

УДК 539.234:621.52

Получение оптических пленок оксида цинка магнетронным распылением на постоянном и переменном токе

О. Д. Вольпян, Ю. А. Обод, П. П. Яковлев

Исследовано влияние концентрации кислорода и давления плазмообразующего газа на элементный состав и оптические свойства пленок окиси цинка, полученных магнетронным распылением Zn-мишени и в Ar:O₂-среде постоянным и импульсным током ультразвуковой частоты. Изложены вычислительные процедуры для определения дисперсионных зависимостей показателей преломления и поглощения и ширины запрещенной зоны.

PACS: 52.25.-b

Ключевые слова: магнетронное распыление, оптические свойства, пленки оксида цинка.

Введение

Оксид цинка обладает уникальной совокупностью физических свойств, обеспечивающих применение этого материала как базового при разработке различных оптоэлектронных приборов. Благодаря химической инертности, временной стабильности, устойчивости к атмосферному воздействию и относительной дешевизне пленки ZnO применяются в качестве низкоомных прозрачных в видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра покрытий. В частности, в легированных донорной примесью (Al, Ga) пленках оксида цинка при оптимизации условий изготовления удается достичь удельного сопротивления $\rho \approx (2-5) \cdot 10^{-4}$ Ом·см [1—4]. Эта величина сопоставима с сопротивлением пленок ИТО-сплава (In:10 вес. % Sn), традиционно применяемых для этих целей. Пленки ZnO применяются в качестве слоев пьезоэлектриков в приборах на поверхностных акустических волнах (звуконпроводы, фильтры, резонаторы, линии задержки) [5—7]. Способность в нагретом состоянии адсорбировать кислород из атмосферы с изменением проводимости позволяет использовать пленки ZnO в качестве сенсоров в газоаналитических приборах.

В последние годы интенсивно исследуются люминесцентные свойства пленок ZnO в целях создания твердотельных источников и приемников излучения в синей и ультрафиолетовой областях спектра [8—11].

Известно, что физические свойства пленок решающим образом определяются условиями их

роста. Этим обстоятельством объясняются активные исследования пленок ZnO, полученных различными методами: импульсным лазерным испарением, испарением электронным лучом, газофазным осаждением, молекулярной эпитаксией.

Большой интерес представляет осаждение пленок ZnO с помощью различных модификаций метода магнетронного распыления, допускающего сравнительно простое управление параметрами технологического процесса в целях получения пленок с требуемыми структурой и уровнем легирования.

В работе исследовались элементный состав и оптические свойства пленок оксида цинка как базового материала, изготовленных магнетронным распылением Zn-мишени в аргонокислородной среде постоянным и переменным током ультразвуковой частоты.

Технологическое оборудование и измерительная аппаратура

Пленки оксида цинка изготавливались с помощью планарного магнетронного источника с диаметром Zn-мишени, равным 140 мм, выполненного в виде моноблока, смонтированного в вакуумной камере установки ВУ-1А [12]. Мишень располагали в горизонтальной плоскости, причем расстояние до поверхности подложки в экспериментах составляло ~55 мм. Магнитная система, состоящая из центрального магнита диаметром 40 мм, и периферийного кольца, собранного из магнитов диаметром 10 мм (марка КС-37), обеспечивала остаточную индукцию магнитного поля в зоне эрозии 0,08—0,1 Тл. Зона эрозии в форме кольца имела внешний диаметр, равный 110 мм, и ширину около 10 мм. Строго говоря, магнетронный источник такой конструкции магнитного поля не является полностью сбалансированным, поскольку объем центрального магнита приблизительно на

Вольпян Олег Дмитриевич, начальник лаборатории.
Обод Юрий Александрович, ведущий инженер.
Яковлев Петр Петрович, ведущий научный сотрудник.
ФГУП «НИИ "Полус"» им. М. Ф. Стальмаха.
Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3.
Тел. (495) 720-54-64. E-mail: o.d.volpian@rambler.ru.
Статья поступила в редакцию 10 сентября 2009 г.

30 % меньше объема периферийных. В этом случае магнитный поток, создаваемый периферийными магнитами, только частично замыкается на центральном магните.

Таким образом, магнитное поле существует не только у поверхности мишени, но и в пространстве между мишенью и подложкой, т. е. область ионизации рабочего газа увеличивается, вследствие чего возрастает плотность ионного тока на подложку. Использование магнетронного источника с несбалансированным магнитным полем обеспечивает модификацию свойств пленки на стадии роста путем ее бомбардировки компонентами плазмы [13].

Анодом служил корпус установки, а подложкодержатель в технологическом процессе находился под "плавающим" потенциалом, т. е. ток, проходящий через арматуру, равен нулю. При этом на изолированном подложкодержателе возникает потенциал отрицательного автосмещения, увеличивающий отношение потока ионов к потоку нейтральных атомов. Такой режим стимулированного ионного осаждения приводит к росту температуры подложки и, следовательно, плотности растущей пленки.

Установка была дополнительно оснащена аппаратурой контроля давления плазмообразующего газа в вакуумной камере (смесь аргона и кислорода) на базе ионизационного преобразователя ПМИ-10-2, допускающего длительную эксплуатацию в кислородосодержащей среде. Узел транспортировки газа обеспечивал напуск O_2 с помощью игольчатого натекавателя и Ag через автоматически управляемый пьезострикционный вакуумный клапан [14]. Заметим, что применение игольчатого натекавателя в данном случае вполне допустимо, поскольку давление кислорода в вакуумной камере в экспериментах находилось в пределах 0,2—0,9 мТорр, что не оказывало заметного влияния на скорость откачки диффузионного насоса.

Электропитание магнетрона осуществлялось асимметричными биполярными импульсами прямоугольной формы, формируемыми стабилизированным источником тока с частотой ~ 22 кГц. При этом отношение токов отрицательной части импульсов, обеспечивающей зажигание и поддержание магнетронного разряда, к положительной части составляло приблизительно 9:1. Подобная схема питания магнетронного источника практически исключает образование электрических дуг на поверхности мишени, а также в значительной степени решает проблему "исчезающего" анода [15].

Стабилизация тока разряда I_{dis} осуществлялась по схеме стабилизации тока с регулирующим дросселем. Источник питания обеспечивал плав-

ное регулирование I_{dis} в пределах 0—2 А при действующем значении напряжения разряда U_{dis} до 1,5 кВ. Напряжение U_{dis} главным образом определяется величиной индукции магнитного поля и давлением рабочего газа.

Поскольку в конструкции магнетронного источника использовали постоянные магниты, то для стабилизации мощности разряда требуется жесткий контроль транспортировки и давления рабочего газа в вакуумной камере. Измерение переменного тока I_{dis} и напряжения U_{dis} осуществляли термопарным методом, поскольку выходное напряжение генератора имеет форму, отличную от синусоидальной. Для распыления мишени постоянным током в источнике питания предусмотрена мостовая схема выпрямления.

Известно, что процессу нанесения пленки предшествует стадия "тренировки" мишени, позволяющая очистить поверхность мишени от загрязнений, возникающих при напуске в вакуумную камеру воздуха. Кроме того, при нанесении многослойных покрытий происходит также загрязнение мишени продуктами распыления материалов другими магнетронными источниками. В этом случае использование источника питания со стабилизацией тока разряда имеет явные преимущества, поскольку по изменению напряжения разряда на ранних стадиях технологического процесса можно уверенно контролировать время "тренировки" мишени и степень ее очистки. Обычно напряжение разряда стабилизируется по истечении 2—3 мин.

В качестве подложек были использованы стеклянные пластины (К8) диаметром 40 и толщиной 1,5 мм. Спектральные зависимости коэффициента пропускания чистой подложки $T_S(\lambda)$ и образцов с пленкой $T(\lambda)$ измеряли на спектрофотометре Perkin-Elmer 330 при нормальном падении излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 0,35—1,2$ мкм. Измерение $T_S(\lambda)$ позволяет учесть разброс значений показателей преломления подложек, связанный с качеством стекла и обработкой их поверхностей.

В установке смонтирован резистивный нагреватель подложек, обеспечивающий предварительный локальный нагрев их до 400 °С. В настоящей работе исследуемые пленки наносились без предварительного нагрева подложек. Термопарные измерения показали, что в технологическом процессе подложки нагреваются до 60—70 °С.

Элементный состав пленок исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-6480LV с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии INCA ENERGY Dry Cool. Сканирование выполнялось в областях размером 100×100 мкм, не содержащих заметных микродефектов на обзорной фотографии. Ускоряющее напряжение состав-

ляло 10—12 кВ, при котором практически исключалось влияние материала подложки (в спектрах люминесценции исследуемых образцов пленок атомная концентрация кремния, входящего в состав стекла, не превышала 1 %).

Особенности распыления Zn-мишени в реакционной среде

При магнетронном распылении оптическое качество оксидных пленок определяется в основном концентрацией реакционного газа в вакуумной камере и мощностью разряда, а при распылении металлической мишени в кислородосодержащей среде наблюдается характерное изменение напряжения разряда U_{dis} как функции концентрации O_2 в плазмообразующем газе.

Если давление газовой смеси ($P_{O_2} + P_{Ar}$) в вакуумной камере и ток разряда I_{dis} поддерживаются постоянными, то при увеличении концентрации кислорода величина U_{dis} сначала возрастает, достигая максимального значения, а затем уменьшается до значений, часто более низких, чем первоначальное, соответствующее распылению мишени в чистом аргоне. Концентрацию кислорода, при которой величина U_{dis} достигает максимального значения, можно считать оптимальной с точки зрения получения оксидных пленок, по составу близких к стехиометрическому, при максимальной скорости роста [12]. Зависимости $U_{dis}(c)$, где $c = P_{O_2}/(P_{O_2} + P_{Ar})$, полученные распылением Zn-мишени при разных значениях давления газа и величины импульсного тока, приведены на рис. 1.

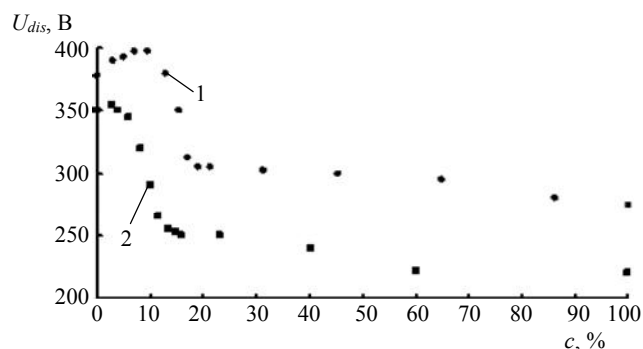


Рис. 1. Зависимость напряжения разряда от содержания кислорода в плазмообразующем газе:

1 — $I_{dis} = 0,9$ А, $P_{(Ar+O_2)} = 3,8$ мТорр; 2 — $I_{dis} = 0,6$ А, $P_{(Ar+O_2)} = 5,2$ мТорр

Из рис. 1 следует, что при $I_{dis} = 0,9$ А оптимальное содержание кислорода в смеси составляет ~13 %. Уменьшение тока разряда и увеличение давления плазмообразующего газа приводят к уменьшению оптимальной концентрации кислорода (см. рис. 1, кривая 2).

В табл. 1 приведены значения скорости роста V пленок ZnO, полученные при различных условиях. При увеличении давления плазмообразующего газа и фиксированной величине тока разряда наблюдается уменьшение V , особенно это заметно при распылении на постоянном токе. Такое явление объясняется уменьшением мощности разряда, обусловленное ростом концентрации заряженных частиц в плазме, и в меньшей степени рассеянием атомов распыленного материала на атомах и ионах плазмообразующего газа.

Таблица 1

Условия получения пленок ZnO и их свойства

Образец	P , мТорр	I_{dis} , А	W , Вт	V , Å/с	O(K), ат. %	Zn(L), ат. %	E_g , эВ
Z21	3,4	0,8(~)	253	8,5	45,7	54,2	—
Z22	3,8	0,8(~)	231	8,7	45,7	54,2	—
Z23	5,3	0,8(~)	226	8,6	45,4	54,6	—
Z24	6,5	0,8(~)	217	7,6	45,9	54,1	—
Z25	8,6	0,8(~)	207	9,0	45,2	54,8	—
Z6-2	3,2	1(~)	305	11,2	—	—	3,38
Z6-3	4,1	1(~)	294	10,4	—	—	3,36
Z6-1	5,9	1(~)	283	9,4	—	—	3,38
Z6-4	7,6	1(~)	283	9,5	—	—	3,43
Z5-1	3,3	1(=)	305	11,7	—	—	3,42
Z5-2	4,9	1(=)	300	10,7	—	—	3,40
Z5-3	6,3	1(=)	295	10,6	—	—	3,39
Z5-4	7,7	1(=)	300	11,6	—	—	3,41

В работе [16] исследовались свойства пленок ZnO, полученных при $I_{dis} = 0,25$ А и вариациях давления газовой смеси в пределах 22,5—75 мТорр с концентрацией кислорода $c = 1—3,3$ %.

Скорость роста пленок при этом была почти на порядок меньше полученных в настоящей работе. Отметим, что параметры технологического процесса, указанные в работе [16], характерны для катодного распыления материалов.

С увеличением содержания кислорода в газовой смеси и при фиксированном токе разряда наблюдается уменьшение скорости роста пленки, связанное с формированием оксидной пленки на поверхности мишени. На окисление последней указывает также наличие гистерезиса на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) магнетронного разряда.

На рис. 2 показано изменение напряжения разряда при увеличении и уменьшении импульсного тока в газовой смеси Ar : 20 об.% O₂.

Характерно, что с уменьшением I_{dis} величина U_{dis} оказывается несколько больше во всем диапазоне изменения тока разряда. Это прямо указывает на то, что скорость распыления пленкообразующего материала зависит от состояния мишени. Обычно данная проблема решается "тренировкой" мишени, предшествующей нанесению пленки на подложку. Из рис. 2 также видно, что при низком давлении газовой смеси эта разница особенно заметна, тогда как при больших значениях $P_{(Ar+O_2)}$ этот эффект выражен слабее. Заметим, что наличие гистерезиса на ВАХ характерно для реакционных процессов, особенно при распылении материалов на постоянном токе [17].

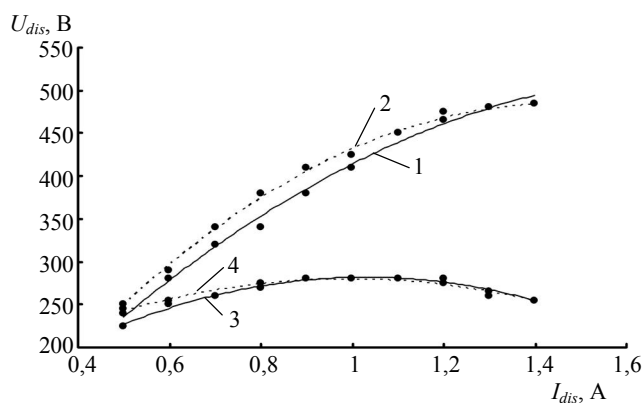


Рис. 2. ВАХ магнетронного разряда при распылении Zn-мишени переменным током в смеси Ar : 20 об.% O₂, P = 3,8 мТорр — при увеличении (1) и уменьшении (2) тока; P = 8,2 мТорр — при увеличении (3) и уменьшении (4) тока

При фиксированной величине I_{dis} увеличение давления плазмообразующего газа приводит к снижению величины U_{dis} . Это обусловлено ростом концентрации ионов кислорода в результате неуп-

ругой диссоциации его молекул в плазме магнетронного разряда. Рост концентрации положительных ионов O⁺ можно объяснить тем, что энергия сродства для атомов кислорода составляет 3,6 эВ, что существенно меньше энергии их ионизации (первый потенциал ионизации кислорода равен 13,6 эВ).

В табл. 1 приведен также элементный состав пленок ZnO как функция параметров технологического процесса (давления Ar : 20 об.% O₂ — газовой смеси и мощности разряда).

Из табл. 1 следует, что пленки, синтезированные при указанных условиях, имеют избыток атомов цинка, причем концентрации атомов цинка и кислорода в пленке практически не меняются при вариациях давления газовой смеси в довольно широких пределах. Наличие кислородных вакансий, а также несвязанных атомов цинка, являющихся донорной примесью, объясняют тот факт, что в естественном состоянии оксид цинка является полупроводником с проводимостью n-типа.

Оптические свойства пленок оксида цинка

К основным оптическим параметрам пленкообразующего материала относятся дисперсионные зависимости показателей преломления $n(\lambda)$ и поглощения $k(\lambda)$, входящих в действительную $\epsilon_1 = n^2 - k^2$ и мнимую $\epsilon_2 = 2nk$ части комплексной диэлектрической проницаемости, а также оптическая ширина запрещенной зоны E_g . Величина k , характеризующая степень затухания электромагнитной волны в материале, связана с коэффициентом экстинкции α известным соотношением $\alpha = 4\pi k/\lambda$ [см⁻¹]. Обычно эти параметры пленок вычисляются из спектров пропускания и отражения, а также измерений ее толщины.

В данной работе исследовались пленки толщиной $d = 0,3—0,7$ мкм. На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов пропускания пленок ZnO, нанесенных на стеклянную подложку распылением Zn-мишени в газовой смеси (Ar : 20 об.% O₂) постоянным и переменным током. Из анализа спектральных характеристик следует, что в длинноволновой части спектра максимальные значения коэффициента пропускания экспериментальных образцов совпадают с коэффициентом пропускания чистой подложки. Это означает, что в этой части спектра в пленках отсутствуют потери, связанные с поглощением и рассеянием излучения, которое удается зарегистрировать фотометрическим методом. Кроме того, пленки характеризуются однородным по толщине показателем преломления.

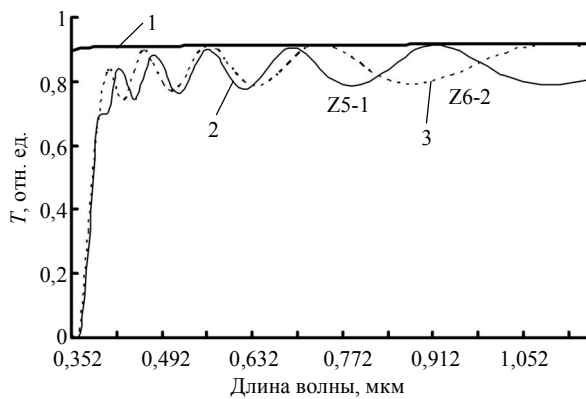


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента пропускания чистой подложки (1) и подложки с пленкой ZnO, полученных: 2 — на постоянном (образец Z5-1) и 3 — на переменном (образец Z6-2) токе

Измерения коэффициента пропускания образцов в поляризованном свете показали, что он не изменяется при вращении поляризатора, т. е. исследуемые пленки являются изотропными. Эти свойства определяют математическую модель, использованную при расчетах параметров пленок [18].

Оптические постоянные пленок в спектральной области прозрачности и их геометрическую толщину определяли из решения задачи аппроксимации, которое включает два этапа: определение вида интерполяционных формул и последующее вычисление входящих в них коэффициентов.

В качестве интерполяционных формул для описания дисперсионных зависимостей показателей преломления и поглощения использовали следующие формулы [19]:

$$n(\lambda) = A + B\lambda^{-2} + C\lambda^{-4}; \quad (1)$$

$$k(\lambda) = P \cdot \exp(-Q\lambda). \quad (2)$$

Коэффициенты в формулах (1) и (2), а также толщину пленки d вычисляли путем минимизации целевой функции $F[n(\lambda_i), k(\lambda_i), d]$, оценивающей среднеквадратичное отклонение текущей спектральной характеристики от измеренной, нормированное на число точек дискретизации i спектрального интервала. Минимизация выполнялась методом покоординатного спуска с поиском локального минимума по каждой координате по алгоритму "золотого сечения".

Тестирование вычислительной программы показало, что с ее помощью удается достаточно точно определять толщину пленки (с погрешностью менее 1 %). Однако в силу малой величины k относительная погрешность ее вычисления Δk может составлять несколько сотен процентов. Заметим, что абсолютные значения показателя поглощения зависят от выбора интерполяционной функции. Для уточнения значений k использовался следующий

прием. После вычисления массивов $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ и толщины пленки значение d фиксировалось, и вычислительная процедура повторялась. При этом поиск экстремума целевой функции $F[n(\lambda_i), k(\lambda_i)]$ выполнялся в более узкой области. Компьютерное моделирование показало, что такой прием позволяет уточнить значения показателя преломления, а погрешность Δk уменьшить более чем на порядок. При этом величина Δk оказывается соизмеримой с точностью определения поглощения в диэлектрических пленках, например фототермическим методом [20].

На рис. 4 приведены дисперсионные зависимости показателей преломления и поглощения пленок ZnO (образцы Z21 и Z24), полученных при разном давлении плазмообразующего газа (см. табл. 1). Видно, что зависимость $n(\lambda)$ имеет нормальный характер, свойственный оксидам металлов в спектральной области прозрачности. При этом показатель преломления пленок ZnO с увеличением давления газа мало меняется, оставаясь в пределах 1,9—2,15. Этот результат согласуется с данными, приведенными в работах [16, 21]. В работе [13] даны результаты исследований оптических и структурных свойств пленок ZnO, полученных при вариациях давления аргонокислородной плазмы в интервале 0,13—0,16 мТорр.

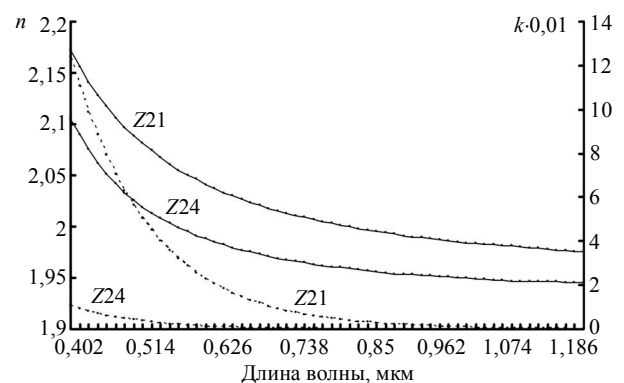


Рис. 4. Дисперсионные зависимости: — — — — — показателей преломления; - - - - - поглощения образцов Z21 и Z24

Значения n , вычисленные по интерференционному максимуму коэффициента отражения в диапазоне длин волн $\lambda = 0,4—0,45$ мкм, лежали в интервале 2,33—2,82. Как правило, значительное увеличение показателя преломления в пленках оксидов металлов наблюдается при дефиците кислорода. При этом резко возрастает показатель поглощения пленки, данные о котором отсутствуют в упомянутой работе. Из рис. 4 также следует, что показатель поглощения как характеристика пленкообразующего материала более чувствителен к вариациям давления рабочего газа, что характерно для диэлектрических пленок, применяемых для оптических целей.

Оптическую ширину запрещенной зоны E_g пленки можно оценить на основе анализа спектра пропускания в области края фундаментального поглощения материала. Коэффициент экстинкции в этом случае вычисляется по формуле $T \approx \exp(-\alpha d)$, являющейся вариантом записи закона Бугера [22].

Известно характеристическое выражение, связывающее мнимую часть диэлектрической проницаемости полупроводникового материала с энергией падающего фотона E [23]. При этом выражение в соответствии со структурой пленки (аморфная или кристаллическая), а также типом оптических переходов между энергетическими зонами записывается в виде

$$f_{\tau,\sigma}(E) \equiv \varepsilon_2'' E^{\tau+\sigma} = A(E - E_g), \quad (3)$$

где A — постоянная, зависящая от эффективной массы электрона;

τ и σ — параметры, определяемые формой зоны проводимости и валентной зоны.

Для кристаллических полупроводников $\tau = \sigma$, в то же время для прозрачных проводящих оксидов $\sigma = 0$. При этом для прямых переходов полагается $\tau = 2$.

Из формулы Бугера вычислим $\alpha(T) = -\ln(T)/d$. Тогда, принимая во внимание выражение для ε_2'' , соотношение (3) можно записать в следующем виде:

$$f_{\tau,\sigma}(\alpha) \equiv [\alpha(T)]^2 E^2 = A_0(E - E_g), \quad (4)$$

где $A_0 = A_0(A, n, \lambda)$.

Теперь ширина запрещенной зоны определяется путем экстраполяции линейного участка на графике функции $f^2(E)$ до пересечения с осью абсцисс (т. е. при выполнении условия $(\alpha \cdot E)^2 = 0$). На рис. 5 показаны зависимости $f^2(E)$ для образцов пленок оксида цинка Z5-1 и Z6-2. Согласно данным табл. 1, у пленок ZnO, изготовленных распылением на постоянном токе, величина E_g больше, чем у пленок, полученных при импульсном распылении мишени. Отметим, что какой-либо связи между давлением рабочего газа и величиной E_g не имеется.

Следует обратить внимание на ограничения процедуры определения оптической ширины запрещенной зоны, основанной на измерении спектров пропускания. Необходимо отметить, что в формуле Бугера не учитываются многократные отражения световой волны от границ пленки и вызванные этим интерференционные явления. Кроме того, величина α описывает суммарные потери, связанные с поглощением и рассеянием излучения в материале пленки, т. е. $\alpha = \alpha_a + \alpha_s$. При выводе соотношения (4) по умолчанию полагается, что $\alpha = \alpha_a$, а рассеянием излучения пренебрегаем.

Однако отметим, что пленки оксида цинка толщиной более 1,5—2 мкм, полученные в наших экспериментах, имели визуально фиксируемое рассеяние, связанное с увеличением размеров кристаллитов. Заметное рассеяние наблюдалось даже на сравнительно тонких пленках (~0,5 мкм) при их нанесении на предварительно нагретые (до 200 °С) подложки.

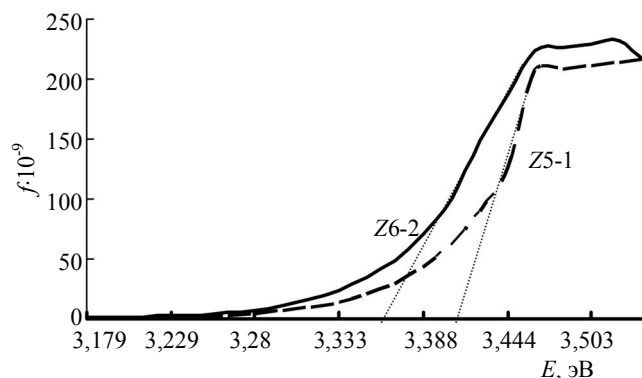


Рис. 5. К оценке ширины запрещенной зоны пленок ZnO

Пленки ZnO обычно осаждают на предварительно нагретые подложки, а легированные пленки иногда подвергаются дополнительной термообработке. В табл. 2 указана температура подложки и приведены значения ширины запрещенной зоны и размер кристаллитов пленок ZnO, осажденных разными способами.

Таблица 2

Метод изготовления и некоторые параметры пленок ZnO

Метод изготовления	$T, ^\circ\text{C}$	Размер кристаллитов, Å	$E_g, \text{эВ}$	Источник
Магнетронный (ВЧ)	400	175–375	3,27–3,26	[24]
Пиролиз	400	400	3,27	[21]
Магнетронный (постоянный ток)	390	250–550	3,24–3,32	[16]
Магнетронный (ВЧ)	500	150–370	3,27	[9]
Магнетронный (ВЧ)	150	–	3,30–3,64	[3]
Лазерное испарение		160–420	3,28–3,64	[8]

Из табл. 2 следует, что размер кристаллитов в пленках лишь на порядок меньше длин волн, в диапазоне которых определяется ширина запрещенной зоны. При увеличении давления рабочего газа наблюдается повышение шероховатости поверхности пленки [9].

Таким образом, при построении графика $f^2(E)$ используются завышенные значения коэффициента экстинкции. Кроме того, при экстраполяции функции $f^2(E)$ имеет место субъективный фактор,

связанный с оценкой степени линейности участка на графике этой функции. Тем не менее, ввиду простоты изложенная процедура оказывается полезной при оценке величины E_g полупроводниковых пленок при оптимизации технологических режимов их получения.

Заключение

Описано оборудование с магнетронным источником распыления, источниками его питания и средствами контроля давления и транспортировки рабочего газа в вакуумную камеру для получения оптических пленок.

Определены оптимальные условия распыления Zn-мишени с точки зрения получения пленок ZnO по элементному составу, близких к стехиометрическому при максимальной скорости роста.

Исследованы оптические свойства пленок ZnO, в том числе дисперсия показателей преломления и поглощения, а также ширина запрещенной зоны в зависимости от режимов распыления.

Отмечено, что в пленках, синтезированных при варьировании концентрации кислорода в плазмообразующем газе, сохраняется избыток атомов цинка. Это объясняет тот факт, что в естественном состоянии оксид цинка является полупроводником с проводимостью n -типа.

Литература

1. Minami T., Nanto H., Shooji S., Takata S.// Thin solid films. 1984. V. 111. No. 2. P. 167.
2. Ghos S., Sarkar A., Chaudhuri S., Pal A. K.// Vacuum. 1991. V. 42. No. 10/11. P. 645.
3. Jayaraj M. K., Antony A., Ramachandran M.// Bull. Mater. Sci., 2002. V. 25. No. 3. P. 227.
4. Kon M., Keun P. K., Shigesato Y., Frash P., Akio M., Susuki K.// Japanese J. Appl. Phys. 2002. V. 41. P. 814.

5. Зима В. Н., Белянин А. Ф.// Техника средств связи. Сер. ТПО. 1987. Вып. 1. С. 71.

6. Белянин А. Ф., Кривченко В. А., Лопав Д. В., Павлушкин Л. В., Пащенко П. В. и др.// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2006. № 6. С. 48—55.

7. Liu D.-S., Wu C.-Y., Sheu C.-S., Tsai F.-C., Li C. H.// Japanese J. Appl. Phys. 2006. V. 45. P. 3531.

8. Новодворский О. А., Горбатенко Л. С., Панченко В. Я., Храмова О. Д. и др.// Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. Вып. 4. С. 439.

9. Кривченко В. А., Лопав Д. В., Пащенко П. В., Пирогов В. Г., Рахимов А. Т. и др.// Журнал техн. физики. 2008. Т. 28. Вып. 8. С. 107.

10. Грузинцев А. Н., Волков В. Т., Бартохоу К., Беналул П.// Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. Вып. 6. С. 741.

11. Грузинцев А. Н., Волков В. Т., Якимов Е. Е.// Там же. 2003. Т. 37. Вып. 3. С. 275.

12. Кошеверский Е. В., Левчук Е. А., Новопащин В. В., Яковлев П. П.// Лазерная техника и оптоэлектроника. 1993. Вып. 3—4. С. 55.

13. Сердобинцев А. А., Веселов А. Г., Кирясова О. А.// Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42. Вып. 4. С. 496.

14. Вольянян О. Д., Яковлев П. П.// Оптический журнал. 1999. № 1. С. 79.

15. Вольянян О. Д., Кузьмичев А. И.// Прикладная физика. 2008. № 3. С. 34.

16. Subramanyam T. K., Srinivasulu Naidu B., Uthanna S.// Cryst. Res. Technol. 2000. V. 35. No. 10. P. 1103.

17. Вольянян О. Д., Яковлев П. П., Мешков Б. Б., Обод Ю. А.// Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 9. С. 88.

18. Яковлев П. П., Мешков Б. Б. Проектирование интерференционных покрытий. — М.: Машиностроение, 1986. — 186 с.

19. Вольянян О. Д., Яковлев П. П.// Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 92. № 1. С. 116.

20. Temple P. A.// Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1986. V. 652. P. 272.

21. Gümüs G., Ozkendir O. M., Kavak H., Ufuktere Y.// Journal of optoelectronics and advanced materials. 2006. V. 8. No. 1. P. 299.

22. Сереленко М. М.// Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 1. С. 29.

23. Demichelis F., Kariadakis G., Tagliaferro A., Tresso E.// Appl. Opt. 1987. V. 26. No. 9. P. 1737.

24. Lan W., Liu Y., Zhang M., Wang B., Yan H., Wang Y.// Materials letters. 2007. V. 61. P. 2262.

Fabricating the optic films from zinc oxide by magnetron sputtering on direct and alternating current

O. D. Volpian, Yu. A. Obod, P. P. Yakovlev

M. F. Stelmakh Research Institute "Polyus", 3 Vvedensky str., Moscow, 117342, Russia

E-mail: o.d.volpian@rambler.ru

Consideration is made to influence of oxygen and pressure of plasma-generating gas on element composition and optical features of the zinc oxide films fabricated by magnetron sputtering a zinc target in Ar:O₂ medium.

PACS: 52.25.-b

Keywords: magnetron sputtering, optical features, films of zinc oxide.

Bibliography — 24 references.

Received 10 September 2009