

Лекция 6

Тема Лекции: Гетеропереходы

к.ф.-м.н., PhD, ассоциированный профессор
Тулегенова Аида Тулегенкызы

Цель лекции:

Рассмотреть физические основы гетеропереходов —контактов между различными полупроводниковыми материалами, изучить их энергетические зонные диаграммы, механизмы переноса носителей заряда и основные области применения в современной электронике и оптоэлектронике

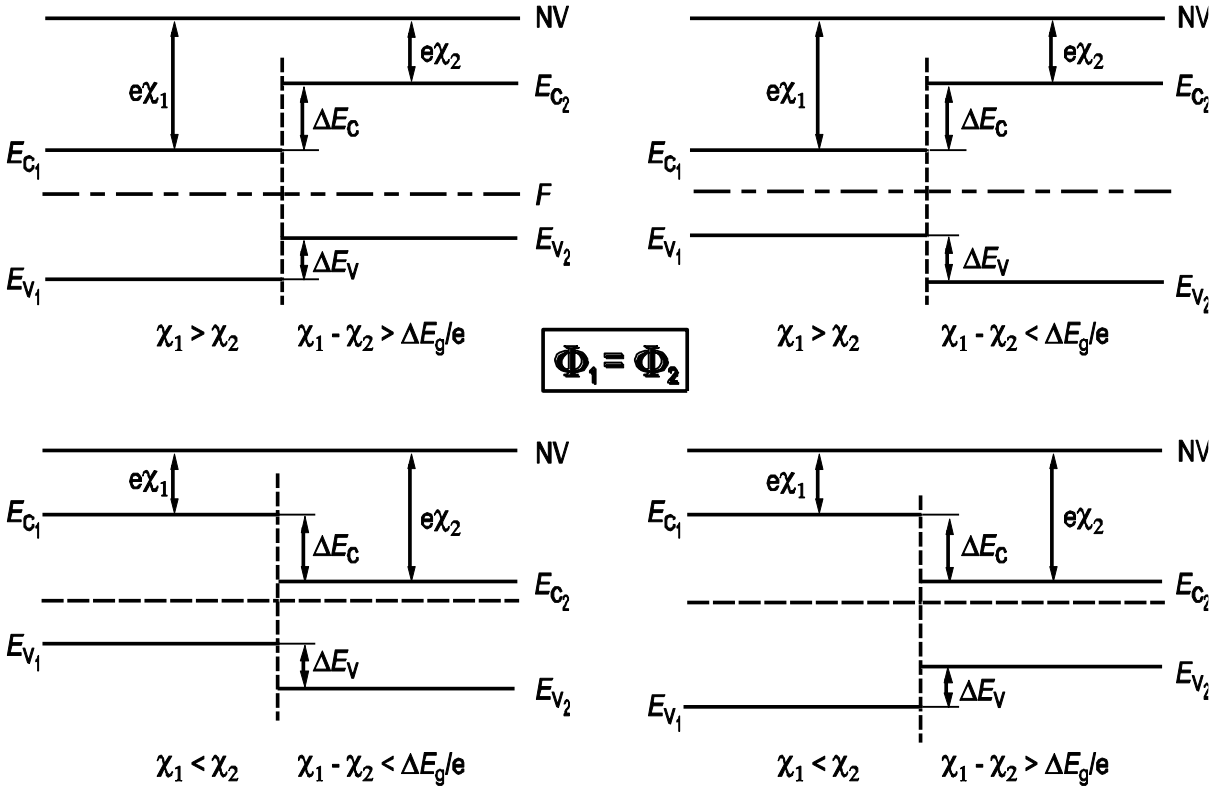
Основные вопросы:

1. Понятие и физическая сущность гетероперехода.
2. Классификация гетеропереходов: изотипные и анизотипные, прямые и косвенные типы.
3. Энергетические соотношения на границе раздела полупроводников, разрывы зон
4. Зонные диаграммы гетеропереходов: типы выравнивания (I, II, III).
5. Формирование встроенного потенциала и выравнивание уровней Ферми.
6. Перенос носителей заряда через гетерограницу: диффузия, дрейф, туннельные процессы.
7. Влияние дефектов и поверхностных состояний на свойства гетероперехода.

Гетеропереходом называют контакт двух полупроводников различного вида и разного типа проводимости, например, **pGe – nGaAs**. Отличие гетеропереходов от обычного *p-n* перехода заключается в том, что в обычных *p-n* переходах используется один и тот же вид полупроводника, например, ***pSi – nSi***. Поскольку в гетеропереходах используются разные материалы, необходимо, чтобы у этих материалов с высокой точностью совпадали два параметра: температурный коэффициент расширения (ТКР) и постоянная решетки

Количество материалов для гетеропереходов ограничено. Наиболее распространенными из них являются германий Ge, арсенид галлия GaAs, фосфид индия InP, четырехкомпонентный раствор InGaAsP.

В зависимости от ширины запрещенной зоны E_g, *электронного сродства* χ *и типа легирования узкозонной и широкозонной областей гетероперехода возможны различные комбинации* E_g *и* χ. *Показаны эти комбинации при условии равенства термодинамических работ выхода.*



С учетом этого в процессе построения зонной диаграммы гетероперехода при сращивании дна **зоны проводимости E_C** этих полупроводников на металлургической границе перехода на зонной диаграмме образуется “**пичок**”. Величина “**пичка**” **ΔE_C равна:**

$$\Delta E_C = \chi_{Ge} - \chi_{GaAs}$$

При сшивании вершины валентной **зоны E_V** в области металлургического перехода получается **разрыв ΔE_V.** Величина “***разрыва***” равна:

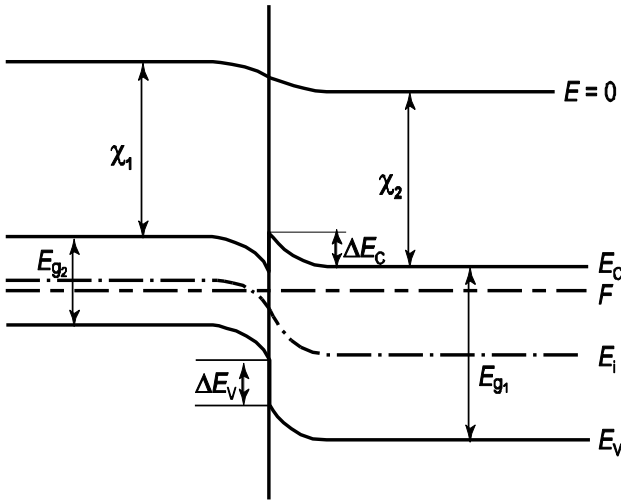
$$\Delta E_V = -\chi_{Ge} - E_{g\,Ge} + \chi_{GaAs} + E_{g\,GaAs} = -\Delta E_C + (E_{g\,GaAs} - E_{g\,Ge})$$

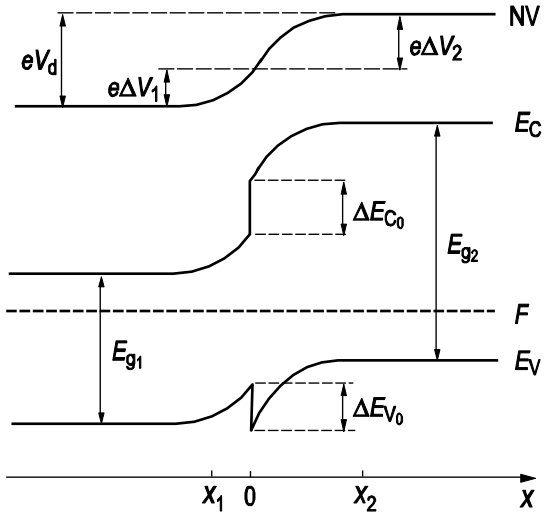
Из приведенных соотношений следует, что суммарная величина ***“пичка” ΔE_C и “разрыва” ΔE_V составляет***

$$\Delta E_C + \Delta E_V = (E_{g\,GaAs} - E_{g\,Ge})$$

“Пичок” наблюдается в области металлургического перехода для энергии вершины валентной зоны E_V. Величина “пичка” ΔE_V равна

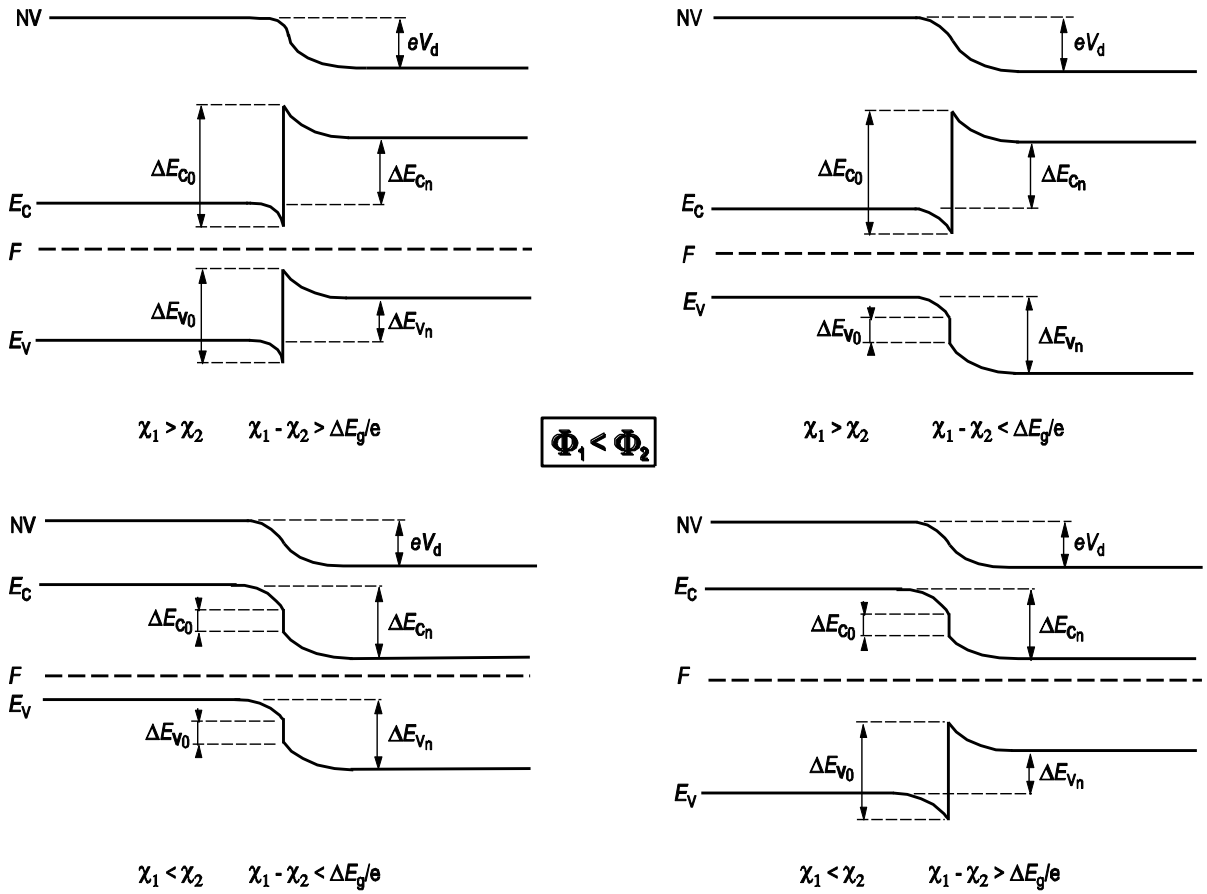
$$\Delta E_{\mathrm{V}} = -\chi_{\mathrm{Ge}} - E_{\mathrm{g\,Ge}} + \chi_{\mathrm{GaAs}} + E_{\mathrm{g\,GaAs}} = -\Delta E_{\mathrm{C}} + (E_{\mathrm{g\,GaAs}} - E_{\mathrm{g\,Ge}})$$





Аналогичным образом можно построить зонные диаграммы для гетеропереходов при любых комбинациях уровней легирования, ширины запрещенной зоны и электронного сродства

Зонные диаграммы для различных типов гетеропереходов при условии, что термодинамическая работа выхода первого слоя меньше, чем второго ($\Phi_1 < \Phi_2$), и при различных комбинациях для электронного сродства



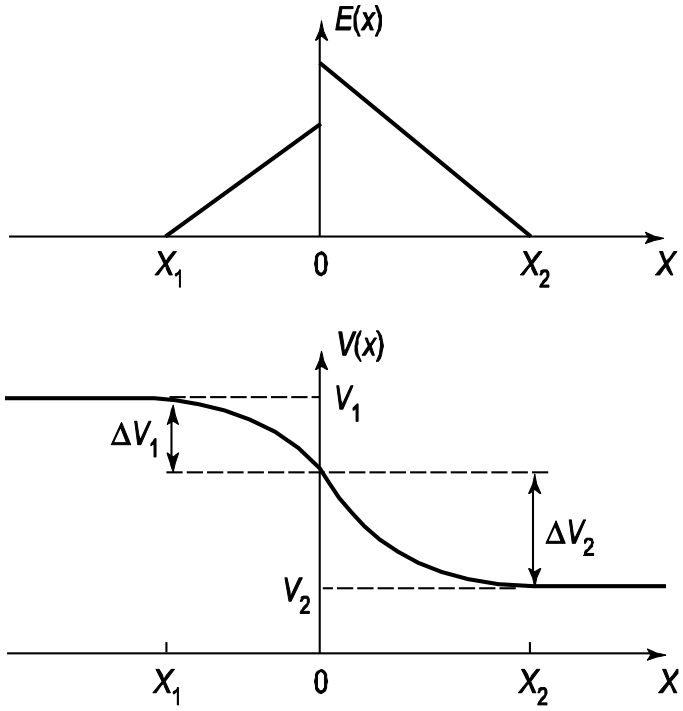
Решение уравнения Пуассона в этом случае дает следующие выражения для электрического поля *E*, потенциала φ и ширины обедненной области W_{1n} и W_{2p} при наличии внешнего напряжения:

$$E_{1\max} = \frac{qN_D W_{1n}}{\varepsilon_1 \varepsilon_0}; \quad E_{2\max} = \frac{qN_A W_{2p}}{\varepsilon_2 \varepsilon_0}$$

$$V_{1n} = \frac{qN_D W_{1n}^2}{2\varepsilon_1 \varepsilon_0}; \quad V_{2p} = \frac{qN_A W_{2p}^2}{2\varepsilon_2 \varepsilon_0}$$

$$W_{1n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_0 (\Delta\varphi_0 - V)}{qN_D^2 \left(\frac{\varepsilon_1}{N_A} + \frac{\varepsilon_2}{N_D} \right)}}; \quad W_{2p} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_0 (\Delta\varphi_0 - V)}{qN_A^2 \left(\frac{\varepsilon_1}{N_A} + \frac{\varepsilon_2}{N_D} \right)}}$$

Распределения электрического поля и потенциала в области пространственного заряда гетероперехода



Распределение электрического поля и потенциала в области пространственного заряда **гетероперехода nGe – pGaAs**

Выводы лекции:

Гетеропереход — это контакт двух полупроводников с разной шириной запрещённой зоны. Гетеропереходы бывают изотипными (n–n, p–p) и анизотипными (p–n). Различие в электронном сродстве и ширине запрещённой зоны приводит к разрывам зон ΔE_c и ΔE_v на границе раздела; по правилу Андерсона $\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2$. По взаимному расположению зон выделяют три типа выравнивания:

I тип — охватывающий (GaAs/AlGaAs): электроны и дырки локализуются в одном материале.

II тип — ступенчатый: электроны и дырки пространственно разделены.

III тип — с разорванной щелью (InAs/GaSb).

Как и в p–n переходе, при контакте уровни Ферми выравниваются, образуются встроенный потенциал и изгиб зон. Отличие в том, что разрывы зон создают для электронов и дырок разные барьеры.

Ток через гетерограницу переносится диффузией, дрейфом, термоэлектронной эмиссией и туннелированием через барьерные пики. Несоответствие параметров решёток порождает дислокации несоответствия и поверхностные состояния. Они усиливают безызлучательную рекомбинацию и закрепляют уровень Ферми, поэтому качество границы раздела определяет характеристики прибора. Гетеропереходы позволяют управлять движением и локализацией носителей. На них основаны:

полупроводниковые лазеры на двойной гетероструктуре;

светодиоды;

транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT);

гетеробиполярные транзисторы;

высокоэффективные солнечные элементы.

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. Что называется гетеропереходом и чем он отличается от p–n перехода в одном материале?
2. Как классифицируются гетеропереходы по типу выравнивания зон?
3. Объясните физический смысл разрывов зон
4. Что представляет собой зонная диаграмма гетероперехода типа I и типа II?
5. Как осуществляется перенос носителей через границу двух полупроводников?
6. Какие методы применяются для получения гетероструктур?
7. В каких приборах используются гетеропереходы и почему?
8. Какие современные материалы используются в наноразмерных гетероструктурах?

Список литературных источников:

1. Соколов В. И. Физика и технология полупроводников. — М.: МИФИ, 2018.
2. Трифонов Е. Н. Электронные процессы в твёрдых телах. — М.: Наука, 2015.
3. Sze, S. M., Ng, K. K. Physics of Semiconductor Devices. — Wiley, 2007
4. Yu, P. Y., Cardona, M. Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties. — Springer, 2019.
5. Bhattacharya, P. Semiconductor Optoelectronic Devices. — Prentice Hall, 1997.
6. Kittel, C. Introduction to Solid State Physics. — Wiley, 2018.
7. Esaki, L. Long journey into tunneling. — Rev. Mod. Phys., 46, 1974.