

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Gorczyca, I.* Size effects in band gap bowing in nitride semiconducting alloys / I. Gorczyca [et. al.] // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83. №15. P. 153301.
2. *Wu, J.* When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives / J. Wu // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. №1. P. 011101.
3. *Thakur, J.S.* Influence of on the absorption edge of InN thin films: The band gap value / J.S. Thakur [et. al.]// Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76. №3. P. 035309.

## УПРАВЛЯЕМОЕ МАГНЕТРОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ИНДИЯ - ОЛОВА ИТО С ОПТИМАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

**В. А. Зайков, А. П. Бурмаков, В. Н. Кулешов, О. Р. Людчик**

---

*Белорусский государственный университет, valery48@tut.by*

## ВВЕДЕНИЕ

Благодаря сочетанию высокой прозрачности и почти металлической проводимости пленки оксида индия – олова (ИТО – Indium-Tin Oxide) широко применяются в качестве прозрачных электродов для фотоприемников, солнечных батарей, устройств отображения информации. Основной технологической проблемой формирования пленки ИТО является выбор между проводимостью и прозрачностью, поскольку увеличение толщины и концентрации носителей заряда увеличивает проводимость материала, но уменьшает его прозрачность.

Следует отметить, что в работах, посвященных магнетронному осаждению ИТО [1,2], процесс проводился при фиксированном расходе кислорода и аргона с использованием стабилизированных источников питания разряда при «оксидном» состоянии катода, что позволяло наносить пленки не любого, а только близкого к стехиометрическому оксиду состава. Осаждение пленок ИТО стехиометрического состава можно проводить только в условиях стационарного поддержания неравновесного состояния катода, что приводит к необходимости управления в реальном времени расходом кислорода.

Основной задачей настоящей работы является определение оптимальных параметров осаждения, которые позволяют достичь высокой воспроизводимости химического состава пленок ИТО, соответственно, их низкого удельного сопротивления и высокой степени прозрачности.

## МЕТОДИКА МАГНЕТРОННОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК ИТО

Воспроизводимость химического состава пленок оксидов можно обеспечить путем управления расходом кислорода и аргона при постоянной мощности разряда. Управление расходом аргона осуществлялось с помощью обратной связи между выходным сигналом вакуумметра и сигналом на натекатель аргона, что позволяет поддерживать в вакуумной камере постоянное давление аргонкислородной смеси. Для управления расходом кислорода можно использовать зависимости интенсивностей спектральных линий оптического излучения разряда от содержания кислорода в вакуумной камере [3]. Для управления процессом осаждения ИТО использовалась спек-

трально чистая линия In 451,1 нм. Использование электрического сигнала пропорционального интенсивности линии In в качестве параметра управления позволило с большой точностью поддерживать состав осаждаемых пленок ИТО. В данной работе контроль и управление процессом реактивного магнетронного нанесения пленок ИТО проводили по одноканальному алгоритму работы прибора спектрального управления СПУ [3].

Для осаждения пленок ИТО использован планарный магнетрон постоянного тока. В работе использовалась мишень следующего состава: In 85 % Sn 15 %. Остаточное давление в разрядной камере распыления равнялось  $1 \times 10^{-3}$  Па. Суммарное давление рабочего газа в разрядной камере поддерживалось на заданном уровне 0,5 Па (точность поддержания 2 %), путем управления расходом аргона по сигналу вакуумметра. Ток разряда составлял величину 2,0 А, точность поддержания - 5 %. Основным параметром, определяющим свойства пленок ИТО, является степень реактивности процесса. Степень реактивности  $\alpha$  определялась из спектроскопических характеристик разряда по формуле [3]:

$$\alpha = \frac{I_0 - I}{I_0 - I^*}, \quad (1)$$

где  $I_0$  - интенсивность атомной линии металла мишени (для индия  $\lambda = 451,1$  нм);  $I$  - текущая величина интенсивности линии металла при осаждении;  $I^*$  - интенсивность линии металла для полностью оксидированной мишени.

В настоящей работе степень реактивности процесса  $\alpha$  варьировалась от 0,60 до 0,80 (точность поддержания 1,5 %).

Определение удельного электрического сопротивления проводилось на пленках ИТО, нанесенных на стеклянные подложки. Удельное электрическое сопротивление рассчитывалось по значению слоевого сопротивления  $R_{\square}$  и толщины пленки  $h$ . Измерение  $R_{\square}$  проводилось с помощью четырехзондового прибора "Omnimap RS30", а толщина пленки определялась с помощью сканирующего профилометра "α-step" с алмазной иглой. Коэффициент пропускания пленки измерялся с помощью спектрофотометра "UV-vis". Компонентный состав пленок исследовался методами обратного резерфордовского рассеяния.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В сводной таблице приведены результаты по компонентному составу, электрофизическим характеристикам и коэффициенту оптического пропускания пленок ИТО.

Таблица

Данные спектроскопии обратного резерфордовского рассеяния, электрофизические и оптические характеристики пленок ИТО

№ обр.	$\alpha$ , от.ед.	O, ат.%	In, ат.%	Sn, ат.%	толщ, ат/см <sup>2</sup>	толщ. нм.	$R_{\square}$ , Ом/□	$\rho$ , $10^{-4}$ Ом.см	T, %
1	0,58	57,2	36,5	6,5	$2,30 \times 10^{18}$	295	150,0	43,2	42,4
2	0,63	57,8	35,8	6,4	$1,90 \times 10^{18}$	243	95,2	23,1	58,5
3	0,69	58,4	35,4	6,2	$1,70 \times 10^{18}$	218	52,0	11,3	85,5
4	0,715	59,5	48,4	6,1	$1,40 \times 10^{18}$	178	32,5	5,8	93,0
5	0,75	59,8	34,2	6,0	$1,30 \times 10^{18}$	165	80,3	13,2	94,4

Зависимость удельного сопротивления пленок ИТО от степени реактивности  $\alpha$  имеет четко выраженный минимум. Минимальное значение слоевого сопротивления  $R_{\text{омин}} = 32,5 \text{ Ом}/\square$  для пленок толщиной 180 нм. При этом величина реактивности  $\alpha = 0,71$ . Минимальное значение удельного сопротивления  $\rho = 5,8 \times 10^{-4} \text{ Ом}/\square$ .

Вторым по значению параметром, определяющим свойства ИТО в процессе нанесения, является температура подложки. Удельное электрическое сопротивление пленок ИТО в интервале температур от комнатной до 200 – 210 °С имеет резкий линейный спад, который меняется на пологую линейную зависимость в диапазоне 300–450 °С. Степень реактивности  $\alpha$  влияет на величину спада и на предельное значение удельного сопротивления. Наименьшие значения удельного сопротивления получены в диапазоне 320 – 360 °С при степени реактивности  $\alpha = 0,715$ .

Структурные и фазовые исследования тонкопленочных слоев ИТО проводились методами просвечивающей электронной микроскопии и электронной дифракции с помощью электронного микроскопа ЭМ-125. Пленки ИТО, осажденные при комнатной температуре являются аморфными. Кристаллическая структура проявляется при температуре подложки порядка 200 – 250 °С. Наибольшее кристаллическое совершенство (однородная мелкодисперсная структура с размером зерна 20–30 нм, минимум дефектов и резко очерченные границы) соответствует пленкам ИТО, полученным при степени реактивности  $\alpha = 0,715$ .

На рисунке 1 представлены зависимости спектрального коэффициента пропускания слоев ИТО на стеклянных подложках для оптимального значения  $\alpha$ .

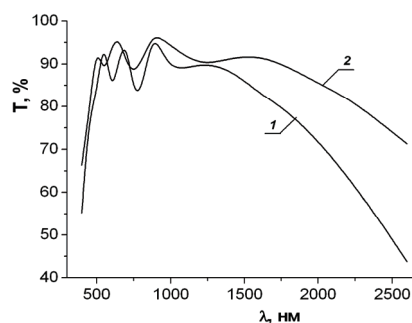
Подбором толщины пленки можно повысить коэффициент пропускания в узком спектральном диапазоне порядка 50–70 нм до 95%. Увеличение толщины пленки ведет к росту поглощения в ближней ИК области спектра.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что оптическое управление расходом кислорода в процессах магнетронного распыления позволяет воспроизводимо получать пленки ИТО в широком диапазоне их электрических и оптических характеристик. Проведенные исследования позволили выбрать оптимальные режимы формирования прозрачного электрода к приборным светоизлучающим структурам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Youn J. Kim* Effect of oxygen flow rate on ITO thin films deposited by facing targets sputtering / Su B. Jin, Sung I. Kim, Yoon S. Choi // *Thin Solid Films*. 2010. Vol.518. P. 6241.
2. *Смирнова И. П.* Оптимизация технологии нанесения тонких пленок ИТО, применяемых в качестве прозрачных проводящих контактов / Марков Л.К., Павлюк А.С., Кукушкин М.В. // *Физика и техника полупроводников* 2014. Т. 48. № 1. С. 61. 2003. Т. 33. №1. С. 57.
3. *Бурмаков А. П.* Контроллер расходов газов для процессов нанесения пленок сложного состава / Бурмаков А.П., Кулешов В.Н. // *Электроника*. 2006. №5. С. 59.



Толщина  $h$  равна: 1 – 420 нм, 2 – 360 нм;  $\alpha = 0,715$ ; температура осаждения 290 °С.  
Рис. 1. Спектральный коэффициент пропускания слоев ИТО различной толщины