

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ ЧЕТЫРЕХЗОНДОВЫМ МЕТОДОМ

Т. О. Зинченко¹, Е. А. Печерская², Д. В. Якушов³, Г. В. Козлов⁴, В. С. Александров⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹scar0243@gmail.com, ²pea1@list.ru, ³vsalexrus@gmail.com, ⁴gvk17@yandex.ru, ⁵hammer.fate@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Прозрачные проводящие оксиды, такие как оксид индия-олова (ITO) и оксид алюминия-цинка (AZO), находят применение в различных областях электроники, включая солнечные элементы, дисплеи и сенсоры. Точное измерение их поверхностного сопротивления критически важно для оценки качества и производительности таких материалов. Однако существующие методы измерения имеют ограничения по точности. Цель работы заключается в разработке и исследовании средства измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов с помощью четырехзондового метода. Прибор должен обеспечивать высокую точность измерений, гибкость в настройке конфигурации зондов и быть интегрированным с компьютером для автоматизации процесса измерений и сбора данных. *Материалы и методы.* При разработке прибора и способа его коммутации с объектом исследований использованы платиновые зонды, регулируемые микроприводы для настройки положения зондов, стабилизированный источник постоянного тока и высокочувствительные усилители. Используемая конфигурация зондов имеет треугольное расположение, которое может быть адаптировано для различных типов образцов. Для калибровки прибора предусмотрено использование эталонных образцов. Программная часть включает микроконтроллер STM32 и интерфейс, реализованный на Python. *Результаты.* Устройство показало высокую точность измерений ($\pm 1\%$) в диапазоне от 10 Ом/□ до 10 кОм/□ и успешно протестировано на образцах ITO и AZO. Применение треугольной конфигурации зондов позволило точно измерять сопротивление на неоднородных материалах. Программное обеспечение предоставляет удобный интерфейс для визуализации и анализа данных. *Выводы.* Разработанное устройство отвечает заявленным требованиям и может быть использовано для контроля качества прозрачных проводящих оксидов в различных областях, требующих точных измерений поверхностного сопротивления. Программная часть устройства позволяет легко интегрировать его в рабочие процессы, автоматизируя сбор и обработку данных. В перспективе возможна доработка устройства для повышения удобства использования и расширения функциональности.

Ключевые слова: прозрачные проводящие оксиды, поверхностное сопротивление, четырехзондовый метод, микроконтроллер, программное обеспечение, калибровка, измерение сопротивления, USB-интерфейс

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., Печерская Е. А., Якушов Д. В., Козлов Г. В., Александров В. С. Прибор для измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов четырехзондовым методом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 91–96. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-11

A DEVICE FOR MEASURING THE SURFACE RESISTANCE OF TRANSPARENT CONDUCTIVE OXIDES BY THE FOUR-PROBE METHOD

T.O. Zinchenko¹, E.A. Pecherskaya², D.V. Yakushov³, G.V. Kozlov⁴, V.S. Aleksandrov⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

¹scar0243@gmail.com, ²pea1@list.ru, ³vsalexrus@gmail.com, ⁴gvk17@yandex.ru, ⁵hammer.fate@yandex.ru

Abstract. *Background.* Transparent conducting oxides, such as indium tin oxide (ITO) and aluminum-doped zinc oxide (AZO), are essential materials for various electronic applications, including solar cells, displays, and sensors. Accurate measurement of their surface resistance is critical for evaluating the quality and performance of such materials. However, existing measurement methods have limitations in terms of accuracy and versatility. The four-probe method, known

for its high precision, is an effective approach for these measurements. The objectives of this study are to develop and investigate a device for measuring the surface resistance of TCOs using the four-probe method. The device must provide high measurement accuracy, flexibility in probe configuration adjustments, and integration with a PC to automate the measurement process and data collection. *Materials and Methods.* The device was developed using platinum probes, adjustable micro-drives for probe positioning, a stabilized DC power source, and high-sensitivity amplifiers. The probe configuration uses a triangular arrangement, which can be adapted for various types of samples. Calibration was performed using reference samples, and measurement accuracy was verified on real materials. The software includes an STM32 microcontroller and a PC interface implemented in Python. *Results.* The device demonstrated high measurement accuracy ($\pm 1\%$) within the range of $10 \Omega/\square$ to $10 \text{ k}\Omega/\square$ and was successfully tested on ITO and AZO samples. The triangular probe configuration enabled precise resistance measurements on non-uniform materials. The software provides a user-friendly interface for data visualization and analysis. *Conclusions.* The developed device meets the stated requirements and can be used for quality control of TCOs in various applications requiring precise surface resistance measurements. The software component facilitates seamless integration into workflows, automating data collection and processing. Future improvements may include enhancing user convenience and expanding device functionality.

Keywords: transparent conducting oxides, surface resistance, four-probe method, microcontroller, software, calibration, resistance measurement, USB interface

Financing: the work was supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «Synthesis and research of promising nanomaterials, coatings and electronics devices» (№ 124041700069-0).

For citation: Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Yakushov D.V., Kozlov G.V., Alexandrov V.S. A device for measuring the surface resistance of transparent conductive oxides by the four-probe method. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):91–96. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-11

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО), такие как *ITO* (оксид индия-олова) и *AZO* (оксид алюминия-цинка), находят широкое применение в производстве солнечных элементов, сенсоров, дисплеев и других электронных компонентов [1, 2]. Эти материалы обладают сочетанием высокой проводимости и прозрачности, что делает их незаменимыми для технологии экранов и солнечных панелей. Одним из важных параметров, определяющих качество прозрачных проводящих оксидов, является их поверхностное сопротивление, которое должно быть низким и равномерным по всей поверхности материала [3–5]. Для точного измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов часто используется четырехзондовый метод. Этот метод исключает влияние контактного сопротивления и позволяет измерять сопротивление материала на его поверхности [3]. Однако существующие устройства для таких измерений имеют ограничения, связанные с точностью, гибкостью настройки и сложностью использования. В этой статье представлено устройство для измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов, которое обладает высокой точностью, компактностью и возможностью настройки параметров в зависимости от типа исследуемого материала. Целью работы является разработка устройства для измерения поверхностного сопротивления с использованием четырехзондового метода, а также интеграция его с ПК для удобства управления и анализа данных.

Материалы и методы

Проектирование средства измерения поверхностного сопротивления ППО базируется на принципах высокой точности, гибкости конфигурации и простоты использования. Для этого был выбран четырехзондовый метод, который позволяет устранить влияние контактного сопротивления и измерять сопротивление материала в зависимости от его геометрии.

Основные задачи при разработке устройства включали:

- обеспечение точности измерений с минимальными погрешностями;
- создание устройства, которое может работать с различными конфигурациями зондов (треугольной, квадратной и линейной);
- интеграцию устройства с персональным компьютером для удобства управления и анализа данных.

Конструкция устройства

Корпус устройства выполнен из металла с экраном, что обеспечивает защиту от внешних электромагнитных помех. Платформа для размещения образца изготовлена из прозрачного

стекла, что позволяет визуально контролировать его положение и фиксацию. Направляющие для зондов оснащены регулируемыми микроприводами, которые позволяют точно настраивать расстояние между зондами и их расположение в зависимости от формы образца.

Зонды изготовлены из платины, что снижает контактное сопротивление и повышает точность измерений. Основная конфигурация зондов – треугольная схема, которая помогает учитывать неоднородности материала и градиенты сопротивления. Возможность регулировки расположения зондов позволяет использовать и другие конфигурации, такие как квадратная или линейная, для работы с различными типами образцов.

Электронная часть включает следующие основные элементы:

1) источник постоянного тока: стабилизированный источник тока обеспечивает подачу тока между зондами. Диапазон регулировки тока позволяет подбирать оптимальные условия для измерений;

2) высокочувствительные усилители: усилители с низким уровнем шума (например, ОРА227) используются для точного измерения напряжения на зондами;

3) АЦП (16 бит): используется для высокоточного считывания сигналов с зондов и передачи данных на микроконтроллер;

4) микроконтроллер STM32: управляет процессом измерений, регулирует подачу тока и положение зондов, а также обрабатывает данные с АЦП.

Структура средства измерения поверхностного сопротивления

Укрупненная структурная схема средства измерения поверхностного сопротивления посредством четырехзондового метода представлена на рис. 1.

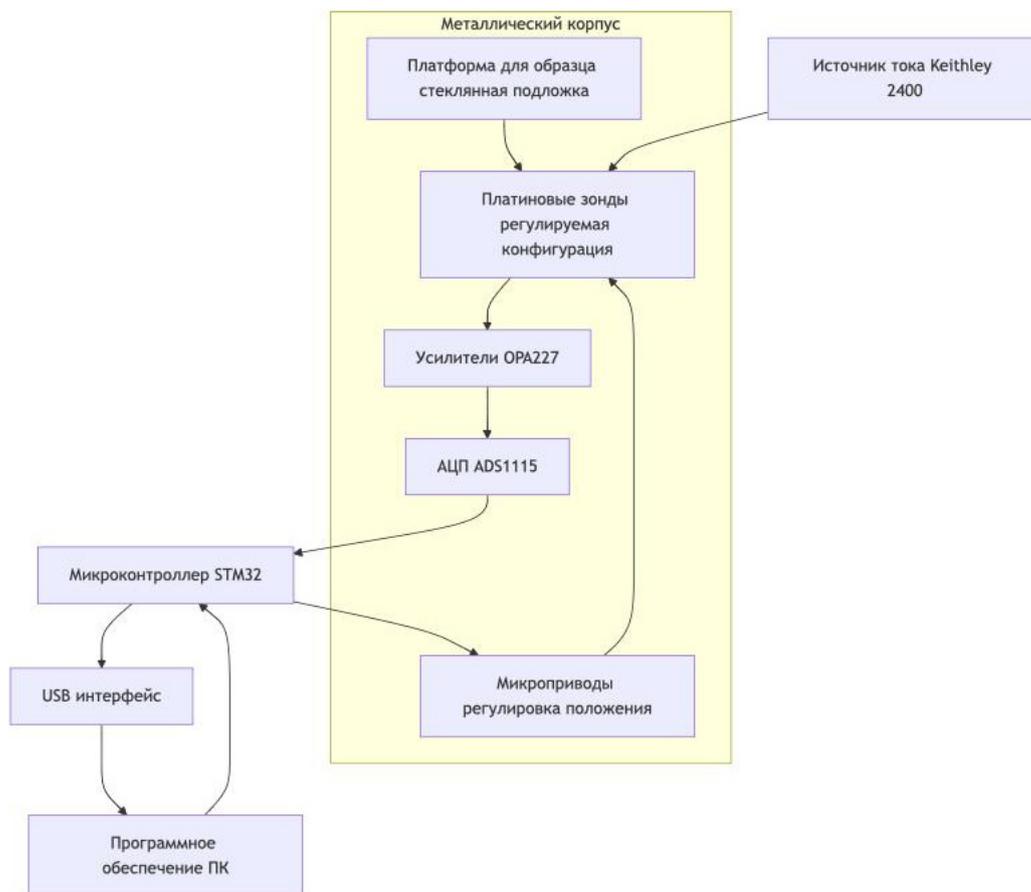


Рис. 1. Структурная схема разработанного средства измерения поверхностного сопротивления посредством четырехзондового метода

Программное обеспечение базируется на использовании микроконтроллера, который отвечает за управление процессом измерений, включая регулировку тока и положения зондов, а также сбор данных.

Интерфейс для персонального компьютера представляет собой приложение, написанное на Python, отображает результаты измерений в реальном времени и позволяет сохранять данные для дальнейшего анализа. Интерфейс включает функции калибровки устройства и адаптации к различным образцам [3].

Методы измерений и калибровки

Используемый четырехзондовый метод позволяет исключить влияние контактного сопротивления. Для этого ток подается через два внешних зонда, а напряжение измеряется между двумя внутренними¹ [6, 7]. Сопротивление вычисляется по закону Ома с учетом геометрического коэффициента, зависящего от конфигурации зондов. Калибровка устройства проводится с использованием эталонных образцов с известным сопротивлением, а также с учетом поправок на контактное сопротивление [8].

Разработанное средство измерений имеет следующие технические и метрологические характеристики:

- диапазон измерений: от 10 Ом/□ до 10 кОм/□;
- относительная основная погрешность измерения поверхностного сопротивления не более ± 1 %;
- габаритные размеры: 200×150×100 мм.

Калибровка средства измерений на основе использования эталонных образцов показала соответствие требуемым метрологическим характеристикам, результаты калибровки сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты калибровки прибора с помощью эталонных образцов

Номер образца	Эталонное сопротивление, Ом/□	Измеренное значение, Ом/□	Относительная погрешность, %
1	50	49,8	0,4
2	500	499,6	0,08
3	1000	998,9	0,11

Прибор апробирован посредством измерений поверхностного сопротивления образцов *ITO* и *AZO*, что подтвердило его метрологические характеристики и пригодность к работе с материалами, имеющими разные свойства:

- *ITO*: поверхностное сопротивление варьировалось от 15 до 50 Ом/□. Измерения показали отличное согласование с данными производителя;
- *AZO*: сопротивление варьировалось от 1000 до 5000 Ом/□, что позволило выявить неоднородности на поверхности материала.

Треугольная конфигурация зондов подтвердила свою эффективность в работе с неоднородными образцами. Например, для тонкопленочных покрытий *AZO* она позволила точно выявить изменения сопротивления, связанные с изменением толщины слоя.

Программное обеспечение осуществляет управление процессом измерений, выполняет обработку экспериментальных данных, позволяет осуществлять построение графиков изменения сопротивления по площади исследуемого образца, а также в зависимости от других влияющих факторов.

Заключение

Разработанное средство измерения поверхностного сопротивления прозрачных проводящих оксидов на основе четырехзондового метода обеспечивает высокую точность измерений (относительная погрешность не превышает ± 1 %), гибкость в настройке конфигурации зондов и удобство в использовании благодаря интеграции с персональным компьютером. Полученные результаты подтверждают его эффективность для использования в научных и промышленных приложениях, связанных с исследованием и контролем качества материалов. В перспективе предполагается дальнейшее совершенствование устройства, включая расширение функциональных возможностей и улучшение интерфейса.

¹ ГОСТ Р 53134–2008. Электрические и магнитные измерения. Методы измерения сопротивления проводников, обладающих высокой электропроводностью.

Список литературы

1. Пандей С. С. Transparent Conducting Oxides // *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2003. Т. 39, № 1. С. 1–40.
2. 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. Пенза, 2018. С. 256–258.
3. Пимента А. Д. Р., Ли Ж. М., Кардозо П. Ж. [и др.]. Four-Point Probe Measurement of Surface Resistivity of Transparent Conductive Oxides // *Journal of Applied Physics*. 2014. Т. 116, № 23. С. 233703.
4. Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В. [и др.]. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2019. Т. 24, № 4. С. 363–369.
5. Raksha S. V., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O. Functional materials for dye-sensitized solar cells // *Журнал нано- и электронной физики*. 2015. Т. 7, № 4. С. 04062.
6. Лю Б. В., Джонсон Х. Ж., Мартин К. Л. [и др.]. Design and Development of a Precision Measurement System for Surface Resistance // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2016. Т. 65, № 10. С. 2621–2628.
7. Мак Криери Р. Л. *Electrochemical Techniques in Surface Analysis*. Springer, 2019. 285 с.
8. Artamonov D.V., Baranov V.A., Pecherskaya E.A. [et al.]. 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.

References

1. Pandey S.S. Transparent Conducting Oxides. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2003;39(1):1–40.
2. 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 of the Russian Academy of Sciences. inter-university. scientific.-practical conference*. Penza, 2018:256–258. (In Russ.)
3. Pimenta A.D. R., Li Zh.M., Kardozo P.Zh. et al. Four-Point Probe Measurement of Surface Resistivity of Transparent Conductive Oxides. *Journal of Applied Physics*. 2014;116(23):233703.
4. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Karpanin O.V. et al. Investigation of the influence of technological parameters of the microarc oxidation process on the properties of oxide coatings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika = Proceedings of higher educational institutions. Electronics*. 2019;24(4):363–369. (In Russ.)
5. Raksha S.V., Kondrashin V.I., Pecherskaya E.A., Nikolaev K.O. Functional materials for dye-sensitized solar cells. *Zhurnal nano- i elektronnoy fiziki = Journal of nano- and electronic physics*. 2015;7(4):04062.
6. Lyu B.V., Dzhonson Kh.Zh., Martin K.L. et al. Design and Development of a Precision Measurement System for Surface Resistance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2016;65(10):2621–2628.
7. Mak Krieri R.L. *Electrochemical Techniques in Surface Analysis*. Springer, 2019:285.
8. Artamonov D.V., Baranov V.A., Pecherskaya E.A. et al. 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.

Информация об авторах / Information about the authors**Тимур Олегович Зинченко**

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department of information
measuring technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, профессор,
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, professor,
head of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Викторович Якушов

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

Dmitry V. Yakushov

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

Геннадий Васильевич Козлов

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gvkl7@yandex.ru

Gennady V. Kozlov

Doctor of technical sciences, professor,
director of the Polytechnic Institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владимир Сергеевич Александров

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

Vladimir S. Aleksandrov

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 20.02.2025

Поступила после рецензирования/Revised 18.03.2025

Принята к публикации/Accepted 14.04.2025