

Физика конденсированного состояния

Презентации к лекционному курсу

Гетеропереходы

Основные понятия

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

Основные понятия

- С учетом сказанного количество материалов для гетеропереходов ограничено. Наиболее распространенными из них являются германий Ge, арсенид галлия GaAs, фосфид индия InP, четырехкомпонентный раствор InGaAsP

Зонные диаграммы гетеропереходов при различных комбинациях E_g и χ в случае равенства термодинамических работ выхода $\Phi_1 = \Phi_2$

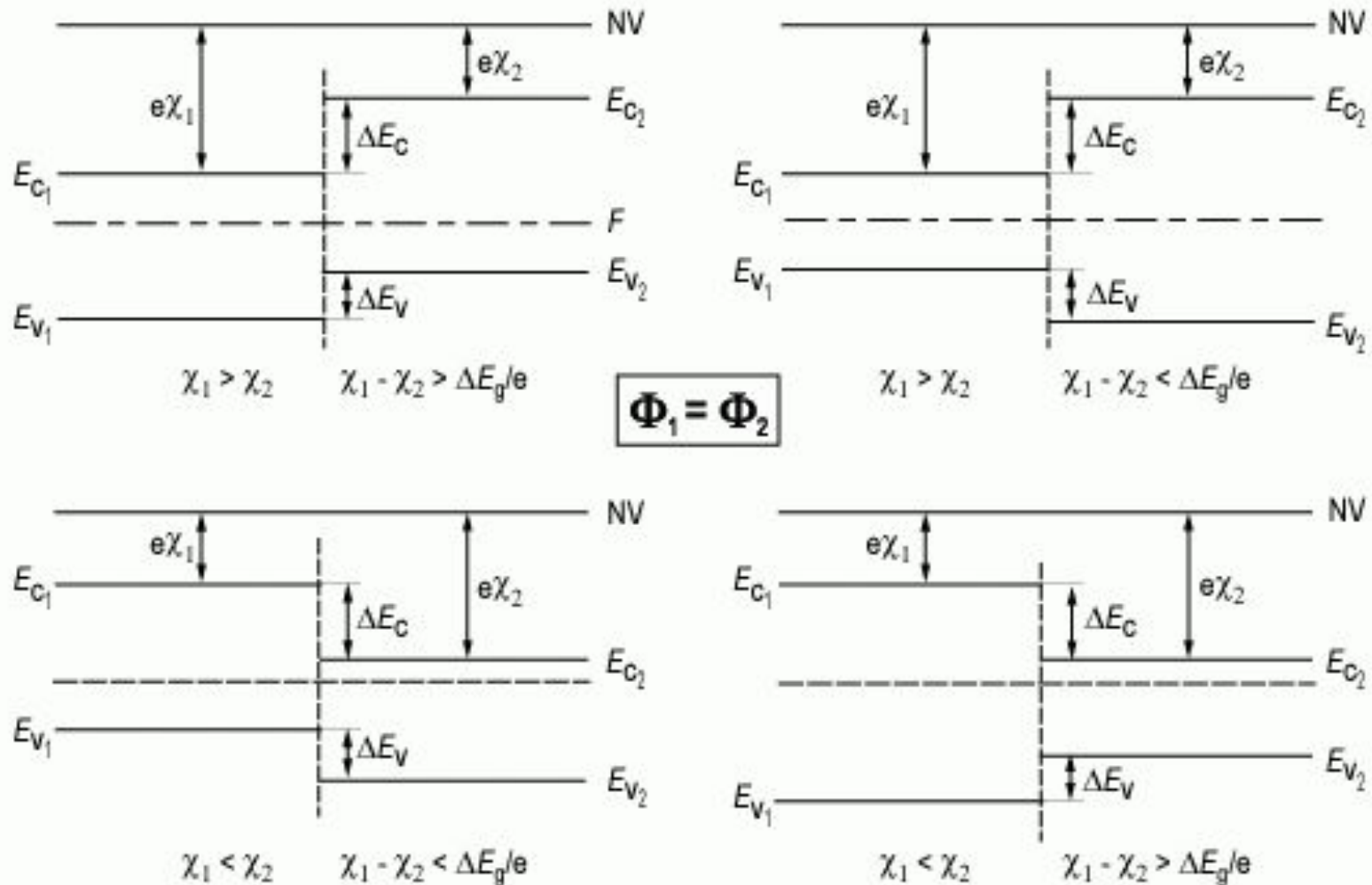


Таблица 1. Параметры выбранных для расчета полупроводниковых материалов

Параметры материала	Обозначение	Германий (p Ge)	Арсенид галлия (n GaAs)
Постоянная решетки, Å	a	5,654	5,658
Коэффициент линейного температурного расширения, 10^{-6} K^{-1}	TKP	5,9	6,0
Легирующая концентрация, см^{-3}	$N_{A,D}$	$3 \cdot 10^{14}$	10^{14}
Расстояние от уровня Ферми до зоны разрешенных энергий, эВ	W_0	0,14	0,17
Расстояние от уровня Ферми до середины запрещенной зоны, эВ	φ	0,21	0,55
Электронное сродство, В	χ	4,05	4,07

Контакт германий $p\text{Ge}$ и арсенид галлия $n\text{GaAs}$

- Приведем в контакт германий $p\text{Ge}$ и арсенид галлия $n\text{GaAs}$.
- При построении зонной диаграммы гетероперехода учтем следующие факторы:
 - 1. Уровень вакуума $E=0$ непрерывен.
 - 2. Электронное сродство в пределах одного сорта полупроводника χGe и χGaAs постоянно.
 - 3. Ширина запрещенной зоны E_g в пределах одного сорта полупроводника остается постоянной.

Контакт германий $p\text{Ge}$ и арсенид галлия $n\text{GaAs}$

- С учетом этого в процессе построения зонной диаграммы гетероперехода при сращивании дна зоны проводимости EC этих полупроводников на металлургической границе перехода на зонной диаграмме образуется "пичок". Величина "пичка" ΔEC равна:

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

Контакт германий $p\text{Ge}$ и арсенид галлия $n\text{GaAs}$

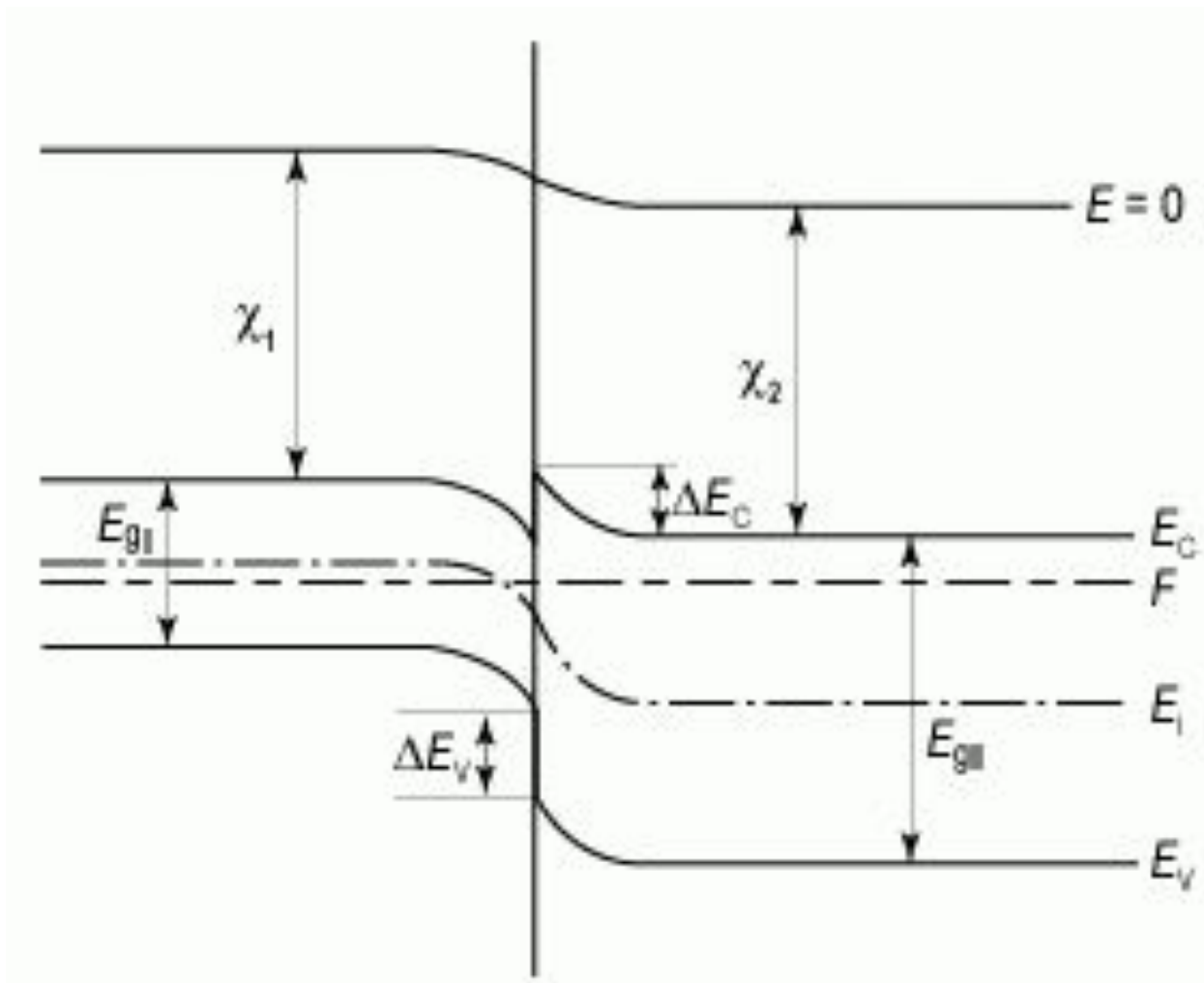
- При сшивании вершины валентной зоны EV в области металлургического перехода получается разрыв ΔEV . Величина "разрыва" равна:

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

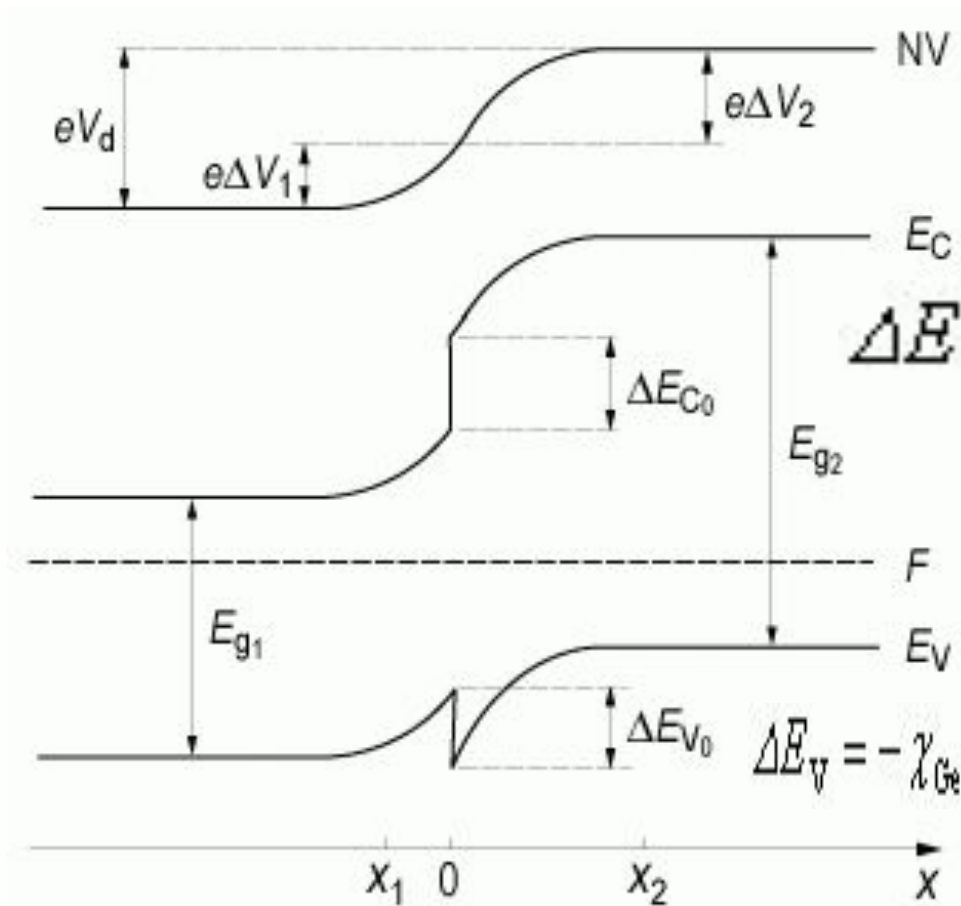
- Из приведенных соотношений следует, что суммарная величина "пичка" ΔE_C и "разрыва" ΔEV составляет

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

Зонная диаграмма гетероперехода $p\text{Ge}$ - $n\text{GaAs}$ в равновесных условиях



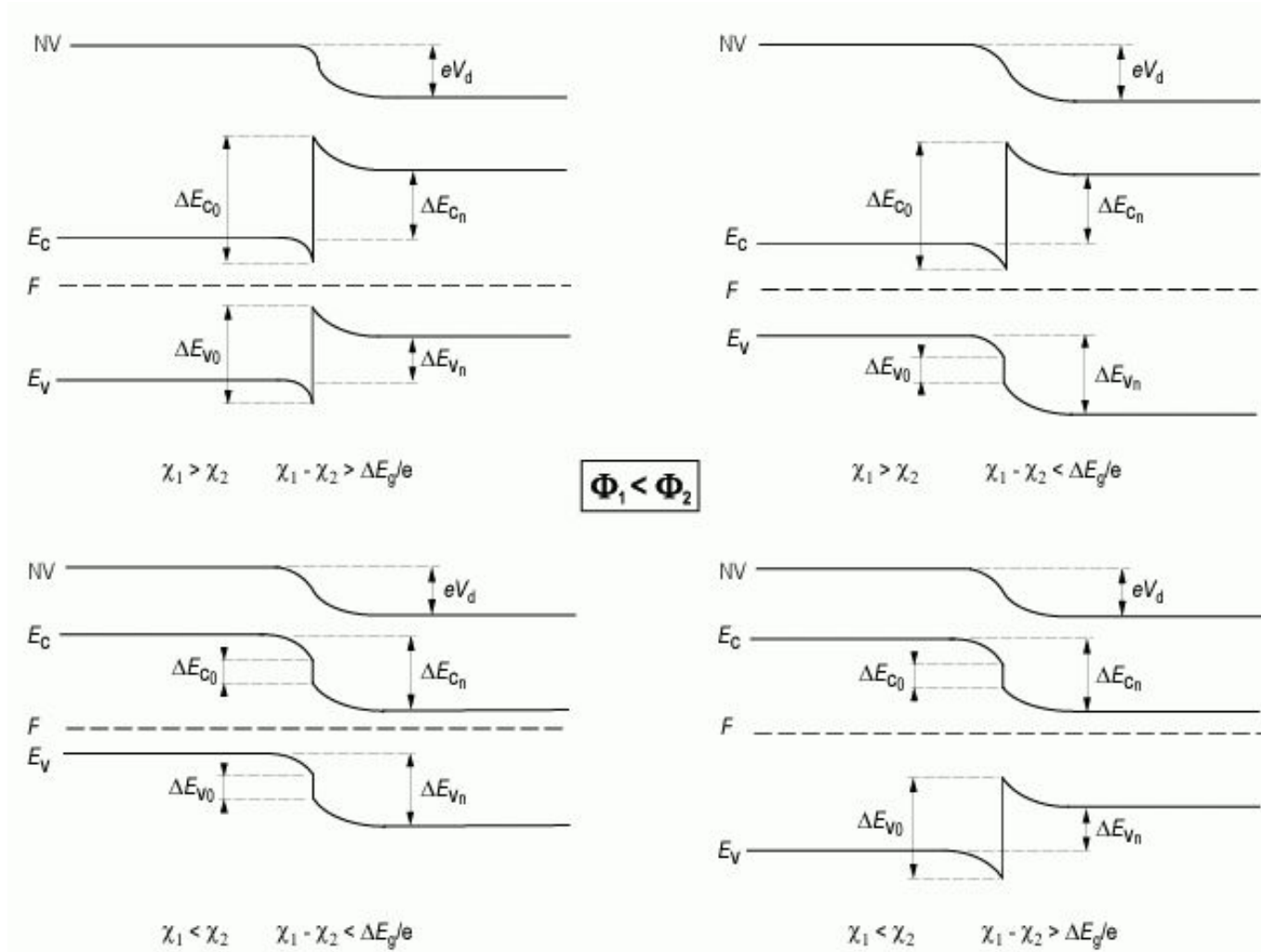
Зонная диаграмма гетероперехода $n\text{Ge}$ - $p\text{GaAs}$ в равновесных условиях



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

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

Зонные диаграммы для различных типов гетеропереходов при условии, что термодинамическая работа выхода $\Phi_1 < \Phi_2$



Распределение электрического поля и потенциала в области пространственного заряда для гетероперехода

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

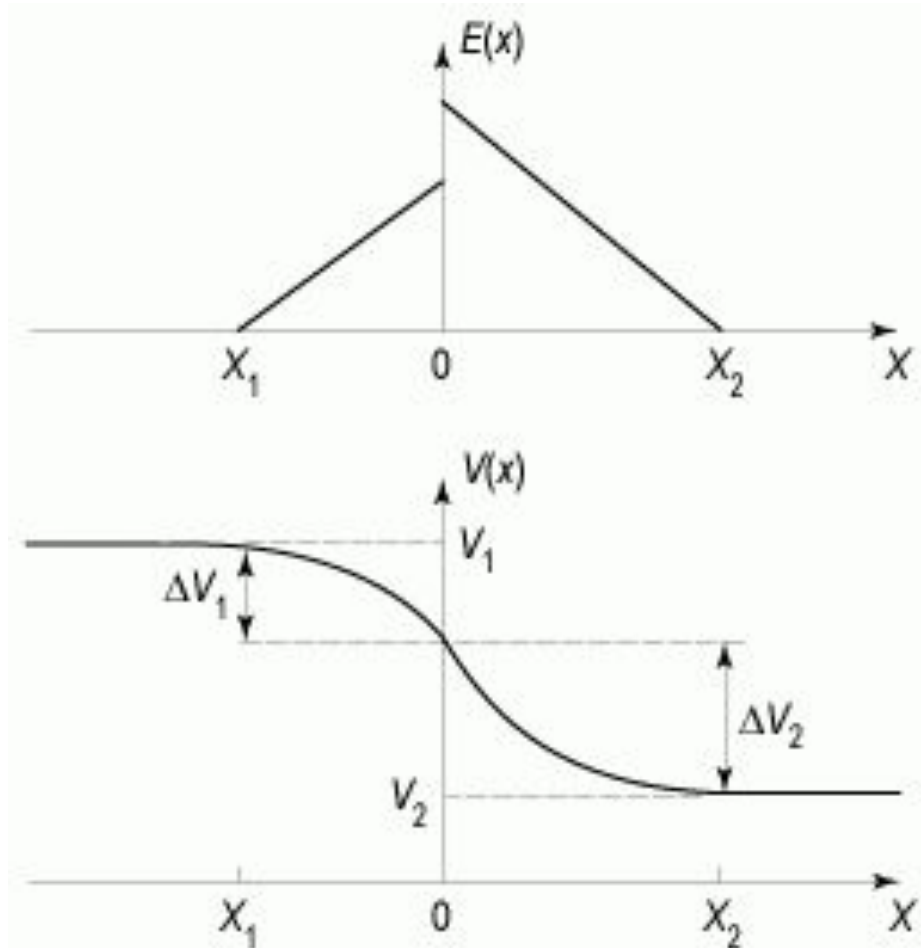
$$V_{\ln} = \frac{qN_D W_{\ln}^2}{2\varepsilon_1 \varepsilon_0}; \quad V_{2p} = \frac{qN_A W_{2p}^2}{2\varepsilon_2 \varepsilon_0},$$

Ширина области пространственного заряда гетероперехода W

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

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_0(\Delta\varphi_0 - V)}{q} \left(\frac{1}{N_A\varepsilon_1} + \frac{1}{N_D\varepsilon_2} \right)}.$$

Распределение электрического поля и потенциала в области пространственного заряда гетероперехода $n\text{Ge} - p\text{GaAs}$



$$\varepsilon_1 E_{1\text{max}} = \varepsilon_2 E_{2\text{max}} .$$

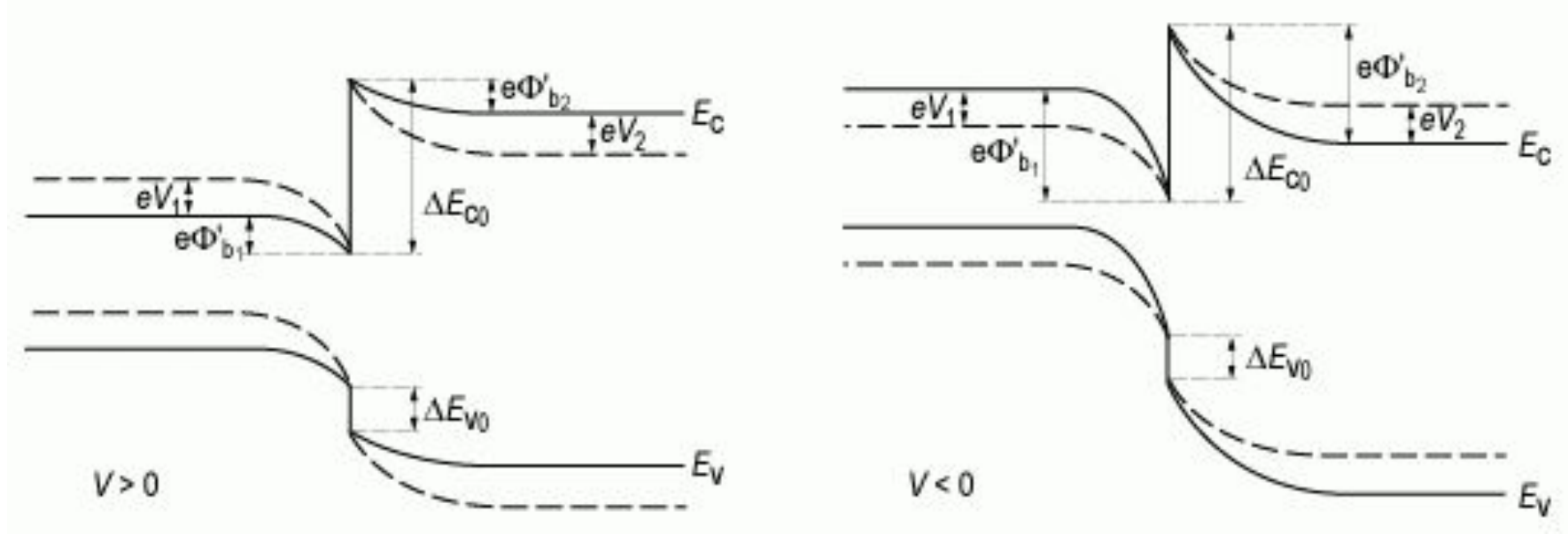
$$\Delta \varphi_0 = V_{\text{ln}} + V_{2\text{p}} .$$

Распределение электрического поля

- Скачок электрического поля в гетеропереходе на металлургической границе обусловлен различными значениями диэлектрических постоянных ϵ_1 и ϵ_2 .

- Рассмотрим зонную диаграмму гетероперехода при приложении внешнего напряжения V . Как и в случае p - n -перехода, знак напряжения будет определяться знаком приложенного напряжения на p -область гетероперехода.

Зонные диаграммы гетероперехода nGe - pGaAs при положительном $V > 0$ и отрицательном $V < 0$



Пунктиром изображены энергетические уровни в равновесных условиях $V = 0$

Вольт-амперные характеристики гетероперехода

- Расчет вольт-амперных характеристик гетероперехода проводится исходя из баланса токов термоэлектронной эмиссии. Используя тот же самый подход, для вольт-амперной характеристики гетероперехода получаем следующую зависимость

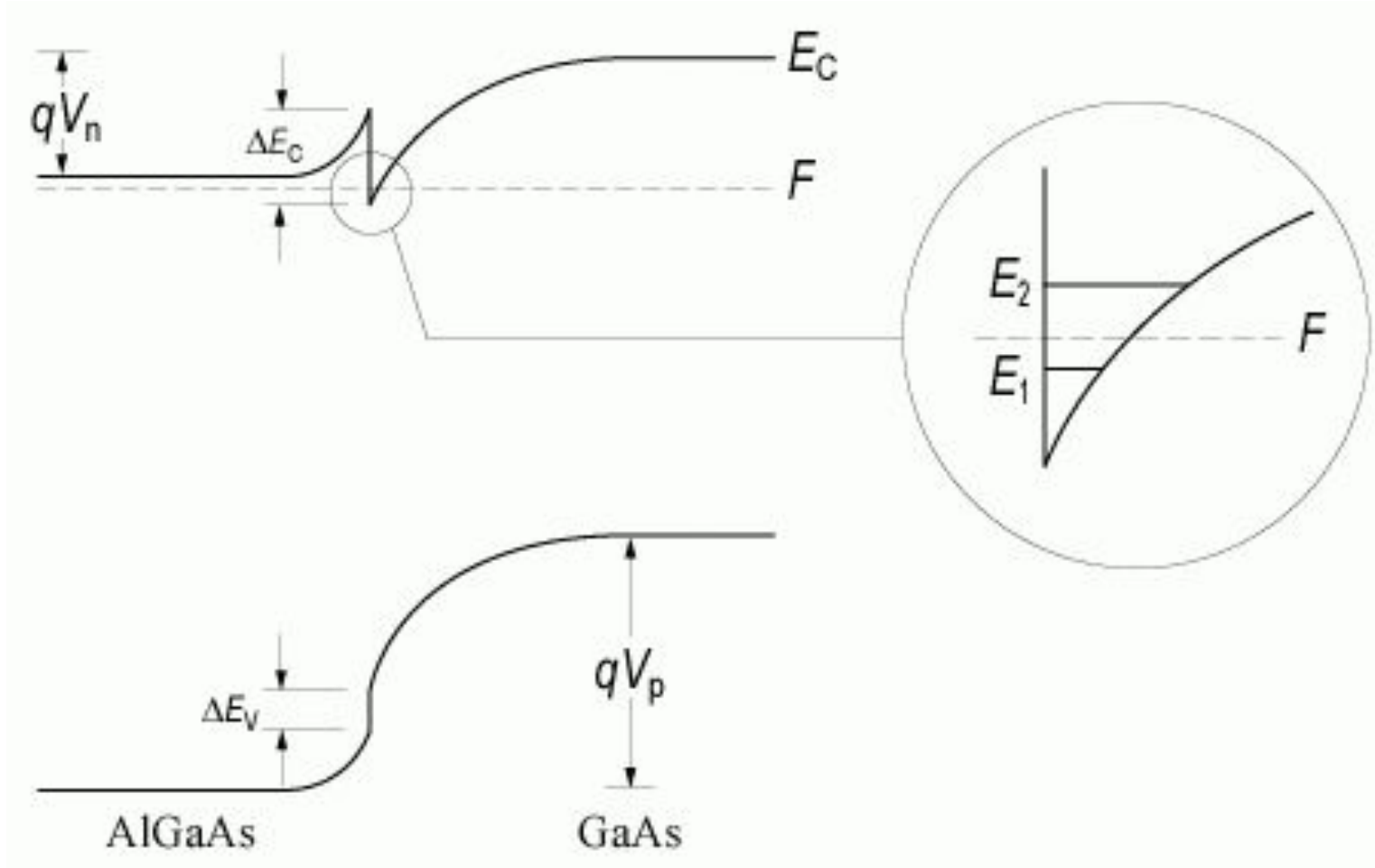
$$J = J_s (e^{qV} - 1).$$

ВАХ при прямом смещении

$$\frac{J_p}{J_n} = \frac{qL_p p_n}{\tau_p} / \frac{qL_n n_p}{\tau_n} \approx \frac{p_n}{n_p} = \frac{n_{i2}^2}{N_D} / \frac{n_{i1}^2}{N_A} = \frac{n_{i2}^2}{n_{i1}^2}$$

- Поскольку арсенид галлия – более широкозонный полупроводник, чем германий, то собственная концентрация в арсениде галлия (n_{i2}) будет много меньше, чем в германии (n_{i1}), следовательно, дырочная компонента J_p инжекционного тока будет много меньше, чем электронная компонента J_n

Потенциальная яма в гетеропереходах



Потенциальная яма в гетеропереходах

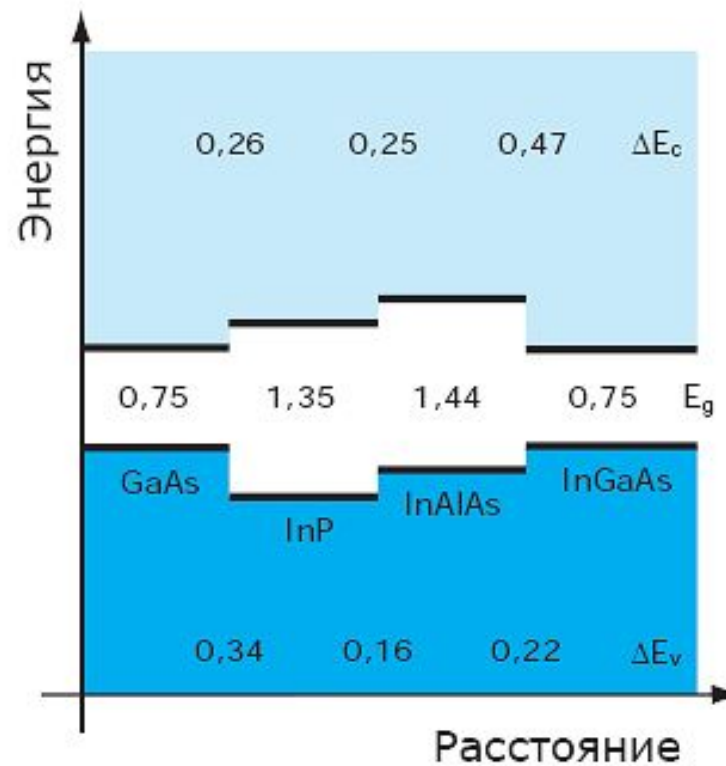
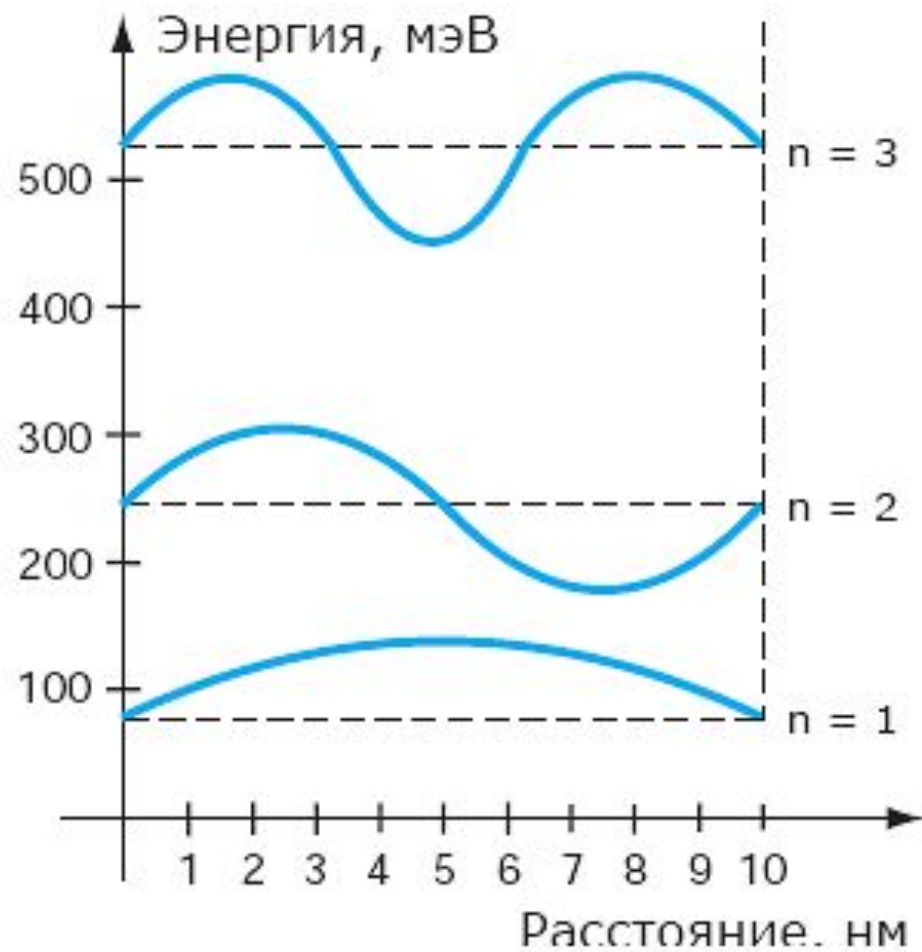
- На зонной диаграмме гетеропереходов видно, что в области "пичка" для электронов или дырок реализуется потенциальная яма. Расчеты электрического поля в этой области показывают, что его значение достигает величины $E \sim 10^6$ В/см. В этом случае электронный газ локализован в узкой пространственной области вблизи металлургической границы гетероперехода

Двумерный электронный газ

- Для описания такого состояния используют представление о двумерном электронном газе.
- Для двумерного электронного газа меняется плотность квантовых состояний в разрешенных зонах, спектр акустических и оптических фононов, а, следовательно, кинетические явления в двумерных системах (подвижность носителей, магнетосопротивление и эффект Холла).

Двумерный электронный газ

- Самое важное состоит вот в чем: разрывы энергии уровней зоны проводимости и валентной зоны представляют собой квантовые потенциальные барьеры для электронов и, соответственно, дырок



Квантовые ямы

- Формируемые квантовые ямы могут иметь отнюдь не только прямоугольную форму, плавным изменением состава (т. е. величины x в формуле вида $Ga_xAl_{1-x}As$) можно получить, например, яму «пилообразного» вида

- Могут быть сформированы структуры с практически любой наперед заданной вольт-амперной характеристикой и любыми, необходимыми на практике, электронными свойствами. Работы по созданию гетероструктур принесли Нобелевскую премию по физике 2000 года Жоресу Ивановичу Алферову (Россия) и Герберту Кремеру (Германия) «за разработку полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокоскоростной оптоэлектронике»