

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 620.1.08

DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-7

*Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко,
А. Н. Кравцов, В. С. Александров, М. В. Бержинская*

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗА ДЛЯ СИНТЕЗА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ОЛОВА¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Преимущества метода спрей-пиролиза заключаются в способности производить высокооднородные пленки большой площади при приемлемых (от 100 до 500 °С) значениях температуры технологического процесса. Метод не требует использования вакуума на всех стадиях процесса. Цель исследования заключается в выборе оптимальных технологических параметров для получения прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова, обладающих минимальным поверхностным сопротивлением.

Материалы и методы. Представлены технологические этапы процесса получения образцов прозрачных проводящих оксидов на основе диоксида олова в рамках подготовки поверхности стеклянных подложек, приготовления растворов прекурсоров, нанесения на поверхность подложек нелегированных и легированных сурьмой пленок диоксида олова.

Результаты. Разработана методика синтеза образцов прозрачных проводящих оксидов на основе диоксида олова методом спрей-пиролиза, эмпирически установлены оптимальные значения технологических параметров, нацеленных на достижение минимального поверхностного сопротивления образцов с покрытием SnO₂.

Выводы. Предложенные технологические режимы позволяют синтезировать методом спрей-пиролиза прозрачные проводящие оксиды на основе диоксида олова, обладающие поверхностным сопротивлением $R_S = 27 \text{ Ом}/\square$, что соответствует современному мировому уровню промышленно производимых прозрачных проводящих покрытий на основе оксида индия, легированного оловом. Полученные результаты подтверждают целесообразность изготовления методом спрей-пиролиза прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90044.

© Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Кравцов А. Н., Александров В. С., Бержинская М. В., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Ключевые слова: спрей-пиролиз, диоксид олова, прекурсор, прозрачный проводящий оксид, поверхностное сопротивление.

*E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko,
A. N. Kravtsov, V. S. Aleksandrov, M. V. Berzhinskaya*

A DEVELOPMENT OF SPRAY-PYROLYSIS TECHNOLOGY FOR SYNTHESIS OF TRANSPARENT CONDUCTIVE COATINGS BASED ON TIN DIOXIDE

Abstract.

Background. The advantages of the spray-pyrolysis method are the ability to produce films with a high area and a high degree of uniformity at acceptable (from 100 to 500 °C) process temperatures. The method does not require the use of vacuum at all stages of the process. The aim of the study is to select the optimal technological parameters for obtaining transparent conductive coatings based on tin dioxide with minimal surface resistance.

Materials and methods. Such technological stages of the process of obtaining samples of transparent conducting oxides based on tin dioxide are presented in the research as preparation of the surface of glass substrates; preparation of precursor solutions; deposition of pure and antimony-doped films of tin dioxide on the surface of substrates.

Results. A method for the synthesis of transparent conducting oxides samples based on tin dioxide by the spray-pyrolysis method was developed, and the optimal values of technological parameters aimed at achieving the minimum surface resistance of samples with a SnO₂ coating were established empirically.

Conclusions. The proposed technological modes make it possible to synthesize by spray pyrolysis transparent conducting oxides based on tin dioxide with a surface resistance $RS = 27 \text{ Ohm}/\square$, which corresponds to the modern world level of industrially produced transparent conducting coatings based on tin-doped indium oxide. The results obtained confirm the feasibility of manufacturing transparent conductive coatings based on tin dioxide by spray-pyrolysis.

Keywords: spray-pyrolysis, tin dioxide, precursor, transparent conductive oxide, surface resistance.

Введение

Одним из перспективных химических методов получения тонких пленок и различных тонкопленочных структур является метод спрей-пиролиза, также называемый методом пиролиза аэрозолей. Распыляемый раствор обычно изготавливают на основе воды и растворимых солей компонентов требуемого материала – основы синтезируемой тонкой пленки. Спрей-пиролиз в настоящее время широко используется для создания прозрачных проводящих оксидных пленок [1]. В основу рассматриваемого метода положено пиролитическое разложение на предварительно нагретую подложку металлического соединения, которое растворено в жидкой смеси. В то же время растворители и иные летучие продукты, которые являются побочными, выбрасываются в паровой фазе. Давление газа-носителя и геометрические размеры распыляющего сопла являются факторами, определяющими величину капель распыляемого раствора.

Технологии синтеза полупроводниковых тонких пленок методов спрей-пиролиза присущи следующие преимущества: сравнительно невысокая стои-

мость, высокая однородность получаемых пленок, возможность получения пленок большой площади, относительно простой способ внедрения примеси [2]. Посредством изменения концентрации примеси в растворе осуществляется варьирование процентного содержания примеси легированного образца. Синтезирование слоистых пленок и пленок, имеющих градиенты состава по толщине, реализуется путем изменения состава распыляемого раствора во время процесса распыления. Существенное преимущество метода спрей-пиролиза с точки зрения его промышленного использования заключается в том, что на всех стадиях технологического процесса не требуется вакуум. Требуемые значения толщины синтезируемой пленки, скорости ее осаждения достигаются посредством варьирования технологических параметров.

Структура технологической установки, реализующей метод спрей-пиролиза, приведена на рис. 1. Метод спрей-пиролиза осуществляется в условиях приемлемой температуры (в диапазоне от 100 до 500 °С) и позволяет выполнять нанесение пленок не только на высокопрочных материалах.

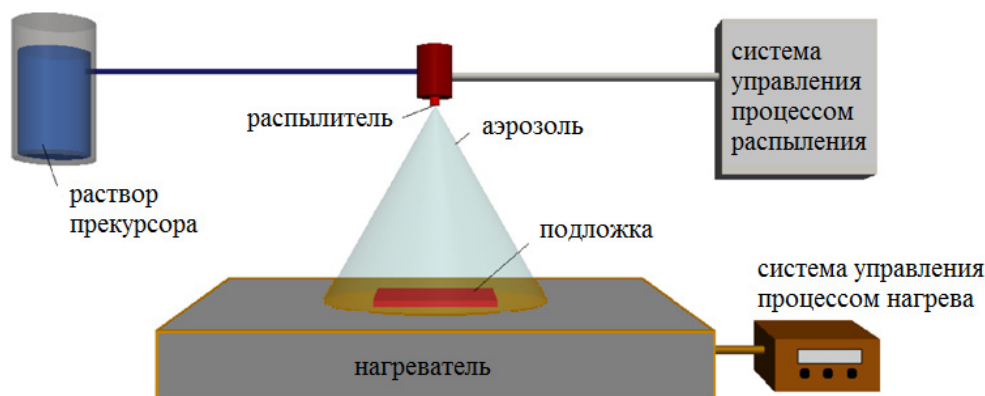


Рис. 1. Структура технологической установки, реализующей метод спрей-пиролиза

Таким образом, с учетом отмеченных преимуществ, а также благодаря высокой производительности в промышленных масштабах пиролиз аэрозолей целесообразно использовать при получении тонких пленок оксидов металлов (групп I-VI, II-VI, III-VI, IV-VI, V-VI, VIII-VI), бинарных халькогенидов (групп II-II-VI, II-III-VI, II-VI-VI), тернарных халькогенидов (групп V-II-VI) [3]. Следует отметить перспективность использования метода спрей-пиролиза для синтеза оксидных пленок, обладающих сверхпроводящими свойствами, а также для получения многокомпонентных, неокисных и композиционных порошков (пористых, а также наночастиц).

Ниже рассмотрены требования к выбору прекурсора и процессу распыления. От выбора прекурсора аэрозолей (истинных растворов, эмульсий, золь, коллоидных дисперсий) зависят свойства синтезируемых пленок различных соединений. Водные растворы, как правило, используют по причине наличия большой номенклатуры водорастворимых солей металлов, из-за их низкой стоимости и безопасности обработки. При этом к растворяемому веществу предъявляется требование высокой растворимости.

Процесс распыления растворов предусматривает использование следующих типов распылителей: электростатических, пневматических, ультразву-

ковых. Перечисленным распылителям присущи разные размеры капель, различная скорость распыления, а следовательно, и разная производительность технологического процесса. Кроме того, скорость распыления определяет продолжительность пребывания капель в воздухе во время распыления, а следовательно, влияет на качество получаемой пленки. При использовании ультразвукового распылителя размер капель определяется плотностью раствора, поверхностным натяжением, вязкостью. В случае пневматического распылителя на размер капель оказывает влияние разность давлений (например, величина капель увеличивается с уменьшением разности давлений).

В процессе спрей-пиролиза имеют место следующие основные этапы: растворитель испаряется с поверхности капли, пары растворителя диффундируют в каплю, происходит изменение температуры капли, по направлению к центру капли происходит диффузия растворенного вещества.

От рассмотренных этапов во многом зависит стехиометрия пленки [4].

В процессе пиролиза аэрозолей целесообразно выделить технологические стадии (их последовательность иллюстрирует рис. 2), которые включают в себя распыление из распылителя водного раствора, процесс испарения растворителя, формирование осадка и его пиролиз, формирование и нарастание пленки; в итоге на подложке образуется тонкий слой пленки [5].

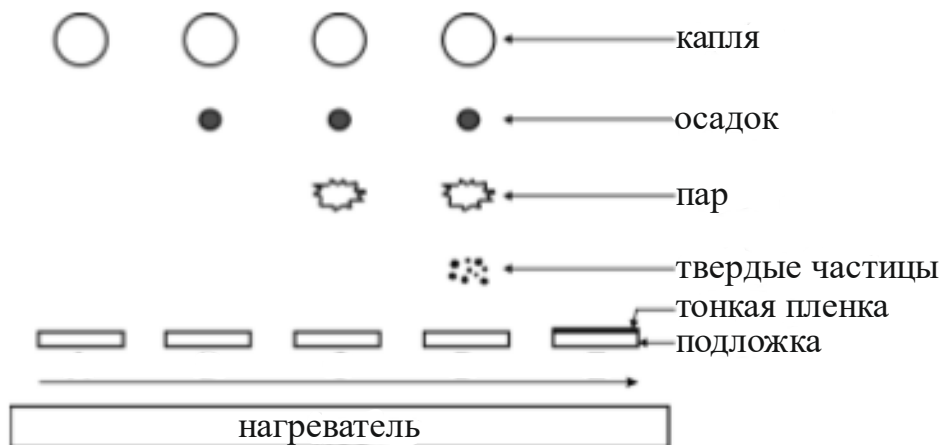


Рис. 2. Основные стадии формирования тонкой пленки при использовании метода спрей-пиролиза

Таким образом, качество формируемой тонкопленочной структуры зависит от процесса испарения растворителя из капель, от процесса диффузии вещества к центру капли и от температуры капель раствора.

1. Материал и методика исследования

Ниже рассмотрен процесс формирования пленок прозрачных проводящих оксидов (ППО) на основе диоксида олова на стеклянных подложках с использованием метода спрей-пиролиза. Целесообразно выделить следующие технологические стадии:

1. Подготовка поверхностей подложек. В качестве материала подложек использовано натриево-кальциево-силикатное стекло, подложки имеют пря-

моугольную форму. Прежде чем разместить подложки в реакционной камере технологической установки, необходимо очистить их поверхность от загрязнений, оказывающих негативное влияние на адгезию (прочность сцепления поверхностей). Подготовка поверхностей подложек включала следующую последовательность операций:

- обработка пищевой содой, промывка подложек водопроводной водой;
- погружение подложек в этанол и их ультразвуковая очистка на протяжении 30 мин (при этом объем этанола зависит от количества подложек и их геометрических размеров);
- помещение подложек в дистиллированную воду и их промывка;
- размещение подложек в емкости с хромовой смесью (представляет собой смесь концентрированной серной кислоты (H_2SO_4) и дихромата калия ($K_2Cr_2O_7$)) при температуре $70\text{ }^\circ\text{C}$ и обработка на протяжении 10 мин;
- подогрев дистиллированной воды и промывка подложек;
- проверка качества очистки подложек, для чего подложки следует поместить в емкость с дистиллированной водой. При этом на подложке, подготовленной надлежащим образом, имеет место равномерное *распределение воды ровным слоем*;
- нагрев электрической плитки до $100\text{ }^\circ\text{C}$ и выполнение сушки подложек.

Таким образом, при подготовке подложек применены следующие вещества: гидрокарбонат натрия (пищевая сода, $NaHCO_3$); этанол (C_2H_5OH); дистиллированная вода; хромовая смесь. Использованное лабораторное оборудование включает ультразвуковую ванну, электрическую плитку, химическую посуду, дистиллятор, вытяжной шкаф.

2. Приготовление растворов прекурсоров. В начале рассмотрим последовательность получения раствора прекурсора № 1 для синтеза чистых пленок диоксида олова.

Для расчета массы прекурсора № 1 m_{precl} использована известная формула [6]:

$$m_{precl} = C_M \cdot V_{rast} \cdot M_{precl} = 5,26 \text{ г}, \quad (1)$$

где M_{precl1} – молярная масса прекурсора № 1; V_{rast} – объем раствора, $V_{rast} = 60$ мл; C_M – молярная концентрация, $C_M = 0,25$ моль/л.

Для взвешивания прекурсора использованы электронные весы. В емкость, содержащую 30 мл этанола, помещался взятый с рассчитанной массой порошок тетраоксида пентагидрата олова. С целью растворения прекурсора, произведено перемешивание приготовленной смеси с использованием магнитной мешалки на протяжении 10 мин. Затем в емкость был добавлен этанол (до достижения отметки 60 мл). После этого в течение 30 мин было проведено повторное перемешивание раствора. Раствор следует готовить во время сушки подложек, т.е. непосредственно перед его использованием.

Теперь рассмотрим процесс приготовления раствора для получения пленок диоксида олова, легированных сурьмой. В данном случае раствор должен содержать прекурсор № 1 и прекурсор № 2.

Прекурсор № 1 необходимо взять массой m_{precl} и растворить в емкости с этанолом (30 мл). Затем туда требуется добавить порошок трихлорида

сурьмы, имеющий массу m_{prec2} . Полученную массу необходимо перемешать магнитной мешалкой за 10 мин. Далее в емкость добавляется этанол (до уровня отметки 60 мл), после чего необходимо повторить перемешивание на протяжении 90 мин.

Получение пленок диоксида олова, имеющих разные уровни легирования, достигается посредством использования прекурсора № 2. При этом в полученном растворе используются разные значения мольной доли трихлорида сурьмы $N_{prec2} = (0,001; 0,0005; 0,00025)$. Для расчета массы порошка трихлорида сурьмы m_{prec2} использована формула

$$m_{prec2} = n_{prec2} \cdot M_{prec2}, \quad (2)$$

где M_{prec2} – молярная масса прекурсора № 2; n_{prec2} – количество вещества прекурсора № 2.

Известно, что мольная доля компонента раствора определяется отношением количества вещества рассматриваемого компонента к общему количеству вещества суммарных компонентов в растворе. Поэтому для расчета количества вещества прекурсора № 2 n_{prec2} применена следующая формула:

$$n_{prec2} = \frac{N_{prec2} (n_{C_2H_5OH} + n_{prec1})}{1 - N_{prec2}}, \quad (3)$$

где $n_{C_2H_5OH}$ – количество вещества этанола; n_{prec1} – количество вещества прекурсора № 1.

Ниже представлены результаты вычислений масс порошка трихлорида сурьмы m_{prec2} при соответствующих концентрациях прекурсора № 2:

$$m_{prec2} = \begin{pmatrix} 0,055 \\ 0,11 \\ 0,22 \end{pmatrix} \text{ г при } N_{prec2} = \begin{pmatrix} 0,025 \\ 0,05 \\ 0,1 \end{pmatrix} \text{ \%}.$$

Таким образом, для приготовления растворов прекурсоров необходимы следующие вещества: тетрагидрид пентагидрат олова ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) для прекурсора № 1; трихлорид сурьмы (SbCl_3) для прекурсора № 2; в качестве растворителя использован этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

Для приготовления растворов прекурсоров необходимо следующее оборудование: электронные весы, химическая посуда, магнитная мешалка, вытяжной шкаф.

3. Нанесение чистых и легированных сурьмой пленок диоксида олова на поверхности стеклянных подложек. Для нанесения пленок диоксида олова, отличающихся различными значениями уровней легирования сурьмой, в установке спрей-пиролиза осуществлен следующий ряд операций:

– размещение подложки в реакционной камере установки спрей-пиролиза;

– постепенный нагрев подложки в реакционной камере до достижения нагревателем значения температуры $T_S = 450 \text{ }^\circ\text{C}$;

- нагнетание воздуха посредством включения компрессора;
- посредством регулятора компрессора подача в пневматический распылитель воздуха, имеющего давление $p = 2$ бар;
- отслеживание достижения температуры раствора значения T_S , после чего производится открытие шарового крана с целью подачи сжатого воздуха от компрессора к распылителю при заданном давлении;
- распыление на подготовленную и нагретую подложку раствора;
- окончание процесса распыления раствора путем закрытия шарового крана при нагреве нагревателя T_S до значения 420 °С.

2. Результаты

Технологические режимы (в том числе материал подложек; требования к прекурсорам, растворителю, газу-носителю; объем раствора, расстояние между распылителем и подложкой; входное давление воздуха в распылителе; температура нагревателя) получения пленок прозрачных проводящих оксидов на основе диоксида олова сведены в табл. 1. Простейший эксперимент по измерению R_S основан на использовании мультиметра, что иллюстрирует рис. 3. Внешний вид синтезированных образцов показан на рис. 4, 5. Критерием оптимизации технологических параметров T_S , C_M , l , p выступает минимизация поверхностного сопротивления R_S образцов с ППО.

Таблица 1

Технологические режимы процесса синтеза ППО

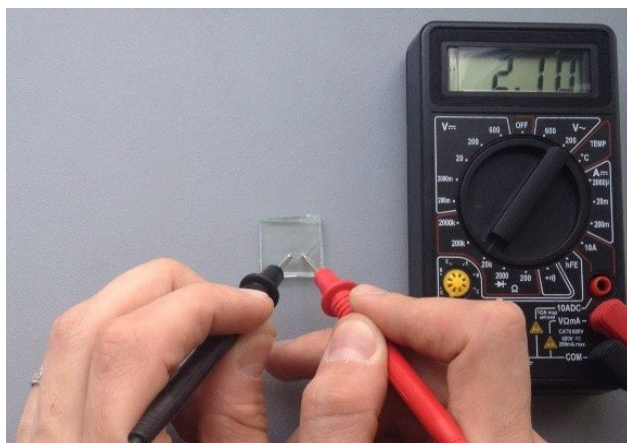
Технологические режимы (обозначение)	Требование к параметрам
Материал подложек	натриево-кальциево-силикатное стекло
Прекурсор № 1	$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Прекурсор № 2	SbCl_3
Растворитель	этанол
Газ-носитель	сжатый воздух
Концентрация прекурсора № 1 (C_M), моль/л	0,25
Мольная доля прекурсора № 2 (N_{prec2}), мол. %	0,1; 0,05; 0,025
Объем раствора (V_{rast}), мл	от 5 до 20
Расстояние между распылителем и подложкой (l), мм	300
Входное давление воздуха в распылителе (p), бар	2
Температура нагревателя (T_S), °С	450

На рис. 5 можно увидеть, что образцы являются прозрачными, однако дать количественную оценку прозрачности можно лишь с помощью спектрофотометрии.

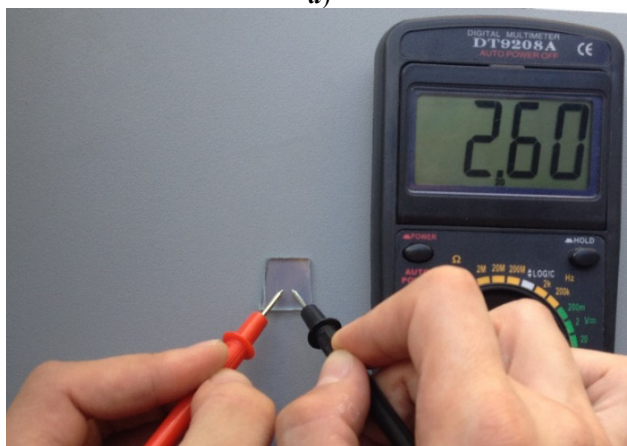
3. Обсуждение

При исследовании оптических свойств прозрачных проводящих покрытий рассмотрено явление интерференции в тонких пленках [7]. При прохождении сквозь синтезированную пленку ППО световой луч отражается от наружной и от внутренней поверхностей. Таким образом, отраженные лучи

удовлетворяют условию интерференции, поскольку являются когерентными, им присуща постоянная разность фаз.



а)



б)

Рис. 3. Процесс измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих покрытий на основе SnO_2 при объеме раствора 10 мл:

а – $C_M = 0,25$ моль/л; б – $C_M = 0,3$ моль/л

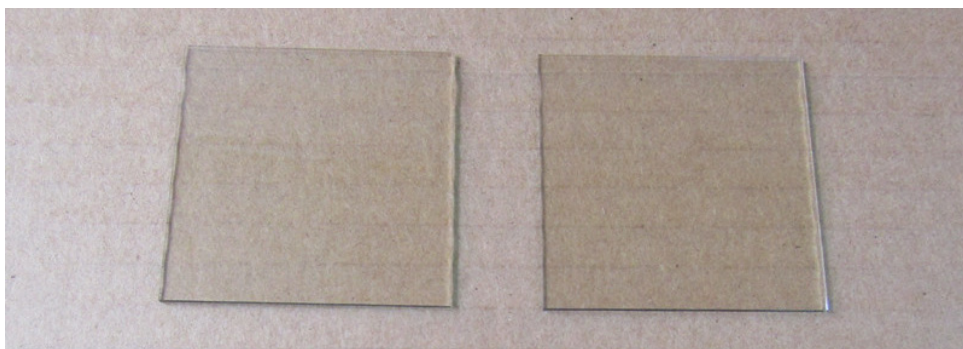


Рис. 4. Внешний вид синтезированных прозрачных проводящих покрытий на основе SnO_2

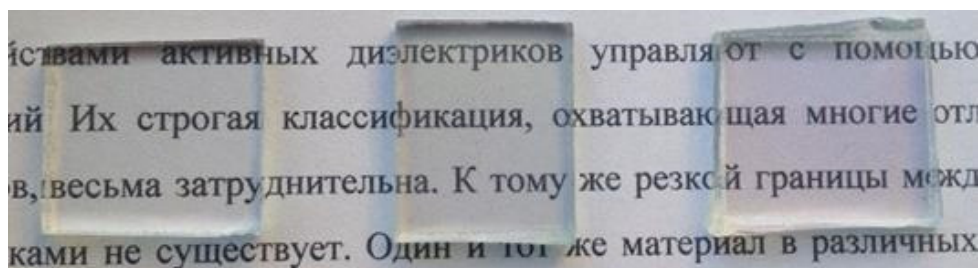


Рис. 5. Фотография, наглядно демонстрирующая прозрачность образцов с нанесенным прозрачным проводящим покрытием при мольной доле прекурсора № 2, равной 0,05 мол. %

Таким образом, явление интерференции может быть положено в основу принципа измерения и контроля толщины и равномерности формируемой пленки ППО, поскольку ее цвет зависит от толщины [9, 10]. В свою очередь толщина пленки при использовании метода спрей-пиролиза во многом зависит от объема распыленного раствора. Авторами статьи синтезированы пленки ППО при различных значениях технологических параметров, приведенных в табл. 2.

Таблица 2
Технологические параметры получения экспериментальных образцов

№ образца	χ , %	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			5
20			10
21			15
22	20		
23	0,1	0,25	5
24			10
25			15
26			20

Заключение

Разработанная технология спрей-пиролиза позволяет синтезировать прозрачные проводящие оксиды на основе диоксида олова. В результате измерений электрофизических параметров синтезированных образцов с нанесенными ППО установлено, что наименьшее значение поверхностного сопротивления составляет 27 Ом/□. Это значение одного порядка с величиной поверхностного сопротивления ППО покрытий на основе оксида индия, легированного оловом – одних из наиболее широко производимых на данный момент прозрачных проводящих покрытий [8].

Библиографический список

1. **Зинченко, Т. О.** Анализ материалов, используемых для производства прозрачных проводящих покрытий / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.- практ. конф. (г. Пенза, 14 марта 2018 г.) / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 256–258.
2. **Зинченко, Т. О.** Анализ методов получения прозрачных проводящих покрытий / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. Всерос. межвуз. науч.- практ. конф. (г. Пенза, 14 марта 2018 г.) / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – 258 с.
3. Анализ локальных областей полупроводниковых нанообъектов методом туннельной атомно-силовой микроскопии / Н. А. Лашкова, Н. В. Пермяков, А. И. Максимов, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2015. – № 1 (213). – С. 31–42.
4. **Унтила, Г. Г.** Влияние концентрации олова на состав, оптические и электрические свойства пленок ПТО, осажденных методом ультразвукового спрей-пиролиза на кремний и стекло / Г. Г. Унтила, Т. Н. Кост, А. Б. Чеботарева, М. А. Тимофеев // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, № 7. – С. 984–990.
5. **Кондрашин, В. И.** Исследование динамических характеристик нагревателя подложек в установке для спрей пиролиза / В. И. Кондрашин, А. М. Метальников, Р. М. Печерская, В. А. Соловьев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 147–148.
6. **Биркина, Н. И.** Методические рекомендации по проведению практических работ дисциплины Химия / Н. И. Биркина. – Ростов-на-Дону, 2015. – 48 с.
7. **Долгов, В. В.** Фотометрия в лабораторной практике / В. В. Долгов, Е. Н. Ованесов, К. А. Щетникович. – Москва : Российская медицинская академия последипломного образования, 2004. – Т. 103.
8. **Zinchenko, T. O.** The properties study of transparent conductive oxides (TCO) of tin dioxide (ATO) doped by antimony obtained by spray pyrolysis / T. O. Zinchenko, E. A. Pecherskaya, D. V. Artamonov // AIMS Materials Science. – 2019. – Vol. 6 (2). – P. 276–287. – DOI 10.3934/materci.2019.2.276.
9. **Наумов, А. В.** Обзор мирового рынка индия (Экономика индия) / А. В. Наумов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2005. – №. 4. – С. 12–17.
10. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis / T. O. Zinchenko, V. I. Kondrashin, E. A. Pecherskaya, A. S. Kozlyakov, K. O. Nikolae, J. V. Shepeleva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 225 (1). – P. 012255.

References

1. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.- prakt. konf. (g. Penza, 14 marta 2018 g.)* [Information technology in science and education. Problems and prospects: proceedings of the All-Russian intercollegiate scientific and practical conference (Penza, March 14, 2018)]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 256–258. [In Russian]
2. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. Vseros. mezhvuz. nauch.- prakt. konf. (g. Penza, 14 marta 2018 g.)* [Information technology in science and education. Problems and prospects: proceedings of the All-Russian intercollegiate scientific and practical conference (Penza, March 14, 2018)]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, 258 p. [In Russian]
3. Lashkova N. A., Permyakov N. V., Maksimov A. I., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Physics and mathematics sciences]. 2015, no. 1 (213), pp. 31–42. [In Russian]
4. Untila G. G., Kost T. N., Chebotareva A. B., Timofeev M. A. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductor physics and technology]. 2012, vol. 46, no. 7, pp. 984–990. [In Russian]
5. Kondrashin V. I., Metal'nikov A. M., Pecherskaya R. M., Solov'ev V. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International symposium “Safety and quality”]. 2014, vol. 2, pp. 147–148. [In Russian]
6. Birkina N. I. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu prakticheskikh rabot distsipliny khimiya* [Methodical recommendations for carrying out practical work in the discipline of chemistry]. Rostov-on-Don, 2015, 48 p. [In Russian]
7. Dolgov V. V., Ovanesov E. N., Shchetnikov K. A. *Fotometriya v laboratornoy praktike* [Photometry in laboratory practice]. Moscow: Rossiyskaya meditsinskaya akademiya posle diplomnogo obrazovaniya. 2004, vol. 103. [In Russian]
8. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Artamonov D. V. *AIMS Materials Science*. 2019, vol. 6 (2), pp. 276–287. DOI 10.3934/mat.2019.2.276.
9. Naumov A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [University proceedings. Nonferrous-metals industry]. 2005, no. 4, pp. 12–17. [In Russian]
10. Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Kozlyakov A. S., Nikolaev K. O., Shepeleva J. V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 225 (1), p. 012255.

Печерская Екатерина Анатольевна

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

Зинченко Тимур Олегович

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: scar0243@gmail.com

Pecherskaya Ekaterina Anatol'evna

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

Zinchenko Timur Olegovich

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

Кравцов Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
начальник кафедры метрологического
обеспечения вооружения, военной
и специальной техники, Военно-
космическая академия имени
А. Ф. Можайского (Россия,
г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)

E-mail: kan1970@bk.ru

Kravtsov Aleksandr Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of metrological support of weapons,
military and special equipment,
Military Space Academy named
after A. F. Mozhaysky (13 Zhdanovskaya
street, St. Petersburg, Russia)

Александров Владимир Сергеевич

студент, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Nauka-fpите@mail.ru

Aleksandrov Vladimir Sergeevich

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

Бержинская Марина Викторовна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mberj@mail.ru

Berzhinskaya Marina Viktorovna

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of information
and measuring technology and metrology,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Разработка технологии спрей-пиролиза для синтеза прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова / Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко, А. Н. Кравцов, В. С. Александров, М. В. Бержинская // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 4 (56). – С. 92–103. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-4-7.