

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ТИПА ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА**

Учебно-методическое пособие

Составители:  
Л.Н. Владимирова,  
В.И. Петраков, И.В. Коняев

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2019

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 4  |
| 1. Теоретическая часть.....                               | 5  |
| 1.1. Полупроводниковые материалы, их классификация.....   | 5  |
| 1.2. Тип проводимости полупроводника.....                 | 7  |
| 1.3. Методы определения типа проводимости полупроводников | 18 |
| 1.3.1. Термоэлектрический метод.....                      | 18 |
| 1.3.2. Метод вольтамперной характеристики контакта        | 20 |
| металл-полупроводник.....                                 |    |
| 2. Практическая часть.....                                | 27 |
| 2.1. Измерительная установка.....                         | 27 |
| 2.2. Методика измерений.....                              | 27 |
| 3. Контрольные вопросы.....                               | 29 |
| Библиографический список.....                             | 30 |

К химическим соединениям в первую очередь отнесем соединения с общей формулой  $A^4B^4$  (SiC, SiGe ...),  $A^3B^5$  (InSb, GaAs, GaP ...),  $A^2B^6$  (ZnO, PbS, ...) и др. К твердым растворам можно отнести такие  $A_xB_{1-x}C$  и  $AC_yD_{1-y}$  (например, GaAsP<sub>2</sub>).

Твердые растворы и соединения значительно расширяют диапазон электрофизических параметров полупроводниковых материалов.

Из приведенных выше данных по электропроводности материалов видно, что резкого изменения в величине удельного сопротивления при переходе от одного класса веществ к другому не существует. На рис. 1 приведена зонная энергетическая диаграмма металлов, полупроводников и диэлектриков, из которой видно, что у металлов отсутствует запрещенная зона. У проводниковых материалов, к которым относятся металлы, зона проводимости и валентная зона либо смыкаются, либо перекрываются.

Для полупроводников и диэлектриков зонная диаграмма отражает их принципиальное качественное сходство, поскольку с точки зрения зонной теории различие между ними заключается лишь в количественном значении ширины запрещенной зоны. К диэлектрикам условно относят материалы с  $\Delta E > 8$  эВ, а у большинства полупроводниковых материалов  $\Delta E < 4$  эВ.

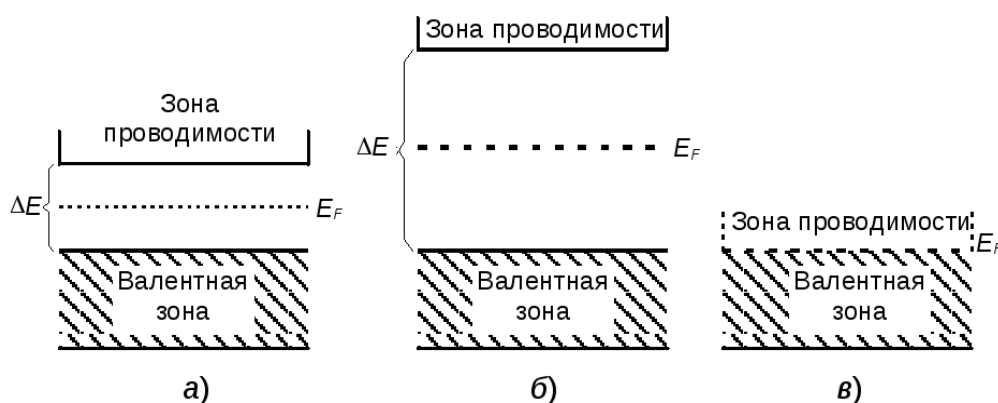


Рис.1. Зонные структуры различных веществ:

а) полупроводника, б) диэлектрика, в) металла

$\Delta E$ – ширина запрещённой зоны;  $E_F$ – уровень Ферми.

## 1.2 Тип проводимости полупроводника

Все наиболее значимые для применения в микроэлектронике свойства полупроводников связаны с их кристаллохимическим строением. Отметим самую важную их особенность – все они имеют кристаллическую решетку, чаще всего алмазоподобного типа, а также ковалентную связь.

Рассмотрим механизм проводимости типичного элементарного полупроводника – кремния (Si). Распределение электронов по состояниям в атоме кремния следующее:

$$\text{Si}^{(14)} \left( 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2 \right)$$

Наивысшая валентность кремния, находящегося в IV группе Периодической системы, равна четырем.

При образовании кристаллической решетки кремния в результате полной гибридизации электронных  $3s$  и  $3p$  облаков (рис.2) каждый атом кремния участвует в формировании четырех одинаковых ковалентных (парноэлектронных) связей.

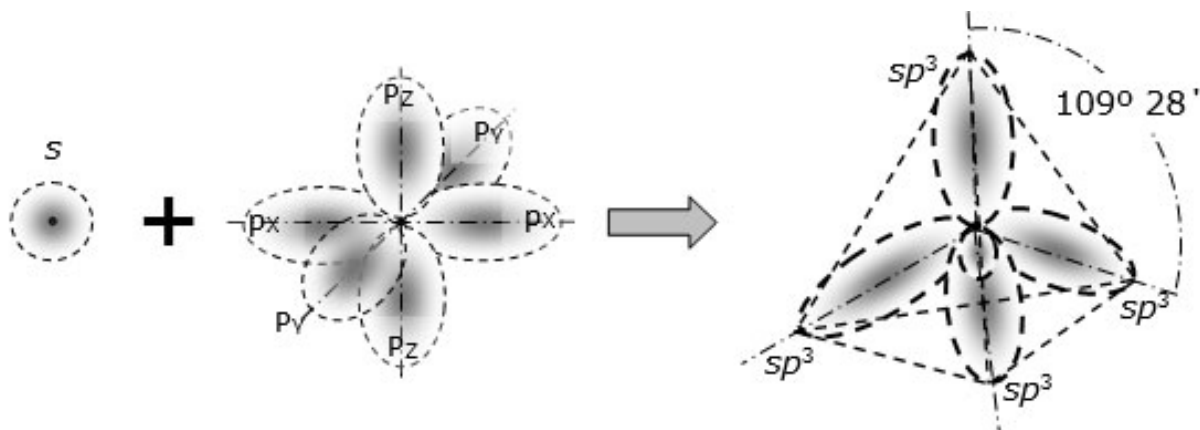


Рис. 2. Гибридизация одной  $s$ - и трех  $p$ -орбиталей:  
слева – 4 исходные орбитали, справа – 4 гибридные  $sp^3$ -орбитали

Схематически кристаллическая решетка Si с ковалентным типом связи представлена на рис.3а. Здесь в узле решетки находится атом кремния, которому принадлежат четыре валентных электрона, изображенные на рис.3 черными точками.

В целом система, представленная на рис.3а, электронейтральна. Если поместить ее в электрической поле, то электрический ток в ней не возникнет, так как все связи в решетке жестко направлены и насыщены, а свободные носители заряда отсутствуют.

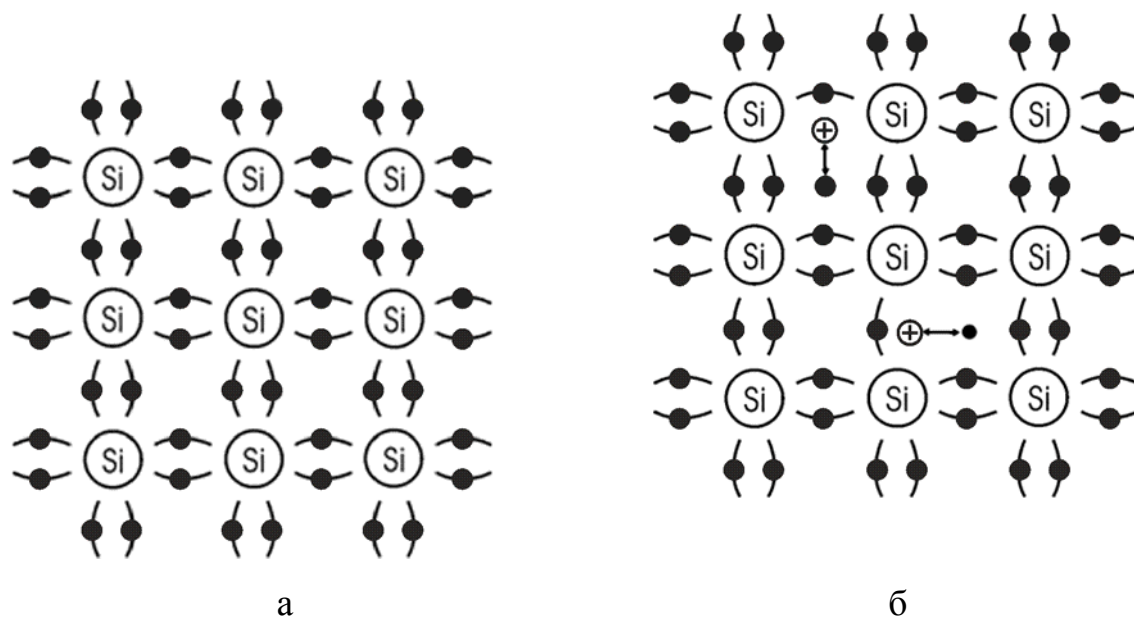


Рис. 3. Двумерное схематическое расположение связей в решетке кремния (собственный полупроводник)

Допустим, что под воздействием каких-либо возмущений произошел разрыв валентной связи, в результате чего электрон стал свободным. Из-за разрыва связи и ухода электрона в этом месте сосредоточился нескомпенсированный положительный заряд. **Такая незавершенная валентная связь получила название дырки.**

Такая незавершенная валентная связь может быть компенсирована электроном, перешедшим от соседнего атома кремния из-за разрыва одной

из четырех его валентных связей, в результате чего дырка появляется у отдавшего свой электрон соседнего атома. Следовательно, дырка будет перемещаться по кристаллу путем последовательного перемещения электрона от атома к атому.

Однако в целом система остается электронейтральной, так как каждому образовавшемуся из-за разрыва связи положительному заряду – дырке соответствует свободный, перемещающийся по кристаллу электрон. На рис.3б свободные электроны и дырки изображены соответственно черными и светлыми точками.

**Полупроводник, в котором в результате разрыва валентных связей образуется равное количество свободных электронов и незавершенных связей – дырок, называется собственным, т.е. это полупроводник, практически не имеющий примесей.** Такие электронно-дырочные пары в нем образуются под действием внешних воздействий, например, под действием температуры.

Процесс образования электронно-дырочных пар называется **генерацией**, а обратный ему процесс возвращения электрона из зоны проводимости в валентную зону называется процессом **рекомбинации** носителей заряда.

Промежуток времени, прошедший с момента генерации частицы, являющейся носителем заряда, до ее рекомбинации называют **временем жизни**, а расстояние, пройденное частицей за время жизни, – **диффузионной длиной**.

Так как время жизни каждого из носителей различно, то для однозначной характеристики полупроводника под временем жизни чаще всего понимают среднее (среднестатистическое) время жизни носителей

заряда, а под диффузионной длиной – среднее расстояние, которое проходит носитель заряда за среднее время жизни.

Диффузионная длина и время жизни электронов и дырок связаны между собой соотношениями

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n};$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p},$$

где  $L_n, L_p$  – диффузионная длина электронов и дырок;

$\tau_n, \tau_p$  – время жизни электронов и дырок;

$D_n, D_p$  – коэффициенты диффузии электронов и дырок (плотность потоков носителей зарядов при единичном градиенте их концентраций).

Среднее время жизни носителей заряда численно определяется как промежуток времени, в течение которого концентрация носителей заряда, введенных тем или иным способом в полупроводник, уменьшится в  $e$  раз ( $e \approx 2,7$ ).

Если в полупроводнике создать электрическое поле напряженностью  $E$ , то хаотическое движение носителей заряда упорядочится, т.е. дырки и электроны начнут двигаться во взаимно противоположных направлениях причем дырки – в направлении, совпадающем с направлением электрического поля. Возникнут два встречно направленных потока носителей заряда, создающих токи, плотности которых равны

$$j_{ndp} = e n_n \mu_n E;$$

$$j_{pdp} = e n_p \mu_p E,$$

где  $e$  – заряд носителя заряда (электрона);