

УДК 533.7; 621.793
PACS 47.85.L-, 81.15.-z

Исследование влияния газодинамических параметров распыления на качество тонких пленок прозрачных проводящих оксидов

Т. О. Зинченко^{1†}

¹ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

[†] scar0243@gmail.com

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) находят широкое применение в современной оптоэлектронике благодаря уникальному сочетанию высокой электропроводности и оптической прозрачности в видимом диапазоне спектра. Метод спрей-пиролиза является одним из наиболее перспективных технологических процессов получения тонкопленочных покрытий ППО, однако качество получаемых пленок критически зависит от газодинамических параметров распыления. В работе исследовалось влияние скорости газа-носителя, давления распыления, температуры подложки и концентрации прекурсора на морфологию, кристаллическую структуру и электрофизические свойства тонких пленок оксида индия-олова (ИТО) и оксида цинка, легированного алюминием (AZO). Использовались методы рентгеноструктурного анализа, оптической спектроскопии и измерения электропроводности четырехзондовым методом. Установлено, что оптимальная скорость газа-носителя составляет 2.5–3.0 л/мин при давлении 0.15–0.20 МПа для получения пленок ИТО с минимальным сопротивлением ($8.2 \cdot 10^{-4}$ Ом·см) и максимальной прозрачностью (88% в видимом диапазоне). Увеличение температуры подложки с 350°C до 450°C приводит к улучшению кристаллическости пленок и снижению удельного сопротивления на 40%. Математическая модель процесса показала корреляцию между числом Рейнольдса газового потока и однородностью толщины пленки. Полученные результаты демонстрируют критическую важность оптимизации газодинамических параметров для получения тонких пленок ППО. Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать свойства пленок в зависимости от технологических параметров и может быть использована для оптимизации промышленных процессов производства прозрачных электродов для солнечных элементов и дисплеев.

Ключевые слова: спрей-пиролиз; прозрачные проводящие оксиды; газодинамические параметры; тонкие пленки; оксид индия-олова; оксид цинка; математическое моделирование; оптические свойства; электропроводность; кристаллическая структура

Поступила в редакцию 24.07.2025; после рецензии 17.09.2025; принята к опубликованию 23.09.2025

Investigation of the influence of gas-dynamic spraying parameters on the quality of thin films of transparent conductive oxides

T. O. Zinchenko

Penza State University, Penza, Russia
scar0243@gmail.com

Transparent conductive oxides (TCO) are widely used in modern optoelectronics due to the unique combination of high electrical conductivity and optical transparency in the visible spectrum range. The spray pyrolysis method is one of the most promising technological processes for obtaining thin-film TCO coatings; however, the quality of the resulting films critically depends on the gas-dynamic spraying parameters. The paper investigates how the carrier gas velocity, spraying pressure, substrate temperature, and precursor concentration influence the morphology, crystal structure, and electrophysical properties of thin films of indium tin oxide (ITO) and aluminum-doped zinc oxide (AZO). The study employed the methods of X-ray diffraction analysis, optical spectroscopy, and four-probe measurement of electrical conductivity. It has been established that the optimal carrier gas velocity is 2.5-3.0 l/min at a pressure of 0.15-0.20 MPa for obtaining ITO films with minimum resistance (8.2×10^{-4} Ohm·cm) and maximum transparency (88% in the visible range). Increasing the substrate temperature from 350°C to 450°C leads to improved film crystallinity and a 40% reduction in resistivity. The mathematical model of the process showed a correlation between the Reynolds number of the gas flow and film thickness uniformity. The obtained results demonstrate the critical importance of optimizing gas-dynamic parameters for obtaining TCO thin films. The developed mathematical model allows predicting film properties depending on technological parameters and can be used to optimize industrial processes for producing transparent electrodes for solar cells and displays.

Keywords: spray pyrolysis; transparent conductive oxides; gas-dynamic parameters; thin films; indium tin oxide; zinc oxide; mathematical modeling; optical properties; electrical conductivity; crystal structure

Received 24 July 2025; revised 17 September 2025; accepted 23 September 2025

doi: 10.17072/1994-3598-2025-3-61-68

1. Введение

Современное развитие оптоэлектроники и фотовольтаики неразрывно связано с совершенствованием технологий получения прозрачных проводящих оксидов (ППО) [1, 2]. Эти материалы обладают уникальным сочетанием высокой электропроводности (10^2 – 10^4 См/см) и оптической прозрачности (>80%) в видимом диапазоне спектра, что делает их незаменимыми для создания прозрачных электродов в солнечных элементах, дисплеях и других оптоэлектронных устройствах [3, 4].

Среди различных методов получения тонких пленок ППО особое место занимает спрей-пиролиз, который характеризуется простотой аппаратного оформления, возможностью получения покрытий большой площади и относительно низкой стоимостью [5, 6]. Однако свойства и параметры получаемых пленок критически зависят от множества технологических параметров, среди которых газодинамические характеристики процесса распыления играют ключевую роль [7, 8].

Фундаментальные исследования А. Джонса и соавторов [9] показали, что характер газового потока в зоне распыления определяет размер и скорость капель прекурсора, что непосредственно влияет на механизм формирования пленки. Работы А. Смита и Д. Брауна [10, 11] продемонстрировали связь между режимом течения газа-носителя и морфологией поверхности получаемых покрытий.

Обзор современной литературы показывает, что большинство исследований в области спрей-пиролиза ППО сосредоточены на изучении влияния температуры подложки и концентрации пре-

курсора [12–15]. При этом систематические исследования влияния газодинамических параметров на свойства тонких пленок остаются фрагментарными [16, 17]. Особенно недостаточно изучено влияние скорости газа-носителя и давления распыления на кристаллическую структуру и электрофизические свойства пленок [18, 19].

Важную роль в понимании процессов формирования тонких пленок при спрей-пиролизе играет математическое моделирование [20]. Модели, описывающие тепломассоперенос в системе газ-капля-подложка, позволяют прогнозировать свойства получаемых покрытий и оптимизировать технологические параметры [21, 22]. Однако существующие модели зачастую не учитывают влияние турбулентности газового потока на распределение капель по размерам и их траектории движения [23, 24].

Целью данной работы является систематическое исследование влияния газодинамических параметров распыления (скорости газа-носителя, давления распыления, режима течения) на свойства и параметры тонких пленок прозрачных проводящих оксидов и разработка математической модели для оптимизации технологического процесса.

Задачи исследования:

1. Изучить влияние скорости газа-носителя на морфологию и электрофизические свойства тонких пленок ITO и AZO;
2. Исследовать зависимость кристаллической структуры пленок от давления распыления;
3. Установить корреляцию между режимом течения газа и оптическими свойствами получаемых покрытий;

4. Разработать математическую модель процесса с учетом газодинамических параметров;

2. Материалы и методы

2.1. Экспериментальная установка и условия синтеза

Тонкие пленки прозрачных проводящих оксидов получали методом спрей-пиролиза на специально разработанной установке [25]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Установка включает пневматический распылитель, систему подачи газа-носителя с регулируемым расходом (0.5–5.0 л/мин), нагреватель подложки с прецизионным температурным контролем ($\pm 2^\circ\text{C}$) и систему газодинамического управления.

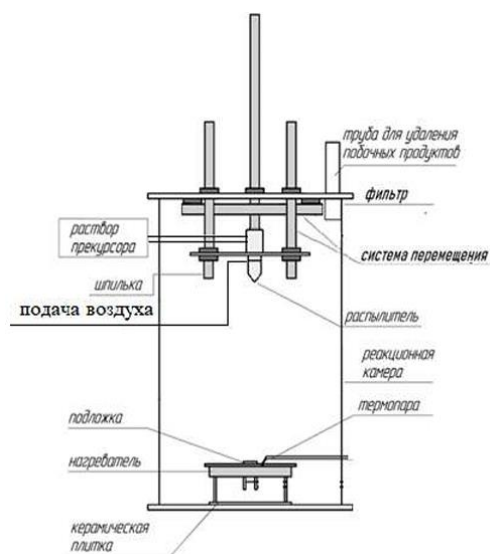


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для получения тонких пленок ППО методом спрей-пиролиза

В качестве прекурсоров использовались:

- для пленок ITO: смесь $\text{InCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (0,05 М) и $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0,01 М) в дистиллированной воде с добавлением HCl ;

- для пленок AZO: смесь $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,1 М) и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (0,01 М) в этиловом спирте.

Подложками служили стеклянные пластины размером $25 \times 25 \times 1$ мм, предварительно очищенные в ультразвуковой ванне последовательно в ацетоне, этиловом спирте и дистиллированной воде.

Варьируемые газодинамические параметры:

- скорость газа-носителя: 1.0–4.0 л/мин;
- давление распыления: 0.10–0.30 МПа;
- расстояние сопло-подложка: 15–35 см.

2.2. Методы исследования

Кристаллическая структура пленок исследовалась методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance ($\text{CuK}\alpha$ -

излучение, $\lambda = 0.154$ нм) в диапазоне углов $2\theta = 20$ – 80° с шагом 0.02° и временем экспозиции 1 с на точку.

Оптические свойства (коэффициент пропускания, коэффициент поглощения, ширина запрещенной зоны) исследовались методом УФ-видимой спектроскопии на спектрофотометре Shimadzu UV-3600 в диапазоне длин волн 300–800 нм.

Электропроводность пленок измерялась четырехзондовым методом на установке Jandel RM3000 при комнатной температуре. Удельное сопротивление рассчитывалось по формуле

$$\rho = (\pi / \ln 2) t (V/I),$$

где t – толщина пленки, V/I – отношение напряжения к току.

2.3. Математическое моделирование

Для описания газодинамических процессов в зоне распыления использовалась система уравнений Навье–Стокса для сжимаемого газа:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}^2) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}), \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho E + p) \mathbf{v}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi, \quad (2.3)$$

где ρ – плотность газа, \mathbf{v} – вектор скорости, p – давление, μ – динамическая вязкость, E – удельная внутренняя энергия, k – теплопроводность, T – температура, Φ – функция диссипации.

Траектории движения капель описывались уравнением:

$$m(d\mathbf{v}_p / dt) = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_B, \quad (2.4)$$

где m – масса капли, \mathbf{v}_p – скорость капли, \mathbf{F}_D – сила аэродинамического сопротивления, \mathbf{F}_G – сила тяжести, \mathbf{F}_B – броуновская сила.

Численное решение проводилось методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent.

3. Результаты исследования

3.1. Влияние скорости газа-носителя на свойства пленок

Исследование влияния скорости газа-носителя на удельное сопротивление пленок ITO (табл. 1) показало нелинейную зависимость удельного сопротивления от данного параметра (рис. 2).

При увеличении скорости газа с 1.0 до 2.5 л/мин наблюдается снижение удельного сопротивления с $2.4 \cdot 10^{-3}$ до $8.2 \cdot 10^{-4}$ Ом·см. Дальнейшее увеличение скорости до 4.0 л/мин приводит к росту сопротивления до $1.5 \cdot 10^{-3}$ Ом·см.

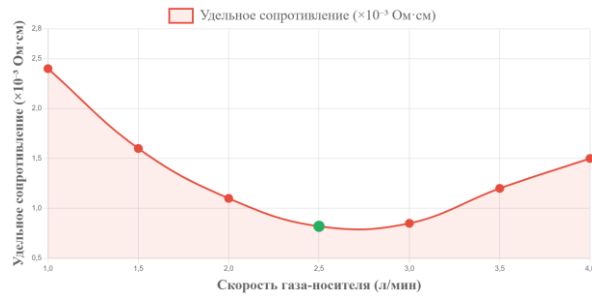


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления пленок ITO от скорости газа-носителя при температуре подложки 400°C и давлении распыления 0.18 МПа

Таблица 1. Влияние скорости газа-носителя на свойства пленок ITO

Скорость газа, л/мин	Толщина, нм	Удельное сопротивление, Ом·см	Прозрачность в видимом диапазоне, %	Размер кристаллитов, нм
1.0	280	$2.4 \cdot 10^{-3}$	82	15
1.5	320	$1.6 \cdot 10^{-3}$	85	18
2.0	350	$1.1 \cdot 10^{-3}$	87	22
2.5	380	$8.2 \cdot 10^{-4}$	88	25
3.0	390	$8.5 \cdot 10^{-4}$	87	24
3.5	370	$1.2 \cdot 10^{-3}$	85	20
4.0	340	$1.5 \cdot 10^{-3}$	83	18

Рентгеноструктурный анализ показал, что минимальное удельное сопротивление соответствуют максимальной степени кристалличности пленок. При скорости газа 2.5 л/мин интенсивность основного рефлекса (222) составляет 1450 имп/с, что на 35% выше, чем при скорости 1.0 л/мин.

При скорости газа, соответствующей минимальному сопротивлению, формируется наиболее однородная микроструктура с размером зерен 80–120 нм. При меньших скоростях наблюдается образование крупных агломератов (до 300 нм), а при больших – формирование пористой структуры с размером пор 50–80 нм. Размер пор определялся по СЭМ-изображениям методом количественного морфометрического анализа с вычислением эквивалентного диаметра круга.

3.2. Влияние давления распыления на кристаллическую структуру

Исследование влияния давления распыления на кристаллическую структуру пленок AZO показало существенные изменения в ориентации кристаллитов (табл. 2). При низком давлении (0.10 МПа) преобладающей является ориентация (100), в то время как при давлении 0.18 МПа доминирует ориентация (002), характерная для высококачественных пленок ZnO.

Таблица 2. Влияние давления распыления на кристаллическую структуру пленок AZO

Давление,	Интенсивность рефлексов, имп/с			Текстурный коэффициент TC (002)	Удельное сопротивление, Ом·см
	(100)	(002)	(011)		
0.10	850	420	680	15	$3.2 \cdot 10^{-3}$
0.13	720	680	650	18	$2.1 \cdot 10^{-3}$
0.15	580	920	580	22	$1.4 \cdot 10^{-3}$
0.18	420	1240	520	25	$9.8 \cdot 10^{-4}$
0.20	380	1180	480	24	$1.1 \cdot 10^{-3}$
0.25	520	980	610	20	$1.8 \cdot 10^{-3}$
0.30	680	760	720	18	$2.5 \cdot 10^{-3}$

Текстурный коэффициент рассчитывался по формуле:

$$TC(002) = I(002) / [I(001) + I(002) + I(011)] \quad (3.1)$$

где $I(hkl)$ – интенсивность соответствующего рефлекса.

3.3. Оптические свойства и газодинамические параметры

Спектроскопические исследования показали прямую корреляцию между газодинамическими параметрами и оптическими характеристиками пленок (рис. 3).

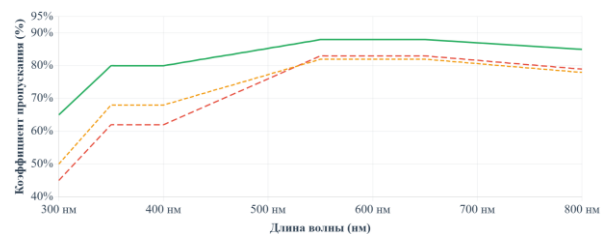


Рис. 3. Спектры пропускания пленок ITO, полученных при различных газодинамических параметрах: 1 – оптимальные условия ($v = 2.5$ л/мин, $p = 0.18$ МПа); 2 – $v = 1.0$ л/мин, $p = 0.15$ МПа; 3 – $v = 4.0$ л/мин, $p = 0.25$ МПа.

Ширина запрещенной зоны пленок ITO увеличивается с 3.65 до 3.82 эВ при оптимизации скорости газа-носителя, что связано с эффектом Бурштейна–Мосса в легированном полупроводнике. Газодинамические условия распыления (скорость/давление потока и режим течения) определяют распределение размеров капель и время их испарения, степень уплотнения и дефектную химию растущей пленки (концентрацию кислородных вакансий и эффективность активации донорных центров Sn). Это приводит к росту концентрации носителей n и заполнению нижних состояний зоны проводимости; вследствие эффекта Бурштейна–Мосса оптический порог сдвигается

в сторону больших энергий. При увеличении n от $\sim 5 \cdot 10^{19}$ до $\sim 1 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$ и $m^* \approx 0.35\text{--}0.4$ m_0 даёт сдвиг на десятки меВ, согласующийся с наблюдаемым ростом ширины запрещённой зоны. Вклад ренормализации зоны носителями в этих режимах невелик и ВМ-сдвиг доминирует.

Коэффициент пропускания в видимом диапазоне достигает максимального значения 88% при скорости газа 2.5 л/мин и давлении 0.18 МПа. При отклонении от оптимальных условий наблюдается снижение прозрачности из-за увеличения рассеяния света на неоднородностях структуры.

3.4. Математическое моделирование газодинамических процессов

Численное моделирование показало, что режим течения газа-носителя характеризуется числом Рейнольдса:

$$Re = \rho v D / \mu \quad (3.2)$$

где D – характерный размер сопла (3 мм).

При оптимальных условиях (скорость газа 2.5 л/мин, давление 0.18 МПа) число Рейнольдса составляет $Re \approx 2400$, что соответствует переходной области между ламинарным и турбулентным режимами течения.

Расчет траекторий каплей показал, что при $Re < 2000$ капли движутся по прямолинейным траекториям, что приводит к неравномерному распределению материала по поверхности подложки. При $Re > 3000$ турбулентные пульсации вызывают хаотическое движение каплей и образование неоднородной структуры пленки.

Установлена корреляция между числом Рейнольдса и коэффициентом неоднородности толщины пленки:

$$\delta = \sqrt{(\sum (t_i - t_{cp})^2) / n}, \quad (3.3)$$

где t_i – локальная толщина, t_{cp} – средняя толщина, n – количество измерений.

Минимальная неоднородность ($\delta = 4.2\%$) достигается при $Re = 2400 \pm 200$.

4. Обсуждение и заключения

Полученные экспериментальные результаты и данные математического моделирования позволяют сформулировать комплексное понимание влияния газодинамических параметров на свойства и параметры тонких пленок прозрачных проводящих оксидов.

Ключевым результатом исследования является установление оптимального режима газодинамических параметров: скорость газа-носителя 2.5–3.0 л/мин при давлении 0.15–0.20 МПа. В этих условиях реализуется переходный режим течения ($Re \approx 2400$), обеспечивающий оптимальное сочетание

направленности движения каплей и их равномерного распределения по поверхности подложки.

Физический механизм влияния газодинамических параметров на свойства пленок связан с изменением условий тепломассопереноса в системе газ–капля–подложка [26]. При оптимальной скорости газа обеспечивается достаточное время для полного испарения растворителя и пиролиза прекурсора до контакта с подложкой, что способствует формированию кристаллической структуры с минимальным количеством дефектов.

Установленная корреляция между числом Рейнольдса и качеством пленок имеет важное практическое значение для масштабирования технологического процесса. Поддержание Re в диапазоне 2200–2600 позволяет получать пленки с воспроизводимыми свойствами независимо от геометрических размеров установки.

Разработанная математическая модель адекватно описывает экспериментальные данные (коэффициент корреляции $R^2 = 0.92$) и может быть использована для оптимизации промышленных процессов производства прозрачных электродов.

Практическая значимость результатов подтверждается получением пленок ИТО с низким удельным сопротивлением ($8.2 \cdot 10^{-4}$ Ом·см) при высокой прозрачности (88%), что соответствует мировым аналогам [27, 28].

Направления дальнейших исследований включают:

1. Изучение влияния формы и размеров сопла на газодинамические характеристики;
2. Исследование процессов формирования пленок в условиях пульсирующего газового потока;
3. Разработку системы автоматического управления газодинамическими параметрами на основе онлайн-контроля свойств пленок.

Список литературы

1. Fortunato E., Ginley D., Hosono H., Paine D. C. Transparent conducting oxides for photovoltaics // MRS Bulletin. 2007. Vol. 32, № 3. P. 242–247. DOI: 10.1557/mrs2007.29
2. Ellmer K. Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes // Nature Photonics. 2012. Vol. 6, № 12. P. 809–817. DOI: 10.1038/nphoton.2012.282
3. Granqvist C. G. Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2007. Vol. 91, № 17. P. 1529–1598. DOI: 10.1016/j.solmat.2007.04.031
4. Ginley D. S., Bright C. Transparent conducting oxides // MRS Bulletin. 2000. Vol. 25, № 8. P. 15–18. DOI: 10.1557/mrs2000.256
5. Chamberlin R. R., Skarman J. S. Chemical spray deposition process for inorganic films // Journal of

- the Electrochemical Society. 1966. Vol. 113, № 1. P. 86–89. DOI: 10.1149/1.2423870
6. Chopra K. L., Major S., Pandya D. K. Transparent conductors – A status review // *Thin Solid Films*. 1983. Vol. 102, № 1. P. 1–46. DOI: 10.1016/0040-6090(83)90256-0
 7. Рембеза С. И., Белоусов С. А., Кошелева Н. Н., Рембеза Е. С., Свистова Т. В. Аморфные пленки тройных оксидов цинка и олова для прозрачной электроники // *Письма в ЖТФ*. 2018. Т. 44, № 21. С. 11–18. DOI: 10.21883/PJTF.2018.21.46858.17038
 8. Badadhe S. S., Madhuri W. Effect of gas flow rate on structural and optical properties of spray deposited SnO₂ thin films // *Materials Letters*. 2011. Vol. 65, № 12. P. 1815–1817. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.03.067
 9. Jones A. C., Hitchman M. L. Chemical Vapour Deposition: Precursors, Processes and Applications. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2009. 576 p.
 10. Smith A. W. Fundamental studies of droplet evaporation and film formation in spray pyrolysis // *Journal of Materials Science*. 2008. Vol. 43, № 18. P. 6238–6245. DOI: 10.1007/s10853-008-2939-5
 11. Brown D. M., Wilson J. R. Gas-dynamic effects in spray pyrolysis deposition // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518, № 15. P. 4246–4251. DOI: 10.1016/j.tsf.2010.01.042
 12. Ремеле В. Е., Мутцев М. А., Кузьмин М. В. Количественный анализ пленочных структур с диффузной границей раздела, исследованных методом электронной Оже-спектроскопии // *Физика твердого тела*. 2023. Т. 65, № 9. С. 1611–1617. DOI: 10.21883/FTT.2023.09.56260.89
 13. Kumar V., Singh R. G., Purohit L. P., Mehra R. M. Structural and optical characterization of ZnO thin films deposited by spray pyrolysis // *Journal of Physics D*. 2011. Vol. 44, № 32, 325404. DOI: 10.1088/0022-3727/44/32/325404
 14. Agashe C., Kluth O., Hüpkens J., Zastrow U., Rech B., Wuttig M. Efforts to improve carrier mobility in radio frequency sputtered aluminum doped zinc oxide films // *Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 95, № 4. P. 1911–1917. DOI: 10.1063/1.1641524
 15. Хомец А. Л., Сафронов И. В., Филонов А. Б., Мигас Д. Б. Влияние морфологии поверхности и границ раздела на продольную фононную теплопроводность в тонкопленочных структурах Ge(001) и Si/Ge(001) // *Физика и техника полупроводников*. 2023. Т. 57, № 3. С. 239–248. DOI: 10.21883/FTP.2023.03.55624.4742
 16. García-Valenzuela A., Martínez-Castañón G. A., Ruiz F. Influence of the gas flow rate on the formation of SnO₂ nanoparticles by spray pyrolysis // *Materials Chemistry and Physics*. 2012. Vol. 132, № 2–3. P. 618–623. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.11.072
 17. Голуб В. В., Киверин А. Д., Садохина Т. Д., Яковенко И. С. Генерация направленных потоков микрочастиц путем сжигания газообразного топлива в нестационарном режиме // *Письма в ЖТФ*. 2018. Т. 44, № 22. С. 88–95. DOI: 10.21883/PJTF.2018.22.46926.17463
 18. Ashour A., Kaid M. A., El-Sayed N. Z., Ibrahim A. A. Physical properties of ZnO thin films deposited by spray pyrolysis technique // *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252, № 22. P. 7844–7848. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.09.048
 19. Wienke J., Booi A. S. Temperature- and thickness-dependent optical properties of In₂O₃-SnO₂ films // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516, № 14. P. 4508–4512. DOI: 10.1016/j.tsf.2007.10.126
 20. Messing G. L., Zhang S. C., Jayanthi G. V. Ceramic powder synthesis by spray pyrolysis // *Journal of the American Ceramic Society*. 1993. Vol. 76, № 11. P. 2707–2726. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1993.tb04007.x
 21. Рембеза С. И., Кошелева Н. Н., Рембеза Е. С., Свистова Т. В., Плотникова Е. Ю. Электрофизические свойства плёнок (SnO₂)_x(ZnO)_{1-x} для прозрачной электроники // *Нано- и микросистемная техника*. 2016. Т. 18, № 11. С. 699–707.
 22. Рембеза С. И., Синельников Б. М., Рембеза Е. С., Каргин Н. И. Физические методы исследования материалов твердотельной электроники. Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. 432 с.
 23. Mueller R., Mädler L., Pratsinis S. E. Nanoparticle synthesis at high production rates by flame spray pyrolysis // *Chemical Engineering Science*. 2003. Vol. 58, № 10. P. 1969–1976. DOI: 10.1016/S0009-2509(03)00022-8
 24. Johannessen T., Jensen J. R., Mosleh M., Johansen J., Quaade U., Livbjerg H. Flame synthesis of nanoparticles // *Chemical Engineering Research and Design*. 2004. Vol. 82, № 11. P. 1444–1452. DOI: 10.1205/cerd.82.11.1444.52025
 25. Зинченко Т. О. Структура информационно-измерительной и управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2023, № 2 (44). С. 22–27. DOI: 10.21685/2307-5538-2023-2-3.
 26. Рембеза С. И., Рембеза Е. С., Свистова Т. В., Кошелева Н. Н. Синтез и свойства металлооксидных пленок. Воронеж: ВГТУ, 2017. 176 с.
 27. Haacke G. New figure of merit for transparent conductors // *Journal of Applied Physics*. 1976. Vol. 47, № 9. P. 4086–4089. DOI: 10.1063/1.323240
 28. Gordon R. G. Criteria for choosing transparent conductors // *MRS Bulletin*. 2000. Vol. 25, № 8. P. 52–57. DOI: 10.1557/mrs2000.151

References

- Fortunato E., Ginley D., Hosono H., Paine D. C. Transparent conducting oxides for photovoltaics. *MRS Bulletin*, 2007, vol. 32, no. 3, pp. 242–247. DOI: 10.1557/mrs2007.29.
- Ellmer K. Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes. *Nature Photonics*, 2012, vol. 6, no. 12, pp. 809–817. DOI: 10.1038/nphoton.2012.282
- Granqvist C. G. Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, vol. 91, no. 17, pp. 1529–1598. DOI: 10.1016/j.solmat.2007.04.031
- Ginley D. S., Bright C. Transparent conducting oxides. *MRS Bulletin*, 2000, vol. 25, no. 8, pp. 15–18. DOI: 10.1557/mrs2000.256
- Chamberlin R. R., Skarman J. S. Chemical spray deposition process for inorganic films. *Journal of the Electrochemical Society*, 1966, vol. 113, no. 1, pp. 86–89. DOI: 10.1149/1.2423870
- Chopra K. L., Major S., Pandya D. K. Transparent conductors – A status review. *Thin Solid Films*, 1983, vol. 102, no. 1, pp. 1–46. DOI: 10.1016/0040-6090(83)90256-0
- Rembeza S. I., Belousov S. A., Kosheleva N. N., Rembeza E. S., Svistova T. V. Amorphous films of ternary zinc and tin oxides for transparent electronics. *Technical Physics Letters*, 2018, vol. 44, no. 11, pp. 984–987. DOI: 10.1134/S1063785018110147
- Badadhe S.S., Madhuri W. Effect of gas flow rate on structural and optical properties of spray deposited SnO₂ thin films. *Materials Letters*, 2011, vol. 65, no. 12, pp. 1815–1817. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.03.067
- Jones A. C., Hitchman M. L. Chemical Vapour Deposition: Precursors, Processes and Applications. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2009. 576 p.
- Smith A. W. Fundamental studies of droplet evaporation and film formation in spray pyrolysis. *Journal of Materials Science*, 2008, vol. 43, no. 18, pp. 6238–6245. DOI: 10.1007/s10853-008-2939-5
- Brown D. M., Wilson J. R. Gas-dynamic effects in spray pyrolysis deposition. *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, no. 15, pp. 4246–4251. DOI: 10.1016/j.tsf.2010.01.042
- Remele V. E., Mittsev M. A., Kuz'min M. V. Quantitative analysis of thin-film structures with diffuse interfaces studied by Auger electron spectroscopy. *Fizika Tverdogo Tela*, 2023, vol. 65, no. 9, pp. 1611–1617. DOI: 10.21883/FTT.2023.09.56260.89 (In Russian)
- Kumar V., Singh R. G., Purohit L. P., Mehra R. M. Structural and optical characterization of ZnO thin films deposited by spray pyrolysis. *Journal of Physics D*, 2011, vol. 44, no. 32, 325404. DOI: 10.1088/0022-3727/44/32/325404
- Agashe C., Kluth O., Hüpkens J., Zastrow U., Rech B., Wuttig M. Efforts to improve carrier mobility in radio frequency sputtered aluminum doped zinc oxide films. *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 95, no. 4, pp. 1911–1917. DOI: 10.1063/1.1641524
- Khomets A. L., Safronov I. V., Filonov A. B., Migas D.B. Effect of surface morphology and interfaces on longitudinal phonon thermal conductivity in Ge(001) and Si/Ge(001) thin-film structures. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, 2023, vol. 57, no. 3, pp. 239–248. DOI: 10.21883/FTP.2023.03.55624.4742 (In Russian)
- García-Valenzuela A., Martínez-Castañón G.A., Ruiz F. Influence of the gas flow rate on the formation of SnO₂ nanoparticles by spray pyrolysis. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, vol. 132, no. 2–3, pp. 618–623. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.11.072
- Golub V. V., Kiverin A. D., Sadokhina T. D., Yakovenko I. S. Generation of directed flows of microparticles by burning gaseous fuel in an unsteady regime. *Technical Physics Letters*, 2018, vol. 44, no. 11, pp. 1038–1041. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785018110202>
- Ashour A., Kaid M. A., El-Sayed N. Z., Ibrahim A. A. Physical properties of ZnO thin films deposited by spray pyrolysis technique. *Applied Surface Science*, 2006, vol. 252, no. 22, pp. 7844–7848. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.09.048
- Bange K., Gambke T. Electrochromic materials for optical switching devices. *Advanced Materials*, 1990, vol. 2, no. 1, pp. 10–16. DOI: 10.1002/adma.19900020103
- Messing G. L., Zhang S. C., Jayanthi G. V. Ceramic powder synthesis by spray pyrolysis. *Journal of the American Ceramic Society*, 1993, vol. 76, no. 11, pp. 2707–2726. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1993.tb04007.x
- Rembeza S. I., Kosheleva N. N., Rembeza E.S., Svistova T. V., Plotnikova E. Yu. Electrophysical properties of (SnO₂)_x(ZnO)_{1-x} (x = 0...0.5) films for transparent electronics. *Nano- and Microsystem Technology*, 2016, vol. 18, no. 11, pp. 705–710.
- Rembeza S. I., Sinel'nikov B. M., Rembeza E. S., Kargin N. I. *Physical Methods for Studying Materials of Solid-State Electronics*. Stavropol: SevKavGTU, 2010. 432 p. (In Russian).

23. Mueller R., Mädler L., Pratsinis S. E. Nanoparticle synthesis at high production rates by flame spray pyrolysis. *Chemical Engineering Science*, 2003, vol. 58, no. 10, pp. 1969–1976. DOI: 10.1016/S0009-2509(03)00022-8
24. Johannessen T., Jensen J. R., Mosleh M., Johansen J., Quaade U., Livbjerg H. Flame synthesis of nanoparticles. *Chemical Engineering Research and Design*, 2004, vol. 82, no. 11, pp. 1444–1452. DOI: 10.1205/cerd.82.11.1444.52025
25. Zinchenko T. O. Structure of the information-measuring and control system for transparent conductive oxide synthesis. *Measurement. Monitoring. Management. Control*, 2023, no. 2 (44), pp. 22–27. DOI: 10.21685/2307-5538-2023-2-3 (In Russian)
26. Rembeza S. I., Rembeza E. S., Svistova T. V., Kosheleva N. N. *Synthesis and Properties of Metal-Oxide Films*. Voronezh: VGTU, 2017. 176 p. (In Russian)
27. Haacke G. New figure of merit for transparent conductors. *Journal of Applied Physics*, 1976, vol. 47, no. 9, pp. 4086–4089. DOI: 10.1063/1.323240
28. Gordon R. G. Criteria for choosing transparent conductors. *MRS Bulletin*, 2000, vol. 25, no. 8, pp. 52–57. DOI: 10.1557/mrs2000.151

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Зинченко Т. О. Исследование влияния газодинамических параметров распыления на качество тонких пленок прозрачных проводящих оксидов // Вестник Пермского университета. Физика. 2025. № 3. С. 61–68. doi: 10.17072/1994-3598-2025-3-61-68

Please cite this article in English as:

Zinchenko T. O. Investigation of the influence of gas-dynamic spraying parameters on the quality of thin films of transparent conductive oxides. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2025, no. 3, pp. 61–68. doi: 10.17072/1994-3598-2025-3-61-68

Сведения об авторе

Тимур Олегович Зинченко, канд. тех. наук, ст. преподаватель кафедры информационно-измерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет, ул. Красная, 40, Пенза, 440026

Author information

Timur O. Zinchenko, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer, Department of Information and Measurement Technology and Metrology, Penza State University; 40, Krasnaya st., Penza, 440026, Russia