



УДК 621.315
doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-15



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Исследование температурной зависимости сопротивления проводников электрического тока

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. Целью работы является исследование зависимости электрического сопротивления проводников и полупроводников от температуры. Выполнен сравнительный анализ температурных зависимостей сопротивления металлов и полупроводников.

Ключевые слова: электрическое сопротивление, проводник, полупроводник, температурная зависимость

Для цитирования: Зими́на П. С., Печерская Е. А. Исследование температурной зависимости сопротивления проводников электрического тока // Инжиниринг и технологии. 2025. Т. 10 (1). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-15

Investigation of the temperature dependence of the resistance of electric current conductors

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. The aim of the work is to study the dependence of the electrical resistance of conductors and semiconductors on temperature. A comparative analysis of the temperature dependences of the resistance of metals and semiconductors is performed.

Keywords: electrical resistance, conductor, semiconductor, temperature dependence

For citation: Zimina P.S., Pecherskaya E.A. Investigation of the temperature dependence of the resistance of electric current conductors = *Engineering and Technology*. 2025;10(1):1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-15

Электрическое сопротивление – это физическая величина, характеризующая способность проводника препятствовать прохождению электрического тока. Оно определяется как отношение напряжения, приложенного к проводнику, к силе тока, протекающего через него. Это соотношение формулируется законом Ома и выражается известной формулой

$$R = U / I,$$

где R – сопротивление в омах (Ом), U – напряжение в вольтах (В), а I – ток в амперах (А). Сопротивление резисторов и проводников цилиндрической формы рассчитывается по формуле

$$R = \rho l / S,$$

где ρ – удельное сопротивление материала, из которого изготовлен проводник; S – площадь поперечного сечения проводника; l – длина проводника [1].



Критерии выбора проводников для эксперимента включают в себя несколько ключевых аспектов. Во-первых, необходимо учитывать электрические свойства материалов, такие как удельное сопротивление и проводимость, которые определяют их пригодность для изучения температурной зависимости сопротивления. Во-вторых, важным фактором является стабильность физических свойств материалов в широком температурном диапазоне [2, 3]. Это позволяет проводить измерения с высокой точностью и минимизировать влияние внешних факторов. Наконец, материалы должны быть доступными и легко обрабатываемыми, что упрощает подготовку образцов для эксперимента.

Для исследования температурной зависимости сопротивления часто используются материалы, такие как медь и алюминий. Эти металлы обладают высокой проводимостью, что делает их идеальными кандидатами для измерений. Кроме того, они демонстрируют стабильное поведение при изменении температуры, что позволяет минимизировать погрешности в эксперименте. В некоторых случаях применяются полупроводники, например, кремний, что открывает возможности для изучения различных аспектов температурной зависимости сопротивления. В этом контексте общий вид кривых на рис. 1 и последовательное уменьшение удельного сопротивления в зависимости от продолжительности термообработки являются ожидаемым результатом, поскольку демонстрируют поведение, характерное для процесса последовательного устранения кислородного дефицита в материале пленки [4].

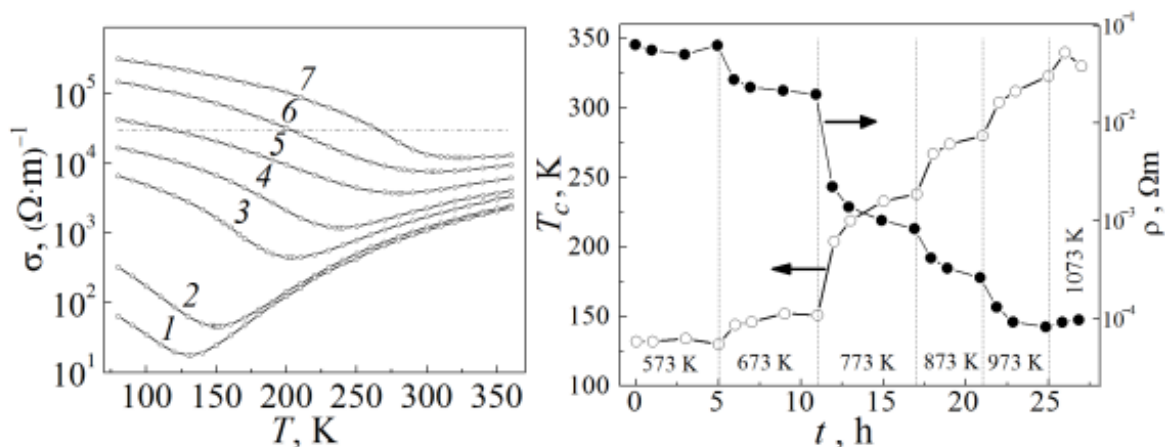


Рис. 1. Температурные зависимости проводимости LSMO-пленки на подложке NdGaO₃. Кривые 1–7 соответствуют продолжительности пошаговой термообработки 1, 11, 12, 17, 21, 25 и 26 h

В данном исследовании были выбраны медь и алюминий как основные материалы для эксперимента. Это решение обусловлено их высокой проводимостью и стабильностью физических свойств, что способствует получению точных и воспроизводимых результатов. Кроме того, эти металлы широко используются в промышленности, что придает результатам исследования практическую значимость. Таким образом, выбор меди и алюминия оправдан как с научной, так и с прикладной точки зрения. Исследования, проведенные в рамках диссертации, вошли в проекты, поддерживаемые Российским фондом фундаментальных исследований, а также в ряд международных инициатив [5].

Процедура эксперимента по исследованию температурной зависимости сопротивления проводников включает несколько ключевых этапов. На первом этапе подготавливаются образцы проводников, выбранных для исследования, таких как медь или алюминий, которые обладают высокой проводимостью и стабильными физическими свойствами. Эти образцы очищаются и фиксируются в специальной ячейке, обеспечивающей надежный контакт с измерительным оборудованием. Далее, экспериментальная установка, включающая мост Уитстона для точного измерения сопротивления, настраивается и калибруется для минимизации возможных погрешностей. На втором этапе образцы подвергаются воздействию контролируемых температурных условий, создаваемых с помощью криостата, что позволяет варьировать температуру в широком диапазоне, включая экстремально низкие значения. В процессе эксперимента измеряются значения сопротивления проводников при различных температурах, а данные фиксируются с использованием компьютеризированной системы сбора данных. На заключительном этапе проводится анализ полученных данных, включая построение графиков зависимости сопротивления от температуры и расчет коэффициента температурной зависимости. Таким образом, данная процедура обеспечивает точность и воспроизводимость результатов.



Результаты исследования температурных зависимостей сопротивления металлов

В рамках данного исследования были получены экспериментальные данные о температурной зависимости сопротивления для двух наиболее часто используемых металлов – меди и алюминия. Для меди сопротивление при температуре 20 °C составляет $1,68 \times 10^{-8}$ Ом·м, а ее температурный коэффициент равен примерно $0,0039/^\circ\text{C}$. Это свидетельствует о том, что сопротивление меди увеличивается практически линейно с ростом температуры. Для алюминия сопротивление при той же температуре равно $2,82 \times 10^{-8}$ Ом·м, а температурный коэффициент составляет около $0,004/^\circ\text{C}$, что также указывает на линейное увеличение сопротивления с температурой. Эти данные были собраны с использованием стандартных методов измерения электрического сопротивления в контролируемых условиях.

Анализ полученных данных показывает, что оба металла демонстрируют схожую зависимость сопротивления от температуры, что соответствует теоретическим представлениям о поведении проводников. Температурные коэффициенты меди и алюминия близки по величине, что объясняется их сходной электронной структурой. Однако алюминий имеет несколько большее начальное сопротивление и температурный коэффициент, что может быть связано с особенностями его кристаллической решетки и межатомных взаимодействий. Эти результаты подтверждают теоретическую модель, согласно которой рост температуры приводит к увеличению амплитуды тепловых колебаний атомов, что вызывает увеличение числа столкновений электронов с атомами и, как следствие, рост сопротивления.

Результаты исследования температурных зависимостей сопротивления полупроводников

Полупроводники, такие как кремний, демонстрируют уникальное поведение сопротивления при изменении температуры. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что с увеличением температуры сопротивление кремния уменьшается, что связано с ростом концентрации носителей заряда. Этот эффект обусловлен тепловой генерацией электронов и дырок, которая становится значительной при температурах выше 150 К. Такое поведение выделяет полупроводники на фоне металлов, где сопротивление, как правило, увеличивается с ростом температуры. Кроме того, сопротивление приконтактной области определяется сопротивлением сильно легированной области и сопротивлением переходов $n-n^+$ и $p-p^+$. Сопротивление сильно легированной приконтактной области обычно невелико в полупроводниках с высокой подвижностью носителей заряда, что подчеркивает важность легирования в управлении электрическими свойствами полупроводников [6].

Анализ экспериментальных данных для полупроводников, таких как кремний, показывает, что уменьшение сопротивления с повышением температуры связано с их физической природой. В отличие от металлов, где электрическое сопротивление определяется рассеянием электронов на кристаллической решетке, в полупроводниках основную роль играет концентрация носителей заряда, которая увеличивается за счет тепловой генерации. «Проведен эксперимент, в результате которого выявлена зависимость сопротивления от температуры у проводников и полупроводников. Установлено, что у проводников это линейная зависимость, а у полупроводников – экспоненциальная». Данные наблюдения подтверждают значительный вклад тепловой генерации при температурах выше 150 К, что приводит к снижению сопротивления.

Сравнительный анализ полученных данных

Температурная зависимость сопротивления металлов и полупроводников демонстрирует принципиально разные характеристики, что обусловлено их различной электронной структурой. Металлы, такие как медь и алюминий, характеризуются положительным температурным коэффициентом сопротивления, что означает увеличение сопротивления с ростом температуры. Например, температурный коэффициент сопротивления меди составляет $+0,0039\ ^\circ\text{C}^{-1}$, что свидетельствует о значительном влиянии температуры на ее проводимость. В отличие от этого, полупроводники, такие как кремний, проявляют отрицательный температурный коэффициент сопротивления, что связано с увеличением концентрации носителей заряда при повышении температуры. Это различие обусловлено тем, что в металлах основным механизмом является рассеяние электронов на фононах, а в полупроводниках – тепловая генерация носителей заряда.

При сравнении экспериментальных данных с теоретическими моделями выявляются определенные отклонения, которые могут быть связаны с рядом факторов. Например, для металлов отклонения могут быть вызваны примесями или дефектами в кристаллической решетке, которые изменяют характер рассеяния электронов. В случае полупроводников на результаты могут влиять такие факторы, как



наличие локальных состояний в запрещенной зоне, которые могут изменять концентрацию носителей заряда. Эти отклонения подчеркивают необходимость учета реальных условий эксперимента при разработке теоретических моделей и отмечают сложность полного описания поведения материалов в широком диапазоне температур.

Экспериментальные данные, собранные в ходе исследования, демонстрируют, как изменяется сопротивление проводников при различных температурах. Например, сопротивление меди при температуре 20 °C составляет $1,68 \times 10^{-8}$ Ом·м, что является стандартным значением для оценки электрических свойств материалов. Эти данные подтверждают, что с увеличением температуры сопротивление металлов возрастает, что связано с увеличением рассеяния электронов на фононах и дефектах кристаллической решетки. В дополнение к этому «изучены особенности формирования нанокристаллических пленок ZnO методом импульсного лазерного осаждения при различных расстояниях мишень-подложка» [7]. Это исследование подчеркивает значимость учета различных факторов, влияющих на электрические свойства материалов, включая методы их формирования и расстояние между мишенью и подложкой.

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими закономерностями демонстрирует их высокую степень соответствия. Закон Видемана – Франца, который связывает теплопроводность и электрическую проводимость металлов, подтверждает теоретические представления о температурной зависимости сопротивления. Это указывает на то, что модели, основанные на классической теории проводимости, достаточно точно описывают поведение металлов при изменении температуры и позволяют «объяснить влияние температуры на электрическое сопротивление металлов» [8].

В ходе проведенного исследования была изучена температурная зависимость электрического сопротивления различных проводников, включая металлы и полупроводники. Полученные экспериментальные данные подтвердили теоретические предположения о линейном увеличении сопротивления металлов с ростом температуры и уменьшении сопротивления полупроводников за счет роста концентрации носителей заряда. Были выявлены отличия в поведении материалов, которые могут быть объяснены различными физическими механизмами, лежащими в основе их проводимости. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими моделями показало их высокую степень соответствия, что подтверждает применимость существующих теорий для описания температурной зависимости сопротивления. Однако были выявлены небольшие отклонения, требующие дополнительного изучения и, возможно, уточнения моделей.

Список литературы

1. Писарев М. А., Глущенко А. Г., Глущенко Е. П. Исследование зависимости сопротивления проводника от его формы // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3. С. 351–352.
2. Печерская Е. А., Попченков Д. В., Соловьев В. А. Систематизация показателей качества высокотемпературных тонкопленочных тензорезисторов // Инновационные информационные технологии. 2012. № 1. С. 302–305.
3. Кондрашин В. И., Печерская Е. А. Исследование влияния концентрации примеси на поверхностное сопротивление в ППП (полученных методом спрей-пиролиза) на основе диоксида олова // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 19-й Всероссийской молодежной науч. школы-семинара. Ульяновск, 2016. С. 175–176.
4. Николаенко Ю. М., Эфрос Н. Б., Корнеев А. С., Федюк Д. О. Особенности изменения физических характеристик пленочной структуры $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3\text{--}\delta/\text{NdGaO}_3$ в процессе термообработки на воздухе // Физика и техника высоких давлений. 2020. Т. 30, № 3.
5. Бурков А. Т. Электронный транспорт в проводниках вблизи границы устойчивости металлического состояния : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб., 2007. С. 79–86.
6. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник: обзор // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41, вып. 11. С. 1281–1282.
7. Агеев О. А., Достанко А. П., Замбург Е. Г., Коноплев Б. Г., Поляков В. В., Чередниченко Д. И. Влияние процессов в факеле при лазерной абляции на удельное сопротивление и морфологию нанокристаллических пленок ZnO // Физика твердого тела. 2015. Т. 57, вып. 10. С. 2037–2038.
8. Пташинский В. В. Температурная зависимость сопротивления резисторов и диодов: лабораторная работа № 2-12 // Электричество и магнетизм. М. : НИТУ МИСиС, 2015. С. 68–82.



References

1. Pisarev M.A., Gluschenko A.G., Gluschenko E.P. Investigation of the dependence of the resistance of a conductor on its shape. *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik = International Student Scientific Bulletin*. 2016;(3):351–352. (In Russ.)
2. Pecherskaja E.A., Popchenkov D.V., Solovev V.A. Systematization of quality indicators of high-temperature thin-film strain gages. *Innovatsionnye informatsionnye tehnologii = Innovative information technologies*. 2012;(1):302–305. (In Russ.)
3. Kondrashin V.I., Pecherskaja E.A. Investigation of the effect of impurity concentration on surface resistance in PPD (obtained by spray pyrolysis method) based on tin dioxide. *Aktualnye problemy fizicheskoy i funktsionalnoj elektroniki: materialy 19-j Vserossijskoj molodezhnoj nauch. shkoly-seminara = Actual problems of physical and functional electronics : proceedings of the 19th All-Russian Youth Scientific Conference seminar schools*. Uljanovsk, 2016:175–176. (In Russ.)
4. Nikolaenko Ju.M., Efros N.B., Korneevets A.S., Fedjuk D.O. Features of changes in the physical characteristics of the $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3\text{--}\delta/\text{NdGaO}_3$ film structure during heat treatment in air. *Fizika i tehnika vysokih davlenij = High-pressure physics and engineering*. 2020;30(3). (In Russ.)
5. Burkov A.T. Electronic transport in conductors near the boundary of stability of the metallic state: DSc abstract. Saint Petersburg, 2007:79–86. (In Russ.)
6. Blank T.V., Goldberg Ju.A. Mechanisms of current flow in ohmic metal-semiconductor contacts: an overview. *Fizika i tehnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*. 2007;41(11):1281–1282. (In Russ.)
7. Ageev O.A., Dostanko A.P., Zamburg E.G., Konoplev B.G., Poljakov V.V., Cherednichenko D.I. The effect of processes in the flare during laser ablation on the resistivity and morphology of ZnO nanocrystalline films. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*. 2015;57(10):2037–2038. (In Russ.)
8. Ptashinskij V.V. Temperature dependence of resistance of resistors and diodes: laboratory work № 2-12. *Elektrichestvo i magnitizm = Electricity and magnetism*. Moscow: NITU MISiS, 2015:68–82. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 15.03.2025

Принята к публикации / Accepted 29.03.2025