



Уральский
федеральный
университет

Электроника

Тема лекции: Однородный
полупроводник

§ 1 Собственный полупроводник

Лекторы:

Елфимов Вячеслав Ильич

к.т.н., профессор каф. РЭИС

Дурнаков Андрей Адольфович

ст. преподаватель каф. РЭИС

Разработчики:

Елфимов В.И., Дурнаков А.А.

Классификация веществ

Проводники

Полупроводники

Диэлектрики

Изменение электропроводности

σ , Сим/см

$10^4 - 10^6$

$10^{-10} - 10^3$

$10^{-10} - 10^{-18}$

Увеличение
температуры

падает

растет

растет

Внесение
примеси

падает

резко растет

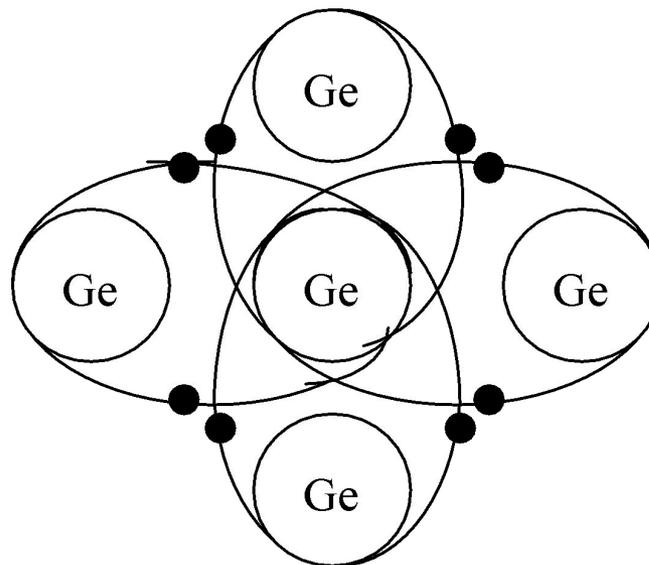
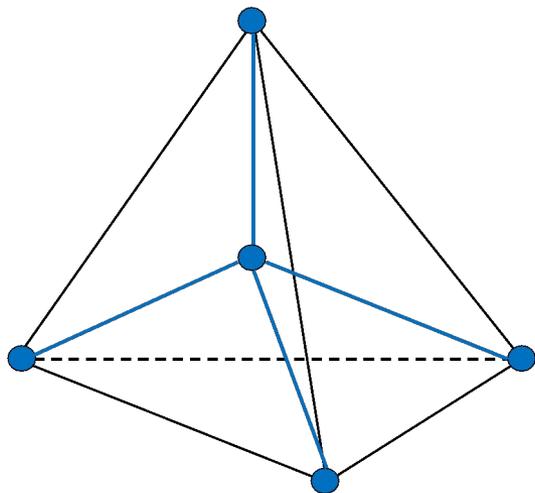
растет

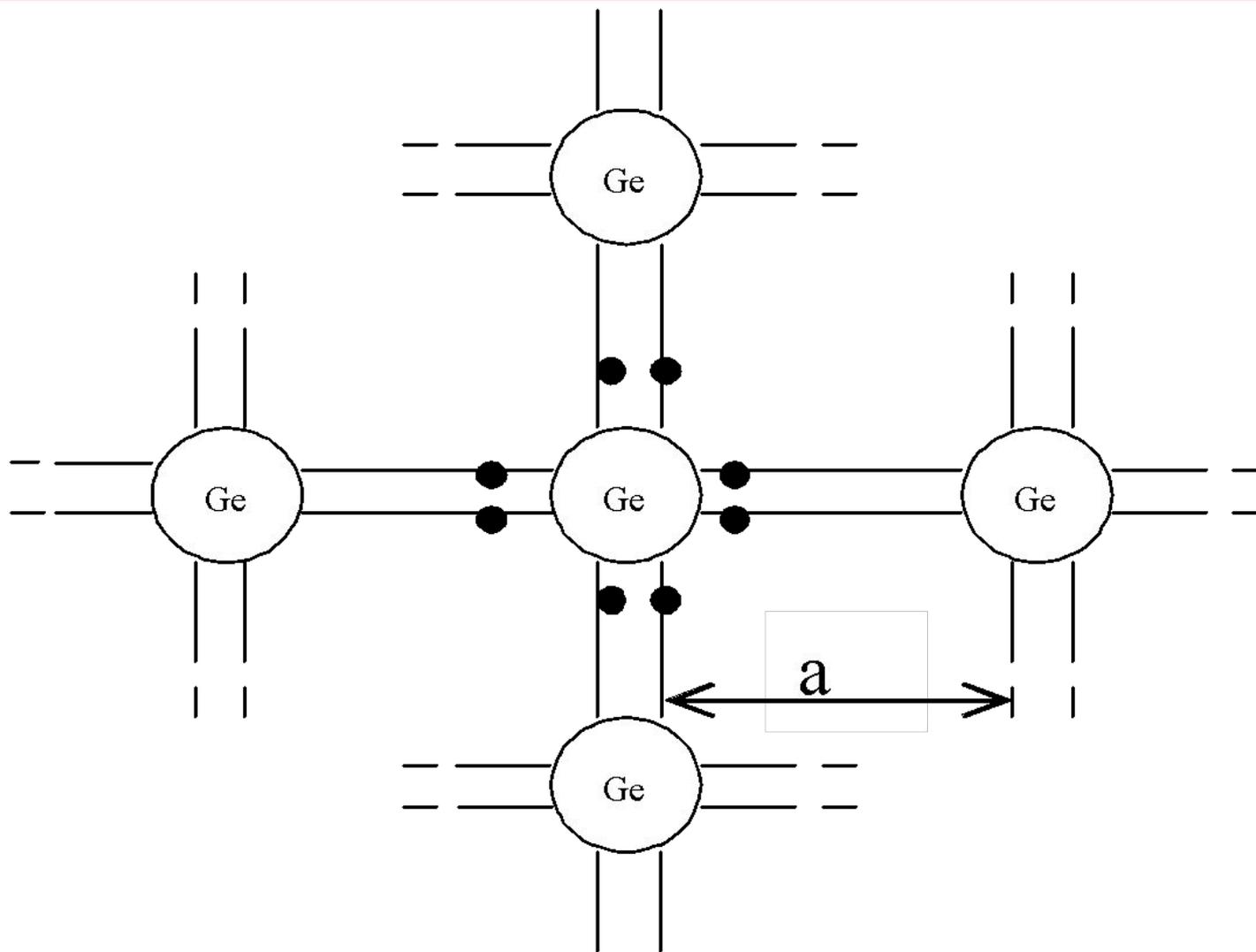
- **Полупроводник** – это вещество, электропроводность которого занимает промежуточное положение между проводниками и диэлектриками, основным свойством этого вещества является сильная зависимость удельной проводимости от воздействия внешних факторов (температура, концентрация примесей, световое и ионизирующее излучение и др.).
- **Собственный полупроводник** или полупроводник ***i*-типа** (от английского *intrinsic* – собственный) – это идеально чистый полупроводник, т.е. влиянием примеси на его свойства можно пренебречь.
- Это элементы IV группы периодической таблицы Менделеева (Ge, Si), химические соединения элементов A^{III} B^V (GaAs, InSb), сульфиды (CdS, BbS, ZnS), карбиды (SiC), оксиды (ZnO, Cu₂O).

Модель ковалентной связи

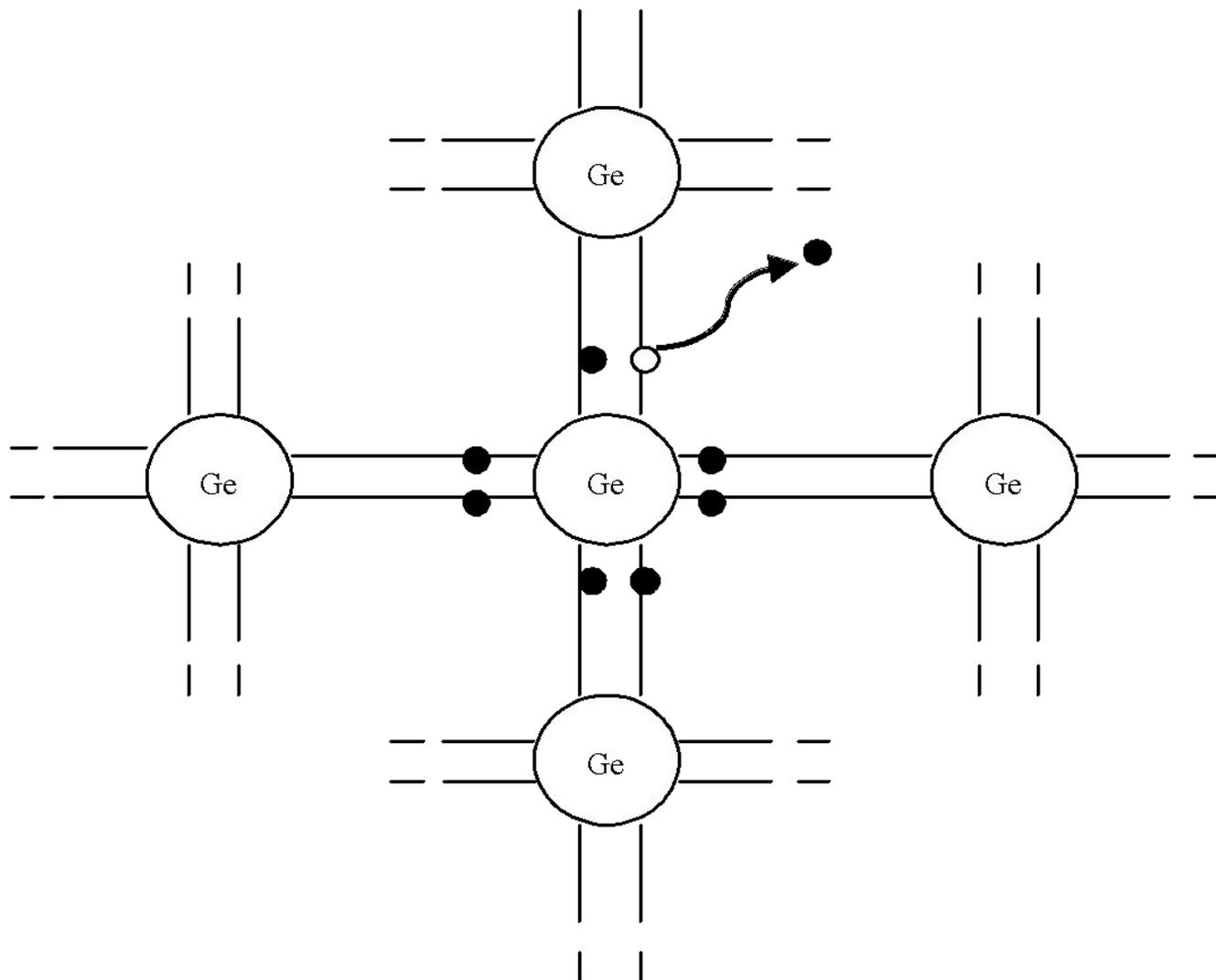
Собственные полупроводники образуют кубическую решётку типа алмаза, которая состоит из тетраэдров; расстояние между смежными атомами $\sim 0,5$ нм.

В такой решётке каждый атом образует с четырьмя соседними атомами ковалентные связи, в результате которых происходит обобществление валентных электронов и образование устойчивых электронных оболочек, состоящих из 8 электронов.





Плоскостная схема кристаллической решетки германия

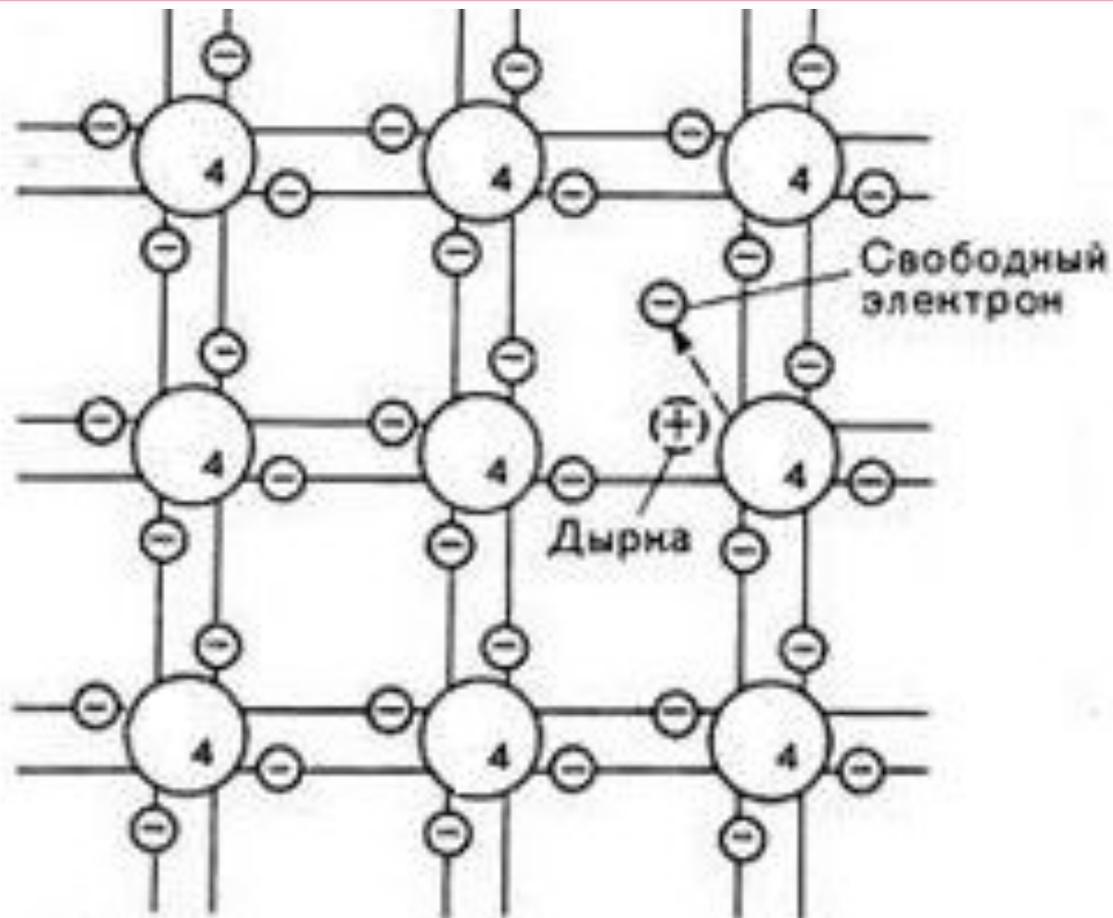


Возникновение пары электрон-дырка

Дырка – это разорванная ковалентная связь, ведущая себя как подвижный носитель заряда, равный по модулю заряду электрона.

Генерация – это явление возникновения пар электрон-дырка при получении атомом полупроводника дополнительной энергии (тепловой, электрической, световой и пр.), превышающей энергию связи электрона с атомом.

Рекомбинация – явление исчезновения электрона проводимости и дырки проводимости при их встрече, т. е. электрон восстанавливает ковалентную связь.



Кристаллическая решетка собственного полупроводника

Модель энергетических зон

Особенность энергетического спектра твердого тела - он состоит не из дискретных разрешенных уровней, а из дискретных разрешенных зон. Каждая зона происходит от соответствующего атомного уровня, который как бы расщепляется при сближении атомов. Таким образом, для кристалла с межатомным расстоянием $\approx 0,56$ нм получается определенная зонная диаграмма, в которой разрешенные зоны чередуются с запрещенными зонами.

Верхнюю зону твердого тела, не заполненную (или не полностью заполненную) электронами при $T = 0$ называют **зоной проводимости** (ЗП).

Зону, ближайшую к ЗП, называют **валентной зоной** (ВЗ).

При $T = 0$ она полностью заполнена. Следовательно, электроны этой зоны не могут участвовать в проводимости.

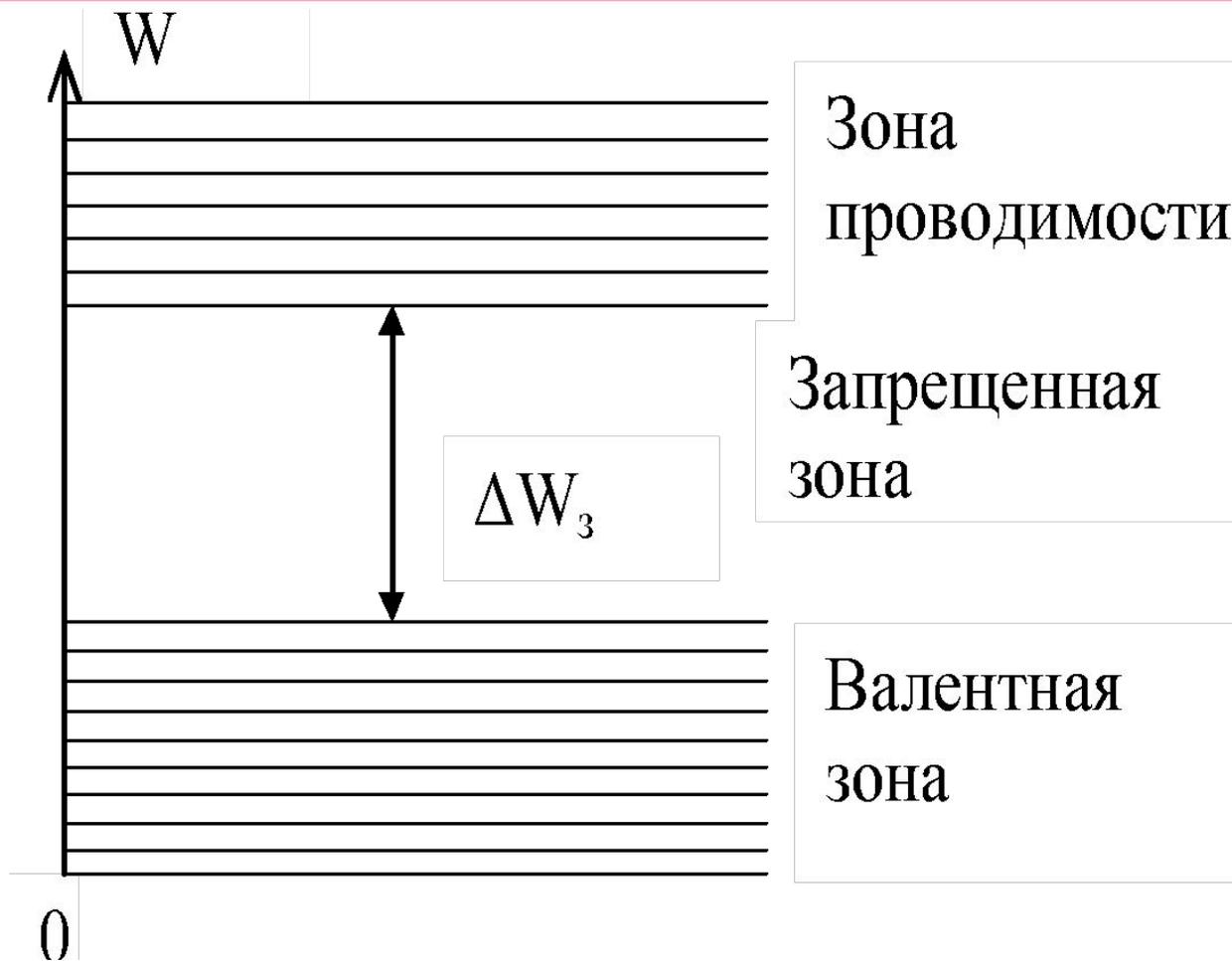
Таким образом, все существенные процессы в полупроводниковых приборах можно изучить, рассматривая только две смежные зоны: зону проводимости и валентную.

Разрешенные энергетические зоны разделены интервалами энергий, которыми электроны не могут обладать и которые называются **запрещенными зонами**.

Зонная структура твердого тела при нулевой температуре лежит в основе классификации металлов, полупроводников и диэлектриков.

$\Delta W_3 = 0$ – проводники, $\Delta W_3 \leq 3$ эВ – полупроводники,

$\Delta W_3 > 3$ эВ – диэлектрики.



Зонная структура при нулевой температуре для полупроводников и диэлектриков

При $T = 0$ проводимость в собственном полупроводнике отсутствует, потому что ЗП пуста, а ВЗ заполнена. При любой температуре, отличной от нуля, в кристалле появляются фононы, энергетический спектр которых непрерывен.

Фононы с энергией, превышающей ΔW_3 , переводят некоторые электроны из верхней части ВЗ в ЗП. В результате в ЗП появляются свободные электроны, а в ВЗ – незаполненные уровни. Те и другие образуются одновременно и в равных количествах. Теперь электроны обеих зон могут двигаться в электрическом поле, обеспечивая проводимость кристалла.

Дырка – это незаполненный уровень валентной зоны.

Энергетическая диаграмма собственного полупроводника



W_{Π} – энергия дна ЗП, $W_{В}$ – энергия потолка ВЗ

Количество электронно-дырочных пар тем больше, чем выше температура и меньше ширина запрещенной зоны. Из-за процессов генерации и рекомбинации носителей зарядов при данной температуре устанавливается определенная концентрация электронов в ЗП n_i и равная ей концентрация дырок p_i в ВЗ.

- **Скорость генерации** – число электронно-дырочных пар, возникающих в единицу времени. Она зависит от температуры и ширины запрещенной зоны.
- **Скорость рекомбинации** – число электронно-дырочных пар, исчезающих в единицу времени. Она зависит от концентрации носителей и свойств полупроводника

$$V_{\text{рек}} = r \cdot n_i \cdot p_i$$

Для состояния термодинамического равновесия ($T = \text{const}$) обязательно выполняется равенство

$$V_{\text{ген}} = V_{\text{рек}}$$

В собственном полупроводнике $n_i = p_i$. ***

$$V_{\text{ген}} = V_{\text{рек}} = r \cdot n_i \cdot p_i = r \cdot n_i^2$$

В результате процессов генерации электронно-дырочных пар и их рекомбинации в собственном полупроводнике для каждого значения температуры устанавливается равновесная (или собственная) концентрация носителей – n_i .

Расчет равновесной концентрации носителей заряда

Это важнейшая задача статистической физики. Для решения этой задачи необходимо знать число квантовых состояний в заданном интервале энергий и вероятность нахождения частиц в этих состояниях.

Для определения концентрации носителей заряда в полупроводнике необходимо знать фактическое число состояний занятых электронами и дырками.

I – энергетическая диаграмма собственного полупроводника.

W_F – энергия Ферми, этот уровень расположен посередине ЗЗ.

II - изменения плотности разрешенных уровней.

$N(W)$ – плотность разрешенных состояний, т.е. число квантовых состояний в единичном интервале энергии для единичного объема кристалла.

III - статистика Ферми – Дирака.

Функция Ферми для электронов

$$f_n(W, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right) + 1},$$

функция Ферми для дырок

$$f_p(W, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{W_F - W}{kT}\right) + 1},$$

$$f_n + f_p = 1.$$

$$T = 0 \text{ K} \quad \begin{cases} f_n(W, 0) = 0, & W > W_F \\ f_n(W, 0) = 1, & W < W_F \end{cases}$$

Статистика Максвелла – Больцмана $\begin{cases} W - W_F \gg kT \\ W_F - W \gg kT \end{cases}$

$$f_n(W, T) = \exp^{***} \left(-\frac{W - W_F}{kT} \right),$$

$$f_p(W, T) = \exp^{***} \left(-\frac{W_F - W}{kT} \right).$$

IV - Распределения электронов и дырок по энергиям

$$\partial n = N(W) \cdot f_n(W) \partial W$$

Количество электронов, находящихся в ЗП

$$n = \int_{W_{\Pi}}^{\infty} N(W) \cdot f_n(W) dW$$

число дырок в ВЗ

$$p = \int_0^{W_{\text{В}}} N(W) \cdot f_p(W) dW$$

Концентрация электронов

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot \exp\left(-\frac{W_{\Pi} - W_F}{kT}\right) \approx N_c \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W_3}{2kT}\right)$$

Концентрация дырок

$$p_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot \exp\left(-\frac{W_F - W_{\mathbf{B}}}{kT}\right) \approx N_v \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right)$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi \cdot m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi \cdot m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2},$$

N_c – эффективная плотность разрешенных состояний в ЗП,

N_v – эффективная плотность разрешенных состояний ВЗ,

m_n^* и m_p^* – эффективные массы электрона и дырки.

Параметры основных полупроводников ($T=300\text{ K}$)

№	Параметр	Ge	Si	GaAs	InSb
6	Ширина ЗЗ, ΔW_3 , эВ	0,72	1,12	1,41	0,18
7	Собственная концентрация носителей заряда n_i , см^{-3}	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^6$	
8	Эффективная масса электронов m_n^*/m_0	0,22	0,33	0,07	0,013
9	Эффективная масса дырок m_p^*/m_0	0,39	0,55	0,5	0,6
10	Эффективная плотность разрешенных состояний в ЗП N_C , см^{-3}	$1,0 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	
11	Эффективная плотность разрешенных состояний в ВЗ N_V , см^{-3}	$0,61 \cdot 10^{19}$	$1,0 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{18}$	

Выводы

1. Распределения носителей заряда по энергиям носят экспоненциальный характер.
2. При $T = 300$ К основная часть электронов имеет энергию близкую к энергии дна ЗП, а дырок – энергию близкую к энергии потолка ВЗ.
3. Равновесная концентрация носителей заряда n_i зависит от температуры

$$n_i \sim T^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W_3}{2kT}\right) \quad ***$$

n_i будет возрастать примерно на (5–7)% при увеличении температуры на 1 градус.

4. n_i зависит от ΔW_3 полупроводника: чем больше ΔW_3 , тем меньше n_i .

- Электрический ток в собственном полупроводнике определяется двумя составляющими – электронным и дырочным токами, текущими в одном направлении.