

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР И ПРИБОРОВ

Е. А. Печерская<sup>1</sup>, О. В. Карпанин<sup>2</sup>, Д. Е. Нелюцкова<sup>3</sup>,  
М. А. Нелюцков<sup>4</sup>, В. С. Александров<sup>5</sup>, А. Е. Журина<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</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> nelyuckovmihail@mail.ru, <sup>5</sup> vsalexrus@gmail.com, <sup>6</sup> gelya.zhurina@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объект исследования – автоматизированная измерительная система, предназначенная для измерения электрофизических параметров полупроводниковых структур и приборов. Предметом исследования являются вольт-амперные характеристики полупроводниковых структур и приборов. Цель работы – исследование вольт-амперных характеристик полупроводников на примере кремниевого транзистора КТ306А с помощью автоматизированной измерительной системы. *Материалы и методы.* Рассмотрена структура автоматизированной измерительной системы для исследования вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур и приборов. Апробированы принципы работы следующих методов измерения полупроводниковых характеристик: вольтметра-амперметра, емкостного делителя, мостового и резонансного. *Результаты.* Выполнено исследование вольт-амперной характеристики кремниевого транзистора КТ306А с помощью автоматизированной измерительной системы. Показана возможность использования предложенного средства измерений для исследования вольт-амперных характеристик МДП-структур (металл-диэлектрик-полупроводник) при использовании в качестве прозрачного проводящего оксида слоя диоксида олова, легированного сурьмой. *Выводы.* Рассмотрена структура автоматизированной измерительной системы для исследования вольт-амперных характеристик полупроводников. Представлены результаты апробации указанной системы при измерениях электрофизических параметров полупроводникового транзистора КТ306А, а также полученной авторами новой МДП-структуры на основе легированного сурьмой диоксида олова, синтезированного методом спрей-пиролиза.

**Ключевые слова:** автоматизированная измерительная система, полупроводниковые структуры и приборы, вольт-амперная характеристика, методы измерений электрофизические параметры полупроводников

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

**Для цитирования:** Печерская Е. А., Карпанин О. В., Нелюцкова Д. Е., Нелюцков М. А., Александров В. С., Журина А. Е. 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

## RESEARCH OF VOLTAMPER CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES AND DEVICES

Е.А. Pecherskaya<sup>1</sup>, О.В. Karpanin<sup>2</sup>, D.E. Nelyutskova<sup>3</sup>,  
M.A. Nelyutskov<sup>4</sup>, V.S. Aleksandrov<sup>5</sup>, A.E. Zhurina<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</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> nelyuckovmihail@mail.ru, <sup>5</sup> vsalexrus@gmail.com, <sup>6</sup> gelya.zhurina@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The object of study is an automated measuring system designed to measure the electrical parameters of semiconductor structures and devices. The subject of the study is the current-voltage characteristics of semiconductor structures and devices. The purpose of the work is to study the current-voltage characteristics of semiconductors using the example of a КТ306А silicon transistor using an automated measuring system. *Materials and methods.* The structure of an automated measuring system for studying the current-voltage characteristics of semiconductor structures and devices is considered. The operating principles of the following methods for measuring semiconductor characteristics have been tested: voltmeter-ammeter, capacitive divider, bridge and resonant. *Results.* The volt-ampere characteristic of the КТ306А silicon transistor was studied using an automated measuring system. The possibility of using the proposed

measuring instrument to study the volt–ampere characteristics of TIR structures (metal–dielectric–semiconductor) when using a layer of tin dioxide doped with antimony as a transparent conductive oxide is shown. *Conclusions.* The structure of an automated measuring system for studying the volt–ampere characteristics of semiconductors is considered. The results of the approbation of this system are presented when measuring the electrophysical parameters of the KT306A semiconductor transistor, as well as the new metal–dielectric–semiconductor structure obtained by the authors based on antimony-doped tin dioxide synthesized by spray pyrolysis.

**Keywords:** automated measuring system, semiconductor structures and devices, current-voltage characteristics, methods of measuring electrophysical parameters of semiconductors

**Financing:** the work was supported by the Russian Science Foundation, № 23-29-00343.

**For citation:** Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Nelyutskova D.E., Nelyutskov M.A., Aleksandrov V.S., Zhurina A.E. Research of voltampere characteristics of semiconductor structures and devices. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):32–40. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-4

### *Введение*

Актуальность исследования электрофизических параметров полупроводниковых структур и приборов в настоящее время возрастает в связи с их широким применением в элементах функциональной электроники. В микро- и нанoeлектронике полупроводники используются при создании микросхем, процессоров, сенсоров [1], а также применяются для изготовления импульсных источников энергии [2]. В основу практически всех приложений в электронике и оптоэлектронике входят полупроводниковые устройства, так как именно транзисторы с высокой подвижностью электронов, биполярные транзисторы с гетеропереходом и кремниевые интегральные схемы доминируют в электронной промышленности [3]. Формирование одномерных структур – полупроводниковых нанопроволок, которые используются для потенциального применения в оптоэлектронных устройствах, описано в работе [4]. В приборостроении полупроводниковые структуры применяются для создания различных приборов и сенсоров, таких как фотодиоды, лазеры, фоторезисторы и т.д.

Понимание и контроль электрофизических параметров полупроводников позволяет разрабатывать более эффективные и мощные устройства, а также повышать их производительность и надежность. Например, в работе [5] представлена подробная информация о влиянии температуры на энергетическую зону МОП-транзистора, что позволило сформировать изменение его параметров (плотность носителей, подвижность, диффузия носителей, насыщение по скорости, плотность тока, пороговое напряжение) для дальнейшего его применения в различных секторах современной электроники. Примером также может служить использование полупроводниковых материалов в солнечных батареях, где оптимизация длины волны поглощаемого света и эффективности преобразования энергии света может привести к разработке более эффективных и экономически выгодных солнечных панелей [6].

Таким образом, экспериментальные исследования параметров полупроводниковых приборов и структур могут привести к обнаружению новых и интересных направлений их использования. Это связано с тем, что полупроводниковые структуры и приборы имеют уникальные электрические и оптические свойства, которые могут быть оптимизированы и настроены путем контроля и изменения различных параметров, таких как примеси, размеры и форма структур, температура окружающей среды и др. Поэтому важно повышать точность измерений параметров полупроводниковых структур и приборов.

### *Материалы и методы*

В настоящее время широко применяются следующие методы измерения параметров полупроводниковых структур и приборов:

#### 1. Метод вольтметра-амперметра.

Данный метод измерений направлен на исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых структур и приборов: к измеряемому объекту (электродам полупроводника) подключают генераторы тока или напряжения, что позволяет изменять значение подаваемой величины (напряжения или тока). Далее с помощью измерительных устройств (вольтметра и амперметра) выполняют измерения значений токов и напряжения в цепях полупроводникового прибора при различных значениях управляющих источников. По полученным данным строится ВАХ исследуемого объекта, по которой косвенным методом измерения определяются параметры полупроводника [7].

### 2. Резонансный метод.

В состав колебательного контура, резонансную частоту которого нужно определить, включают два элемента – образцовый и измерительный. На первом этапе данного метода колебательный контур приводят в резонансное состояние, которое достигается изменением частоты при некотором значении емкости образца по средству ГВЧ (генератора высоких частот). Далее (на втором этапе) происходит параллельное подключение измерительного и образцового конденсаторов. Резонанс колебательного контура достигается за счет изменения емкости образцового конденсатора при частоте, что и на первом этапе. Зная показания двух емкостей и частоту резонанса аналитически определяют другие параметры исследуемого объекта [6].

### 3. Мостовой метод.

Данный метод основывается на сравнении исследуемого образца с мерой. В состоянии равновесия моста, которое достигается при условии равенства модулей комплексных сопротивлений противолежащих плеч и при равенстве фазовых сдвигов между током и напряжением в каждом плече, напряжение в диагонали моста достигает значения своего минимума (не превышает значения тестового сигнала напряжения). Если функция преобразования емкости в напряжение не имеет экстремумов при всех возможных значениях аргумента, то это означает, что у нее отсутствуют максимумы или минимумы. Производная этой функции быстро убывает с ростом аргумента, но не меняет своего знака, т.е. она может быть отрицательной, но не достигает нуля. Такое поведение функции может указывать на то, что преобразование емкости в напряжение описывается монотонно убывающей функцией, т.е. с ростом емкости значение напряжения уменьшается. Зная данную зависимость, можно найти параметры исследуемого полупроводника [6–9].

### 4. Метод емкостного делителя.

Суть данного метода состоит в следующем: входное тестовое напряжение поступает на делитель напряжения, который состоит из измеряемой и эталонной емкостей. Напряжение на эталонной емкости снижается при увеличении измеряемой емкости. Также в цепь включают измерительный резистор, на котором с помощью вольтметра определяют значение падения напряжения. Максимальная точность измерения данным методом обеспечивается подбором соответствующих значений измерительной и эталонной емкостей для оптимального падения напряжения. Таким образом, путем изменения эквивалентной емкости и измерения падения напряжения на резисторе можно определить значение эквивалентной емкости полупроводникового прибора, по средством которой происходит расчет остальных параметров исследуемого объекта [6].

В данной статье рассмотрено измерение вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур и приборов с помощью автоматизированной измерительной системы.

### *Структура и принцип работы автоматизированной измерительной системы*

Структурная схема автоматизированной измерительной системы представлена на рис. 1.

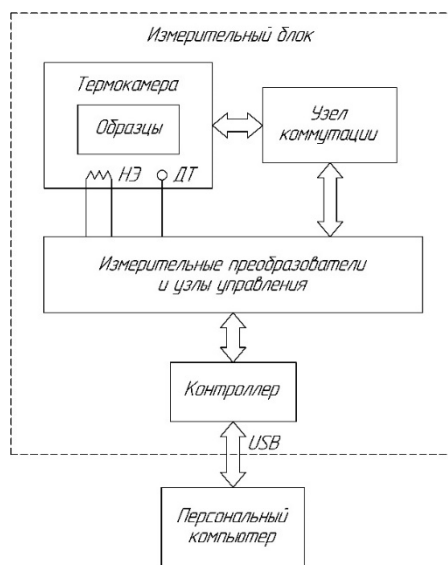


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной измерительной системы для измерений вольт-амперных характеристик полупроводниковых структур и приборов

Аппаратная часть данного устройства состоит из измерительного блока, с помощью которого осуществляются различные измерения и тесты. Он оснащен набором сменных кассет (модулей исследуемых объектов и схем), необходимых для проведения конкретных измерений или испытаний. Также в состав измерительной системы входит компьютер для обеспечения связи пользователя с интерфейсом и программным обеспечением, которое необходимо для настройки, запуска и анализа измерений. Полученные и обработанные данные сохраняются в табличном и графическом представлении [9].

Исследуемые образцы располагаются на сменных кассетах вместе с датчиком температуры (ДТ). Для увеличения температуры образца кассету помещают в термокамеру, в состав корпуса которой входит нагревательный элемент (НЭ). Узел коммутации выполняет функцию переключения между различными образцами, которые могут быть сохранены на сменной кассете. Он позволяет выбирать определенный образец и включать его в измерительную схему для проведения необходимых исследований или измерений [9].

Для получения и преобразования данных в процессе измерений применяются измерительные преобразователи. Обработка полученных данных осуществляется с помощью контроллера. Узлы управления отвечают за управление источниками тока и напряжения, а также могут управлять работой термокамеры, которая контролирует и поддерживает определенную температуру во время измерения. Контроллер состоит из микропроцессорного модуля и устройств ввода/вывода данных, которые обеспечивают возможность подключения и управления датчиками. Контроллер шины USB обеспечивает подключение контроллера к компьютеру посредством интерфейса USB. Это позволяет передавать данные между контроллером и компьютером для дальнейшей обработки и анализа.

Программное обеспечение (ПО) осуществляет автоматизированные измерения электрических параметров полупроводниковых структур и приборов, что в свою очередь позволяет сократить время измерительного процесса. Также ПО осуществляет корректировку инструментальных погрешностей измерительных преобразователей и выполняет измерение характеристик полупроводников косвенным методом.

### Результаты

Исследование вольт-амперных характеристик выполнено на примере полупроводникового транзистора КТ306А (кремниевый *p-n-p*-переход). Для этого исследуемый образец подключен к автоматизированной измерительной системе, после выполнения измерений получены результаты, сведенные в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные значения напряжений и токов на транзисторе КТ306А

$U_{бэ}, В$	$I_{э}, мА$	$I_{кас}, мА$	$U_{бэ}, В$	$I_{э}, мА$	$I_{кас}, мА$
1	2	3	4	5	6
0,80	6,86	6,8499 E0	0,39	0,00	-1,999 E1
0,78	5,45	5,7922 E0	0,38	0,00	-2,1048 E1
0,77	4,16	4,7014 E0	0,36	0,00	-2,2139 E1
0,75	3,14	3,6436 E0	0,34	0,00	-2,3197 E1
0,73	2,28	2,5528 E0	0,33	0,00	-2,4254 E1
0,72	1,60	1,4951 E0	0,31	0,00	-2,5345 E1
0,70	1,04	4,0428 E-1	0,29	0,00	-2,6403 E1
0,69	0,67	-6,5347 E-1	0,28	0,00	-2,7494 E1
0,67	0,41	-1,7112 E0	0,26	0,00	-2,8552 E1
0,65	0,23	-2,802 E0	0,24	0,00	-2,9642 E1
0,64	0,13	-3,8598 E0	0,23	0,00	-3,07 E1
0,62	0,07	-4,9506 E0	0,21	0,00	-3,1791 E1
0,60	0,04	-6,0083 E0	0,20	0,00	-3,2849 E1
0,59	0,02	-7,0991 E0	0,18	0,00	-3,3939 E1
0,57	0,01	-8,1569 E0	0,16	0,00	-3,4997 E1
0,56	0,00	-9,2477 E0	0,15	0,00	-3,6088 E1
0,54	0,00	-1,0305 E1	0,13	0,00	-3,7146 E1
0,52	0,00	-1,1396 E1	0,11	0,00	-3,8237 E1

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
0,51	0,00	-1,2454 E1	0,10	0,00	-3,9294 E1
0,49	0,00	-1,3545 E1	0,08	0,00	-4,0385 E1
0,47	0,00	-1,4603 E1	0,07	0,00	-4,1443 E1
0,46	0,00	-1,5693 E1	0,05	0,00	-4,2534 E1
0,44	0,00	-1,6751 E1	0,03	0,00	-4,3591 E1
0,42	0,00	-1,7842 E1	0,02	0,00	-4,4682 E1
0,41	0,00	-1,89 E1	0,00	0,00	-4,574 E1

П р и м е ч а н и я:  $U_{бэ}$  – напряжение база-эмиттер транзистора, В;  $I_э$  – ток, протекающий через эмиттер транзистора, мА;  $I_{кас}$  – ток каскада, мА

Получив значения, представленные в табл. 1, было произведено сравнение реальной ВАХ транзистора с идеальной (рис. 2); приведена зависимость статического и дифференциального сопротивления от тока для исследуемого образца (рис. 3); выявлена температурная зависимость ВАХ транзистора при различных ее значениях (рис. 4).

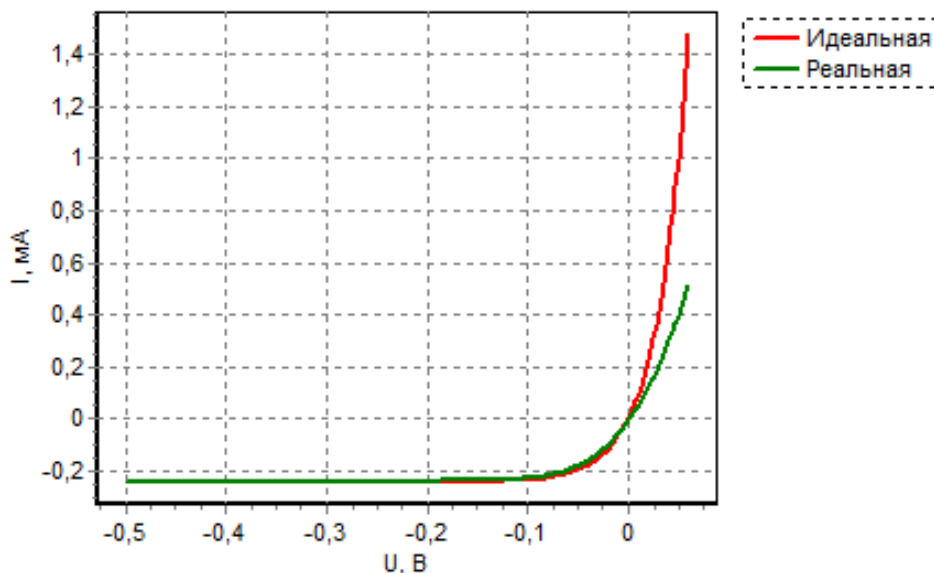


Рис. 2. Реальная и идеальная ВАХ кремниевого транзистора КТ306А

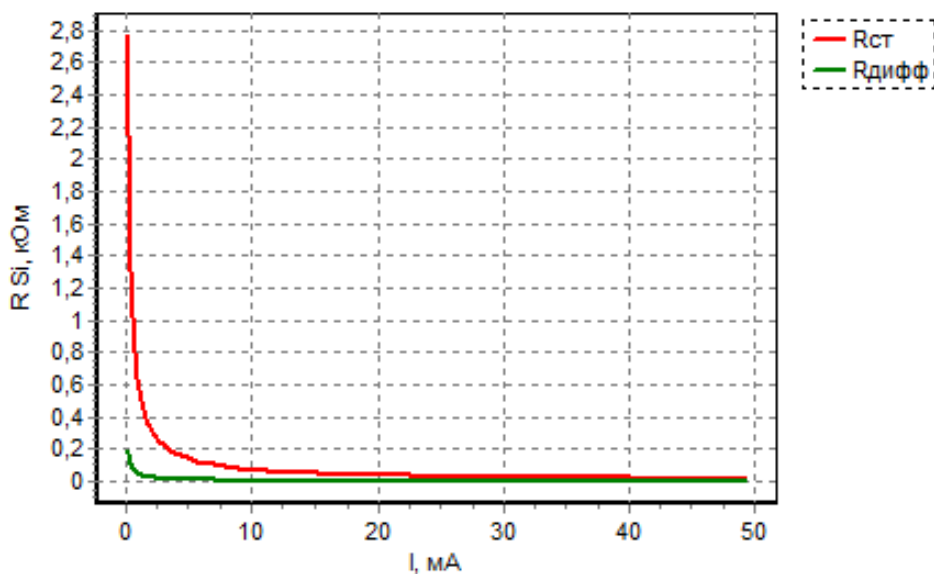


Рис. 3. Зависимость статического и дифференциального сопротивления от тока для кремниевого транзистора

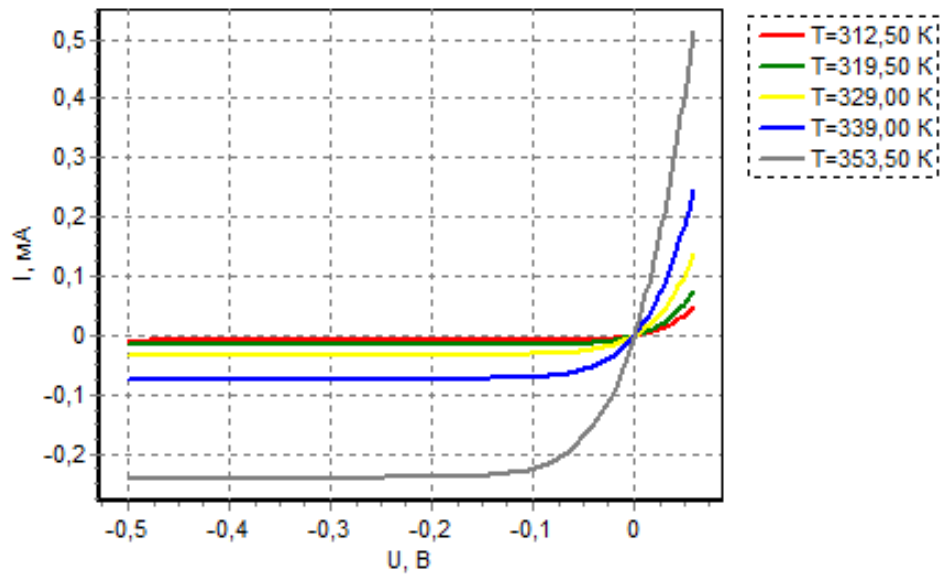


Рис. 4. Зависимость ВАХ транзистора при различных значениях температуры

Помимо исследования ВАХ устройств функциональной электроники, рассматриваемая система способна производить измерения зависимости тока от напряжения у более сложных структур, а именно в МДП-структуре (металл-диэлектрик-полупроводник) при использовании в качестве прозрачного проводящего оксида (ППО) слоя диоксида олова [10–12], легированного сурьмой. Результат исследования такой структуры изображен на рис. 5.

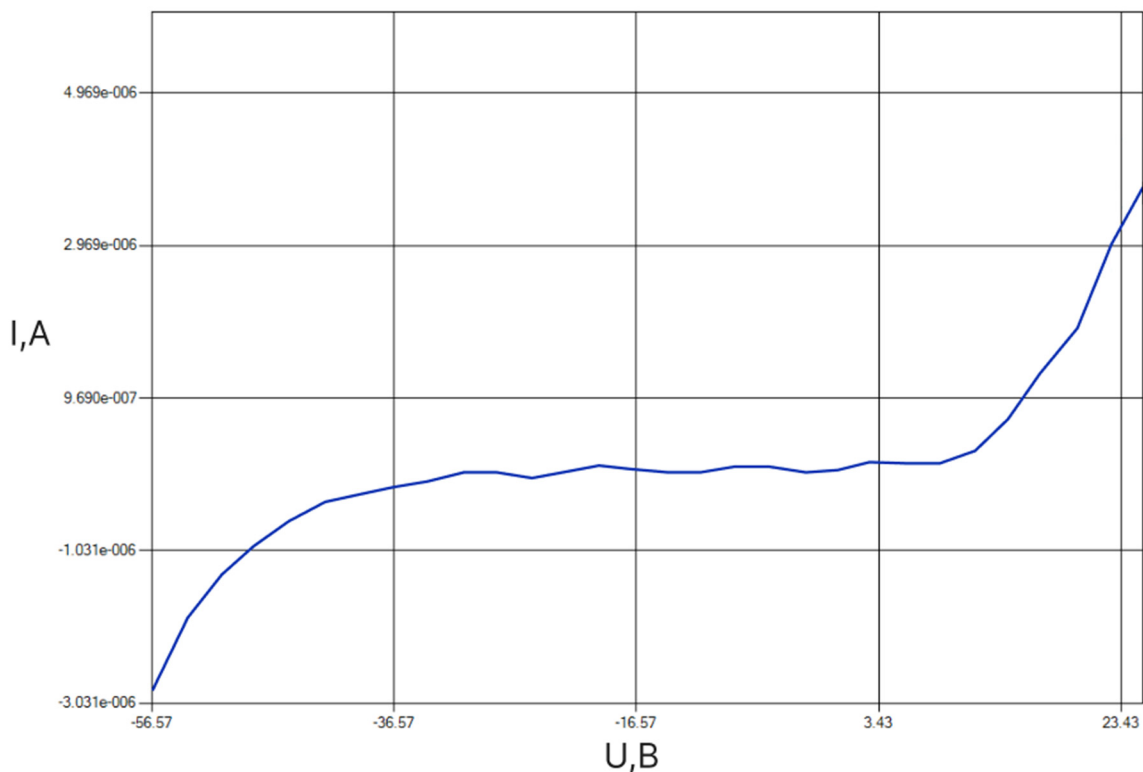


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика полученной МДП-структуры на основе прозрачного проводящего оксида

ППО характеризуются высокой способностью проводить ток и оптической прозрачностью. Изначально такие вещества являются диэлектриками, однако из-за кислородных вакансий и наличия межузельных атомов кристалла они проявляют полупроводниковые свойства [10].

### *Заключение*

Результаты измерений вольт-амперных характеристик полупроводников позволяют определить ряд важных параметров и характеристик, таких как:

– проводимость: высокая проводимость может указывать на хорошую кристаллическую структуру и малое количество дефектов в полупроводнике;

– пороговое напряжение: на основе вольт-амперных характеристик возможно определение порогового напряжения, необходимого для начала протекания тока через полупроводник. Этот параметр может быть важным для правильного функционирования полупроводниковых устройств;

– электрическое сопротивление: вольт-амперная характеристика позволяет определить сопротивление полупроводникового устройства (структуры), что важно для расчета электрических цепей и оптимального проектирования устройств;

– температурная зависимость параметров полупроводников, что позволяет проводить анализ и оптимизацию работы полупроводниковых приборов при различных условиях окружающей среды;

– граница насыщения: пользуясь вольт-амперной характеристикой, можно определить точку, в которой дополнительное увеличение напряжения не приводит к дальнейшему увеличению тока, что используется при проектировании и использовании полупроводниковых устройств.

Таким образом, ВАХ полупроводников является важным инструментом для определения различных параметров полупроводниковых структур и устройств, что в свою очередь позволяет оптимизировать их производство и использование в различных областях электроники и микроэлектроники.

### *Список литературы*

1. Bronovets M. A., Volodin N. M., Mishin Yu. N. New materials in semiconductor tensometry // *Materials Letters*. 2022. Т. 267. P. 127467.
2. Leech P., Ressel P. Application to Semiconductor Devices // *Surface Analysis Methods in Materials Science*. 2003. P. 435–454. doi: 10.1007/978-3-662-05227-3\_18
3. Shammass N. Y. A., Chamund D., Taylor P. Advances in semiconductor devices and their growing use in electrical circuits and systems // *12th WSEAS International Conference on CIRCUITS (Heraklion, Greece, July 22–24, 2008)*. Heraklion, 2008. P. 373–384.
4. Barth S., Hernandez-Ramirez F., Holmes J. D., Romano-Rodriguez A. Synthesis and applications of one-dimensional semiconductors // *Progress in Materials Science*. 2010. Vol. 55, iss. 6. P. 563–627.
5. Rahman M. A. A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors // *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*. 2014. Vol. 7, № 1. P. 50–70.
6. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М., 1985.
7. Павлов Л. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1987. 239 с.
8. Демидов А. А., Рыбалка С. Б. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020–2030 гг.) // *Прикладная математика & физика*. 2021. № 1. С. 53–72.
9. 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.
10. Печерская Е. А., Зинченко Т. О., Кондрашин В. И. [и др.]. Анализ электрофизических параметров пленок прозрачных проводящих оксидов // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2020. № 1. С. 73–80.
11. 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.
12. Печерская Е. А., Семенов А. Д., Зинченко Т. О. [и др.]. Система автоматического регулирования температуры подложки в составе установки для получения пленочного материала методом спрей-пириза // *Измерительная техника*. 2024. Т. 73, № 5. С. 41–47.

## References

1. Bronovets M.A., Volodin N.M., Mishin Yu.N. New materials in semiconductor tensometry. *Materials Letters*. 2022;267:127467.
2. Leech P., Ressel P. Application to Semiconductor Devices. *Surface Analysis Methods in Materials Science*. 2003:435–454. doi: 10.1007/978-3-662-05227-3\_18
3. Shammam N.Y.A., Chamund D., Taylor P. Advances in semiconductor devices and their growing use in electrical circuits and systems. *12th WSEAS International Conference on CIRCUITS (Heraklion, Greece, July 22–24, 2008)*. Heraklion, 2008:373–384.
4. Barth S., Hernandez-Ramirez F., Holmes J. D., Romano-Rodriguez A. Synthesis and applications of one-dimensional semiconductors. *Progress in Materials Science*. 2010;55(6):563–627.
5. Rahman M.A. A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*. 2014;7(1):50–70.
6. Batavin V.V., Kontsevoy Yu.A., Fedorovich Yu.V. *Izmerenie parametrov poluprovodnikovyykh materialov i struktur = Measurement of parameters of semiconductor materials and structures*. Moscow, 1985. (In Russ.)
7. Pavlov L. *Metody izmereniya parametrov poluprovodnikovyykh materialov. 2-e izd., pererab. i dop. = Methods of measuring parameters of semiconductor materials. 2nd ed., reprint. and add.* Moscow: Vyssh. shk., 1987:239. (In Russ.)
8. Demidov A.A., Rybalka S.B. Modern and promising semiconductor materials for microelectronics of the next decade (2020–2030). *Prikladnaya matematika & fizika = Applied Mathematics & Physics*. 2021;(1):53–72. (In Russ.)
9. Metal'nikov A.M., Karpanin O.V., Chaykin M.S. Hardware and software of an automated training system for the study of current-voltage characteristics of semiconductor devices. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2019;(50):118–121. (In Russ.)
10. Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O., Kondrashin V.I. et al. Analysis of electrophysical parameters of films of transparent conductive oxides. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;(1):73–80. (In Russ.)
11. 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.)
12. Pecherskaya E.A., Semenov A.D., Zinchenko T.O. et al. The system of automatic temperature control of the substrate as part of the installation for obtaining film material by spray pyrolysis method. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2024;73(5):41–47. (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

**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)



**Михаил Александрович Нелюцков**

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

**Mikhail A. Nelyutskov**

Master degree student,  
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)

**Ангелина Евгеньевна Журина**

инженер-исследователь кафедры  
информационно-измерительной  
техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: gelya.zhurina@mail.ru

**Angelina E. Zhurina**

Research engineer of the sub-department  
of information and measuring equipment  
and metrology,  
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 24.06.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 22.07.2024**

**Принята к публикации/Accepted 12.08.2024**