

## Лабораторная работа № 75

### Изучение электропроводности металлов и полупроводников

**Цель работы:** экспериментальное определение температурных зависимостей электропроводности металлов и полупроводников; определение ширины запрещенной зоны собственного полупроводника.

#### I. Приборы и принадлежности

Лабораторная установка по исследованию температурной зависимости сопротивления собственных полупроводников и металлов.

#### II. Подготовка к работе

1. Изучить теорию по учебникам и лекциям.
2. Изучить описание работы и подготовить протокол с таблицами.
3. Ответить на вопросы для допуска к работе.

#### Основная литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1997.
2. Тюшев А.Н. Курс лекций по физике. Часть 5. Квантовая физика: учеб. пособие. Лекция 13. – Новосибирск: СГГА, 2003.
3. Савельев И.В. Курс физики. Т. 3. – М., 1989, § 42–43.

#### Дополнительная литература

4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3. – М., 1987, § 53–58.
5. Тюшев А.Н. Физика в конспективном изложении. Часть 3. Основы молекулярной физики и термодинамики. Квантовая физика: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2003. – С. 141–148.

#### III. Вопросы для допуска к работе

1. Какими факторами определяется электропроводность вещества и плотность электрического тока?
2. Сформулируйте принцип Паули.
3. В чём заключается причина возникновения энергетических зон в твёрдых телах?

4. Что такое запрещённая зона?
5. В чём заключается различие между металлами и диэлектриками с точки зрения зонной теории?
6. В чём заключается различие между диэлектриками и полупроводниками?
7. По каким причинам возникает электропроводность металлов?
8. По каким причинам возникает собственная электропроводность полупроводников?

#### IV. Краткое теоретическое введение

Электропроводность – способность вещества проводить электрические токи, возникающие под действием электрического поля в веществе.

В соответствии с законом Ома:

$$\sigma = \frac{j}{E}, \quad (75.1)$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость;  $j$  – плотность электрического тока;  $E$  – напряженность электрического поля.

Плотность тока определяется выражением:

$$j = e \cdot n \cdot v, \quad (75.2)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n$  – концентрация носителей тока;  $v$  – дрейфовая скорость направленного движения носителей тока.

Дрейфовое движение – это движение носителей под действием электрического поля *с постоянной во времени средней скоростью*.

Дрейфовая скорость линейно зависит от напряженности поля:

$$v = \mu \cdot E, \quad (75.3)$$

где  $\mu$  – подвижность носителей тока в веществе.

Таким образом, учитывая (75.1), (75.2) и (75.3), для удельной проводимости можно найти:

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu. \quad (75.4)$$

Температурная зависимость проводимости, как видно из последнего выражения, определяется изменениями концентрации  $n$  носителей и подвижности носителей при изменениях температуры. Закономерности этих изменений различны для металлов и полупроводников, что определяется различным для них распределением электронов вещества по уровням энергии.

При объединении атомов в кристалл их энергетические уровни, вследствие принципа Паули, превращаются в систему очень близко расположенных подуровней – разрешенные энергетические зоны. Разрешенные зоны могут быть разделены запрещенными зонами, электрон не может иметь энергию, лежащую в пределах запрещенной зоны.

Если самая верхняя, валентная зона, заполнена наполовину, то она является зоной проводимости. Такие кристаллы относятся к металлам. Все металлы хорошо проводят электрический ток.

Если валентная зона заполнена полностью, а следующая за ней разрешенная зона отделена от валентной широкой запрещенной зоной ( $\Delta E_{\text{зап}} \geq 5 \text{ эВ}$ , напомним, что  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ), то такой кристалл будет диэлектриком. Диэлектрики почти не проводят электрический ток.

Полупроводники имеют зонную схему, похожую на зонную схему диэлектриков, но ширина запрещенной зоны у них мала ( $\Delta E_{\text{зап}} \leq 3 \text{ эВ}$ ).

Зонные схемы металла, диэлектрика и полупроводника изображены на рис. 75.1.

В случае металла, электрон, расположенный на верхнем из занятых уровней, под действием даже слабого электрического поля получит дополнительную энергию и перейдет на соседний незанятый уровень той же зоны, станет свободным, может участвовать в создании проводимости.

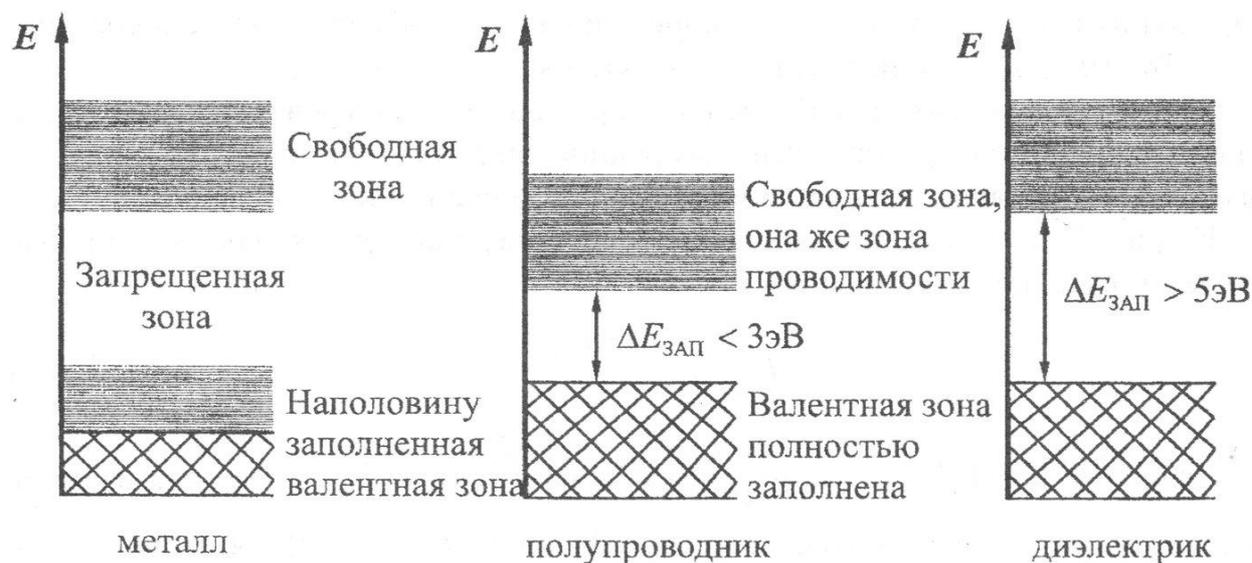


Рис. 75.1. Зонные схемы металла, диэлектрика и полупроводника

Количество  $n$  таких свободных электронов в металлах практически не зависит от температуры. Зависимость подвижности электронов в металлах от температуры обратно пропорциональная:

$$\mu \sim \frac{1}{T}. \quad (75.5)$$

поэтому и проводимость металла обратно пропорциональна температуре:

$$\sigma \sim \frac{1}{T}. \quad (75.6)$$

При нагревании полупроводника часть электронов за счёт энергии теплового движения переходит из валентной зоны в свободную зону, которая и является у полупроводников *зоной проводимости*. В валентной зоне появляются дырки, проводимость будет электронно-дырочной. У беспримесных полупроводников проводимость экспоненциально растет с ростом температуры. Такая проводимость называется собственной проводимостью полупроводников, а полупроводники – собственными полупроводниками.

Объяснение экспоненциальной зависимости собственной проводимости полупроводников от температуры даётся на основе зонной теории и распределения Ферми – Дирака:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1}, \quad (75.7)$$

здесь  $f(E)$  – среднее число электронов в одном квантовом состоянии с энергией  $E$ ;  $E_F$  – уровень Ферми (или химический потенциал), он является нормировочным параметром этого распределения;  $T$  – абсолютная температура;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

У полупроводников с собственной проводимостью уровень Ферми  $E_F$  с большой точностью расположен посередине запрещенной зоны. На рис. 75.2 график  $f(E)$  изображен рядом с энергетической схемой полупроводника.

Из рис. 75.2 видно, что для электронов, находящихся у «дна» зоны проводимости, выполняется равенство:

$$E - E_F = \frac{\Delta E_{\text{зап.}}}{2}. \quad (75.8)$$

Если  $\frac{\Delta E_{\text{зап.}}}{2} > kT$ , то  $\exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right] = \exp\left[\frac{\Delta E_{\text{зап.}}}{2kT}\right] \gg 1$ , что обычно и имеет место.

Тогда мы имеем дело с «хвостом» функции  $f(E)$  (75.7), учитывая (75.8), получим:

$$f(E) \cong \exp\left[-\frac{E - E_F}{kT}\right] = \exp\left[-\frac{\Delta E_{\text{зап.}}}{2kT}\right]. \quad (75.9)$$

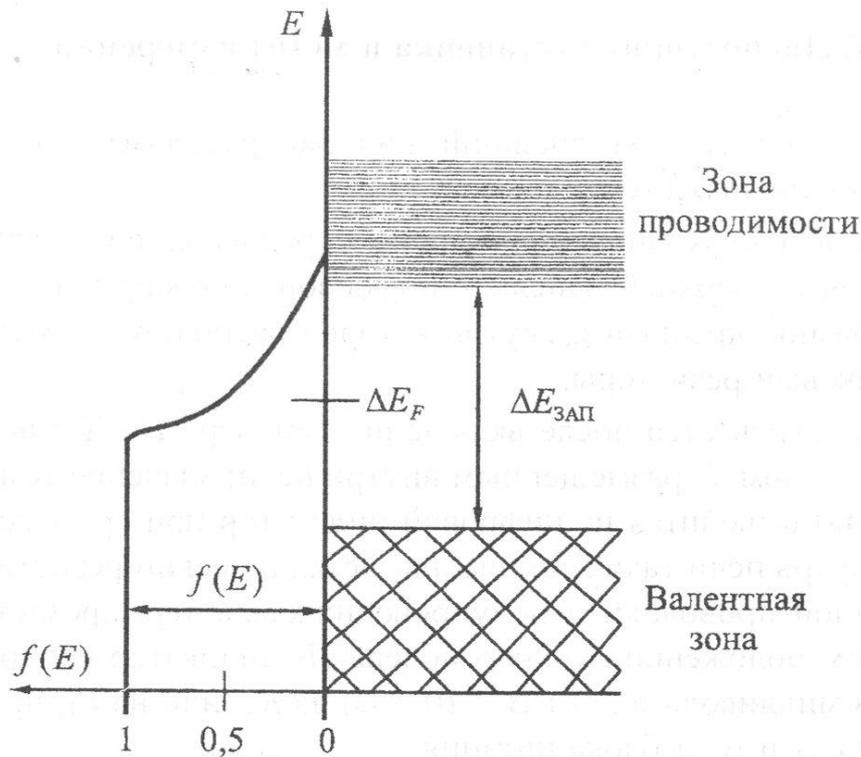


Рис. 75.2. Распределение Ферми – Дирака для собственного полупроводника

Концентрация электронов проводимости  $n$  (и равная ей концентрация дырок) будет пропорциональна  $f(E)$ , а так как удельная проводимость  $\sigma$  пропорциональна концентрации, то для нее, с учетом (75.9), имеем:

$$\sigma \sim f(E) = \exp \left[ -\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2kT} \right].$$

Переходя от пропорциональности к равенству, получим формулу зависимости собственной проводимости полупроводников от температуры:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp \left[ -\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2kT} \right], \quad (75.10)$$

здесь  $\sigma_0$  – постоянная величина, имеющая размерность удельной проводимости. (Напомним, что  $\sigma = 1/\rho$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление.) Из полученной формулы видно, что собственная проводимость полупроводников  $\sigma$  экспоненциально быстро растет с температурой. Изучая на опыте зависимость  $\sigma(T)$ , можно вычислить значение ширины запрещенной зоны  $\Delta E_{\text{зап}}$ .

## V. Лабораторная установка и метод измерений

На рис. 75.3 представлен внешний вид лабораторной установки, а на рис. 75.4 – её упрощённая схема.

На передней панели установки помещены управляющие переключатели  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  и «Вкл. сеть», на верхней панели – цифровой индикатор и электрическая печь (под П-образной крышкой), внутри которой расположены металлический и полупроводниковый резисторы.

Электропечь нагревается после включения тумблера  $\Pi_1$ . Температура печи определяется датчиком  $T$ , размещенным внутри печи; значение температуры (в градусах Цельсия) выводится на цифровой индикатор при среднем положении тумблера  $\Pi_2$ . Внутри печи также помещены металлический резистор  $R_M$  в виде катушки из медной проволоки и полупроводниковый терморезистор  $R_{П}$ . При левом или правом положении ручки тумблера  $\Pi_2$  индикатор измеряет падение напряжения  $U$  в милливольтках ( $1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$ ) на  $R_M$  или на  $R_{П}$  при прохождении по ним токов  $i_1$  и  $i_2$  от блока питания.

Цифровой индикатор установки в исходном положении переключателя  $\Pi_2$  показывает температуру образца  $T_C$  в градусах Цельсия, для перевода которой в кельвины надо пользоваться следующей формулой:

$$T = T_C + 273. \quad (75.11)$$

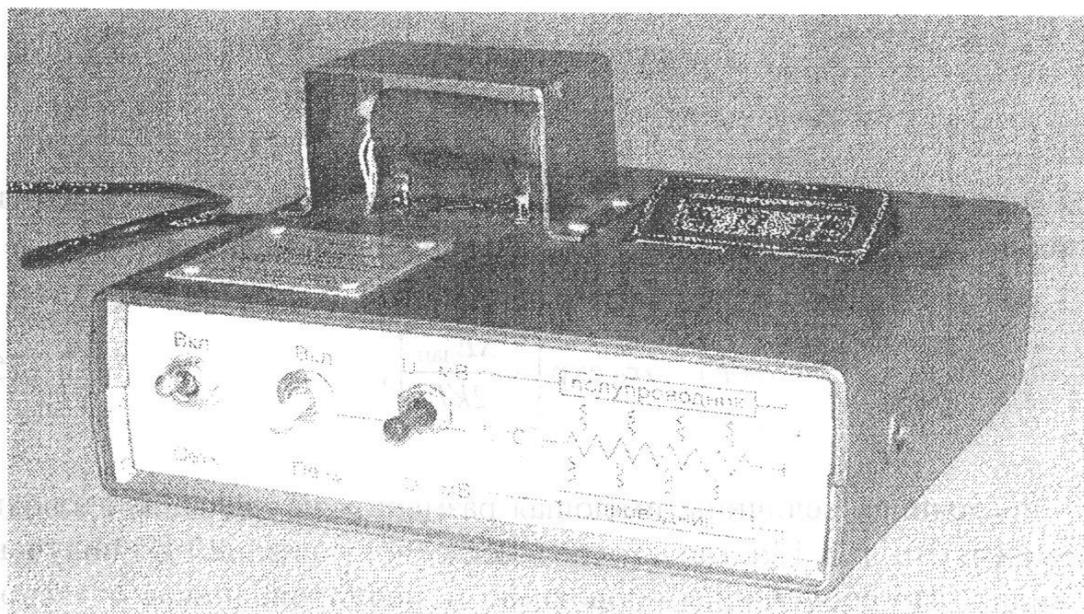


Рис. 75.3. Внешний вид лабораторной установки

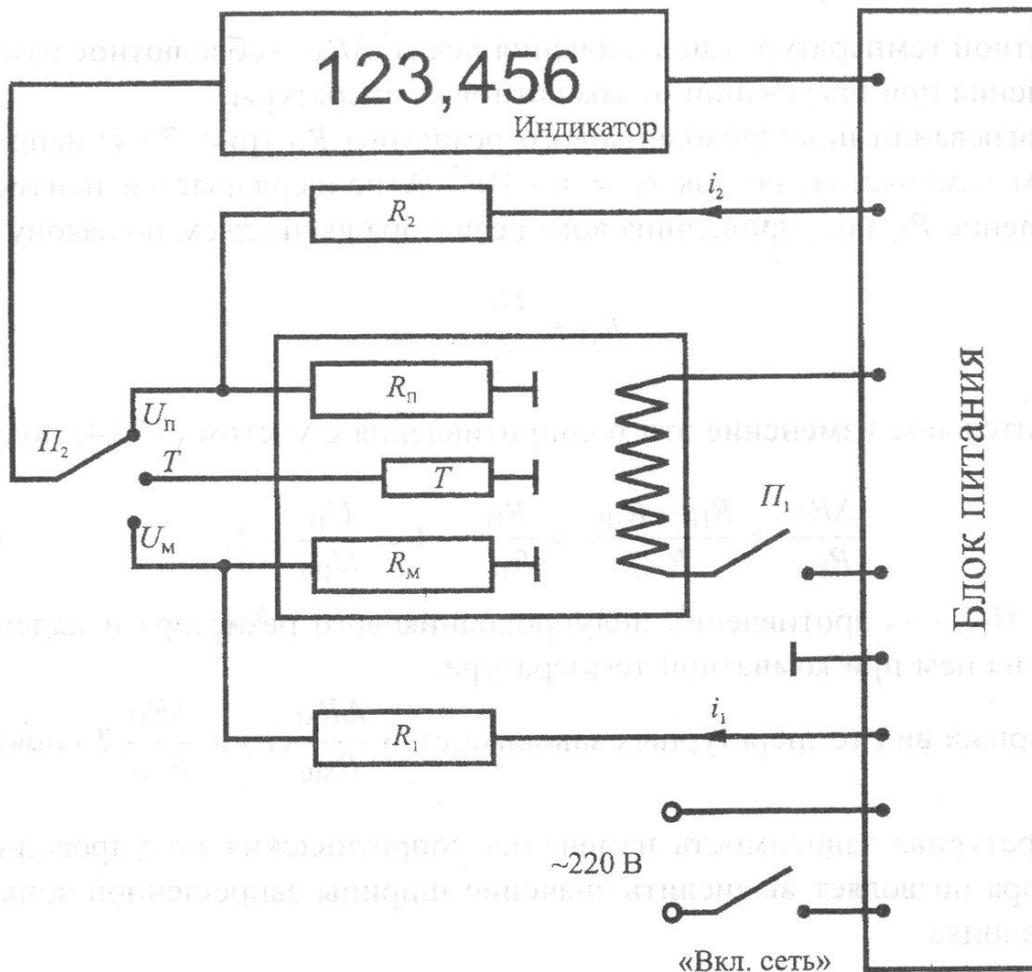


Рис. 75.4. Схема лабораторной установки

При измерении падения напряжения  $U_M$  на металлическом резисторе ток  $i_1$  в результате нагревания резистора изменяется, но напряжение питания  $U_0 = 0,195$  В остается неизменным. Измерив  $U_M$ , можно вычислить значение сопротивления  $R_M$  металлического резистора (см. рис. 75.4):

$$R_M = R_1 \left( \frac{U_0}{U_M} - 1 \right)^{-1}. \quad (75.12)$$

Относительное изменение сопротивления вычисляется по формуле:

$$\frac{\Delta R_M}{R_{M0}} = \frac{\frac{U_0}{U_{M0}} - 1}{\frac{U_0}{U_M} - 1}, \quad (75.13)$$

где  $R_{M0}$  и  $U_{M0}$  – сопротивление металлического резистора и напряжение на нем

при комнатной температуре (до включения печи);  $\Delta R_M$  – абсолютное изменение сопротивления при нагревании от комнатной температуры.

При нагревании полупроводникового резистора  $R_{\Pi}$  (рис. 75.4) напряжение  $U_{\Pi}$  на нем изменяется, но ток  $i_2 = 6 \cdot 10^{-5}$  А поддерживается неизменным. Сопротивление  $R_{\Pi}$  полупроводникового резистора вычисляем по закону Ома:

$$R_{\Pi} = \frac{U_{\Pi}}{i_2}. \quad (75.14)$$

Относительное изменение этого сопротивления с учетом (75.14) получим в виде:

$$\frac{\Delta R_{\Pi}}{R_{\Pi 0}} = \frac{R_{\Pi} - R_{\Pi 0}}{R_{\Pi 0}} = \frac{R_{\Pi}}{R_{\Pi 0}} - 1 = \frac{U_{\Pi}}{U_{\Pi 0}} - 1, \quad (75.15)$$

где  $R_{\Pi 0}$  и  $U_{\Pi 0}$  – сопротивление полупроводникового резистора и падение напряжения на нем при комнатной температуре.

Примерный вид температурных зависимостей  $\frac{\Delta R_M}{R_{M0}}(T)$  и  $\frac{\Delta R_{\Pi}}{R_{\Pi 0}}(T)$  показан на рис. 75.5.

Температурная зависимость изменения сопротивления полупроводникового резистора позволяет вычислить значение ширины запрещенной зоны  $\Delta E_{\text{зап}}$  полупроводника.

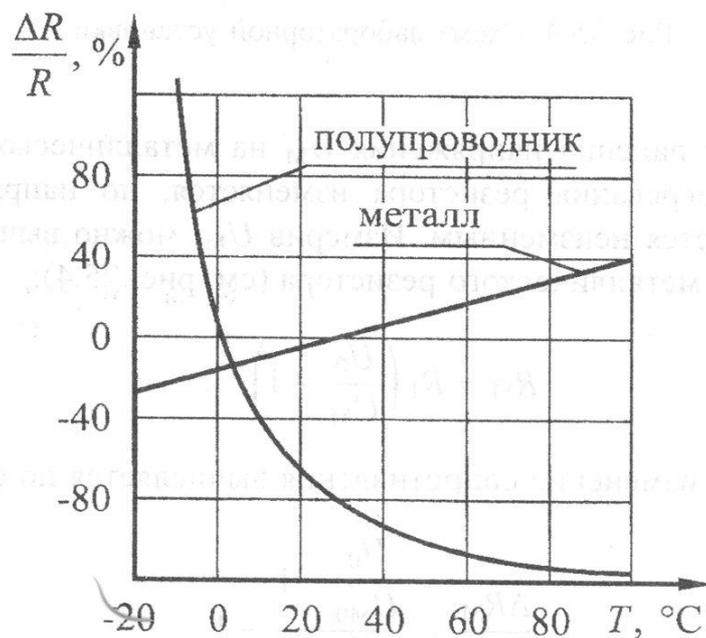


Рис. 75.5. Температурные зависимости относительных изменений сопротивлений металлов и полупроводников

При не меняющемся токе через резистор падение напряжения  $U_{\Pi}$  на нем обратно пропорционально удельной проводимости вещества резистора:

$$U_{\Pi} = i \cdot R_{\Pi} \sim \rho = \frac{1}{\sigma}, \quad (75.16)$$

где  $R_{\Pi}$  – сопротивление резистора;  $\rho$  – удельное сопротивление его вещества.

Используя формулу (75.10), найдем значение отношения  $\frac{U_{\Pi}}{U_{\Pi 0}}$ :

$$\frac{U_{\Pi}}{U_{\Pi 0}} = \frac{1}{\sigma_0 \exp\left[-\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2k_0 T}\right]} : \frac{1}{\sigma_0 \exp\left[-\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2k_0 T_0}\right]} = \exp\left[\frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2k_0} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]. \quad (75.17)$$

Логарифмируя формулу (75.17) получим:

$$\ln U_{\Pi} - \ln U_{\Pi 0} = \frac{\Delta E_{\text{зап}}}{2k_0} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right). \quad (75.18)$$

Из формулы (75.18) можно получить выражение для ширины запрещенной зоны:

$$\Delta E_{\text{зап}} = 2k_0 \cdot \frac{\ln U_{\Pi} - \ln U_{\Pi 0}}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}}. \quad (75.19)$$

Здесь  $k_0$  – постоянная Больцмана,  $k_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Построим график зависимости  $\ln U_{\Pi}$  от  $\frac{1}{T}$ . Примерный вид графика показан на рис. 75.6.

На графике крестиками обозначены экспериментальные точки. Выберем на прямолинейной части графика две произвольные точки 1 и 2. Дробь в формуле (75.19) найдем по графику как отношение разницы координат этих точек по оси ординат и оси абсцисс и вычислим  $\Delta E$ .

## VI. Порядок выполнения работы

1. Включить лабораторную установку в сеть, тумблер «Вкл» перевести в рабочее положение.
2. Включить соответствующим тумблером электрическую печь.

*Внимание! После включения печи темп выполнения работы определяется ходом естественного процесса нагревания образца. Будьте внимательны!*



6. На следующем рисунке построить график зависимости  $\ln U_{\text{П}} = f\left(\frac{1}{T}\right)$ .
7. Для двух точек на прямолинейной части построенного в п. 6 графика определить значения  $(\ln U_2 - \ln U_1)$  и  $\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$ . Вычислить по формуле (75.19) ширину запрещенной зоны. Результат представить в электронвольтах –  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .
8. На основе полученных результатов сделать выводы об отличиях температурных зависимостей электропроводности металлов и полупроводников.

## VII. Контрольные вопросы

1. Объясните на основании формулы (75.6), какой становится проводимость металлов при  $T \rightarrow 0$ ? Дайте физическую интерпретацию ответа.
2. Объясните на основании формулы (75.10), какой становится проводимость полупроводников при  $T \rightarrow 0$ ;  $T \rightarrow \infty$ ? Дайте физическую интерпретацию ответа.
3. Постройте качественный вид зависимости удельной проводимости полупроводника  $\sigma(T)$ .
4. Постройте качественный вид зависимости удельной проводимости полупроводника  $\sigma = F(\Delta E_{\text{зап}})$  при постоянной температуре.
5. Изложите теоретические основы метода определения  $\Delta E_{\text{зап}}$ , используемую в данной работе.