

УДК 684.4.05  
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-3

## СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ

Т. О. Зинченко

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
scar0243@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования является информационно-измерительная и управляющая система синтеза прозрачных проводящих оксидов методом спрей-пиролиза. Предмет исследования – структура указанной информационно-измерительной и управляющей системы. Цель работы заключается в повышении управляемости синтеза прозрачных проводящих оксидов методом спрей-пиролиза, что достигается посредством разработки усовершенствованной информационно-измерительной управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов, ее аппаратного и программного обеспечения. *Материалы и методы.* Структурная схема информационно-измерительной и управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов содержит аппаратную и программную части. В частности, аппаратная часть состоит из блоков, необходимых для осуществления и управления процессом спрей-пиролиза, каналов измерения температуры подложки (на основе применения термомпары) и электрофизических параметров синтезированных прозрачных проводящих оксидов (на основе четырехзондового метода). *Результаты.* Разработана структура информационно-измерительной и управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов. Проведены исследования поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов. Разработана структура канала измерения температуры подложки при выполнении процесса спрей-пиролиза. *Выводы.* Разработанная структура информационно-измерительной управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов позволяет решить следующие задачи: осуществлять выбор оптимальных технологических параметров формируемых покрытий; выполнять синтез покрытий посредством управления технологическим процессом; измерять температуру и электрофизические параметры прозрачных проводящих покрытий.

**Ключевые слова:** структура информационно-измерительной и управляющей системы, измерительные каналы, поверхностное сопротивление, температура, спрей-пиролиз

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 23-29-00343).

**Для цитирования:** Зинченко Т. О. Структура информационно-измерительной и управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 22–27. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-3

## STRUCTURE OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT CONTROL SYSTEM FOR THE SYNTHESIS OF TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES

T.O. Zinchenko

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

**Abstract.** *Background.* The object of the study is an information-measuring and control system for the synthesis of transparent conductive oxides by spray pyrolysis. The subject of the study is the structure of the specified information-measuring and control system. The aim of the work is to increase the controllability of the synthesis of transparent conductive oxides by spray pyrolysis, which is achieved through the development of an improved information and measurement control system for the synthesis of transparent conductive oxides, its hardware and software. *Materials and methods.* The block diagram of the information-measuring and control system for the synthesis of transparent conductive oxides contains hardware and software parts. In particular, the hardware part consists of blocks necessary for the implementation and control of the spray pyrolysis process, channels for measuring the temperature of the substrate (based on the use of a

thermocouple) and electrophysical parameters of synthesized transparent conductive oxides (based on the four-probe method). *Results.* The structure of the information-measuring and control system for the synthesis of transparent conductive oxides has been developed. Studies of the surface resistance of transparent conductive oxides have been carried out. The structure of the channel for measuring the temperature of the substrate during the spray pyrolysis process has been developed. *Conclusions.* The developed structure of the information-measuring control system for the synthesis of transparent conductive oxides allows us to solve the following tasks: to select the optimal technological parameters of the coatings being formed; to perform the synthesis of coatings by controlling the technological process; to measure the temperature and electrophysical parameters of transparent conductive coatings.

**Keywords:** the structure of the information – measuring and control system, measuring channels, surface resistance, temperature, spray pyrolysis

**Financing:** the work was supported by the Russian Science Foundation (RGNF grant 23-29-00343).

**For citation:** Zinchenko T.O. Structure of the information and measurement control system for the synthesis of transparent conductive oxides. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):22–27. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-3

### *Введение*

Согласно современным направлениям исследований технологий и техники, создание новых материалов и интеллектуализация технологии их производства являются одним из передовых направлений современной науки. Одним из таких материалов являются прозрачные проводящие тонкопленочные оксиды, получаемые различными химическими (в основном) методами и обладающие высокими показателями проводимости и высокой пропускной способностью света в видимом диапазоне спектра, которые нашли множество применений [1–6].

Но в настоящее время имеются недостатки в технологии производства данных материалов, а именно: высокая стоимость синтеза подобных покрытий, сложность оборудования, из-за использования, как правило, вакуума. На сегодняшний день применение метода спрей-пиролиза решает эти проблемы.

Однако методу пиролиза аэрозолей присуща основная проблема, связанная с низкой управляемостью процесса, что приводит к затруднению воспроизводимости покрытий с заданными свойствами. Это вызвано следующими причинами:

- трудность подбора оптимальных технологических параметров вследствие большого количества разнородных факторов, одновременно влияющих на свойства формируемых покрытий;
- отсутствие базы образцов, учитывающей влияние основных параметров технологического процесса на конечные свойства покрытий.
- отсутствие информационно-измерительной управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов.

### *Метод спрей-пиролиза для синтеза прозрачных проводящих оксидов*

Спрей-пиролиз – метод, основанный на пиролитическом разложении раствора. В процессе распыления раствор проходит через этапы: образование пара, осадка и в конечном итоге тонкой пленки. В качестве основы раствора используют либо водные, либо спиртовые основы. Метод применяется в различных отраслях [7].

Основные преимущества этого метода – простота и возможность синтеза покрытий на подложки разной формы и размера.

Общий принцип метода представлен на рис. 1.

В данной работе решена задача создания информационно-измерительной системы для управления процессом синтеза прозрачных проводящих оксидов с целью контроля температурного режима подложки, а также контроля параметров покрытия, на базе измерителя поверхностного сопротивления.

Для разработки информационно-измерительной системы управления синтезом прозрачных проводящих оксидов рассмотрен процесс синтеза прозрачных проводящих оксидов с точки зрения управления им и измерений параметров. На основе выполненного анализа взаимосвязей между технологическими режимами и параметрами покрытий определен перечень параметров, требующих измерения и управления при синтезе прозрачных проводящих оксидов.

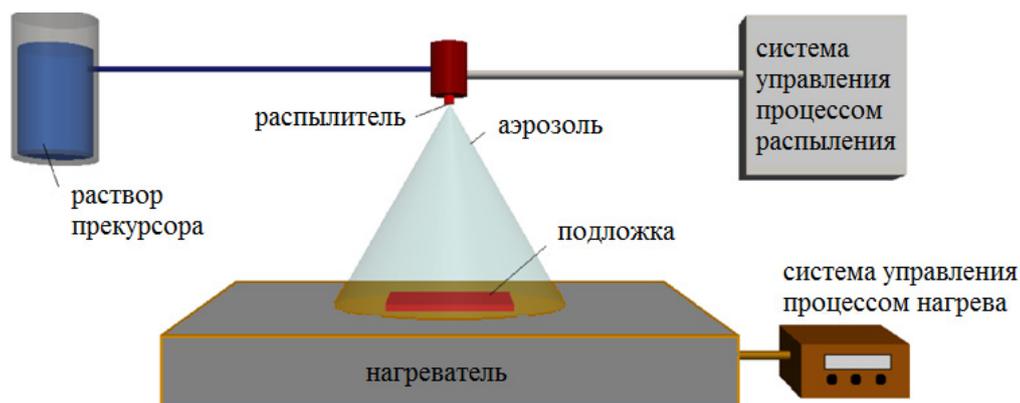


Рис. 1. Реализация метода спрей-пиролиза

Основными факторами, влияющими на параметры покрытий, являются технологические режимы, представленные в работе [8].

Параметром контроля покрытия является поверхностное сопротивление, поскольку от него напрямую зависит возможность применения прозрачного проводящего оксида в полупроводниковой отрасли.

#### *Разработка канала измерения поверхностного сопротивления*

На рис. 2 и 3 приведены структурная схема и фотография установки, с помощью которой выполнены измерения поверхностного сопротивления  $R_s$  полученных ранее образцов [9, 10]. При измерениях поверхностного сопротивления используются следующие средства:

- четырехзондовая головка;
- источник питания;
- цифровые мультиметры.

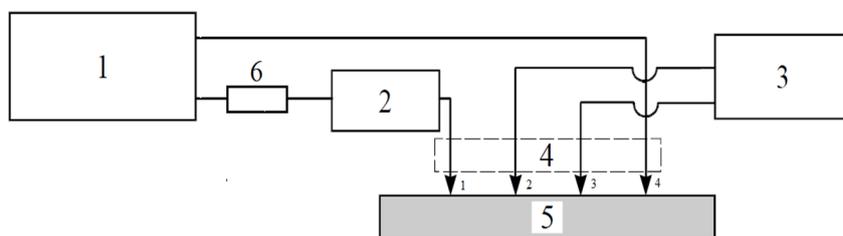


Рис. 2. Структурная схема канала измерения поверхностного сопротивления на основе четырехзондового метода: 1 – источник тока; 2 – устройство для измерения силы тока; 3 – вольтметр; 4 – устройство с четырьмя зондами; 5 – измеряемый образец; 6 – элемент постоянного сопротивления



Рис. 3. Фотография четырехзондовой системы измерений

Методика выполнения измерений:

- собрать систему измерений исходя из структуры, изображенной на рис. 2;
- измеряемый образец закрепить на столике для измерений;
- установить зонды четырехзондовой головки на образец;
- установить величину силы тока  $I_{14} = (1 - 5)$  мА;
- выполнить измерение напряжения  $U_{23}$ ;
- выполнить расчет поверхностного сопротивления по следующей формуле:

$$R_s = f\left(\frac{a}{b}, \frac{b}{s}\right) \frac{U_{23}}{I_{14}}, \quad (1)$$

где  $a$  – длина образца;  $b$  – ширина образца;  $f$  – поправочная функция.

#### *Разработка структуры канала измерения температуры подложки*

На рис. 4 представлена структура канала нагрева и измерения температуры.



Рис. 4. Структурная схема канала нагрева и измерения температуры

На рис. 5 изображен измерительный канал температуры подложки, на которую наносятся прозрачные проводящие оксиды.



Рис. 5. Канал измерения температуры с компенсационной температурой: ТП1 – термопара; ТП2 – дополнительная термопара; КП – провода; Е – термо-ЭДС;  $U$  – напряжение; ЦС – цифровой сигнал;  $\Theta_0$  – температура термостата;  $\Theta_1$  – температура свободных концов термопары;  $\Theta_2$  – температура компенсационных проводов на конце линии;  $\Theta_x$  – измеряемая температура

#### *Заключение*

Предложена структура каналов измерения температуры подложки, на которую осуществляется нанесение прозрачного проводящего покрытия методом спрей-пиролиза и структура канала измерения поверхностного сопротивления полученного покрытия.

Представлена методика измерений поверхностного сопротивления, основанная на использовании четырехзондового метода, которая позволяет косвенно определить поверхностное сопротивление.

Канал измерения температуры позволяет осуществлять нагрев подложки до требуемого значения и осуществляет стабилизацию заданного значения посредством управляющих сигналов информационно-измерительной и управляющей системы.

### Список литературы

1. Николаев К. О., Зинченко Т. О. Альтернативные способы получения функциональных слоев солнечных элементов нового поколения // Вестник научных конференций. 2017. № 9-3. С. 139–140.
2. Зинченко Т. О. Прозрачные проводящие покрытия на основе диоксида олова и их применение в солнечных элементах // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В. М. Шляндина. Пенза, 2018. С. 129–132.
3. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Паличев А. М. [и др.]. Прозрачные проводящие оксиды и их применение в умных стеклах // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2019»): материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых / под ред. Е. А. Печерской. Пенза, 2019. С. 315–318.
4. Зинченко Т. О., Печерская Е. А. Прозрачные проводящие оксиды и их применение в устройствах опто-, нано- и микроэлектроники // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. науч. ст. по материалам XXXIV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / под ред. М. А. Щербакова. Пенза, 2021. С. 108–111.
5. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Антипенко В. В. [и др.]. Синтез оксидных материалов для электрохромных панелей методом спрей – пиролиза // XXII Междунар. конф. молодых специалистов в области электронных приборов и материалов (EDM 2021) : дайджесты. Новосибирск, 2021. С. 261–266.
6. Зинченко Т. О. Принципы построения мультисенсорных систем газоаналитических приборов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 24-й Всерос. молодежной науч. конф. Ульяновск, 2021. С. 201–202.
7. 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, 2018. С. 258–260.
8. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Печерский А. В. [и др.]. Анализ параметров качества технологического процесса синтеза прозрачных проводящих оксидов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 100–109.
9. Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И. [и др.]. Анализ факторов, влияющих на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 64–72.
10. Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Кравцов А. Н. [и др.]. Разработка технологии спрей-пиролиза для синтеза прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 4. С. 92–103.

### References

1. Nikolaev K.O., Zinchenko T.O. Alternative methods of obtaining functional layers of new generation solar cells. *Vestnik nauchnykh konferentsiy = Bulletin of scientific conferences*. 2017;(9-3):139–140. (In Russ.)
2. Zinchenko T.O. Transparent conductive coatings based on tin dioxide and their application in solar cells. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.M. Shlyandina = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information : materials of International Scientific and Technical conf., dedicated. The 100th anniversary of the birth of V. M. Shlyandin*. Penza, 2018:129–132. (In Russ.)
3. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Palichev A.M. et al. Transparent conductive oxides and their application in smart glasses. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2019»): materialy XI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauchnoy shkoly i konkursom nauchno-issledovatel'skikh rabot dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information ("Shlyandinsky readings – 2019") : materials of the XI International Scientific and Technical. conf. with elements of a*

- scientific school and a competition of research papers for students, postgraduates and young scientists. Ed. by E.A. Pecherskoy. Penza, 2019:315–318. (In Russ.)
4. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A. Transparent conductive oxides and their application in opto-, nano- and microelectronics devices. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. nauch. st. po materialam XXXIV Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem = Problems of automation and control in technical systems : collection of scientific articles based on the materials of XXXIV All-Russian Scientific-Technical. conf. with the international participation.* Ed. by M.A. Shcherbakova. Penza, 2021:108–111. (In Russ.)
  5. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Antipenko V.V. et al. Synthesis of oxide materials for electro-chrome panels by spray pyrolysis method. *XXII Mezhdunar. konf. molodykh spetsialistov v oblasti elektronnykh priborov i materialov (EDM 2021): dayzhesty = XXII International Conference of Young specialists in the field of electronic devices and materials (EDM 2021) : digests.* Novosibirsk, 2021:261–266. (In Russ.)
  6. Zinchenko T.O. Principles of construction of multisensory systems of gas-analytical devices. *Aktual'nye problemy fizicheskoy i funktsional'noy elektroniki: materialy 24-y Vseros. molodezhnoy nauch. konf. = Actual problems of physical and functional electronics : materials of the 24th All-Russian. youth scientific conference.* Ul'yanovsk, 2021:201–202. (In Russ.)
  7. 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. scientific and practical conf.* Ed. by L.R. Fionovoy. Penza, 2018:258–260. (In Russ.)
  8. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Pecherskiy A.V. et al. Analysis of quality parameters of the technological process of synthesis of transparent conductive oxides. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(2):100–109. (In Russ.)
  9. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Kondrashin V.I. et al. Analysis of factors affecting the electrophysical properties of transparent conductive coatings. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2021;(1):64–72. (In Russ.)
  10. Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O., Kravtsov A.N. et al. Development of spray pyrolysis technology for synthesis of transparent conductive coatings based on tin dioxide. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences.* 2020;(4):92–103. (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)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /  
The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 29.02.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 29.03.2023**

**Принята к публикации / Accepted 28.04.2023**