

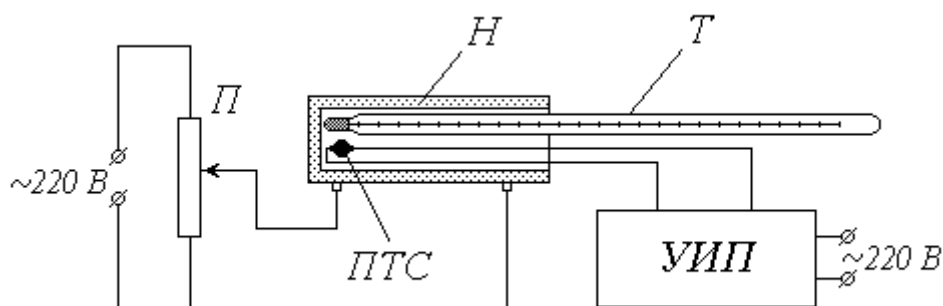


Работа 6.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКА

- Цель работы:
- 1) изучение температурной зависимости сопротивления полупроводника;
 - 2) экспериментальное определение энергии активации.

Схема экспериментальной установки



- Π – потенциометр; H – нагреватель; T – термометр;
 $ПТС$ – полупроводниковое термосопротивление (термистор);
 $УИИ$ – универсальный измерительный прибор

Описание установки и методики измерений

Объектом исследования в данной работе является полупроводниковое термосопротивление ($ПТС$), иначе называемое *термистором*. $ПТС$ вместе со ртутным термометром T помещены в нагреватель H , питание которого осуществляется от сети переменного тока через потенциометр Π . Для измерения сопротивления термистора служит универсальный цифровой измерительный прибор $УИИ$, также питающийся от сети; термометр позволяет контролировать температуру в зоне нагрева.

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 ΔW называется *энергией активации* полупроводника.

В чистых полупроводниках, состоящих из атомов одного химического элемента, электроны переходят из *валентной зоны ВЗ* (рис. 44) в *свободную зону СЗ* (которая в этом случае становится *зоной проводимости ЗП*). При этом электроны должны преодолеть энергетический барьер ΔW , 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

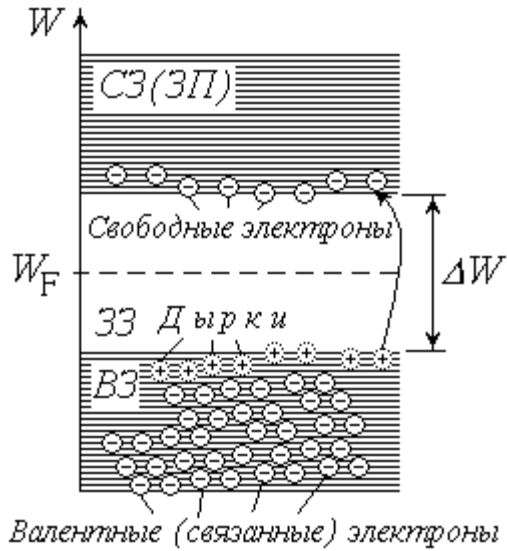


Рис. 44

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 n_s в свободной зоне и дырок n_d в валентной зоне в таком полупроводнике одинаковы: $n_s = n_d$.

Как известно, внутри кристалла концентрация электронов, обладающих энергией W , определяется на основе

распределения Ферми-Дирака

$$n(W) \sim \left[\exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

где W_F – энергия Ферми; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. В чистых полупроводниках уровень Ферми W_F расположен посередине запрещенной зоны ЗЗ (см. рис. 44); поэтому для электронов, перешедших в зону проводимости, разность $W - W_F = \frac{1}{2} \Delta W$. 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 по сравнению с экспоненциальным слагаемым и распределение Ферми переходит в классическое распределение Больцмана:

$$n_s \sim \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right). \quad (2)$$

Так как электропроводность вещества σ прямо пропорциональна концентрации носителей заряда ($\sigma \sim n_s$), а его электрическое сопротивление R в свою очередь обратно пропорционально электропроводности ($R \sim \frac{1}{\sigma}$), с учетом (2) можно представить температурную зависимость сопротивления полупроводника в виде

$$R = R_\infty \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (3)$$

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. 45, *а*).

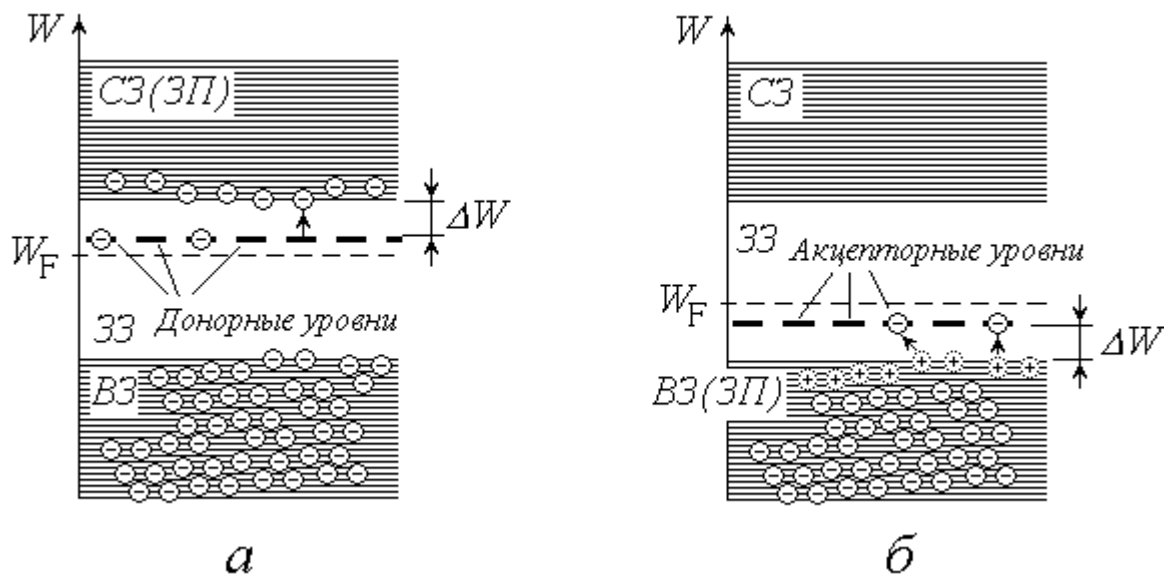


Рис. 45

Для таких полупроводников $n_s \gg n_d$ (электроны являются *основными*, а дырки – *неосновными* носителями). Уровни донорной примеси располагаются вблизи «дна» свободной зоны, и энергия активации примеси ΔW значительно меньше ширины запрещенной зоны.

В полупроводниках *p*-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. 45, *б*); в таких полупроводниках основными носителями являются дырки. А неосновными – свободные электроны ($n_s \ll n_d$). Уровни акцепторной примеси лежат вблизи «потолка» валентной зоны, которая становится зоной проводимости, и энергия активации ΔW 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:

$$\alpha = \frac{dR}{R \cdot dT}. \quad (4)$$

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

$$\alpha = -\frac{\Delta W}{2kT^2}.$$

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 ΔW). Определение этих параметров является одной из целей данной лабораторной работы.

Для линеаризации зависимости (3) прологарифмируем ее (см. пример 10 на с. 30):

$$\ln R = \ln R_\infty + \frac{\Delta W}{2kT}$$

и введем обозначения:

$$\ln R_\infty = b; \quad \frac{\Delta W}{2k} = K, \quad (5)$$

после чего получим

$$\ln R = K \cdot \frac{1}{T} + b.$$

Таким образом, величины $\ln R$ и $\frac{1}{T}$ 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):

$$\boxed{R_\infty = \exp(b)}; \quad (6)$$

$$\boxed{\Delta W = 2kK}. \quad (7)$$

Порядок измерений и обработки результатов

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.

Номер опыта	t, °C	R, Ом	T, K	1/T, K ⁻¹	lnR	lnR/T, K ⁻¹	(1/T) ² , K ⁻²
1							
...
n							
Σ =							

2. Подсоединив выводы ПТС к измерительному прибору, включите последний в сеть. Установив нужный предел измерения, определите сопротивление термистора и запишите его в таблицу.

3. Поместите ПТС и термометр в нагреватель. Включите в сеть цепь питания нагревателя H (движок потенциометра Π без необходимости не перемещайте).

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. 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 « T » таблицы.

7. Вычислите значения $1/T$ и $\ln R$ и также занесите их в таблицу.

8. Нанесите экспериментально полученные точки на график зависимости $\ln R$ от $1/T$.

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 ΔW зависимости сопротивления полупроводника от температуры. Значение энергии активации ΔW выразите в электрон-вольтах и сравните полученный результат с положениями зонной теории.

Контрольные вопросы

1. Электропроводность (проводимость) и сопротивление вещества; связь между этими характеристиками. От чего зависит электропроводность?

2. Строение кристаллов. Принцип Паули. Образование энергетических зон в кристалле. Валентная, свободная и запрещенная зоны. Металлы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения зонной теории. Распределение Ферми-Дирака.
3. Собственная проводимость полупроводников. Два вида носителей заряда. Энергия активации. Температурная зависимость проводимости и сопротивления чистого полупроводника. Термический (температурный) коэффициент сопротивления.