

## Лабораторная работа № 5-9(н): Изучение полупроводникового диода

Студент: \_\_\_\_\_ группа: \_\_\_\_\_

Допуск \_\_\_\_\_ Выполнение \_\_\_\_\_ Защита \_\_\_\_\_

**Цель работы:** изучение принципа действия полупроводникового диода, снятие вольт – амперной характеристики диода при разных температурах, определение контактной разности потенциалов  $\varphi_k$ .

**Приборы и материалы:** установка для изучения полупроводникового диода.

### Внешний вид установки



### Порядок выполнения работы

#### **Упражнение 1. Снятие вольтамперной характеристики (ВАХ) полупроводникового диода**

1. Ознакомьтесь с установкой. Кнопка включения установки находится на задней панели прибора.
2. Установите переключатель ВАХ-ВФХ в положение ВАХ.
3. Установите переключатель «Прямая-обратная» в положение «Прямая».
4. Кнопкой «+» задавая необходимое значение напряжения на индикаторе напряжения от 0.3 В до 0.7 В через 0,05 В, снимите соответствующие показания с индикатора силы тока (с учетом указателя единиц измерения мА или мкА) и результаты измерений запишите в таблицу 1.
5. Нажмите кнопку «Сброс». Установите переключатель «Прямая-обратная» в положение «Обратная».
6. Проделайте измерения в интервале от 0,1 В до 10 В через 1 В. Результаты измерений запишите в таблицу 1.
7. По полученным данным постройте **вольтамперную характеристику** полупроводникового диода.

**Таблица 1**

Прямой ток		Обратный ток	
<i>U</i> , В	<i>I</i> , мА	<i>U</i> , В	<i>I</i> , мкА
0.30		0.1	
0.35		0.3	
0.40		0.5	
0.45		0.8	
0.50		1.0	
0.55		2.0	
0.60		3.0	
0.65		4.0	
0.70		5.0	
		6.0	
		7.0	
		8.0	
		9.0	
		10.0	

## Упражнение 2. Определение контактной разности потенциалов $\varphi_k$

Величину контактной разности потенциалов  $\varphi_k$  определите графически. Исходя из графика, представленного на рис.2 (см. теорию), ВАХ диода на промежутке  $U > \varphi_k$  имеет практически линейный вид. Прямая, являющаяся продолжением почти линейного участка ВАХ, пересекает ось напряжений в точке  $U = \varphi_k$ .

Для проверки совпадения Вашей экспериментальной зависимости  $I = f(U)$  с теоретической зависимостью данного полупроводникового диода используется метод наименьших квадратов.

1. Заполните таблицу 2, используя результаты предыдущего упражнения для прямого тока (возьмите последние 5 значений прямого тока).

2. В данном случае зависимость  $I = f(U)$  должна определяться линейной функцией вида

$$y = Ax + B, \text{ где } x = U; y = I.$$

**Таблица 2**

№	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$x_i$	$y_i$	$x_i^2$	$x_i y_i$	$y_i - \langle y \rangle$	$(y_i - (Ax_i + B))^2$
1								
2								
3								
4								
5								
$\Sigma$	X	X	X					

3. Определите коэффициенты  $A$  и  $B$  в линейной зависимости  $y = Ax + B$  по методу наименьших квадратов (см. лаб. работу 0-1):

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

4. Определив значения параметров  $A$  и  $B$ , запишите уравнение прямой и постройте эту прямую на графике зависимости силы тока  $I$  от напряжения  $U$  из упражнения 1.

5. По формулам  $S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - (Ax_i + B))^2}{n-2}$  и  $S_{on}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \langle y \rangle)^2}{n-1}$  определите дисперсию адекватности и дисперсию опыта, где  $n$  – число измерений.

6. По полученным данным найдите критерий Фишера  $F = \frac{S_{ad}^2}{S_{on}^2}$  и проверьте двухстороннее неравенство:

$$\frac{1}{F_{\text{рабл}}} \leq F \leq F_{\text{рабл}}, \quad \text{где } F_{\text{рабл}} = 6.59.$$

Если неравенство выполняется, то с вероятностью  $p = 0.95$  можно утверждать о линейной зависимости силы тока  $I$  от напряжения  $U$  в Вашем эксперименте.

5. Сделайте вывод о соответствии зависимости  $y = Ax + B$  полученным экспериментальным данным и определите по графику значение контактной разности потенциалов  $\varphi_k$  (это точка пересечения полученной прямой с осью ОХ).

6. Запишите ответ.

## Контрольные вопросы

1. Основные отличия в электрических свойствах проводников, полупроводников и диэлектриков.
2. Виды полупроводников.
3. Получение полупроводников  $n$  – типа и  $p$  – типа.
4. Зонная структура металлов, полупроводников и диэлектриков
5. Полупроводниковый диод
6. Вольтамперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода

## Краткие теоретические сведения

Существуют вещества, которые по проводимости электрического тока занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Такие вещества называют **полупроводниками**. К ним относится целый ряд химически чистых элементов (германий, кремний, селен и др.), а также некоторые химические соединения (минералы, сульфиды, оксиды).

### **Основные отличия в электрических свойствах проводников, полупроводников и диэлектриков**

#### **1. различная величина удельного сопротивления $\rho$ :**

- **проводники** (вещества, которые хорошо проводят электрический ток, например, металлы, электролиты).

Хорошая проводимость тока объясняется наличием у них большого количества свободных носителей тока.

В проводниках – свободных электронов, в электролитах – положительных и отрицательных ионов.

У проводников удельное сопротивление  $\rho_{np} = (10^{-8} \div 10^{-6}) \Omega \cdot m$ ,

- **полупроводники** (вещества, которые занимают промежуточное положение по проводимости электрического тока между проводниками и диэлектриками, например, кремний, германий, индий и др.)

Плохая проводимость тока объясняется наличием у них небольшого по сравнению с проводниками количества свободных носителей тока. В полупроводниках носителями тока являются электроны проводимости и дырки.

У полупроводников удельное сопротивление  $\rho_{nn} = (10^{-5} \div 10^7) \Omega \cdot m$ ,

- **диэлектрики** (вещества, которые не проводят электрический ток, например, стекло, керамика, полимеры и др.)

Отсутствие проводимости тока объясняется отсутствием у них свободных носителей тока.

У диэлектриков удельное сопротивление  $\rho_d = (10^8 \div 10^{13}) \Omega \cdot m$ .

#### **2. различная зависимость удельного сопротивления от температуры:**

- у проводников с повышением температуры удельное сопротивление увеличивается,  
- у полупроводников и диэлектриков с повышением температуры удельное сопротивление уменьшается.

#### **3. различная зависимость силы тока, текущего через вещество, от напряжения:**

- у проводников зависимость линейная (выполняется закон Ома),  
- у полупроводников и диэлектриков зависимость нелинейная (не выполняется закон Ома).

## Виды полупроводников

Различают **собственные** и **примесные** полупроводники.

**Собственными полупроводниками** называются химически чистые полупроводники, у которых концентрация свободных электронов  $n_e$  в зоне проводимости равна концентрации «дырок»  $n_p$  в валентной зоне.

Собственная проводимость очень маленькая и обычно не представляет практического интереса. Для увеличения электрической проводимости полупроводников применяют примеси.

### Примесные полупроводники

**Примесными** называются полупроводники, электрическая проводимость которых обусловлена наличием в собственном полупроводнике примесей.

(например, при введении в кремний всего лишь 0.001% примеси бора увеличивает его проводимость в миллион раз)

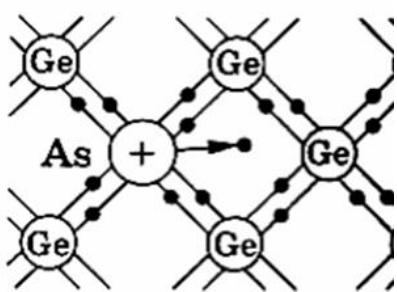
Различают два типа примесных полупроводников:

- ***n* - типа** (основными носителями тока являются свободные электроны в зоне проводимости),

- ***p* - типа** (основными носителями тока являются дырки в валентной зоне).

### Получение полупроводников *n* – типа

ПП *n* - типа

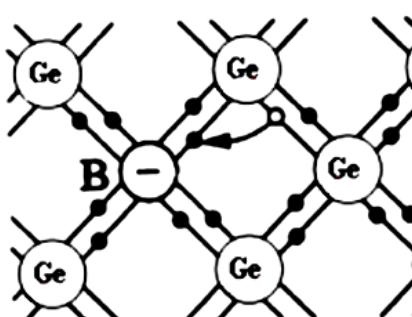


В кристаллическую решётку чистого полупроводника вводят примесь валентностью на единицу больше (например, в чистый четырёхвалентный германий *Ge* (или кремний *Si*) вводят примесь пятивалентного мышьяка *As*).

В этом случае четыре валентных электрона мышьяка образуют четыре ковалентные связи с четырьмя валентными электронами соседних атомов германия *Ge*, а пятый электрон мышьяка *As* оказывается лишним, слабосвязанным с ядром, который может довольно легко при тепловых колебаниях атома мышьяка оторваться от него и стать свободным электроном проводимости. При этом атом мышьяка *As* превращается в положительно заряженный ион *As*<sup>+</sup>, который свободно перемещаться по кристаллу не может.

### Получение полупроводников *p* – типа

ПП *p* - типа



В кристаллическую решётку чистого полупроводника вводят примесь валентностью на единицу меньше (например, в чистый четырёхвалентный германий *Ge* (или кремний *Si*) вводят трёхвалентную примесь бора *B*).

В этом случае валентные электроны примеси бора образуют три ковалентные связи с тремя валентными электронами соседних атомов германия. Образование четвёртой ковалентной связи осуществляется путём захвата атомом бора одного электрона у атома кремния из соседней кристаллической ячейки (это оказывается возможным из-за того, что атом бора по размерам меньше атома германия,

в результате чего его валентные электроны оказываются ближе к ядру и сильнее притягиваются к нему, чем валентные электроны атома германия). При этом атом бора превращается в отрицательно заряженный ион  $B^-$ , который свободно перемещаться по кристаллу не может, и образуется вакансия электрона (то есть «дырка») у «обварованного» атома германия.

### Зонная структура металлов, полупроводников и диэлектриков

**Валентной зоной** называется самая верхняя разрешённая энергетическая зона, полностью заполненная валентными электронами.

**Зоной проводимости** называется следующая разрешённая энергетическая зона, лежащая выше валентной.

(при  $T = 0$  К она может быть либо полностью свободной от электронов, либо частично заполненной)

В зависимости от степени заполнения электронами зон проводимости и ширины запрещённой зоны, вещества ведут себя как проводники, полупроводники или диэлектрики. Возможны четыре различных случая, представленных на рис. 1. Для этого рассмотрим вещество при температуре  $T = 0$  К.

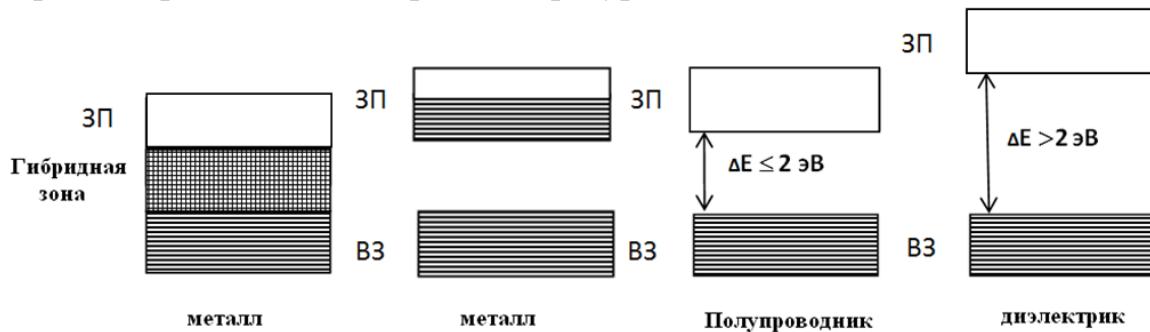


рис. 1 возможные случаи заполнения энергетических зон

- Если полностью заполненная валентная зона ВЗ перекрывается с вышерасположенной свободной зоной проводимости ЗП, с образованием, так называемой, **гибридной зоны**, то такое вещество будет вести себя как **проводник**.
- Если над полностью заполненной валентной зоной ВЗ находится частично заполненная зона проводимости ЗП, то такое вещество будет вести себя тоже как **проводник**.
- Если над полностью заполненной валентной зоной ВЗ находится свободная от электронов зона проводимости ЗП и ширина запрещённой зоны окажется меньше или равно 2 эВ (то есть  $\Delta E \leq 2$  эВ), то такое вещество будет вести себя как **полупроводник** (надо отметить, что при температуре  $T = 0$  К полупроводники ведут себя как диэлектрики).
- Если над полностью заполненной валентной зоной ВЗ находится свободная от электронов зона проводимости ЗП и ширина запрещённой зоны окажется больше 2 эВ (то есть  $\Delta E > 2$  эВ), то такое вещество будет вести себя как **диэлектрик**.

## Полупроводниковый диод

**Полупроводниковым диодом** называется устройство, представляющее собой двухслойный полупроводниковый кристалл с разными типами электрической проводимости (полупроводниковый диод служит в основном для преобразования переменного тока в постоянный ток).

Один слой полупроводникового диода обладает проводимостью *p*-типа, а другой – проводимостью *n*-типа.



При совмещении полупроводников *p*-типа и *n*-типа возникает пограничная область, называемая ***p-n* переходом** (или электронно–дырочным переходом), основным свойством которого является способность проводить ток преимущественно в одном направлении.

## Вольтамперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода

(это зависимость силы тока  $I$ , текущего через *p* – *n*- переход от величины напряжения  $U$  на нём)

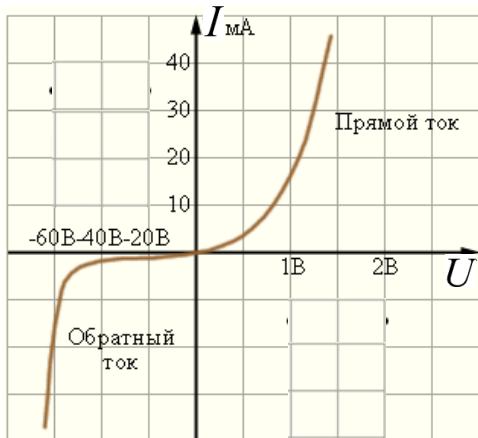


рис.2. ВАХ полупроводникового диода

При обратном включении полупроводника ( $U < 0$ ) ток, обусловленный неосновными носителями тока, сначала экспоненциально растет по закону

$I_{\text{обратный}} = I_0(e^{-\frac{|e|U}{kT}} - 1)$ . Затем при некотором напряжении  $U$ , когда  $e^{-\frac{|e|U}{kT}} \ll 1$ , ток достигает предельного значения  $I_{\text{обратный}} = -I_0$ , которое называется **током насыщения**.

При дальнейшем увеличении обратного напряжения может наступить **электрический пробой** *p-n* – перехода, который может привести к разрушению *p-n* – перехода и выхода из строя полупроводникового диода.