

**Специализированный учебно-научный центр -
факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
Школа имени А.Н. Колмогорова
Кафедра физики**

Общий физический практикум

Лабораторная работа №3.5

**Исследование зависимости
сопротивления полупроводников
и металлов от температуры**

Составитель Т.П. Корнеева

Исследование зависимости сопротивления полупроводников и металлов от температуры

Цель работы:

1. Снятие температурных характеристик термистора и медного проводника.
2. Определение характерной величины энергии активации в полупроводниках.
3. Определение температурного коэффициента сопротивления меди.

Приборы и оборудование:

Термистор ММТ-1 в пробирке с маслом; катушка медного провода; термометр лабораторный; металлический стакан с водой; электрическая плитка; измерительный мост.

1. Термисторы

Термистор (термосопротивление, терморезистор) - это небольшой полупроводниковый кристалл (часто в виде пластинки) с металлическими контактами. Термисторы используются для измерения и регулирования температуры в диапазоне от 1К до температуры расплавленной стали (1800К), для пожарной сигнализации, для контроля тепловых режимов машин и механизмов, для изучения спектра Солнца и звезд и т.д.

Первые термисторы были изготовлены в 1890г. великим немецким физиком В.Нернстом.

Изготовление термисторов для измерений в области низких и очень высоких температур представляет собой непростую техническую задачу.

Для работы в области температур от -60°C до $+120^{\circ}\text{C}$ промышленностью изготавливаются термисторы на основе окислов переходных металлов - марганца (Mn), кобальта (Co), никеля (Ni), меди (Cu).

Термистор ММТ-1, с которым выполняют данную работу, состоит из спрессованной и термически обработанной смеси порошкообразных оксидов металлов.

2. Зависимость сопротивления полупроводника от температуры

Наряду с промежуточным между проводниками и изоляторами значением электрической проводимости, самым характерным признаком полупроводников является сильный рост проводимости при увеличении температуры.

Понять ход такой температурной зависимости можно, если рассмотреть процесс образования (генерации) свободных носителей заряда в чистых (собственных) полупроводниках.

В полупроводниковом кристалле между атомами в соседних узлах кристаллической решетки существует ковалентная связь, т.е. они связаны общими электронными парами. Для того чтобы электрон мог выйти из связи, и образовалась электронно-дырочная пара, атом должен получить энергию ϵ_a , называемую энергией ионизации в твердом теле или *энергией активации*. Эта физическая величина является определяющей при проявлении полупроводниками своих свойств. Приведем значения величины энергии активации для некоторых полупроводников:

Германий	Ge	0,72 эВ
Антимонид индия	InSb	0,17 эВ
Кремний	Si	1,1 эВ
Фосфид галлия	GaP	2,3 эВ

Величина энергии активации во много раз превышает среднюю кинетическую энергию теплового движения $\epsilon_K = 3/2 kT$, которая при комнатной температуре составляет около 0,04 эВ.

В этом случае вероятность $\psi_{ген}$ образования электронно-дырочной пары за счет энергии хаотического теплового движения описывается формулой Больцмана:

$$\psi_{ген} \sim \exp(-\epsilon_a / kT). \quad (1)$$

Концентрации свободных носителей - электронов (n_i) и дырок (p_i) - в собственном полупроводнике равны друг другу:

$$n_i = p_i = n_o.$$

Заметим, что при заданной температуре величина n_o остается постоянной, а это означает, что электронно-дырочные пары рождаются и исчезают (рекомбинируют) с одинаковой вероятностью:

$$\psi_{ген} = \psi_{рек}.$$

Но вероятность рекомбинации электронно-дырочной пары пропорциональна произведению концентраций электронов и дырок:

$$\psi_{рек} \sim n_o^2.$$

С учетом выражения (1) получаем, что температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда в полупроводниках определяется следующим выражением:

$$n_o = p_i = p_i = A \exp(-\epsilon_a / 2kT), \quad (2)$$

где A - коэффициент, величина которого для различных полупроводников лежит в пределах от 10^{17} до 10^{19} см^{-3} .

Чтобы лучше понять, как резко меняется с температурой собственная концентрация носителей, проследим, как меняется с температурой величина n_o в кремнии. Для кремния $A \approx 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

При температуре жидкого азота (77 К) $n_o = 1,7 \cdot 10^{-17} \text{ см}^{-3}$, т.е. нужен куб кремния с длиной ребра 4 км, чтобы в нем нашлась одна электронно-дырочная пара.

При комнатной температуре (300 К) $n_o = 1,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Заметим, что увеличение температуры всего в четыре раза

привело к изменению собственной концентрации электронов и дырок на 27 порядков!

При $T = 500 \text{ К}$ $n_o = 5,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, но при этом стоит вспомнить, что в металлах при любых температурах концентрация свободных электронов составляет $n \sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$.

Сильная зависимость концентрации свободных носителей от температуры приводит к аналогичной зависимости проводимости полупроводника и к уменьшению его сопротивления с ростом температуры по закону:

$$R(T) = R_0 \exp(\epsilon_a / 2kT) \quad (3)$$

Эту температурную зависимость сопротивления Вам и предстоит обнаружить в данной работе.

3. Зависимость сопротивления металлов от температуры

Согласно молекулярно-кинетическим представлениям плотность тока в веществе равна $j = e n v$, где e - заряд, n - концентрация и v - средняя скорость упорядоченного движения свободных носителей заряда под действием электрического поля.

В отличие от полупроводников, в металлах концентрация свободных носителей заряда (электронов) не зависит от температуры, и, как уже упоминалось, составляет примерно 10^{22} см^{-3} . Поэтому температурная зависимость сопротивления металлов обусловлена зависимостью от температуры средней скорости упорядоченного движения (дрейфа). Рассмотрим механизм этой зависимости подробно.

В кристалле (как в металле, так и в полупроводнике) в отсутствие электрического поля свободные носители заряда движутся хаотически, участвуя в тепловом движении. При этом они испытывают столкновения как между собой, так и с массивными частицами (атомами или ионами), находящимися в узлах кристаллической решетки. В дальнейшем, говоря о столкновениях, будем иметь в

виду именно столкновения с массивными частицами, т.к. они играют основную роль в рассматриваемом процессе.

Если в кристалле существует электрическое поле E , то под действием этого поля заряженные частицы получают ускорение $a = e E / m$ и начинают набирать скорость вдоль направления поля, а на фоне хаотического возникает упорядоченное движение - дрейф. Однако, отдельная частица набирает скорость под действием поля только в промежутке между столкновениями. Непосредственно после столкновения она может двигаться с равной вероятностью в любом направлении, что означает, что скорость направленного движения после столкновения равна нулю. Столкновения происходят случайно, и если среднее время между двумя последовательными столкновениями равно τ , то средняя дрейфовая скорость носителей вдоль электрического поля равна $v = e E \tau / m$. Таким образом, дрейфовая скорость носителей, а значит и плотность тока пропорциональны напряженности электрического поля. При этом проводимость оказывается равной $\lambda = e^2 n \tau / m$, а обратная ей величина удельного сопротивления $\rho = m / e^2 n \tau$.

В рамках классической модели нетрудно рассчитать величину среднего времени между столкновениями электрона с ионами кристаллической решетки в металле как отношение периода решетки к средней скорости теплового движения электронов: $\tau = a_0 / v_{\text{ср}}$.

Однако на этом этапе классическая теория перестает отражать реальное поведение электронов в металле: полученное таким образом значение τ для конкретного металла даже по порядку величины не совпадает с вычисленным по известному из эксперимента значению проводимости. В действительности столкновения электронов с ионами решетки в металлах происходят значительно реже, чем это следует из классической теории. Более того, предположение, что средняя скорость хаотического движения электронов в металлах

определяется температурой ($v_{\text{ср}}^2 \sim T$), приводит к ожидаемой зависимости удельного сопротивления от температуры вида $\rho \sim \sqrt{T}$. Эксперимент показывает, что на самом деле в достаточно большом диапазоне температур удельное сопротивление изменяется пропорционально изменению абсолютной температуры. Эту зависимость принято характеризовать температурным коэффициентом α :

$$\rho(T) - \rho_0 = \rho_0 \alpha(T - T_0), \quad (4)$$

где ρ_0 - значение удельного сопротивления при температуре $T_0 = 273 \text{ К}$ или 0°С .

Температурные коэффициенты чистых металлов примерно одинаковы и равны $\alpha \approx 1/273 \text{ К}^{-1} \approx 0,0036 \text{ К}^{-1}$. Температурные коэффициенты сплавов, как правило, значительно меньше, чем у чистых металлов. Существуют специальные сплавы, сопротивление которых практически не изменяется при нагревании, например, константан и манганин.

Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры используют в различных измерительных и автоматических устройствах, например, в термометрах сопротивления. Главным достоинством таких термометров является большой температурный диапазон измерений.

4. Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы

1. Поставьте на плитку стакан с водой и опустите в него пробирку с термистором, укрепив ее так, чтобы она не касалась дна стакана, а уровень воды превышал уровень масла.

2. Опустите в стакан закрепленный в штативе термометр так, чтобы конец термометра находился на уровне термистора и не касался стенок.
3. Подсоедините выводы термистора к контактам измерительного моста в соответствии с монтажной схемой, находящейся на рабочем месте.
4. Измерьте начальную температуру и сопротивление термистора при этой температуре.
5. Включите плитку, и примерно через каждые 5°C делайте замеры температуры и сопротивления до значения температуры 60°C.
6. Регулярно перемешивайте воду в стакане и отключайте плитку в момент измерения - температура во время замера не должна меняться. Проведите измерения при остывании термистора, переставив стакан на подставку. Процесс остывания можно ускорить, доливая в стакан холодную воду и хорошо ее перемешивая. При этом необходимо подождать установления температуры.
7. По окончании измерений выньте термометр и закройте пробирку.
8. Опустив в стакан с водой помещенную в пробирку катушку медной проволоки и термометр, повторите процесс измерений при нагревании до 60°C.

Обработка результатов

Результаты измерений занесите в таблицы для полупроводника и металла

t (°C)	T (K)	R (Ом)
--------	-------	--------

По полученным данным постройте графики зависимости R(T) и убедитесь в различном ходе зависимости сопротивления от температуры для металлов и полупроводников.

Вычисление величины энергии активации полупроводника.

Из полученного для полупроводника графика зависимости R(T) невозможно определить какие либо количественные характеристики исследуемой зависимости. В подобных случаях проделывают операцию, называемую линеаризацией, т.е. подбирают такие переменные, в которых график функции становится прямой линией.

Для полупроводника ожидаемая зависимость сопротивления от температуры имеет вид (3)

$$R(T) = R_0 \exp(\epsilon_a / 2kT),$$

или

$$R(T)/R_0 = \exp(\epsilon_a / 2kT). \quad (5)$$

Логарифмируя обе части уравнения (5), получим:

$$\ln(R/R_0) = (\epsilon_a / 2k)(1/T).$$

Нетрудно увидеть, что существует линейная зависимость между математической величиной lnR, представляющей численное значения сопротивления в логарифмическом масштабе, и величиной 1/T, обратной абсолютной температуре:

$$\ln R = \ln R_0 + (\epsilon_a / 2k)(1/T). \quad (6)$$

Если по оси ординат откладывать натуральный логарифм численного значения сопротивления (значение сопротивления в логарифмическом масштабе), а по оси абсцисс откладывать величину, обратную абсолютной температуре, то функциональная зависимость (6) будет изображаться прямой линией с угловым коэффициентом, равным $(\epsilon_a / 2k)$.

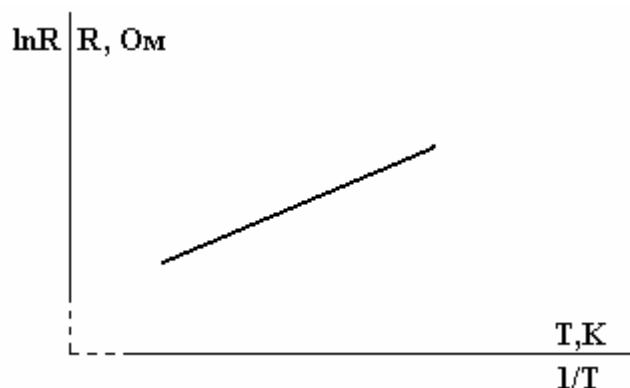
Для построения такого графика дополните таблицу результатов измерений новыми графами **1/T** и **lnR**.

Выбрав подходящий масштаб, нанесите на график полученные значения и, проведя по точкам прямую, получите значение углового коэффициента и вычислите значение энергии активации ϵ_a .

При построении графика зависимости $\ln R = f(1/T)$, откладывая по оси ординат значение lnR, дополнительно

указывайте соответствующее ему значение R (Ом); то же замечание относится и к оси абсцисс.

Ниже приведен примерный вид графика.



Примерный вид графика для определения ε_a

Заметим, что значение углового коэффициента прямой можно получить не графическим способом, а применяя метод наименьших квадратов.

Полученное значение ε_a выразите в джоулях и электрон-вольтах.

Вычисление температурного коэффициента сопротивления меди.

Для получения значения температурного коэффициента проводников удобно отсчитывать значения температуры по шкале Цельсия. Тогда зависимость сопротивления от температуры имеет вид

$$R(t^{\circ}) = R_0 (1 + \alpha t^{\circ}),$$

где R_0 – значение сопротивления при 0°C .

Для построения графика зависимости $R(t^{\circ})$ выберите разумный масштаб на осях координат и округлите значения наносимых величин, если это необходимо, в соответствии с масштабом.

Желательно при построении графика использовать миллиметровую бумагу.

(Данные рекомендации следует учитывать и при исследовании температурной зависимости полупроводника.)

По полученным экспериментально точкам на графике проведите прямую линию. Продолжив получившуюся прямую до значения температуры 0°C , получите значение R_0 .

Вычислите угловой коэффициент получившейся прямой, который численно равен $(R_0 \alpha)$, и подсчитайте α .

Запишите результат и сделайте выводы о проделанной работе.

Вопросы для получения допуска к выполнению лабораторной работы.

1. Сформулируйте цель работы.
2. Какие задания Вы будете выполнять в данной работе, в какой последовательности, и какие приборы будут Вами использованы для выполнения каждого из этих заданий?
3. В какой форме Вы будете представлять результаты измерений?
4. Какой вид температурной зависимости сопротивления Вы ожидаете получить для полупроводника? Для металла?

Вопросы к защите результатов лабораторной работы.

1. Какие выводы Вы сделали по результатам проделанной Вами работы?
2. Что такое термистор? Где применяют термисторы?
3. Почему проводимость полупроводников сильно зависит от температуры?
4. Какие физические факторы, кроме температуры, влияют на проводимость полупроводников?

5. От чего зависит число образующихся в единицу времени электронно-дырочных пар в единице объема полупроводника?
6. От чего зависит число рекомбинирующих в единицу времени электронно-дырочных пар в единице объема полупроводника?
7. Почему температурная зависимость концентрации свободных носителей в полупроводнике описывается формулой (2), отличающейся от выражения для распределения Больцмана (1)?
8. Что такое энергия активации в полупроводниковом кристалле? На основании каких экспериментальных результатов Вы можете оценить значение энергии активации в данном полупроводнике?
9. Какие детали механизма проводимости металлов хорошо описываются классической электронной теорией, и что она объяснить не в состоянии?
10. Что такое температурный коэффициент сопротивления проводников? Как этот коэффициент определяется в данной работе?
11. Соответствует ли полученное значение α температурному коэффициенту сопротивления для химически чистых металлов?

Рекомендуемая литература

1. Г.Я. Мякишев, А.З. Сияков
«ФИЗИКА 10-11. Электродинамика»
«Дрофа», 2002г.
2. Д.А. Соболев
«Введение в технику физического эксперимента»
М. 1993г.
3. М.Е. Левинштейн, Г.С. Симин
«Знакомство с полупроводниками»
Библиотечка «Квант» вып.33, «Наука», 1984г.

4. Э. Парселл
«Электричество и магнетизм», БКФ т. II
«Наука», 1975г.