

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 620.1.08

doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-5

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Е. А. Печерская¹, О. В. Карпанин², Д. Е. Тузова³,
М. А. Нелюцков⁴, А. А. Данилов⁵, Д. В. Артамонов⁶

^{1,2,3,4,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

⁵ Пензенский центр стандартизации, метрологии и сертификации, Пенза, Россия

¹ iit@pnzgu.ru, ² karpanino@mail.ru, ³ diana.tuzova.02@bk.ru,

⁴ nelyuckovmihail@mail.ru, ⁵ aa-dan@mail.ru, ⁶ dmitrartamon@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Структуры на основе полупроводниковых материалов находят широкое применение в устройствах нано- и микроэлектроники. Одно из перспективных направлений связано с получением и исследованием прозрачных проводящих пленок и структур на их основе. Целью данного исследования является разработка автоматизированной информационно-измерительной системы для измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур. *Материалы и методы.* Информационно-измерительная система предназначена для исследования вольт-амперных характеристик различных полупроводниковых структур, в том числе прозрачных проводящих покрытий, полученных методом спрей-пиролиза на стеклянных подложках. *Результаты.* Представлена структура измерительного блока автоматизированной информационно-измерительной системы, в состав которой входят каналы измерения напряжения и силы тока на исследуемой структуре, а также термокамера, что позволяет исследовать температурные зависимости электрических параметров полупроводниковых компонентов. *Выводы.* Изложена методология измерений вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур, которая апробирована при исследовании прозрачных проводящих покрытий, синтезированных на основе спрей-пиролиза. Автоматизация измерительных процедур позволила достичь снижения временных затрат на измерительный процесс и исключения субъективных составляющих погрешностей измерений.

Ключевые слова: автоматизированные измерения, информационно-измерительная система, вольт-амперная характеристика, полупроводник

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

Для цитирования: Печерская Е. А., Карпанин О. В., Тузова Д. Е., Нелюцков М. А., Данилов А. А., Артамонов Д. В. Автоматизированная информационно-измерительная система для измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 41–46. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-5

AUTOMATED INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR MEASUREMENT OF VOLTAGE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES

E.A. Pecherskaya¹, O.V. Karpanin², D.E. Tuzova³,
M.A. Nelyutskov⁴, A.A. Danilov⁵, D.V. Artamonov⁶

^{1,2,3,4,6} Penza State University, Penza, Russia

⁵ The State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing, Penza, Russia

¹ iit@pnzgu.ru, ² karpanino@mail.ru, ³ diana.tuzova.02@bk.ru,

⁴ nelyutkovmihail@mail.ru, ⁵ aa-dan@mail.ru, ⁶ dmitrartamon@yandex.ru

Abstract. *Background.* Structures based on semiconductor materials are widely used in nano- and microelectronics devices. One of the promising directions is related to the production and research of transparent conductive films and structures based on them. The purpose of this study is to develop an automated information and measurement system for measuring the volt-ampere characteristics of semiconductor structures. *Materials and methods.* The information and measurement system is designed to study the volt-ampere characteristics of various semiconductor structures, including transparent conductive coatings obtained by spray pyrolysis on glass substrates. *Results.* The structure of the measuring unit of an automated information and measurement system is presented, which includes voltage and current measurement channels on the structure under study, as well as a thermal chamber, which allows us to study the temperature dependences of the electrical parameters of semiconductor components. *Conclusions.* A methodology for measuring the volt-ampere characteristics of semiconductor structures is described, which has been tested in the study of transparent conductive coatings synthesized on the basis of spray pyrolysis. Automation of measurement procedures has made it possible to reduce the time spent on the measuring process and eliminate the subjective components of measurement errors.

Keywords: automated measurements, information-measuring system, current-voltage characteristics, semiconductor

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

For citation: Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Tuzova D.E., Nelyutskov M.A., Danilov A.A., Artamonov D.V. Automated information-measuring system for measurement of voltage characteristics of semiconductor structures. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):41–46. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-5

Введение

Актуальность измерения электрофизических параметров полупроводниковых структур обусловлена их широким применением во многих областях промышленности, в частности, электронике и приборостроении. Из рассматриваемых структур производят различные компоненты и изделия. Например, с помощью полупроводников изготавливаются светоизлучающие устройства, тонкопленочные транзисторы и сверхбыстрые фотодетекторы, быстродействующие диоды [1]. На основе пористых полупроводниковых структур, обладающих прочностью, химической инертностью ко многим веществам и большим сроком службы, создают газовые сенсоры [2].

Особую популярность полупроводниковые структуры находят в оптоэлектронике. Работа [3] посвящена созданию мощных и долговечных суперлюминесцентных диодов на основе самоорганизующихся полупроводниковых наноструктур. Они способствуют улучшению контроля размера, длины волны и плотности излучения оптоэлектронных устройств. В статье [4] описана работа оптоэлектронных детекторов, изготовленных из полупроводниковых структур, которые отвечают современным требованиям, предъявляемым к данным устройствам, а именно: время жизни и подвижность электронов, удельное сопротивление.

Полупроводники на основе арсенида галлия применяются для работы на высоких частотах. Именно из них был изготовлен новый модуль питания, обладающий высокой надежностью [5]. Бесперебойный блок питания, разработанный на основе полупроводников, имеет высокую надежность и эффективность работы [6].

Методом спрей-пиролиза возможно получение прозрачных проводящих полупроводниковых пленок на основе различных легированных оксидов, например, оксида цинка, легированного алюминием; диоксида олова, легированного сурьмой и других материалов [7–11].

Таким образом, с развитием промышленности пришла необходимость в поиске новых полупроводниковых структур, обладающих высокой производительностью и экономической

эффективностью. Для этого нужно использовать новые методы и средства для исследований полупроводниковых структур, которые в совокупности смогут обеспечить высокую надежность и точность измерений их электрофизических параметров. Экспериментальные исследования позволят учитывать сложную природу связей полупроводниковых структур, делать прогноз и анализ их свойств, предлагать новые инженерные решения, что играет важную роль в развитии современных технологий в науке.

Средство измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур

В качестве средства для измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур авторами предложена автоматизированная информационно-измерительная система. Аппаратная часть данной системы состоит из персонального компьютера и измерительного блока (рис. 1).

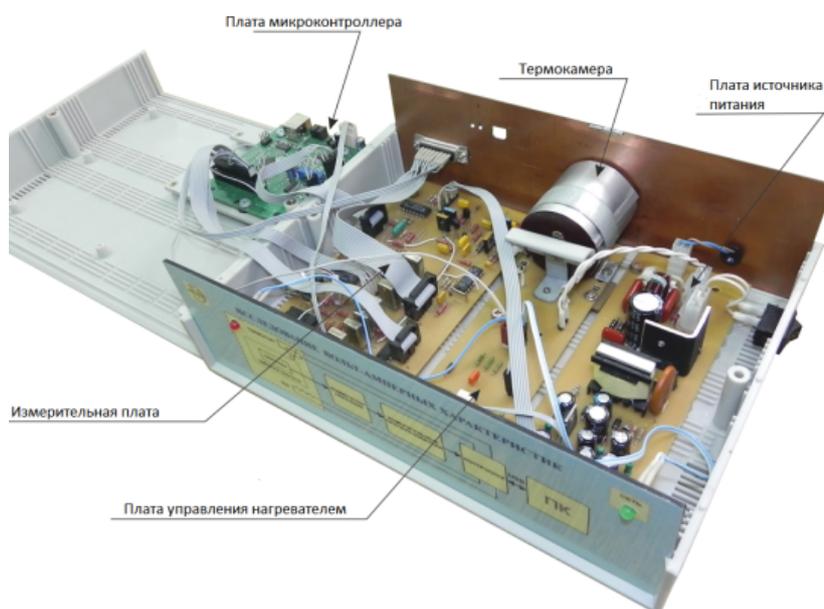


Рис. 1. Измерительный блок автоматизированной информационно-измерительной системы [7]

Измерительный блок автоматизированной информационно-измерительной системы отвечает за сбор информации о электрофизических параметрах полупроводниковых исследуемых образцов. Для удобства и простоты проведения эксперимента образцы представлены в виде сменных кассет, которые помещают в термокамеру, которая контролирует и поддерживает определенную температуру во время измерения. Помимо термокамеры в состав измерительного блока входит масштабирующий преобразователь, который служит для приведения полученного значения напряжения исследуемого образца к входной величине напряжения цифроаналогового преобразователя; микроконтроллер, подключаемый к измерительным образцам и персональному компьютеру; источник управляемого тока и напряжения, служащий для формирования нужной величины тока или напряжения на исследуемом полупроводниковом образце.

Персональный компьютер обеспечивает управление измерительным блоком, анализ и обработку полученной информации с помощью специального программного обеспечения, которое способно представить измеренные данные в графическом и табличном представлении. На рис. 2 изображено рабочее окно рабочей программы.

Основные метрологические и технические характеристики автоматизированной информационно-измерительной системы для исследования вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур следующие [11]:

- измеряемый диапазон напряжения на исследуемом образце от -100 В до $+100$ В;
- измеряемый диапазон тока на исследуемом образце от 50 нА до 50 мА;
- максимальная температура в термокамере до 120 °С;
- относительная погрешность измерения тока и напряжения не более $0,5$ %;
- абсолютное значение погрешности измерения термокамеры не более 1 °С;
- время измерения вольт-амперной характеристики не более 2 с.

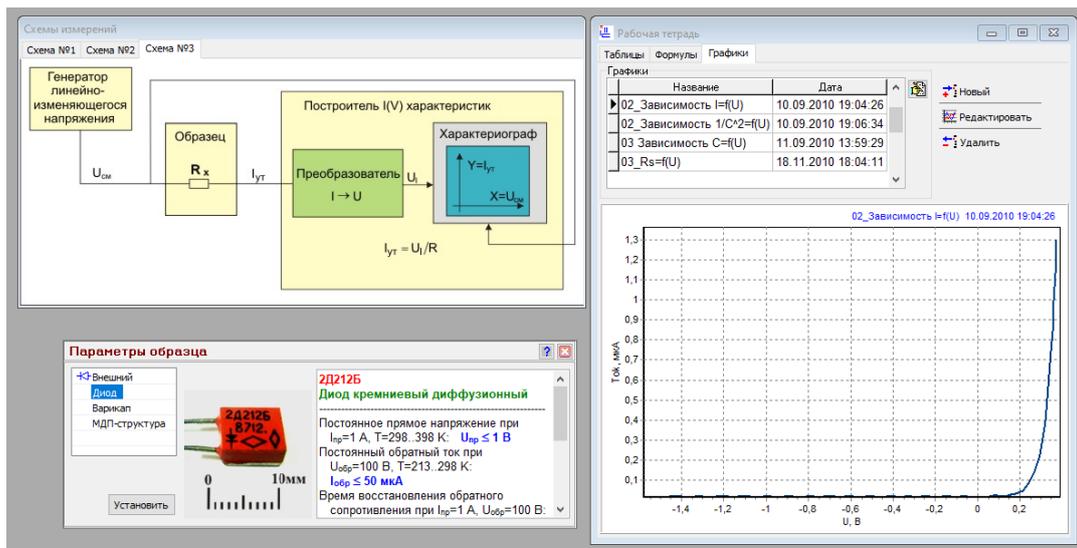


Рис. 2. Рабочее окно программы

Заключение

Рассмотренная автоматизированная информационно-измерительная система позволяет не только выполнять измерения параметров полупроводниковых образцов косвенным методом, но и производить их обработку. За счет автоматизации измерений наблюдается уменьшение временных затрат на измерительный процесс и исключаются субъективные погрешности измерений.

Изложенная методология измерений вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур апробирована при исследовании прозрачных проводящих покрытий, полученных методом спрей-пиролиза. Автоматизированная информационно-измерительная система позволяет выполнять контроль качества технологического процесса синтеза прозрачных проводящих покрытий; экспериментально исследовать новые полупроводниковые структуры, в состав которых входят прозрачные проводящие слои; совершенствовать технологии для разработки инновационных полупроводниковых устройств; оптимизировать работу полупроводниковых приборов с учетом влияющих факторов (температуры, напряжения и др.).

Предложенная информационно-измерительная система использована для исследований вольт-амперных характеристик прозрачных проводящих оксидов, синтезированных методом спрей-пиролиза, а также структур металл-диэлектрик-полупроводник на их основе.

Список литературы

1. Forrest S. R. Active optoelectronics using thin-film organic semiconductors // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2000. Vol. 6, iss. 6. P. 1072–1083. doi: 10.1109/2944.902156
2. Сычакова А. Я. Применение пористых полупроводников в качестве материала для изготовления газовых сенсоров // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2014. № 1 (5). С. 169–171.
3. Fangling Du, Anjin Liu, Hailing Wang. Unstable Semiconductor Laser Based on Surface High-Order Bragg Gratings With 62×50 GHz Wavelength Tuning // IEEE Photonics Technology Letters. 2022. Vol. 34, iss. 19. P. 1019–1022. doi: 10.1109/LPT.2022.3198671
4. Xu B., Key Z. G., Wang Y. H. Controlled growth of III-V compound semiconductor nano-structures and their application in quantum-devices // 13th International Conference on Semiconducting and Insulating Materials. 2004. doi: 10.1109/SIM.2005.1511398;
5. Anderson S., Berringer K., Romero G. Advanced power module using GaAs semiconductors, metal matrix composite packaging material, and low inductance design // Proceedings of the 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics. 2002. doi: 10.1109/ISPSD.1994.583629
6. Zhang J., Zhou J., Wang Yu. A 2.2kV Organic Semiconductor-Based Lateral Power Device // IEEE Electron Device Letters. 2022. Vol. 43, iss. 2. P. 276–279. doi: 10.1109/LED.2021.3135699
7. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Golubkov P. E. [et al.]. Investigation of the properties of transparent conductive oxides produced by aerosol pyrolysis // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. T. 16, № 6. С. 1315–1321.

8. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Novichkov M. D. [et al.]. Synthesis of thin-film structures of tungsten oxide by the spray-pyrolysis method // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2023. Т. 16, № S3.1. P. 402–407.
9. 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.
10. Ракша С. В., Кондрашин В. И., Печерская Е. А., Николаев К. О. Функциональные материалы для сенсibilизированных красителем солнечных элементов // *Физика и технология наноматериалов и структур* : сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2015. С. 143–146.
11. Метальников А. М., Карпанин О. В., Чайкин М. С. Аппаратное и программное обеспечение автоматизированной обучающей системы для исследования вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов // *Молодой ученый*. 2019. № 50. С. 118–121.

References

1. Forrest S.R. Active optoelectronics using thin-film organic semiconductors. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2000;6(6):1072–1083. doi: 10.1109/2944.902156
2. Sychakova A.Ya. The use of porous semiconductors as a material for the manufacture of gas sensors. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoy oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy = Modern technologies for ensuring civil defense and eliminating the consequences of emergency situations*. 2014;(1):169–171. (In Russ.)
3. Fangling Du, Anjin Liu, Hailing Wang. Unable Semiconductor Laser Based on Surface High-Order Bragg Gratings With 62×50 GHz Wavelength Tuning. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2022;34(19):1019–1022. doi: 10.1109/LPT.2022.3198671
4. Xu B., Key Z.G., Wang Y.H. Controlled growth of III-V compound semiconductor nano-structures and their application in quantum-devices. *13th International Conference on Semiconducting and Insulating Materials*. 2004. doi: 10.1109/SIM.2005.1511398;
5. Anderson S., Berringer K., Romero G. Advanced power module using GaAs semiconductors, metal matrix composite packaging material, and low inductance design. *Proceedings of the 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics*. 2002. doi: 10.1109/ISPSD.1994.583629
6. Zhang J., Zhou J., Wang Yu. A 2.2kV Organic Semiconductor-Based Lateral Power Device. *IEEE Electron Device Letters*. 2022;43(2):276–279. doi: 10.1109/LED.2021.3135699
7. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E. et al. Investigation of the properties of transparent conductive oxides produced by aerosol pyrolysis. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022;16(6):1315–1321.
8. Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Novichkov M.D. et al. Synthesis of thin-film structures of tungsten oxide by the spray-pyrolysis method. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2023;16(S3.1):402–407.
9. 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 All Russia. inter-university. scientific.-practical conf.* Penza, 2018:256–258. (In Russ.)
10. Raksha S.V., Kondrashin V.I., Pecherskaya E.A., Nikolaev K.O. Functional materials for dye-sensitized solar cells. *Fizika i tekhnologiya nanomaterialov i struktur: sb. nauch. st. 2-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Physics and technology of nanomaterials and structures : collection of scientific articles of the 2nd International scientific and practical conference*. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2015:143–146. (In Russ.)
11. Metal'nikov A.M., Karpanin O.V., Chaykin M.S. Hardware and software of an automated training system for the study of volt-ampere characteristics of semiconductor devices. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2019;(50):118–121. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Анатольевна Печерская
 доктор технических наук, профессор,
 заведующий кафедры информационно-
 измерительной техники и метрологии,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: iit@pnzgu.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)

Олег Валентинович Карпанин

заведующий службой калибровки и ремонта,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: karpanino@mail.ru

Диана Евгеньевна Тузова

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: diana.tuzova.02@bk.ru

Михаил Александрович Нелюцков

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nelyuckovmihail@mail.ru

Александр Александрович Данилов

доктор технических наук, профессор,
директор,
Пензенский центр стандартизации,
метрологии и сертификации
(Россия, г. Пенза, ул. Комсомольская, 20)
E-mail: aa-dan@mail.ru

Дмитрий Владимирович Артамонов

доктор технических наук, профессор,
первый проректор,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dmitrartamon@yandex.ru

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2024

Поступила после рецензирования/Revised 22.07.2024

Принята к публикации/Accepted 05.08.2024

Oleg V. Karpanin

Head of calibration and repair service,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Diana E. Tuzova

Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Mikhail A. Nelyutskov

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

Aleksandr A. Danilov

Doctor of technical sciences, professor,
director,
The State Regional Center for Standardization,
Metrology and Testing
(20 Komsomolskaya street, Penza, Russia)

Dmitry V. Artamonov

Doctor of technical sciences, professor,
first vice-rector,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)