3. Тепообмен излучением: Справочник/А.Г.Блох, Ю.А.Журавлев, Н.Л.Рыжков- М. :Энергоиздат, 1991.

Лабораторная работа № 6

(Работа № 6.2 в VirtLab)

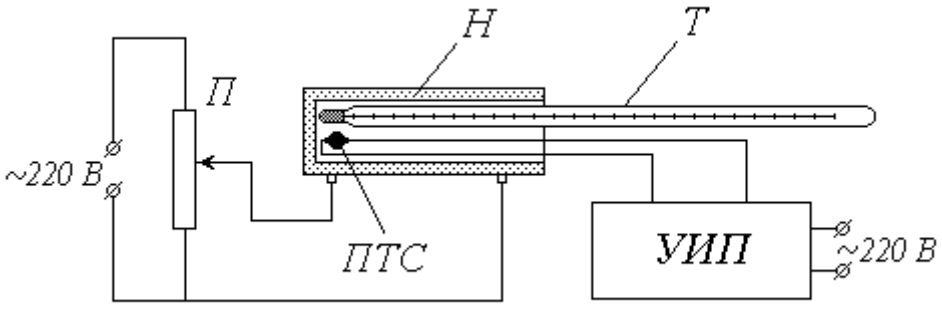
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЁННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

Цель работы: 1) изучение температурной зависимости сопротивления полупроводника;

2) экспериментальное определение ширины запрещённой зоны полупроводника

Ширина запрещенной зоны может быть найдена с помощью измерений электропроводности или сопротивления в зависимости от температуры, а также из спектрального распределения фототока полупроводника.

Схема экспериментальной установки



П – потенциометр; *Н* – нагреватель; *Т* – термометр;

ПТС – полупроводниковое термосопротивление (термистор);

УИП – 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 *Т* помещены в нагреватель *Н*, питание которого осуществляется от сети переменного тока через потенциометр *П*. Для измерения сопротивления термистора служит универсальный цифровой измерительный прибор *УИП*, также питающийся от сети; термометр позволяет контролировать температуру в зоне нагрева.

Известно, что удельная электропроводность вещества зависит от концентрации свободных носителей заряда *n* и их подвижности μ:

$$\sigma = en\mu,$$

где *e* – заряд электрона. Если носителей заряда несколько видов, то общая удельная электропроводность σ равна сумме электропроводностей.

Удельная электропроводность полупроводника равна сумме собственной и примесной электропроводности:

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_{\text{пр}} . \qquad (1)$$

При высоких температурах $\sigma_i >> \sigma_{\text{пр}}$. Электропроводность собственного (чистого) полупроводника

$$\sigma_i = n_i e\mu_n + p_i e\mu_p , \qquad (2)$$

Где n_i, μ_n, p_i, μ_p – концентрации и подвижности электронов и дырок соответственно чистого полупроводника.

Электрическое сопротивление *R* в свою очередь обратно пропорционально электропроводности ($R \sim \frac{1}{\sigma}$).

Для того чтобы найти зависимость электропроводности (или сопротивления) от температуры, необходимо выяснить, как изменяются концентрации носителей заряда и их подвижности с изменением температуры.

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. 1) 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 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_i в свободной зоне и дырок p_i в валентной зоне в таком полупроводнике одинаковы: $n_i = p_i$.

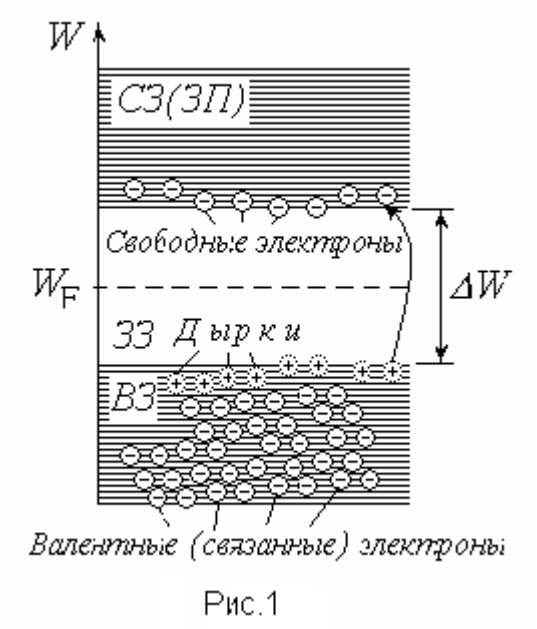


Рис.1

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

$$n(W) \sim \left[\exp\left(\frac{W - W_F}{kT} \right) + 1 \right]^{-1}, \qquad (3)$$

где W_F – энергия Ферми; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. В чистых полупроводниках уровень Ферми W_F расположен посередине запрещенной зоны *33* (см. рис. 1); 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 ΔW составляет от нескольких десятых *эВ* до единиц *эВ*, – следовательно, единицей в квадратных скобках выражения (3) можно пренебречь по сравнению с экспоненциальным слагаемым и распределение Ферми переходит в классическое распределение *Больцмана* и тогда концентрация электронов:

$$n_i \sim \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT} \right). \qquad (4)$$

В металлах при любой температуре отличной от нуля Кельвина все валентные электроны оторваны от своих атомов. Поэтому концентрация свободных электронов в металлах не зависит от температуры.

Рассмотрим зависимость подвижности электронов от температуры. По определению подвижность равна отношению дрейфовой скорости носителей заряда к напряженности электрического поля

$$\mu_n = \frac{v_n}{E}.$$

Вследствие теплового движения атомов и наличия дефектов кристаллической решётки происходит рассеяние электронов и дырок при столкновении с дефектами или колеблющимся атомом. В результате этого электрон и дырка не ускоряются неограниченно при включении электрического поля E, а движутся с определённой средней скоростью v_n. Расчёты показывают, что

при рассеянии на колебаниях атомов решётки подвижность электронов и дырок в полупроводниках

$$\mu_n \sim T^{-3/2}$$

а при рассеянии на ионизированных примесях подвижность

$$\mu_n \sim T^{+3/2}.$$

Первый механизм преобладает при высоких температурах, а второй – при низких температурах.

В металлах при рассеянии на колебаниях атомов решётки подвижность электронов

$$\mu_n \sim T^{-1},$$

а при рассеянии на ионизированных примесях

$$\mu_n = const.$$

Ясно, что основной вклад в температурную зависимость электропроводности (значит и сопротивления) полупроводника даёт концентрация (экспоненциальная зависимость на много сильнее степенной). В металлах температурная зависимость электропроводности (значит и сопротивления) определяется зависимостью подвижности от температуры.

Учитывая зависимость концентрации и подвижности носителей заряда от температуры удельную электропроводность собственного полупроводника можно записать в виде

$$\sigma_i = \sigma_0 e^{-\Delta W/2kT}, \qquad (5)$$

где σ_0 - слабо зависящий от температуры множитель.

Так как электрическое сопротивление R обратно пропорционально электропроводности $(R \sim \frac{1}{\sigma})$, температурную зависимость сопротивления полупроводника с учетом (5) можно представить в виде

$$R = R_\infty \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right), \qquad (6)$$

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

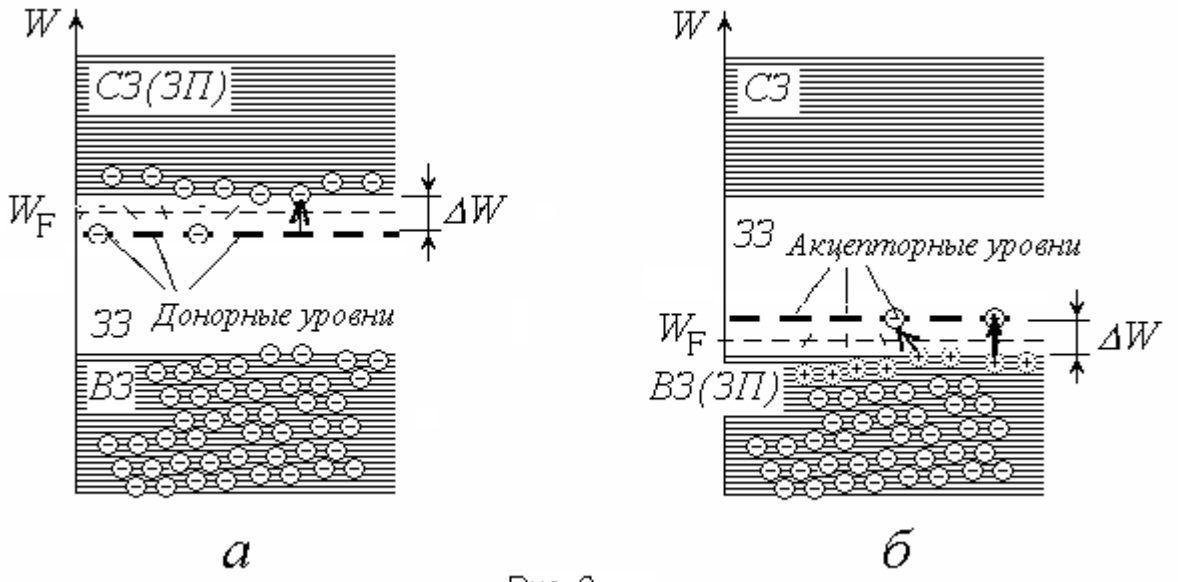


Рис. 2

свободное состояние без образования дырки в валентной зоне (рис. 2, *а*).

Для таких полупроводников концентрация электронов *n* много больше концентрации дырок *p* (электроны являются *основными*, а дырки – *неосновными* носителями). Уровни донорной примеси располагаются вблизи «дна» свободной зоны, и энергия активации примеси ΔW (равная энергии ионизации атома примеси) 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. 2, *б*); в таких

полупроводниках основными носителями являются дырки, а неосновными – свободные электроны ($n << p$). Уровни акцепторной примеси лежат вблизи «потолка» валентной зоны, которая становится зоной проводимости, и энергия активации ΔW при этом также много 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 зону проводимости, 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:

$$\alpha = \frac{dR}{R \cdot dT}. \qquad (7)$$

Подставляя в (7) зависимость (6), получим:

$$\alpha = -\frac{\Delta W}{2kT^2}. \qquad (8)$$

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 полупроводниковое термосопротивление *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.

Логарифмирование уравнения (6) приводит к выражению

$$\ln R = \ln R_\infty + \frac{\Delta W}{2kT}, \tag{9}$$

из которого следует, что зависимость $\ln R$ от $\frac{1}{T}$ должна представлять собой прямую. Отрезок, отсекаемый такой прямой на оси ординат, даёт величину $\ln R_\infty$, а угловой коэффициент этой прямой, т.е. отношение $\frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)}$, равен $\frac{\Delta W}{2k}$,т.е позволяет определить ширину запрещённой зоны полупроводника:

$$\Delta W = 2k\frac{\Delta(\ln R)}{\Delta(1/T)}. \tag{10}$$

Здесь $\Delta(\ln R) = \ln R_2 - \ln R_1$

а $\Delta(1/T) = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}$, $k = 8{,}6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К.

Индексы 1 и 2 относятся к двум точкам выбранным на графике.

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, *К*	ln$R$	$10^3/T$, $К^{-1}$
1					
…	…	…	…	…	…
n					

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 *Н* (движок потенциометра *П* без необходимости не перемещайте).

4. Следите за показаниями термометра (температура должна медленно повышаться). Через каждые 3–5 градусов 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 $1/T$. Проведите сглаживающую прямую через экспериментальные точки.

9. Выберите на этой прямой две точки и по тангенсу угла наклона прямой, используя формулу (10), рассчитайте значение ширины запрещенной зоны ΔW.

10. Значение ширины запрещенной зоны ΔW выразите в электрон-вольтах и сравните полученный результат с табличным значением.

Контрольные вопросы

1. Каково цель работы?
2. От чего зависит удельная электропроводность вещества?
3. Запишите выражение, связывающее удельная электропроводность вещества с его электрическим сопротивлением.
4. Что такое ширина запрещённой зоны полупроводника?
5. Что такое энергия ионизации (активации) атомов примеси полупроводника и как она отличается от ширины запрещённой зоны?
6. Как зависит концентрация носителей заряда от температуры в полупроводниках и металлах?
7. Что такое подвижность носителей заряда и как она зависит от температуры в полупроводниках и металлах?
8. Что такое собственная проводимость полупроводников?
9. Что такое примесная проводимость полупроводников?
10. Как зависит электропроводность и сопротивление чистого полупроводника от температуры? Объяснит причину такой зависимости.
11. При каких температурах преобладает собственная проводимость, а при каких температурах преобладает примесная проводимость полупроводников?
12. Чем объясняется различный ход температурной зависимости сопротивления у полупроводников и металлов?
13. В каких осях нужно строить график температурной зависимости сопротивления полупроводника и почему?

14. Как по графику будете определять ширину запрещённой зоны полупроводника ΔW?

Список литературы

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. – М.: Астрель, 2001.

2. *Трофимова Т.И.* Курс физики. - М.: Академия, 2004 (и др. годы изданий).

3. *Епифанов Г.И.* Физика твердого тела. – М.: Высш. шк., 1996. – Гл. 7, §§ 2–7.