

УДК 539.234:621.78.061

А. И. БАЖИН, А. Е. ПОКИНТЕЛИЦА, Н. С. ЩЕГЛОВА, В. А. СТУПАК, А. Н. ТРОЦАН

Донецкий национальный университет

СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ ГАЛЛИЕМ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Известно, что различные структурные, электрические и оптические характеристики пленок сильно зависят от параметров процесса осаждения, таких как давление газа в камере, температура подложки и скорость осаждения. Путем изменения условий нанесения был изготовлен ряд образцов на стеклянных подложках. Тонкие пленки легированного галлием оксида цинка были получены методом импульсного магнетронного распыления керамической мишени ZnO с добавкой Ga₂O₃ (3,5 at %). Выполнен отжиг пленок в условиях среднего вакуума в атмосфере, содержащей остаточный воздух. Получены спектры пропускания, а также дифрактограммы образцов до и после отжига. Проведена оценка поверхностного сопротивления исходных и отожженных пленок.

тонкопленочные покрытия, прозрачные проводящие оксиды, оксид цинка, магнетронное распыление, легирование, отжиг, нанокристаллы

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Прозрачные проводящие оксиды (transparent conductive oxides, в дальнейшем TCO) относятся к классу полупроводников с широкой запрещенной зоной $E_g > 3$ эВ и высокой прозрачностью в видимом диапазоне спектра. Типичными представителями таких полупроводниковых материалов являются оксид индия-олова (indium tin oxide, далее ITO), легированный фтором оксид олова. Проводимость данных материалов осуществляется собственными (внутренние дефекты) и примесными (легированные атомы) носителями. Тонкие пленки TCO находят применение в производстве широкого спектра фотоэлектрических устройств, таких как полупроводниковые светодиоды, солнечные элементы и электрохромные ячейки [1]. Глобальный рост потребности в энергоэффективных и компактных приборах стимулирует глубокий интерес исследователей к данному классу материалов.

Оксид цинка (ZnO) – полупроводник группы соединений A^{II}B^{VI} с шириной запрещенной зоны $E_g = 3,4$ эВ и высокой энергией связи экситона $E_{ex} = 60$ мэВ [2]. Обладая химической инертностью, стабильностью свойств во времени, устойчивостью к атмосферному воздействию, пленки ZnO применяются в качестве прозрачных в видимой и ближней инфракрасной областях спектра покрытий с низким сопротивлением [3].

Элементы III группы – алюминий, галлий, индий – выступают в роли донорных примесей в пленках оксида цинка. Легирование этими элементами позволяет получать низкоомные покрытия n-ZnO [4], которые могут применяться в качестве прозрачных проводящих слоев в устройствах пленочной электроники, твердотельных источниках и приемниках излучения. Отмечено, что слои легированного галлием оксида цинка (ZnO:Ga) являются сравнительно недорогой альтернативой прозрачным проводящим пленкам ITO [5].

АНАЛИЗ НЕДАВНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Свойства пленочных покрытий находятся в строгой зависимости от способа и условий их получения. Разработано множество методов получения пленок на основе оксида цинка для устройств электроники и оптики, такие как пиролиз из водного раствора [6], импульсное лазерное осаждение [4],

электронно-лучевое осаждение [7], а также магнетронное распыление на постоянном [8, 9] и переменном [10, 11] токе.

Используемый для нанесения прозрачных проводящих пленок метод магнетронного распыления позволяет варьировать условия осаждения, путем изменения параметров плазмы [12]. Синтез покрытий на основе ZnO из магнетронного разряда проводят как с использованием реактивного газа [10, 11, 13, 14], так и распылением керамической мишени [4, 8, 9].

Применение метода импульсного магнетронного распыления позволяет стабилизировать процесс осаждения оксидных пленок. Импульсный разряд с частотой от десяти до сотен килогерц препятствует возникновению микродуг на поверхности мишени за счет того, что мишень-катод подвергается распылению лишь во время длительности импульса, величину которого можно выбрать меньше времени, необходимого для поджига дуги. Во время отсутствия отрицательного потенциала на мишени компенсируются заряженные области за счет электронов из плазмы [15].

Режим импульсного питания магнетрона может быть двух видов: униполярный и биполярный. Биполярный режим отличается наличием добавочного положительного напряжения на мишени во время отсутствия отрицательного (распыляющего) напряжения.

Температурные воздействия на пленки, полученные в сильно неравновесных условиях, каковым является процесс осаждения покрытия из магнетронного разряда, приводят к модификации свойств пленки. Ключевую роль в процессе отжига играет окружающая атмосфера. Влияние состава атмосферы на электрофизические и оптические свойства ТСО пленок на основе легированного оксида цинка показано в работах [7, 15].

Таким образом, тонкие пленки легированного галлием оксида цинка представляют собой перспективный материал для устройств микроэлектроники и оптики. В свою очередь, метод магнетронного распыления, используемый для нанесения пленок, отличается эффективностью, гибкостью и прикладным характером, что делает его предпочтительным для лабораторных исследований.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Синтез функциональных покрытий с заданными характеристиками является актуальной задачей современного материаловедения. Разработчикам важно определить такой режим магнетронного распыления, который позволяет достичь оптимальных свойств и структуры пленок с учетом влияния материала подложки. Технологический процесс может включать в себя дополнительную обработку пленки (термическую, ионную). Исходя из сказанного выше, целью данной работы было исследование влияния отжига на структурные, оптические и электрические свойства тонкопленочных покрытий ZnO:Ga, осажденных на стеклянные подложки при различных режимах импульсного магнетронного распыления.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемые образцы получали на установке ВУП-5М с приставкой магнетронного распыления и импульсным источником питания приставки. Катод-мишень распылялся в атмосфере аргона при различных режимах питания магнетрона. Рабочая камера предварительно откачивалась до остаточного давления порядка 10–4 Па. Давление рабочего газа составляло 0,27 Па. Пленки осаждали на предварительно очищенные стеклянные подложки, расположенные параллельно плоскости мишени на фиксированном расстоянии. Подложкодержатель был оборудован радиационным нагревателем, а его температура контролировалась термопарой хромель-алюмель. Потенциал держателя подложек изменялся в зависимости от режима нанесения покрытия. Распыляемой мишенью служил керамический диск ZnO+Ga₂O₃ (3,5 at %). Условия получения образцов пленок ZnO:Ga, представлены в таблице 1.

Отжиг проводился при давлении 4–6 Па в атмосфере, содержащей остаточный воздух. Образцы нагревались в вакуумной камере в течение 5 минут до температуры 400 °С, выдерживались 40 минут при постоянной температуре и затем свободно остывали при поддержании вакуума.

Электрофизические свойства покрытий изучались путем измерения поверхностного сопротивления пленок между двумя контактными полосками с одинаковыми длиной и расстоянием между ними. Рентгеноструктурные исследования пленок и мишени проводили с помощью дифрактометра ДРОН-4 в диапазоне углов 2θ от 9 до 90°. Использовали рентгеновское CuK_{α} – излучение с длиной волны 0,15418 нм. Оптическое пропускание образцов исследовали на спектрофотометре СФ 4 в диапазоне длин волн от 400 до 1 000 нм при комнатной температуре. Образцом сравнения служил воздух. Толщина нанесенных пленок измерялась при помощи микроинтерферометра МИИ-4.

Таблица 1 – Условия осаждения покрытий

	Порядковый номер образца			
	1	2	3	4
Режим распыления мишени	Импульсный биполярный	Импульсный униполярный	Импульсный униполярный	Импульсный униполярный
Амплитуда импульса U_a , В	-475, +40	-620	-490	-500
Средний ток в разряде I , мА	60	60	70	70
Частота импульсов f , кГц	30	30	30	30
Коэффициент заполнения импульса γ	0,4	0,2	0,6	0,6
Длительность осаждения t , мин	40	40	40	40
Температура подложки T , °С	30	200	200	230
Потенциал смещения на держателе подложек	«плавающий»	«плавающий»	заземленный держатель	импульсный потенциал смещения $U_{см} = 300$ В, $f_{см} = 45$ кГц, $\gamma_{см} = 0,5$

На рис. 1 приведены участки дифрактограмм образцов до и после отжига. Для сравнения на рисунках показан участок дифрактограммы чистой подложки. Как видно из рисунка, пленки ZnO:Ga, полученные в униполярном режиме на подогреваемых подложках, имеют на дифрактограммах ярко выраженный максимум, который соответствует отражению от плоскости (002) в кристаллической решетке оксида цинка. Из этого следует, что данные покрытия являются поликристаллическими с гексагональной структурой и преимущественной ориентацией оси c перпендикулярно плоскости подложки. Такой результат находится в хорошем согласии с литературными данными [8, 10, 13].

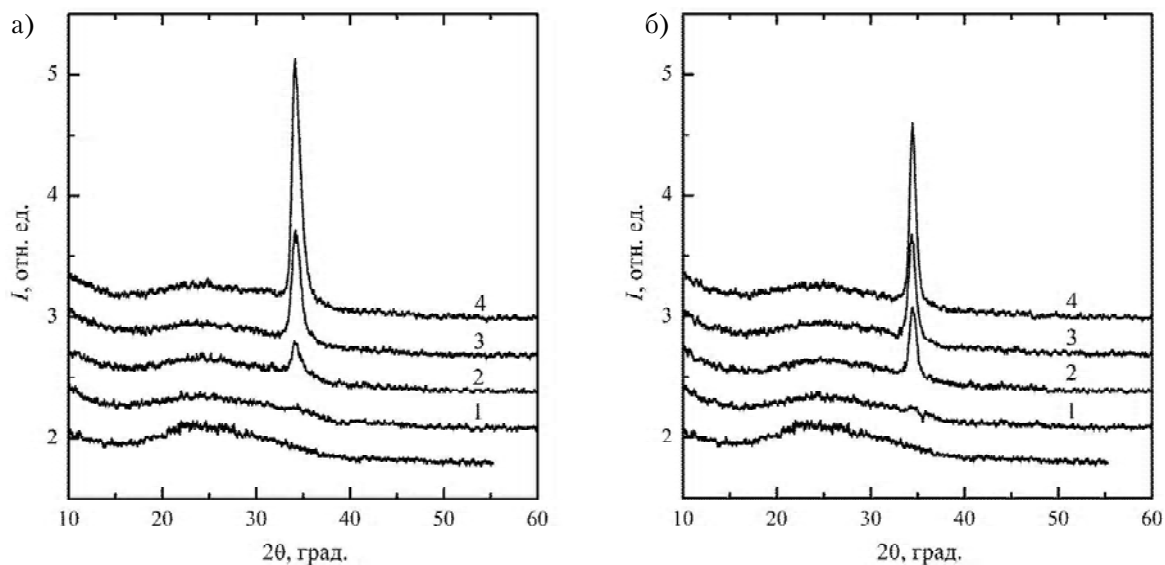


Рисунок 1 – Участки дифрактограмм тонких пленок ZnO:Ga на стеклянных подложках: а) до отжига, б) после отжига. Цифрами обозначены номера образцов. Участок дифрактограммы чистой стеклянной подложки без обозначений.

На дифрактограмме образца № 1 обнаруживается лишь размытый пик (002) малой интенсивности, который говорит о переходе пленки из рентгеноаморфного состояния в нанокристаллическое.

Результаты анализа данных дифрактометрии исследуемых покрытий и мишени сведены в таблицу 2. Также в этой таблице представлены значения толщины и поверхностного сопротивления покрытий. Размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) находились по уширению дифракционных пиков, используя формулу Селякова-Шеррера:

$$D = (0,9\lambda) / (w \cos \theta), \quad (1)$$

где D – размер ОКР,

λ – длина волны используемого рентгеновского излучения,

θ – угол отражения,

w – полуширина соответствующего пика. Заметим, что в случае нанокристаллических материалов инструментальное уширение мало в сравнении полушириной пика, а следовательно, им можно пренебречь.

При использовании формулы (1) предполагается, что уширение профиля линии обусловлено только лишь величиной области когерентного рассеяния.

Постоянная решетки c была определена из квадратичной формы для гексагональной сингонии по формуле:

$$d_{hkl}^2 = \left(\frac{4(h^2 + k^2 + hk)}{3a^2} + \frac{l^2}{c^2} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где d_{hkl} – межплоскостное расстояние, рассчитанное для плоскости (hkl) ;

h, k, l – индексы Миллера соответствующей плоскости;

a – постоянная решетки. Из (2) видно, что для плоскости (002) вычисления значительно упрощаются.

Из таблицы 2 следует, что термический отжиг образцов приводит к увеличению размеров ОКР, а следовательно, и кристаллитов. Также можно утверждать, что отжиг текстурированных образцов не внес изменений в характер текстуры. Отжиг наименее кристаллического образца № 1 привел к появлению дополнительных отражений от плоскостей (100) , (101) и (102) гексагональной решетки ZnO, но интенсивность их невелика.

Таблица 2 – Структурные характеристики, толщина, а также поверхностное сопротивление исследуемых образцов и керамической мишени

	Мишень	Порядковый номер образца							
		До отжига				После отжига			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Центр тяжести пика x_c , град	34,454	34,671	34,329	34,331	34,375	34,392	34,523	34,439	34,521
Параметр решетки c , нм	0,5206	0,5174	0,5224	0,5224	0,5218	0,5215	0,5196	0,5208	0,5196
Размер ОКР D , нм	44,0	3,2	7,6	7,2	7,6	9,4	9,1	8,4	9,9
Толщина h , нм	–	250	300	340	490	250	300	340	490
Поверхностное сопротивление R , Ом/□	–	$2,0 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^3$	200	$1,6 \cdot 10^3$	330

Кроме того, вызывает интерес тот факт, что пленки, осажденные на нагретые подложки при униполярном режиме распыления мишени, имеют больший параметр кристаллической решетки с нежели поликристаллическая мишень. Для образца, нанесенного на неподогреваемую подложку при биполярном режиме питания магнетрона, зависимость противоположная. Отжиг пленок, в свою очередь, снижает различие параметров решетки мишени и образцов. Это свидетельствует о том, что первоначальное несоответствие параметра с мишени и образцов связано с наличием напряжений в осажденных пленках, которые частично снимаются в процессе отжига при перераспределении дефектов (как собственных, так и примесных). Следует отметить, что наличие напряжений в пленке в большей степени связано с температурой подложки, чем с режимом питания магнетронной приставки. При нанесении пленок на подложки при низкой температуре внедренные и выбитые в междоузлия атомы имеют низкую подвижность в приповерхностном слое осаждаемой пленки. Эти дефекты являются причиной высоких сжимающих напряжений. По мере роста пленки эти напряжения могут накапливаться и в дальнейшем релаксировать с образованием дислокаций.

Результаты измерения поверхностного сопротивления покрытий демонстрируют его существенное снижение под действием термического отжига в вакууме. Снижение сопротивления в отожженных пленках легированного оксида цинка связано как с увеличением числа свободных носителей за счет роста концентрации кислородных вакансий, так и с увеличением подвижности носителей, вследствие уменьшения их рассеяния на границах зерен.

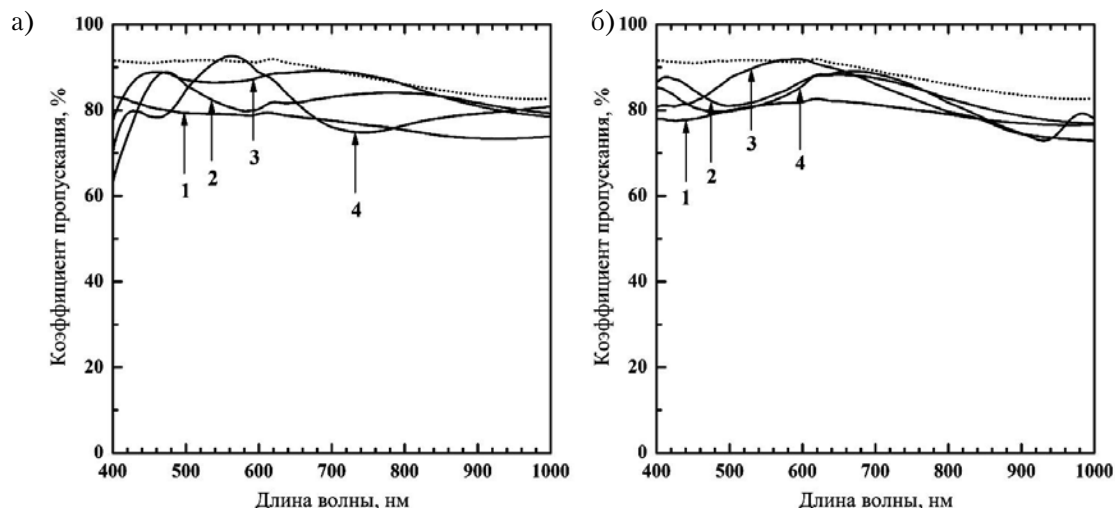


Рисунок 2 – Спектры пропускания образцов тонкопленочных покрытий ZnO:Ga на стеклянных подложках и чистых подложек: а) до отжига, б) после отжига. Цифрами обозначены номера образцов. Спектр стеклянной подложки обозначен пунктиром.

На рис. 2 приведены спектры пропускания пленок ZnO:Ga на стеклянных подложках и чистых подложек. Видно, что исходные и отожженные образцы обладают хорошей прозрачностью. Образцы № 2, № 3 и № 4 имеют коэффициент пропускания более 80 % практически во всем исследуемом диапазоне длин волн. Также наблюдается сдвиг области края фундаментального поглощения в результате отжига в коротковолновую сторону. Прозрачность образца № 1 лежит в пределах 75–80 %, а его спектр пропускания не имеет интерференционных максимумов, что может говорить о снижении его пропускания за счет увеличения поглощения в пленке.

Подобные картины спектров оптического пропускания наблюдались в работе [14] при исследовании покрытий, полученных реактивным магнетронным распылением Zn-мишени, и в работе [8], где пленки получались при распылении керамической мишени. Аналогичное влияние отжига на спектры пропускания описано авторами в работе [15], где изучались пленки оксида цинка легированного алюминием.

В целом результаты проведенных исследований хорошо согласуются с литературными данными. Полученные образцы покрытий легированного галлием оксида цинка могут выступать как в качестве прозрачных проводящих оксидов, так и промежуточных высокоомных слоев в зависимости от режима нанесения и параметров последующей термической обработки.

ВЫВОДЫ

Таким образом, исследование полученных пленок ZnO:Ga на стеклянных подложках показало эффективность метода импульсного магнетронного распыления для синтеза прозрачных проводящих оксидных покрытий.

Обнаружено, что пленки, осаждаемые на холодные подложки, имеют низкую степень кристалличности, а их оптическое пропускание составляет 75–80 % и обусловлено в первую очередь увеличением поглощения, в то время как пленки, нанесенные на подогреваемые подложки, имеют ярко выраженную текстуру вдоль оси перпендикулярно плоскости подложки, которая сохраняется после термического отжига, а их пропускание лежит в пределах 80–85 %.

Показано, что термический отжиг в вакууме существенно снижает поверхностное сопротивление образцов и не приводит к выделению примесей в виде отдельных фаз, что характеризует данные покрытия как термически стабильные в исследуемом диапазоне температур. Отмечено, что отжиг в среде с низким содержанием кислорода вызывает сдвиг области края фундаментального поглощения в коротковолновую сторону.

Данные, полученные в ходе экспериментов, могут служить основой для исследований по оптимизации технологических процессов с целью получения тонких пленок с высокой проводимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guillén, C. TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics [Текст] / C. Guillén, J. Herrero // *Thin Solid Films*. – 2011. – Vol. 520. – P. 1–17.
2. Hanada, T. Basic Properties of ZnO, GaN, and Related Materials [Текст] / T. Hanada // *Oxide and nitride semiconductors: processing, properties, and applications* / Eds. Y. Takafumi, H. Soon-Ku. – Berlin-Heidelberg: Springer, 2009. – P. 1–19.
3. Ellmer K. Transparent conductive zinc oxide: basics and applications in thin film solar cells [Текст] / Eds. K. Ellmer, A. Klein, B. Rech. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 446 p.
4. Оптические и структурные характеристики пленок оксида цинка, легированных галлием [Текст] / О. А. Новодворский, Л. С. Горбатенко, В. Я. Панченко и др. // *Физика и техника полупроводников*. – 2009. – Т. 4, № 43. – С. 439–444.
5. Minami, T. New n-type transparent conducting oxides [Текст] / T. Minami // *MRS Bulletin*. – 2000. – Vol. 25, No 8. – P. 38–44.
6. Growth and characterization of ZnO nanocrystalline thin films and nanopowder via low-cost ultrasonic spray pyrolysis [Текст] / P. Singh, A. Kumar, Deepak, D. Kaur // *Journal of Crystal Growth*. – 2007. – Vol. 306, No 2. – P. 303–310.
7. Влияние отжига на оптические и электрические свойства пленок ZnO:Er [Текст] / Н. Р. Агамалян, Р. К. Овсепян, Е. А. Кафадарян и др. // *Известия НАН Армении. Физика*. – 2008. – Т. 43, № 3. – С. 224–232.
8. Characteristic of Ga-doped ZnO films deposited by DC magnetron sputtering with a sintered ceramic ZnO:Ga target [Текст] / L. Jung-Chul, K. Yang-Do, S. Pung-Keun et al. // *Journal of the Korean Physical Society*. – 2008. – Vol. 53, No 1. – P. 416–420.
9. Пленки легированного галлием оксида цинка, нанесенные с использованием несбалансированной магнетронной распылительной системы [Текст] / А. Н. Захаров, К. В. Оскомов, С. В. Работкин и др. // *Журнал технической физики*. – 2010. – Т. 80, № 5. – С. 127–131.
10. Microstructures and optical properties of Cu-doped ZnO films prepared by radio frequency reactive magnetron sputtering [Текст] / L. Ma, S. Ma, H. Chen et al. // *Applied Surface Science*. – 2011. – Vol. 257, No 23. – P. 10036–10041.
11. Исследование режимов нанесения нанокристаллических пленок оксида цинка методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления [Текст] / Е. Ю. Гусев, В. А. Гамалеев, А. С. Михно, О. О. Мироненко // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – Т. 11, № 2. – С. 389–391.
12. Кузьмичев, А. И. Магнетронные распылительные системы [Текст]. Книга 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления / А. И. Кузьмичев. – К.: Аверс, 2008. – 244 с.
13. Получение тонких пленок оксида цинка методом реактивного магнетронного распыления и исследование их электрических и оптических характеристик [Текст] / В. Б. Залесский, Т. Р. Леонова, О. В. Гончарова и др. // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2005. – Т. 6, № 1. – С. 44–49.
14. Вольпян, О. Д. Получение оптических пленок оксида цинка магнетронным распылением на постоянном и переменном токе [Текст] / О. Д. Вольпян, Ю. А. Обод, П. П. Яковлев // *Прикладная физика*. – 2010. – Т. 3. – С. 24–30.
15. Advanced coatings through pulsed magnetron sputtering [Текст] / P. J. Kelly, J. Hisek, Y. Zhou et al. // *Surface Engineering*. – 2004. – Vol. 20, No 3. – P. 157–162.

Получено 21.05.2013

А. І. БАЖИН, А. Є. ПОКИНТЕЛИЦЯ, Н. С. ЩЕГЛОВА, В. А. СТУПАК,
А. М. ТРОЦАН

СТРУКТУРНІ ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГОВАНИХ ГАЛІЄМ ТОНКИХ
ПЛІВОК ОКСИДУ ЦИНКУ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ІМПУЛЬСНОГО
МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ

Донецький національний університет

Відомо, що різноманітні структурні, електричні та оптичні характеристики плівок істотно залежать від параметрів процесу осадження, таких як тиск газу у камері, температура підкладки і швидкість осадження. Шляхом варіації умов нанесення було виготовлено низку зразків на скляних підкладках. Тонкі плівки легованого галієм оксиду цинку було отримано методом імпульсного магнетронного розпилення керамічної мішені ZnO із домішкою Ga₂O₃ (3,5 at %). Виконано відпал плівок в умовах середнього вакууму в атмосфері, що містить залишкове повітря. Отримано спектри пропускання, а також дифрактограми зразків до та після відпалу. Проведено оцінювання поверхневого опору первинних та відпалених плівок.

тонкоплівкові покриття, прозорі провідні оксиди, оксид цинку, магнетронне розпилення, легування, відпал, нанокристали

ANATOLY BAZHIN, ARTEM POKYNTELYTSIA, NATALIA SHCHEGLOVA,
VOLODYMYR STUPAK, ANTONINA TROTSAN
STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF GALLIUM DOPED ZINC
OXIDE THIN FILMS PRODUCED BY PULSED MAGNETRON SPUTTERING
Donetsk National University

It is known that the various structural, electrical, and optical characteristics of the deposited films are strongly sensitive to the parameters of the deposition process, such as the gas pressure in the chamber, the substrate temperature, and the deposition rate. By varying the coating conditions a series of samples were produced onto glass substrates. Thin films of gallium doped zinc oxide were obtained by pulsed magnetron sputtering of the ceramic ZnO target with the addition of Ga₂O₃ (3,5 at%). The films were annealed in middle vacuum with the presence of residual air. Transmission spectra and X-ray diffraction patterns of the samples were registered prior to and after annealing. Surface resistivity of deposited films and annealed ones was estimated.

thin-film coatings, transparent conductive oxides, zinc oxide, magnetron sputtering, doping, annealing, nanocrystals

Бажин Анатолій Іванович – д.ф.-м.н., професор кафедри нанофізики Донецького національного університету. Академік АН ВШ України. Наукові інтереси: іони, фулерени, елементний склад, спектри випромінювання і поглинання, іонно-фотонна емісія.

Покинтелиця Артем Євгенович – аспірант кафедри нанофізики Донецького національного університету. Наукові інтереси: тонкоплівкові покриття, осадження покриттів у вакуумі, структура тонких плівок, наноматеріали.

Щеглова Наталія Сергіївна – аспірант кафедри нанофізики Донецького національного університету. Наукові інтереси: тонкоплівкові покриття, електрохромні покриття, оптичні властивості тонких плівок.

Ступак Володимир Аврамович – старший науковий співробітник кафедри нанофізики Донецького національного університету. Наукові інтереси: іони, фулерени, елементний склад, вторинна іонна мас-спектрометрія, тонкі плівки, магнетронне розпилювання.

Троцан Антоніна Миколаївна – к.ф.-м.н., доцент кафедри нанофізики Донецького національного університету. Наукові інтереси: структура і властивості тонких плівок.

Бажин Анатолій Іванович – д.ф.-м.н., профессор кафедры нанофизики Донецкого национального университета. Академик АН ВШ Украины. Научные интересы: ионы, фуллерены, элементный состав, спектры излучения и поглощения, ионно-фотонная эмиссия.

Покинтелиця Артем Євгеньєвич – аспірант кафедри нанофизики Донецкого национального университета. Научные интересы: тонкопленочные покрытия, осаждение покрытий в вакууме, структура тонких пленок, наноматериалы.

Щеглова Наталья Сергеевна – аспирант кафедры нанофизики Донецкого национального университета. Научные интересы: тонкопленочные покрытия, электрохромные покрытия, оптические свойства тонких пленок.

Ступак Владимир Аврамович – старший научный сотрудник кафедры нанофизики Донецкого национального университета. Научные интересы: ионы, фуллерены, элементный состав, вторичная ионная масс-спектрометрия, тонкие пленки, магнетронное распыление.

Троцан Антонина Николаевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры нанофизики Донецкого национального университета. Научные интересы: структура и свойства тонких пленок.

Bazhin Anatoly – professor of the Department of Nanophysics, Donetsk National University, Academician, member of the National Academy of Sciences of Ukraine. Scientific interests: ions, fullerenes, elemental composition, emission and absorption spectra, ion-photon emission.

Pokyntelytsia Artem – post-graduate student, Nanophysics Department, Donetsk National University. Scientific interests: thin film coatings, vacuum deposition, structure of thin films, nanomaterials.

Shcheglova Natalia – post-graduate student, Nanophysics Department, Donetsk National University. Scientific interests: thin film coatings, vacuum deposition, structure of thin films, nanomaterials.

Stupak Volodymyr – senior researcher of the Department of Nanophysics, Donetsk National University. Scientific interests: ions, fullerenes, elemental composition, secondary ions mass spectrometry, thin films, magnetron sputtering.

Trotsan Antonina – PhD, Associate Professor, Nanophysics Department, Donetsk National University. Scientific interests: structure and properties of thin films.