

# Пленки ИТО, нанесенные на кремний методом CVD

Р. Р. Кабулов<sup>а</sup>, А. Кутлимратов<sup>а</sup>, А. С. Саидов<sup>а</sup>, М. У. Хажиев<sup>а,б</sup>, Х. Н. Жураев<sup>а,б,\*</sup>

<sup>а</sup>Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан,  
г. Ташкент, 100084, Узбекистан

<sup>б</sup>Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», г. Ташкент, 100084, Узбекистан

\*e-mail: [khimmatali@gmail.com](mailto:khimmatali@gmail.com)

Поступила в редакцию 28.07.2023

После доработки 15.10.2024

Принята к публикации 22.10.2024

Усовершенствованным CVD-методом в квазизамкнутом объеме при нормальном атмосферном давлении получены пленки ИТО на поликристаллических кремниевых подложках *p*-типа проводимости путем термического разложения паров спиртовых растворов хлористого индия и хлористого олова. С целью выяснения зависимости свойств пленок ИТО от температуры подложки и соотношения  $X = \text{SnO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$  синтез слоев производился в интервале температур 170–500 °С при различных соотношениях  $X$ . Технологические режимы синтеза задавались путем регулирования температуры подложки и испарителей, на которые подаются спиртовые растворы хлоридов индия и олова, а также изменением соотношения компонентов и скорости подачи раствора. При таких условиях синтеза скорость роста пленок составляла ~0,5–1,0 мкм/час, что намного выше, чем в случае спрей-пиролиза в аналогичных условиях. Толщины пленок ИТО определялись как с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4, так и по спектру пропускания; толщины пленок составляют ~3 мкм. Исследована зависимость удельного сопротивления пленок ИТО от температуры подложки, и показано, что пленки, полученные при температурах подложки 240–260 °С, обладают относительно низким удельным сопротивлением, приемлемым для применения в солнечных элементах. Проведен анализ спектра рентгенограммы пленок ИТО путем идентификации с картой 00-006-0416 ( $\text{In}_2\text{O}_3$  cubic) из базы (JCPDS). Рассчитано среднее значение постоянной решетки, которое составляло  $a = 10,1273$  Å. Это немного больше параметра решетки чистого  $\text{In}_2\text{O}_3$  (10,1195 Å), что связано с присутствием Sn, влияющего на поведение ионов кислорода.

**Ключевые слова:** пленки ИТО, метод CVD, удельное сопротивление, кристаллическая структура, фазовый состав, дифрактограмма, параметр решетки

УДК 539.216.2:539.234,544.032.4

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.6.25>

## ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своим уникальным электрофизическим и оптическим свойствам пленки оксидов индия ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) и олова ( $\text{SnO}_2$ ) ИТО (Indium and Tin Oxide), относящиеся к оксидным полупроводникам, широко применяются в электронике, солнечной энергетике и других отраслях электронной промышленности. Пленки ИТО, содержащие 90 вес.%  $\text{In}_2\text{O}_3$  и 10 вес.%  $\text{SnO}_2$  [1], используются в качестве токопроводящих прозрачных пленок в жидкокристаллических дисплеях и мониторах [2], газовых датчиках [3–5], светоизлучающих диодах (СД) и индикаторах, в том числе и на основе органических полупроводников (OLED) [6]. Из-за высокого показателя преломления 1,97–2,06 и относительно низкого удельного сопротивления (<0,1 Ом·см) они также используются в солнечных элементах (СЭ) в качестве прозрачных антиотражающих покрытий и фронтальных прозрачных проводящих

контактов [2, 7, 8]. ИТО имеет большую ширину запрещенной зоны ( $E_g \sim 3,5\text{--}3,6$  эВ), и поэтому он прозрачен в видимой области спектра электромагнитного излучения. Тонкие пленки ИТО пропускают до 80–85% падающего на них излучения в оптическом диапазоне 450–1100 нм [9–11]. Однако, несмотря на большую ширину запрещенной зоны, материал ИТО представляет собой вырожденный полупроводник с проводимостью *n*-типа и низким удельным сопротивлением. Кроме того, свечение нанонитей ИТО, обнаруженное в последнее время [12], может служить предпосылкой для дальнейших исследований по применению пленок ИТО в СД.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Известно множество способов получения прозрачных проводящих пленок ИТО. В основном для синтеза высококачественных пленок ИТО используются высокотемпературные

методы, такие как газофазное осаждение, атомное осаждение, осаждение из жидкой дисперсионной среды и др. [13]. В работе [2] авторы получали пленки ИТО методом реактивного высокочастотного распыления с одновременной ионной обработкой, а в работах [10, 1, 14] – с помощью магнетронного распыления. Большинство исследователей для получения пленок  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{SnO}_2$  применяли золь-гель метод [15, 16], но качественные пленки ИТО получают при использовании метода CVD (Chemical Vapor Deposition – химическое парофазное осаждение) [17]. Несмотря на это, в последнее время метод CVD по неизвестным причинам почти не применяется для получения пленок ИТО. Однако мы решили использовать в этой работе метод CVD и показать возможность получения качественных пленок ИТО указанным методом.

В данном методе реагенты ( $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{SnO}_2$ ) подаются прямо на поверхность подложки, где испарившиеся молекулы  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{SnO}_2$ , термически распадаясь и вступая в реакцию между собой, синтезируют слои ИТО на поверхности подложки. Преимуществом этого метода является то, что процесс осаждения производится в квазизамкнутом объеме в кислородной среде, и так как продукт осаждения является окислом, кислород не мешает процессу осаждения. Для получения кристаллически совершенных пленок и облегчения управления составом пленки метод CVD был нами модифицирован так, что испарение каждого реагента осуществлялось из отдельного испарителя [18]. Кроме того, процесс осаждения проводился не в потоке газа-носителя, а в квазизамкнутом объеме при нормальном атмосферном давлении. Это позволяет создать большое парциальное давление каждого из компонентов, близкое к давлению насыщенных паров для данной температуры подложки [19]. Это, во-первых, позволяет увеличить скорость роста, а во-вторых, уменьшить потерю реагентов и увеличить процент использования сырья.

Пленки ИТО осаждались на поликристаллических кремниевых подложках *p*-типа проводимости толщиной 300 мкм. С целью выявления зависимости свойств пленок ИТО от температуры подложки и соотношения  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$  процесс синтеза слоев ИТО осуществлялся при температурах подложки 170–500 °С. Технологические режимы синтеза ИТО задавались путем управления температурой подложки и испарителя, на которые подаются спиртовые растворы  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{SnO}_2$ , изменением соотношения  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$  и скорости подачи раствора. Предварительно проведенные

эксперименты показали [20], что более эффективным растворителем для  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{SnO}_2$  оказался водный раствор этилового спирта, взятый в соотношении 1:1. Когда использовались водные растворы  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{SnO}_2$ , в растворе образовывались коллоидные частицы, выпадающие в осадок. Температура нижнего испарителя варьировалась в интервале 80–120 °С, которая зависела в основном от температуры подложки и скорости роста. Скорость осаждения слоев ИТО составляла порядка 0,5–1,0 мкм/час, что в несколько раз больше, чем в случае осаждения методом спрей-пиролиза в аналогичных технологических условиях.

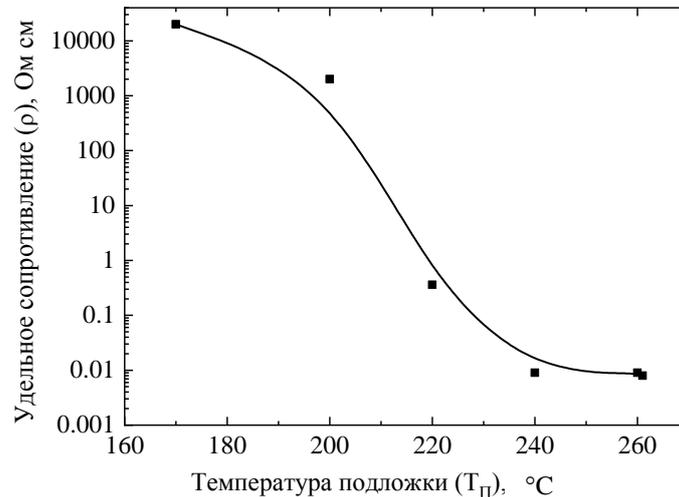
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Толщина синтезированных пленок определялась интерференционным методом на микроскопе МИИ-4 и по спектру пропускания. Определение толщины пленок по спектрам пропускания производилось по точкам экстремума на спектрах пропускания. Результаты измерений и расчетов показали, что полученные пленки ИТО имеют толщину ~ 3,0–3,5 мкм. Результаты проведенных нами расчетов хорошо согласуются с результатами определения толщины с помощью МИИ-4 в пределах погрешности (< 5%). На рис. 1 представлено изображение поверхности пленки *n*-ИТО, полученной на подложке поликристаллического кремния *p*-Si при температуре 170 °С. Как видно из рис. 1, поверхность синтезированной пленки чешуйчатая с шероховатостью, заметной невооруженным глазом, что может способствовать снижению отражения светового излучения с поверхности пленки.

Целью наших экспериментов являлось получение и изучение свойств пленок ИТО для их применения в структурах СЭ в качестве прозрачного токопроводящего контакта. Поэтому с точки зрения их практического применения необходимо знать их удельное сопротивление и коэффициент оптического пропускания, то есть прозрачность. Известно, что удельное сопротивление пленки ИТО в основном зависит от температуры подложки при синтезе [18]. Поэтому была исследована температурная зависимость удельного сопротивления от температуры подложки. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что пленки ИТО, синтезированные при температурах подложки 240–260 °С, обладают относительно более низким удельным сопротивлением, чем пленки, синтезированные при температурах



**Рис. 1.** Изображение поверхности пленки n-ITO, полученной на подложке поликристаллического кремния при температуре 240 °С.



**Рис. 2.** Зависимость удельного сопротивления пленок ITO от температуры подложки  $T_{п}$ .

ниже 240 °С. Это имеет большое значение при использовании их в качестве прозрачного токопроводящего контактного слоя в структурах СЭ.

Другими важными параметрами пленки ITO являются ее (то есть пленки) кристаллическое строение и фазовый состав, которые определяют спектральный диапазон fotocувствительности структуры, созданной на ее основе. Определение кристаллической структуры и фазового состава пленок ITO, выращенных на кремниевых подложках, проводилось методом дифракции рентгеновских лучей на дифрактометре Panalytical Empyrean с  $\text{CuK}\alpha$ -излучением ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) в диапазоне  $2\theta$  от 20 до 80° с шагом 0,01°. Экспериментальные результаты рентгенограммы пленки ITO, синтезированной (выращенной) при температуре подложки 240 °С, представлены на [рис. 3а](#).

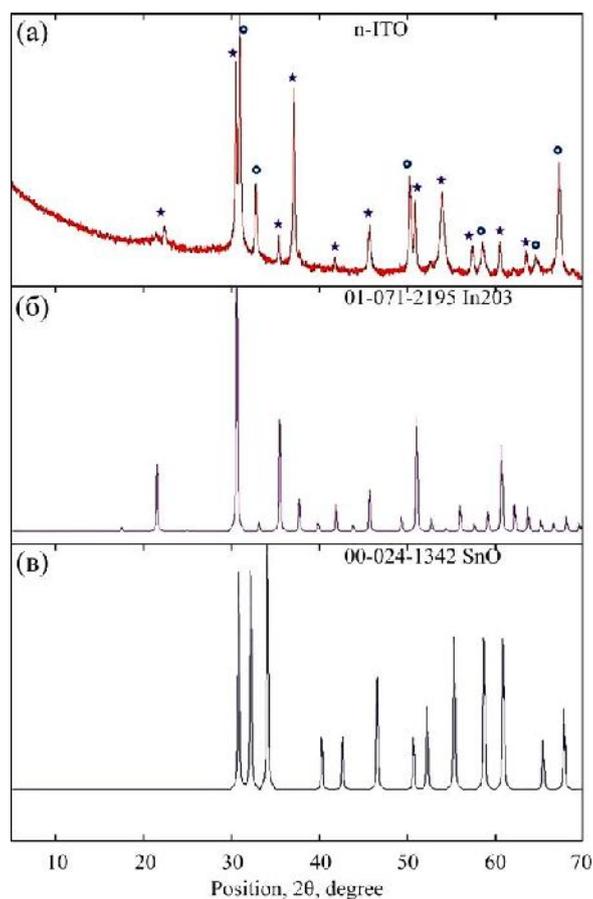
Анализ фазового состава производился путем сопоставления рефлексов наших пленок ITO с базой Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS), а также по открытой базе данных кристаллографии (COD) [21], то есть идентификация рефлексов проведена по спектрам стандартных образцов  $\text{In}_2\text{O}_3$  (карта 01-071-2195  $\text{In}_2\text{O}_3$  cubic) ([рис. 3б](#)) и SnO ([рис. 3в](#)) из базы (JCPDS) [21]. Как видно из [рис. 3а](#), полученный нами образец ITO представляет собой двухфазную структуру, обнаруживая

наряду с пиками  $\text{In}_2\text{O}_3$  пики SnO, что свидетельствует о неполноте реакции образования ITO. Острые пики указывают на то, что пленка является кристаллической и имеет кубическую структуру биксбиита. Как известно, структура биксбиита представляет собой объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку Ia3.

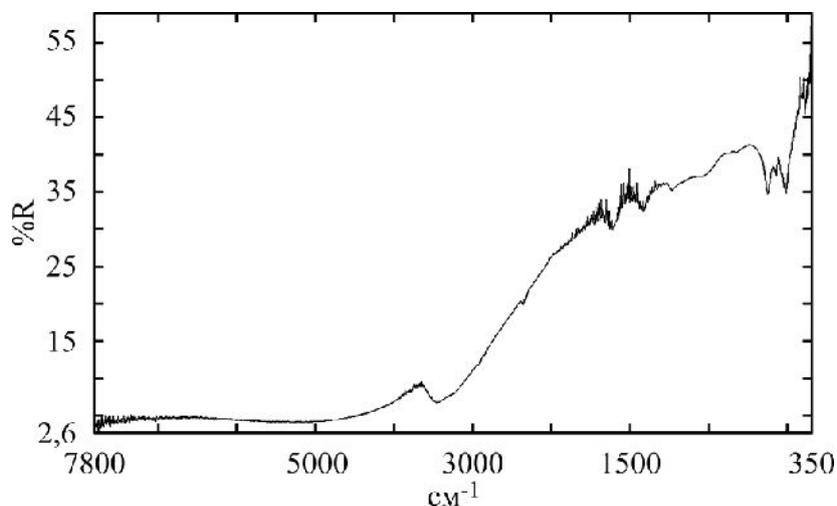
На синтезированных пленках ITO, обладающих относительно низким удельным сопротивлением и полученных при температурах подложки 240–260 °С, были исследованы спектральные зависимости коэффициента отражения. Спектры отражения изучались на ИК-Фурье-спектрометре SPECTRUM VX II (Perkin Elmer). На [рис. 4](#) представлена спектральная зависимость коэффициента отражения  $R$  пленки ITO, полученной при температуре подложки 240 °С. Коэффициент отражения пленки, полученной при температуре подложки 260 °С, имеет идентичный вид.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже было упомянуто в настоящей работе, анализ фазового состава полученных пленок производился с использованием базы Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS) [21]. На [рис. 3](#), ниже рентгенограммы синтезированной нами пленки ITO ([рис. 3а](#)), представлены также спектры стандартных



**Рис. 3.** Рентгенограммы синтезированной пленки ITO (а), а также стандартных образцов  $\text{In}_2\text{O}_3$  (карта 01-071-2195  $\text{In}_2\text{O}_3$ , cubic) (б) и SnO из базы (JCPDS) (в).



**Рис. 4.** Спектральная зависимость коэффициента отражения  $R$  пленки ITO, полученной при температуре подложки  $240\text{ }^\circ\text{C}$ .

образцов  $\text{In}_2\text{O}_3$  (карта 01-071-2195  $\text{In}_2\text{O}_3$ , cubic) и SnO из базы (JCPDS), по которым была проведена идентификация дифракционного спектра синтезированной нами пленки ITO. Острые пики показывают, что осажденная пленка является поликристаллической, обнаруживая кубическую структуру биксбиита, которая представляет собой объемно-центрированную кубическую решетку Ia3. Из рис. 3 видно, что преимущественной ориентацией кристаллитов ITO является направление (400), что свидетельствует о

наличии текстуры в исследуемых пленках, обусловленной изменением кристаллической ориентации. Известно, что изменения в преимущественной кристаллической ориентации при росте пленок оказывают влияние на их оптические и электрофизические свойства и условия активации  $\text{Sn}^{4+}$ . Для сравнения полученных нами результатов они были проанализированы с учетом результатов работ [20–23], где авторы сопоставляли отношения интенсивностей дифракционных отражений  $I_{222}/I_{400}$  полученных ими пленок ITO с

отношениями интенсивностей табличного ИТО, приведенных в ICPSDS (рис. 3б,в). В работе [22] для хаотически ориентированных зерен в стандартной пленке отношение  $I_{222}/I_{400}$  равно 3,33. Отношение  $I_{222}/I_{400}$  (рис. 3а) в выращенных нами пленках ИТО равно 0,104, что свидетельствует об имеющейся на поверхности полученной нами пленки ИТО текстуре [20–23].

Также нами были рассчитаны параметр решетки  $a$ , размеры кристаллитов и коэффициент текстуры  $T_c$ . Параметр кубической решетки  $a$  был вычислен (найден) по уравнению (1) [23, 24]:

$$a = \frac{d}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \quad (1)$$

где  $a$  – параметр решетки;  $d$  – межплоскостное расстояние,  $[hkl]$  – индексы плоскости Миллера. Размеры кристаллитов были рассчитаны из данных рентгенограмм по уравнению Дебая–Шеррера (2) [23, 24]:

$$C.S. = \frac{0,9 \times \lambda}{FWHM \times \cos \theta}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны рентгеновского  $\text{CuK}\alpha$ -излучения (1,5406 Å);  $FWHM$  – ширина пика на половине максимума;  $\theta$  – угол дифракции. Коэффициент текстуры  $T_c$  рассчитывался по уравнению (3) [23, 24]:

$$T_c = \frac{I(hkl)/I_o(hkl)}{Nr \sum I(hkl)/I_o(hkl)}, \quad (3)$$

где  $I(hkl)$  – интенсивность рентгеновского пика;  $I_o(hkl)$  – интенсивность пика  $\text{In}_2\text{O}_3$  (карта 01-071-2195  $\text{In}_2\text{O}_3$ , cubic) из базы (ICPSDS) (рис. 3б);  $Nr$  – число измеренных рентгеновских пиков.

Как видно, среднее значение постоянной решетки, рассчитанное по (1), составляет  $a = 10,1273$  Å, что немного больше, чем параметр решетки чистого  $\text{In}_2\text{O}_3$  (10,1195 Å). Это может быть связано с присутствием Sn, влияющего на поведение ионов кислорода. Как показано в [25], примеси Sn увеличивают расстояние между кислородом и катионом, но при этом расстояние между Sn и кислородом уменьшается [26]. Также в работах [25, 26] показано, что оксид индия образует сильно ориентированные кристаллиты за счет миграции дефектов и атомов примесей к границам кристаллитов. Известно, что с точки зрения термодинамики в тонких пленках преобладают плоскости с наименьшей энергией [26]. В пленках ИТО, как показано в [26], плоскость (222) является самой плотноупакованной с наибольшей энергией, а плоскость (400) имеет наименьшую энергию. Размеры кристаллитов в этой плоскости

максимальные и составляют  $\sim 8410$  Å с высоким коэффициентом текстуры  $T_c = 1,98$ .

Из рис. 4 видно, что пленки, синтезированные при температуре подложки 240 °С, имеют минимальное значение коэффициента отражения ( $R < 5\%$ ) в области длин волн  $4000 \div 7800$   $\text{см}^{-1}$ , а максимальное значение (до  $30 \div 45\%$ ) – в интервале  $350 \div 3000$   $\text{см}^{-1}$ . Для образцов с наивысшей проводимостью, полученных при температурах подложки 240–260 °С, коэффициент отражения имеет значение не менее 25% в области длин волн  $6500 \div 7800$   $\text{см}^{-1}$ , а в области  $350 \div 5000$   $\text{см}^{-1}$  возрастает до  $40 \div 75\%$  [27, 28]. Таким образом, с ростом электропроводности пленок, которая определяется температурой подложки в процессе синтеза, растет интегральное отражение как по амплитуде, так и по спектральному диапазону, в котором наблюдается отражение.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, на поликристаллических кремниевых подложках были получены поликристаллические пленки ИТО методом CVD в квазизамкнутом объеме при нормальном атмосферном давлении без газа-носителя. Исследована зависимость удельного сопротивления полученных пленок ИТО от температуры подложки и показано, что относительно низким удельным сопротивлением обладают пленки, полученные при температурах подложки 240–260 °С. Это является очень важным при использовании их в качестве токопроводящего прозрачного широкозонного «окна» для различных типов СЭ. Исследование кристаллической структуры и фазового состава методом дифракции рентгеновских лучей показало, что параметр постоянной решетки имеет значение  $a = 10,1273$  Å, которое немного больше параметра решетки чистого  $\text{In}_2\text{O}_3$  –  $a = 10,1195$  Å. Это может быть связано с присутствием олова в кристаллической структуре пленки  $\text{In}_2\text{O}_3$ , увеличивающего расстояние между кислородом и катионом In. Пленки ИТО, полученные при температурах подложки более 240 °С, имеют низкие значения коэффициента отражения в диапазоне от  $3500$   $\text{см}^{-1}$  до  $7800$   $\text{см}^{-1}$ , а начиная с  $3000$   $\text{см}^{-1}$  наблюдается рост до  $350$   $\text{см}^{-1}$ , что связано с низким удельным сопротивлением синтезированной пленки.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела полупроводников Физико-технического института АН РУз, а также

сотрудникам Национального научно-исследовательского института возобновляемых источников энергии при Министерстве энергетики РУз за помощь в процессе ведения экспериментальных исследований, а также за советы при обсуждении результатов научных исследований.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках фундаментальных исследований по тематике лабораторий «Рост полупроводниковых кристаллов» и «Полупроводникового приборостроения» Физико-технического института АН РУз.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Isiyaku, A.K., Ali, A.H., Abdu, S.G., Tahan, M., et al., Characterization and optimization of transparent and conductive ITO films deposited on n- and p-types silicon substrates, *Phys. Memoir. J. Theor. Appl. Phys.*, 2020, vol. 2, no. 1, p. 15.
- Крылов, П.Н., Закирова, Р.М., Федотов, И.В., Оптические свойства пленок ИТО, полученных высокочастотным магнетронным напылением с сопутствующей ионной обработкой, *ФТП*, 2013, т. 47, вып. 10, с. 1421.
- Румянцева, М.Н., Коваленко, В.В., Гаськов, А.М., Панье, Т., Нанокompозиты на основе оксидов металлов как материалы для газовых сенсоров, *Российский химич. журнал*, 2007, т. 51, № 6, с. 61.
- Patel, N.G., Patel, P.D. and Vaishnav, V.S., Indium tin oxide (ITO) thin film gas sensor for detection of methanol at room temperature, *Sens. Actuat. B: Chemical*, 2003, vol. 96, p. 180.
- Al-Algawi, S.D.M., Al-Jawad, S.H. and Saadoon, N.M., Physical properties of indium tin oxide (ITO) nanoparticle thin films used as gas sensor, *Eng. Tech. J.*, 2015, vol. 33, p. 141.
- Yong, T.Y., Tou, T.Y., Yow, H.K. and Safran, G., Pulsed Nd:YAG laser deposition of indium tin oxide thin films in different gases and organic light emitting device applications, *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, p. 4267.
- Ryu, K., Lee, Y.-J., Ju, M., Choi, H., et al., Optimal indium tin oxide layer as antireflection coating for crystalline silicon solar cell with shallow emitter, *Thin Solid Films*, 2012, vol. 521, p. 50.
- Park, W.-H. and Kim, J., Transparent and conductive multifunctional window layer for thin-emitter Si solar cells, *Mat. Express*, 2016, vol. 6, p. 451.
- Parida, B., Ji, H.Y., Lim, G.H., Park, S., et al., Enhanced photocurrent of Si solar cell with the inclusion of a transparent indium tin oxide thin film, *J. Renew. Sustain. Energy*, 2014, vol. 6, no. 5, art. ID 053120.
- Oka, N., Kawase, Yu. and Shigesato, Yu., High-rate deposition of high-quality Sn-doped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films by reactive magnetron sputtering using alloy targets, *Thin Solid Films*, 2012, vol. 520, p. 4101.
- Yousif, S.A., Rashid, H.G., Mishjil, K.A. and Habubi, N.F., Design and preparation of low absorbing antireflection coatings using chemical spray pyrolysis, *Int. J. Nanoelectron. Mater.*, 2018, vol. 11, no. 4, p. 449.
- Kim, H., Lee, G.-N. and Kim, J., Hybrid structures of ITO-nanowire-embedded ITO film for the enhanced Si photodetectors, *J. Nanomater.*, 2018, vol. 2018, art. ID 178989.
- Зуев, Д.А., Лотин, А.А., Новодворский, О.А., Лебедев, Ф.В., и др., Импульсное лазерное осаждение тонких пленок ИТО и их характеристики, *ФТП*, 2012, т. 46, вып. 3, с. 425.
- Ali, A.H., Hassan, Z. and Shuhaimi, A., Enhancement of optical transmittance and electrical resistivity of post-annealed ITO thin films RF sputtered on Si, *Appl. Surf. Sci.*, 2018, vol. 443, p. 544.
- Ghorannevis, Z., Akbarnejad, E. and Ghorannevis, M., Structural and morphological properties of ITO thin films grown by magnetron sputtering, *J. Theor. Appl. Phys.*, 2015, vol. 9, p. 285.
- Dong, L., Zhu, G.S., Xu, H.R., Jiang, X.P., et al., Preparation of indium tin oxide (ITO) thin film with (400) preferred orientation by sol-gel spin coating method, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 2019, vol. 30, p. 8047.
- Mayer, B., Highly conductive and transparent films of tin and fluorine doped indium oxide produced by APCVD, *Thin Solid Films*, 1992, vol. 221, no. 1–2, p. 166.
- Atabaev, I.G., Hajiev, M.U. and Pak, V.A., Growth of ITO films by modified chemical vapour deposition method, *Int. J. Thin. Fil. Sci. Tech.*, 2016, vol. 5, № 1, p. 13.
- Gaskell, J.M. and Sheel, D.W., Deposition of indium tin oxide by atmospheric pressure chemical vapour deposition, *Thin Solid Films*, 2012, vol. 520, p. 4110.
- Hajiev, M.U. and Kabulov, R.R., Features of n-SnO<sub>2</sub>/p-Si structural heterojunction manufactured by the chemical steam-gas deposition method, *Int. J. Thin. Fil. Sci. Tech.*, 2021, vol. 10, no. 2, p. 83.
- JCPDS Date Base, Intern. Center for Diffrac. Data, USA.
- Salam, A.Y. and Duha, I.K., Structural, optical and I-V characteristics of ITO/p-Si heterojunction deposited by chemical spray pyrolysis, *Int. J. Nanoelectron. Mater.*, 2020, vol. 13, no. 1, p. 145.
- Kerkache, L., Layadi, A., Dogheche, E. and Remiens, D., Physical properties of RF sputtered ITO thin films and annealing effect, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, vol. 39, no. 1, p. 184.

24. Thilakan, P., Minarini, C., Loreti, S. and Terzini, E., Investigation on the crystallization properties of RF magnetron sputtered indium tin oxide thin films, *Thin Solid Films*, 2001, vol. 388, no. 1–2, p. 34.
25. Isiyaku, A.K., Ali, A.H. and Nayan, N., Structural, optical and electrical properties of a transparent conductive ITO/Al–Ag/ITO multilayer contact, *Beilstein J. Nanotechnol.*, 2020, vol. 11, p. 697.
26. Закирова, Р.М., Разработка метода модификации свойств ИТО пленок ионно-лучевой обработкой при реактивном ВЧ-магнетронном распылении. *Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ижевск*, 2013. 22 с.
27. Крылов, П.Н., Закирова, Р.М., Федотова, И.В., Гильмутдинов, Ф.З., Влияние ионной обработки на свойства пленок  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ , *ФТП*, 2013, т. 47, вып. 6, с. 859.
28. Ali, M.K.M., Ibrahim, K., Mkawi, E.M. and Salhin A., Characterization of phosphoric acid doped N-type silicon thin films printed on ITO coated PET substrate, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2013, vol. 8, p. 535.

### Summary

Indium tin oxide (ITO) films on polycrystalline p-silicon substrates were obtained by an improved chemical vapor deposition method in a quasi-closed volume at the normal atmospheric pressure by thermal decomposition of vapors of alcoholic solutions of indium chloride and tin chloride. In order to clarify the dependence of the properties of ITO films on the substrate

temperature and the ratio  $X = \text{SnO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ , the layers were synthesized in the temperature range 170–500 °C in various X ratios solutions of indium and tin chlorides. The technological modes of the synthesis were set by controlling the temperature of the substrate and evaporators, to which alcoholic solutions of indium and tin chlorides were supplied, as well as by changing the ratio of the components and the rate of supply of the solution. Under such synthesis conditions, the film growth rate was ~ 0.5–1.0  $\mu\text{m/h}$ , which is much higher than in the case of spray pyrolysis under similar conditions. The thicknesses of ITO films were determined by using an MII-4 interference microscope and the transmission spectrum; the film thicknesses amounted to ~ 3  $\mu\text{m}$ . The dependence of the resistivity of ITO films on the substrate temperature has been studied. It was shown that the films obtained at the substrate temperatures of 240–260 °C had a relatively low resistivity, so the films are of interest for solar cells applications. The X-ray spectra of ITO films were analyzed by identification with the map 00-006-0416 ( $\text{In}_2\text{O}_3$ , cubic) from the Joint Committee on Powder Diffraction Standard database. The average value of the lattice constant was calculated, and it was  $a = 10.1273 \text{ \AA}$ , that being slightly larger than the lattice parameter of pure  $\text{In}_2\text{O}_3$  (10.1195  $\text{ \AA}$ ), which is associated with the presence of Sn that affects the behavior of oxygen ions.

*Keywords:* indium tin oxide films, chemical vapor deposition method, resistivity, crystal structure, phase composition, diffraction pattern, lattice parameter