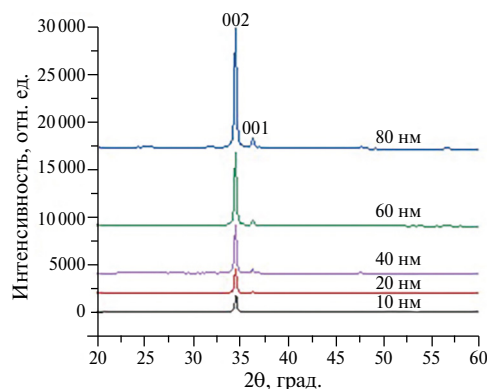


Рис. 6. Рентгенограммы пленок ZnO различной толщины.

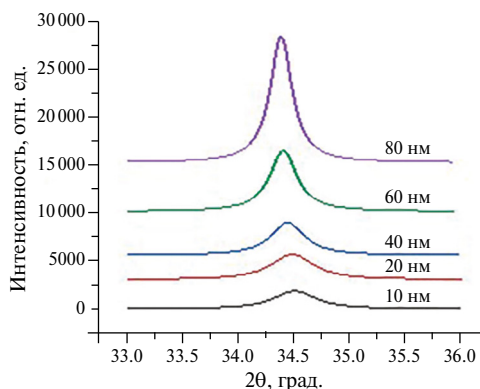


Рис. 7. Зависимость интенсивности дифракционного пика в плоскости (002) от толщины пленки.

$R_{63/\text{mmc}}$ и кристаллы которого имеют преимущественную ориентацию по оси, перпендикулярной подложке.

Зависимость интенсивности дифракционного пика в плоскости (002) от толщины пленки для пленок ZnO различной толщины в увеличенном масштабе приведена на рис. 7.

Можно заметить, что интенсивность в плоскости (002) дифракционного пика увеличивается с увеличением толщины пленок. При этом ширина пика может быть обусловлена размером кристаллов, а уширение — деформацией решетки.

ОЦЕНКА ПОЛОЖЕНИЯ МАКСИМУМА РЕНТГЕНОВСКОГО ПИКА (002) В ПЛЁНКАХ

Смещение максимума пика (002) в зависимости от толщины пленки ZnO проанализировано на рис. 8. Видно, что с увеличением толщины пленок положение брэгговского максимума 2θ , соответствующего плоскости (002), увеличивается от значений 34.51° , характерных для пленок толщиной 10 нм, до значений 34.38° , характерных для пленок толщиной 80 нм.

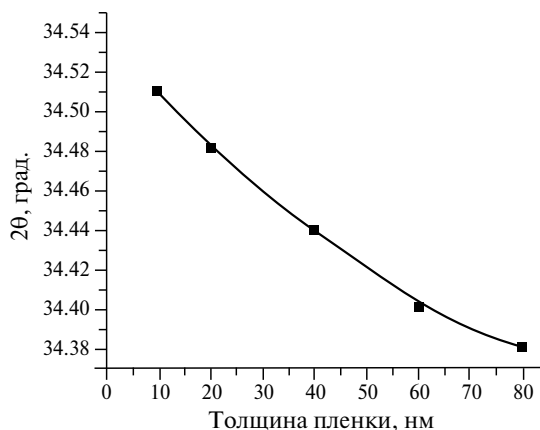


Рис. 8. Зависимость положения максимума пика (002) от толщины пленки ZnO.

Сопоставление полученных результатов с данными карточек PDF № 000-89-1397 и 000-89-7102, находящихся в базе данных ICDD PDF 2012 для кристаллов ZnO, показывает, что положения брэгговских максимумов 2θ , соответствующие плоскости (002) для более толстых пленок (40, 50, 60, 80 нм), достаточно близки по значениям с данными приведенных карточек и имеют значения соответственно 34.3778 и 34.4193°.

Оценка размера кристаллов D в пленках. Оценку среднего размера кристаллов D пленки ZnO от толщины можно осуществить, применив уравнение Шеррера [33, 34] к полной ширине пика (002) на половине высоты (FWHM) из графиков, представленных на рис. 7:

$$D = K\lambda / \beta \cos\theta, \quad (4)$$

где D – средний размер областей когерентного рассеяния кристаллов, который может быть меньше или равным размеру зерна; K – безразмерный коэффициент (в данном случае $K = 0,9$ на основании работы [35]); λ – длина волны рентгеновского излучения ($\lambda = 0.154056$ нм); β – ширина рефлекса на полувысоте (FWHM); θ – угол дифракции [брэгговский угол, в нашем случае для плоскости (002)].

На рис. 9 показаны рассчитанные по уравнению (4) оценки размеров кристаллов и FWHM от толщины пленки.

Видно, что величина FWHM дифракционных пиков в пленках ZnO уменьшается с ростом толщины пленки, соответственно, размер кристалла на пленке увеличивается.

Увеличение размеров кристаллов с 17 до 40 нм может быть связано с толщиной исходных пленок и продолжительностью процесса отжига.

Оценка напряжений ε в пленках. Ранее наблюдающиеся смещения максимума пика (002) в зависимости от толщины пленки ZnO можно использовать для оценки напряжений ε в структуре, которые могут возникать главным образом из-за несоответствия свойств пленки и подложки, толщины пленки, размера кристаллов ZnO и других характеристик.

Напряжения ε , как показано в работе [36], можно вычислить как отношение изменения экспериментального межплоскостного расстояния ($d_{\text{эксп}}$) относительно теоретического $d_{\text{теор}}$:

$$\varepsilon = (d_{\text{теор}} - d_{\text{эксп}}) / d_{\text{теор}}. \quad (5)$$

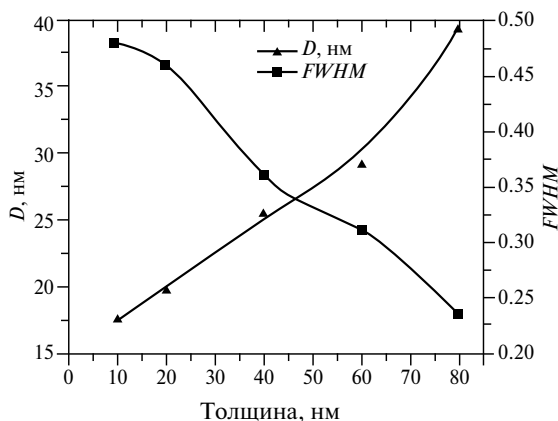


Рис. 9. Зависимость размера кристаллов и FWHM от толщины пленки.

Подставляя $d_{\text{теор}}$ из уравнения Вульфа–Брэгга $2d_{\text{теор}} \sin \theta_{\text{теор}} = \lambda$, можно получить выражение для напряжений ϵ , зная углы дифракции θ :

$$\epsilon = 1 - \sin \theta_{\text{теор}} / \sin \theta_{\text{эксп}} \quad (6)$$

Оценка гексагональных параметров a и c в пленках. Вариация толщины пленок ZnO может оказывать соответствующее влияние на константы a и c гексагональных элементарных ячеек. Располагая рентгеновскими спектрами пленок ZnO, параметры гексагональной решетки a и c можно вычислить с помощью уравнения [37]

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}, \quad (7)$$

где h, k и l известны как индексы Миллера.

В работе [37] также показано, что с помощью уравнения Вульфа–Брэгга константы a для плоскости (001) и c для плоскости (002) могут быть рассчитаны по формулам

$$a = \lambda / \sqrt{3} \sin \theta_{001}, \quad (8)$$

$$c = \lambda / \sin \theta_{002}, \quad (9)$$

где θ_{001} и θ_{002} — положения пиков на дифрактограммах для соответствующих кристаллографических плоскостей (001) и (002).

Структура вюрцита, к которой относится ZnO, имеет гексагональную ячейку с двумя параметрами решетки, a и c , в соотношении $c/a = \sqrt{8/3} = 1.633$ и относится к группе симметрии C_{6v}^4 или $P6_3mc$ [6].

Результаты расчета основных параметров кристаллической структуры пленок, вычисленных на основании уравнений (3)–(9), приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные значения параметров кристаллической структуры пленок ZnO

d , нм	θ_{001} , град	θ_{002} , град	c , Å	a , Å	$\epsilon \cdot 10^{-3}$, отн. ед.	d_{hkl} , нм	D , нм	$FWHM$	E_g , эВ
10	36.28	34.51	5.1941	2.9987	1.98	0.2597	17.5	0.48	3.190
20	36,25	34.48	5.1993	3.0017	1.91	0.2598	19.7	0.46	3.230
40	36,21	34.44	5.2046	3.0047	1.48	0.2602	25.5	0.36	3.255
60	36,18	34.40	5.2099	3.0078	1.29	0.2604	29.2	0.31	3.256
80	36,14	34.38	5.2134	3.0098	0.95	0.2606	39.4	0.23	3.254

Полученные данные показывают, что с увеличением толщины пленок наблюдается рост параметров a и c , значения которых при толщине пленки 80 нм приближаются к значениям, характерным для объемных кристаллов ZnO, у которых согласно [38] они составляют: $a = 3.2501$ Å и $c = 5.2071$ Å, а соответствующее отношение $c/a = 1.6021$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что варьирование толщины слоев цинка, получаемого методом магнетронного напыления, позволяет в широких пределах регулировать структуру и свойства пленок ZnO, синтезируемых посредством

их термического окисления. Установлено, что с увеличением толщины исходных слоев цинка от 10 до 60 и 80 нм размер его кристаллов на поверхности увеличивается и составляет ~10–13, ~19–23, ~26–30 нм, при этом возрастает и плотность покрытия поверхности пленки кристаллами Zn, а размер кристаллов получаемого при последующем термическом окислении оксида цинка составляет соответственно ~17–21, ~27–33, ~35–45 нм.

По данным рентгенофазового анализа, полученные пленки имеют гексагональную структуру вюрцита. С увеличением толщины пленок наблюдается значительное изменение характеристик кристаллической структуры и ширины запрещенной зоны, максимально приближающихся к соответствующим значениям для объемного оксида цинка при толщине слоя 80 нм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 24-23-00140.

Измерения свойств материалов проводились в научном парке Санкт-Петербургского государственного университета (междисциплинарный ресурсный центр по направлению “Нанотехнологии”), ресурсных центрах “Рентгенодифракционные методы исследования”, “Термогравиметрические и калориметрические методы исследования”, “Физические методы исследования поверхности”, “Диагностика функциональных материалов для медицины, фармакологии и нанoeлектроники” и инжиниринговом центре Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают, что у них отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ellmer K., Klein A., Rech B.* Transparent Conductive Zinc Oxide (Springer Series in materials science 104). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008.
2. *Parihar V., Raja M., Paulose R.* A brief review of structural, electrical and electrochemical properties of zinc oxide nanoparticles. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2018. Vol. 53. P. 119–130.
3. *Janotti A., Van de Walle C.G.* Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *Rep. Prog. Phys.*, 2009. Vol. 72, 126501 (29 p).
4. *Kulkarni S.S., Shirsat, M.D.* Optical and Structural Properties of Zinc Oxide Nanoparticles. *International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS)*, 2015. Vol. 2. Iss. 1. P. 14–18.
5. *Nenavathu B.P., Sharma A., Dutta R.K.* Se doped ZnO nanoparticles with improved catalytic activity in degradation of Cholesterol. *J. Water Environ. Nanotechnol.* 2018. Vol. 3(4). P. 289–300.
6. *Özgür Ü., Alivov Ya.I., Liu C., Teke A., Reshchikov M.A., Doğan S., Avrutin V., Cho S.-J., Morkoç H.* A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics.* 2005. Vol. 98, 041301.
7. *Morkoç H., Özgür Ü.* Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009.
8. *Rahman F.* Zinc oxide light-emitting diodes: a review. *Optical Engineering*, 2019. Vol. 58(1), 010901.
9. *Guan N., Dai X., Babichev A.V., Julien F.H., Tchernycheva M.* Flexible inorganic light emitting diodes based on semiconductor nanowires. *Chem. Sci.* 2017. Vol. 8. P. 7904–7911.

10. Meyer B.K., Alves H., Hofmann D.M., Kriegseis W., Forster D., Bertram F., Christen J., Hoffmann A., Straßburg M., Dworak M., Haboeck U., Rodina A.V. Bound exciton and donor–acceptor pair recombinations in Zn O. *Physica status solidi (b)*. 2004. Vol. 241. № 2. P. 231–260.
11. Родный П.А., Черненко К.А., Веницев И.Д. Механизмы люминесценции ZnO в видимой области спектра. *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125. № 3. С. 357–363.
12. Rashmi R.K., Deepak P., Saurabh K.P. A Short Note on ZnO Based Optoelectronics Devices, Research & Development in Material Science. 2018. Vol. 3. Iss. 3. P. 265–267.
13. Guan N., Dai X., Babichev A.V., Julien F.H., Tchernycheva M. Flexible inorganic light emitting diodes based on semiconductor nanowires. *Chem. Sci*. 2017. Vol. 8. P. 7904–7911.
14. Park G.C., Hwang S.M., Lee S.M., Choi J.H., Song K.M., Kim H.Y., Kim H.-S., Eum S.-J., Jung S.-B., Lim J.H., Joo J. Hydrothermally Grown In-doped ZnO Nanorods on p-GaN Films for Color-tunable Heterojunction Light-emitting-diodes. *Sci. Rep*. 2015. Vol. 5. P. 10410.
15. Macaluso R., Lullo G., Crupi I., Sciré D., Caruso F., Feltin E., Mosca M. Progress in Violet Light-Emitting Diodes Based on ZnO/GaN Heterojunction. *Electronics*. 2020. Vol. 9. P. 991.
16. Baratto C., Kumar R., Comini E., Faglia G., Sberveglieri G. Visible electroluminescence from a ZnO nanowires/p-GaN heterojunction light emitting diode. *Optics Express*. 2015. Vol. 23. № 15. P. 18937.
17. Hamelmann F.U. Thin film zinc oxide deposited by CVD and PVD. *J. of Phys. Conf. Ser.* 2016. Vol. 764. P. 0112001.
18. Mukhtar S., Asadov A., Gao W. Microstructure of ZnO thin films produced by magnetron sputter oblique deposition. *Thin Solid Films*. 2012. Vol. 520. P. 3453–3457.
19. Демьянец Л.Н., Лу Л.Е., Лавриков А.С., Нукитин С.В. Нанокристаллический оксид цинка: пиролизический синтез и спектроскопические характеристики. *Кристаллография*. 2010. Т. 55. С. 149–156.
20. Vayssieres L. Growth of arrayed nanorods and nanowires of ZnO from aqueous solutions. *Adv. Mat.* 2003. Vol. 15. P. 464–466.
21. Jalil A.A., Triwahyono S. Hairom N.H.H., Razali N.A.M. Facile synthesis of a zinc oxide nanoparticle by electrochemical method. *Malaysian J. of Fund. Appl. Sci.* 2014. Vol. 10. P. 165–168.
22. Ye J.D., Gu S.L., Qin F., Zhu S.M., Liu S.M., Zhou X., Liu W., Hu L.Q., Zhang R., Shi Y., Zheng Y.D., Ye Y.D. MOCVD growth and properties of ZnO films using dimethylzinc and oxygen. *Applied Physics A*. 2005. Vol. 81(4). P. 809–812.
23. Wang S.P., Shan C.X., Yao B., Li B.H., Zhang J.Y., Zhao D.X., Shen D.Z., Fan X.W. Electrical and optical properties of ZnO films grown by molecular beam epitaxy. *Appl. Surf. Sci.* 2009. Vol. 225. P. 4913–4915.
24. Znaidi L. Sol–gel-deposited ZnO thin films: A review. *Mater. Sci. Eng.: B*. 2010. Vol. 174. P. 18–30.
25. Fan X.M., Lian J.S., Guo Z.X., Lu H.J. Microstructure and photoluminescence properties of ZnO thin films grown by PLD on Si (111) substrates. *Appl. Surf. Sci.* 2005. Vol. 239. P. 176–181.
26. Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques. Second Edition / Ed. by Krishna Seshan. 2002. Published in the United States of America by Noyes Publications / William Andrew Publishing. 656 p.
27. Суздалев И.П., Суздалев П.И. Нанокластеры и нанокластерные системы. Организация, взаимодействие, свойства. *Успехи химии*. 2001. Т. 70. № 3. С. 203–240.
28. Родунер Э. Размерные эффекты в наноматериалах. М.: Техносфера. 2010.
29. Томаев В.В., Полищук В.А., Мякин С.В., Вартамян Т.А., Леонов Н.Б. Структурные и оптические свойства нанослоев цинка и оксида цинка, получаемых магнетронным напылением и последующим термоокислением. *Фундаментальные проблемы оптики: сборник трудов XII Международной конференции. Под редакцией С.А. Козлова*, 2020. С. 336–338.

30. Садовников С.И., Кожеевникова Н.С., Ремпель А.А. Структура и оптические свойства нанокристаллических пленок сульфида свинца. *Физика и техника полупроводников*. 2010. Т. 44. Вып. 10. С. 1394–1400.
31. Аванесян В.Т., Провоторов П.С., Сычев М.М., Ерузин А.А. Спектроскопия тонких пленок оксида цинка вблизи края фундаментального поглощения. *Оптика и спектроскопия*. 2021. Т. 129. Вып. 9. С. 1142–1145.
32. Vezbicke B.D., Patel S., Davis B.E., Birnie D.P. Evaluation of the Tauc Method for Optical Absorption Edge Determination: ZnO Thin Films as a Model System. *Physica Status Solidi*, B. 2015. Vol. 252. P. 1700–1710.
33. JCPSDS – International Center for Diffraction Data. Card № 05-0664 (2001).
34. Scherrer P. Bestimmung der Grösse und der Inneren Struktur von Kolloidteilchen Mittels Röntgenstrahlen, *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen. Mathematisch-Physikalische Klasse*. 1918. Vol. 2. P. 98–100.
35. Dave P.Y., Patel K.H., Chauhan K.V., Chawla A.K., Rawal S.K. Examination of zinc oxide films prepared by magnetron sputtering. *Procedia Technology*. 2016. Vol. 23. P. 328–335. 3rd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering, ICI-AME-2016.
36. Волковский Ю.А., Жернова В.А., Фоломешкин М.С., Просеков П.А., Муслимов А.Э., Буташин А.В., Исмаилов А.М., Григорьев Ю.В., Писаревский Ю.В., Каневский В.М. Сравнительная рентгеновская дифрактометрия дефектной структуры эпитаксиальных пленок ZnO, выращенных методом магнетронного осаждения на подложках Al₂O₃ ориентации (0001) в неоднородном электрическом поле. *Кристаллография*. 2023. Т. 68. № 2. С. 180–188.
37. Soati E., Dorrnanian D. Estimation of Lattice Strain in ZnO Nanoparticles Produced by Laser Ablation at Different Temperatures. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2017. Т. 84, № 3. С. 475–482.
38. Kisi E.H., Elcombe M.M. Parameters for the Wurtzite Structure of ZnS and ZnO using Powder Neutron Diffraction. *Acta Cryst*. 1989. V. C45. P. 1867–1870.