

# Определение температурной зависимости электропроводности полупроводника

А.Н. Якименко, Н.М. Шибанова

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Измерить удельную проводимость полупроводникового образца в зависимости от его температуры. По результатам измерений определить ширину запрещенной зоны.

## ЗАДАЧИ

1. Измерить величину тока через образец и продольное напряжение на нём в зависимости от температуры.
2. По результатам п.1, используя геометрические размеры образца, рассчитать величину удельной проводимости  $\sigma$ , построить график  $\sigma = f(1/T)$ .
3. Выделить на графике линейный участок, соответствующий собственной проводимости образца, по коэффициенту наклона которого определить ширину запрещенной зоны.

## ВВЕДЕНИЕ

Под понятием электрический ток в полупроводнике подразумевают упорядоченное движение носителей заряда – электронов проводимости и дырок. Плотность тока  $j = \sigma E$ , где  $\sigma = en\mu$  – удельная проводимость вещества,  $e$ ,  $n$  и  $\mu$  – элементарный заряд, концентрация и подвижность носителей заряда соответственно,  $E$  – напряженность электрического поля. Зная основные параметры участка электрической цепи можно вычислить удельную проводимость  $\sigma$  по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{I \cdot l}{A \cdot U}$$

где:  $\rho$  – удельное сопротивление,  $l$  – длина образца,  $A$  – площадь поперечного сечения,  $I$  – ток через образец,  $U$  – продольное напряжение.

Проводимость полупроводников сильно зависит от температуры (см. рис. 1).

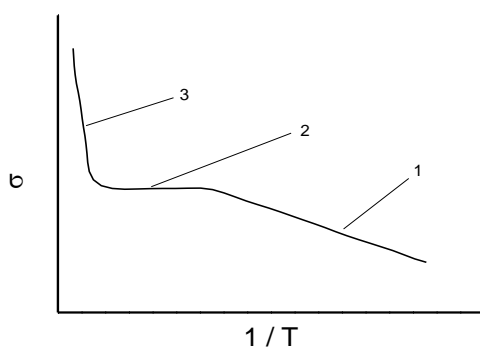


Рис. 1. Удельная проводимость полупроводника как функция от обратной температуры.

На графике температурной зависимости удельной проводимости можно выделить три области: при низкой температуре наблюдается несобственная проводимость (область 1, рис. 1), т.е. при росте температуры в этой области носители заряда генерируются из примесей. При умеренной температуре (область 2, рис. 1) следует говорить об истощении генерации из примесей, т.к. дальнейшее повышение температуры не сопровождается увеличением проводимости. При высокой температуре (область 3, рис. 1) доминирует собственная проводимость. В этом случае за счет энергии тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки часть ковалентных связей разрушается и появляется одинаковое количество свободных электронов проводимости и дырок.

Температурная зависимость в этом случае описывается в основном экспоненциальной зависимостью:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp - \frac{E_g}{2kT}$$

где:  $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура образца.

Логарифм этого выражения:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2kT}$$

представляет собой линейное уравнение вида:  $y = a + bx$ , где  $y = \ln \sigma$ ,  $x = 1/T$ ,  $b = -\frac{E_g}{2k}$  – коэффициент наклона прямолинейного участка 3 на рис.1.

Таким образом, из теории следует, что угловой коэффициент зависимости  $\ln \sigma(1/T)$  позволяет определить ширину запрещенной зоны.

### Экспериментальная установка

Фотография экспериментальной установки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Экспериментальная установка для определения ширины запрещённой зоны германия.

Исследуемый образец нелегированного Ge полупроводника с размерами (10 x 20 x 1) мм<sup>3</sup> и удельным сопротивлением ~50 Ом·см закреплен на плате (рис. 3), помещенной в измерительный модуль (рис. 4 и 5).

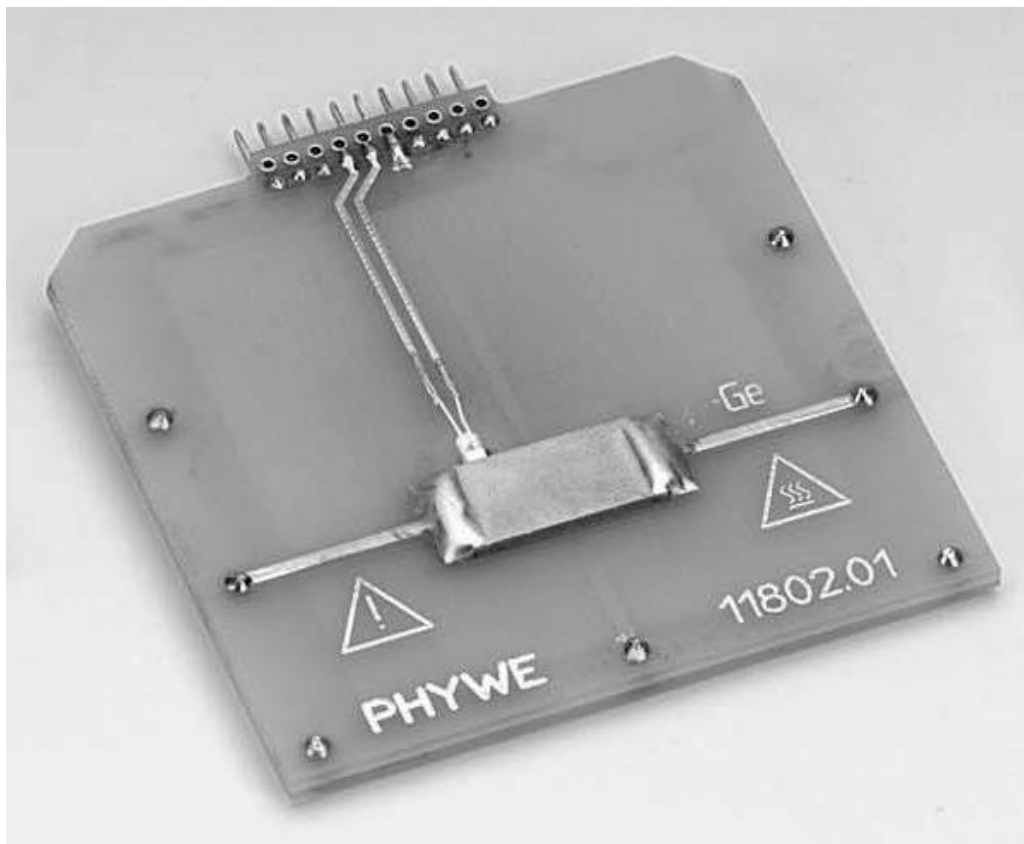


Рис. 3. Сменная плата, с закреплённым образцом.

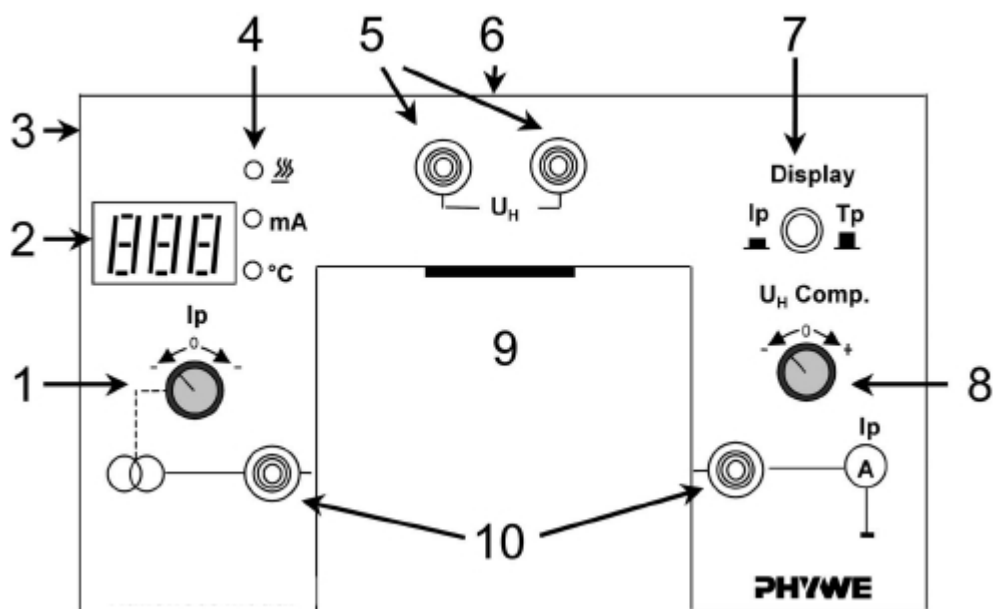


Рис. 4. Лицевая панель измерительного модуля с элементами управления и индикатором.

Функциональные элементы лицевой панели измерительного модуля:

1. Ручка регулирования тока через образец  $I_p$ .
2. Цифровой индикатор, показывающий, по выбору, ток через образец либо его температуру.
3. Резьбовое отверстие для крепления модуля.
4. Светодиодные индикаторы, показывающие включение режима нагрева образца, а также режим индикации либо тока через образец, либо температуры образца.
5. Клеммы для измерения поперечного напряжения на образце  $U_H$  (не подключены).
6. Отверстие для крепления магнитного зонда.
7. Кнопка выбора режима индикации: если кнопка нажата, то измеряется ток через образец  $I_p$ , если отжата – то температура образца  $T_p$ .
8. Ручка компенсации поперечного напряжения (не задействована).
9. Выемка для крепления сменной платы с электрическим разъёмом.
10. Клеммы для измерения продольного напряжения на образце  $U_p$ .

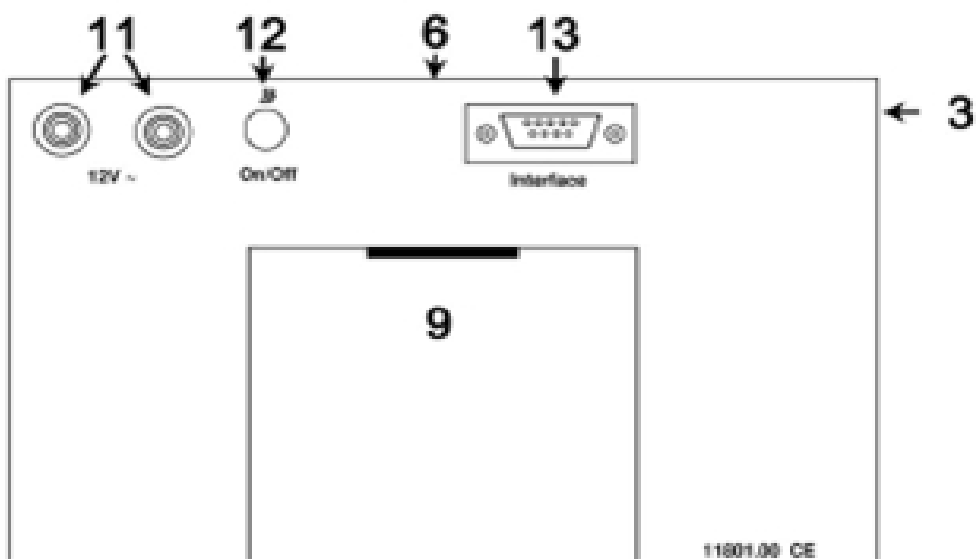


Рис. 5. Задняя панель измерительного модуля.

Функциональные элементы задней панели измерительного модуля:

11. Клеммы для подключения внешнего источника напряжения 12 В.
12. **Кнопка включения нагревателя образца.**
13. Разъём интерфейса RS-232 для подключения измерительного модуля к компьютеру при работе модуля в составе автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса.

Измерительный модуль непосредственно связан с внешним источником переменного напряжения 12 В, подключенным к его задней панели (поз. 11 на рис. 5). Падение напряжения на образце измеряется вольтметром, который подключается к двум нижним клеммам на передней стороне модуля (поз. 10 на рис. 4). Температура измеряется с помощью платинового термометра сопротивлением 100 Ом, находящегося в контакте с образцом. Сопротивление термометра

измеряется встроенным в измерительный модуль прибором, и выводится на встроенный индикатор (поз. 2) в единицах °С. Так же на этот индикатор может быть выведено значение тока через образец в мА, измеряемое встроенным амперметром. Режим «Ток» / «Температура» изменяется кнопкой «Дисплей» (поз.7). Плата с образцом (рис.3) содержит нагревательную спираль, максимальная температура нагрева которой не должна превышать 170 °С (контролируется встроенным в измерительный модуль реле). **Нагревательная спираль включается кнопкой “on/off” (поз.12 на рис. 5) на обратной стороне панели модуля с образцом.** Отключение при достижении максимальной температуры происходит автоматически.

## ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Ознакомьтесь с правилами техники безопасности. Выполните указанные в них рекомендации. **Будьте осторожны!** Некоторые части экспериментальной установки нагреваются до высокой температуры. При не аккуратном обращении это может вызвать термический ожог кожи. В случае если вы получили травму, немедленно сообщите об этом преподавателю или лаборанту, воспользуйтесь медицинской аптечкой, а затем обратитесь в медицинское учреждение для получения квалифицированной медицинской помощи.
2. Проверьте правильность подключения приборов к соответствующим клеммам на панели установки. Включите вольтметр, затем источник питания, дайте им прогреться.
3. Установите силу тока через образец 5 мА (на рис. 4: ручка 1, индикатор 2, кнопка 7 нажата). Ток должен оставаться постоянным в течение эксперимента.
4. Выберите на дисплее модуля Холла режим измерения температуры (кнопка 7 отжата) и включите нагревательную спираль кнопкой 12 “on/off” на обратной стороне модуля (загорится светодиод). Изменение продольного напряжения  $U_p$  в температурном интервале от комнатной температуры до 170 °С измеряется и выводится на дисплей вольтметра. Когда максимальная температура 170 °С будет достигнута и процесс нагревания завершен, нагревательная спираль автоматически отключается (проверить это по характерному щелчку реле). **Внимание!** Если нагрев не прекратился, немедленно выключите установку и обратитесь к преподавателю или лаборанту.
5. Зависимость продольного напряжения  $U_p$  от температуры снимают при охлаждении образца. В интервале температур 170...100 °С измерения целесообразно проводить через 10 °С, а в интервале 100...25 °С - через 5 °С. Типичная кривая температурной зависимости продольного напряжения  $U_p$  в исследуемом температурном интервале приведена на рис. 6.

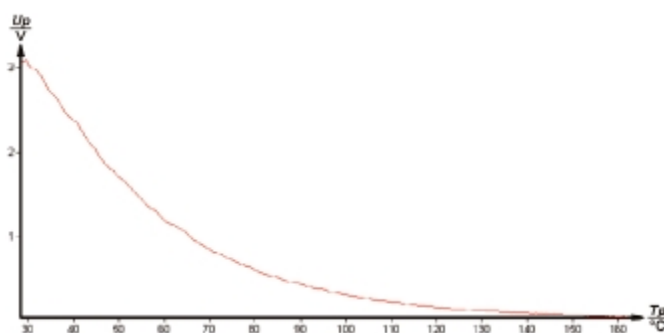


Рис. 6. Типовая зависимость напряжения на образце от температуры.

6. При выбранных ранее значениях температуры  $T_p$  записывайте в таблицу 1 продольное падение напряжения  $U_p$  на полупроводниковом образце. Напряжение экспоненциально зависит от температуры, поэтому не забывайте поддерживать оптимальную точность измерения вольтметра своевременным переключением его пределов измерения. Учтите, что сначала охлаждение происходит достаточно быстро. В течение измерений следите за постоянством тока через образец.
7. После окончания измерений выключите источник питания, затем вольтметр.

Таблица 1. Результаты прямых измерений.

№ опыта п/п.	$T_p, ^\circ\text{C}$	$U_p, \text{мВ}$

### Обработка результатов

1. В таблицу 2 запишите результаты вычислений проводимости и удельной проводимости образца,  $1000/T$  и  $\ln \sigma$ . Приведите примеры вычислений всех величин.

Таблица 2. Первичная обработка результатов измерений

№ опыта п/п.	$T, \text{К}$	$1000/T, \text{К}^{-1}$	$G, \text{См}$	$\sigma, \text{См}\cdot\text{м}^{-1}$	$\ln \sigma,$

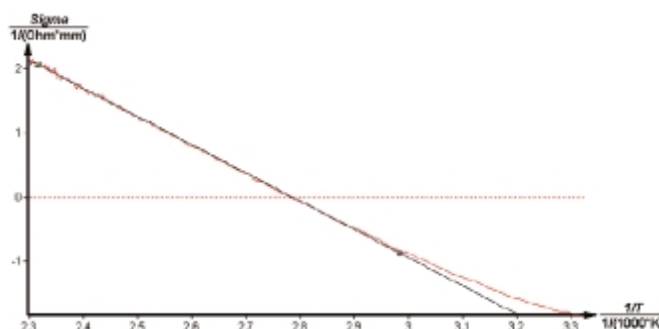


Рис. 7. Линеаризация проводимости полупроводника от обратной температуры.

2. Постройте график зависимости  $\ln \sigma = f(1000/T)$ . Выделите диапазон температур, где эта прямая является линейной (см. рис. 7). Пользуясь методом парных точек или наименьших квадратов, найдите угловой коэффициент прямой, равный  $1000 \cdot b$ , и погрешность его определения. Вместо графика зависимости  $\ln \sigma = f(1000/T)$  можно строить график  $\sigma = f(1000/T)$ , откладывая величину  $\sigma$  в «логарифмическом масштабе», как это и сделано на рис. 7. В этом случае коэффициент наклона прямой может потребовать корректировки в соответствии с величиной основания логарифма, использованного для построения логарифмической шкалы. Учтите эту поправку самостоятельно.

3. Найдите ширину запрещенной зоны нелегированного образца германия и оцените её погрешность, как погрешность косвенных измерений. Подберите надежный справочник физических величин, содержащий основные параметры полупроводников, в том числе ширину запрещенной зоны, ознакомьтесь с приведенными данными, обдумайте их.

4. Проведите анализ результатов работы. Сравните полученное значение  $E_g$  с табличным. Сделайте развернутый вывод, отражающий как количественное сравнение полученных результатов, так и качественное понимание изученного физического явления.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как зависит от температуры электропроводность полупроводника и почему?
2. Зачем надо определять ширину запрещенной зоны полупроводников?
3. Каков механизм собственной проводимости, и чем он отличается от механизма примесной проводимости?
4. Какие трудности встречаются при измерении температуры на этой установке? При каких температурах можно ожидать отклонения от линейности в зависимости  $\ln\sigma = f(1/T)$ ?
5. Каким образом данная физическая лабораторная работа могла бы помочь в освоении вашей будущей профессии?