# РАБОТА 2.02П
# ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКА

## Задача

1. Измерить электрическое сопротивление полупроводникового образца в диапазоне температур от комнатной до 70°С.
2. По результатам п.1 вычислить ширину запрещенной зоны полупроводника.
3. Для одной из температур вычислить удельное сопротивление полупроводникового образца.

## Введение

Электрический ток есть направленное движение заряженных частиц - свободных носителей заряда. Без внешнего электрического поля эти носители совершают беспорядочное тепловое движение. Средний модуль скорости теплового движения электронов при комнатных температурах порядка $10^5$ м/с. Внешнее электрическое поле действует на носитель заряда силой

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q, \qquad (1)$$

где $\vec{E}$ - напряженность поля, q - заряд носителя. Таким образом, внешнее поле создает направленное движение носителей заряда - электрический ток с плотностью тока

$$\vec{j} = n \cdot q \cdot \vec{u}\ . \qquad (2)$$

Здесь n - концентрация носителей заряда; $\vec{u} = (\vec{v})$ - направленная (дрейфовая) скорость носителей. Если ток практически создается одним типом носителей (например, электронами), формула (2) дает полную плотность тока в испытуемом образце.

В кристаллах (и еще в ряде сред) носители заряда претерпевают частые столкновения с другими частицами. Это ведет к двум важным следствиям: дрейфовая скорость носителей много меньше средней скорости их теплового движения (u << v) и пропорциональна силе $\vec{F}$, а следовательно и напряженности поля

$$\vec{u} = \mu \cdot \vec{E}$$

(3)

Величину μ называют подвижностью носителей заряда. Пропорциональной напряженности поля оказывается и плотность тока: из (2) и (3) следует

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \qquad (4)$$

где

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu \qquad (5)$$

есть параметр конкретного материала - его удельная проводимость. Обратную величину $\rho = 1/\sigma$ называют удельным сопротивлением. Соотношение (4) представляет собой дифференциальную (векторную) форму закона Ома.

В полупроводнике валентные электроны связаны с ядрами атомов значительно сильнее, чем в металле. «Оторваться» от атома и превратиться в электрон проводимости могут лишь те из них, которые обладают избыточной энергией, не меньшей некоторого ε; ε - называют шириной запрещенной зоны. В чистом полупроводнике разрыв каждой связи приводит к образованию пары электрон-дырка (разорванная межатомная связь) [3, с. 200-204]. Дырки перемещаются в направлении внешнего электрического поля, то есть являются свободными носителями положительного элементарного заряда ($^{+}$e). Плотность тока в полупроводнике слагается из плотности тока электронов $\vec{j}_{-}$ и плотности тока дырок $\vec{j}_{+}$; $\vec{j}_{п} = \vec{j}_{-} + \vec{j}_{+}$. Следовательно, удельная проводимость (см. формулу (5))

$$\sigma_{п} = e \cdot n \cdot (\mu_{-} + \mu_{+}), \qquad (8)$$

так как в собственном полупроводнике концентрации электронов и дырок одинаковы ($n_{+} = n_{-} = n$), а подвижности их $\mu_{-}$ и $\mu_{+}$ различны. Но $\mu_{-}$ и $\mu_{+}$ зависят от температуры много слабее,

чем концентрация n носителей каждого знака. Поэтому для полупроводника можно приближенно считать $\sigma_п \sim n$.

Разрыв связей (генерация свободных носителей) достигается за счет энергии тепловых колебаний атомов. Среднее ее значение порядка kT (k - постоянная Больцмана; при комнатной температуре $kT \approx 4\cdot10^{-21}$ Дж $\approx 2.5\cdot10^{-2}$ эВ). Процесс генерации носителей сопровождается обратным процессом рекомбинации электронов проводимости с дырками. Равновесие наступает, когда средняя частота атомов рекомбинации равна средней частоте атомов генерации. Расчет дает, что равновесная концентрация свободных носителей при этом

$$n \sim \exp\left(-\frac{\varepsilon}{2kT}\right). \tag{9}$$

Следовательно, удельная проводимость полупроводника зависит от температуры следующим образом:

$$\sigma_n = \sigma^* \exp\left(-\frac{\varepsilon}{2kT}\right), \tag{10}$$

а удельное сопротивление

$$\rho_n = \frac{1}{\sigma_n} = \rho^* \exp\left(\frac{\varepsilon}{2kT}\right). \tag{11}$$

Если однородный полупроводниковый образец весь имеет температуру T, то зависимость его сопротивления от этой температуры можно описать формулой

$$R_n = R^* \exp\left(\frac{\varepsilon}{2kT}\right). \tag{12}$$

Вид этой зависимости показан на рис. 1. Логарифмирование соотношения (12) дает

$$\ln\frac{R_n}{R^*} = \frac{\varepsilon}{2kT}. \tag{13}$$

Вид этой зависимости представлен на рис.2.

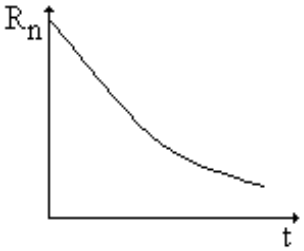


Рис.1

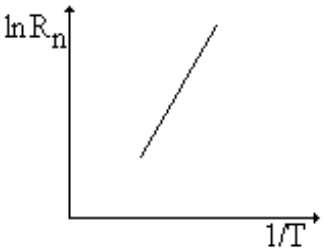


Рис.2

Из измерений на полупроводниковом образце можно вычислить ширину запрещенной зоны

$$\varepsilon = 2k\frac{\Delta(\ln R_n)}{\Delta(1/T)}. \tag{14}$$

В этой работе образцами служат параллелепипеды из германия и кремния. Сопротивление таких образцов описывается известной формулой

$$R = \rho\frac{\ell}{S}, \tag{15}$$

где $\ell$ - длина образца, S - площадь его поперечного сечения. Измерив R, можно вычислить для каждого из исследуемых материалов удельное сопротивление $\rho$ при любой из использованных температур.

**Установка**

Схема установки приведена на рис. 3.

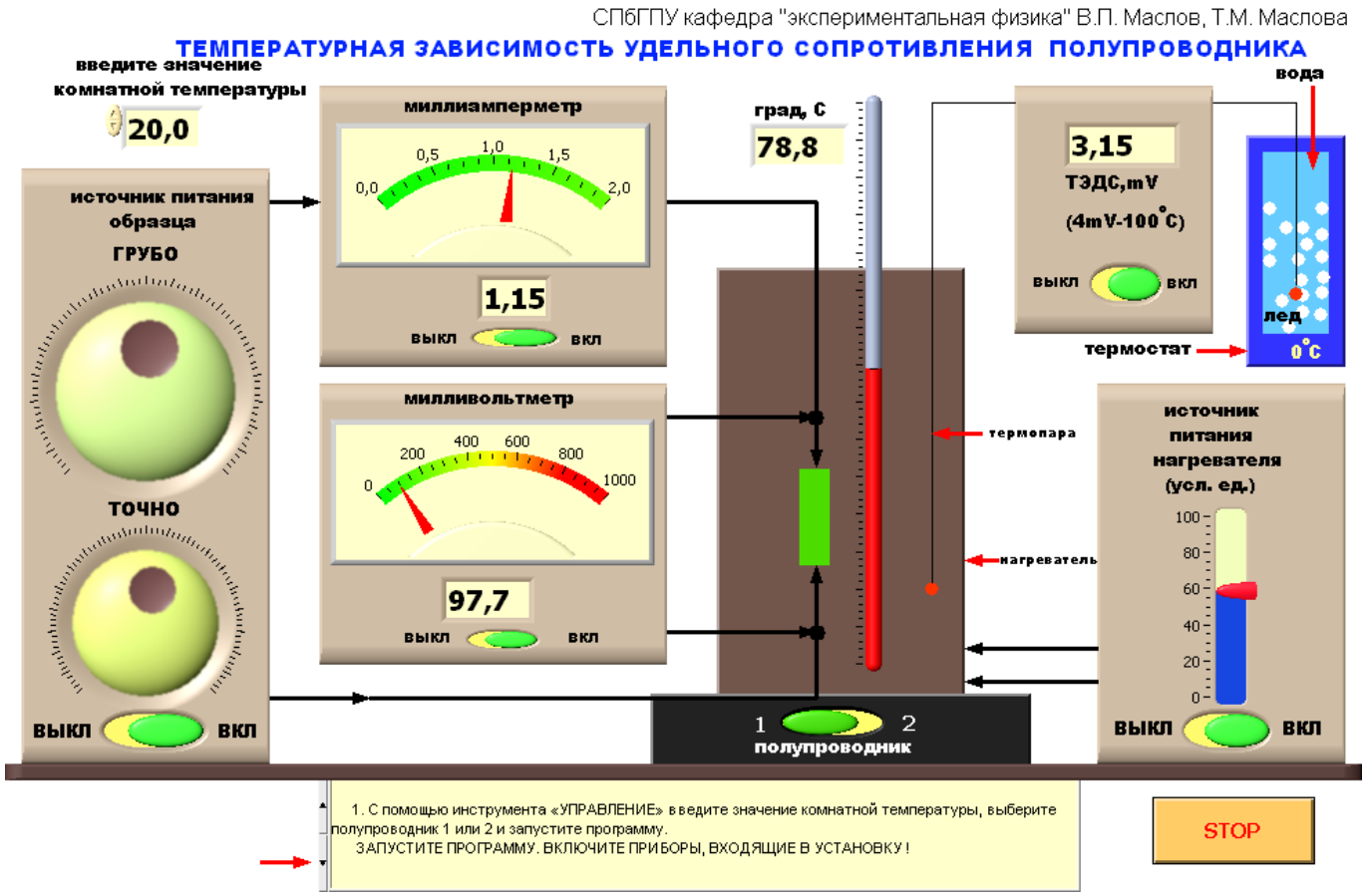


Рис.3

Полупроводниковый образец помещен в нагреватель. Изменение мощности нагревателя осуществляется источником питания нагревателя. Для измерения температуры используется медь-константановая термопара («холодный» конец термопары находится в термостате при 0ºС) и градусник. Ток через образец устанавливается источником питания и контролируется миллиамперметром. Падение напряжения на полупроводнике измеряется милливольтметром. Тип полупроводника выбирается переключателем «полупроводник».

## Измерения и обработка результатов

1. С помощью инструмента «УПРАВЛЕНИЕ» введите значение комнатной температуры, выберите полупроводник 1 или 2 и запустите программу.
2. С помощью инструмента «УПРАВЛЕНИЕ» регулятором источника питания установите ток через образец (рекомендуемое значение 1 mA).
3. Изменяйте мощность нагревателя, регулируя напряжение на источнике питания нагревателя. Результаты измерений заносите в таблицу 1.

Таблица 1

| № | $U_т$, мВ | $R_п$., Ом | t, ºС | T,K | 1/T, $K^{-1}$ | Ln $R_п$. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | |
| ... | | | | | | |
| 20 | | | | | | |

4. Проведите необходимые вычисления, заполните все графы таблицы 1.
5. Постройте графики зависимостей $R_п$.=$R_п$.(t) и Ln $R_п$.=(1/T). На последнем графике в соответствии с формулой ($\varepsilon = 2k\frac{\Delta(\ln R_п)}{\Delta(1/T)}$) методом парных точек вычислите угловой коэффициент

$$\gamma = \frac{\varepsilon}{2k} = \frac{d(\ln R_{п.})}{d(1/T)}$$

и его погрешность. Для вычислений пользуйтесь таблицей 2.

Таблица 2

| Пары точек i j | $\ln\frac{R_{пj}}{R_{пi}}$ | $\left(\frac{1}{T}\right)_j - \left(\frac{1}{T}\right)_i$ $K^{-1}$ | $\gamma_{ij}$, K | $\gamma_{ij} - <\gamma>$, K | $(\gamma_{ij} - <\gamma>)^2$, $K^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| $<\gamma> =$ | | | | | |

6.Вычислите ширину запрещенной зоны полупроводника и погрешность ее измерения, пользуясь тем, что относительные погрешности $\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$. Запишите результаты.

7. Вычислите удельное сопротивление полупроводника при комнатной температуре.
8. Запишите окончательный результат в стандартной форме и сделайте выводы по работе.

**Литература**


1. Электричество и магнетизм (методические указания к лабораторным работам). СПбГТУ, 1997
2. Обработка экспериментальных результатов (методические указания к лабораторным работам). СПбГТУ, 1998.
3. Савельев И.В. Курс общей физии. Т.2, М., Наука,1982