

## Тема учебного предмета: «Физические процессы в полупроводниках»

### Лабораторная работа № 5

#### Тема работы: «Определение зависимости сопротивления полупроводников от температуры»

##### 1. Цель работы

Научить устанавливать зависимость между температурой и сопротивлением полупроводников.

##### 2. Задание

Измерить сопротивление полупроводников при различных температурах, построить график зависимости  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$ .

##### 3. Оснащение работы

1. Стенд НТЦ – 05.13 «Электротехнические материалы».
2. Модуль №1 «Температурная зависимость сопротивления полупроводников».
3. Мультиметр.
4. Измеритель RLC.
5. Канцелярские принадлежности (ручка, карандаш, линейка и др.).
6. Калькулятор.

##### 4. Основные теоретические сведения

Большая группа материалов с электронной  $n$  и дырочной  $p$  проводимостью, удельное сопротивление  $\rho$  которых при температуре 20 °С больше, чем у проводников, но меньше, чем у диэлектриков, относится к **полупроводникам**. С точки зрения зонной теории твердого тела, к полупроводникам относятся те материалы, ширина *запрещенной зоны* (33) которых имеет величину в пределах от 0,05 до 3 эВ.

Электрофизические характеристики полупроводниковых материалов зависят не только от их природы, но и от интенсивности внешнего энергетического воздействия, природы и концентрации легирующей примеси – примеси, которую специально вводят в полупроводниковый материал для создания определенного типа и величины электропроводности. Полупроводниковый материал, используемый для изготовления приборов, должен иметь очень высокую степень чистоты.

Управляемость удельной электропроводностью полупроводниковых материалов посредством температуры, света, электрического поля, механического напряжения положена в основу принципа действия соответствующих приборов: терморезисторов, фоторезисторов, нелинейных резисторов (вариаторов), тензорезисторов и т.д.

Наличие двух или более взаимно связанных  $p$ - $n$ -переходов образуют управляемые системы – кристаллические транзисторы и тиристоры.

Полупроводниковые системы широко используют для преобразования различных видов энергии в электрическую и наоборот.

*Величина и тип электропроводности полупроводников зависят от природы и концентрации примеси, в том числе специально введенной (легирующей).*

Концентрация легирующей примеси обычно незначительна, например у *Ge* она составляет один атом на  $10^{10}$ – $10^{12}$  атомов полупроводника. В этой связи все полупроводники можно разбить на две группы: собственные и примесные.

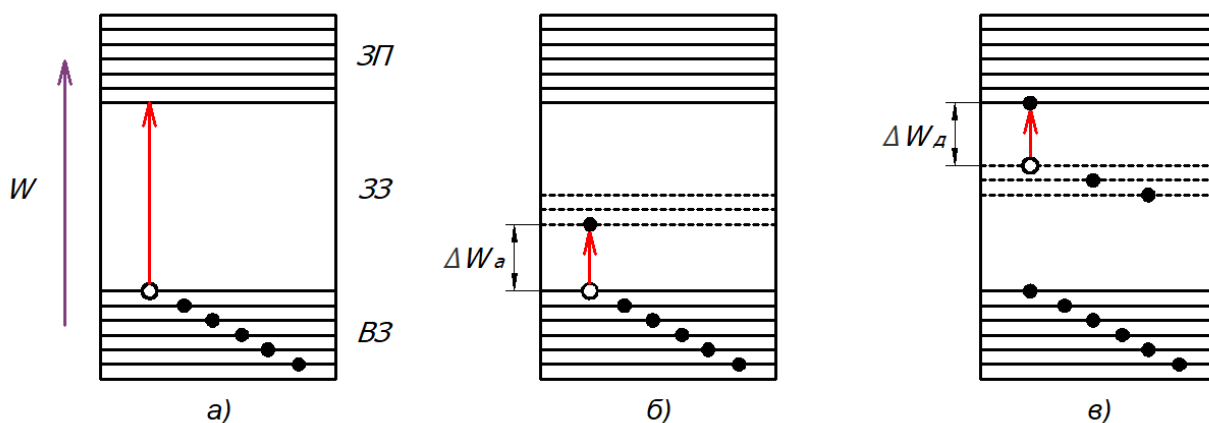
**Собственные полупроводники** не содержат легирующие примеси; к ним относятся высокой степени чистоты простые полупроводники: кремний *Si*, германий *Ge*, селен *Se*, теллур *Te* и др. и многие полупроводниковые химические соединения: арсенид галлия *GaAs*, антимонид индия *InSb*, арсенид индия *InAs* и др.

**Примесные полупроводники** всегда содержат донорную или акцепторную примесь. В производстве полупроводниковых приборов примесные полупроводники используют чаще, поскольку в них свободные носители заряда образуются при более низких температурах (чем в собственных полупроводниках), которые отвечают рабочему интервалу температур полупроводникового прибора.

**Электропроводность собственных полупроводников.** В собственных полупроводниках при достаточности тепловой энергии решетки или в результате внешнего энергетического воздействия электрон(ы) перейдет(ут) из валентной зоны (*ВЗ*) в зону проводимости (*ЗП*) и станет(ут) свободным(и). Необходимая для этого перехода энергия определяется шириной запрещенной зоны ( $\Delta W$ ) —  $\Delta W$  полупроводника. При комнатной температуре эта энергия может возникать вследствие флуктуации тепловых колебаний решетки (средней тепловой энергии решетки для такого перехода недостаточно). С уходом электрона в *ЗП* в валентной зоне остается свободным энергетический уровень, называемый **дыркой**, а сама *ВЗ* становится не полностью заполненной (рисунок 1, а). Электрон имеет отрицательный заряд, дырку принято считать положительно заряженной частицей, численно равной заряду электрона.

Таким образом, в кристалле образуется пара свободных носителей заряда — электрон в *ЗП* и дырка в *ВЗ*, которые и создают собственную электропроводность полупроводника, тип которой электронно-дырочный.

В отсутствие внешнего электрического поля электрон и дырка совершают тепловые хаотические движения в пределах кристалла, а под действием поля осуществляют дополнительно направленное движение — *дрейф*, обуславливая тем самым электрический ток. Если концентрации свободных электронов и дырок равны между собой, то подвижность у них различна. В результате более низких значений эффективной массы и инерционности при движении в поле кристаллической решетки свободные электроны более подвижны, чем дырки. Поэтому собственная электропроводность полупроводников имеет слабо преобладающий электронный тип.



*a* – полупроводник без лигирующей примеси; *б* – полупроводник (*p*-типа) с акцепторной примесью; *в* – полупроводник (*n*-типа) с донорной примесью;  $\Delta W_a$  – энергия активации (образования) дырок в ВЗ полупроводника за счет перехода электронов на уровни акцепторной примеси;  $\Delta W_d$  – энергия активации электронов – энергия, необходимая для перехода электронов с уровней донорной примеси в ЗП полупроводника  
Рисунок 1 – Энергетические диаграммы полупроводников:

**Электропроводность примесных полупроводников.** В примесных полупроводниках атомы примеси либо поставляют электроны в ЗП полупроводника, либо принимают их с уровней ВЗ. Эти переходы электронов осуществляются при существенно меньших затратах энергии, которые требуются электронам для преодоления потенциального барьера в виде 33 полупроводника. Поэтому эти виды переходов в примесных полупроводниках являются основными, доминирующими над переходом электронов из ВЗ в ЗП.

Атомы примеси, размещаясь в запрещенной зоне полупроводника, создают в пределах этой зоны дискретные энергетические уровни либо у нижнего ее края вблизи к ВЗ, либо – у верхнего, вблизи к ЗП (рисунок 1, б, в). Вследствие своей малой концентрации атомы примеси располагаются в решетке полупроводника на очень больших расстояниях друг от друга, поэтому между собой не взаимодействуют.

При температуре  $0\text{ K}$  и в отсутствие другого энергетического воздействия все валентные электроны полупроводника находятся на энергетических уровнях ВЗ. В этом состоянии полупроводник подобен диэлектрику и его проводимость равна нулю. Для переброса электронов из ВЗ в ЗП нужна дополнительная энергия для преодоления потенциального барьера в виде 33. При температуре большей  $0\text{ K}$  и дальнейшем ее повышении электроны под действием тепловой энергии начнут переходить в ЗП; в результате образуются пары свободных носителей заряда – электроны в ЗП, а дырки – в ВЗ. Этот процесс называют тепловой генерацией свободных носителей заряда. В ЗП (благодаря наличию свободных уровней) электроны под действием приложенного электрического поля будут перемещаться с уровня на уровень, образуя электрический ток. Аналогично в ВЗ дырки образуют электрический ток. Одновременно с тепловой генерацией свободных носителей заряда существует и обратный процесс, когда свободный электрон возвращается в незаполненную ВЗ. Этот процесс называется рекомбинацией электрона с дыркой.

При заданной температуре между этими процессами осуществляется термодинамическое равновесие, в результате чего в ЗП устанавливается некоторая, вполне определенная концентрация свободных электронов, а в ВЗ – дырок проводимости.

В примесных полупроводниках переходы электронов из ВЗ полупроводника на уровни акцепторной примеси и с локальных уровней донорной примеси в ЗП полупроводника осуществляются при более низких затратах энергии, чем переход электронов из ВЗ собственного полупроводника в его ЗП, т. е.  $\Delta W > \Delta W_a$  ( $\Delta W_d$ ). Поэтому электропроводность примесных полупроводников начинает проявляться при более низких температурах, чем электропроводность собственных полупроводников.

Собственная и примесная электропроводности полупроводниковых материалов с ростом температуры возрастают, т.е. они обладают отрицательным коэффициентом сопротивления.

## 5 Порядок выполнения работы

5.1 Изучите основные теоретические сведения.

5.2 Согласно рисунку 2 выполните электрические соединения для проведения измерений.

**!!! Монтаж схемы производите при отключенном питании.**

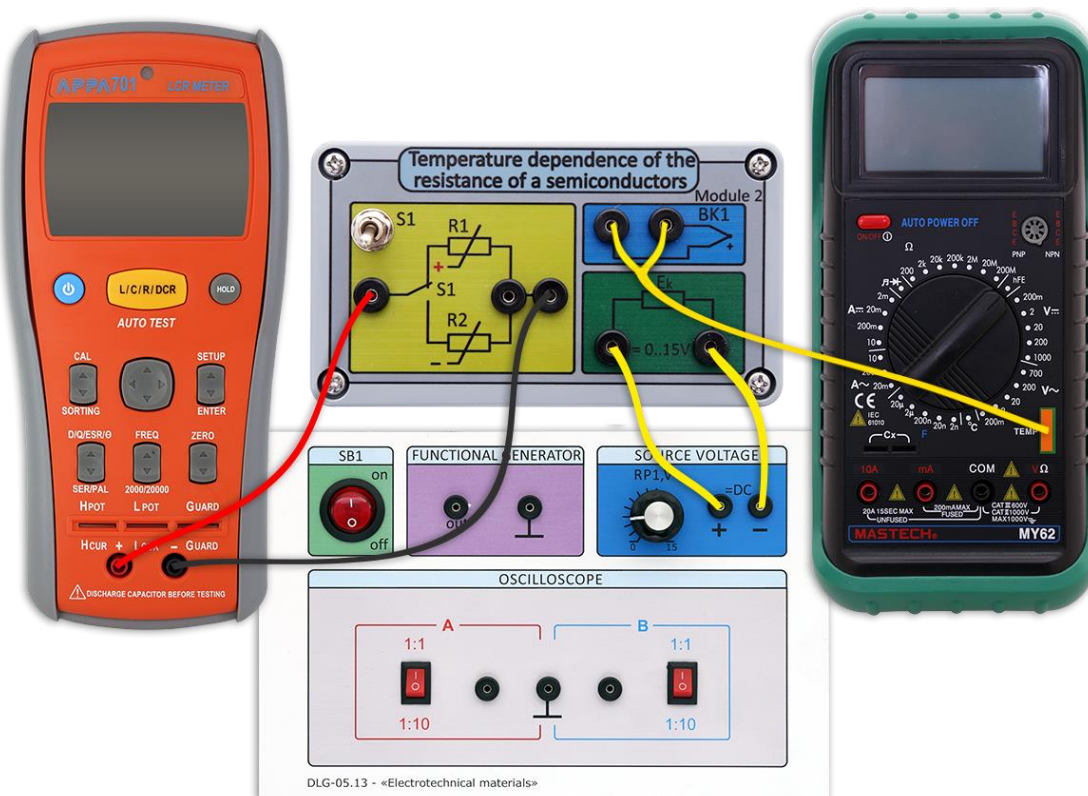


Рисунок 2 – Схема соединений типового комплекта для измерения ТКС полупроводников

В качестве источника питания для нагрева в данной схеме используется источник напряжения «Source Voltage» стенда.

В качестве омметра используйте измеритель RLC, выберите режим измерения сопротивления, нажимая кнопку L/C/R; диапазон измерения выбирается автоматически при измерении.

В качестве термометра используйте мультиметр. Установите режим измерения температуры «°C».

5.3 Поверните ручку потенциометра RP1 на 4 деления вверх от нуля.

5.4 Подайте напряжение питания на комплект включением кнопки SB1 на стенде.

5.5 Включите мультиметры. Если термопара не соединена с гнездами мультиметра на его индикаторе будет отображена комнатная температура. Подключите термопару к входу «ТЕМР» мультиметра и, если показания температуры ниже комнатной, измените полярность подключения (переверните вилку термопары).

5.6 Для измерения сопротивления первого полупроводника переключите тумблер S1 в верхнее положение, для измерения сопротивления второго полупроводника - в нижнее. Полученные значения заносите в таблицу 1.

5.7 Постепенно поворачивая ручку потенциометра RP1 вправо, наблюдайте за показаниями термометра и омметра, и через каждые 5 °C одновременно заносите значения сопротивлений полупроводников и температуры в таблицу 1. Для переключения между проводниками используйте тумблер S1. Измерения проводите до 85°C.

**!!! Не допускается нагревать образцы выше 90°C.**

5.8 Отключите питание и проведите измерения в тех же температурных точках при охлаждении образцов. Полученные значения заносите в таблицу 1. Так как охлаждение ниже 40 °C происходит медленно, допускается не охлаждать ниже 30 – 40 °C (по указанию преподавателя).

5.9 Разберите схему, предоставьте комплекс в полной комплектности и исправности преподавателю или лаборанту.

5.10 По данным опыта (таблица 1) постройте графики зависимостей  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$ . Точку пересечения осей графика выбирать таким образом, чтобы кривая графика занимала максимальную область построения.

5.11 Сделайте обобщающий вывод о характере температурной зависимости сопротивления полупроводников.

5.12 Оформите отчет по рекомендуемой форме.

## **6 Форма отчета о работе**

Лабораторная работа № \_\_\_\_

Номер учебной группы \_\_\_\_\_

Фамилия, инициалы обучающегося \_\_\_\_\_

Дата выполнения работы \_\_\_\_\_

Тема работы \_\_\_\_\_

Цель работы \_\_\_\_\_

Задание: \_\_\_\_\_

Оснащение работы: \_\_\_\_\_

Результаты выполнения работы: \_\_\_\_\_

Таблица 1 – Результаты измерений

№ п/п	Нагревание			Охлаждение		
	t, °C	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	t, °C	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом
1						
2						
...						

График зависимостей  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$ .

Ответы на контрольные вопросы:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

Вывод: \_\_\_\_\_

## 7 Контрольные вопросы и задания

- 1 Объясните отличие полупроводников и проводников.
- 2 Перечислите материалы для изготовления терморезисторов.
- 3 Назовите факторы для управления проводимостью полупроводников.
- 4 Объясните зависимость сопротивления полупроводников от температуры.
- 5 Объясните отличие собственных и примесных полупроводников.

## Рекомендуемая литература

1. Берлин, В.И. Материаловедение: учебник для техникумов / В. И. Берлин, П.С. Костяев, К.Д. Шапкин. – М.: Транспорт, 1979. – 382 с.
2. Гелин, Ф. Д. Материаловедение: пособие с элементами программирования для металлистов / Ф. Д. Гелин, Э. И. Крупицкий, И. П. Позняк. – Минск: Вышэйшая школа, 1977. – 269 с.
3. Журавлева, Л.В. Электроматериаловедение: учебник для нач. проф. образования / Л. В. Журавлева. – М.: Издательский центр “Академия”, 2008. – 352 с.
4. Красько, А.С., Павлович С.Н. Электроматериаловедение: учеб. пособие / А.С. Красько, С.Н. Павлович. – Минск: РИПО, 2012. – 210 с.