
Научная статья

УДК 666.1.056.8:539.231

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-103-112

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ГИДРОФОБНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ИНДИЯ–ОЛОВА, ПОЛУЧЕННЫХ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

И.А. Сорокин¹, И.В. Мекалина¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Тонкие пленки оксида индия–олова (ИТО) получили широкое распространение ввиду высокой прозрачности и достаточно низкого сопротивления. Для получения данных покрытий на актуальных гибких полимерных подложках нанесение необходимо проводить при комнатной температуре с тщательной оптимизацией его параметров. Представлены результаты получения тонких пленок ИТО на полиэтилентерефталатных и стеклянных подложках с помощью магнетронного распыления. Исследовано влияние потока кислорода на удельное сопротивление, спектральные оптические характеристики и гидрофобные свойства покрытий.

Ключевые слова: оксид индия–олова, магнетронное распыление, прозрачные проводящие покрытия, низкоэмиссионные покрытия, гидрофобные покрытия

Для цитирования: Сорокин И.А., Мекалина И.В. Электрофизические, оптические и гидрофобные свойства тонких пленок оксида индия–олова, полученных магнетронным распылением // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 103–112. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-103-112.

Scientific article

ELECTROPHYSICAL, OPTICAL AND HYDROPHOBIC PROPERTIES OF MAGNETRON SPUTTERED INDIUM TIN OXIDE THIN FILMS

I.A. Sorokin¹, I.V. Mekalina¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Indium tin oxide (ITO) thin films are widely spread due to their high visible transparency and relatively low resistivity. Deposition at room temperature with thorough parameters optimization is required to obtain such coatings on flexible polymer substrates. Current research presents the results of ITO thin films obtaining on polyethylene terephthalate and glass substrates by magnetron sputtering. The influence of oxygen flow on coating's resistivity, spectral optical characteristics and hydrophobic properties are investigated.

Keywords: indium tin oxide, magnetron sputtering, transparent conducting coatings, low-emissivity coatings, hydrophobic coatings

For citation: Sorokin I.A., Mekalina I.V. Electrophysical, optical and hydrophobic properties of magnetron sputtered indium tin oxide thin films. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 103–112. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-103-112.

Введение

Прозрачные проводящие оксиды вызывают значительный интерес в связи с их высоким пропусканием главным образом видимого излучения, сочетаемым с достаточно низким электрическим сопротивлением. Благодаря этим свойствам данные вещества широко используются в качестве прозрачных электродов и нагревателей, в производстве солнечных панелей, светодиодов, плоскопанельных дисплеев, энергосберегающих (низкоэмиссионных) стекол, различных электрохромных устройств и др. [1]. При этом наиболее часто в качестве прозрачного проводящего оксида выступает оксид индия–олова (Indium Tin Oxide – ИТО), что, помимо высокого уровня упомянутых свойств, обусловлено абразивной стойкостью, химической стабильностью и наименьшей требуемой температурой осаждения для веществ данного класса [2].

Среди способов получения тонких пленок ИТО обычно выделяют следующие: спрей-пиролиз, золь-гель процесс, магнетронное распыление, электронно-лучевое испарение, импульсное лазерное напыление и др. Исследователи отмечают хорошую воспроизводимость и контроль процесса, сравнительно низкую стоимость и высокое качество покрытий, полученных методом магнетронного распыления [3, 4], в связи с чем ему отдается предпочтение при выборе способа нанесения тонких пленок ИТО [5]. Следует отметить, что условия нанесения во многом определяют качество получаемых пленок, что подробно рассмотрено далее.

В последние годы возникает все больший интерес к использованию гибких материалов в различных областях [6–8]. В частности, в связи с быстрым развитием гибкой электроники стало актуальным получение ИТО-покрытий на различных полимерных подложках, в том числе на пленках из полиэтилентерефталата (ПЭТ) [9]. Однако производство таких изделий осложняется тем, что для получения структур с оптимальными свойствами необходима повышенная температура. Соответственно, в процессе получения покрытий подложки перегреваются, что недопустимо для пластиков. Неприменимы оказываются и традиционные методы термической постобработки – отжиг в печи или быстрый фотонный отжиг. В связи с этим критически важной при получении тонких пленок ИТО на полимерных подложках при комнатной температуре оказывается оптимизация параметров магнетронного распыления, что рассматривается в данной работе. С целью дальнейшего увеличения свойств в данном случае также можно использовать сравнительно новый метод импульсного фотонного отжига [10], который будет подробно рассмотрен в рамках будущих исследований.

Ключевым параметром тонкой пленки ИТО является удельное сопротивление. Данное вещество является сильно вырожденным полупроводником *n*-типа и в части электропроводности ведет себя подобно металлам, в связи с чем справедливым оказывается следующее выражение:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{en_e\mu_e},$$

где ρ – удельное сопротивление, Ом·м; σ – проводимость, См/м; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; n_e – концентрация электронов, м⁻³; μ_e – подвижность электронов, м²/(В·с).

Таким образом, на конечное удельное сопротивление влияет как концентрация, так и подвижность носителей. С целью понимания влияния параметров нанесения обратимся к упрощенной схеме строения кристаллического ИТО, представленной на рис. 1.

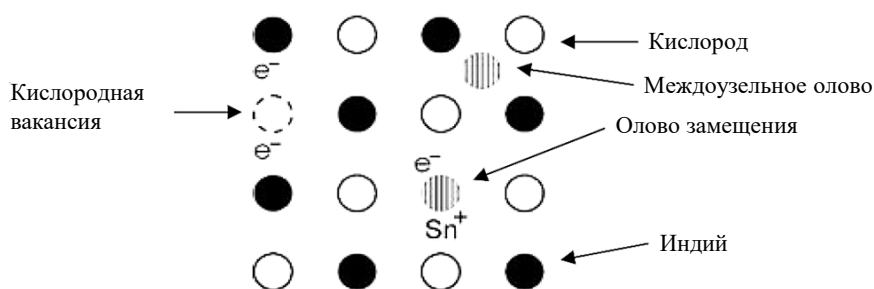


Рис. 1. Упрощенная схема структуры кристаллического ИТО [11]

Так, для кристаллического ИТО характерны следующие источники носителей:

- примеси замещения Sn^{4+} в решетке In_2O_3 ;
- кислородные вакансии в кристаллической решетке In_2O_3 ;
- разрушенные кластеры Sn-O (избыток кислорода при нанесении пленки может приводить к образованию кластеров, состоящих из двух замещающих катионов Sn^{4+} и аниона O^{2-} , находящегося в междоузельном положении) [11].

Однако исследования показывают, что в большинстве случаев при нанесении тонких пленок ИТО при комнатной температуре конечная структура оказывается в основном аморфной. В таком состоянии источники носителей менее ясны, однако считается, что ими являются кислородные дефекты, подобные вакансиям [12]. В связи с этим для получения удовлетворительной проводимости покрытия необходимо обеспечивать некоторую субстехиометричность.

Как упомянуто ранее, на конечное удельное сопротивление пленок также влияет подвижность носителей заряда. Ее в свою очередь лимитирует рассеяние на дефектах аморфной структуры или границах зерен, на ионизированных примесях, фононах и др. При этом считается, что наибольшее влияние оказывает рассеяние на ионизированных примесях [11, 13], что в случае нанесения при комнатной температуре относится главным образом к кислородным дефектам. Так, при изготовлении пленок с предельной проводимостью без постобработки необходимо выдерживать баланс между концентрацией носителей, обеспечиваемых ионизированными примесями, и снижением подвижности за счет рассеяния на данных дефектах.

Концентрация носителей и дефекты структуры также влияют на оптические свойства ИТО. Для большинства прозрачных проводящих оксидов характерны высокие значения поглощения в ультрафиолетовой (УФ) области спектра, отражения – в инфракрасной (ИК), пропускания – в видимой. УФ-поглощение связано с протеканием межзонных переходов в полупроводнике: начиная с фотонов с энергией, равной ширине запрещенной зоны, наблюдается резкое снижение пропускания. Причем с увеличением концентрации носителей из-за эффекта Бурштейна–Мосса край поглощения сдвигается в область коротких волн [11]. Поведение в ИК-области обусловлено взаимодействием излучения со свободными электронами, причем, чем выше их концентрация, тем сильнее отражение. На абсолютное значение пропускания в видимой области оказывают влияние эффекты рассеяния излучения, аналогичные рассмотренным ранее. Так, увеличение пропускания связывают с окисдированием кластеров Sn-O и возрастанием общей стехиометричности пленки [13]. В некоторых работах также отмечено повышение кристалличности покрытия при увеличении парциального давления кислорода, что, как считают авторы, также внесло вклад в возрастание прозрачности в видимом диапазоне [14].

В ходе нанесения ИТО при комнатной температуре с помощью магнетронного распыления все описанные моменты в основном определяются потоком натекания кислорода в вакуумную камеру, в связи с чем подробному изучению этого фактора уделено внимание в данной работе.

Кроме того, в открытой научно-технической литературе недостаточно освещено влияние условий нанесения на поверхностные свойства тонких пленок ИТО. Однако при этом упоминается, что они являются гидрофобными [15–17]. Для ряда областей применения актуально знание поверхностных свойств и методов воздействия на них [18], этому вопросу также уделено внимание в данной работе.

Далее представлены результаты исследований, направленных на получение тонких пленок ИТО с помощью магнетронного распыления при комнатной температуре как на гибких ПЭТ-подложках, так и на силикатном стекле. Изучено влияние потока натекающего кислорода в вакуумную камеру на электрофизические, оптические и гидрофобные свойства данных покрытий.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15. «Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

Материалы и методы

Нанесение тонких пленок ИТО проводили с помощью импульсного (униполярные импульсы) магнетронного распыления из керамической мишени $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$ (в соотношении 90:10 по массе) при комнатной температуре. При этом блок питания работал в режиме стабилизации тока с частотой следования импульсов 10 кГц и временем паузы 5 мкс. Как упомянуто ранее, свойства ИТО крайне чувствительны к потоку кислорода. В связи с этим условия нанесения варьировали с помощью его изменения при постоянстве других параметров (ток разряда, суммарное давление, остаточное давление). Результирующая толщина всех покрытий была практически одинаковой. В ходе процесса рабочее давление поддерживали постоянным с помощью изменения потока аргона, поток кислорода в течение отдельных процессов оставался постоянным. Скорость распыления дополнительно контролировали с помощью кварцевого датчика толщины.

Нанесение осуществляли на ПЭТ-подложки толщиной 125 мкм и силикатные предметные стекла толщиной 1 мм. Подложки предварительно проходили финишную обработку ионным пучком. Основные исследования проводили для гибких образцов на ПЭТ-подложках, а образцы на стеклах получены с целью измерения краевого угла смачивания.

Оптические свойства пленок ИТО на ПЭТ-подложках (отражение и пропускание) исследовали сразу после нанесения с помощью спектрофотометра с приставкой диффузного отражения. Толщину наносимых пленок d определяли по зарегистрированным спектрам отражения путем их сопоставления с данными, полученными при моделировании с применением программного обеспечения. Обе полученные спектральные характеристики использовали для расчета спектральных коэффициентов поглощения покрытий $\alpha_{coat}(\lambda)$, в том числе на длине волны 550 нм (α_{550}), по методике, подробно описанной в работе [20], а именно с использованием следующей формулы:

$$\alpha_{coat}(\lambda) = \frac{d_{sub}}{d_{coat}} [\alpha_{tot}(\lambda) - \alpha_{sub}(\lambda)],$$

где $\alpha_{coat}(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения покрытия, см^{-1} ; d_{sub} , d_{coat} – толщина подложки и покрытия соответственно, см; $\alpha_{tot}(\lambda)$, $\alpha_{sub}(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения системы «пленка–подложка» и чистой подложки соответственно, см^{-1} .

В свою очередь для оставшихся коэффициентов поглощения использовали следующую формулу:

$$\alpha_{tot(sub)}(\lambda) = \frac{1}{d_{tot(sub)}} \ln \left[\frac{1 - R_{tot(sub)}(\lambda)}{T_{tot(sub)}(\lambda)} \right],$$

где $d_{tot} = d_{sub} + d_{coat}$ – толщина системы «покрытие–подложка», см; $R_{tot(sub)}(\lambda)$ – спектр отражения системы «покрытие–подложка» (чистой подложки); $T_{tot(sub)}(\lambda)$ – спектр пропускания системы «покрытие–подложка» (чистой подложки).

Для получения значения удельного сопротивления пленок сразу после нанесения определяли их поверхностное сопротивление R_{\square} четырехзондовым методом, после чего искомую величину рассчитывали по формуле

$$\rho = R_{\square} d.$$

Краевой угол смачивания (КУС) водой при комнатной температуре определяли для образцов на силикатном стекле с помощью метода лежащей капли. Объем капли составлял 10 мкл, КУС рассчитывался прибором автоматически на основании полученных фотографий.

Результаты и обсуждение

Полученные зависимости удельного сопротивления ρ и коэффициента поглощения на длине волны 550 нм α_{550} тонких пленок ИТО в зависимости от потока кислорода при нанесении представлены на рис. 2. Данные характеристики получены после предварительного снятия оптических спектров, некоторые из которых будут освещены далее.

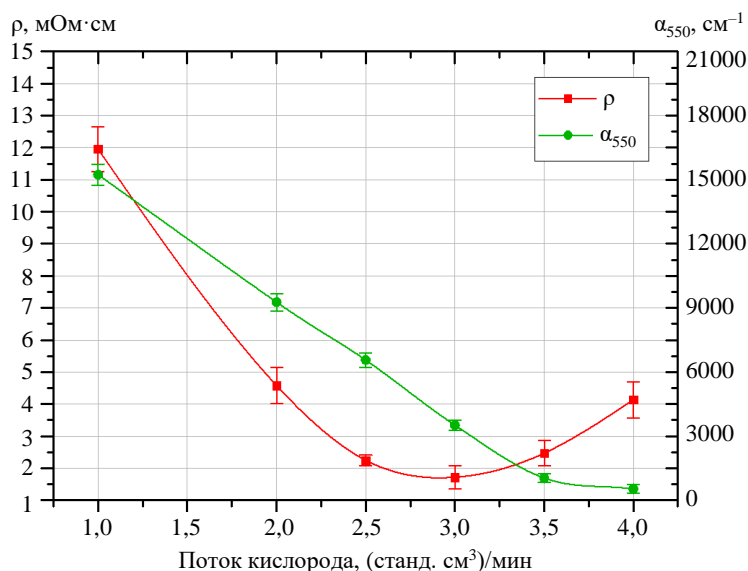


Рис. 2. Удельное сопротивление ρ и коэффициент поглощения на длине волны 550 нм α_{550} полученных покрытий

Показатель α_{550} монотонно уменьшался, что связано с образованием все более стехиометричной структуры и снижением количества дефектов, рассеивающих излучение.

Зависимость ρ имела форму «колодца». Ее условно можно разделить на три области. Первая область характеризуется недостатком кислорода, третья – его переизбытком. Вторая область представляет собой баланс между количеством дефектов структуры (главным образом, кислородных вакансий), являющихся донорами электронов, и

количеством актов рассеяния носителей заряда и излучения. Кроме того, с возрастанием потока кислорода возможно возникновение некоторой кристалличности структуры [14], что также положительно сказывается на удельном сопротивлении (в сравнении с первой областью) за счет активации примесных доноров Sn^{4+} . Таким образом, в данной работе минимальное удельное сопротивление ($\sim 1,72 \text{ мОм}\cdot\text{см}$) получено при оптимальном потоке кислорода 3 (станд. см^3)/мин. При этом значение α_{550} составило $\sim 3510 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 3 приведены спектры пропускания и отражения для ряда образцов на ПЭТ-подложках.

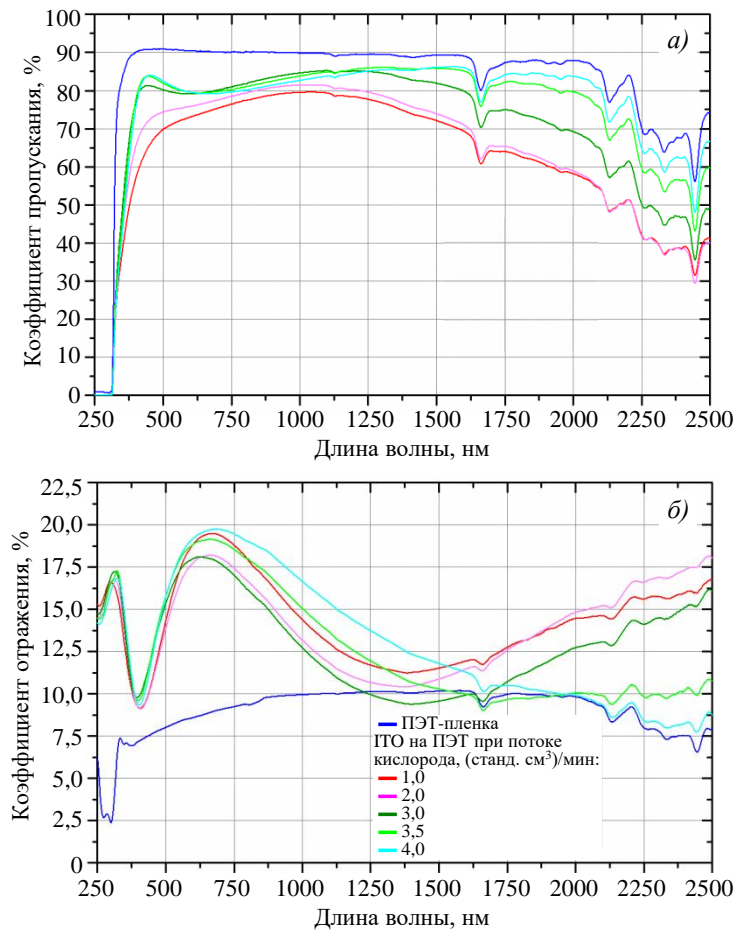


Рис. 3. Спектры пропускания (а) и отражения (б) образцов (ПЭТ – полиэтилентерефталат)

Из спектров пропускания образцов видно, что даже наименее оптимальный из них обладает достаточно высокой прозрачностью в видимом диапазоне (среднеинтегральный коэффициент пропускания в диапазоне длин волн 380–780 нм превышает 70 %). Следует отметить, что пропускание в видимом диапазоне можно увеличить, если задать толщину пленки ИТО на таком уровне, чтобы интерференционный минимум оказался в интересующей области, однако это не являлось целью данной работы. На рис. 3 также можно отметить снижение отражения в ИК-диапазоне при возрастании потока, связанное с заполнением кислородных вакансий, а следовательно, с уменьшением концентрации свободных электронов, ответственных за отражение в данной области. Незначительное отклонение от данного монотонного поведения для образца, полученного при потоке кислорода 2 (станд. см^3)/мин, можно объяснить упомянутым ранее возникновением кристалличности и вкладом некоторой активации примесей в концентрацию

электронов. В частности, возможность управления оптическими характеристиками в ИК-диапазоне оказывается незаменимой в случае применения ИТО в качестве низко-эмиссионного покрытия [21].

На рис. 4 приведена зависимость для КУС вблизи оптимального потока кислорода для покрытий, нанесенных на предметные стекла.

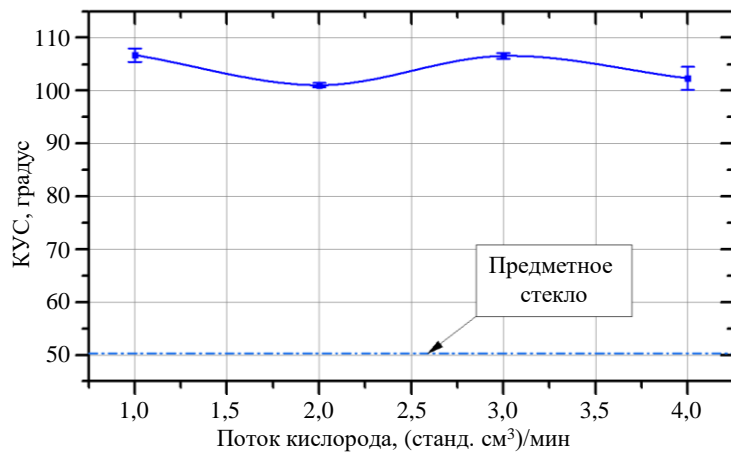


Рис. 4. Краевой угол смачивания (КУС) вблизи оптимального потока кислорода

Как видно из рис. 4, действительно, тонкие пленки ИТО проявляют гидрофобные свойства (значение КУС превышает 90 градусов) и позволяют повысить КУС деталей из силикатного стекла более чем в 2 раза (вплоть до 107 градусов при потоке кислорода 1 или 3 (станд. см³)/мин). При этом его зависимость от потока кислорода оказывается слабой и немонотонной.

Таким образом, нанесение данных покрытий может помочь снизить обледенение остекления или экранов приборов (водяные капли будут скатываться с поверхности). Более того, в силу высокой проводимости можно организовать подогрев изделия по всей поверхности, что позволит полностью предотвратить обледенение.

Следует отметить, что ожидалось монотонное увеличение КУС с возрастанием потока кислорода, а следовательно, с уменьшением концентрации кислородных вакансий. Считается, что данные дефекты могут взаимодействовать с водой в атмосфере, образуя ОН-группы, в результате чего повышается гидрофильность поверхности [22]. В связи с этим можно предположить, что данный механизм в случае ИТО оказывается незначительным.

Заключения

С помощью магнетронного распыления при комнатной температуре получены проводящие тонкие пленки ИТО с высокой прозрачностью в видимом диапазоне на ПЭТ-пленках и силикатных стеклах. Исследовано влияние потока натекающего кислорода в вакуумную камеру на характеристики покрытий, определено его оптимальное значение, составившее 3 (станд. см³)/мин. При этом получено минимальное для рассматриваемых условий удельное сопротивление $1,72 \text{ мОм} \cdot \text{см}$ при $\alpha_{550} = 3510 \text{ см}^{-1}$.

Кроме того, рассмотрено влияние потока кислорода на коэффициент отражения излучения в ИК-диапазоне. Показано, что его значение уменьшается с увеличением потока в связи с заполнением кислородных вакансий и снижением концентрации свободных электронов. Установлено, что тонкие пленки ИТО проявляют гидрофобные свойства, а нанесение такого покрытия позволяет увеличить КУС силикатного стекла вплоть до 107 градусов.

Полученные результаты можно использовать для изготовления различных гибких изделий на термочувствительных полимерных подложках: гибкие электроды, дисплеи и солнечные панели, носимые сенсоры, гибкие электронные компоненты и др. Умение управлять оптическими свойствами покрытия в ИК-диапазоне позволяет использовать ИТО для низкоэмиссионных приложений. Данные покрытия также можно применять для повышения гидрофобности остекления и экранов приборов для минимизации обледенения (или его предотвращения при пропускании тока через покрытие).

Список источников

1. Rebohle L., Prucnal S., Reichel D. Flash Lamp Annealing. From Basics to Applications. Cham: Springer Nature Switzerland, 2019. 288 p. DOI: 10.1007/978-3-030-23299-3.
2. Gordon R.G. Criteria for choosing transparent conductors // MRS Bulletin. 2000. Vol. 25. No. 8. P. 52–57. DOI: 10.1557/mrs2000.151.
3. Будиновский С.А., Доронин О.Н., Косьмин А.А., Бенклян А.С. Влияние состояния мишени системы Zr–Y–PЗМ на скорость ее распыления при нанесении керамического слоя ТЗП с помощью установки УОКС-3 // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). С. 85–92. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-85-92.
4. Сорокин И.А., Соловьяничик Л.В., Мекалина И.В., Цапенко А.Н. Оптически прозрачные полимерные пленки с антибликовым покрытием // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). С. 89–99. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-89-99.
5. Tseng K.S., Lo Y.L. Effect of sputtering parameters on optical and electrical properties of ITO films on PET substrates // Applied surface science. 2013. Vol. 285. P. 157–166. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.08.024.
6. Liu H., Wang L., Lin G., Feng Y. Recent progress in the fabrication of flexible materials for wearable sensors // Biomaterials Science. 2022. Vol. 10. No. 03. P. 614–632. DOI: 10.1039/d1bm01136g.
7. Зуев А.В., Заричняк Ю.П., Баринов Д.Я., Краснов Л.Л. Исследование теплофизических свойств гибкого теплоизоляционного материала // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). С. 119–126. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
8. Бабашов В.Г., Степанова Е.В., Зимичев А.М., Басаргин О.В. Оксидные непрерывные волокна как компонент гибкой высокотемпературной изоляции // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). С. 34–43. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-34-43.
9. Khachatryan H., Kim D.J., Kim M., Kim H.K. Roll-to-Roll fabrication of ITO thin film for flexible optoelectronics applications: The role of post-annealing // Materials Science in Semiconductor Processing. 2018. Vol. 88. P. 51–56. DOI: 10.1016/j.mssp.2018.07.033.
10. Kim Y., Park S., Kim S. et al. Flash lamp annealing of indium tin oxide thin-films deposited on polyimide backplanes // Thin Solid Films. 2017. Vol. 628. P. 88–95. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.03.016.
11. Facchetti A., Marks T. Transparent electronics: from synthesis to applications. New-York: John Wiley & Sons, 2010. 452 p. DOI: 10.1002/9780470710609.
12. Guillén C., Herrero J. Structure, optical, and electrical properties of indium tin oxide thin films prepared by sputtering at room temperature and annealed in air or nitrogen // Journal of applied physics. 2007. Vol. 101. No. 7. P. 073514. DOI: 10.1063/1.2715539.
13. David C., Tinkham B.P., Prunici P., Panckow A. Highly conductive and transparent ITO films deposited at low temperatures by pulsed DC magnetron sputtering from ceramic and metallic rotary targets // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 314. P. 113–117. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.022.
14. Txintxurreta J., G-Berasategui E., Ortiz R. et al. Indium tin oxide thin film deposition by magnetron sputtering at room temperature for the manufacturing of efficient transparent heaters // Coatings. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 92. DOI: 10.3390/coatings11010092.

15. Besbes S., Ouada H.B., Davenas J. et al. Effect of surface treatment and functionalization on the ITO properties for OLEDs // *Materials Science and Engineering: C*. 2006. Vol. 26. No. 2-3. P. 505–510. DOI: 0.1016/j.msec.2005.10.078.
16. Ozbay S., Erdogan N., Erden F. et al. Surface free energy and wettability properties of transparent conducting oxide-based films with Ag interlayer // *Applied Surface Science*. 2021. Vol. 567. P. 150901. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.15090.
17. Аксенова В.В., Смирнова И.П., Марков Л.К. и др. Смачиваемость прозрачных проводящих наноструктурированных покрытий ITO и ITO/Al₂O₃ // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Физико-математические науки*. 2023. Т. 16. № 1.1. С. 404–410. DOI: 10.18721/JPM.161.169.
18. Салахова Р.К., Вешкин Е.А., Судьин Ю.И., Баранников А.А. Влияние шероховатости на поверхностно-энергетические характеристики и смачиваемость стеклопластика // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 2 (79). С. 48–58. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-48-58.
19. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Cesaria M., Caricato A.P., Martino M. Realistic absorption coefficient of ultrathin films // *Journal of Optics*. 2012. Vol. 14. No. 10. P. 105701. DOI: 10.1088/2040-8978/14/10/105701.
21. Shamsuddin W.N.S.W., Zuber K., Murphy P.J., Jane M.L. Environmental durability of soft low-e coatings: A review // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2024. Vol. 266. P. 112673. DOI: j.solmat.2023.112673.
22. Horprathum M., Eiamchai P., Limnonthakul P. et al. Structural, optical and hydrophilic properties of nanocrystalline TiO₂ ultra-thin films prepared by pulsed dc reactive magnetron sputtering // *Journal of alloys and compounds*. 2011. Vol. 509. No. 13. P. 4520–4524. DOI: j.jallcom.2011.01.038.

References

1. Rebohle L., Prucnal S., Reichel D. *Flash Lamp Annealing. From Basics to Applications*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2019, 288 p. DOI: 10.1007/978-3-030-23299-3.
2. Gordon R.G. Criteria for choosing transparent conductors. *MRS Bulletin*, 2000, vol. 25, no. 8, pp. 52–57. DOI: 10.1557/mrs2000.151.
3. Budinovskiy S.A., Doronin O.N., Kosmin A.A., Benklyan A.S. Influence of the state of the YSZ target on its sputtering rate during deposition of a TBC ceramic layer by the UOKS-3 unit. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), pp. 85–92. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-85-92.
4. Sorokin I.A., Solovyanchik L.V., Mekalina I.V., Tsapenko A.N. Optically transparent polymer films with anti-reflective coating. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), pp. 89–99. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-89-99.
5. Tseng K.S., Lo Y.L. Effect of sputtering parameters on optical and electrical properties of ITO films on PET substrates. *Applied surface science*, 2013, vol. 285, pp. 157–166. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.08.024.
6. Liu H., Wang L., Lin G., Feng Y. Recent progress in the fabrication of flexible materials for wearable sensors. *Biomaterials Science*, 2022, vol. 10, no. 03, pp. 614–632. DOI: 10.1039/d1bm01136g.
7. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya., Krasnov L.L. Measurement of thermophysical properties of flexible thermal insulation. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 119–126. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
8. Babashov V.G., Stepanova E.V., Zimichev A.M., Basargin O.V. Oxide continuous fibers as a part of flexible high temperature insulation. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 34–43. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-34-43.

9. Khachatryan H., Kim D.J., Kim M., Kim H.K. Roll-to-Roll fabrication of ITO thin film for flexible optoelectronics applications: The role of post-annealing. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2018, vol. 88, pp. 51–56. DOI: 10.1016/j.mssp.2018.07.033.
10. Kim Y., Park S., Kim S. et al. Flash lamp annealing of indium tin oxide thin-films deposited on polyimide backplanes. *Thin Solid Films*, 2017, vol. 628, pp. 88–95. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.03.016.
11. Facchetti A., Marks T. *Transparent electronics: from synthesis to applications*. New-York: John Wiley & Sons, 2010, 452 p. DOI: 10.1002/9780470710609.
12. Guillén C., Herrero J. Structure, optical, and electrical properties of indium tin oxide thin films prepared by sputtering at room temperature and annealed in air or nitrogen. *Journal of applied physics*, 2007, vol. 101, no. 7, p. 073514. DOI: 10.1063/1.2715539.
13. David C., Tinkham B.P., Prunici P., Panckow A. Highly conductive and transparent ITO films deposited at low temperatures by pulsed DC magnetron sputtering from ceramic and metallic rotary targets. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 314, pp. 113–117. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.022.
14. Txintxurreta J., G-Berasategui E., Ortiz R. et al. Indium tin oxide thin film deposition by magnetron sputtering at room temperature for the manufacturing of efficient transparent heaters. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 92. DOI: 10.3390/coatings11010092.
15. Besbes S., Ouada H.B., Davenas J. et al. Effect of surface treatment and functionalization on the ITO properties for OLEDs. *Materials Science and Engineering: C*, 2006, vol. 26, no. 2–3, pp. 505–510. DOI: 10.1016/j.msec.2005.10.078.
16. Ozbay S., Erdogan N., Erden F. et al. Surface free energy and wettability properties of transparent conducting oxide-based films with Ag interlayer. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 567, p. 150901. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.150901.
17. Aksenova V.V., Smirnova I.P., Markov L.K., Pavlyuchenko A.S., Kolokolov D.S., Volkov D.Yu., Wettability of transparent conductive nanostructured ITO and ITO/Al₂O₃ coatings. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Ser.: Physics and Mathematics*, 2023, vol. 16 (1.1), pp. 404–410. DOI: 10.18721/JPM.161.169.
18. Salakhova R.K., Veshkin E.A., Sudin Yu.I., Barannikov A.A. Effect of roughness on surface-energy characteristics and wetting properties of fiberglass. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), pp. 48–58. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-48-58.
19. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Cesaria M., Caricato A.P., Martino M. Realistic absorption coefficient of ultrathin films. *Journal of Optics*, 2012, vol. 14, no. 10, p. 105701. DOI: 10.1088/2040-8978/14/10/105701.
21. Shamsuddin W.N.S.W., Zuber K., Murphy P.J., Jane M.L. Environmental durability of soft low-e coatings: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, vol. 266, p. 112673. DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112673.
22. Horprathum M., Eiamchai P., Limnonthakul P. et al. Structural, optical and hydrophilic properties of nanocrystalline TiO₂ ultra-thin films prepared by pulsed dc reactive magnetron sputtering. *Journal of alloys and compounds*, 2011, vol. 509, no. 13, pp. 4520–4524. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.01.038.

Информация об авторах

Сорокин Илья Алексеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мекалина Ирина Васильевна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ilya A. Sorokin, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Irina V. Mekalina, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 25.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.12.2025.
The article was submitted 25.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 05.12.2025