

*Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, А. В. Печерский,
С. А. Гурин, Б. П. Сибринин, В. В. Антипенко*

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ

*T. O. Zinchenko, E. A. Pecherskaya, A. V. Pecherskiy,
S. A. Gurin, B. P. Sibrinin, V. V. Antipenko*

ANALYSIS OF THE QUALITY PARAMETERS OF THE SYNTHESIS PROCESS TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Прозрачные проводящие оксиды (ППО) являются перспективными материалами элементов функциональной электроники, используются при создании «умных» стекол, в солнечных элементах. Это подтверждает актуальность разработки технологии синтеза прозрачных проводящих покрытий с заданными свойствами. Данная работа нацелена на обеспечение надлежащих показателей качества синтезируемых покрытий на основе применения инструментов контроля качества. *Материалы и методы.* Проанализировано влияние технологических режимов метода спрей-пиролиза (температуры подложки, давления в распылителе, расстояния между распылителем и подложкой, объема раствора, геометрического расположения; формы и размера подложки; скорость распыления) на параметры прозрачных проводящих оксидов, сгруппированные по трем основным группам: оптические, морфологические, электрофизические. *Результаты.* В результате анализа применимости семи известных инструментов контроля качества к технологическому процессу синтеза оксидных покрытий с заданными свойствами разработаны диаграммы Исикавы, диаграмма Парето, контрольные карты, способствующие решению задачи получения прозрачных проводящих тонких пленок с заданными свойствами. *Выводы.* На основе применения инструментов контроля качества систематизированы причины, влияющие на показатели качества прозрачных проводящих покрытий. Разработанные причинно-следственные диаграммы Исикавы позволили заключить, что основными показателями, влияющими на качество ППО, являются выбор прекурсора и примеси для раствора, подготовка раствора и подложки, выбор метода получения и конструкция распылителя и реакционной камеры. Посредством разработки кумулятивной кривой Парето установлено, что наиболее часто встречающимся дефектом является недопустимо высокое поверхностное сопротивление покрытий, и следовательно, с целью повышения качества покрытий первоочередными должны быть корректирующие меры в процессе синтеза, направленные на снижение сопротивления. В совокупности рассмотренные инструменты контроля качества внедрены при разработке технологического процесса синтеза прозрачных проводящих оксидов методом спрей-пиролиза.

A b s t r a c t. *Background.* Transparent conductive oxides are promising materials for the elements of functional electronics; they are used to create smart glasses in solar cells. This confirms the relevance of developing a technology for the synthesis of transparent conductive coat-

ings with desired properties. This work is aimed at providing appropriate quality indicators of synthesized coatings based on the use of quality control tools. **Materials and methods.** The article analyzes the influence of the technological regimes of the spray pyrolysis method (substrate temperature, pressure in the atomizer, distance between the atomizer and the substrate, solution volume, geometric location; substrate shape and size; atomization speed) on the parameters of transparent conductive oxides, grouped into three main groups: optical, morphological, electrophysical. **Results.** As a result of the analysis of the applicability of seven well-known quality control tools to the technological process of synthesis of oxide coatings with desired properties, Ishikawa diagrams, Pareto diagrams, and control cards have been developed that contribute to solving the problem of obtaining transparent conductive thin films with desired properties. **Conclusions.** Based on the use of quality control tools, reasons are systematized for the quality indicators of transparent conductive coatings. The developed causal diagrams of Ishikawa made it possible to conclude that the main indicators affecting the quality of PPO are the choice of precursor and impurities for the solution, the preparation of the solution and substrate, the choice of the method of preparation and the design of the atomizer and reaction chamber. By developing a cumulative Pareto curve, it has been established that the most common defect is an unacceptably high surface resistance of coatings, and therefore, in order to improve the quality of coatings, corrective measures in the synthesis process aimed at reducing the resistance should be priority. In total, the considered quality control tools were introduced in the development of a technological process for the synthesis of transparent conductive oxides by spray pyrolysis.

К л ю ч е в ы е с л о в а: диаграмма Парето, диаграмма Исикавы, контрольная карта, прозрачные проводящие оксиды, тонкие пленки, параметры качества, спрей – пиролиз.

К e y w o r d s: Pareto diagram, Ishikawa diagram, control card, transparent conductive oxides, thin films, quality parameters, spray – pyrolysis.

Введение

В процессе отработки технологий синтеза прозрачных проводящих покрытий (ППП) необходим анализ параметров их качества. Чтобы понять причины, влияющие на потребительские свойства, необходимо организовать процесс сбора статистических данных и применить к ним инструменты контроля качества. На качество прозрачных проводящих оксидов сильно влияют разного рода дефекты, определение которых, а также причин их появления и необходимо осуществить. При этом причины могут заключаться и в технологических режимах, и в самой установке, и в ошибке оператора, и в некачественных материалах, что указывает на необходимость систематизации причин дефектов.

Сами дефекты также тоже могут различаться. Широкое распространение получили семь методов, которые превратились, по сути, в эффективные инструменты контроля качества. Методы являются простыми в реализации, но при этом достаточно эффективны для решения поставленных целей. Последовательность применения методов может быть различной. Как показывает практика, применение следующих известных методов с 95 % вероятностью позволяет решить поставленную задачу [1, 2]: контрольная карта; диаграмма Парето; контрольный листок; гистограмма; диаграмма Исикавы; стратификация; диаграмма разброса.

Применение диаграммы Исикавы для систематизации причин, влияющих на параметры качества прозрачных проводящих покрытий

Диаграмма Исикавы – инструмент контроля качества, который выявляет причинно-следственную связь, т.е. наиболее важные факторы, влияющие на конечный результат [3]. Если в результате технологического процесса качество покрытия оказалось неудовлетворительным, то это свидетельствует об отклонении требуемых технологических режимов от заданных условий. Если причину устранить, то качество получаемых изделий возрастет [4]. Для произ-

водства качественных прозрачных проводящих оксидов необходимо учитывать множество факторов. Основными факторами производства являются следующие технологические режимы [5, 6]:

- температура подложки;
- давление в распылителе;
- расстояние между распылителем и подложкой;
- объем раствора;
- геометрическое расположение;
- форма и размер подложки;
- скорость распыления.

Данные факторы напрямую оказывают влияние на параметры качества ППО, которыми являются три основных группы показателей [7]:

- оптические;
- морфологические;
- электрофизические.

К оптическим относят такие параметры, как показатель прозрачности в видимой и в инфракрасной области света, коэффициент преломления, коэффициент экстинкции и поглощения. Электрофизические параметры включают следующие: поверхностное сопротивление, удельная проводимость, концентрация и подвижность носителей заряда, длина свободного пробега, концентрация носителей заряда.

К морфологическим относятся следующие параметры: структура пленки (кристаллическая или аморфная), изотропность, равномерность и толщина пленки, а также фазовый состав.

Для составления диаграммы Исикавы необходимо определить, какие показатели влияют на качество формируемой оксидной пленки в зависимости от следующих факторов-причин: материалы; методы; субъективные факторы; внешние факторы; оборудование. Разработанная диаграмма Исикавы представлена на рис. 1.

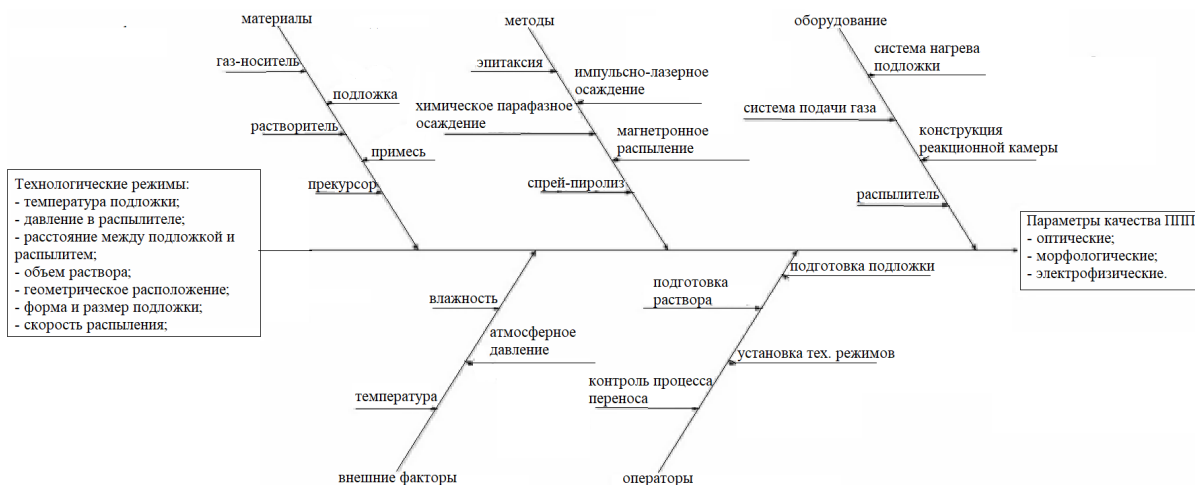


Рис. 1. Диаграмма Исикавы для процесса получения прозрачных проводящих оксидов

Основными показателями, влияющими на качество ППО, являются выбор прекурсора и примеси для раствора, подготовка раствора и подложки, выбор метода получения и конструкция распылителя и реакционной камеры [8–10]. Контроль требуемых значений перечисленных параметров способствует повышению качества покрытий, формированию покрытий с заданными свойствами.

Анализ причинно-следственных диаграмм дает возможность выявить основные факторы (причины), влияющие на данное свойство покрытия или одну из его эксплуатационных характеристик (параметров качества). С этой целью построены диаграммы Исикавы, учитывающие причины, определяющие следующие основные параметры качества ППО-покрытий: сопротивление (проводимость), коэффициент пропускания, коэффициент поглощения, толщина покрытия (рис. 2).



Рис. 2. Причинно-следственные диаграммы, учитывающие факторы, влияющие на следующие параметры качества ППО-покрытий: в – коэффициент поглощения; г – толщину (окончание)

В качестве примера рассмотрим диаграмму Исикавы для анализа факторов, влияющих на сопротивление ППО-покрытия (рис. 2,а). На диаграмме стрелками показаны причинно-следственные взаимосвязи, причем стрелки направлены от причины к следствию. Например, стрелка «концентрация носителей заряда – сопротивление (проводимость)» свидетельствует о том, что концентрация носителей влияет на сопротивление (проводимость), а не наоборот. Если же стрелка направлена в обе стороны, это означает, что причина и следствие в равной степени влияют друг на друга. Анализ диаграммы (см. рис. 2) показывает, что на сопротивление ППО-покрытия оказывает влияние достаточно большое число факторов, в которые входят и состав раствора, и технологические параметры, и ряд параметров самого покрытия.

Разработка диаграммы Парето

Для повышения качества необходимо учитывать множество причин, влияющих на свойства ПП. Целесообразно классифицировать эти причины, поскольку существует множество второстепенных несущественных проблем, но при этом небольшое количество важных причин, влияющих на синтез оксидных покрытий с заданными свойствами. Анализ диаграмм Парето показывает, что наибольшее число дефектов возникает из-за относительно небольшого ряда проблем. Диаграмма Парето – это инструмент контроля качества, позволяющий распределить усилия для разрешения возникающих проблем и выявить основные причины. Различают два вида диаграмм Парето: по результатам деятельности и по причинам [11]. Для оценки качества ППО используется диаграмма Парето по причинам. Основными видами дефектов являются: неравномерность, высокое сопротивление, плохая изотропность, высокий показатель толщины и т.д. (табл. 1).

Таблица 1

Виды дефектов и их частота в полученных ППО

Виды дефектов	Количество дефектных образцов	Частота дефекта, %	Накопленная сумма дефектов, %
Неудовлетворительно высокое сопротивление	6	22	22
Неудовлетворительная равномерность	3	11	33
Неудовлетворительно высокая толщина	5	18	51
Неудовлетворительно низкая прозрачность	3	11	62
Неудовлетворительно низкая изотропность	2	7	69
Неудовлетворительный фазовый состав	2	7	76
Неудовлетворительная степень кристаллизации	0	0	76
Неудовлетворительно низкая подвижность	4	14	90
Неудовлетворительно низкая концентрация носителей	2	7	97
Неудовлетворительный показатель преломления	1	3	100

В результате анализа количества дефектных образцов, относящихся к тому или иному виду дефекта, построена кумулятивная кривая Парето (рис. 3).

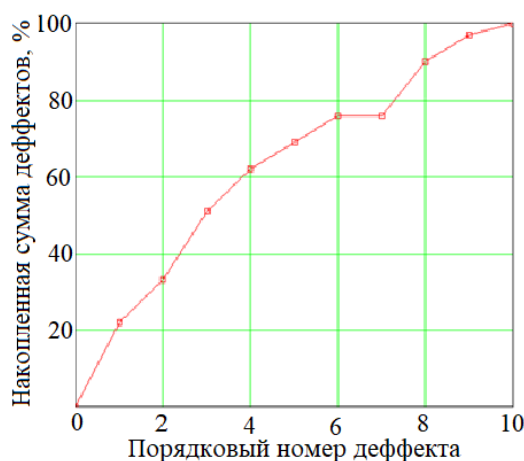


Рис. 3. Кумулятивная кривая Парето

Наиболее часто встречающимся дефектом является высокое сопротивление, которое необходимо устранить в первую очередь. *ABC*-анализ показал, что к группе *A* наиболее существенных дефектов относятся следующие: неудовлетворительно высокое сопротивление, неудовлетворительная равномерность, неудовлетворительно высокая толщина. Именно эти дефекты необходимо устранить в первую очередь. В группу *B* входят: неудовлетворительно низкая прозрачность, неудовлетворительно низкая изотропность, неудовлетворительный фазовый состав, неудовлетворительная степень кристаллизации. Остальные дефекты входят в группу *C*: они самые многочисленны, но при этом наименее значимы.

Контрольная карта

Так как анализ диаграммы Парето позволил выявить, что наиболее часто встречающийся дефект – неудовлетворительно высокое сопротивление оксидного покрытия, то далее следует подробнее рассмотреть этот дефект с помощью контрольной карты. Контрольная карта – инструмент, который позволяет отслеживать ход протекающего процесса и воздействовать на него, предупреждая его отклонение от заданных требований [4]. При разработке контрольной карты необходимо построить три линии (рис. 4). Центральная линия обозначает требуемое среднее значение исследуемого параметра, две другие линии, которые называются верхний и нижний контрольные пределы, определяют границы разброса величины.

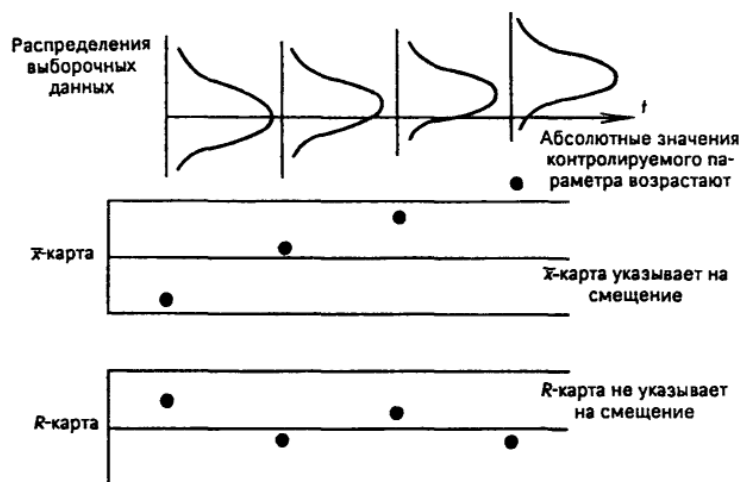


Рис. 4. Пример контрольной карты

Если все точки находятся между контрольными пределами, процесс считается контролируемым. Существуют разные типы контрольных карт, в основном используются семь типов, которые относятся к картам Шухарта: средних арифметических и размахов; медиан и размахов; индивидуальных значений; доли дефектной продукции; числа дефектных единиц продукции; числа дефектов; числа дефектов на единицу продукции.

Таким образом, посредством контрольных карт решены следующие задачи:

- контроль значений параметров оксидного покрытия;
- проверка стабильности технологического процесса [12, 13];
- немедленное принятие корректирующих мер непосредственно во время технологического процесса;
- проверка эффективности принятых мер.

В связи с тем, что в рассматриваемом случае актуальна задача контроля значений конкретной характеристики покрытия, то целесообразно использовать контрольные карты средних арифметических и размахов [14].

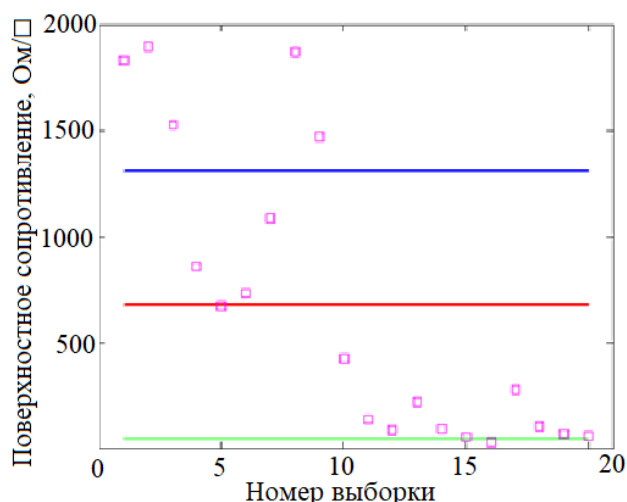


Рис. 5. Контрольная карты контроля сопротивления ППО

Контрольная карта сопротивлений прозрачных проводящих оксидов (рис. 5) показывает, что ряд значений поверхностного сопротивления вышел за граничные прямые. Но учитывая, что значения поверхностного сопротивления, которые находятся под нижней граничной кривой, наоборот, в лучшую сторону сказываются на качестве покрытия, стоит принимать во внимание только те выбросы, которые выходят за верхнюю граничную прямую.

Заключение

С целью анализа технологических режимов на параметры качества прозрачных проводящих покрытий построены диаграммы Исикавы, кумулятивная кривая Парето и контрольная карта сопротивлений. В соответствии с диаграммой Исикавы основными показателями, влияющими на качество ППО, являются выбор прекурсора и примеси для раствора, подготовка раствора и подложки, выбор метода получения и конструкции распылителя и реакционной камеры. Кумулятивная кривая Парето позволила определить, что наиболее часто встречающимся дефектом является недопустимо высокое сопротивление, которое необходимо устранить в первую очередь. В совокупности рассмотренные инструменты контроля качества внедрены при разработке технологического процесса синтеза прозрачных проводящих оксидов методом спрей-пиролиза.

Библиографический список

1. Власов, А. И. Управление и контроль качества изделий электронной техники. Семь основных инструментов системного анализа при управлении качеством изделий электронной техники / А. И. Власов, В. В. Маркелов, Д. Е. Зотьева // Датчики и системы. – 2014. – № 8. – С. 55–66.
2. Голубков, П. Е. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, А. В. Мартынов // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : тез. докл. третьей Всерос. молодежной науч. конф. – Тамбов, 2018. – С. 111–113.
3. Ребрин, Ю. И. Управление качеством : учеб. пособие / Ю. И. Ребрин. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2004. – С. 174.
4. Петрова, Е. И. Современные методы управления качеством / Е. И. Петрова // Научный альманах. – 2015. – № 8. – С. 864–868.
5. 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. – С. 258–260.
6. Nikolaev, K. O. Influence of technological parameters on the energy efficiency of oxide solar cells / K. O. Nikolaev, E. A. Pecherskaya, A. A. Shamin // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM EDM 2018 : proceedings. – Novosibirsk, 2018. – P. 19–21.
7. Прозрачные проводящие оксиды и их применение в умных стеклах / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, А. М. Паличев, Б. П. Сибринин, А. М. Бибарсова // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шлядинские 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.
8. Синтез и свойства нанокристаллических пленок диоксида олова, полученных методом пиролиза аэрозолей / Р. М. Печерская, Е. А. Печерская, А. М. Метальников, В. И. Кондрашин, В. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 237–241.
9. Кондрашин, В. И. Исследование влияния концентрации примеси на поверхностное сопротивление в ППП (полученных методом спрей-пиролиза) на основе диоксида олова / В. И. Кондрашин, Е. А. Печерская // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 19-й Всерос. молодежной научной школы-семинара. – Ульяновск, 2016. – С. 175–176.
10. Electrical properties of transparent conductive ATO coatings obtained by spray pyrolysis / Т. О. Zinchenko, V. I. Kondrashin, E. A. Pecherskaya, A. S. Kozlyakov, K. O. Nikolaev, J. V. Shepeleva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 225 (1). – P. 012255.
11. Ваньян, П. Л. Правило Парето и самоподобие в ABC-анализе / П. Л. Ваньян, А. И. Поташев // Исследовано в России. – 2005. – С. 1986–1995.
12. Controlling the temporal instability of the dielectric parameters of ferroelectrics / Е. А. Pecherskaya, V. A. Solov'ev, A. M. Metal'nikov, Y. A. Varenik, I. M. Gladkov, D. V. Ryabov // Semiconductors. – 2013. – Т. 47, № 13. – С. 1720–1722.
13. Контроль временной нестабильности диэлектрических параметров сегнетоэлектриков / Е. А. Печерская, В. А. Соловьев, А. М. Метальников, Ю. А. Вареник, И. М. Гладков, Д. В. Рябов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2013. – № 2 (100). – С. 84–88.
14. Гродзенский, С. Я. Об эффективности применения семи простых инструментов качества / С. Я. Гродзенский, Я. С. Гродзенский // Методы менеджмента качества. – 2012. – № 2. – С. 46–49.

References

1. Vlasov A. I., Markelov V. V., Zot'eva D. E. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2014, no. 8, pp. 55–66. [In Russian]
2. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Martynov A. V. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. tret'ey Vseros. molodezhnoy nauch. konf.* [Radionics. Problems and prospects : proc. dokl. the third all-Russian youth scientific conf.]. Tambov, 2018, pp. 111–113. [In Russian]
3. Rebrin Yu. I. *Upravlenie kachestvom: ucheb. posobie* [Quality management: tutorial]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004, p. 174. [In Russian]
4. Petrova E. I. *Nauchnyy al'manakh* [Scientific almanac]. 2015, no. 8, pp. 864–868. [In Russian]
5. 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 technologies in science and education. Problems and prospects: collection of scientific articles of the all-Russian interuniversity scientific-practical Conf. (Penza, March 14, 2018)]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 258–260. [In Russian]
6. Nikolaev K. O., Pecherskaya E. A., Shamin A. A. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM EDM 2018: proceedings*. Novosibirsk, 2018, pp. 19–21.
7. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Palichev A. M., Sibirin B. P., Bibarsova A. M. *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, tools and technologies for obtaining and processing measurement information ("Shlyandinsky readings-2019"): materials of the XI international conference. scientific and technical conference with elements of a scientific school and a competition of research papers for students, postgraduates and young scientists]. Penza, 2019, pp. 315–318. [In Russian]
8. Pecherskaya R. M., Pecherskaya E. A., Metal'nikov A. M., Kondrashin V. I., Solov'ev V. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical Sciences]. 2012, no. 4 (24), pp. 237–241. [In Russian]
9. Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A. *Aktual'nye problemy fizicheskoy i funktsional'noy elektroniki: materialy 19-y Vseros. molodezhnoy nauchnoy shkoly-seminara* [Actual problems of physical and functional electronics: materials of the 19th all-Russian conference. youth scientific school-seminar]. Ulyanovsk, 2016, pp. 175–176. [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.
11. Van'yan P. L., Potashev A. I. *Issledovano v Rossii* [Studied in Russia]. 2005, pp. 1986–1995. [In Russian]
12. Pecherskaya E. A., Solov'ev V. A., Metal'nikov A. M., Varenik Y. A., Gladkov I. M., Ryabov D. V. *Semiconductors*. 2013, vol. 47, no. 13, pp. 1720–1722.
13. Pecherskaya E. A., Solov'ev V. A., Metal'nikov A. M., Varenik Yu. A., Gladkov I. M., Ryabov D. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics]. 2013, no. 2 (100), pp. 84–88. [In Russian]
14. Grodzenskiy S. Ya., Grodzenskiy Ya. S. *Metody menedzhmenta kachestva* [Quality management methods]. 2012, no. 2, pp. 46–49. [In Russian]

Зинченко Тимур Олегович

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

Zinchenko Timur Olegovich

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

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

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

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)

Печерский Анатолий Владимович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационного обеспечения
управления и производства,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ura258@yandex.ru

Pechersky Anatoly Vadimovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information support
for management and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Гурин Сергей Александрович

кандидат технических наук,
начальник отдела,
ЗАО «Медтехника»
(Россия, г. Пенза, ул. Средняя, 9)
E-mail: teslananoel@rambler.ru

Gurin Sergey Alexandrovich

candidate of technical sciences,
head of department,
CJSC Medtehnika
(9 Srednyaya street, Penza, Russia)

Сибринин Борис Петрович

старший преподаватель,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sibrinin@rambler.ru

Sibrinin Boris Petrovich

senior lecturer,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Антипенко Владимир Викторович

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

Antipenko Vladimir Viktorovich

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

Образец цитирования:

Анализ параметров качества технологического процесса синтеза прозрачных проводящих оксидов / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, А. В. Печерский, С. А. Гурин, Б. П. Сибринин, В. В. Антипенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 100–109. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-12.