



УДК 621.315.592
doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-13



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Пьезоэлектрические тонкопленочные покрытия: перспективы получения и применения

Тимур Олегович Зинченко

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
scar0243@gmail.com

Полина Сергеевна Зими́на

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
Ziminapolina241@yandex.ru

Екатерина Анатольевна Печерская

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
peal@list.ru

Аннотация. Рассматриваются перспективные материалы для получения пьезоэлектрических тонкопленочных покрытий методом спрей-пиролиза. Описаны основные области применения таких покрытий в современных технологиях, включая микроэлектромеханические системы, энергоэффективные устройства, сенсоры и медицинские имплантаты. Особое внимание уделяется наиболее перспективным материалам, таким как ZnO, TiO₂ и BaTiO₃, а также многослойным структурам и гибридным материалам. Приведены сведения о методе спрей-пиролиза как эффективном способе получения тонкопленочных структур с заданными свойствами.

Ключевые слова: пьезоэлектрические покрытия, тонкопленочные структуры, спрей-пиролиз, оксид цинка, диоксид титана, титанат бария, гибридные материалы

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и устройств электроники» (№ 124041700069-0).

Для цитирования: Зинченко Т. О., Зими́на П. С., Печерская Е. А. Пьезоэлектрические тонкопленочные покрытия: перспективы получения и применения // Инжиниринг и технологии. 2025. Т. 10 (1). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-13

Piezoelectric thin-film coatings: prospects for production and application

Timur O. Zinchenko

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
scar0243@gmail.com

Polina S. Zimina

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
Ziminapolina241@yandex.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
peal@list.ru

Abstract. This article examines promising materials for the fabrication of piezoelectric thin-film coatings using the spray pyrolysis method. The main application areas of such coatings in modern technologies are described, including microelectromechanical systems, energy-efficient devices, sensors, and medical implants. Special attention is given to the most promising materials, such as ZnO, TiO₂, and BaTiO₃, as well as multilayer structures and hybrid materials. Information on the spray pyrolysis method is provided as an effective approach for obtaining thin-film structures with specified properties.



Keywords: piezoelectric coatings, thin-film structures, spray pyrolysis, zinc oxide, titanium dioxide, barium titanate, hybrid materials

Financing: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project "Synthesis and Research of promising Nanomaterials, Coatings and electronics Devices" (No. 124041700069-0).

For citation: Zinchenko T.O., Zimina P.S., Pecherskaya E.A. Piezoelectric thin-film coatings: prospects for production and application = *Engineering and Technology*. 2025;10(1):1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-13

Пьезоэлектрические тонкопленочные покрытия играют ключевую роль в развитии современных микро- и нанотехнологий [1]. Они находят широкое применение в электронике, медицине, энергетике и других высокотехнологичных областях. Их популярность обусловлена уникальным сочетанием пьезоэлектрических, диэлектрических и механических свойств, которые делают их незаменимыми в ряде устройств [2].

Пьезоэлектрические тонкопленочные покрытия широко используются в производстве микро-электромеханических систем и наносистем, а именно поверхностно-акустических волновых фильтров, резонаторов, высокочастотных генераторов, датчиков давления, датчиков ускорения, датчиков вибрации, биосенсоров для регистрации механических изменений в биологических системах [3].

Пьезоэлектрические тонкопленочные покрытия исследуются для возможного применения в сфере энергоэффективности и автономного питания. Производство самозаряжаемых сенсорных экранов, медицинских имплантатов и автономных устройств мониторинга состояния организма, а также генераторов на основе пьезоэлектрического эффекта позволяет расширить перспективы применения пьезоэлектрических покрытий и повышает актуальность их получения [4].

Развитие прозрачных пьезоэлектрических материалов позволяет интегрировать их в оптоэлектронные системы: гибкие дисплеи и сенсорные панели с функцией тактильного отклика, лазерные модуляторы и оптические датчики, использующие пьезоэлектрический эффект для точного контроля параметров света [5].

Пьезоэлектрические покрытия находят применение и в медицине благодаря их способности реагировать на механические воздействия.

Пьезоэлектрические актуаторы используются в микро- и наноманипуляторах, роботизированных системах и адаптивных поверхностях [6].

Среди наиболее перспективных пьезоэлектрических соединений выделяют оксид цинка (ZnO), диоксид титана (TiO₂) и титанат бария (BaTiO₃), которые обладают высокой пьезоэлектрической активностью и которые можно получить методом спрей-пиролиза. ZnO обладает высокой пьезоэлектрической чувствительностью и прозрачностью, TiO₂ устойчив к агрессивным средам, а BaTiO₃ демонстрирует выдающиеся диэлектрические и сегнетоэлектрические свойства [7].

Самым перспективным методом получения оксидных покрытий является метод спрей-пиролиза. Это простой и эффективный метод получения тонкопленочных структур, причем отличается простотой в масштабировании и дешевизной производственного процесса [8, 9]. Схема процесса нанесения покрытия этим методом представлена на рис. 1.

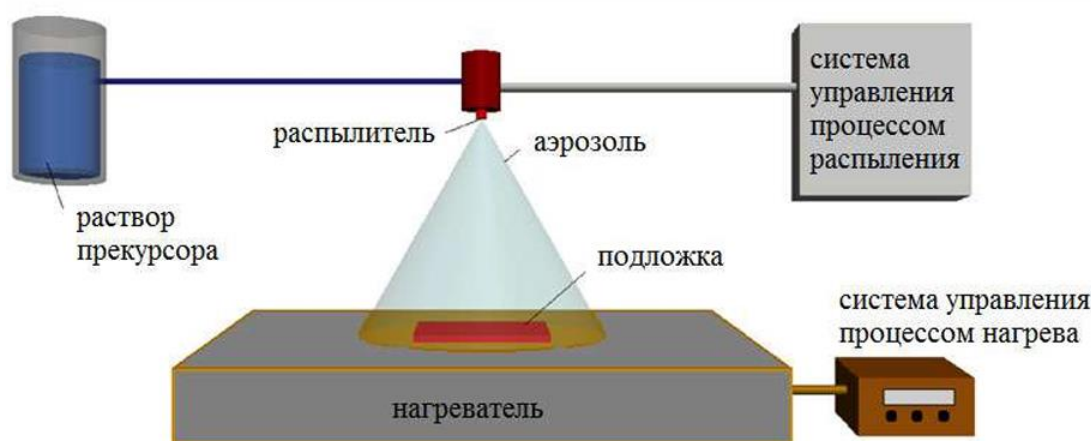


Рис. 1. Реализация метода спрей-пиролиза



Также на рис. 2 и 3 представлена разработанная информационно-измерительная и управляющая система получения тонкопленочных структур [10, 11].

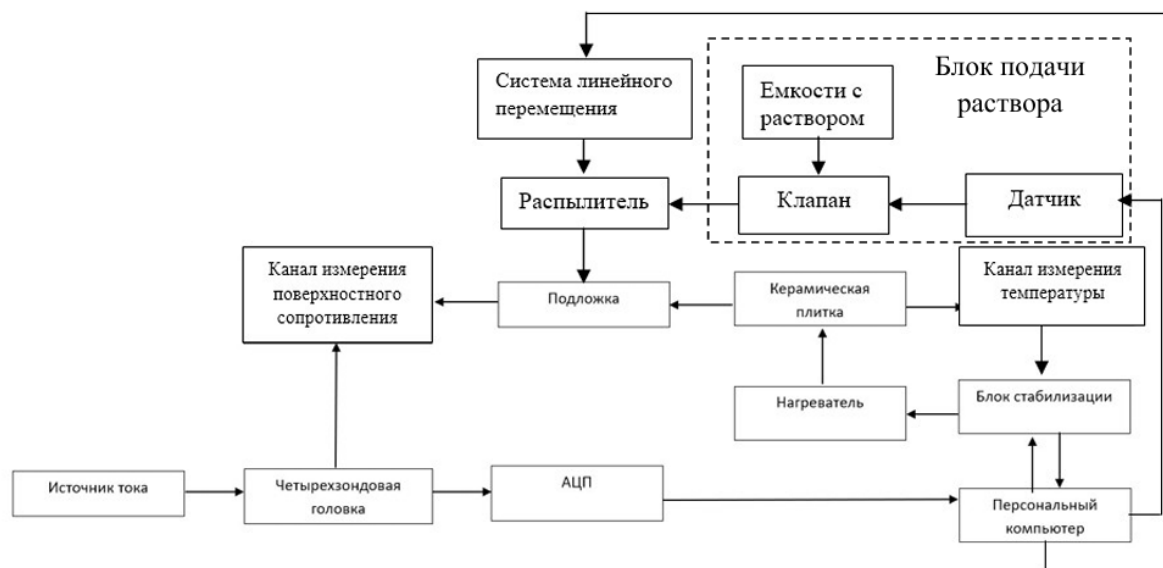


Рис. 2. Структурная схема информационно-измерительной системы управления процессом получения прозрачных проводящих оксидов

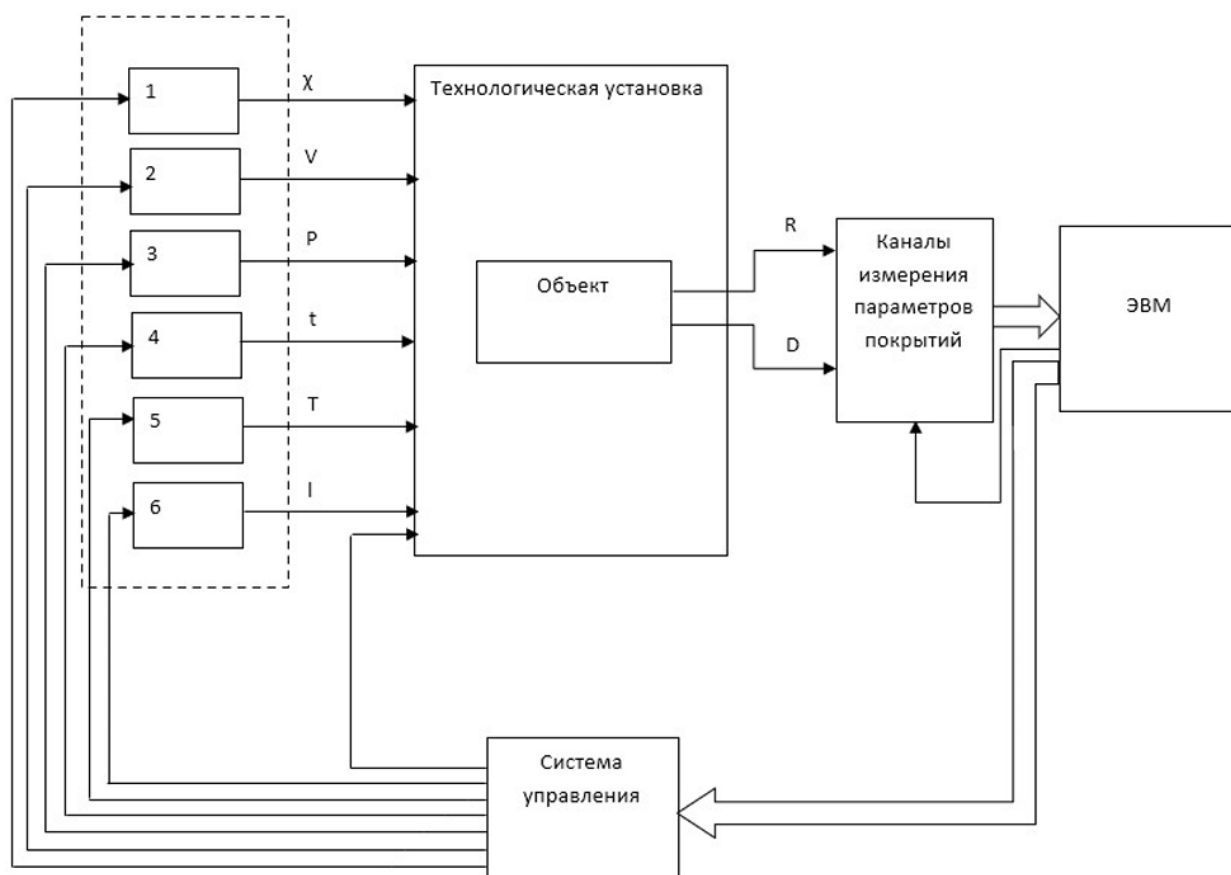


Рис. 3. Функциональная схема информационно-измерительной системы управления процессом получения прозрачных проводящих оксидов: 1, 2 – Блоки подачи раствора; 3 – Компрессор; 4 – Секундомер в программном обеспечении; 5 – Блок нагрева подложки; 6 – Блок линейного перемещения распылителя

Разработанная информационно-измерительная и управляющая система позволяет получать пьезоэлектрические тонкопленочные структуры из большого перечня материалов.



Еще одним перспективным направлением является разработка гибридных материалов и многослойных структур, которые позволят улучшить пьезоэлектрические характеристики, а также оптимизировать механические и электрофизические свойства покрытий [12]. Такими многослойными структурами являются композиты на основе $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$, которые используются для создания гибких пьезоэлектрических сенсоров и носимой электроники. Композитом также является из оксида цинка и полимерных матриц, который нашел применение в гибких пьезогенераторах и биосенсорах.

Добавление углеродных нанотрубок или графена (CNT-ZnO композиты, гибриды $\text{BaTiO}_3/\text{графен}$) в традиционные пьезоэлектрические материалы позволяет значительно повысить их механическую прочность и электропроводность.

При этом исследования и поиск новых пьезоэлектрических материалов продолжаются, основными критериями являются соединения, обладающие высокой пьезоэлектрической активностью, химической стабильностью, гибкостью и совместимостью с существующими технологическими процессами. Среди наиболее перспективных направлений можно выделить свинцовые и бессвинцовые перовскиты, слоистые оксиды, гибридные органо-неорганические материалы и наноинженерные структуры.

Перовскитные структуры являются одними из наиболее эффективных пьезоэлектрических материалов, но традиционные соединения на основе свинца (например, PZT – цирконат-титанат свинца) имеют экологические ограничения. Поэтому ведется активный поиск безсвинцовых аналогов, которыми являются $\text{K}_{0,5}\text{Na}_{0,5}\text{NbO}_3$ (высокий пьезоэлектрический отклик), $\text{Bi}_{0,5}\text{Na}_{0,5}\text{TiO}_3$ (высокая стабильность и совместимость с гибкими подложками), $(\text{K},\text{Na},\text{Li})(\text{Nb},\text{Ta})\text{O}_3$ (расширенная температурная стабильность), $(\text{Ba},\text{Sr})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (пьезоэлектрические свойства BaTiO_3 с улучшенной температурной стабильностью).

Слоистые оксиды представляют собой альтернативу традиционным перовскитам, обладая высокой термической устойчивостью и высокой диэлектрической проницаемостью.

К примеру, $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ пьезоэлектрический материал с высокой устойчивостью к электрическому пробое или $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ применяется в тонкопленочных сенсорах. Комбинирование слоистых оксидов с классическими пьезоэлектрическими материалами (например, ZnO , BaTiO_3), к примеру $\text{BaTiO}_3/\text{SrTiO}_3$, позволяет увеличить чувствительность и механическую стабильность.

Органо-неорганические соединения обладают высокой пьезоэлектрической чувствительностью и перспективны для гибкой электроники. Один из наиболее изученных гибридных перовскитов с уникальными пьезоэлектрическими свойствами $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$.

В итоге развитие пьезоэлектрических тонкопленочных покрытий будет направлено на повышение эффективности, экологическую безопасность и интеграцию с новыми технологическими платформами, что позволит расширить их применение в гибкой электронике, медицине и системах энергообеспечения.

Список литературы

1. Uchino K. Piezoelectric actuators and ultrasonic motors. Springer, 1997.
2. Safari A., Akdogan E. K. Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications. Springer, 2008.
3. Priya S., Inman D. J. Energy harvesting technologies. Springer, 2009.
4. Wang Z. L., Wu W. Nanotechnology for energy harvesting in self-powered microsystems // *Angewandte Chemie International Edition*. 2012.
5. Yang Y., Qi J., Liao C. Flexible piezoelectric devices for self-powered sensors // *Advanced Materials*. 2018.
6. Bowen C. R., Kim H. A., Weaver P. M. Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications // *Energy & Environmental Science*. 2014.
7. Muralt P. PZT thin films for microsensors and actuators: Where do we stand? // *Journal of Electroceramics*. 2008. № 21. P. 177–192.
8. Artamonov D. V., Baranov V. A., Pecherskaya E. A., Tsylin B. V., Fimin A. V., Pushkareva A. V. Application of a hyper-complex impedance model for indirect measurements of materials parameters of functional electronics // *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*. Altay, 2019. P. 760–764.
9. Печерская Е. А. Математические модели предметной области при исследовании параметров материалов нано- и микроэлектроники // *Университетское образование : сб. ст. XV Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 50-летию полета первого космонавта Ю. А. Гагарина*. Пенза, 2011. С. 436–438.



10. Зинченко Т. О. Аппаратное обеспечение информационно-измерительной и управляющей системы синтеза прозрачных проводящих оксидов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 2 (66). С. 83–89. doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-6
11. 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 // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1 (35). С. 64–72.
12. Печерская Е. А. Метрологические аспекты исследования активных диэлектриков для микро- и наноиндустрии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 41–44.

References

1. Uchino K. *Piezoelectric actuators and ultrasonic motors*. Springer, 1997.
2. Safari A., Akdogan E.K. *Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications*. Springer, 2008.
3. Priya S., Inman D.J. *Energy harvesting technologies*. Springer, 2009.
4. Wang Z.L., Wu W. Nanotechnology for energy harvesting in self-powered microsystems. *Angewandte Chemie International Edition*. 2012.
5. Yang Y., Qi J., Liao C. Flexible piezoelectric devices for self-powered sensors. *Advanced Materials*. 2018.
6. Bowen C.R., Kim H.A., Weaver P.M. Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications. *Energy & Environmental Science*. 2014.
7. Muralet P. PZT thin films for microsensors and actuators: Where do we stand? *Journal of Electroceramics*. 2008;(21):177–192.
8. Artamonov D.V., Baranov V.A., Pecherskaya E.A., Tsybin B.V., Fimin A.V., Pushkareva A.V. Application of a hyper-complex impedance model for indirect measurements of materials parameters of functional electronics. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*. Altay, 2019:760–764.
9. Pecherskaja E.A. Mathematical models of the subject area in the study of the parameters of nano- and micro-electronics materials. *Universitetskoe obrazovanie: sb. st. XV Mezhdunar. nauch.-metod. konf., posvyasch. 50-letiju poleta pervogo kosmonavta JU. A. Gagarina = University education : collection of art. XV International scientific method. conf., dedication. The 50th anniversary of the flight of the first cosmonaut Yuri Gagarin*. Penza, 2011:436–438. (In Russ.)
10. Zinchenko T.O. Hardware for the information, measurement and control system for the synthesis of transparent conductive oxides. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki = News of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences*. 2023;(2):83–89. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-6
11. Zinchenko T.O., Pecherskaja E.A., Kondrashin V.I., Antipenko V.V., Melnikov O.A., Karpanin O.V. 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.)
12. Pecherskaja E.A. Metrological aspects of research of active dielectrics for micro- and nanoindustry. *Nano- i mikro-sistemnaja tehnika = Nano- and microsystem engineering*. 2007;(7):41–44. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 30.04.2025

Принята к публикации / Accepted 21.05.2025