

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

Электропроводность полупроводниковых материалов

Цель работы

Изучение стандартных методов определения удельной электрической проводимости полупроводниковых материалов при различных температурах, вычисление энергии активации носителей заряда.

Домашнее задание

- 1) Изучите физические основы и характерные особенности явления электропроводности полупроводников.
- 2) Объясните влияние температуры T на процесс электропроводности величину удельной проводимости полупроводников на примере зависимости $\ln \sigma = F(1/T)$.
- 3) Объясните двух-зондовый метод измерения удельной проводимости.
- 4) Ознакомьтесь с порядком выполнения работы, обработки полученных результатов измерений и оформления отчета по выполненной работе.

Общие положения

Для полупроводниковых материалов характерна зависимость электропроводности от внешних факторов. В частности имеет место ярко выраженная зависимость электропроводности от температуры. Для полупроводников, не имеющих примесей, электропроводность обусловлена собственными подвижными носителями заряда. Этими носителями заряда являются свободные электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Электроны и дырки образуются парами за счет перехода электронов через запрещенную зону шириной ΔE из валентной зоны в зону проводимости за счет теплового движения. Число свободных n электронов в единице объема для собственного полупроводника определяется соотношением

$$n = A \cdot e^{-\frac{\Delta E}{2 \cdot k \cdot T}} \quad (1)$$

где A – коэффициент, определяемый свойствами полупроводника;

k – постоянная Больцмана;

T – температура полупроводника.

Как видно, эта зависимость носит экспоненциальный характер и число носителей заряда быстро растет с ростом температуры.

Удельная проводимость полупроводников σ помимо концентрации определяется также подвижностью носителей заряда μ и величиной заряда электрона e

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu \quad (2)$$

В свою очередь, подвижность определяется как отношение скорости V направленного движения носителей к напряженности поля E

$$\mu = \frac{V}{E} \quad (3)$$

Подвижность зависит от температуры в гораздо меньшей степени, чем концентрация. Поэтому с известной степенью точности температурную зависимость проводимости можно представить в виде

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E}{2 \cdot k \cdot T}} \quad (4)$$

Прологарифмировав выражение (4), получим

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E}{2 \cdot k} \cdot \frac{1}{T} \quad (5)$$

Зависимость $\ln \sigma \left(\frac{1}{T} \right)$ представляет собой прямую линию (рис. 1).

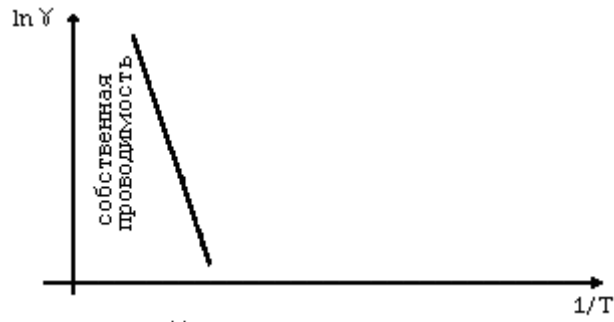


Рис. 1. Зависимость проводимости собственного проводника

Рассмотрим как с помощью соотношения (5) рассчитывается ширина запрещенной зоны. Пусть у нас имеется два измерения при температурах T_1 и $T_2 > T_1$, соответствующие им проводимости σ_1 и σ_2 . Запишем выражение (5) для этих температур

$$\begin{cases} \ln \sigma_1 = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E}{2 \cdot k} \cdot \frac{1}{T_1} \\ \ln \sigma_2 = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E}{2 \cdot k} \cdot \frac{1}{T_2} \end{cases}$$

Вычитая из второго соотношения первое, имеем

$$\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1 = \frac{\Delta E}{2 \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (6)$$

Ширина запрещенной зоны равна

$$\Delta E = 2 \cdot k \cdot \frac{(\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (7)$$

Для изготовления полупроводниковых приборов применяют примесные полупроводники. Примеси, вводимые в полупроводник в очень малых количествах заметно влияют на величину и характер электропроводности полупроводника. Энергетические уровни валентных электронов за счет наличия примеси могут располагаться внутри запрещенной зоны вблизи дна зоны проводимости (рис.). В этом случае для перехода в зону проводимости примесные электроны должны преодолеть не всю ширину запрещенной зоны (составляющую для полупроводников от десятых долей электронвольта до 3-5 эВ), а барьер (энергетическое расстояние от примесного уровня до дна зоны проводимости, составляющая несколько сотых долей электронвольта).

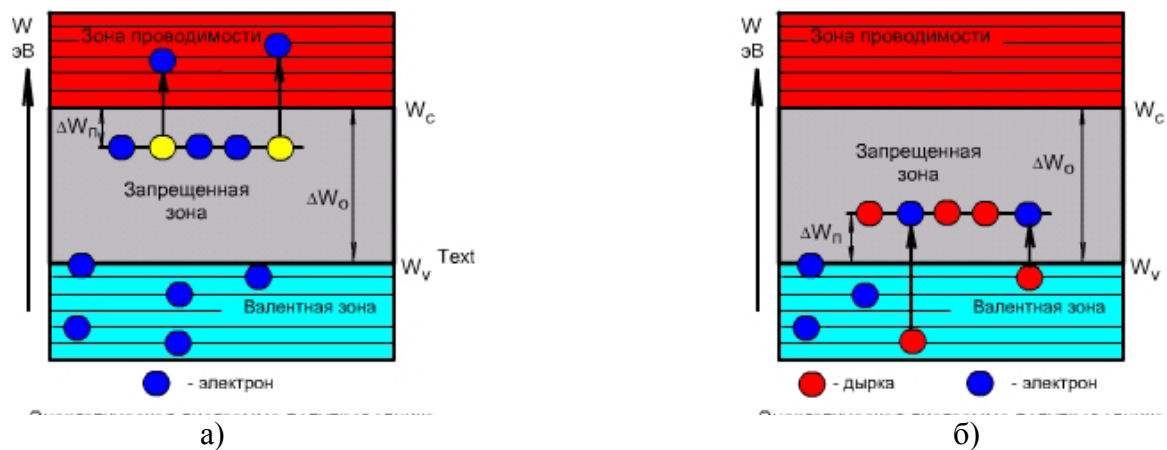


Рис. 2. Энергетические диаграммы полупроводников, содержащих донорные – а) и акцепторные - б) примеси

Такие примесные уровни называются донорными (отдающими электроны в зону проводимости), а сами примесные атомы – донорами. Для других типов примеси примесные уровни располагаются вблизи потолка валентной зоны. Вследствие тепловых колебаний валентные электроны попадают на примесный уровень. Примесный атом захватывает электрон, в валентной зоне образуется вакансия – положительно заряженная дырка. Примесная проводимость в этом случае обусловлена движением дырок в валентной зоне. Такого рода примеси называются акцепторными. Полупроводники с донорными примесями, в которых преобладает электронная проводимость, являются полупроводниками n-типа. Полупроводники с акцепторными примесями, у которых преобладает дырочная проводимость, называются полупроводниками p-типа.

У примесных полупроводников температурная зависимость удельной проводимости имеет вид

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E}{2 \cdot k \cdot T}} + \sigma_{0np} \cdot e^{-\frac{\Delta E_{np}}{2 \cdot k \cdot T}} \quad (8)$$

Первое слагаемое отражает собственную проводимость полупроводника, второе – примесную с энергией активации проводимости ΔE_{np} . Зависимость (8) представлена на рис. 3.

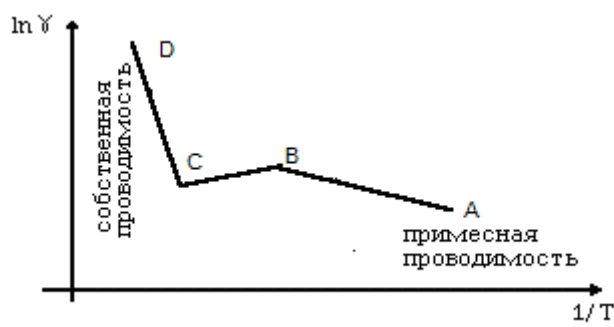


Рис. 3. Зависимость проводимости примесного полупроводника от температуры

При низких температурах имеет место в основном примесная проводимость. При увеличении температуры до некоторого значения примесная проводимость растет за счет

ионизации атомов примеси (участок АВ). При более высоких температурах на некотором интервале (участок ВС) наблюдается некоторое уменьшение проводимости. В этом температурном интервале число примесных носителей заряда достигает насыщения (все атомы примеси ионизированы отдали или приняли электроны в зависимости от того какая примесь – донорная или акцепторная), а их подвижность уменьшается вследствие рассеяния на тепловых колебаниях атомов. Собственная проводимость, обусловленная ионизацией собственных атомов полупроводника, проявляется лишь при больших температурах (участок CD).

Описание лабораторной установки

Измерение удельной электропроводности производится зондовым методом по компенсационной схеме. При этом исключается влияние переходных сопротивлений, возникающих при соприкосновении образца с токоподводящими электродами.

Образец исследуемого материала изготавливается в виде бруска прямоугольного сечения, площадь которого известна. Образец укрепляется в зажиме, который имеет также два зонда А и В (рис.4) в виде игл из вольфрамовой проволоки, прижимающиеся к поверхности образца. Расстояние l между зондами точно измеряется. Последовательно с образцом в токовую цепь включается эталонный резистор с известным сопротивлением R_0 .

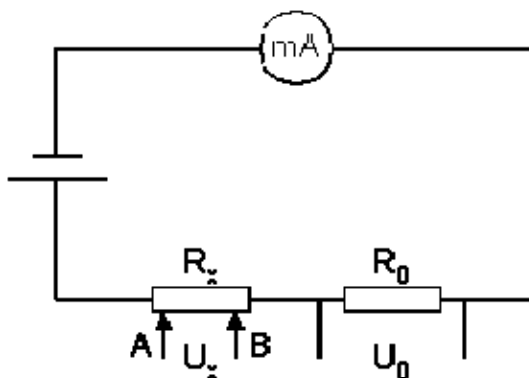


Рис.4. Схема измерения удельной электропроводности полупроводника зондовым методом.

При прохождении постоянного тока как между зондами на образце, так и на эталонном резисторе происходит падение напряжения, которое можно очень точно измерить без потребления мощности в цепи при помощи потенциометра постоянного тока. Измерив падение напряжения U_0 на эталонном резисторе, можно определить ток в цепи и, следовательно, в образце

$$I = \frac{U_0}{R_0} \quad (9)$$

По величине напряжения U_x , измеренному между зондами, и известному току определяется сопротивление исследуемого участка образца

$$R_x = \frac{U_x}{U_0} R_0 \quad (10)$$

Зная длину участка l в см и площадь поперечного сечения S в см^2 , определяем удельную электропроводность образца в $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$

$$\sigma = \frac{l}{R_x} \cdot \frac{i}{S} = \frac{l}{J_x} \cdot \frac{l}{S} \quad (11)$$

Виртуальная лабораторная работа состоит из вкладки «Задание» (рис. 5), на которой размещается информация об образцах и условиях проведения эксперимента и вкладок виртуальных стендов с виртуальными приборами (рис. 6).



Рис. 5. Вкладка «Задание» виртуальной лабораторной работы «Электропроводность полупроводниковых материалов»

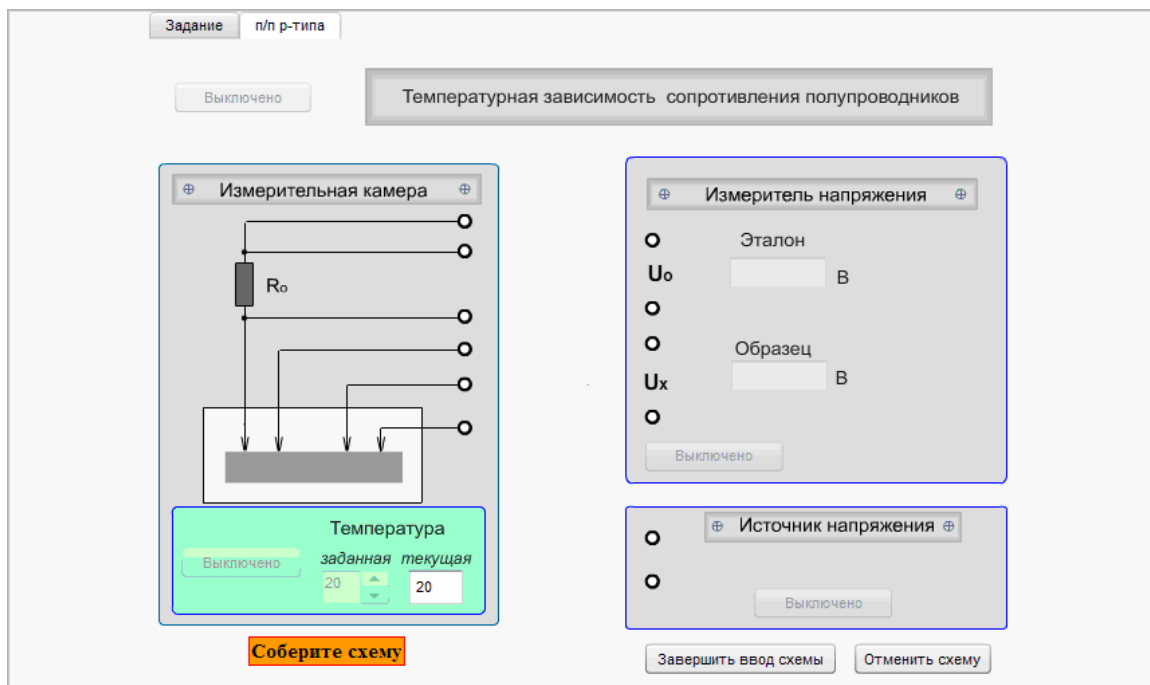


Рис. 6. Виртуальный лабораторный стенд лабораторной работы «Электропроводность полупроводниковых материалов»

Виртуальный лабораторный стенд включает в себя: камеру с испытуемым образцом, размещенном в термостате, источник напряжения, измеритель напряжения.

Стенд, термостат, измеритель напряжения и источник напряжения имеют кнопки включения. Для выполнения измерений необходимо собрать схему соединений. Соединения осуществляются с помощью мыши перетаскиванием контактов. Позиционируем указатель мыши на первый контакт соединения, кликаем левую кнопку мыши и удерживая ее, протаскиваем указатель мыши на второй контакт соединения, отпускаем левую кнопку. В случае правильного соединения появляется электрическое соединение. Для завершения сборки схемы необходимо нажать кнопку «Завершить ввод схемы». Если схема собрана неправильно, то появляется сообщение «Схема собрана неправильно», необходимо отменить собранную схему, нажав кнопку «Отменить схему» и повторить процедуру сборки вновь. После того, как собрана схема следует включить стенд и приборы стенда. Включенный, подготовленный к работе стенд приведен на рис. 7.

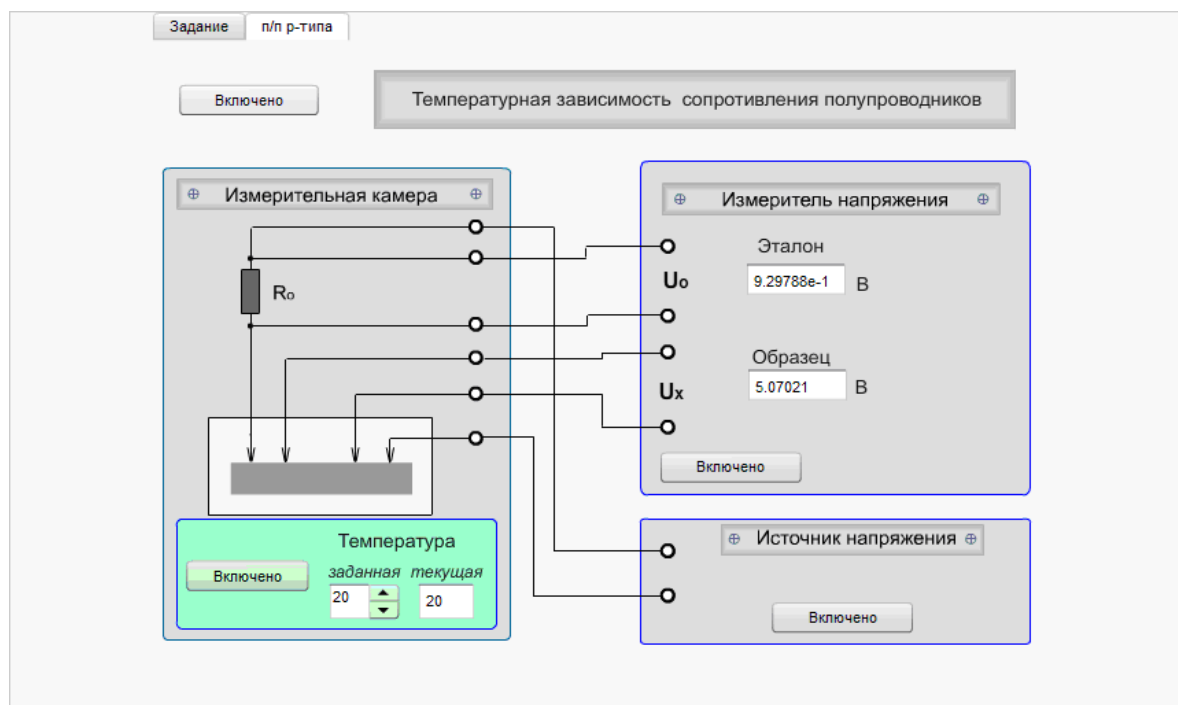


Рис. 7. Виртуальный лабораторный стенд подготовлен к работе

Образец установлен в камере с термостатом. Термостат имеет два дисплея, в одном отображается температура испытания, задаваемая пользователем, в другом – текущая температура в измерительной камере с образцом. Температура задается с помощью клика мышью на элементы управления, отображаемые в виде треугольников. При однократном нажатии на верхний треугольник заданная температура возрастает на один градус, при нажатии на нижний треугольник – соответственно температура уменьшается на один градус. Температуру можно задавать также и с клавиатуры, предварительно кликнув на окне «Заданная температура». При этом после завершения ввода следует нажать клавишу «Enter».

Задаем необходимую температуру в термостате. Дожидаемся, пока температура в термостате не станет равной заданной. Фиксируем с помощью измерителя падение напряжение на эталонном сопротивлении – дисплей «Эталон», на образце – дисплей «Образец».

Рабочее задание и порядок проведения работы

Лабораторная работа проводится по следующей схеме:

1. Авторизоваться на учебно-методическом комплексе «Виртуальные лабораторные работы по курсу ЭТМ» (<http://etm.mpei.ru>). Загрузить

виртуальную лабораторную работу «Электропроводность полупроводниковых материалов». Перейти к вкладке «Задание» на виртуальном лабораторном стенде и ознакомиться с выданным для выполнения заданием.

2. Собрать схему, перетаскивая соответствующие клеммы на виртуальном стенде. После успешной сборки схемы следует включить приборы стенда.
3. Измерить зависимости падения напряжения на образце и сопротивлении от температуры в заданном диапазоне. Рассчитать температурную зависимость удельной проводимости и построить для нее график. Рассчитать ширину запрещенной зоны исследуемого полупроводникового материала. Занести полученные результаты в таблицу.
4. Сделать письменные выводы по проделанной работе, объяснив полученные зависимости. Подготовить отчет в формате текстового процессора Microsoft Word по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями. Отчет должен включать в себя:

- титульный лист с наименованием лабораторной работы, названием кафедры, Ф.И.О. студента и преподавателя;
- конкретное задание, номер варианта;
- основные формулы и соотношения, по которым проводился расчет;
- таблицы (протоколы) с результатами экспериментов и рассчитанными значениями удельной проводимости;
- графики, полученных зависимостей;
- краткие письменные выводы, объясняющие соответствие (или несоответствие) полученных зависимостей теоретическим.

Графические зависимости оформляются с помощью средств построения графиков Excel, либо с помощью любых программ построения графиков.

Контрольные вопросы

1. Физические основы и характерные черты явления электропроводности полупроводников.
2. Влияние температуры на электропроводность полупроводников.
3. Донорные и акцепторные примеси в полупроводниках.
4. Сущность двухзондового метода измерения удельной проводимости.
5. Проведение измерений, обработка экспериментальных результатов.

Литература

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. Учебник. Лань. 2001. 185 с.
2. Конструкционные и электротехнические материалы / под ред. В.А.Филикова. М.:Высшая школа, 1990, 294 с.
3. Электронные учебники по курсу «Электротехническое материаловедение». НИУ МЭИ, <http://ftemk.mpei.ac.ru/ctlw/LocalContent.aspx?id=etmTut>
4. Бородулин В.Н., К.В.Елизаров К.В., Сутченков А.А., Тихонов А.И. Методические указания по курсу Электротехническое материаловедение. Под ред А.И. Тихонова; М.: Изд-во МЭИ, 1997. 32с. Электронное учебное пособие.
5. Бородулин В.Н., К.В.Елизаров К.В., Сутченков А.А., Тихонов А.И. Задачи компьютерного учебно-контролирующего комплекса. Учебное пособие по курсу Электротехническое Материаловедение. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 42с. Электронное учебное пособие.

