

Influence of Al impurities on the electrical properties of ZnO films

S. I. Rembeza^{†,1}, R. E. Prosvetov¹, E. S. Rembeza², A. A. Vinokurov¹,
V. A. Makagonov¹, B. L. Agapov²

[†]rembeza@yandex.ru

¹Voronezh State Technical University, 84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh, 394026, Russia

²Voronezh State University, 1 Universitetskaya Sq., Voronezh, 394018, Russia

The paper presents the results of studies of the structure, electrical and optical properties of ZnO films with Al content from 1 to 5 at.% obtained by the method of ion-beam sputtering of a composite ceramic target in an argon atmosphere. The composite target is a rectangular ZnO ceramic plate with several bands of Al₂O₃ corundum unevenly distributed over the ZnO surface. In one sputtering cycle, 10 samples were obtained with an aluminum concentration of 1 to 5 at.% as the results of the analysis of the energy dispersion of the second electrons. After deposition, ZnO films were partially crystallized and contained one phase of hexagonal wurtzite with increased parameters *a* and *c*. The grain size of the films was estimated using the Scherrer equation and showed a tendency for the grain sizes to change with increasing Al concentration in ZnO films. X-ray diffraction data were confirmed by studying the surface morphology using atomic force microscopy. Measurement of the electrical parameters of the films showed that the smallest resistivity ($\sim 4 \cdot 10^{-3} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$) is observed in ZnO films with 1 at.% Al. As the Al concentration in ZnO increases, the resistivity of the films increases, reaching the value $\rho = 250 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ at 5 at.% Al. A possible model of the effect of Al impurity on the electrical properties of ZnO films is considered. Studies of the optical properties of the samples showed that all films are highly transparent ($\sim 70 \div 90\%$) in the visible light range. The interference bandwidths provide an estimate of the value of the refractive index of ZnO:Al films. From the light absorption spectra, the values of the band gap of ZnO:Al samples were determined and a slight increase in the band gap of ZnO:Al with an increase in the Al concentration in films was established. The mechanism of this behavior of Al impurity in ZnO is discussed. Possible areas of application for ZnO films with Al impurities are considered.

Keywords: ion beam sputtering, ZnO films, impurity Al, X-ray analysis, electrical and optical properties.

УДК: 538.975

Влияние примеси Al на электрофизические свойства пленок ZnO

Рембеза С. И.^{†,1}, Просветов Р. Е.¹, Рембеза Е. С.², Винокуров А. А.¹,
Макагонов В. А.¹, Агапов Б. Л.²

¹Воронежский государственный технический университет, ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж, 394006, Россия

²Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, 394018, Россия

В работе представлены результаты исследований структуры, электрических и оптических свойств пленок ZnO с содержанием Al от 1 до 5 ат.%, полученных методом ионно-лучевого распыления составной керамической мишени в атмосфере аргона. Составная мишень представляет собой прямоугольную керамическую пластину ZnO с несколькими полосами корунда Al₂O₃, неравномерно распределенными на поверхности ZnO. За один цикл напыления были получены 10 образцов с концентрацией алюминия от 1 до 5 ат.% по данным энергодисперсионного анализа вторичных электронов. Сразу после напыления пленки ZnO были частично кристаллизованы и содержат одну фазу гексагонального вюрцита с увеличенными параметрами *a* и *c*. Размер зерна пленок оценивался по формуле Шеррера и показал тенденцию к изменению размеров зерен по мере увеличения концентрации Al в пленках ZnO. Данные

рентгеноструктурного анализа подтверждены исследованием морфологии поверхности с помощью атомно-силовой микроскопии. Измерение электрических параметров пленок показали, что наименьшее удельное сопротивление ($\sim 4 \cdot 10^{-3}$ Ом·см) наблюдается в пленках ZnO с 1 ат.% Al. По мере увеличения концентрации Al в ZnO удельное сопротивление пленок возрастает, достигая значения $\rho = 250$ Ом·см при 5 ат.% Al. Рассмотрена возможная модель влияния примеси Al на электрические свойства пленок ZnO. Исследования оптических свойств образцов показали, что все пленки отличаются высокой прозрачностью ($\sim 70 \div 90\%$) в видимом диапазоне света. По интерференционным полосам пропускания приведена оценка величины коэффициента преломления пленок ZnO:Al. Из спектров поглощения света определены значения ширины запрещенной зоны образцов ZnO:Al и установлено небольшое увеличение ширины запрещенной зоны ZnO:Al с увеличением концентрации Al в пленках. Обсужден механизм такого поведения примеси Al в ZnO. Рассмотрены возможные сферы применения пленок ZnO с примесью Al.

Ключевые слова: ионно-лучевое распыление, пленки ZnO, примесь Al, рентгеноструктурный анализ, электрические и оптические свойства.

1. Введение

Тонкие полупроводниковые пленки ZnO имеют ширину запрещенной зоны более 3 эВ, прозрачны в видимом диапазоне света, обладают прямозонной структурой, из-за наличия дефицита кислорода характеризуются *n*-типом проводимости и широко используются в современной электронике [1]. Пленки ZnO применяются в газовой сенсорике [2], в прозрачной электронике [3], в качестве светоизлучающих структур [4], прозрачных проводящих электродов [5] и в других областях науки и техники. Для изготовления пленок ZnO и их легирования примесями используются различные методы синтеза. Например, золь-гель технологии [6,7,8], спрей-пиролиз [9], лазерное импульсное осаждение [10], магнетронное распыление на переменном токе [11] и другие.

Трехвалентный ион алюминия Al^{3+} при замещении двухвалентного цинка Zn^{2+} в кристаллической решетке ZnO будет вести себя как донорная примесь, что широко используется для изготовления прозрачных высокопроводящих слоев ZnO в прозрачной электронике [11] и солнечной энергетике [12]. Влияние примесных атомов на свойства ZnO зависит не только от структуры их электронных оболочек, но и от предельной растворимости и места локализации примесей в кристаллической решетке ZnO. В частности, примеси атомов V группы образуют в кристаллической решетке ZnO сложный дефект с участием вакансий цинка и ведут себя как акцепторы, позволяющие изготавливать пленки ZnO *p*-типа проводимости для различных изделий электроники [13].

Литературные данные о поведении Al в ZnO неоднозначны. У одних авторов с увеличением концентрации Al электросопротивление пленок ZnO сначала уменьшается, а свыше 1 ат.% сопротивление возрастает [9]. У других исследователей [7] с ростом концентрации Al сопротивление пленок ZnO растет непрерывно, по мнению авторов за счет выхода примеси в междоузлия решетки ZnO. Однако, по данным работы [14] добавление в ZnO примеси Al от 1 до 5 об.% приводит к монотонному росту электропроводности пленок ZnO и при 5 об.% Al проводимость чистого ZnO удваивается. Во всех цитируемых статьях количество примеси Al в пленках ZnO определялось не экспериментальным, а расчетным путем по содержанию Al в прекурсор.

Цель данной работы — исследование влияния количества примеси Al в пленках ZnO на структуру, морфологию, электрические и оптические свойства пленок ZnO, синтезированных ионно-лучевым распылением керамических мишеней в атмосфере аргона. Определение оптимальной концентрации Al в пленках ZnO необходимо для их применения в качестве прозрачных электропроводящих покрытий в составе солнечных элементов и других изделий электроники.

2. Изготовление образцов и методика эксперимента

Тонкие пленки ZnO с примесью Al изготавливались методом ионно-лучевого распыления составной керамической мишени [15] размером 280×80 мм, и содержащей керамические бруски ZnO площадью 80×10 мм, полученные методом сухого прессования порошка ZnO (ЧДА). На поверхности мишени ZnO закреплялись с переменным шагом тонкие полоски корунда Al_2O_3 шириной 3 мм в количестве 5 штук. В качестве подложек использовались предметные стекла (10 штук) размером 25×75 мм. Распыление осуществлялось в атмосфере Ar чистотой 99.992%. Неравномерное расположение навесок корунда на поверхности мишени ZnO позволило в одном технологическом режиме осаждения получить различные концентрации легирующего элемента (Al) в пленке ZnO в зависимости от положения подложки относительно керамической мишени (Рис. 1).

Толщина синтезированных пленок измерялась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4, элементный состав образцов контролировался методом энергодисперсионного анализа вторичных электронов с помощью электронно-зондовой приставки INCA x-sight (Oxford Instruments) к электронному микроскопу JEOL JSM-6380LV. Фазовый состав пленок исследовался методом рентгеновского дифракционного анализа на установке Bruker D2 Phaser с обработкой данных при помощи программы Bruker DIFFRAC SUITE EVA 3.0. Морфология пленок контролировалась методом атомно-силовой микроскопии на установке FemtoScan-1. Оптические свойства образцов исследовались с помощью двухлучевого спектрофотометра СПЕКС ССП-715М, электрические параметры пленок ZnO измерялись четырехзондовым методом (установка ВИК-УЭС).

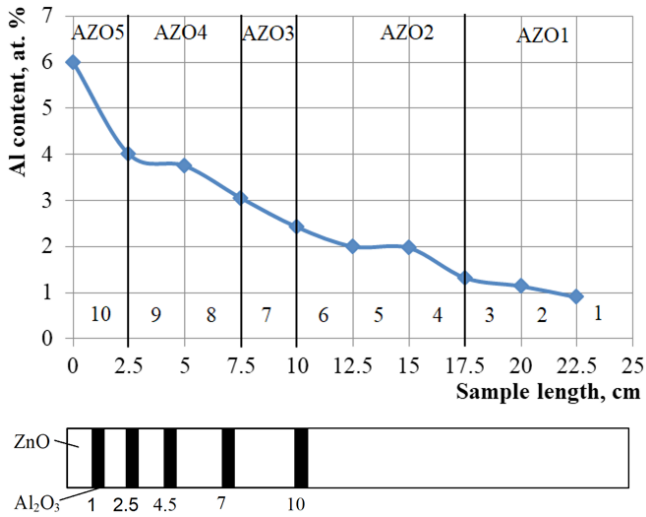


Рис. 1. Распределение содержания примеси Al по длине подложки. Все 10 стеклянных подложек размещены на длине 25 см. Вверху обозначена группа образцов со средним количеством алюминия в ZnO от 1 до 5 ат.%. Внизу — схема размещения корундовых вставок (темные полосы шириной 3 мм) на мишени из ZnO.

Fig. 1. The distribution of the content of Al impurities along the substrate. All 10 glass substrates are placed at a length of 25 cm. Above is indicated a group of samples with an average amount of aluminum in ZnO from 1 to 5 at.%. Below — layout of corundum inserts (dark zones width 3 mm) on a ZnO target.

3. Элементный состав и структура пленок

Использование составной керамической мишени и выбранные режимы ионно-лучевого распыления позволили получить в одном технологическом процессе распределение в 10 образцах ZnO примеси Al по данным энергодисперсионного анализа с концентрацией от 1 до 6 ат.%. (Рис. 1). Стеклянная подложка содержала 10 образцов пленок ZnO шириной 2.5 см каждый с различным количеством примеси Al. Все образцы были разбиты на 5 групп со средним содержанием Al от 1 до 5 ат.%. и обозначены как AZO1 (1 ат.% Al), AZO2 (2 ат.% Al), AZO3, AZO4 и AZO5. Толщина пленок составляла 2 ± 0.2 мкм и возрастала с уменьшением концентрации алюминия в пленках ZnO (Табл. 2). Уменьшение толщины пленок в местах увеличения числа навесок корунда, возможно, обусловлено меньшей скоростью распыления корундовой мишени по сравнению с керамикой ZnO.

Для определения фазового состава полученных слоев был проведен рентгеноструктурный анализ образцов ZnO-Al. Дифрактограммы были получены на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser с использованием медного излучения ($\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1.54 \text{ \AA}$). Обработка результатов проводилась в программе DIFFRAC SUITE Eva 3.0 с кристаллографическими базами данных ICDD PDF-2 2012 и TOPAS 4.2.

Анализ полученных дифрактограмм (Рис. 2) показал, что тонкие пленки ZnO характеризуются одной кристаллической фазой с гексагональной решеткой вюрцита (пространственная группа P63mc). Сравнивая интенсивности рефлексов с данными карточки

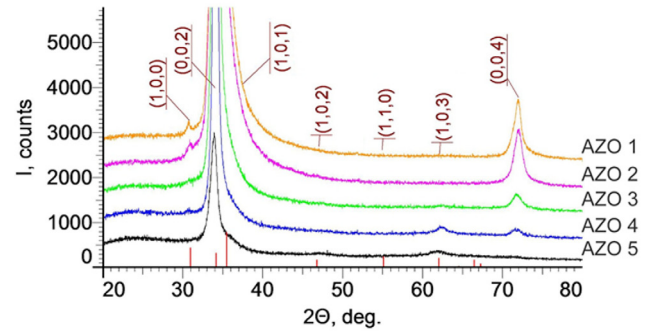


Рис. 2. (Color online) Картины дифракции рентгеновских лучей от тонких пленок ZnO-Al с различным содержанием Al.

Fig. 2. (Color online) X-ray diffraction patterns from thin ZnO-Al films with different Al contents.

PDF 01-070-8070 базы данных ICDD PDF 2012 можно сделать вывод, что пленки ZnO-Al являются сильно текстурированными с осью текстуры $\langle 001 \rangle$, что на дифрактограммах Рис. 2 проявляется в виде увеличения интенсивностей от рефлексов (002) и (004).

Оценка размеров кристаллитов проводилась по формуле Шеррера

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cdot \cos\theta}, \quad (1)$$

где D — средний размер кристаллов, K — безразмерный коэффициент формы частиц (постоянная Шеррера), λ — длина волны рентгеновского излучения, β — ширина рефлекса на полувысоте (в радианах), θ — угол дифракции (брегговский угол). Результаты приведены в Табл. 1 и на Рис. 3.

По причине присутствия на дифрактограммах малого количества пиков, не удается разделить вклад микронапряжений и размера частиц в уширение рефлексов, поэтому размеры кристаллитов были определены в предположении, что размерный эффект доминирует. При этом следует учесть, что определенный таким образом размер кристаллитов относится к направлению [001] кристаллической решетки ZnO, которое, учитывая текстурированность полученных

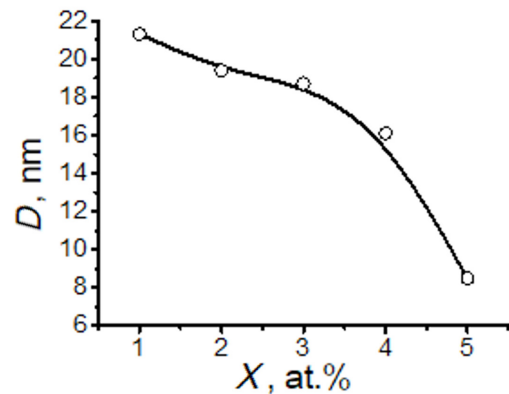


Рис. 3. Зависимость размеров кристаллитов тонких пленок ZnO-Al, определенных по формуле (1) от содержания Al в образцах.

Fig. 3. Dependence of crystallite sizes of thin ZnO:Al films, determined by formula (1) on Al content in samples.

Табл. 1. Параметры элементарной ячейки ZnO при легировании Al.
Table 1. ZnO unit cell parameters for Al doping.

Образец Sample	$a, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	$D, \text{нм}$ D, nm
AZO5	3.274	5.287	8.5
AZO4	3.266	5.268	16.1
AZO3	3.254	5.262	18.7
AZO2	3.262	5.25	19.4
AZO1	3.305	5.251	21.3

пленок, находится перпендикулярно к плоскости подложки. Таким образом, размер кристаллитов D — это размер кристаллитов ZnO, измеренный в направлении, перпендикулярном плоскости пленки. В направлениях вдоль плоскости пленки размеры кристаллитов могут отличаться. Рассчитанные параметры решетки и размеры зерен приведены в Табл. 1. Параметры решетки из базы данных: $a=3.249 \text{ Å}$; $c=5.206 \text{ Å}$. В предварительных экспериментах по напылению чистого ZnO методом ионно-лучевого распыления нами для параметров решетки a и b были получены значения 3.36 и 5.24 Å соответственно [16]. Это значительно больше параметров решетки согласно данным карточки PDF 01-070-8070: $a=3.249 \text{ Å}$; $c=5.206 \text{ Å}$, однако лучше согласуется с данными, полученными в настоящей работе.

Таким образом, рентгенофазовый анализ показал, что с увеличением концентрации Al в пленках ZnO растет величина параметра c решетки вюрцита и одновременно уменьшается средний размер зерна поликристалла. Эти результаты согласуются с данными работы [17] и подтверждаются исследованиями морфологии поверхности методом атомно-силовой микроскопии. Обработка изображений с помощью Image Analysis показала, что с увеличением концентрации Al в пленках ZnO высота неровностей пленок уменьшается. Усредненные значения высоты неровностей S уменьшаются от 16.5 нм до 6.6 нм при увеличении концентрации Al от 1 до 5 ат.% (Табл. 2). Сравнить эти численные значения с результатами расчетов размеров зерен из рентгенограммы не вполне корректно, но тенденция к уменьшению размеров зерен

поликристалла ZnO при увеличении содержания Al подтверждается.

4. Электрические свойства ZnO с примесью Al

В соответствии с данными рентгеноструктурного анализа свежеприготовленные пленки частично кристаллизованы, поэтому их электрические параметры легко измеряются. В Табл. 2 приведены значения слоевого (r_s) и удельного (ρ) сопротивления всех 10 образцов с различным содержанием примеси алюминия. Из Табл. 2 следует, что наименьшим удельным сопротивлением ($4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) обладают образцы с концентрацией Al ~ 1 ат.%. С увеличением концентрации примеси Al удельное электросопротивление образцов непрерывно увеличивается и достигает значения $260 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при 5 ат.% Al.

Увеличение электросопротивления пленок ZnO при увеличении концентрации Al более 1 ат.% наблюдалось ранее [7,9,17]. В этих работах предполагается, что 1 ат.% Al соответствует пределу растворимости атомов Al в решетке ZnO, когда трехвалентный Al^{3+} может замещать атомы двухвалентного Zn^{2+} и выступать в качестве однозарядного донора. Избыточный сверх 1 ат.% алюминий не замещает атомы Zn в узлах решетки ZnO, а размещается в междоузлиях кристаллической решетки ZnO и взаимодействует с донорными кислородными вакансиями, что уменьшает генерацию свободных носителей зарядов. Размещение избыточного Al в междоузлиях кристалла ZnO должно приводить к деформации кристаллической решетки, что подтверждается данными рентгеноструктурного анализа, свидетельствующими об искажении параметров кристаллической решетки при увеличении концентрации Al в ZnO.

В пленках ZnO с отклонением от стехиометрического состава кислородные вакансии образуют мелкий донорный уровень и являются причиной n -типа проводимости ZnO [18]. Поэтому образование комплексов $\text{Al}_i\text{-V}_o$ приводит к снижению концентрации

Табл. 2. Значения поверхностного и удельного сопротивления образцов.

Table 2. Values of surface and resistivity of samples.

Номер образца Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Al, ат.% Al, at.%	0.9	1.14	1.32	1.97	2	2.42	3.05	3.75	4	5
$r_s, \text{Ом}/\square$ $r_s, \text{Ohm}/\square$	17	18	20	65	60	100	1500	$6 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$
$d, \text{мкм}$ $d, \mu\text{m}$	2.2	2.2	2.3	2.37	2.4	2.3	2.1	1.8	1.35	1.3
Содержание Al Al content	AZO1			AZO2			AZO3	AZO4		AZO5
$S, \text{нм}$ S, nm	16.5			8.8			7.4	6.6		–
$\rho, \text{Ом} \cdot \text{см}$ $\rho, \text{Ohm} \cdot \text{cm}$	0.0037	0.004	0.005	0.008	0.014	0.023	0.315	10.8	24.3	260
n	2.03			2.01			1.84	2.04		2.05

кислородных вакансий и к уменьшению концентрации свободных носителей зарядов, что наблюдается в наших экспериментах, а также в работах [7,9,17]. При этом уменьшение концентрации заряженных донорных центров может приводить к изменению механизма рассеивания свободных носителей зарядов и к возрастанию величины подвижности электронов, что наблюдалось в работе [7].

Влияние кислородных вакансий на величину электросопротивления пленок ZnO:Al наглядно показано в работе [17], где отжиг пленок ZnO:Al в вакууме приводит к увеличению количества кислородных вакансий и к росту концентрации свободных носителей на 1–2 порядка величины в пленках ZnO, легированных примесью Al до 5 ат.%.

Из Табл. 2 следует, что пленки ZnO с концентрацией примеси Al (1÷2) ат.% характеризуются величиной удельного сопротивления $\rho = (4 \div 14) \cdot 10^{-3}$ Ом·см, что сопоставимо с удельным сопротивлением пленок ИТО ($\text{In}_2\text{O}_3 + 10\% \text{SnO}_2$), содержащих дорогостоящих индий [19] и применяемых в качестве прозрачных электропроводящих покрытий.

5. Оптические свойства пленок ZnO:Al

Все синтезированные пленки ZnO:Al прозрачны в видимом диапазоне. Спектры пропускания света некоторыми образцами AZO приведены на Рис. 4.

Все спектры характеризуются порогом пропускания света в интервале 350÷400 нм и прозрачностью в видимом диапазоне 70÷95%. Это свойство пленок AZO позволяет использовать их в прозрачной электронике и в солнечной энергетике.

Наличие интерференционных полос в спектрах пропускания обусловлено интерференцией света при отражении от поверхности пленки и от границы раздела с подложкой. При известной толщине пленок и нормальном падении света на их поверхность соответствующие расчеты [20] позволяют оценить значение коэффициента преломления n пленок AZO.

$$n = \frac{1}{2d} \frac{1}{(\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1})}, \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн, соответствующие соседним максимумам; d — толщина пленки.

В Табл. 2 представлены коэффициенты преломления n для различных образцов для длины волны 500 нм. Среднее значение $n = 1.9 \pm 0.1$, что соответствует литературным данным [21].

Спектры пропускания (Рис. 4) можно перестроить в спектры поглощения света, зная толщину пленок и учитывая прямозонную структуру оптических переходов в ZnO (Рис. 5). Из спектров поглощения можно определить ширину запрещенной зоны полупроводника и её зависимость от содержания примеси алюминия. Из результатов эксперимента следует, что примесь Al в ZnO приводит к небольшому увеличению ширины запрещенной зоны ZnO ($E_g = 3.34 \pm 0.3$ эВ), что согласуется с результатами других авторов [7,9,16], согласно

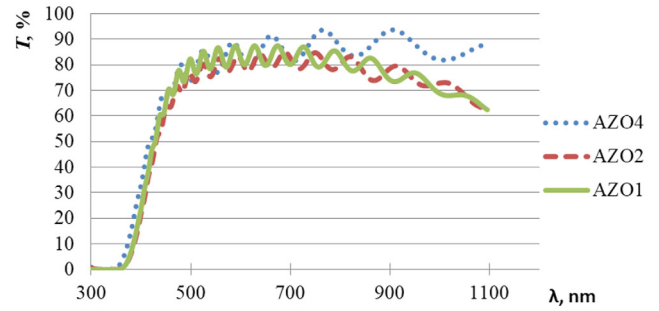


Рис. 4. (Color online) Спектры пропускания пленок ZnO:Al для образцов AZO4, AZO2, AZO1.

Fig. 4. (Color online) Transmission spectra of ZnO:Al films for samples AZO4, AZO2, AZO1.

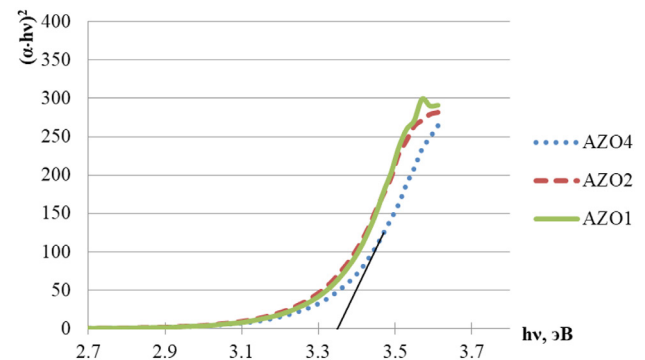


Рис. 5. (Color online) Спектры поглощения пленок ZnO:Al для образцов AZO4, AZO2, AZO1.

Fig. 5. (Color online) Absorption Spectra of ZnO:Al Films for Samples AZO4, AZO2, AZO1.

которым ширина запрещенной зоны изменяется в диапазоне 3.17÷3.37 эВ.

На всех спектрах поглощения света пленками AZO при энергиях световых квантов менее значений ширины запрещенной зоны наблюдается экспоненциальная полоса поглощения (полоса Урбаха) [20]. Полоса Урбаха объясняется переходами между хвостами зон, форма и величина которых зависит от легирования полупроводникового материала. Уширения запрещенной зоны за счет эффекта Бурштейна-Мосса [17,22] представляется маловероятным, так как с увеличением концентрации Al число свободных носителей падает, а не растет, и степень вырождения носителей в образцах ZnO уменьшается.

Из Рис. 5 также следует, что с ростом концентрации Al в ZnO увеличивается полоса Урбаха, свидетельствующая, в частности, о локальных напряжениях кристаллической решетки [20]. В работе [7] проведены расчеты значений энергии Урбаха и показано, что вклад разупорядочения в пленке ZnO растет с увеличением концентрации Al.

6. Заключение

Методом ионно-лучевого распыления в атмосфере аргона составных керамических мишеней в одном технологическом режиме изготовлены пленки ZnO с содержанием Al от 1 до 5 ат.% Свежеприготовленные

пленки частично кристаллизованы, характеризуются одной фазой с гексагональной решеткой вюрцита с увеличенными параметрами a и c . Оценка размеров зерен из рентгенограмм показала, что с увеличением концентрации Al от 1 до 5 ат.% средний размер зерен уменьшается от 21.3 нм до 8.5 нм. Такая же тенденция наблюдается по результатам анализа морфологии поверхности с помощью атомно-силовой микроскопии.

Измерение электрических параметров пленок ZnO с примесью Al показало, что наименьшим удельным сопротивлением $\rho \sim 4 \cdot 10^{-3}$ Ом·см обладают образцы с 1 ат.% Al, которые могут использоваться в качестве токопроводящих прозрачных ($T \sim 80 \div 90\%$ в видимом диапазоне) покрытий в прозрачной электронике и в солнечной энергетике. Рассмотрена возможная причина увеличения электросопротивления пленок ZnO при возрастании концентрации Al более 1 ат.% за счет образования комплексов Al_i-V_o . Оптические свойства пленок ZnO:Al показали их высокую прозрачность в видимом диапазоне света ($T \sim 80 \div 90\%$) и небольшое увеличение ширины запрещенной зоны по мере увеличения концентрации Al. Приведена оценка величины коэффициента преломления ZnO:Al, и получены значения $n = 1.9 \pm 0.1$.

Таким образом, пленки ZnO с 1÷2 ат.% примеси Al по своим электрическим и оптическим свойствам могут служить заменой дорогостоящих пленок ГТО ($In_2O_3 + 10\% SnO_2$), использующихся в качестве проводящих прозрачных покрытий и оптических окон в фотовольтаике.

Литература/References

- Z. L. Wang, J. Phys. Condens. Matter 2016. 16, 829 (2004). [Crossref](#)
- S. T. Shishiyanu, T. S. Shishiyanu, O. I. Lupan. Sens. Actuator B-Chem. 107, 379 (2005). [Crossref](#)
- J. F. Wager. Science. 300, 1245 (2003). [Crossref](#)
- L. J. Mandalapu, Z. Yang, S. Chu, J. L. Liu. Appl. Phys. Lett. 92, 122101 (2008). [Crossref](#)
- K. L. Foo, M. Kashif, U. Hashim, W. W. Liu. Ceram Int. 40, 753 (2014). [Crossref](#)
- Y. Liu, Y. Li, H. Zeng. J. Nanomater. 2013, 196521 (2013). [Crossref](#)
- T. Jannanea, M. Manoua, A. Liba, N. Fazouan, A. El Hichou, A. Almagoussi, A. Outzourhit, M. Chaik. J. Mater. Environ. Sci. 8 (1), 160 (2017).
- N. A. Lashkova, A. I. Maximov, A. A. Ryabko, A. A. Bobkov, V. A. Moshnikov, E. I. Terukov. Semiconductors. 50, 1254 (2016). (in Russian) [Н. А. Лашкова, А. И. Максимов, А. А. Рябко, А. А. Бобков, В. А. Мошников, Е. И. Теруков. Физика и техника полупроводников. 50 (9), 1276 (2016).] [Crossref](#)
- F. Choikh, Y. Beggah, M. S. Aida. Int. J. Thin Film Sci. Tech. 3 (2), 51 (2014). [Crossref](#)
- P. Gondoni, M. Ghidelli, F. Di Fonzo, V. Russo, P. Bruno, J. Marth-Rujas, C. E. Bottani, A. Li Bassi, C. S. Casari. Thin Solid Films. 520, 4707 (2012). [Crossref](#)
- X. Wang, X. Zeng, D. Huang, X. Zhang, Q. Li. J. Mater. Sci. Mater. Electron. 23, 1580 (2012). [Crossref](#)
- A. A.-G. Farrag, M. Balboul. J. Sol-Gel Sci. Technol. 82, 269 (2017). [Crossref](#)
- J. C. Fan, K. M. Srekanth, Z. Xie, S. L. Chan, K. V. Rao. Prog. Mater. Sci. 58, 874 (2013). [Crossref](#)
- A. D. Pogrebnyak, A. A. Muhammed, E. T. Karash, N. Y. Jamil, J. Partyka. Przegląd Elektrotechniczny. 89 (3), 315 (2013).
- I. V. Babkina, O. V. Zhilova, Y. Y. Kalinin, V. A. Makagonov, O. I. Remizova, A. V. Sitnikov. Letters on Materials. 8 (2), 196 (2018). (in Russian) [И. В. Бабкина, О. В. Жилова, Ю. Е. Калинин, В. А. Макагонов, О. И. Ремизова, А. В. Ситников. Письма о материалах. 8 (2), 196 (2018).] [Crossref](#)
- I. S. Pyaushev, Yu. E. Kalinin, V. A. Makagonov, S. Yu. Pankov, A. V. Sitnikov. Bulletin of Voronezh state technical University. 13 (5), 100 (2017). (in Russian) [И. С. Ильяшев, Ю. Е. Калинин, В. А. Макагонов, С. Ю. Панков, А. В. Ситников. Вестник Воронежского государственного технического университета. 13 (5), 100 (2017).]
- S. Mridha, D. Basak. J. Phys. D. Appl. Phys. 40, 6902 (2007). [Crossref](#)
- W. H. Hirschwald. Acc. Chem. Res. 18 (8), 228 (1985). [Crossref](#)
- C.-L. Tang, H.-Y. Lin, C.-K. Chang, C.-J. Tang. Adv. Condens. Matter Phys. 2018, 2647282 (2018). [Crossref](#)
- J. I. Pankove. Optical processes in semiconductors. New Jersey, Englewood Cliffs (1971) 422 p.
- N. Baydogan, T. Ozdurmuglu, H. Cimenoglu. Defect and Diffusion Forum. 334–335, 290 (2013). [Crossref](#)
- I. Juhnevica, M. Masonkina, G. Mezinskis, A. Gabrene. Material Science and Applied Chemistry. 31, 33 (2015). [Crossref](#)