Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва» в г. Белово

Кафедра горного дела и техносферной безопасности

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Методические указания по выполнению

лабораторной работы по дисциплине «Физика горных пород»

для студентов направления 21.05.04 «Горное дело»

Составитель: С.В. Белов

Утверждены на заседании кафедры

Протокол № 5 от 15.01.2020 г.

Рекомендованы к печати

методическим советом филиала

КузГТУ в г. Белово

Протокол № 6 от 22.01.2020 г.

Электронная копия находится в методическом кабинете филиала КузГТУ в г. Белово

### 

*Белово 2020*

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

### **1. Цель работы**: изучить температурную зависимость сопротив-ления полупроводника, экспериментально определить энергию активации.

**2. Подготовка к работе:** изучить теоретические положения, касающиеся основы электропроводности полупроводников [1], §§ 57-59; [2], §§240–243; [3], §§43.1– 43.5; изучить данные методические указания; ответить на контрольные вопросы.

В результате подготовки нужно знать:

а) зонную теорию твердых тел;

б) собственную и примесную проводимость полупроводников;

в) зависимость сопротивления полупроводника от температуры;

г) энергию активации полупроводников.

# 3. Выполнение работы

**3.1. Описание лабораторного стенда**

Объектом исследования в данной работе является полупроводниковое термосопротивление (*ПТС*), иначе называемое *термистором*. *ПТС* вместе со ртутным термометром *Т* помещены в нагреватель *Н*, питание которого осуществляется от сети переменного тока через потенциометр *П* (рис. 1).

|  |
| --- |
| **Схема_62** |
| *Рис.1. Схема лабораторного стенда: П – потенциометр; Н – нагреватель;*  *Т – термометр; ПТС – полупроводниковое термосопротивление (термистор);*  *УИП – универсальный измерительный прибор* |

Для измерения сопротивления термистора служит универсальный цифровой измерительный прибор *УИП*, также питающийся от сети; термометр позволяет контролировать температуру в зоне нагрева.

**3.2. Методика измерений и расчёта**

При повышении температуры полупроводника электроны, «задействованные» в ковалентных связях между атомами кристаллической решетки, получают дополнительную энергию и могут перейти в свободное состояние, т.е. стать носителями заряда и участвовать в проводимости. Минимально необходимая для этого энергия Δ*W* называется *энергией активации* полупроводника.

|  |
| --- |
| Рис_42 |
| *Рис.2. Распределение электронов по уровням валентной зоны ВЗ и зоны проводимости ЗП в собственном полупроводнике* |

В собственных (чистых) полупроводниках, состоящих из атомов одного химического элемента, электроны переходят из *валентной зоны ВЗ* (рис. 2) в *свободную зону СЗ* (которая в этом случае становится *зоной проводимости ЗП*). При этом электроны должны преодолеть энергетический барьер Δ*W*, равный ширине *запрещенной зоны ЗЗ*. Освободившаяся «вакансия» в ковалентной связи – так называемая *дырка* – может быть занята электроном из соседней связи и т.д. Под действием электрического поля дырка будет вести себя как положительный носитель заряда и также участвовать в проводимости. Таким образом, в чистом полупроводнике проводимость в равной степени осуществляется как отрицательными носителями – свободными электронами, так и положительными – дырками. Из приведенных выше рассуждений следует, что концентрации свободных электронов *nэ* в свободной зоне и дырок *nд* в валентной зоне в таком полупроводнике одинаковы: *nэ* *= nд*.

Как известно, внутри кристалла концентрация электронов, обладающих энергией *W*, определяется на основе распределения *Ферми-Дирака*

 (1)

где *WF* – энергия Ферми; *k* – постоянная Больцмана; *Т* – абсолютная температура. В чистых полупроводниках уровень Ферми *WF* расположен посередине запрещенной зоны *ЗЗ* (см. рис. 2); поэтому для электронов, перешедших в зону проводимости, разность *W - WF* =. При температурах до тысячи кельвин произведение *kT* не превышает 0,1 *эВ*, в то время как ширина запрещенной зоны составляет несколько десятых *эВ*, – следовательно, единицей в квадратных скобках выражения (1) можно пренебречь про сравнению с экспоненциальным слагаемым и распределение Ферми переходит в классическое распределение *Больцмана*:

 (2)

Так как электропроводность вещества *σ* прямо пропорциональна концентрации носителей заряда (*σ ~ nэ*), а его электрическое сопротивление *R* в свою очередь обратно пропорционально электропроводности (), с учетом (2) можно представить температурную зависимость сопротивления полупроводника в виде

 (3)

где величина *R*∞ характеризует сопротивление при бесконечно высокой температуре.

Аналогичные закономерности справедливы и для *примесной* проводимости полупроводников. В полупроводниках *n*-типа валентность примеси (*донора*) на единицу превышает валентность основного вещества. Поэтому «лишние» валентные электроны особенно легко переходят в свободное состояние без образования дырки в валентной зоне (рис. 3, *а*).

|  |
| --- |
| Рис_43а |
| *Рис. 3. Схема энергетических уровней полупроводника n-типа (а) и p-типа (б)* |

Для таких полупроводников *nэ* >> *nд* (электроны являются *основными*, а дырки – *неосновными* носителями). Уровни донорной примеси располагаются вблизи «дна» свободной зоны, и энергия активации примеси Δ*W* значительно меньше ширины запрещенной зоны.

В полупроводниках *р*-типа валентность примеси (*акцептора*) на единицу меньше, чем у атомов основного вещества. «Лишняя» вакансия в ковалентной связи атома примеси легко превращается в дырку без предварительного перехода электронов в свободную зону (рис. 3, *б*); в таких полупроводниках основными носителями являются дырки. А неосновными – свободные электроны (*nэ* << *nд*). Уровни акцепторной примеси лежат вблизи «потолка» валентной зоны, которая становится зоной проводимости, и энергия активации Δ*W* при этом также меньше ширины запрещенной зоны.

При высоких температурах практически все донорные уровни освобождаются, а акцепторные – занимаются электронами; таким образом, исчерпывается механизм примесной проводимости. Дальнейшее повышение температуры все больше способствует переходам электронов из валентной зоны в свободную, как это имеет место в чистых полупроводниках (*собственная* проводимость).

Итак, независимо от наличия и характера примеси, на сопротивление полупроводников весьма существенно влияет их температура. Зависимость *R*(*T*) принято характеризовать *термическим коэффициентом* сопротивления *α*, представляющим собой относительное изменение сопротивления при изменении температуры на один кельвин:

 (4)

Подставляя в (4) зависимость (3), получим:



Таким образом, в отличие от металла, у полупроводника термический коэффициент сопротивления, во-первых, отрицателен, во-вторых, не является постоянным (зависит от температуры). Это говорит о том, что сопротивление полупроводника уменьшается с ростом температуры, причем не по линейному закону.

Сам факт явно выраженной температурной зависимости сопротивления позволяет использовать *ПТС* в качестве датчика температуры, т.е. определять его температуру по измеренному сопротивлению. Это можно сделать либо с помощью градуировочного графика зависимости *R*(*T*), либо по известным параметрам этой зависимости (значениям *R*∞ и Δ*W*). Определение этих параметров является одной из целей данной лабораторной работы.

Для линеаризации зависимости (3) прологарифмируем ее



и введем обозначения:

 (5)

после чего получим



Таким образом, величины ln*R*  и  связаны между собой линейной зависимостью. Измерив сопротивление полупроводника при различных значениях температуры, можно найти коэффициенты *K* и *b* этой зависимости либо графическим способом, либо методом наименьших квадратов. После этого параметры исходной зависимости (3) легко определить, используя выражения (5):

 ; (6)

 . (7)

**3.3. Порядок выполнения работы**

1. Ознакомьтесь с лабораторной установкой. Определите цену деления шкалы термометра и снимите с нее начальное показание *t*. Результат (в градусах Цельсия) занесите в первую строку таблицы 1.

*Таблица 1*

*Данные измерения зависимости*

*сопротивления полупроводника от температуры*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер опыта | *t,*  °*C* | *R,*  *Ом* | *Т,*  *К* | 1/*Т,*  *К*-1 | ln*R* | ln*R/T,*  *К*-1 | (1/*Т*)2*,*  *К*–2 |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |
| … | … | … | … | … | … | … | … |
| *n* |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  | Σ = |  |  |  |  |

2. Включите УИП, определите сопротивление термистора и запишите его в таблицу 1.

  3. Поместите *ПТС* и термометр в нагреватель. Включите в сеть цепь питания нагревателя *Н*.

4. Следите за показаниями термометра (температура должна медленно повышаться). Через каждые 3–5 градусов (согласно рекомендациям) снимайте показания прибора *УИП*; значения температуры *t* и сопротивления *R* заносите в таблицу 1. Общее количество измерений *n* должно быть не менее семи.

5. Выключите из сети нагреватель и измерительный прибор.

6. Переведите значения температуры в кельвины и заполните столбец «*Т*» таблицы 1.

7. Вычислите значения 1/*Т* и ln*R* и также занесите их в таблицу 1.

8. Нанесите экспериментально полученные точки на график зависимости ln*R* от 1/*Т*.

9. Определите коэффициенты *K* и *b* этой зависимости либо путем обработки графика, либо методом наименьших квадратов (в последнем случае заполните два крайних правых столбца таблицы и ее нижнюю строку сумм).

10. По формулам (6) и (7) вычислите параметры *R*∞ и Δ*W* зависимости сопротивления полупроводника от температуры. Значение энергии активации Δ*W* выразите в электрон-вольтах и сравните полученный результат с положениями зонной теории.

**4. Контрольные вопросы**

1. Строение кристаллов. Принцип Паули. Образование энергетических зон в кристалле.

2. Валентная, свободная и запрещенная зоны.

3. Металлы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения зонной теории.

4. Собственная проводимость полупроводников. Два вида носителей заряда.

5. Как сопротивление полупроводников (ПП) зависит от температуры? Почему зависимость  имеет линейный характер?

6. Как повышение температуры влияет на количество электронов или дырок в примесных ПП?

7. Нарисуйте зонную схему примесных ПП. Объясните образование электронов или дырок в примесных ПП.

8. Чем определяется энергия активации у примесных ПП?

9. Как определяется энергия активации  ПП?

# 5. Список рекомендуемой литературы

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3 томах/ И.В. Савельев. — 13-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань,— Том 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц — 2019. — 320 с.

URL: https://e.lanbook.com/book/123463

2. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для вузов. – Изд. 18-е, испр. – М.: Издат. центр «Академия», 2010. – 560 с.

3. Детлаф, А.А. Курс физики: учеб. пособие для втузов /А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 4-е изд., стереотип. – М.: Издат. центр «Академия», 2007. – 720 с.

4. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород: учебник/В.В. ржевский, Г.Я. Новик. – изд., стереотип. - М: Книжный дом «Либриком», 2014 – 360 с.

Составитель

Белов Сергей Викторович

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Методические указания по выполнению

лабораторной работы по дисциплине «Физика горных пород»

для студентов направления 21.05.04 «Горное дело»

Отпечатано на ризографе.

Тираж экз.

Филиал ГУ КузГТУ в г. Белово. 652644, г. Белово, ул. Ильича 32-а