

УДК 620.1.08  
doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-14

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Е. А. Печерская<sup>1</sup>, О. В. Карпанин<sup>2</sup>, Д. Е. Нелюцкова<sup>3</sup>,  
А. М. Метальников<sup>4</sup>, У. С. Чихрина<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>2</sup> karpanino@mail.ru, <sup>3</sup> diana.tuzova.02@bk.ru, <sup>4</sup> metalnikovam@gmail.com, <sup>5</sup> chikhulyana@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В настоящее время полупроводниковые структуры и приборы применяются во многих отраслях, в частности, электронике, телекоммуникациях, приборостроении. Рассматривается способ экспериментального определения их параметров посредством измерения вольт-амперных характеристик полупроводников с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы. Цель работы – исследование электрофизических параметров полупроводниковых компонентов и описание методики измерений, положенной в основу измерительной системы. *Материалы и методы.* Автоматизированная информационно-измерительная система предназначена для исследования различных полупроводниковых компонентов и изделий, таких как интегральные схемы, микросхемы, диоды, транзисторы, солнечные элементы, стабилитроны, устройства с зарядовой связью, солнечные элементы. Все эти компоненты используются в электронике, машиностроении, оптоэлектронике и системах обработки сигналов. *Результаты.* Выполнено измерение вольт-амперной характеристики на примере полупроводникового компонента (диода 2Д212Б), осуществлен анализ полученных результатов, представленных в табличном и графическом виде. *Выводы.* Представлена структура автоматизированной информационно-измерительной системы, которая содержит измерительный блок и ЭВМ, осуществляющую управление измерениями и автоматизированную обработку результатов измерений с целью определения электрофизических параметров исследуемых структур по измеренной вольт-амперной характеристике.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система, автоматизация измерений, полупроводниковые компоненты, исследование диода, вольт-амперная характеристика

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

**Для цитирования:** Печерская Е. А., Карпанин О. В., Нелюцкова Д. Е., Метальников А. М., Чихрина У. С. Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур с помощью разработанной автоматизированной информационно-измерительной системы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 123–128. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-14

## INVESTIGATION OF THE VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES USING THE DEVELOPED AUTOMATED INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM

E.A. Pecherskaya<sup>1</sup>, O.V. Karpanin<sup>2</sup>, D.E. Nelyutskova<sup>3</sup>,  
A.M. Metalnikov<sup>4</sup>, U.S. Chikhrina<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>2</sup> karpanino@mail.ru, <sup>3</sup> diana.tuzova.02@bk.ru, <sup>4</sup> metalnikovam@gmail.com, <sup>5</sup> chikhulyana@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* Currently, semiconductor structures and devices are used in many industries, in particular electronics, telecommunications, and instrumentation. This article discusses a method for experimentally determining their parameters by measuring the volt-ampere characteristics of semiconductors using an automated information and measurement system. The purpose of the work is to study the electrophysical parameters of semiconductor components and describe the measurement technique used as the basis of the measuring system. *Materials and methods.* The automated information and measurement system is designed to study various semiconductor components and products, such as

integrated circuits, microcircuits, diodes, transistors, solar cells, zener diodes, charge-coupled devices, solar cells. All these components are used in electronics, mechanical engineering, optoelectronics and signal processing systems. *Results.* The volt-ampere characteristic was measured using the example of a semiconductor component (diode 2D212B), and the results obtained were analyzed, presented in tabular and graphical form. *Conclusions.* The structure of an automated information and measurement system is presented, which contains a measuring unit and a computer that controls measurements and automated processing of measurement results in order to determine the electrophysical parameters of the structures under study according to the measured volt-ampere characteristic.

**Keywords:** information and measurement system, measurement automation, semiconductor components, diode research, volt-ampere characteristic

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

**For citation:** Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Nelyutskova D.E., Metalnikov A.M., Chikhina U.S. Investigation of the volt-ampere characteristics of semiconductor structures using the developed automated information and measurement system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):123–128. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-14

### Введение

Такие кристаллические вещества, как полупроводники, обладающие уникальными свойствами, в современном мире играют важную роль в электронике и смежных с ней областях. Из-за возможности проявлять как проводниковые, так и диэлектрические свойства полупроводники применяются для изготовления различных компонентов, изделий и приборов. Например, на их основе производят транзисторы, диоды, интегральные микросхемы, солнечные батареи [1, 2].

Самыми распространенными полупроводниковыми веществами являются германий (Ge) и кремний (Si). Кремний из-за своей доступности и электрических свойств широко используют для изготовления солнечных батарей и всех элементов микроэлектроники [5, 6]. Германий, в свою очередь, также часто используется в функциональной электронике, в основном для производства детекторов. Помимо германия и кремния для изготовления полупроводниковой продукции используют такие материалы, как селен (Se) и теллур (Te), которые хорошо подходят для реализации фотодетекторов [3].

Оптические и электрические свойства полупроводниковых соединений (арсенида галлия (GaAs), фосфида галлия (GaP), арсенида индия (InAs)) позволяют использовать их в высокочастотных устройствах – сенсоров и усилителей. Карбид кремния (SiC), обладающий стойкостью при высоких температурах и устойчивостью к химическим воздействиям, нашел свое применение в высокотемпературных и высоковольтных приложениях [4].

Производство полупроводниковой продукции обязательно включает в себя процесс измерения параметров материалов, из которых она изготавливается, так как будущие свойства изделий из полупроводников будут напрямую определяться их характеристиками. Одной из важнейших характеристик всех полупроводников является зависимость тока, протекающего в исследуемом образце, от изменяющегося напряжения (вольт-амперная характеристика). Именно она содержит информацию о параметрах объекта измерения.

Измерение вольт-амперной характеристики возможно с помощью множества средств измерений, таких как различные параметрические тестеры и анализаторы, измерители R-C-L, программные комплексы [8, 9]. В данной работе показаны измерения вольт-амперной характеристики, осуществляемые с помощью разработанной авторами автоматизированной информационно-измерительной системы.

### Структура автоматизированной информационно-измерительной системы

В состав автоматизированной информационно-измерительной системы входит персональный компьютер и измерительный блок, к которому подключаются исследуемые образцы, а также специально разработанное программное обеспечение, осуществляющее анализ и обработку полученной информации. Для удобства данные об измерении могут быть представлены как в графическом, так и табличном представлении. Структура рассматриваемой системы представлена на рис. 1.

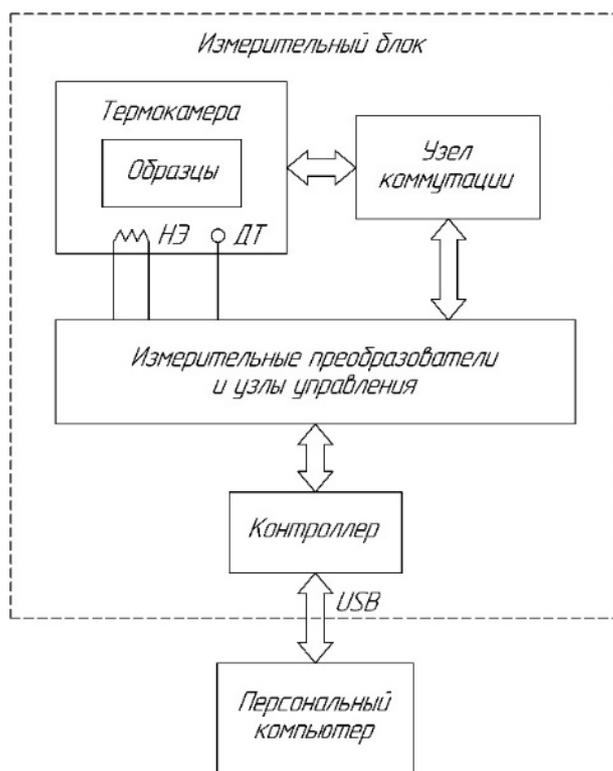


Рис. 1. Структура автоматизированной информационно-измерительной системы

Исследуемые образцы устанавливаются в термокамеру с нагревательным элементом. С помощью узла коммутации возможно переключение между несколькими исследуемыми объектами. Получение данных осуществляется измерительными преобразователями и узлами управления. Обработка информации производится контроллером и передается в персональный компьютер для дальнейшей работы [7].

#### **Исследование вольт-амперных характеристик диффузионного диода**

В качестве исследуемого образца в данной статье выступает кремниевый диффузионный диод 2Д212Б (рис. 2), обладающий следующими характеристиками:

- постоянное прямое напряжение при  $I_{пр} = 1 \text{ А}$ ,  $T = 298 \dots 398 \text{ К}$ :  $U_{пр}$  менее 1 В;
- постоянный обратный ток при  $U_{обр} = 100 \text{ В}$ ,  $T = 213 \dots 298 \text{ К}$ :  $I_{обр}$  менее 50 мкА;
- время восстановления обратного сопротивления при  $I_{пр} = 1 \text{ А}$ ,  $U_{обр} = 100 \text{ В}$ :  $t_v$  менее 300 нс;
- емкость диода при  $U_{обр} = 100 \text{ В}$ :  $C_{min}$  менее 40 пФ.

Диод 2Д212Б предназначен для преобразования переменного напряжения повышенной частоты в постоянное электрическое напряжение.

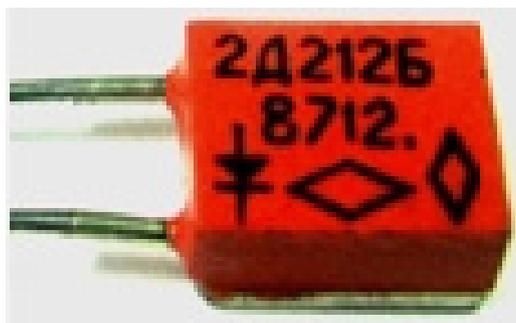


Рис. 2. Внешний вид диода 2Д212Б

В ходе исследования образца были получены результаты измерения напряжения и тока на исследуемом полупроводниковом диоде, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения напряжения и тока исследуемого полупроводникового диода

Напряжение на исследуемом образце $U$ , В	Протекающий через исследуемый образец электрический ток $I$ , мкА	Напряжение на исследуемом образце $U$ , В	Протекающий через исследуемый образец электрический ток $I$ , мкА
0,370	1,30	-1,018	0,02
0,366	1,13	-1,038	0,02
0,358	1,00	-1,059	0,02
0,352	0,84	-1,076	0,02
0,347	0,74	-1,097	0,02
0,338	0,62	-1,118	0,02
0,328	0,51	-1,139	0,02
0,318	0,40	-1,159	0,02
0,306	0,31	-1,181	0,02
0,293	0,23	-1,197	0,02
0,282	0,18	-1,218	0,02
0,266	0,13	-1,239	0,02
0,248	0,10	-1,259	0,02
0,230	0,07	-1,281	0,02
0,211	0,05	-1,302	0,02
0,191	0,04	-1,318	0,02
0,176	0,03	-1,339	0,02
0,155	0,02	-1,359	0,02
0,135	0,02	-1,381	0,02
0,114	0,02	-1,402	0,02
0,093	0,02	-1,423	0,02
0,072	0,02	-1,439	0,02
0,056	0,02	-1,460	0,02
0,035	0,02	-1,480	0,02

Графическое представление зависимости тока от напряжения, т.е. вольт-амперная характеристика диода, изображено на рис. 3.

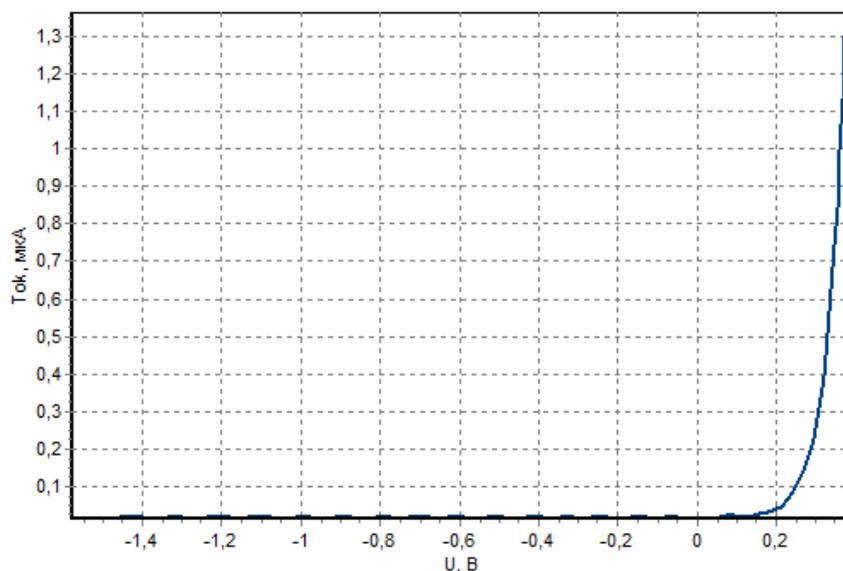


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика диода 2Д212Б

На основе вольт-амперной характеристики исследуемого объекта, в рассматриваемом примере диода 2Д212Б, можно найти другие его параметры косвенным методом измерения, а именно: проводимость, пороговое напряжение, электрическое сопротивление, температурную зависимость, границы насыщения и т.д.

Перспективным представляется применение предложенной автоматизированной информационно-измерительной системы для исследования вольт-амперных характеристик структур типа металл – диэлектрик – полупроводник (МДП-структур) [10, 11].

#### Заключение

Экспериментальное определение вольт-амперных характеристик целесообразно использовать для косвенного определения свойств исследуемых полупроводниковых структур. Предложена структура автоматизированной информационно-измерительной системы, содержащей измерительный блок и ЭВМ, которая посредством разработанного программного обеспечения осуществляет управление измерениями и автоматизированную обработку результатов измерений с целью определения электрофизических параметров исследуемых структур.

#### Список литературы

1. Rahman A. *A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors*. Bangladesh, Pabna : Pabna University of Science and Technology, 2014.
2. 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 (September 2004)*. 2004. doi: 10.1109/SIM.2005.1511398
3. Bronovets M. A., Volodin N. M., Mishin Yu. N. New materials in semiconductor tensometry // *Materials Letters*. 2022. Vol. 267. P. 127467
4. Anderson S., Berringer K., Romero G. [et al.]. 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*, August 2002. doi: 10.1109/ISPSD.1994.583629
5. 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. Т. 16. № 6. P. 1315–1321.
6. 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. Vol. 16, № S3.1. P. 402–407.
7. Метальников А. М., Карпанин О. В., Чайкин М. С. Аппаратное и программное обеспечение автоматизированной обучающей системы для исследования вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов // *Молодой ученый*. 2019. № 50. С. 118–121.
8. Савин М. Л., Гришко А. К., Зуев В. Д. [и др.]. Анализ отказов полевых транзисторов при контроле работоспособности устройства по косвенным параметрам // *Надежность и качество сложных систем*. 2022. № 1. С. 91–97. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-10
9. Юрков Н. К. Синтез оптимальной структуры технической системы на основе теории межмодельного взаимодействия // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2020. Т. 1. С. 12–17.
10. 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.
11. Печерская Е. А., Карпанин О. В., Нелюцкова Д. Е. [и др.]. Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур и приборов // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2024. № 3. С. 32–40. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-4

#### References

1. Rahman A. *A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors*. Bangladesh, Pabna: Pabna University of Science and Technology, 2014.
2. 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 (September 2004)*. 2004. doi: 10.1109/SIM.2005.1511398
3. Bronovets M.A., Volodin N.M., Mishin Yu.N. New materials in semiconductor tensometry. *Materials Letters*. 2022;267:127467.
4. Anderson S., Berringer K., Romero G. et al. 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*, August 2002. doi: 10.1109/ISPSD.1994.583629
5. 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.
6. 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.

7. Metal'nikov A.M., Karpanin O.V., Chaykin M.S. Hardware and software of an automated learning system for studying the voltage characteristics of semiconductor devices. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2019;(50):118–121. (In Russ.)
8. Savin M.L., Grishko A.K., Zuev V.D. et al. Analysis of failures of field-effect transistors when monitoring device operability by indirect parameters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):91–97. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-10
9. Yurkov N.K. Synthesis of the optimal structure of a technical system based on the theory of inter-model interaction. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:12–17. (In Russ.)
10. 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.)
11. Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Nelyutskova D.E. et al. Investigation of the volt-ampere characteristics of semiconductor structures and devices. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2024;(3):32–40. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-4

#### *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

##### **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)

##### **Диана Евгеньевна Нелюцкова**

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

##### **Diana E. Nelyutskova**

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

##### **Алексей Михайлович Метальников**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: metalnikovam@gmail.com

##### **Aleksey M. Metalnikov**

Candidate of technical sciences, senior researcher,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

##### **Ульяна Сергеевна Чихрина**

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

##### **Ulyana S. Chikhrina**

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 15.07.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 19.08.2024**

**Принята к публикации/Accepted 02.09.2024**