



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»**

**Кафедра физики**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.09**

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ**

**Москва 2005 г.**

## Лабораторная работа № 2.09

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

#### ВВЕДЕНИЕ

Твердые тела, по своему удельному сопротивлению  $\rho$ , могут быть разделены на три больших класса: металлы (проводники), полупроводники и диэлектрики (изоляторы). При комнатной температуре для различных классов твердых тел  $\rho$  имеет значения в следующих пределах:

Металлы	$10^{-8} \div 10^{-6}$ Ом·м
Полупроводники	$10^{-6} \div 10^8$ Ом·м
Диэлектрики	более $10^8$ Ом·м

Однако такая чисто количественная классификация не передает специфических особенностей электропроводности и других свойств твердых тел. Между металлами и полупроводниками наблюдается существенное качественное различие. Например, у металлов удельное сопротивление с ростом температуры увеличивается по линейному закону (1), а полупроводников – экспоненциально уменьшается (кривая 2) (рис. 1).

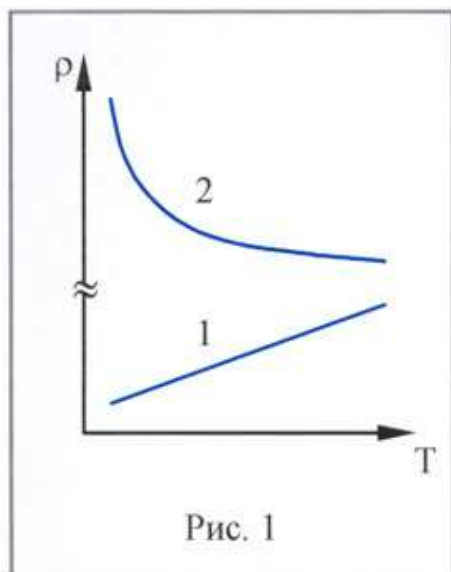


Рис. 1

Объяснение различия электропроводности и других свойств указанных классов дает квантово – механическая зонная теория твердого тела. Из квантовой механики известно, что в любом изолированном атоме электроны могут иметь только определенные дискретные значения энергии, называемые энергетическими уровнями. Причем на каждом энергетическом уровне, в соответствии с принципом Паули, может находиться не более двух электронов. Электроны, находящиеся на наиболее высоком энергетическом уровне (электроны внешних электронных орбит), называются валентными. По мере сближения атомов до расстояний, равных межатомным расстояниям в твердых телах, взаимодействие между электронными оболочками атомов приводит к тому, что энергетические уровни отдельных атомов расщепляются, образуя энергетические зоны твердого тела. Каждая энергетическая зона представляет собой набор дискретных, но очень близко расположенных энергетических уровней, число которых в зоне равно числу атомов в кристалле, а расстояние между ними составляет порядка  $10^{-22} - 10^{-23}$  эВ ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж).

Энергетическая зона, образованная расщеплением энергетического уровня валентных электронов оказывается полностью заполненной и называется **валентной зоной**. Выше валентной зоны располагается энергетическая зона, в которой электронов нет (все энергетические уровни этой зоны свободны), и называется **зоной проводимости**. Разность энергии между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны называется **шириной запрещенной зоны**  $\Delta E$  (дно – минимум энергии в зоне, потолок – максимум энергии в зоне).

Электропроводность твердых тел определяются степенью заполнения электронами зоны проводимости и шириной запрещенной зоны.

В зависимости от степени заполнения зон электронами и шириной запрещенной зоны  $\Delta E$  возможны четыре случая, схематически изображенные на рис. 2.

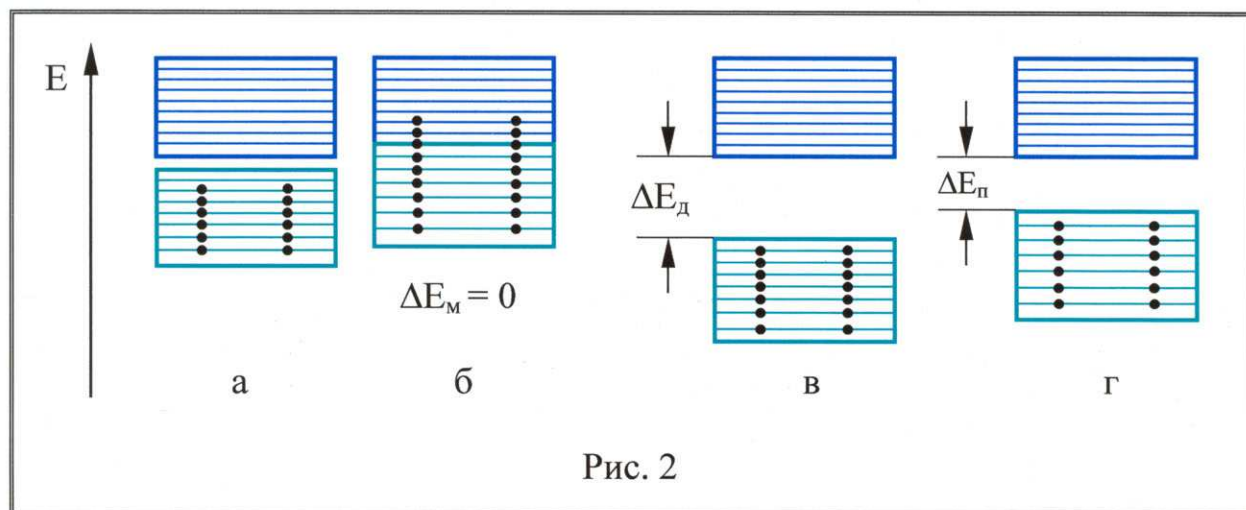


Рис. 2

Валентная зона заполнена полностью, но перекрывается с зоной проводимости (рис. 2б). В этом случае электроны могут легко переходить на энергетические уровни зоны проводимости и участвовать в электропроводности. Это характерно для металлов.

В общем случае валентная зона полностью заполнена электронами, а зона проводимости пуста (рис. 2 а, в, г). В зависимости от ширины запрещенной зоны  $\Delta E$ , твердые тела, имеющие такое зонное строение, являются проводниками, диэлектриками или полупроводниками. Если ширина запрещенной зоны много больше энергии теплового движения электронов, определяемой температурой, то электроны не могут перейти в зону проводимости (то есть для перехода в зону проводимости тепловой энергии электронов оказывается недостаточно). Такой кристалл является диэлектриком (рис. 2 в).

И, наконец, если запрещенная зона достаточно узкая, так что переброс электронов из валентной зоны в зону проводимости может быть осуществлен сравнительно легко даже путем теплового возбуждения, то кристалл является полупроводником (рис. 2 г).

В полупроводнике в основном состоянии, когда валентная зона заполнена

полностью в кристалле нет свободных носителей заряда, которые могли бы участвовать в электропроводимости. Все электроны заняты в ковалентных связях, объединяющих атомы в кристаллическую решетку. При этих условиях полупроводник ничем не отличается от диэлектрика. При повышении температуры возможно вырывание электрона из этой связи. При этом образуется свободный электрон, который не связан с каким-то определенным атомом в кристаллической решетке, а в том месте, где была связь, образуется вакансия, которая называется **дыркой** (рис. 3а). На языке зонной теории это означает, что под действием теплового движения электрон преодолел запрещенную зону и перешел в зону проводимости, а в валентной зоне образовалась дырка (рис. 3б).

Если такой кристалл поместить в электрическое поле, то под действием этого поля свободный электрон может перемещаться, то есть участвовать в электропроводимости.

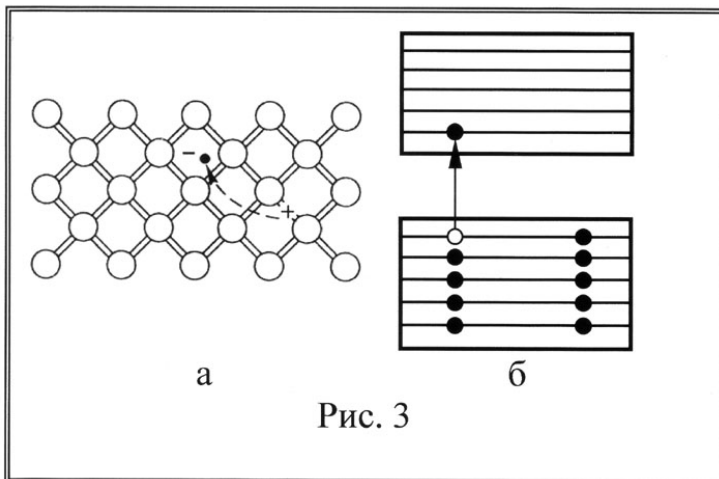


Рис. 3

Проводимость, осуществляемая электронами зоны проводимости, называется **электронной**. В то же время в результате теплового движения возможен перескок валентных электронов из соседних связей в образовавшуюся вакансию — дырку, а дырка появится в том месте, откуда ушел электрон и т.д. Под влиянием внешнего электрического поля такие

перемещения примут направленный характер. То есть проводимость может осуществляться и за счет валентных электронов. Такой процесс заполнения дырок электронами обычно рассматривают как перемещение дырки в направлении, противоположном движению электрона, как если бы дырка обладала положительным зарядом, равным по величине заряду электрона. Проводимость полупроводников, обусловленная дырками, называется **дырочной проводимостью**.

Таким образом, в полупроводниках наблюдаются два механизма проводимости: электронный и дырочный. Если число электронов в зоне проводимости равно числу дырок в валентной зоне, то такой полупроводник называется **собственным**, а его проводимость **собственной проводимостью**. Собственными полупроводниками являются, как правило, химически чистые полупроводники, к которым относятся элементы IV группы Периодической системы элементов Менделеева Si, Ge, а также химические соединения III и V групп, как, например, GaAs, GaP и другие.

По мере увеличения температуры (то есть при увеличении энергии теплового возбуждения) все большее число электронов будет переходить из

валентной зоны в зону проводимости, то есть образуется большее число носителей заряда (электронов и дырок), участвующих в электропроводности. Это приводит к увеличению электропроводности полупроводника при увеличении температуры и, следовательно, уменьшению сопротивления.

В теории физики полупроводников показывается, что сопротивление собственного полупроводника в зависимости от температуры изменяется в соответствии с выражением

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (1)$$

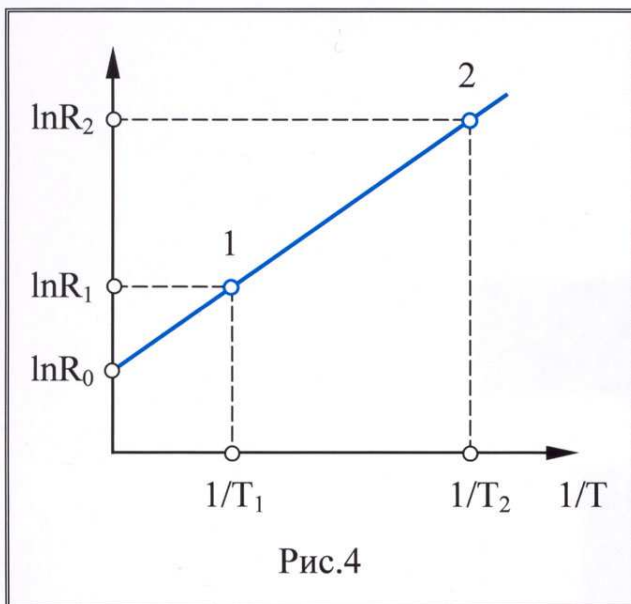
где  $R_0$  – некоторый множитель, зависящий от природы полупроводника;  
 $k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура.

Соотношение (1) используется в данной работе для определения ширины запрещенной зоны  $\Delta E$  полупроводника. Прологарифмировав выражение (1), получим

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2kT} \quad (2)$$

Выражение (2) в координатах  $\ln R$  и  $1/T$  является уравнением прямой, график которой приведен на рис.4. Из выражения (2) и рисунка 4 видно, что ширина запрещенной зоны будет определяться следующим выражением:



$$\Delta E = 2k \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \quad (3)$$

Таким образом, измерив сопротивление полупроводника, в зависимости от температуры в некотором интервале температур, построив график зависимости  $\ln R = f(1/T)$ , и выбрав на этом графике значения  $\ln R_2$  и  $\ln R_1$ , соответствующие температурам  $T_2$  и  $T_1$ , можно вычислить ширину запрещенной зоны изучаемого полупроводника. На

практике график для нахождения ширины запрещенной зоны удобнее строить в координатах  $\ln R = f(10^3/T)$ . В этом случае, учитывая, что  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $0,862 \cdot 10^{-4}$  эВ/К. ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж), получим окончательную формулу для расчета ширины запрещенной зоны:

$$\Delta E = 2k \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = 0,172 \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{10^3}{T_2} - \frac{10^3}{T_1}} \text{ (эВ)} \quad (4)$$

## Описание установки

Экспериментальная установка для измерения сопротивления полупроводникового элемента в зависимости от температуры состоит из измерительной камеры с электронагревателем, в которую помещается исследуемый полупроводник. Измерение сопротивления полупроводникового элемента осуществляется цифровым прибором в Омах или килоОмах (в зависимости от предела измерения). Температура измеряется дифференциальной термопарой, один из спаев которой помещается в непосредственной близости от полупроводникового элемента, а другой находится при комнатной температуре. На свободных концах такой термопары образуется термоЭДС, которая пропорциональна разности комнатной и измеряемой температур. В работе термоЭДС измеряется цифровым вольтметром. Измерив термоЭДС, по специальной градуировочной таблице можно определить температуру.

## Порядок выполнения работы

1. Получить у лаборанта градуировочную таблицу для перевода значений термоЭДС в значения температуры.
2. Ознакомиться с инструкцией по работе с электроизмерительными приборами для измерения сопротивления и термоЭДС. В соответствии с инструкцией подготовить приборы к работе и включить.
3. Дать прогреться приборам в течение 5 минут и, убедившись, что приборы показывают разумные значения сопротивления и термоЭДС (вблизи комнатной температуры сопротивление полупроводникового элемента порядка 3000 – 1000 Ом, термоЭДС порядка 0,00 – 0,04 мВ) нажать кнопку «Сеть» нагревателя. При этом загорается индикаторная лампочка.
4. По мере повышения температуры в соответствии с градуировочной таблицей через каждые 10° записывать показания прибора, измеряющего сопротивление. Данные заносить в таблицу.

Измерения проводить до тех пор, пока температура в камере не достигнет 150°С. После этого выключить нагреватель и измерительные приборы.

## Обработка результатов измерений

1. На миллиметровой бумаге построить график зависимости  $\ln R = f(10^3/T)$ .

- С помощью линейки провести прямую линию зависимости  $\ln R = f(10^3/T)$  таким образом, чтобы разброс экспериментальных точек от прямой был минимальным по обе стороны прямой.
- Выбрать на прямой две точки 1 и 2 наиболее удаленные друг от друга и найти значения  $\ln R_1$ ,  $\ln R_2$ ,  $10^3/T_1$  и  $10^3/T_2$  как показано на рисунке.
- По формуле (4) рассчитать ширину запрещенной зоны  $\Delta E$ .

Таблица.

№	Полупроводник	t, °C	T, К	R, Ом	$10^3/T$	$\ln R$	$\Delta E$ , эВ
1	кремний	20					
2		30					
3		40					
		50					
		60					
...		...					
16		100					
$\Delta E_{\text{cp}}$							

### Контрольные вопросы

- Как объясняется различие температурных зависимостей сопротивления для металлов и полупроводников?
- В чем заключается принципиальное различие между металлами и полупроводниками с точки зрения зонной структуры энергетических уровней?
- В чем заключается принципиальное сходство между полупроводниками и диэлектриками и в чем их различие с точки зрения зонной структуры?
- На чем основан метод определения ширины запрещенной зоны полупроводника, используемый в данной работе?

### Литература

- Савельев И.В. Курс общей физики, книга 2. Электричество и магнетизм.– М.: «Наука». 2003 г.
- Детлаф А.А., Яворский В. М. Курс физики. М.: «Высшая школа», 1999 г.
- Калашников С.Г. Электричество.– М.: Физматлит, 2004 г.
- Трофимова Т.И. Курс физики.– М.: «Высшая школа», 2003г.



Таблица 3

## Задания для расчета шунта к амперметру

№	ФИО	Материал полупровод ника	Начальное, сопротивление R, Ом
1.	Абдрашитов Артем	кремний	5000
2.	Баранова Наталия	мышьяк	5500
3.	Белоусов Глеб	селен	6000
4.	Гасанов Ринат	германий	6500
5.	Герасенков Константин	фосфор	7000
6.	Елисеев Георгий	кремний	7500
7.	Исмагилова Рената	мышьяк	8000
8.	Исхакова Айгуль	селен	8500
9.	Ишмуратов Эдвин	германий	9000
10.	Капралова Анастасия	фосфор	9500
11.	Клименко Алексей	кремний	10000
12.	Кучеренко Ольга	мышьяк	5000
13.	Маликов Алик	селен	5500
14.	Малова Анна	германий	6000
15.	Маннанов Руслан	фосфор	6500
<b>16.</b>	<b>Муртазин Михаил</b>	кремний	7000
17.	Муртазина Ангелина	мышьяк	7500
18.	Насырова Карина	селен	8000
19.	Нигматуллина Эмилия	германий	8500
20.	Николаева Анастасия	фосфор	9000
21.	Полякова Алена	кремний	9500
22.	Предтеченский Дмитрий	мышьяк	10000
23.	Рахимова Алсу	селен	5000
24.	Резяпов Денис	германий	5500
25.	Соломина Екатерина	фосфор	6000
26.	Степанова Александра	кремний	6500
27.	Таймасов Самат	мышьяк	7000
28.	Уразгильдин Тимур	селен	7500
29.	Шарипова Алина	германий	8000
30.	Шарифуллина Юлия	фосфор	8500



31.	ШипульНикита	кремний	9000
32.	ЮрченкоАнна	мышьяк	9500