

УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАСТВОРА

Т. О. Зинченко¹, Е. А. Печерская², В. И. Кондрашин³,
В. С. Александров⁴, Г. В. Козлов⁵, А. И. Левин⁶

^{1,2,4,5,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

³ ООО «Парадигма», Пенза, Россия

¹ scar0243@gmail.com, ² pea1@list.ru, ³ vlad_kondrashin@mail.ru,

⁴ vsalexrus@gmail.com, ⁵ gvkl17@yandex.ru, ⁶ levin.alescha2013@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность цели.* Традиционным методам синтеза прозрачных проводящих оксидов – перспективным материалам опто- и полупроводниковых приборов и устройств присущи серьезные недостатки, обусловленные использованием вакуума, высокой стоимостью производства. Цель работы заключается в исследовании влияния на свойства прозрачных проводящих оксидов параметров раствора при использовании метода спрей-пиролиза, который позволяет устранить указанные недостатки. *Материалы и методы.* В качестве материала для получения прозрачных проводящих оксидов выбран оксид олова, легированный сурьмой, который обладает следующими преимуществами: химическая инертность, устойчивость при высоких температурах и в атмосферных условиях, достаточно высокие показатели прозрачности и проводимости. Синтез покрытия осуществлен методом спрей-пиролиза, который позволяет устранить недостатки других методов, требующих наличие вакуума, а следовательно, имеющих высокую стоимость производства. *Результаты.* Исследовано влияние объема раствора, концентрации примеси, концентрации прекурсоров на свойства прозрачных проводящих покрытий (поверхностное сопротивление, удельную проводимость, концентрацию носителей, длину свободного пробега). *Выводы.* В результате исследования синтезированных образцов показано, что при увеличении объема раствора наблюдается уменьшение поверхностного сопротивления и повышение удельной проводимости. Определено, что оптимальное значение концентрации прекурсора $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ для достижения минимального поверхностного сопротивления образцов с покрытием SnO_2 составляет 0,25 моль/л.

Ключевые слова: спрей-пиролиз, прозрачный проводящий оксид, прекурсор, примесь, объем раствора, поверхностное сопротивление

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90044.

Для цитирования: Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И., Александров В. С., Козлов Г. В., Левин А. И. Управление свойствами прозрачных проводящих оксидов в зависимости от параметров раствора // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 64–72. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-8

CONTROL OF THE PROPERTIES OF TRANSPARENT CONDUCTING OXIDES DEPENDING ON THE SOLUTION PARAMETERS

T.O. Zinchenko¹, E.A. Pecherskaya², V.I. Kondrashin³,
V.S. Aleksandrov⁴, G.V. Kozlov⁵, A.I. Levin⁶

^{1,2,4,5,6} Penza State University, Penza, Russia

³ Paradigm LLC, Penza, Russia

¹ scar0243@gmail.com, ² pea1@list.ru, ³ vlad_kondrashin@mail.ru,

⁴ vsalexrus@gmail.com, ⁵ gvkl17@yandex.ru, ⁶ levin.alescha2013@yandex.ru

Abstract. *Background.* Traditional methods of synthesis of transparent conducting oxides—a promising material for opto- and semiconductor devices and devices—have serious disadvantages due to the use of vacuum and high production costs. The aim of the work is to study the effect of the solution parameters on the properties of transparent conducting

oxides when using the spray-pyrolysis method, which eliminates these disadvantages. *Materials and methods.* As a material for the production of transparent conducting oxides, tin oxide doped with antimony is selected, which has the following advantages: chemical inertia, stability at high temperatures and in atmospheric conditions, sufficiently high transparency and conductivity. The coating was synthesized by spray pyrolysis, which eliminates the disadvantages of other methods that require a vacuum, and therefore have a high production cost. *Results.* The influence of the solution volume, impurity concentration, and precursor concentration on the properties of transparent conductive coatings (surface resistance, specific conductivity, carrier concentration, and free path length) is studied. *Conclusions.* As a result of the study of the synthesized samples, it is shown that with an increase in the volume of the solution, a decrease in the surface resistance and an increase in the specific conductivity are observed. It is determined that the optimal concentration of the precursor $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ to achieve the minimum surface resistance of samples coated with SnO_2 is 0,25 mol/l.

Keywords: pyrolysis spray, transparent conductive oxide, precursor, impurity, solution volume, surface resistance

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the RFBR as part of a scientific project № 20-38-90044.

For citation: Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kondrashin V.I., Alexandrov V.S., Kozlov G.V., Levin A.I. Control of the properties of transparent conducting oxides depending on the solution parameters. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):64–72. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-8

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) широко используются в опто- и полупроводниковых приборах и устройствах. Современному этапу развития технологий присуща тенденция замены оксида индия – олова на альтернативные материалы, такие как оксид олова-сурьмы, оксид цинка-алюминия, оксид олова-фтора и ряд других. При легировании примесью таким оксидам присущи высокие уровни проводимости и прозрачности. Благодаря легированию достигается возрастание концентрации носителей заряда образующихся в зонной структуре MeO неглубоких примесных уровней. При этом валентность атома примеси должна быть выше, чем у атома металла, образующего оксидное соединение [1, 2]. При этом ППО присуща проводимость *n*-типа.

Кроме высокой проводимости, в видимой и ближней инфракрасной части электромагнитного спектра излучения ППО присуще высокое значение коэффициента пропускания $T > 80\%$. Область пропускания ППО характеризуется длиной волны λ в диапазоне от 400 до 1500 нм. При повышении длины волны имеет место отражение света ввиду наличия плазменного края. При этом частота света ω совпадает с плазменной частотой ω_p коллективных колебаний носителей заряда в материале. Напротив, при понижении длины волны в ультрафиолетовой области ($\lambda < 350$ нм) наблюдается поглощение фотонов с энергией $\hbar\omega > E_g$, поэтому светопередача ограничена запрещенной зоной. Для получения таких оксидов может использоваться несколько методов: реактивное испарение, МОСVD, высокочастотное распыление и химическое осаждение из паровой фазы и др. Однако традиционные методы обладают рядом недостатков, один из наиболее существенных – использование вакуума, что усложняет производство прозрачных проводящих оксидов и отражается на стоимости таких покрытий.

В настоящей статье представлены результаты анализа технологических режимов, в том числе параметров раствора при получения прозрачных проводящих оксидов методом спрей-пиролиза. В качестве материала использован оксид олова, легированный сурьмой, который обладает следующими преимуществами: химическая инертность, устойчивость при высоких температурах и в атмосферных условиях, достаточно высокие показатели прозрачности и проводимости.

Постановка задачи

Цель – теоретические и экспериментальные исследования влияния параметров раствора на свойства прозрачных проводящих оксидов, поскольку параметры раствора, такие как его объем, концентрация прекурсора, концентрация примеси напрямую влияют на проводимость

и пропускную способность ППО. Особенно стоит учитывать, что оптические и электрические свойства напрямую связаны с плазменной частотой. Достигнутые результаты целесообразно использовать при создании информационно-управляющей системы (ИУС) синтеза методом спрей-пиролиза ППО, применяемых в производстве солнечных элементов, умных стекол, органических светодиодов, чувствительных элементов для газовых сенсоров, покрытия для LCD-экрана, сенсорных экранов [3–6].

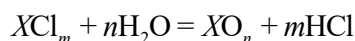
Для получения прозрачных проводящих оксидов использованы натриево-кальциево-силикатные стекла, квадратной формы размером 2,5 на 2,5 см. Технология получения прозрачных проводящих оксидов включает следующие основные этапы:

- этап подготовки поверхности стеклянных подложек;
- этап подготовки растворов прекурсоров;
- этап осаждения на поверхности подложек пленок диоксида олова (как чистых, так и легированных сурьмой) [7].

В статье наибольшее внимание уделено исследованию прекурсоров, поскольку параметры раствора оказывают существенное влияние на параметры качества покрытий при производстве прозрачных проводящих оксидов методом пиролиза аэрозолей.

Использованы следующие вещества: первый прекурсор – тетрахлорид олова ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$); второй прекурсор – трихлорид сурьмы (SbCl_3); растворитель – этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

Для получения оксида олова выбран в качестве прекурсора тетрахлорид пентагидрат олова. Формирование пленки оксида металла на примере хлорида описывается известной формулой



где X – металл, например, Cu, Zn, Sn.

Что касается трихлорида сурьмы, то выбор прекурсора обусловлен возможностью получения сурьмы чистотой 99,999 %. При этом сурьма в чистом виде является токсичным материалом, указанной проблеме посвящен ряд работ [8, 9].

Сурьма в качестве примеси выбрана в связи с тем, что результаты проводимости и прозрачности покрытий оксида олова с сурьмой имеют достаточно высокие показатели для использования в качестве прозрачных проводящих оксидов [10].

Также следует отметить, что в качестве растворителя необходимо использовать спиртовые растворы, поскольку водные растворы могут вызвать растрескивание подложек [11].

Далее представлены основные аспекты подготовки раствора первого прекурсора для осуществления синтеза пленок диоксида олова без примесей. При приготовлении раствора объемом $V_{\text{rast}} = 60$ мл и молярной концентрацией $C_M = 0,25$ моль/л, для расчета массы данного прекурсора m_{prec1} применено выражение

$$m_{\text{prec1}} = C_m \cdot V_{\text{rast}} \cdot M_{\text{prec1}},$$

где M_{prec1} – молярная масса первого прекурсора.

Расчетным путем получено значение $m_{\text{prec1}} = 5,26$ г, для взвешивания прекурсора использованы электронные весы. Данная масса порошка тетрахлорида пентагидрата олова помещена в емкость с этанолом объемом 30 мл и перемешана магнитной мешалкой на протяжении 10 мин, что способствовало быстрому растворению прекурсора. Затем в емкость был добавлен этанол до получения общего объема смеси 60 мл, после чего раствор повторно был перемешан на протяжении 30 мин. Приготовление раствора осуществляется непосредственно перед его использованием, в это же время выполнена сушка подложек.

Методика подготовки раствора, содержащего первый и второй прекурсора для получения легированных сурьмой пленок диоксида олова. Первый прекурсор массой m_{prec1} растворен в этаноле объемом 30 мл. Затем в смесь добавлен порошок трихлорида сурьмы, имеющий массу m_{prec2} ; полученный раствор на протяжении 10 мин перемешан магнитной мешалкой. После этого в емкость добавлен этанол до получения объема 60 мл и повторно перемешан на протяжении 90 мин.

Для синтеза пленок диоксида олова, имеющих разный уровень легирования, использован второй прекурсор с разной мольной долей N_{prec2} трихлорида сурьмы, $N_{prec2} = (0,001; 0,0005; 0,00025)$. Масса второго прекурсора m_{prec2} рассчитана по формуле

$$m_{prec2} = n_{prec2} \cdot M_{prec2},$$

где n_{prec2} – количество вещества второго прекурсора; M_{prec2} – молярная масса второго прекурсора.

Для определения количества вещества второго прекурсора n_{prec2} использовано выражение

$$n_{prec2} = \frac{N_{prec2} (n_{C_2H_5OH} + n_{prec1})}{1 - N_{prec2}},$$

где $n_{C_2H_5OH}$ – количество вещества этанола, n_{prec1} – количество вещества первого прекурсора.

При этом учтено, что мольная доля компонента раствора представляет собой отношение количества вещества компонента к суммарному количеству вещества всех компонентов в растворе.

Вычисленные значения массы второго прекурсора m_{prec2} при соответствующих концентрациях данного прекурсора сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения масс при соответствующих концентрациях второго прекурсора

m_{prec2} , Г	N_{prec2} , %
0,055	0,025
0,11	0,05
0,22	0,1

Результаты экспериментов

Значения технологических параметров синтеза образцов прозрачных проводящих оксидов на основе диоксида олова сведены в табл. 2.

Таблица 2

Технологические параметры процесса синтеза ППО

Технологический параметр	Значение параметра
Материал подложек	Натриево-кальциево-силикатное стекло
Первый прекурсор	$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Второй прекурсор	SbCl_3
Растворитель	Этанол
Газ-носитель	Сжатый воздух
Молярная концентрация первого прекурсора, C_M	0,25 моль/л
Концентрация второго прекурсора, N_{prec2}	0,1 % 0,05 % 0,025 %
Объем растворов, V_{rast}	От 5 до 20 мл
Расстояние между распылителем и подложкой, l	300 мм
Входное давление воздуха в распылителе, p	2 бар
Температура нагревателя, T_S	450 °С

Рисунок 1 демонстрирует, каким образом концентрация тетрахлорида пентагидрата олова оказывает влияние на поверхностное сопротивление покрытий на основе диоксида олова. В результате многократных экспериментов, нацеленных на достижение минимального поверхностного сопротивления R_S образцов с покрытием SnO_2 , получен результат – оптимальное значение концентрации прекурсора $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – это 0,25 моль/л, также необходимо отметить, что оптимальные значения параметров T_S , C_M , l , p тоже подобраны таким способом [12–14].

В результате выполненных исследований синтезированы пленки ППО при различных условиях, которые систематизированы в табл. 3.

Таблица 3

Условия синтеза экспериментальных образцов

Порядковый номер образца ППО	Концентрация второго прекурсора, N_{prec2} , %	C_M , моль/л	V , мл
1	0	0,1	5
2			10
3			15
4			20
5			5
6		10	
7		15	
8		20	
9		0,25	5
10			10
11			15
12			20
13			5
14		10	
15		15	
16	0,025	0,25	5
17			10
18			15
19		0,1	5
20			10
21			15
22		0,25	20
23			5
24			10
25	15		
26	20		

Обсуждение результатов

В процессе экспериментов получены результаты измерения зависимостей электрофизических параметров (поверхностного сопротивления, удельной проводимости, подвижности носителей заряда, длины свободного пробега) от объема раствора при разных значениях концентрации примеси, что соответственно демонстрируют рис. 1–4.

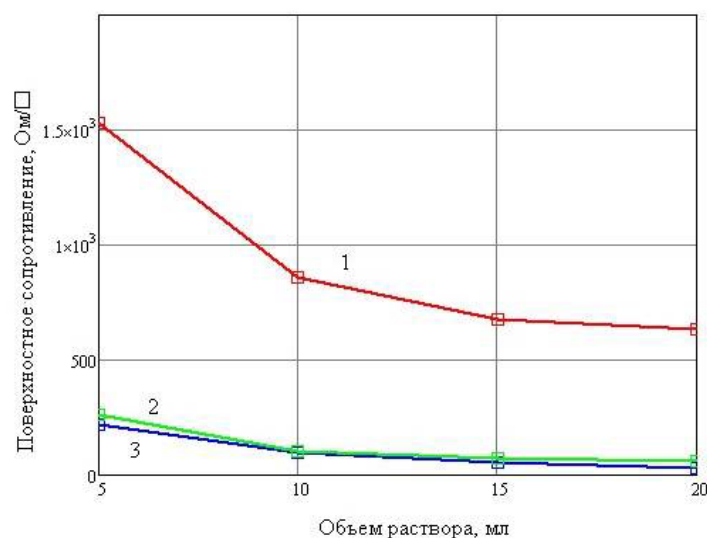


Рис. 1. Зависимость поверхностного сопротивления от объема раствора:
 1 – примесь отсутствует; образцы с примесью; 2 – концентрация примеси 5 %;
 3 – концентрация примеси 10 %

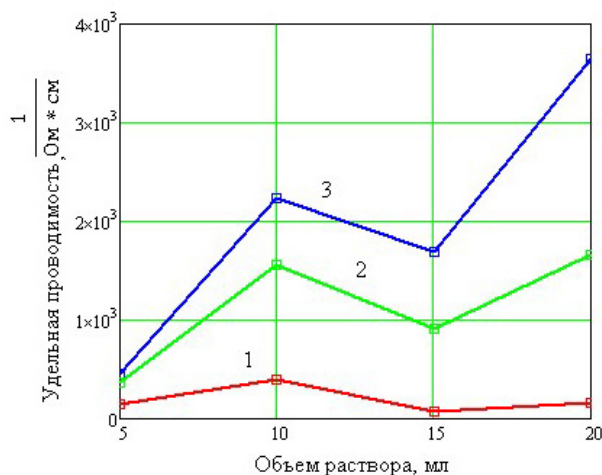


Рис. 2. Функция зависимости удельной проводимости от объема раствора:
 1 – примесь отсутствует; образцы с примесью; 2 – концентрация примеси 5 %;
 3 – концентрация примеси 10 %

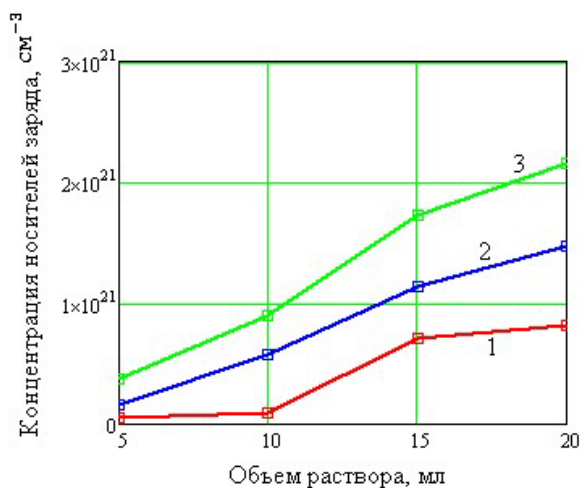


Рис. 3. Зависимость концентрации носителей заряда от объема раствора:
 1 – образец без примеси; образцы с примесью; 2 – концентрация примеси 5 %;
 3 – концентрация примеси 10 %

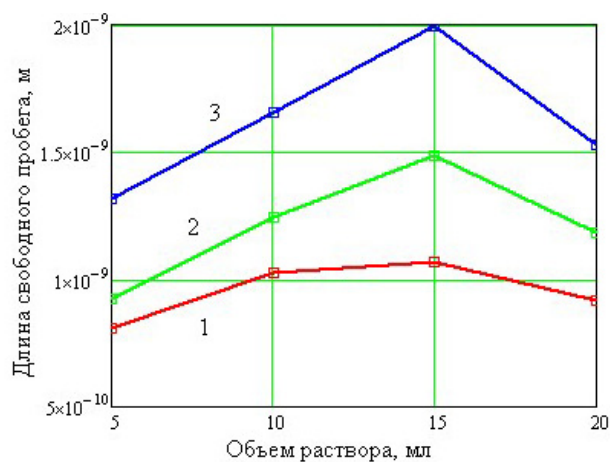


Рис. 4. Влияние объема раствора на длину свободного пробега:
 1 – образцы без примеси; образцы с примесью; 2 – концентрация примеси 5 %;
 3 – концентрация примеси 10 %

Проанализируем влияние объема раствора на свойства ППО: согласно рис. 1 при увеличении объема раствора имеет место снижение поверхностного сопротивления и рост удельной проводимости. Это обусловлено увеличением толщины пленки при увеличении объема раствора. В свою очередь, с ростом толщины пленки снижается ее сопротивление, поскольку имеет место увеличение количества свободных носителей заряда. Данный факт подтверждает график влияния объема на концентрацию носителей заряда при концентрации прекурсора $C_M = 0,25$ моль/л (см. рис. 3). С увеличением объема раствора до определенного значения подвижность носителей уменьшается, а затем возрастает (см. рис. 4), что обусловлено рассеянием носителей, которое существенно вплоть до определенного значения объема раствора, а затем явление рассеяния снижается.

Заключение

Представлены результаты исследования влияния параметров раствора (объема, концентрации примеси, концентрации прекурсоров) на свойства прозрачных проводящих оксидов, что позволило заключить, что при увеличении объема раствора наблюдается уменьшение поверхностного сопротивления и повышение удельной проводимости. Это объясняется ростом толщины пленки при увеличении объема раствора. На основе проведения результате многократных экспериментов, нацеленных на достижение минимального поверхностного сопротивления R_s образцов с покрытием SnO_2 , получено оптимальное значение концентрации прекурсора $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ это 0,25 моль/л.

Поверхностное сопротивление прозрачной проводящей пленки снижается с увеличением концентрации примеси сурьмы, которая замещает в решетке атомы олова. Таким образом, атомы сурьмы являются донорами, а следовательно, способствуют появлению избыточного количества свободных электронов. Анализ проведенных экспериментов доказал, что наиболее высокие показатели проводимости достигаются при использовании раствора со следующими параметрами: объем раствора 10 мл и концентрация примеси 0,05 %.

Список литературы

1. Kawazoe H., Yanagi H., Ueda K. [et al.]. Transparent p-type conducting oxides: design and fabrication of p-n heterojunctions // MRS Bull. 2000. Vol. 25. P. 28–36.
2. Gordon R. G. Criteria for choosing transparent conductors // MRS Bull. 2000. Vol. 25. P. 52–57.
3. Lewis B. G., Paine D. C. Applications and processing of transparent conducting oxides // MRS Bull. 2000. Vol. 25. P. 22–27.
4. Porch A., Morgan D. V., Perks R. M. [et al.]. Electromagnetic absorption in transparent conducting films // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95. P. 4734–4737.
5. Tiwari A. N., Khrypunov G., Kurdzesau F. [et al.]. CdTe solar cell in a novel configuration // Prog. Photovoltaics. 2004. Vol. 12. P. 33–38.
6. Hamberg I., Granqvist C. G. Evaporated Sn-doped In_2O_3 films: basic optical properties and applications to energy-efficient windows // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. P. R123–R160.
7. Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A. [et al.]. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis // IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng. 2017. Vol. 225. P. 012255.
8. Biswas P., Wu C. Y. Control of toxic metal emissions from combustors using sorbents: a review // J. Air Waste Manage. 1998. Vol. 48. P. 113–127.
9. Linak W. P., Wendt J. O. L. Toxic metal emissions from incineration: Mechanisms and control // Prog. Energ. Combust. 1993. Vol. 19. P. 145–185.
10. Elangovan E., Ramamurthi K. A study on low cost-highly conducting fluorine and antimony-doped tin oxide thin films // Appl. Surf. Sci. 2005. Vol. 249. P. 183–196.
11. Rembeza S. I., Svistova T. V., Rembeza E. S. [et al.]. Electric and optical properties of semiconductor films based on SnO_2 and SiO_2 // Russ. Electr. Eng. 2004. Vol. 75. P. 11–15.
12. Зинченко Т. О., Печерская Е. А. Анализ методов получения прозрачных проводящих покрытий // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. С. 258–260.
13. Кондрашин В. И., Печерская Е. А. Исследование влияния концентрации примеси на поверхностное сопротивление в ппп (полученных методом спрей-пиролиза) на основе диоксида олова // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 19-й Всерос. молодеж. науч. школы-семинара. Ульяновск, 2016. С. 175–176.

14. Печерская Р. М., Печерская Е. А., Метальников А. М. [и др.]. Синтез и свойства нанокристаллических пленок диоксида олова, полученных методом пиролиза аэрозолей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2012. № 4. С. 237–241.

References

1. Kawazoe H., Yanagi H., Ueda K. [et al.]. Transparent p-type conducting oxides: design and fabrication of p-n heterojunctions. *MRS Bull.* 2000;25:28–36.
2. Gordon R.G. Criteria for choosing transparent conductors. *MRS Bull.* 2000;25:52–57.
3. Lewis B.G., Paine D.C. Applications and processing of transparent conducting oxides. *MRS Bull.* 2000;25:22–27.
4. Porch A., Morgan D. V., Perks R. M. [et al.]. Electromagnetic absorption in transparent conducting films. *J. Appl. Phys.* 2004;95:4734–4737.
5. Tiwari A.N., Khrypunov G., Kurdzesa F. [et al.]. CdTe solar cell in a novel configuration. *Prog. Photovoltaics.* 2004;12:33–38.
6. Hamberg I., Granqvist C.G. Evaporated Sn-doped In₂O₃ films: basic optical properties and applications to energy-efficient windows. *J. Appl. Phys.* 1986;60:R123–R160.
7. Zinchenko T.O., Kondrashin V.I., Pecherskaya E.A. [et al.]. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng.* 2017;225:012255.
8. Biswas P., Wu C.Y. Control of toxic metal emissions from combustors using sorbents: a review. *J. Air Waste Manage.* 1998;48:113–127.
9. Linak W.P., Wendt J.O.L. Toxic metal emissions from incineration: Mechanisms and control. *Prog. Energ. Combust.* 1993;19:145–185.
10. Elangovan E., Ramamurthi K. A study on low cost-high conducting fluorine and antimony-doped tin oxide thin films. *Appl. Surf. Sci.* 2005;249:183–196.
11. Rembeza S.I., Svistova T.V., Rembeza E.S. [et al.]. Electric and optical properties of semiconductor films based on SnO₂ and SiO₂. *Russ. Electr. Eng.* 2004;75:11–15.
12. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A. Analysis of methods for obtaining transparent conductive coatings. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. = Information technologies in science and education. Problems and prospects : collection of scientific art. Vseros. inter-university. sci.- practical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2018:258–260. (In Russ.)
13. Kondrashin V.I., Pecherskaya E.A. Investigation of the effect of the impurity concentration on the surface resistance in PPTs (obtained by spray pyrolysis) based on tin dioxide. *Aktual'nye problemy fizicheskoy i funktsional'noy elektroniki: materialy 19-y Vseros. molodezh. nauch. shkoly-seminara = Actual problems of physical and functional electronics : Materials of the 19th All-Russian. youth. sci. seminar schools.* Ulyanovsk, 2016:175–176. (In Russ.)
14. Pecherskaya R.M., Pecherskaya E.A., Metal'nikov A.M. [et al.]. Synthesis and properties of nanocrystalline tin dioxide films obtained by aerosol pyrolysis. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2012;(4):237–241. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Тимур Олегович Зинченко

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of information and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владислав Игоревич Кондрашин

генеральный директор
ООО «Парадигма»
(Россия, г. Пенза, ул. Кирова, 51)
E-mail: vlad_kondrashin@mail.ru

Vladislav I. Kondrashin

General director,
LLC "Paradigma"
(51 Kirova street, Penza, Russia)

Владимир Сергеевич Александров

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vsalexrus@gmail.com

Vladimir S. Alexandrov

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

Геннадий Васильевич Козлов

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gvk17@yandex.ru

Gennady V. Kozlov

Doctor of technical sciences, professor,
director of the polytechnic institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Игоревич Левин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: levin.alescha2013@yandex.ru

Alexey I. Levin

Postgraduate 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 21.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 28.09.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021