

**К.С. Жолдыбаев^{1*}, Д.К. Кундызбай² , К.П. Аймаганбетов¹,
А.К. Шонгалова¹, С.Р. Жантуаров¹, И.А. Онгар² , Н.С. Токмолдин¹**

¹Университет Сатпаева, Физико-технический институт, Казахстан, г. Алматы,
*e-mail: k.zholdybaev@satbayev.university

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЁНОК ОКСИДА ИНДИЯ-ОЛОВА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПОТОКАХ КИСЛОРОДА

Оксид индия-олова является широко используемым материалом в современной оптике и электронике и имеет обширную область применения от антиотражающих покрытий до жидкокристаллических дисплеев. Данная работа посвящена применению плёнок оксида индия-олова в области солнечной энергетики. Плёнки были получены с помощью магнетронного напыления (PVD – physical vapour deposition). Оптимизация режимов синтеза плёнок является одной из важнейших задач для солнечной фотовольтаики. В данной работе показаны результаты исследования влияния потоков кислорода в процессе синтеза на стекле плёнок оксида индия-олова, полученных методом магнетронного напыления, а также влияние толщин полученных плёнок на их оптические и электрические свойства. Оптические свойства представлены в виде спектров пропускания. Электрические свойства представлены в виде результатов измерений удельного сопротивления, подвижности и концентрации носителей и их взаимосвязи со скоростью движения образцов, толщины и потока кислорода. Было выявлено, что характеристики плёнок оксида индия-олова зависят от потоков кислорода, а также от толщины самих плёнок. В качестве оптимизации технологического процесса был выбран отжиг плёнок при температуре 300° С.

Ключевые слова: прозрачные проводящие пленки, оксид индия олова, магнетронное напыление, гетеропереходной кремниевый солнечный элемент.

K.S. Zholdybaev^{1*}, D.K. Kundyzbai², K.P. Aimaganbetov¹,
A.K. Shongalova¹, S.R. Zhantuarov¹, I.A. Ongar², N.S. Tokmoldin¹

¹Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Kazakhstan, Almaty,
*e-mail: k.zholdybaev@satbayev.university

²Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

Investigation and optimization of optical and electric properties of indium-tin oxide films obtained by magnetron sputtering method at different oxygen flows

Indium tin oxide is a widely used material in modern optics and electronics and has a wide range of applications from antireflection coatings to liquid crystal displays. This work is devoted to the use of indium tin oxide films in the field of solar energy. Films were obtained using magnetron sputtering, using the PVD (physical vapour deposition) method. The optimization of film synthesis modes is one of the most important tasks for solar photovoltaic. In this paper, we show the results of studying the influence of oxygen fluxes during the synthesis on a glass of indium-tin oxide films obtained by magnetron sputtering, as well as the effect of the thicknesses of the obtained films on their optical and electrical properties. Optical properties are presented as transmission spectra. Electrical properties are presented in the form of results of measurements of resistivity, mobility and concentration of carriers and their relationship with the speed of movement of the samples, the thickness and flow of oxygen. It was found that the characteristics of indium-tin oxide films depend on oxygen fluxes, as well as on the thickness of the films themselves. Annealing of films at a temperature of 300 ° C was chosen as optimization of the technological process.

Key words: transparent conductive films, indium tin oxide, magnetron sputtering, heterojunction silicon cell.

Қ.С.Жолдыбаев^{1*}, Д.Қ. Құндызбай², Қ.П. Аймағанбетов¹,
А.Қ. Шонғалова¹, С.Р. Жантуаров¹, И.А. Онғар², Н.С. Тоқмолдин¹

¹Сатбаев Университеті, Физика-техникалық институты, Қазақстан, Алматы қ.,
^{*}e-mail: k.zholdybaev@satbayev.university

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

Оттектің әр түрлі ағыны кезіндегі магнетронды тозаңдату әдісімен алынған индий-қалайы оксиді қабықшасының оптикалық және электрлік қасиеттерін зерттеу және оңтайландыру

Индий-қалайы заманауи оптика және электроникадағы кеңінен пайдаланылатын материал болып табылады және кері шағылыстырушы жабындардан сұйық кристалды дисплейлерге дейін кең қолдану тәсілін құрайды. Бұл жұмыс күн энергетикасы саласындағы индий-қалайы оксидінің қабықшаларын қолдануға арналған. Қабықшалар магнетронды тозаңдату арқылы PVD тәсілімен алынды. Индий-қалайы оксидінің қабықшаларын синтездеу режимдерін оңтайландыру күнфотозэлементтерінің маңызды міндеттерінің бірі болып табылады. Бұл мақалада магнетронды шашырау арқылы алынған индий-қалайы оксидінің қабықшаларын әйнекте синтездеуде оттегі ағындарының әсерін, сондай-ақ алынған қабықшалардың қалыңдығын олардың оптикалық және электр қасиеттеріне әсерін зерттеу нәтижелері көрсетілген. Оптикалық қасиеттері өткізу спектрлері түрінде көрсетілген. Электрлік қасиеттері меншікті кедергі, қозғалыс және тасушылардың концентрациясын өлшеу нәтижелері және олардың қозғалыс жылдамдығы үлгілері, қалыңдығы және оттегі ағынымен өзара байланысы түрінде көрсетілген. Индий-қалайы оксиді қабықшаларының сипаттамалары оттегі ағындарына, сондай-ақ, өздерінің қабықшаларының қалыңдығына байланысты екендігі анықталды. Технологиялық үрдісті оңтайландыру үшін 300°C температурада қабыршақтарды жағу таңдалды. Индий-қалайы оксиді қабыршақтарының сипаттамалары оттегі ағындарына, сондай-ақ, өздерінің қабыршақтарының қалыңдығына байланысты екендігі анықталды.

Түйін сөздер: мөддір өткізгіш қабықша, индий-қалайы оксиді, магнетронды шашырау, гетеро ауысу кремний күн элементі.

Введение

Тонкие пленки оксида индия-олова (ITO–indiumtin-oxide) находят широкое применение в качестве инфракрасных отражателей, антиотражающих покрытий, антистатических покрытий, прозрачных проводящих электродов, омических контактов в светодиодах, а также при изготовлении ЖК-дисплеев, газовых датчиков, солнечных элементов [1, 2]. Пленки ITO представляют собой широкозонный полупроводник n-типа с оптической шириной запрещенной зоны (3,5-4,3 эВ) [3-5]. Получение данных пленок осуществляется с помощью ряда методов, среди которых: магнетронное напыление (радиочастотное напыление), лазерное осаждение химическое осаждение из газовой фазы, золь-гель и спрей-пиролиз [6, 7]. Среди перечисленных методов наиболее используемым является метод магнетронного напыления [8-10]. Его основными преимуществами является [11]: 1) возможность напыления на относительно большие площади, 2) возможность низкотемпературного напыления, что дает возможность использования в качестве подложек полимерные материалы, 3) работа при более низком давлении, 4) атомный состав получен-

ных пленок практически совпадает с атомным составом мишени.

Стоит отметить, важность данных пленок при производстве солнечных элементов [12-14], в частности, в производстве гетеропереходных солнечных элементов (HIT–heterojunction within intrinsic thin layer) [15]. Важность слоя ITO заключается в следующем: в процессе производства солнечных элементов по технологии HIT используется аморфный кремний собственной проводимости, который осаждается на текстурированную поверхность монокристаллической кремниевой пластины, что приводит к увеличению напряжения холостого хода солнечного элемента [16-18]. С другой стороны, аморфный кремний собственной проводимости имеет большое удельное сопротивление. Таким образом, пленка ITO, нанесенная на аморфный кремний играет роль собирающего электрода. Оптимизация электрических и оптических параметров слоя ITO [19,20] должна привести к увеличению тока короткого замыкания и коэффициента заполнения готового солнечного элемента [21, 22].

Целью данной работы является: 1) исследование влияния потока кислорода в процессе

синтеза пленок ИТО на их электрические и оптические свойства для дальнейшей оптимизации производства солнечных элементов по технологии НТТ; 2) исследование влияния толщин пленок ИТО на их электрические и оптические свойства для дальнейшей оптимизации производства солнечных элементов по технологии НТТ; 3) поиск решений по оптимизации процесса синтеза пленок ИТО.

Методика эксперимента

Синтез пленок ИТО осуществлялся на стеклянные подложки (размер $2,5 \times 2,5$ см²) на оборудовании по магнетронному напылению (PVD), входящей в состав линии АК1000 (MeyerBurger, Германия) с использованием мишени из сплава оксида индия (90%) и оксида олова (10%). Перед

осаждением пленок ИТО, стеклянные подложки подвергались тщательной очистке, которая заключалась в: 1) обработка подложек средством для очистки стекол с последующей промывкой, 2) обработка водным раствором Hellmanex в объемном соотношении 1:5 с последующей промывкой, 3) промывка в дистиллированной воде в ультразвуковой ванне в течение 30 минут, 4) промывка стекол ацетоном в ультразвуковой ванне, 5) промывка стекол изопропиловым спиртом в ультразвуковой ванне в течение 5 минут, 6) сушка стекол в инертной среде. Далее стеклянные подложки помещались в установку PVD, которая далее была откачана до давления 5×10^{-6} мбар. Синтез пленок осуществлялся при постоянном токе в атмосфере аргона и кислорода при комнатной температуре. В таблице 1 приведены параметры синтеза пленок ИТО в камере PVD.

Таблица 1 – Параметры синтеза пленок ИТО методом PVD

Мощность (Вт)	Уровень вакуума (мбар)	Рабочее давление (мбар)	Поток аргона (см ³ /с)	Поток кислорода (см ³ /с)	Длительность осаждения (мин)
2000	5×10^{-6}	100	200	4,8/5,8	10

Контроль толщин пленок осуществлялся при разных скоростях поднесения подложки к плазме (от 0,9 мм/мин до 5,9 мм/мин). Спектры пропускания пленок ИТО исследовались на установке по измерению квантовой эффективности (QEX10 (PVMmeasurements Inc.)) в диапазоне длин волн от 300 нм до 1100 нм. Измерение толщин нанесенных пленок осуществлялось методами сканирующей электронной микроскопии (JSM-6490LA (JEOL)) и эллипсометрии (Эллипс 1000-M). Измерение удельного сопротивления, концентрации носителей осуществлялось с помощью метода Ван дер Пау (HEM2000 (EGK)). Также был проведен рентгеноструктурный анализ пленок на оборудовании Дрон-6. Отжиг полученных пленок осуществлялся в муфельной печи в воздухе при температуре 300°C в течение 1 часа. Электрические и оптические свойства пленок исследовались до и после отжига.

Результаты и обсуждение

Были получены тонкие пленки оксида индия-олова при варьировании параметров потока кислорода и скорости поднесения держателя

образцов к плазме. Толщины пленок варьировались от 64 нм до 394 нм (при потоке 4,8 см³/мин) и от 75 нм до 562 нм (при потоке 5,8 см³/мин).

На рисунке 1 представлены зависимости толщин пленок от скорости поднесения подложки к плазменному разряду.

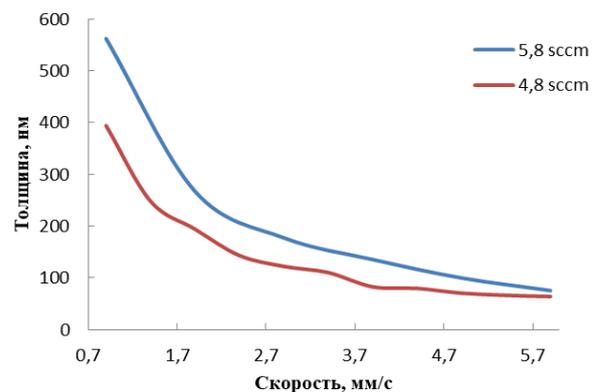


Рисунок 1 – Зависимость толщины пленок ИТО, полученных при потоках кислорода 4,8 и 5,8 см³/мин от скорости поднесения подложек к плазме

Из представленного рисунка видно, что толщина пленки увеличивается с уменьшением скорости поднесения подложки к плазменному разряду. Также отмечено, что увеличение потока кислорода с 4,8 см³/мин до 5,8 см³/мин приводит к увеличению скорости роста оксида индия-олова.

На рисунке 2 представлены спектры пропускания тонких пленок ИТО (при скорости поднесения держателя образцов 3,9 мм/с) в диапазоне длин волн от 300 нм до 1100 нм до и после отжига.

Следует отметить, что в работах [23,24] авторы указывают на то, что увеличение концен-

трации кислорода в пленке ИТО приводит к увеличению их прозрачности. Авторы связывают увеличение прозрачности ИТО с увеличением ширины запрещенной зоны пленки.

Электрические свойства полученных пленок измерялись с помощью четырехзондового метода Ван дер Пау. Увеличение потока кислорода приводит к изменению электрических свойств полученных пленок. Это связано с изменением кислородных вакансий в структуре ИТО [25,26]. В таблице 2-3 представлены электрические характеристики пленок ИТО до и после отжига.

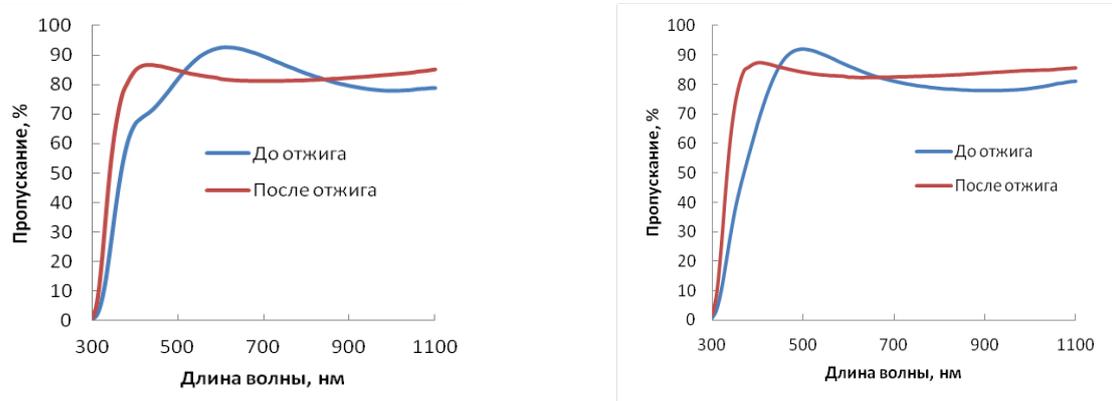


Рисунок 2 – Спектры пропускания пленок ИТО, полученных при потоках кислорода 4,8 см³/мин (слева) и 5,8 см³/мин (справа)

Таблица 2 – Электрические характеристики пленок ИТО до отжига

Поток кислорода, см ³ /мин	Скорость поднесения держателя, мм/с	Толщина, нм	Удельная концентрация носителей, см ⁻³	Подвижность, см ² /В·с	Удельное сопротивление, Ом·см
4,8	0,9	562	$2,02 \cdot 10^{20}$	3,43	$8,99 \cdot 10^{-3}$
4,8	1,9	267	$2,31 \cdot 10^{20}$	5,11	$5,28 \cdot 10^{-3}$
4,8	2,9	177,1	$3,61 \cdot 10^{20}$	6,14	$2,82 \cdot 10^{-3}$
4,8	3,9	135,2	$3,7 \cdot 10^{20}$	6,18	$2,71 \cdot 10^{-3}$
4,8	4,9	99,6	$2,88 \cdot 10^{20}$	6,83	$3,17 \cdot 10^{-3}$
4,8	5,9	75,2	$4,8 \cdot 10^{20}$	8,79	$1,48 \cdot 10^{-3}$
5,8	0,9	394	$2,83 \cdot 10^{19}$	2,11	0,1
5,8	1,9	194	$7,28 \cdot 10^{19}$	1,35	$6,35 \cdot 10^{-2}$
5,8	2,9	122	$7,78 \cdot 10^{19}$	4,28	$1,87 \cdot 10^{-2}$
5,8	3,9	75,3	$9,78 \cdot 10^{19}$	5,3	$1,2 \cdot 10^{-2}$
5,8	4,9	70,9	$9,7 \cdot 10^{19}$	4,4	$1,46 \cdot 10^{-2}$
5,8	5,9	63,8	$8,63 \cdot 10^{19}$	5,1	$1,39 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3 – Электрические характеристики пленок ИТО после отжига

Поток кислорода, см ³ /мин	Скорость поднесения держателя, мм/с	Толщина, нм	Удельная концентрация носителей, см ⁻³	Подвижность, см ² /В·с	Удельное сопротивление, Ом·см
4,8	0,9	562	$1,33 \cdot 10^{21}$	2,73	$1,72 \cdot 10^{-3}$
4,8	1,9	267	$1,99 \cdot 10^{21}$	2,3	$1,36 \cdot 10^{-3}$
4,8	2,9	177,1	$1,75 \cdot 10^{21}$	2,42	$1,47 \cdot 10^{-3}$
4,8	3,9	135,2	$8,64 \cdot 10^{21}$	4,6	$1,57 \cdot 10^{-3}$
4,8	4,9	99,6	$1,16 \cdot 10^{21}$	4,26	$1,26 \cdot 10^{-3}$
4,8	5,9	75,2	$6,39 \cdot 10^{21}$	7,4	$1,32 \cdot 10^{-3}$
5,8	0,9	394	$4,54 \cdot 10^{20}$	7,04	$1,95 \cdot 10^{-3}$
5,8	1,9	194	$3,42 \cdot 10^{20}$	9,45	$1,93 \cdot 10^{-3}$
5,8	2,9	122	$1,39 \cdot 10^{21}$	2,8	$1,6 \cdot 10^{-3}$
5,8	3,9	75,3	$6,72 \cdot 10^{20}$	3,08	$1,71 \cdot 10^{-3}$
5,8	4,9	70,9	$7,66 \cdot 10^{20}$	3,86	$2,11 \cdot 10^{-3}$
5,8	5,9	63,8	$5,19 \cdot 10^{20}$	4,68	$2,57 \cdot 10^{-3}$

Из представленных данных видно, что поток кислорода сильно воздействует на удельное сопротивление пленок ИТО. При потоке 4,8 см³/мин с ростом толщины удельное сопротивление меняет свое значение от $1,48 \cdot 10^{-3}$ Ом·см до $8,99 \cdot 10^{-3}$ Ом·см. Удельное сопротивление пленок ИТО при потоке 5,8 см³/мин меняет свое значение от $1,39 \cdot 10^{-2}$ Ом·см до 0,1 Ом·см. Увеличение сопротивления с ростом толщины может быть связано с занятием кислородных вакансий кислородом во время отвода подложек от плазмы. После

проведения процесса отжига электрические характеристики пленок улучшились. Уменьшение удельного сопротивления пленок после проведения отжига связано с увеличением удельной концентрации носителей, что в свою очередь связано с изменением степени кристалличности пленок.

Результаты рентгеноструктурного анализа пленки ИТО (при скорости поднесения держателя образцов 3,9 мм/с), полученных при различных потоках кислорода до и после отжига представлены на рисунках 3-4.

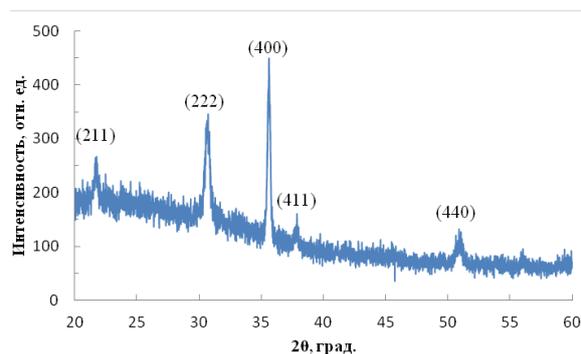
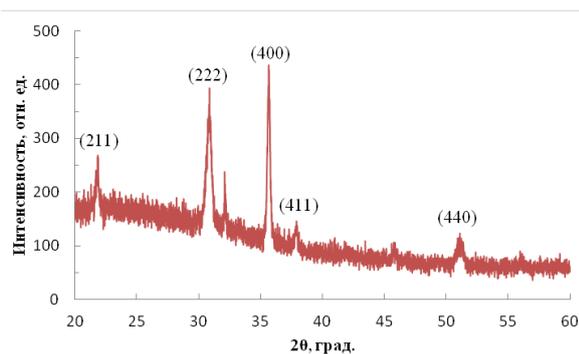


Рисунок 3 – Данные по рентгеноструктурному анализу пленки ИТО полученной при потоке кислорода 4,8 см³/мин

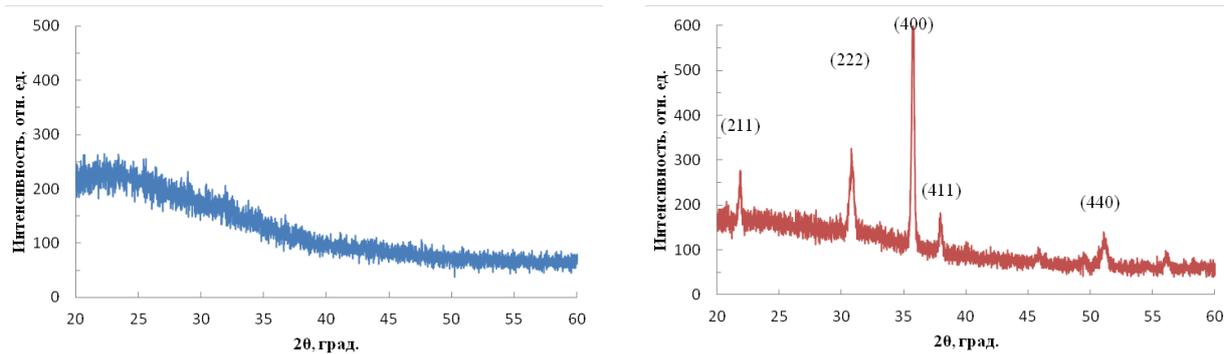


Рисунок 4 – Данные по рентгеноструктурному анализу пленки ИТО полученной при потоке кислорода $5,8 \text{ см}^3/\text{мин}$

Из представленных данных видно, что присутствие кислорода сильно влияет на степень кристалличности пленок. Пленки, полученные при потоке $4,8 \text{ см}^3/\text{мин}$, обладают поликристаллической структурой. Увеличение потока кислорода до $5,8 \text{ см}^3/\text{мин}$ приводит к образованию аморфной структуры пленок. Как видно из рисунка 2 отжиг пленок незначительно изменяет кристаллические структуры пленок. Однако для пленок, полученных при потоке кислорода величиной $5,8 \text{ см}^3/\text{мин}$, отжиг приводит к значительным структурным изменениям. Наиболее видимые пики для обеих пленок соответствуют пикам (400), (222), (211), (411). Данные пики соответствуют кубической структуре пленок ИТО [27].

Заключение

Были получены пленки ИТО методом магнетронного напыления при различных потоках

кислорода. Исследованы оптические, электрические и структурные свойства пленок ИТО. В результате проведенных работ были получены следующие выводы:

- 1) Изменение потока кислорода приводит к значительным изменениям электрических и структурных характеристик пленок;
- 2) Отжиг пленок при температуре 300°C приводит к изменению структурных и электрических характеристик пленок.

Планируется исследование влияния отжига пленок ИТО напыленных на гетеропереходной кремниевый солнечный элемент на электрические и оптические свойства готового устройства.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках проектов ИРН AP05133651 и BR05236404.

Литература

- 1 Caricato A. P. et al. Electrical and optical properties of ITO and ITO/Cr-doped ITO films // Applied Physics A. – 2010. – Vol. 101. – № 4 – P. 753-758.
- 2 Смирнова И. П. и др. Оптимизация технологии нанесения тонких пленок ИТО, применяемых в качестве прозрачных проводящих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48. – № 1. – С. 61-66.
- 3 Wohlmuth W. and Adesida I., Properties of R.F. magnetron sputtered cadmium-tin-oxide and indium-tin-oxide thin films // Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 479. – P. 223-231.
- 4 Terzini E., Thilakan P., Minarini C. Properties of ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering at elevated substrate temperature // Materials Science and Engineering: B– 2000. – Vol. 77. – №. 1. – P. 110-114.
- 5 Крылов П. Н., Закирова Р. М., Федотова И. В. Оптические свойства пленок ИТО, полученных высокочастотным магнетронным напылением с сопутствующей ионной обработкой // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – № 10. – С. 1421-1424.
- 6 Марков Л. К. и др. Способ получения пленок ИТО с контролируемым значением показателя преломления // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50. – № 7. – С. 1001-1006.

- 7 Daza L. G. et al. Tuning optical properties of ITO films grown by rf sputtering: Effects of oblique angle deposition and thermal annealing //Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2019. – Vol. 29. – № 12. – P. 2566-2576.
- 8 Мешковский И. К., Плясов С. А. Фотоэлектрический и фотомагнитный отклик пленок оксида индия-олова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 6. – С. 969-975.
- 9 Амосова Л. П., Исаев М. В. Магнетронное напыление прозрачных электродов ITO из металлической мишени на холодную подложку //Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. – № 10. – С. 127-132.
- 10 Ghorannevis Z., Akbarnejad E., Ghorannevis M. Structural and morphological properties of ITO thin films grown by magnetron sputtering //Journal of Theoretical and Applied Physics. – 2015. – Vol. 9. – №. 4. – P. 285-290.
- 11 Shi F. Introductory Chapter: Basic Theory of Magnetron Sputtering. – IntechOpen, 2018.
- 12 Sibin K. P. et al. Design and development of ITO/Ag/ITO spectral beam splitter coating for photovoltaic-thermoelectric hybrid systems //Solar Energy. – 2017. – Vol. 141. – P. 118-126.
- 13 Bett A. J. et al. Semi-Transparent Perovskite Solar Cells with ITO Directly Sputtered on Spiro-OMeTAD for Tandem Applications //ACS applied materials & interfaces. – 2019. – Т. 11. – №. 49. – С. 45796-45804.
- 14 Wei Z. et al. Efficient and semi-transparent perovskite solar cells using a room-temperature processed MoO_x/ITO/Ag/ITO electrode //Journal of Materials Chemistry C. – 2019. – Vol. 7 – №. 35. – P. 10981-10987.
- 15 Zhang D. et al. Influence of ITO deposition and post annealing on HIT solar cell structures //Energy Procedia. – 2011. – Vol. 8. – P. 207-213.
- 16 Fujishima D. et al. High-performance HIT solar cells for thinner silicon wafers //35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – Honolulu, 20-25 June, 2010. – P. 003137-003140.
- 17 Теруков Е.И., Абрамов А.С., Андроников Д.А., Емцев К.В., Панайотти И.Е., Титов А.С., Шелопин Г.Г. Исследование характеристик гетеропереходных солнечных элементов на основе тонких пластин монокристаллического кремния //Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т.52. – № 7. –С.792-795.
- 18 Jin-Hua G. et al. Indium–tin oxide films obtained by DC magnetron sputtering for improved Si heterojunction solar cell applications //Chinese Physics B. – 2015. – Vol. 24. – №. 11. – P. 117703.
- 19 Sofi A. H., Shah M. A., Asokan K. Structural, optical and electrical properties of ITO thin films //Journal of Electronic Materials. – 2018. – Vol. 47. – №. 2. – P. 1344-1352.
- 20 Marikkannan M. et al. Effect of ambient combinations of argon, oxygen, and hydrogen on the properties of DC magnetron sputtered indium tin oxide films //AIP Advances. – 2015. – Vol. 5. – №. 1. – P. 017128.
- 21 Mishima T. et al. Development status of high-efficiency HIT solar cells //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2011. – Vol. 95. – № 1 – P. 18-21.
- 22 Lien S. Y. Characterization and optimization of ITO thin films for application in heterojunction silicon solar cells //Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 518. – № 21 – P. S10-S13.
- 23 Tien C. L. et al. Effect of Oxygen Flow Rate on the Optical, Electrical, and Mechanical Properties of DC Sputtering ITO Thin Films //Advances in Condensed Matter Physics. – 2018. – Vol. 2018. – № 3–P. 1-6.
- 24 Chen A. et al. A new investigation of oxygen flow influence on ITO thin films by magnetron sputtering //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2014. – Vol. 120. – P. 157-162.
- 25 Lee S. H. et al. Influence of oxygen flow rate on the properties of ITO films prepared by low-frequency (60 Hz) magnetron sputtering //Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2006. – Vol. 459. – № 1 – P. 221/[501]-229/[509].
- 26 Han X., Mendes S. B. Spectroelectrochemical properties of ultra-thin indium tin oxide films under electric potential modulation //Thin solid films. – 2016. – Vol. T. 603. – P. 230-237.
- 27 Choi D., Hong S. J., Son Y. Characteristics of indium tin oxide (ITO) nanoparticles recovered by lift-off method from TFT-LCD panel scraps //Materials. – 2014. – Vol. 7. – № 12 – P. 7662-7669.

References

- 1 A.P.Caricato, M. Cesaria, et al., Appl. Phys. A, 101, 753-758 (2010).
- 2 I.P. Smirnova, L.K. Markov, A.S. Pavluchenko, M.V. Kukushkin and S.I. Pavloet al., Fizikaitehnikapoluprovodnikov, 48(1), 61-66 (2014). (in Russ)
- 3 W. Wohlmuth, and I. Adesida, Thin Solid Films, 479(1-2), 223-231 (2005).
- 4 E. Terzini, P. Thilakan and C. Minarini, Materials Science and Engineering: B, 77(1), 110-114 (2000).
- 5 P.N. Krylov, R.M. Zakirova and I.V. Fedotova, Fizikaitehnikapoluprovodnikov, 47(10), 1421-1424 (2013). (in Russ)
- 6 L.K. Markov, I.P. Smirnova, et al., Fizikaitehnikapoluprovodnikov 50.7, 1001-1006 (2016). (in Russ)
- 7 L.G. Daza, M. Acosta, et al., Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 29(12), 2566-2576 (2019).
- 8 I.K. Meshkovskiy, S.A. Plyastsov, Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 15(6), 969–9756 (2015). (in Russ).
- 9 L.P. Amosova and M.B. Isaev, j. tehnichekoifiziki, 84(10), 127-132 (2014). (in Russ)
- 10 Z. Ghorannevis, E. Akbarnejad and M.Ghorannevis, J. TheorApplPhys 9, 285–290 (2015).

- 11 Shi, Feng Introductory Chapter: Magnetron Sputtering.(Online First, IntechOpen, Nov 5, 2018).Available from:<https://www.intechopen.com/online-first/introductory-chapter-basic-theory-of-magnetron-sputtering>
- 12 K.P. Sibin, N. Selvakumar, et al., Solar Energy, 141, 118-126 (2017).
- 13 J. Bett, K.M. Winkler, et al., ACS applied materials and interfaces, 11(49), 45796-45804 (2019).
- 14 Z. Wei, B. Smith, et al., Journal of Materials Chemistry C, 7(35), 10981-10987 (2019).
- 15 D. Zhanga, A. Tavakoliyarakia, et al., Energy Procedia, 8, 207–213 (2011).
- 16 D. Fujishima, H. Inoue, et al., 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC35), (Honolulu, 20-25 June, 2010), p. 003137-003140.
- 17 E.I. Terukov, A.S. Abramov, et al., Fizika I tehnikapoluprovodnikov, 52(7), 792-795 (2018).
- 18 G. Jin-Hua, S. Jia-Le, et al., Chinese Physics B, 24(11), 117703 (2015).
- 19 A. H. Sofi, M. A. Shah and K. Asokan, J. of Electronic Materials, 47(2), 1344-1352 (2018).
- 20 M. Marikkannan, M. Subramanian et al., AIP Advances, 5(1), 017128 (2015).
- 21 T. Mishima, M. Taguchi, et al., Solar Energy Materials and Solar Cells, 95(1), 18-21 (2011).
- 22 S.Y. Lien, Thin Solid Films, 518(21), S10-S13 (2010).
- 23 C.L. Tien, H.Y. Lin, et al., Advances in Condensed Matter Physics, 2018(3), 1-6 (2018).
- 24 A. Chen, K. Zhu, et al., Solar energy materials and solar cells, 120, 157-162 (2014).
- 25 S.H. Lee, D.K. Lee, et al., Molecular Crystals and Liquid Crystals, 459(1), 221-501 (2006).
- 26 X. Han and S.B. Mendes, Thin solid films, 603, 230-237 (2016).
- 27 D. Choi, S.J. Hong and Y. Son, Materials, 7(12), 7662-7669 (2014).