

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 684.4.05

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-8

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ

Т. О. Зинченко<sup>1</sup>, Е. А. Печерская<sup>2</sup>, В. И. Кондрашин<sup>3</sup>,  
В. В. Антипенко<sup>4</sup>, О. А. Мельников<sup>5</sup>, О. В. Карпанин<sup>6</sup><sup>1,2,4,5,6</sup> Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия<sup>3</sup> ООО «Парадигма», г. Пенза, Россия<sup>1</sup> scar0243@gmail.com, <sup>2</sup> pea1@list.ru, <sup>3</sup> vlad\_kondrashin@mail.ru,<sup>4</sup> v.antipenko7@yandex.ru, <sup>5</sup> oleg-068@mail.ru, <sup>6</sup> karpanino@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Развитие науки и техники привело к появлению огромного количества оптоэлектронных устройств. Одним из наиболее часто используемых слоев в структуре приборов является прозрачный электрод. Для их производства используются прозрачные проводящие оксиды, на процесс получения которых влияет множество разнородных факторов. Цель исследования – выявление контролируемых факторов, оказывающих влияние на электрофизические свойства прозрачных проводящих оксидов. *Материалы и методы.* Для синтеза прозрачных проводящих оксидов использован метод спрей-пиролиза. Соответственно факторы, оказывающие влияние на свойства и описанные в данной работе, напрямую касаются технологии пиролиза аэрозолей. В качестве материала применен оксид олова и оксид олова, легированный сурьмой, в качестве подложки использовано обычное оконное стекло. *Результаты.* Исследовано влияние примеси, температуры отжига, толщины покрытия, давления в распылителе, подвижности носителей заряда и ширины запрещенной зоны на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий. *Вывод.* Выявлена оптимальная температура отжига. Установлены причины влияния указанных выше параметров на электрофизические свойства прозрачных проводящих оксидов. Установлены зоны, в которых влияние концентрации примеси положительно или отрицательно.

**Ключевые слова:** прозрачный электрод, прозрачный проводящий оксид, проводимость, поверхностное сопротивление, примесь, отжиг, толщина, давление в распылителе, подвижность носителей заряда

**Благодарности и 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., Антипенко В. В., Мельников О. А., Карпанин О. В. Анализ факторов, влияющих на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 64–72. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-8

## ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF TRANSPARENT CONDUCTIVE COATINGS

Т. О. Zinchenko<sup>1</sup>, Е. А. Pecherskaya<sup>2</sup>, V. I. Kondrashin<sup>3</sup>,  
V. V. Antipenko<sup>4</sup>, O. A. Mel'nikov<sup>5</sup>, O. V. Karpanin<sup>6</sup><sup>1,2,4,5,6</sup> Penza State University, Penza, Russia<sup>3</sup> LLC "Paradigm", Penza, Russia<sup>1</sup> scar0243@gmail.com, <sup>2</sup> pea1@list.ru, <sup>3</sup> vlad\_kondrashin@mail.ru,<sup>4</sup> v.antipenko7@yandex.ru, <sup>5</sup> oleg-068@mail.ru, <sup>6</sup> karpanino@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The development of science and technology has led to the emergence of a huge number of optoelectronic devices. One of the most commonly used layers in the structure of devices is a transparent electrode. For their production, transparent conductive oxides are used, the production process of which is influenced by many differ-

© Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И., Антипенко В. В., Мельников О. А., Карпанин О. В., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

ent factors. The aim of the study is to identify controllable factors that affect the electrophysical properties of transparent conducting oxides. *Materials and methods.* For the synthesis of transparent conducting oxides, the spray pyrolysis method was used. Accordingly, the factors influencing the properties and described in this work directly relate to the technology of aerosol pyrolysis. Tin oxide and antimony-doped tin oxide were used as the material; ordinary window glass was used as the substrate. *Results.* The effect of impurity, annealing temperature, coating thickness, pressure in the sprayer, charge carrier mobility, and band gap on the electrophysical properties of transparent conductive coatings has been investigated. *Conclusion.* The optimal annealing temperature was found. The reasons for the influence of the above parameters on the electrophysical properties of transparent conducting oxides are established. The zones were established in which the influence of the impurity concentration is positive or negative.

**Keywords:** transparent electrode, transparent conducting oxide, conductivity, surface resistance, impurity, annealing, thickness, pressure in the atomizer, mobility of charge carriers

**Acknowledgments and funding:** The study was carried out with the financial support of RFFI in the framework of scientific project No. 20-38-90044.

**For citation:** Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kondrashin V.I., Antipenko V.V., Mel'nikov O.A., Karpanin O.V. Analysis of factors affecting the electrophysical properties of transparent conductive coatings. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;1:64–72. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-8

### *Введение*

Спрос на прозрачные проводящие оксиды (ППО) в последние годы резко вырос благодаря тому, что они являются ключевыми компонентами жидкокристаллических дисплеев, сенсорных экранов и в качестве электродов фотоэлектрических элементов [1]. Также их применяют в просветляющих покрытиях [2], в волноводах плазменных устройств [3], в органических светоизлучающих устройствах [4] и биоаналитических устройствах [5]. Современный рынок с самой высокой долларовой стоимостью для ППО – это прозрачные электроды в плоских дисплеях (FPDs), рынок оценивается в 135 млрд долл. в 2020 г. [6]. Действующее законодательство Европы и США требует, чтобы все новые здания были оснащены системой контроля солнечной энергии, оконных покрытий, благодаря которым такие продукты, как прозрачные проводящие покрытия на стекле, способствовали созданию многомиллиардного рынка низкоэмиссионных стеклянных покрытий [7].

### *Анализ влияния факторов на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий*

В результате работы получены экспериментальные образцы диоксида олова и диоксида олова, легированного сурьмой.

Хорошо известно, что работа выхода и химический состав на поверхности многих ППО сильно зависят от метода очистки, что указывает на то, что они могут быть нестабильны к окислению, но стоит отметить, что выбранный материал (оксид олова-сурьмы) не имеет такой зависимости.

После проведения исследования поверхностного сопротивления этих образцов выявлена тенденция, что покрытия чистого диоксида олова, значительно выше, нежели легированного сурьмой. Особенности можно объяснить следующим образом: нелегированные тонкие пленки  $\text{SnO}_2$  имеют собственный точечный дефект, который в основном возникает из-за свободных электронов-носителей, генерируемых избыточным Sn в качестве примеси (самолегирование), и ведет себя как *n*-тип материал. Но введенная примесь в структуру покрытия позволяет значительно увеличить число свободных носителей заряда. Поэтому проводимость значительно возрастает, а поверхностное сопротивление снижается.

Полученная зависимость поверхностного сопротивления от концентрации примеси представлена на рис. 1.

На рис. 1 наблюдаются три зоны: 1 – зона резкого падения поверхностного сопротивления; 2 – зона плавного падения поверхностного сопротивления; 3 – зона увеличения поверхностного сопротивления. Рассмотрим каждую зону подробнее.

В первой области происходит резкий рост проводимости. Это связано с тем, что чистый диоксид олова обладает крайне низкой проводимостью и введение примеси резко снижает сопротивление за счет увеличения количества свободных носителей заряда.

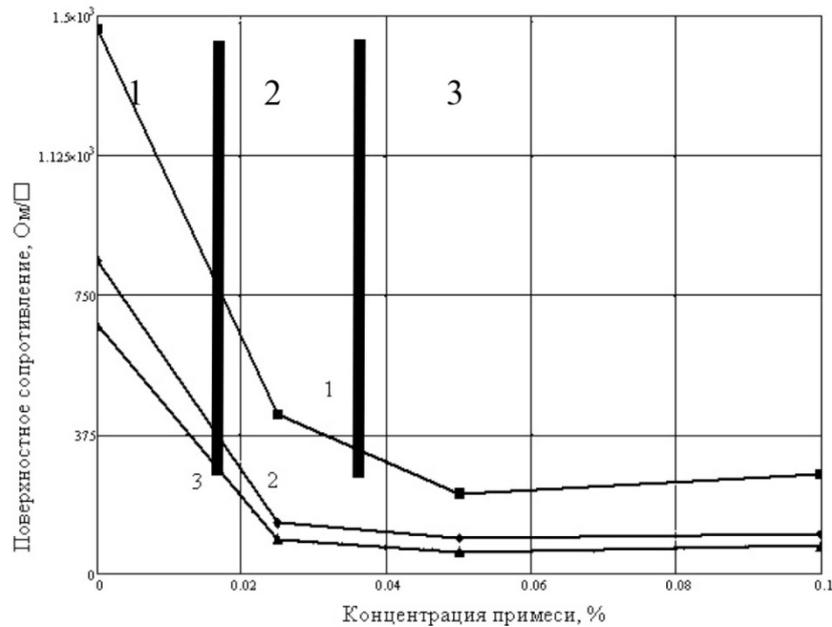


Рис. 1. Зависимость поверхностного сопротивления от концентрации примеси

Во второй области проводимость определяется не только концентрацией носителей заряда, но и подвижностью. В этой области концентрация носителей заряда увеличивается, а подвижность снижается из-за уменьшения размера зерна, что и показано на рис. 2.

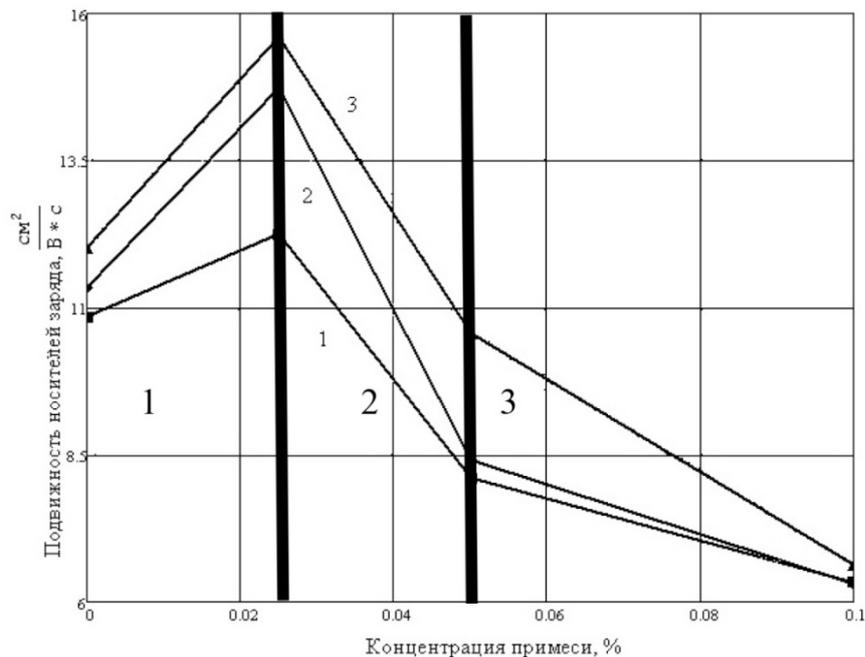


Рис. 2. Зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примеси

На высоколегированном участке 3 поверхностное сопротивление пленок начинает увеличиваться. Увеличение концентрации легирующей примеси в пленке ППО также увеличивает плотность дефектов; при этом проводимость поддерживают донорные характеристики легирующей примеси, но они постепенно перевешиваются эффектом рассеяния электронов из-за повышенного количества дефектов. Длина свободного пробега носителей заряда и, следовательно, время релаксации свободных носителей сокращаются, что увеличивает сопротивление пленки. Кроме того, высокая концентрация носителей увеличивает вероятность столкновений носителей заряда [8].

Свойства легирующих материалов могут сочетаться, чтобы дополнять друг друга, и при этом минимум зоны проводимости снижается (т.е. увеличивается сродство к электрону), чтобы обеспечить выравнивание полосы и омический контакт с другими материалами, в то время как уровень Ферми становится выше минимума, что повышает функциональность ППО.

Энергия Ферми – максимальная энергия электронов при температуре абсолютного нуля. Энергия Ферми рассчитывается по формуле

$$E_f = \left( \frac{h^2}{m^*} \right) \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $m^*$  – эффективная масса электрона;  $n$  – концентрация носителей заряда. Полученные результаты варьируются в диапазоне от  $8,6 \cdot 10^{-20}$  до  $1 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Время синтеза покрытия оказывает влияние на сопротивление тонких пленок. Поверхностное сопротивление тонких пленок ППО как функция толщины покрытия показано на рис. 3. Соотношение между толщиной пленки и временем нанесения покрытия практически линейно.

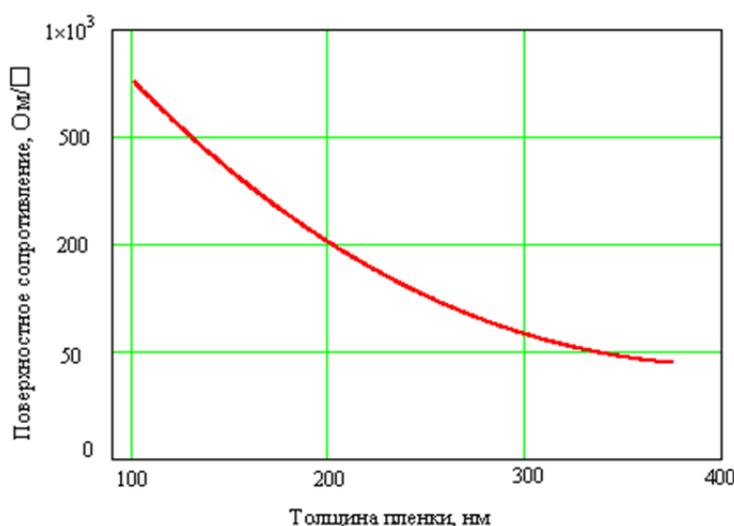


Рис. 3. Зависимость поверхностного сопротивления от толщины покрытия

Размер зерна и степень кристалличности повышаются с ростом слоя покрытия. Это увеличивает показатели длины свободного пробега носителей заряда, уменьшает рассеяние электронов, а следовательно, уменьшает поверхностное сопротивление.

Однако уменьшение сопротивления имеет место до определенного значения. Далее происходит активное проявление дефектов, возможность образования микротрещин и диффузии атомов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  из подложки после многократной сушки [9].

На толщину оказывают влияние режимы нанесения ППО. При увеличении входного давления воздуха в распылителе  $p$  наблюдается уменьшение толщины пленки (рис. 4). Данный эффект связан с повышением скорости потока аэрозоля и со снижением размера его капель. Заметное увеличение толщины происходит, когда давление становится менее 1,5 атм. В области от 1,5 до 2,3 атм. толщина пленки изменяется мало. Исходя из зависимости, представленной на рисунке, можно отметить, что в качестве оптимального входного давления в распылителе для осаждения пленок диоксида олова можно выбрать значение  $p = 2,0$  атм. [10].

Расстояние между соплом распылителя и подложкой  $H$  определяет, прежде всего, площадь покрытия пленок и влияет на их толщину. При сокращении этого расстояния область покрытия уменьшается.

В каждой экспериментальной установке для проведения спрей-пиролиза имеются верхний и нижний пределы расстояния до подложки, которые зависят от способа распыления. При электростатическом распылении нижний предел задается размером подложки, а верхний предел зависит от максимального напряжения, определяемого характеристиками высоковольтного источника питания и пробивным напряжением. Последнее может привести к нестабильному распылению жидкости или к тому, что жидкость совсем не будет распыляться. Для того

чтобы предотвратить это, все элементы экспериментальной установки должны быть надежно электрически изолированы.

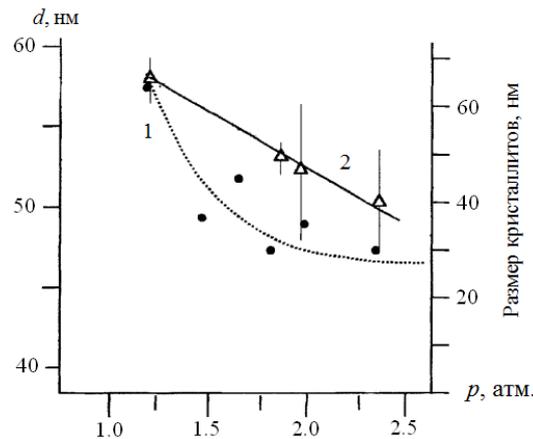


Рис. 4. Зависимости толщины пленки SnO<sub>2</sub> и размера кристаллитов от входного давления воздуха в распылителе ( $T_s = 400$  °C):  
1 – зависимость толщины; 2 – зависимость размера кристаллитов

При напряжениях свыше 40 кВ распыление становится хуже или совсем прекращается. Это ограничивает максимальное расстояние между распылителем и подложкой в ~20 см, так как при больших расстояниях напряженность электрического поля не будет достаточно высокой, чтобы распылять раствор должным образом.

При пневматическом распылении существуют другие виды ограничений. В этом случае минимальное расстояние между распылителем и подложкой ограничивается не размером подложки, а охлаждающим эффектом воздушного потока. На малых расстояниях происходит сильное охлаждение подложки. Следовательно, от нагревателя требуется больше тепла, так как плотность потока аэрозоля увеличивается с уменьшением расстояния, и при определенном расстоянии невозможно достичь оптимальной температуры подложки.

Верхний предел определяется расстоянием, при котором нарушается распыление. Как правило, максимальное расстояние зависит от конструкции распылителя и входного давления воздуха [11].

Толщина осаждаемой пленки уменьшается, если расстояние между соплом распылителя и подложкой увеличивается, так как в этом случае повышается эффект расширения потока аэрозоля. Зависимость, представленная на рис. 5, не подчиняется закону  $d \sim 1/H^2$ , характерному для физических методов напыления, и позволяет определить, что в качестве оптимального расстояния для осаждения пленок диоксида олова можно выбрать значение ~20 см [10].

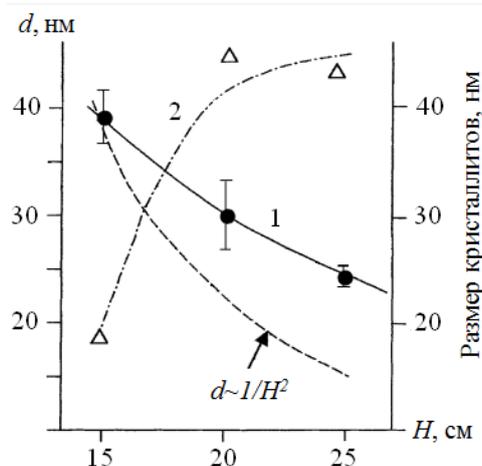


Рис. 5. Зависимости толщины пленки SnO<sub>2</sub> и размера кристаллитов от расстояния между соплом распылителя и подложкой ( $T_s = 400$  °C):  
1 – зависимость толщины; 2 – зависимость размера кристаллитов

Максимальное значение скорости распыления зависит главным образом от способа перевода жидкости в аэрозоль, а также от таких свойств распыляемой жидкости, как поверхностное натяжение, вязкость и т.д. Для повышения скорости в раствор прекурсора можно добавлять специальные вещества (ацетилацетон, различные поверхностно-активные вещества), снижающие эти свойства [12].

Скорость распыления влияет на кристалличность пленок, толщину и сопротивление. Уменьшение скорости способствует увеличению размера кристаллитов и формированию высокой степени кристалличности, потому что в этом случае требуется дольше по времени проводить процесс осаждения, чем при более высокой скорости. Повышение кристалличности приводит к увеличению проводимости пленок.

Поверхностное сопротивление образцов уменьшалось, а затем увеличивалось с увеличением температуры отжига. Поверхностное сопротивление при температуре отжига 450 °С самое низкое по сравнению с другими. При более высокой температуре отжига большее количество сурьмы имеет достаточно энергии, чтобы проникнуть в места замещения олова, увеличивая образование свободных носителей заряда. Одновременно более высокая температура отжига увеличивает кристалличность и размер зерен в тонкой пленке, которые улучшают показатели длины свободного пробега носителей заряда и уменьшают рассеяния электронов и, как следствие, происходит снижение поверхностного сопротивления тонких пленок. Когда температура поднялась до 500 °С, поверхностное сопротивление начало активно расти, что может быть связано с тем, что ионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  в стекле диффундируют в пленку ППО и рассеяние носителей становится сильнее [13].

Сопротивление покрытия  $\text{SnO}_2$  намного выше, чем у легированного 15 % АТО, также отожженного при 550 °С. Также обнаружено, что дырочные носители были образованы  $\text{Sb}_3^+$  вместо  $\text{Sn}_4^+$ . Концентрация дырок пленки  $\text{SnO}_2$  уменьшилась при 550 °С, поскольку фазы  $\text{Sn}_2\text{O}_3$  окислялись, что также увеличивало подвижность. Концентрация дырок в пленках 15 % АТО сначала увеличилась с повышением температуры отжига, а пик концентрации дырок был получен после отжига при 550 °С за 1 ч. При дальнейшем увеличении температуры отжига значение концентрации дырок начало уменьшаться из-за исчезновения акцептора  $\text{Sn}_3^+$ . Пленки 15 % АТО, отожженные при 550 °С за 1 ч, обладают низким сопротивлением (0,83 Ом·см).

Пример зависимости сопротивления  $R$  пленки диоксида олова от температуры подложки представлен на рис. 6. Как видно, сопротивление сначала уменьшается с ростом  $T_s$ , так как размер кристаллитов и, соответственно, кристалличность пленки увеличиваются. После достижения определенного минимального значения сопротивление начинает возрастать в результате уменьшения концентрации носителей заряда [14]. Для зависимости, представленной на рисунке, это значение соответствует  $T_s \sim 500$  °С [10].

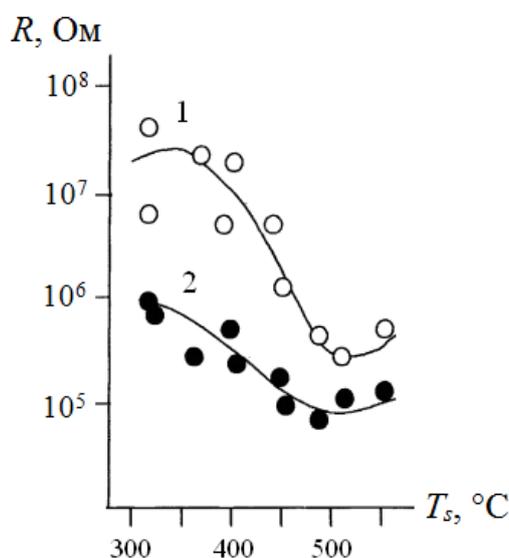


Рис. 6. Влияние температуры подложки на сопротивление пленки  $\text{SnO}_2$  ( $d \sim 25\text{--}35$  нм):  
1 – в чистом воздухе; 2 – в воздухе при наличии газовой примеси (2 %  $\text{H}_2$ )

Увеличение сопротивления вызвано ликвидацией кислородных вакансий (более полным окислением) [15]. Некоторые исследования также показывают, что изменение сопротивления можно объяснить изменением подвижности носителей заряда [16, 17].

### Заключение

На поверхностное сопротивление оказывают различное влияние параметры технологического процесса, а также параметры раствора и некоторые показатели самой пленки. С ростом концентрации примеси до определенного значения проводимость растет, но затем рассеяние носителей преобладает и начинается рост сопротивления. С возрастанием подвижности носителей заряда проводимость также увеличивается. С увеличением толщины пленки ситуация такая же, как и с концентрацией, проводимость растет до определенного значения, затем проявляются дефекты. Температура отжига, равная 450 °С, оптимальна для качественных ППО. Скорость распыления влияет на кристалличность пленок, толщину и сопротивление. Уменьшение скорости способствует увеличению размера кристаллитов и формированию высокой степени кристалличности. Оптимальное расстояние между распылителем и подложкой для осаждения пленок диоксида олова ~20 см. Также проводимость зависит от температуры подложки. Сопротивление сначала уменьшается с ростом  $T_s$ , так как размер кристаллитов и, соответственно, кристалличность пленки увеличиваются. После достижения определенного минимального значения сопротивление начинает возрастать в результате уменьшения концентрации носителей заряда.

### Список литературы

1. Ginley D. S., Bright C. Transparent Conducting Oxides // MRS Bull. 2000. Vol. 25. P. 15–18.
2. Cai J., Qi L. Recent advances in antireflective surfaces based on nanostructure arrays // Mater. Horiz. 2015. Vol. 2. P. 37–53.
3. Lin Y., Zhang X., Bai S., Hu A. Photo-reduction of metallic ions doped in patterned polymer films for the fabrication of plasmonic photonic crystals // J. Mater. Chem. C. 2015. Vol. 3. P. 6046–6052.
4. Wong F. L., Fung M. K., Tong S. W. [et al.]. Flexible organic light-emitting device based on magnetron sputtered indium-tin-oxide on plastic substrate // Thin Solid Films. 2004. Vol. 466. P. 225–230.
5. Fair R. B. Digital microfluidics: is a true lab-on-a-chip possible? // Microfluid. Nanofluid. 2007. Vol. 3. P. 245–281.
6. Flat Panel Display Market: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment 2014–2020: FMI. URL: <http://www.digitaljournal.com/pr/2526206#ixzz6nxN7rz82>
7. Letcher T. M., Scott J. L. Materials for a Sustainable Future. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2012. 828 p. ISBN (Print) 9781849734073.
8. Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A. [et al.]. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 225. P. 012255.
9. Dixon S. C., Scanlon D. O., Carmalt C. J., Parkin I. P. n-Type doped transparent conducting binary oxides: an overview Sebastian C. J. // Mater. Chem. C. 2016. Vol. 4. P. 6946. doi: 10.1039/c6tc01881e
10. Korotchenkov G., Brinzari V., Schwank J. [et al.]. Peculiarities of SnO<sub>2</sub> thin film deposition by spray pyrolysis for gas sensor application // Sensors and Actuators B. 2001. Vol. 77. P. 244–252.
11. Perednis D. Thin film deposition by spray pyrolysis and the application in solid oxide fuel cells : dissertation. Zurich : Swiss Federal Institute of Technology, 2003.
12. Anca D., Pernu D., Isac L., Enesca A. Solar energy materials obtained by spray pyrolysis deposition. URL: <http://www.gobookee.net/thin-film-deposition-by-spray-pyrolysis>
13. Dang H. P., Luc Q. H., Le T., Le V. H. The Optimum Fabrication Condition of p-Type Antimony Tin Oxide Thin Films Prepared by DC Magnetron Sputtering // Journal of Nanomaterials. 2016. P. 1–11. doi: 10.1155/2016/7825456
14. Zinchenko T., Pecherskaya E., Artamonov D. The properties study of transparent conductive oxides (TCO) of tin dioxide (ATO) doped by antimony obtained by spray pyrolysis // AIMS Materials Science. 2019. Vol. 6 (2). P. 276–287. doi: 10.3934/mat.2019.2.276
15. Sanon G., Rup R., Mansingh A. Growth and characterization of tin oxide films by chemical vapor deposition // Thin Solid Films. 1990. Vol. 190. P. 287–301.
16. Зинченко Т. О., Печерская Е. А. Анализ материалов, используемых для производства 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. 256–258.

17. 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

- Ginley D.S., Bright C. Transparent Conducting Oxides. *MRS Bull.* 2000;25:15–18.
- Cai J., Qi L. Recent advances in antireflective surfaces based on nanostructure arrays. *Mater. Horiz.* 2015;2:37–53.
- Lin Y., Zhang X., Bai S., Hu A. Photo-reduction of metallic ions doped in patterned polymer films for the fabrication of plasmonic photonic crystals. *J. Mater. Chem. C.* 2015;3:6046–6052.
- Wong F.L., Fung M.K., Tong S.W. [et al.]. Flexible organic light-emitting device based on magnetron sputtered indium-tin-oxide on plastic substrate. *Thin Solid Films.* 2004;466:225–230.
- Fair R.B. Digital microfluidics: is a true lab-on-a-chip possible? *Microfluid. Nanofluid.* 2007;3:245–281.
- Flat Panel Display Market: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment 2014–2020: FMI.* Available at: <http://www.digitaljournal.com/pr/2526206#ixzz6nxN7rz82>
- Letcher T.M., Scott J.L. *Materials for a Sustainable Future.* Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2012:828. ISBN (Print) 9781849734073.
- Zinchenko T.O., Kondrashin V.I., Pecherskaya E.A. [et al.]. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2017;225:012255.
- Dixon S.C., Scanlon D.O., Carmalt C.J., Parkin I.P. n-Type doped transparent conducting binary oxides: an overview Sebastian C. J. *Mater. Chem. C.* 2016;4:6946. doi: 10.1039/c6tc01881e
- Korotchenkov G., Brinzari V., Schwank J. [et al.]. Peculiarities of SnO<sub>2</sub> thin film deposition by spray pyrolysis for gas sensor application. *Sensors and Actuators B.* 2001;77:244–252.
- Perednis D. *Thin film deposition by spray pyrolysis and the application in solid oxide fuel cells: dissertation.* Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2003.
- Anca D., Perniu D., Isac L., Enesca A. *Solar energy materials obtained by spray pyrolysis deposition.* Available at: <http://www.gobookee.net/thin-film-deposition-by-spray-pyrolysis>
- Dang H.P., Luc Q.H., Le T., Le V.H. The Optimum Fabrication Condition of p-Type Antimony Tin Oxide Thin Films Prepared by DC Magnetron Sputtering. *Journal of Nanomaterials.* 2016:1–11. doi: 10.1155/2016/7825456
- Zinchenko T., Pecherskaya E., Artamonov D. The properties study of transparent conductive oxides (TCO) of tin dioxide (ATO) doped by antimony obtained by spray pyrolysis. *AIMS Materials Science.* 2019;6(2):276–287. doi: 10.3934/matserci.2019.2.276
- Sanon G., Rup R., Mansingh A. Growth and characterization of tin oxide films by chemical vapor deposition. *Thin Solid Films.* 1990;190:287–301.
- Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A. Analysis of materials used for the production of 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 articles All-Russian. inter-university. scientific and practical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2018:256–258. (In Russ.)
- 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 = News of higher educational institutions. 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. Ворошилова, 2, 57)  
E-mail: vlad\_kondrashin@mail.ru

**Vladislav I. Kondrashin**

General director,  
LLC "Paradigma"  
(57, 2 Voroshilova street, Penza, Russia)

**Владимир Викторович Антипенко**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: v.antipenko7@yandex.ru

**Vladimir V. Antipenko**

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

**Олег Андреевич Мельников**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: oleg-068@mail.ru

**Oleg A. Mel'nikov**

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

**Олег Валентинович Карпанин**

старший преподаватель,  
кафедра нано- и микроэлектроники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: karpanino@mail.ru

**Oleg V. Karpanin**

Senior lecturer,  
sub-department of nano-and microelectronics,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)