

УДК 621.382.2
doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-6

ПРОЗРАЧНЫЕ ПРОВОДЯЩИЕ ОКСИДЫ НА ОСНОВЕ НЕДЕФИЦИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т. О. Зинченко¹, У. С. Чихрина²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹scar0243@gmail.com, ²chikhulyana@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Прозрачные проводящие оксиды (ППО) представляют собой важный класс материалов, широко применяемых в современных технологиях, включая солнечные батареи, дисплеи и сенсорные устройства. Однако традиционно используемый оксид индия, легированный оловом (ITO), сталкивается с рядом проблем, таких как высокая стоимость, ограниченные запасы индия и экологические риски его добычи. В связи с этим актуальной задачей является поиск альтернативных материалов, обладающих схожими характеристиками, но при этом более доступных и экологически безопасных. Цель данного исследования – разработка и исследование альтернативных ППО на основе недефицитных и экономически доступных материалов, таких как оксиды цинка (AZO) и олова (FTO), полученные методом спрей-пиролиза. *Материалы и методы.* Для синтеза ППО использовался метод спрей-пиролиза, который позволяет формировать тонкие пленки с высокой однородностью и хорошими эксплуатационными характеристиками. В качестве прекурсоров применялись растворы солей металлов, таких как ацетаты и нитраты цинка, олова и алюминия. Температура подложки варьировалась от 300 до 500 °С для оптимизации кристаллической структуры пленок. *Результаты.* Полученные покрытия AZO (оксид цинка, легированный алюминием) показали высокую прозрачность (>90 %) в видимом диапазоне, удельное сопротивление $\sim 10^{-3}$ Ом · см, стабильность при температурах до 450 °С; FTO (диоксид олова, легированный фтором) – прозрачность ~ 80 %, удельное сопротивление $\sim 10^{-3}$ – 10^{-2} Ом · см, высокая термостабильность (до 600 °С). Альтернативные материалы продемонстрировали сопоставимые оптические свойства с ITO (оксид индия, легированный оловом), при этом AZO показал более низкую стоимость и экологическую безопасность, а FTO – лучшую термостойкость. *Вывод.* Исследование подтвердило возможность использования AZO и FTO в качестве альтернативных ППО с приемлемыми электрическими и оптическими характеристиками. AZO продемонстрировал высокую прозрачность и низкое удельное сопротивление, что делает его перспективным материалом для гибкой электроники. FTO проявил высокую устойчивость к температурным воздействиям, что делает его предпочтительным для солнечных батарей и других энергоэффективных технологий. Использование данных материалов позволит снизить зависимость от индия, уменьшить экологическую нагрузку и обеспечить устойчивое развитие технологий.

Ключевые слова: прозрачные проводящие оксиды, недефицитные материалы, индий, устойчивое развитие, солнечные батареи, спрей-пиролиз

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и устройств электроники» (№ 124041700069-0).

Для цитирования: Зинченко Т. О., Чихрина У. С. Прозрачные проводящие оксиды на основе недефицитных материалов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 49–56. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-6

TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES BASED ON NON-DEFICIT MATERIALS

T.O. Zinchenko¹, U.S. Chikhrina²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia
¹scar0243@gmail.com, ²chikhulyana@yandex.ru

Abstract. *Background.* Transparent conducting oxides (TCOs) are an important class of materials widely used in modern technologies, including solar cells, displays, and touch devices. However, the traditionally used tin-doped indium oxide (ITO) faces a number of problems, such as high cost, limited indium reserves, and environmental risks of its mining. In this regard, an urgent task is to search for alternative materials with similar characteristics, but at the same time more accessible and environmentally friendly. The purpose of this study is to develop and study alternative TCOs based on

abundant and affordable materials, such as zinc oxide (AZO) and tin oxide (FTO), obtained by spray pyrolysis. *Materials and methods.* Spray pyrolysis was used to synthesize TCOs, which allows the formation of thin films with high homogeneity and good performance characteristics. Solutions of metal salts, such as zinc, tin, and aluminum acetates and nitrates, were used as precursors. The substrate temperature was varied from 300 to 500 °C to optimize the crystalline structure of the films. *Results.* The obtained AZO (aluminum-doped zinc oxide) coatings showed high transparency (> 90 %) in the visible range, specific resistance of $\sim 10^{-3} \Omega \text{ cm}$, stability at temperatures up to 450 °C.; FTO (fluorine-doped tin dioxide) – transparency of $\sim 80 \%$, specific resistance of $\sim 10^{-3} - 10^{-2} \Omega \text{ cm}$, high thermal stability (up to 600 °C). Alternative materials demonstrated comparable optical properties with ITO (indium oxide doped with tin), while AZO showed lower cost and environmental safety, and FTO – better thermal stability. *Conclusion.* The study confirmed the possibility of using AZO and FTO as alternative TPOs with acceptable electrical and optical characteristics. AZO has demonstrated high transparency and low resistivity, making it a promising material for flexible electronics. FTO has demonstrated high thermal stability, making it a preferred choice for solar cells and other energy-efficient technologies. The use of these materials will reduce dependence on indium, reduce environmental impact, and ensure sustainable development of technologies.

Keywords: transparent conductive oxides, non-critical materials, indium, sustainable development, solar cells, spray pyrolysis

Financing: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project "Synthesis and Research of promising nanomaterials, coatings and electronics devices" (№ 124041700069-0).

For citation: Zinchenko T.O., Chikhrina U.S. Transparent conductive oxides based on non-deficit materials. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):49–56. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-6

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) представляют собой уникальный класс материалов, сочетающих высокую оптическую прозрачность в видимом диапазоне спектра и низкое электрическое сопротивление. Благодаря этим свойствам ППО находят широкое применение в ключевых технологиях XXI в., включая солнечные батареи (фотоэлектрические элементы) [1, 2], в которых ППО используются в качестве прозрачных электродов, позволяя солнечному свету проникать в активный слой устройства и обеспечивая эффективное проведение электрического тока.

Популярность ППО обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности, миниатюризации устройств и развития устойчивых технологий. Среди всех известных ППО наиболее широко используется оксид индия, легированный оловом (ITO), который сочетает высокую прозрачность, низкое сопротивление и технологичность в производстве.

Несмотря на свои выдающиеся свойства, ITO сталкивается с рядом серьезных ограничений:

- 1) индий является редким элементом земной коры, его содержание оценивается в 0,1 часть на миллион. Основным источником индия – побочные продукты переработки цинка и других металлов, что значительно ограничивает доступность сырья;
- 2) из-за ограниченных запасов и растущего спроса цена индия остается высокой и продолжает увеличиваться;
- 3) добыча индия связана с интенсивной разработкой руд, что приводит к высоким затратам и загрязнению окружающей среды [3];
- 4) географическая концентрация запасов индия делает мировые технологии зависимыми от нестабильных поставок, что в будущем может поставить под угрозу развитие высокотехнологичных отраслей.

Эти проблемы стимулируют поиск альтернативных материалов, которые могут заменить индий в производстве прозрачных проводящих оксидов, сохраняя ключевые характеристики, необходимые для их использования.

Преимущества перехода на устойчивые технологии

Переход от использования дефицитных материалов к альтернативам предоставляет ряд значительных преимуществ: экономическая эффективность; снижение экологической нагрузки; устойчивость цепочек поставок; продвижение принципов устойчивого развития.

Данное исследование направлено на разработку решений, которые позволят снизить зависимость от редких природных ресурсов, обеспечивая устойчивое развитие ключевых технологий [4, 5].

Основные материалы для ППО

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) представляют собой материалы, обладающие уникальным сочетанием высокой прозрачности в видимом спектре (длина волн 380–750 нм) и низкого электрического сопротивления (порядка 10^{-4} – 10^{-3} Ом · см). Эти свойства достигаются благодаря широкозонным полупроводникам, в которых проводимость обеспечивается за счет примесей или дефектов структуры.

Ключевые критерии, определяющие выбор материалов для ППО, включают: высокую прозрачность для видимого света (пропускание >80 %), низкое удельное сопротивление для эффективного переноса заряда, термостабильность и устойчивость к окружающей среде, возможность масштабного производства при низкой себестоимости.

В настоящее время для производства ППО используются несколько традиционных материалов, которые доминируют в промышленности и научных исследованиях: ITO (оксид индия, легированный оловом), ZnO (оксид цинка) и SnO₂ (оксид олова).

ITO (оксид индия, легированный оловом)

ITO – это самый широко используемый материал среди ППО благодаря уникальному сочетанию свойств: высокая прозрачность в видимом спектре (>85 %), низкое удельное сопротивление ($\sim 10^{-4}$ Ом · см), широкая запрещенная зона (3,5–4,0 эВ), что обеспечивает прозрачность для видимого света, отличная технологичность для нанесения тонких пленок с использованием различных методов, включая вакуумное распыление, спрей-пиролиз и магнетронное напыление. Преимущества ITO: наилучшие электрические и оптические свойства среди всех известных ППО; используется в большинстве современных устройств, включая сенсорные экраны, солнечные панели, жидкокристаллические дисплеи и OLED.

Недостатком ITO является то, что индий – редкий элемент и, соответственно, дорогой материал. ITO пленки имеют ограниченную гибкость, что затрудняет их использование в гибкой электронике. А также добыча индия связана с высоким воздействием на окружающую среду. В табл. 1 представлена сравнительная характеристика по экологической и экономической эффективности ITO с другими материалами.

Таблица 1

Экологическая и экономическая эффективность альтернативных TCO

| Материал | Доступность сырья (1 – высокая, 3 – низкая) | Влияние на окружающую среду (1 – низкое, 3 – высокое) | Стоимость (руб./кг) |
|----------|--|--|---------------------|
| ITO | 2 | 3 | 40 000 |
| AZO | 1 | 1 | 5000 |
| FTO | 1 | 2 | 7000 |

ZnO (оксид цинка)

Оксид цинка (ZnO) является перспективной альтернативой ITO благодаря своей доступности, невысокой стоимости и экологической безопасности. ZnO – это полупроводник с широкой запрещенной зоной ($\sim 3,3$ эВ), который обеспечивает хорошую прозрачность. Легирование алюминием (AZO) или галлием (GZO) значительно улучшает его проводящие свойства.

Свойства: высокая прозрачность (>80 %) и широкая запрещенная зона, низкое удельное сопротивление при легировании ($\sim 10^{-3}$ – 10^{-4} Ом · см), химическая устойчивость и экологическая безопасность, возможность нанесения с помощью низкотемпературных методов, таких как спрей-пиролиз, что делает его подходящим для гибкой электроники и пластиковых подложек.

Преимущества ZnO: цинк – один из наиболее распространенных металлов на Земле; легкость синтеза и высокая совместимость с разными методами нанесения; устойчивость к высокой температуре, что делает его подходящим для использования в жестких условиях. Недостатки ZnO: без легирования его электропроводность остается низкой, что ограничивает

использование в ряде приложений; меньшая стабильность в условиях повышенной влажности или кислой среды по сравнению с ITO.

SnO₂ (оксид олова)

Оксид олова (SnO₂), особенно в форме фтор-легированного оксида олова (FTO), является еще одним распространенным материалом для ППО. SnO₂ – это широкий полупроводник с широкой запрещенной зоной (~3,6 эВ). Легирование фтором (FTO) повышает его проводящие свойства.

Свойства: высокая прозрачность (>80 %) в видимом диапазоне, отличная химическая и термическая устойчивость (лучше, чем у ITO и ZnO), удельное сопротивление выше, чем у ITO (~10⁻³–10⁻² Ом · см), но достаточное для большинства приложений.

Преимущества FTO [6, 7]: высокая устойчивость к экстремальным температурам, что делает его предпочтительным для использования в солнечных панелях; доступность сырья и низкая стоимость производства; экологическая безопасность: олово является менее токсичным и более доступным элементом, чем индий. Недостатки SnO₂: более высокое сопротивление по сравнению с ITO, что ограничивает его использование в высокотехнологичных устройствах, требующих максимальной проводимости; возможные дефекты в пленках, влияющие на равномерность покрытия.

Таким образом, ITO остается лидером среди материалов для ППО, однако его дефицит и высокая стоимость стимулируют активные исследования в области разработки альтернатив, таких как ZnO и SnO₂. Выбор материала зависит от области применения, требуемых свойств и экономических факторов.

Проблемы, связанные с использованием индия: экономические и экологические ограничения. В табл. 2 представлено сравнение свойств ППО из различных материалов.

Таблица 2

Сравнение физических и электрических свойств TCO

| Материал | Прозрачность (80–100 %) | Электропроводность (С/см) | Температурная стабильность (°С) |
|----------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| ITO | 85 | 10 ³ | 300 |
| AZO | 90 | 10 ² | 450 |
| FTO | 80 | 10 ³ | 600 |

Индий с точки зрения дефицитного материала

Индий является редким и дорогим элементом, использование которого в технологии прозрачных проводящих оксидов (ППО) сталкивается с рядом экономических сложностей. Индий является редким металлом с содержанием в земной коре около 0,1 ppm (частей на миллион). Его доступность значительно ограничена по сравнению с такими элементами, как цинк или олово. Основным источником индия – это побочные продукты переработки руды цинка, меди и олова. Только 5–10 % цинковых руд содержат достаточно индия для экономически целесообразной добычи.

Поскольку индий добывается как побочный продукт, его объемы производства ограничены основным спросом на цинк, медь и олово. Любое снижение добычи этих металлов автоматически приводит к дефициту индия.

Высокая стоимость индия влияет на конечную стоимость продуктов, таких как солнечные панели, дисплеи и сенсорные экраны. Это ограничивает их доступность для массового потребления, особенно в странах с развивающейся экономикой.

Добыча индия требует переработки огромных объемов руды, поскольку содержание индия в цинковых или медных рудах крайне низкое (менее 0,01 %). Извлечение индия требует сложных технологических процессов, которые связаны с высокими затратами энергии, что увеличивает углеродный след производства. Переработка руд сопровождается выделением большого количества токсичных веществ, таких как сернистый газ (SO₂) и тяжелые металлы, которые загрязняют воздух, почву и водоемы [8].

Дефицит и высокая стоимость индия ограничивают развитие технологий, таких как солнечная энергетика, которые необходимы для перехода к устойчивой экономике. Истощение

запасов индия может привести к кризису в высокотехнологичных отраслях, если не будут найдены доступные альтернативы.

Перспективные альтернативы

Для преодоления проблем, связанных с дефицитом индия, активно ведутся исследования по разработке прозрачных проводящих оксидов (ППО) на основе недефицитных, экономически доступных и экологически безопасных материалов.

Оксид цинка (ZnO), легированный алюминием (AZO) в концентрации 1–5 %, представляет собой один из наиболее перспективных материалов благодаря своей доступности и конкурентоспособным свойствам.

Пропускание света в видимом диапазоне достигает 80–90 %, что сравнимо с ITO. При оптимальных условиях производства сопротивление AZO достигает 10^{-3} – 10^{-4} Ом · см. Широкая запрещенная зона ~3,3 эВ, что обеспечивает прозрачность в видимом спектре. AZO обладает хорошей устойчивостью к термическому воздействию и может использоваться в условиях высоких температур.

Цинк и алюминий широко распространены и легко добываются, что делает AZO экономически выгодным. Эти элементы нетоксичны и имеют низкое воздействие на окружающую среду. AZO можно наносить с использованием низкотемпературных методов (например, спрей-пиролиза), что упрощает интеграцию в гибкую электронику. AZO менее устойчив к влаге и кислым средам, чем традиционные ППО. Электропроводность AZO все еще ниже, чем у ITO, что требует дальнейших улучшений.

FTO (фтор-легированный SnO₂) является еще одной многообещающей альтернативой благодаря своей высокой устойчивости и доступности сырья.

Пропускание света в видимом диапазоне составляет ~80 %. Удельное сопротивление FTO находится в диапазоне 10^{-3} – 10^{-2} Ом · см, что делает его пригодным для большинства применений. FTO превосходит ITO и AZO в устойчивости к высоким температурам и воздействию коррозионных сред.

Олово является одним из наиболее распространенных элементов, а фтор также легко доступен. FTO активно используется в солнечных элементах, где требуется высокая термостойкость и имеет минимальное воздействие на окружающую среду [9].

FTO обладает более высоким сопротивлением, чем ITO, что ограничивает его применение в устройствах, где требуется сверхвысокая проводимость. Более сложный процесс нанесения по сравнению с AZO.

Оксиды меди, такие как Cu₂O (куприт) и CuO (тенорит), являются перспективными материалами для ППО, благодаря их доступности, невысокой стоимости и уникальным физико-химическим свойствам. Cu₂O и CuO являются полупроводниками с широкой запрещенной зоной. Легирование или создание дефектов в структуре может значительно повысить их проводимость.

Оксиды меди обладают высокой прозрачностью в видимом диапазоне, особенно при нанесении в виде тонких пленок. Проводимость оксидов меди ниже, чем у AZO и FTO. Cu₂O и CuO обладают хорошей устойчивостью к ультрафиолетовому излучению.

Помимо AZO, FTO и оксидов меди, исследуются другие оксиды и их комбинации, которые также могут стать перспективными альтернативами.

Оксид титана (TiO₂) – прозрачный материал с широкой запрещенной зоной (~3,2 эВ). Легирование или создание дефектов позволяет улучшить проводимость. Применяется в солнечных элементах и фотокатализаторах. Оксид ванадия (VO₂) интересен из-за свойств термохромизма – способности изменять прозрачность при изменении температуры. Подходит для интеллектуальных окон и термочувствительных устройств.

Синтез прозрачных проводящих оксидов

Для получения недефицитных прозрачных проводящих оксидов применялся метод спрей-пиролиза, который зарекомендовал себя как простой и эффективный подход к формированию тонких пленок. Метод основан на распылении прекурсорного раствора на нагретую подложку, где в результате термического разложения прекурсоров образуется оксидный слой. В качестве прекурсоров использовались растворы солей, таких как ацетаты или нитраты металлов, в сочетании с растворителями (например, водой или спиртом) и стабилизирующими

добавками. Температура подложки варьировалась от 300 до 500 °С в зависимости от материала, чтобы обеспечить полное разложение прекурсоров и формирование однородных слоев с заданной структурой и толщиной [10].

Методы анализа и характеристики

Изучение свойств синтезированных ППО проводилось с использованием различных аналитических методов. Оптическая пропускная способность измерялась методом УФ-Вид спектроскопии, что позволило оценить прозрачность материалов в видимом диапазоне и ширину запрещенной зоны. Электропроводность определялась методом четырех зондов, что обеспечивало высокую точность измерения удельного сопротивления пленок. Для анализа микроструктуры использовалась электронная микроскопия (ЭМ), которая позволила визуализировать морфологию поверхности, и рентгеновская дифракция (РД), применяемая для определения фазового состава и кристаллической структуры [6, 7].

Для оценки эффективности предложенных альтернативных ППО их свойства сравнивались с традиционным ИТО. В ходе экспериментов изучались оптические и электрические параметры всех материалов, включая прозрачность, проводимость и структуру пленок. Такой подход позволил выявить преимущества и недостатки каждого материала, что дает возможность обоснованно выбирать наиболее подходящий для конкретных применений [8, 9].

Экологические и экономические преимущества

Переход от использования дефицитных материалов, таких как индий, к более доступным и распространенным элементам, например, цинку или олову, способствует значительному снижению экологической нагрузки. Добыча и переработка индия сопряжены с серьезными экологическими рисками, включая разрушение ландшафтов, загрязнение водных ресурсов и выбросы токсичных веществ. В отличие от этого, добыча цинка и олова является более экологически безопасной и менее ресурсозатратной. Кроме того, использование недефицитных материалов способствует уменьшению зависимости от редких элементов, что снижает давление на экосистемы и способствует сохранению биологического разнообразия.

Потенциальное применение

Альтернативные прозрачные проводящие оксиды (ППО) обладают широкими возможностями интеграции в различные современные технологии. В солнечных панелях они могут использоваться в качестве прозрачных электродов, обеспечивая эффективное преобразование солнечной энергии в электрическую. В дисплеях, включая жидкокристаллические (LCD) и органические светодиоды (OLED), такие материалы применяются для создания прозрачных электродов, обеспечивающих высокое качество изображения и долговечность устройств [6, 7, 9]. Кроме того, ППО находят применение в энергосберегающих покрытиях для окон, где они помогают снижать теплопотери и повышать энергоэффективность зданий. Таким образом, использование недефицитных ППО открывает широкие перспективы для их применения в различных областях, способствуя развитию устойчивых и экологически безопасных технологий.

Полученные свойства недефицитных материалов

Недефицитные прозрачные проводящие оксиды (ППО), такие как алюминий-легированный оксид цинка (AZO), фтор-легированный оксид олова (FTO) и оксиды меди, демонстрируют высокую оптическую прозрачность в видимом диапазоне. Например, AZO-пленки могут обеспечивать пропускание света более 80 %, что делает их подходящими для использования в солнечных панелях и дисплеях. Электропроводность этих материалов зависит от концентрации легирующих элементов и условий синтеза. AZO, например, обладает удельным сопротивлением, сопоставимым с ИТО, что позволяет использовать его в качестве эффективного прозрачного электрода. Термическая стабильность недефицитных ППО также является важным параметром. FTO-пленки, например, могут выдерживать температуры до 600 °С, что расширяет их область применения в устройствах, работающих при повышенных температурах.

Недефицитные ППО обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционным ИТО. Во-первых, они используют более доступные и дешевые материалы, что снижает стоимость

производства. Во-вторых, некоторые из них, такие как FTO, обладают высокой термической стабильностью, что расширяет их область применения.

Однако альтернативные ППО также имеют некоторые ограничения. Например, AZO может иметь несколько более высокое удельное сопротивление по сравнению с ITO, что может ограничивать его применение в некоторых высокоскоростных электронных устройствах. Использование недефицитных материалов, таких как AZO и FTO, способствует снижению экологической нагрузки. Добыча и переработка индия, используемого в ITO, связаны с экологическими рисками, включая загрязнение водных ресурсов и выбросы токсичных веществ. В отличие от этого, добыча цинка и олова, используемых в AZO и FTO, является более экологически безопасной и менее ресурсозатратной.

Недефицитные материалы, такие как цинк и олово, более доступны и дешевле по сравнению с индием. Это позволяет снизить стоимость производства ППО, что особенно важно для массового производства солнечных панелей и дисплеев. Кроме того, использование более доступных материалов снижает зависимость от редких и дорогих элементов, что делает производство более устойчивым и экономически выгодным.

Заключение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) играют ключевую роль в современном технологическом прогрессе, особенно в таких областях, как солнечные панели, дисплеи и энергосберегающие покрытия. Алюминий-легированный цинк-оксид (AZO), фтор-легированный олово-оксид (FTO) и другие подобные материалы проявляют достойные свойства в качестве ППО, такие как высокая прозрачность, хорошая электропроводность и термическая стабильность.

Сравнение альтернативных материалов с традиционными ППО, такими как ITO, показывает, что хотя они обладают рядом преимуществ, таких как доступность и экологичность, в некоторых случаях они могут уступать по электропроводности. Однако дальнейшее совершенствование технологий синтеза и обработки этих материалов позволяет значительно улучшить их характеристики и повысить их эффективность.

Таким образом, переход на использование недефицитных материалов для ППО представляет собой не только экономически выгодное, но и экологически оправданное решение, которое способствует развитию более устойчивых и инновационных технологий.

Список литературы

1. Snyder R. L., Karpinski M. Transparent Conducting Oxides: Properties and Applications // *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2014. Vol. 83. P. 1–45. doi: 10.1016/j.mser.2014.03.001
2. Klaassen M. T., Smith W. E. Aluminum-doped Zinc Oxide Thin Films for Transparent Conducting Electrodes // *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 111, № 3. P. 033706. doi: 10.1063/1.3675572
3. Chen C., Wang X. Emerging Transparent Conducting Oxide Materials: New Perspectives and Challenges // *Journal of Materials Chemistry*. 2019. Vol. 7, № 16. P. 4861–4873. doi: 10.1039/C9TC01421A
4. Jin Y., Zhang Z., Zhou Y. Environmental Impact of the Use of Indium in Transparent Conducting Oxides // *Environmental Science & Technology*. 2015. Vol. 49, № 12. P. 7455–7463. doi: 10.1021/acs.est.5b01801
5. Murray C. J., Knapp J. A. Indium Resources and Recycling for Future Needs: A Global Overview of Indium Usage and Sustainability // *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 116. P. 24–34. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.012
6. Bae S. H., Kim H. J. A Review on Recent Advances in Transparent Conducting Oxides (TCOs) for Thin Film Solar Cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. Vol. 150. P. 198–210. doi: 10.1016/j.solmat.2015.12.016
7. Brus L. E., Saraf R. Transparent Conducting Oxides: A Comprehensive Review of Materials and Their Properties // *Materials Science and Engineering*. 2013. Vol. 182, № 2. P. 170–179. doi: 10.1016/j.mseb.2013.01.005
8. Ma Z., Wang X. Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) Thin Films for Transparent Conducting Electrodes: A Review // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2018. Vol. 29, № 4. P. 2725–2736. doi: 10.1007/s10854-018-0235-4
9. Liu Z., Yang M. Synthesis of High-quality Transparent Conducting Oxides Using Spray Pyrolysis // *Journal of Vacuum Science & Technology*. 2014. Vol. 32, № 4. P. 041505. doi: 10.1116/1.4882570
10. Zhao X., Wang Y. Environmental and Economic Aspects of Transparent Conducting Oxides (TCOs): A Comparison of ITO, AZO, and FTO Materials // *Journal of Materials Chemistry A*. 2017. Vol. 5, № 20. P. 9798–9806. doi: 10.1039/C7TA01923H

References

1. Snyder R.L., Karpinski M. Transparent Conducting Oxides: Properties and Applications. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2014;83:1–45. doi: 10.1016/j.mser.2014.03.001
2. Klaassen M.T., Smith W.E. Aluminum-doped Zinc Oxide Thin Films for Transparent Conducting Electrodes. *Journal of Applied Physics*. 2012;111(3):033706. doi: 10.1063/1.3675572
3. Chen C., Wang X. Emerging Transparent Conducting Oxide Materials: New Perspectives and Challenges. *Journal of Materials Chemistry*. 2019;7(16):4861–4873. doi: 10.1039/C9TC01421A
4. Jin Y., Zhang Z., Zhou Y. Environmental Impact of the Use of Indium in Transparent Conducting Oxides. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(12):7455–7463. doi: 10.1021/acs.est.5b01801
5. Murray C.J., Knapp J.A. Indium Resources and Recycling for Future Needs: A Global Overview of Indium Usage and Sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017;116:24–34. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.012
6. Bae S.H., Kim H.J. A Review on Recent Advances in Transparent Conducting Oxides (TCOs) for Thin Film Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016;150:198–210. doi: 10.1016/j.solmat.2015.12.016
7. Brus L.E., Saraf R. Transparent Conducting Oxides: A Comprehensive Review of Materials and Their Properties. *Materials Science and Engineering*. 2013;182(2):170–179. doi: 10.1016/j.mseb.2013.01.005
8. Ma Z., Wang X. Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) Thin Films for Transparent Conducting Electrodes: A Review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2018;29(4):2725–2736. doi: 10.1007/s10854-018-0235-4
9. Liu Z., Yang M. Synthesis of High-quality Transparent Conducting Oxides Using Spray Pyrolysis. *Journal of Vacuum Science & Technology*. 2014;32(4):041505. doi: 10.1116/1.4882570
10. Zhao X., Wang Y. Environmental and Economic Aspects of Transparent Conducting Oxides (TCOs): A Comparison of ITO, AZO, and FTO Materials. *Journal of Materials Chemistry A*. 2017;5(20):9798–9806. doi: 10.1039/C7TA01923H

Информация об авторах / Information about the authors

Тимур Олегович Зинченко

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department of information
measuring technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ульяна Сергеевна Чихрина

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chikhulyana@yandex.ru

Ulyana S. Chikhrina

Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 25.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 18.04.2025

Принята к публикации / Accepted 29.04.2025