

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методической комиссией физического факультета для
студентов ННГУ, обучающихся по направлению подготовки 210600
«Нанотехнология»

Нижний Новгород
2009

УДК 621.38
ББК 32.852
П 53

П 53. Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход. Учебно-методическое пособие. /Сост. П.А. Шиляев, Д.А. Павлов. – Н.Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 18 с.

Составители: старший преподаватель, к.ф.-м.н. Шиляев П.А.,
профессор, д.ф.-м.н. Павлов Д.А.

Рецензент: старший научный сотрудник НИФТИ ННГУ, к.ф.-м.н.
С.М. Некоркин

Данное учебно-методическое пособие является дополнением к курсу «Физика низкоразмерных систем», читаемом на физическом факультете ННГУ для студентов, обучающихся по направлению подготовки 210600 «Нанотехнология».

В пособии рассматривается метод построения энергетической диаграммы идеального гетероперехода по правилу электронного сродства и приводится методика расчета параметров резкого анизотипного гетероперехода. Дана классификация гетеропереходов и приведены справочные данные по основным полупроводниковым материалам, применяемым для создания гетеропереходов.

УДК 621.38
ББК 32.852
П 53

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА

Полупроводниковые гетероструктуры лежат в основе конструкций современных транзисторов, приборов квантовой электроники, СВЧ-техники, электронной техники для систем связи, телекоммуникаций, вычислительных систем и светотехники [1].

Основным элементом гетероструктур различного типа является гетеропереход.

Под гетеропереходом понимается контакт двух различных по химическому составу полупроводников, при котором кристаллическая решетка одного материала без нарушения периодичности переходит в решетку другого материала.

Различают изотипные и анизотипные гетеропереходы. Если гетеропереход образован двумя полупроводниками одного типа проводимости, то говорят об изотипном гетеропереходе. Анизотипные гетеропереходы образуются полупроводниками с разным типом проводимости.

Существует три модели гетероперехода:

- идеальный гетеропереход;
- неидеальный гетеропереход;
- гетеропереход с промежуточным слоем.

В идеальном гетеропереходе, в отличие от неидеального, на границе раздела материалов отсутствуют локальные энергетические состояния для электронов. Гетеропереход с промежуточным слоем формируется через слой конечной толщины и локальные энергетические состояния могут существовать как в самом промежуточном слое, так и на границах его раздела.

В данном пособии рассматривается построение энергетической диаграммы в модели идеального гетероперехода.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА ИДЕАЛЬНОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДА

Для построения энергетической диаграммы часто применяют простое «правило электронного сродства» (в англоязычной литературе – правило Андерсона) [2], согласно которому разрыв зоны проводимости равен разности электронного сродства двух материалов. Но следует иметь в виду, что данный подход далеко не всегда справедлив, так как в разрыв зон зависят еще и от деталей формирования связей на гетерогранице и деформационного потенциала.

Для построения энергетической диаграммы идеального гетероперехода должны быть известны следующие характеристики полупроводников:

-ширина запрещенной зоны (E_{g1} , E_{g2}). При построении считаем, что $E_{g2} > E_{g1}$;

-термодинамическая работа выхода (Φ_1 , Φ_2) – расстояние от уровня Ферми полупроводника до уровня вакуума. Следует учитывать, что

термодинамическая работа выхода зависит от положения уровня Ферми, то есть от уровня легирования материала;

-средство к электрону (χ_1, χ_2) – расстояние от дна зоны проводимости до уровня вакуума.

При построении диаграммы считаем, что

-ширина запрещенной зоны и внешняя работа выхода неизменны до плоскости контакта, на которой они скачком изменяют свою величину;

-в приконтактном слое каждого из полупроводников происходит изменение потенциальной энергии электрона. Полное изменение потенциальной энергии равно разности работ выхода, что обеспечивает неизменное положение уровня Ферми вдоль гетероперехода.

До «приведения в контакт» двух полупроводников потенциальная энергия электронов в них разная из-за разной термодинамической работы выхода. При «соприкосновении» двух полупроводников, как и в случае обычного р-п-перехода, электроны начнут «переходить» из полупроводника с меньшей работой выхода в полупроводник с большей. Это будет происходить до тех пор, пока диффузионный ток не будет скомпенсирован дрейфовым током носителей заряда под воздействием поля, созданным избыточными носителями. При этом возникнет контактная разность потенциалов

$$\varphi_0 = \Phi_2 - \Phi_1 \quad (1)$$

и образуется область пространственного заряда шириной d (Рисунок 1).

При таком построении видно, что из-за различия электронного средства в контактирующих полупроводниках дно зоны проводимости первого полупроводника выходит на плоскость контакта в точке, не совпадающей в общем случае с точкой выхода на эту плоскость дна зоны проводимости второго полупроводника – формируется разрыв зоны проводимости ΔE_c . Он равен

$$\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2. \quad (2)$$

Аналогично формируется и разрыв валентной зоны. Он равен:

$$\Delta E_v = E_{g_2} - E_{g_1} - \Delta E_c. \quad (3)$$

Следует заметить, что разрывы зон могут быть как положительными так и отрицательными. Можно выделить следующие разновидности гетеропереходов [1]:

1) охватывающий переход возникает, когда разрыв зоны проводимости ΔE_c и разрыв валентной зоны ΔE_v положительны. Такой случай реализуется, например, в гетеропереходе GaAs-AlGaAs. В литературе данный тип гетероперехода называют гетеропереходом I типа, или стандартным.

2) в случае же, когда разрыв один из разрывов зон положителен, а другой отрицателен говорят о переходе II типа, или ступенчатом. Данный случай реализуется в гетеропереходе InP-In_{0,52}Al_{0,48}As.

3) также возможен вариант, когда запрещенные зоны вообще не перекрываются по энергии. Данный гетеропереход называют гетеропереходом

III типа или разрывным гетеропереходом. Классический пример – гетеропереход InAs-GaSb.

Экспериментально измеренные параметры основных типов гетеропереходов изображены на рисунке 2.

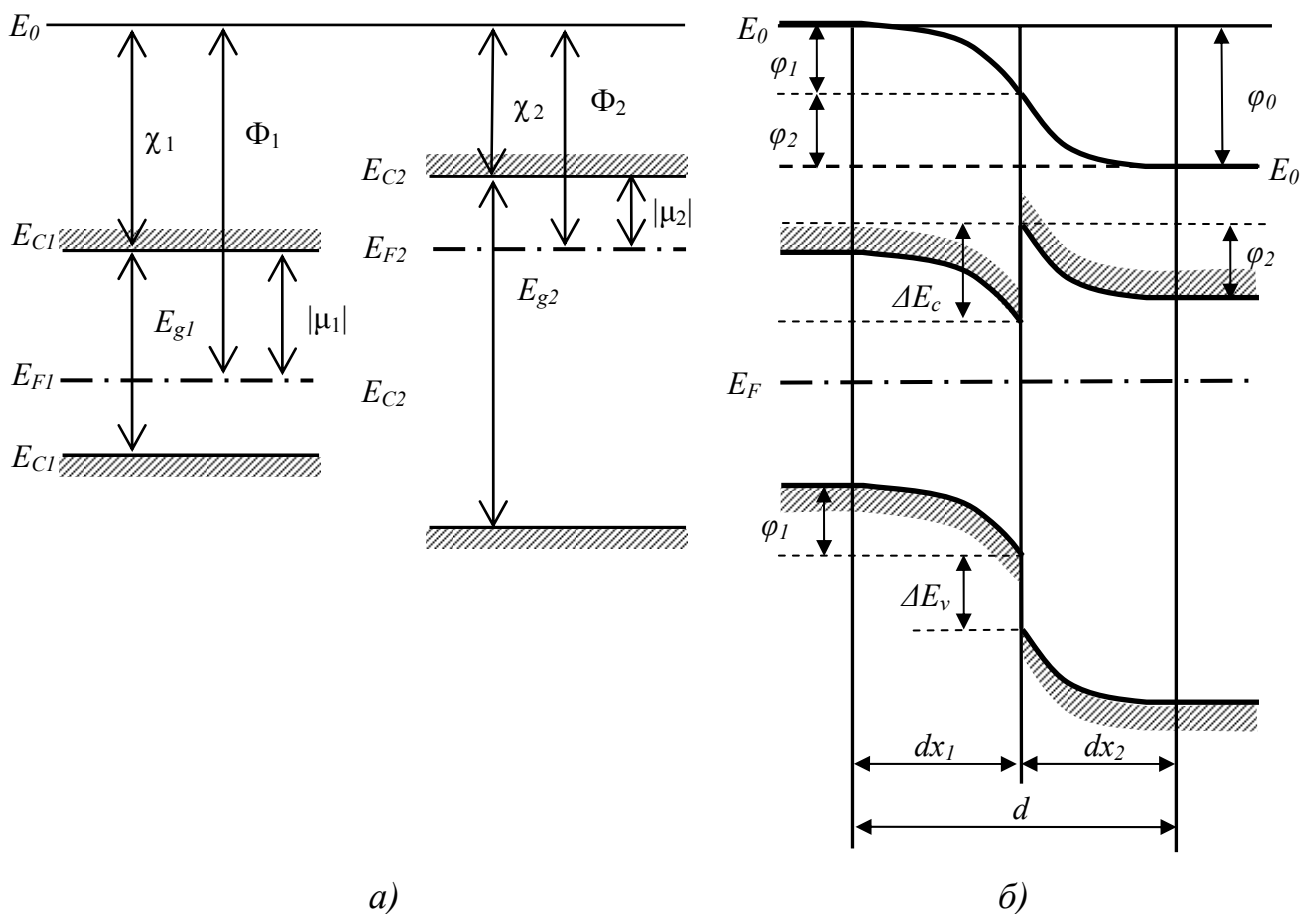


Рисунок 1. Энергетические диаграммы полупроводников (а) и диаграмма идеального гетероперехода (б) [3].

Для характеристики гетероперехода также применяют параметр, называемый разрывом зоны проводимости, показывающий процент разрыва зоны, приходящийся на зону проводимости.

$$Q = \frac{\Delta E_c}{\Delta E_g}, \quad (4)$$

где

$$\Delta E_g = E_{g2} - E_{g1}. \quad (5)$$

Для построения энергетической диаграммы конкретного гетероперехода, нужно вычислить контактную разность потенциалов ϕ_0 . Для этого необходимо сначала рассчитать положение уровня Ферми в каждом из материалов гетеропары [4].

Для вычисления положения уровня Ферми относительно дна зоны проводимости ($\mu = F - E_c$) потребуется знать температуру, концентрацию основных носителей и плотность состояний в зонах N_c и N_v .

Для невырожденного примесного полупроводника n типа положение уровня Ферми относительно зоны проводимости находится из выражения

$$\mu = -kT \ln \frac{N_c}{N_d}, \quad (6)$$

для дырочного:

$$\mu = kT \ln \frac{N_v}{N_a} - E_g, \quad (7)$$

где N_a , N_d – концентрации акцепторов и доноров, которые мы считаем полностью ионизованными.

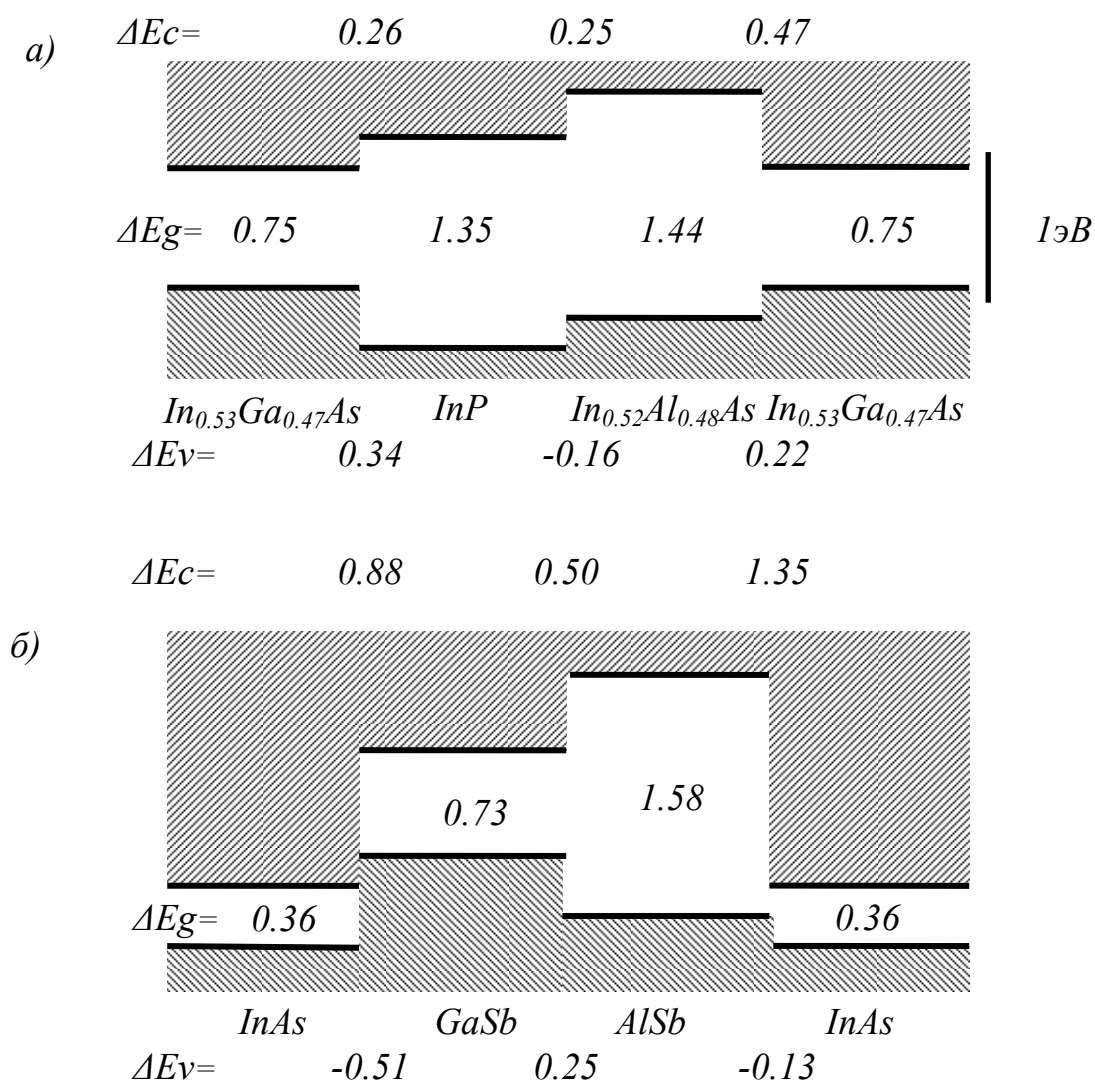


Рисунок 2. Экспериментально определенные разрывы валентной зоны и зоны проводимости двух наиболее близких по параметрам решетки гетеропар: а) $In_{0.53}Ga_{0.47}As-In_{0.52}Al_{0.48}As-In_{0.53}Ga_{0.47}As-InP$ и б) $InAs-GaSb-AlSb$ [5].

В справочниках обычно приведены величины эффективных масс плотности состояний для электронов m_{dn} и дырок m_{dp} . Тогда N_c и N_v вычисляются по формулам

$$N_C = \frac{2(2\pi m_{dn} kT)^{3/2}}{h^3}, \quad N_V = \frac{2(2\pi m_{dp} kT)^{3/2}}{h^3} \quad (8)$$

Если приведены поперечная m_{\perp} и продольная m_{\parallel} составляющая эффективных масс, число эквивалентных эллипсоидов M , то плотность состояний в этом случае рассчитывается по формуле

$$m_d = M^{2/3} (m_{\perp}^2 m_{\parallel})^{1/3}. \quad (9)$$

В полупроводниках р-типа необходимо также учесть вклад двух подзон от легких и тяжелых дырок:

$$m_h^{3/2} = m_{lh}^{3/2} + m_{hh}^{3/2}. \quad (10)$$

Далее по формулам (6), (7) вычисляем положение уровня Ферми и контактную разность потенциалов:

$$\varphi_0 = |\Phi_1 - \Phi_2| = |(\chi_1 + |\mu_1|) - (\chi_2 + |\mu_2|)|. \quad (11)$$

Для вычисления распределения потенциала в области пространственного заряда требуется решить совместно уравнение Пуассона и уравнение плотности тока, при условии, чтобы в равновесии диффузионный ток через переход уравновешивался дрейфовым током. Подробно ознакомиться с расчетом можно в [3]. Здесь лишь приведем конечный результат.

В приближении Шоттки в случае равномерного легирования полупроводников для анизотипного гетероперехода получается линейная зависимость поля и параболическая зависимость потенциала:

в области $-d_1 \leq x \leq 0$:

$$E = -\frac{en_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_1} (x + d_1), \quad (12)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{e^2 n_1}{2\varepsilon_0 \varepsilon_1} (x + d_1)^2. \quad (13)$$

В области $0 \leq x \leq d_2$:

$$E = -\frac{en_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_2} (d_2 - x), \quad (14)$$

$$\varphi = \frac{e^2 n_2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_2} (d_2 - x)^2. \quad (15)$$

А размер области пространственного заряда получаются равными:

$$d_1 = \left(\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_1}{e^2 n_1} \varphi_1 \right)^{1/2}, \quad (16)$$

$$d_2 = \left(\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_2}{e^2 n_2} \varphi_2 \right)^{1/2}, \quad (17)$$

где φ_1, φ_2 – контактные разности потенциалов, приходящиеся на n и p области, которые для идеального гетероперехода равны [3]:

$$\varphi_1 = \varphi_0 \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_1 n_1}{\varepsilon_2 n_2}}, \quad \varphi_2 = \varphi_0 \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_2 n_2}{\varepsilon_1 n_1}}. \quad (18)$$

Полная длина ОПЗ:

$$d = d_1 + d_2 = \left[\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2(n_1 + n_2)}{e^2 n_1 n_2 (\varepsilon_1 n_1 + \varepsilon_2 n_2)} \varphi_0 \right]^{1/2}. \quad (19)$$

Распределение поля и потенциала показано на рисунке 3.

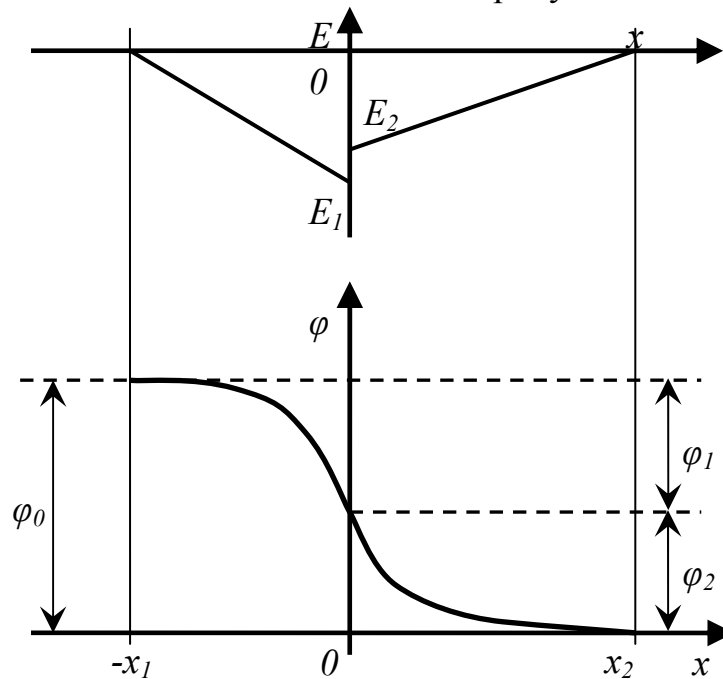


Рисунок 3. Распределение поля и потенциала в резком анизотипном гетеропереходе [3].

Следует также принимать во внимание, что материалы гетеропары могут иметь минимумы зоны проводимости в разных точках зоны Брюллиена. К примеру, минимум зоны проводимости GaAs находится в точке Г, в то время как наименьший минимум в AlAs близок к точке X. Таким образом, природа низшего минимума зоны проводимости меняется при изменении доли Al в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (рисунок 4). Низший минимум в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ изменяется от прямого расположения (минимум в Г) зон до непрямоной структуры (минимум в X) при содержании Al $x \approx 0.45$. Обычно твердый раствор $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ получают с долей Al, меньше 0.4, чтобы получить прямое расположение зон.

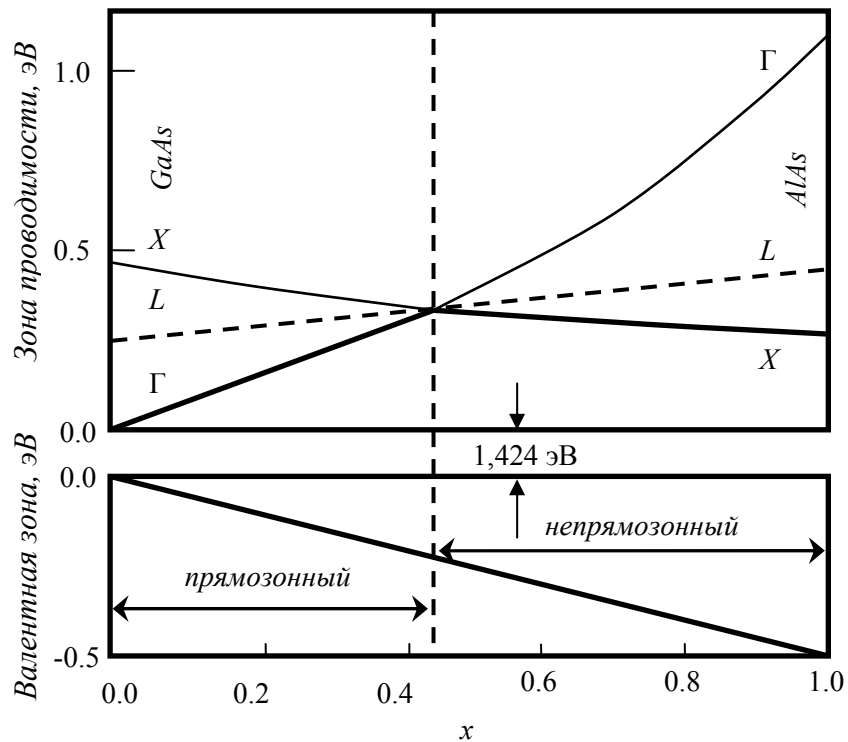


Рисунок 4. Расположение валентной зоны и зоны проводимости в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [5].

Покажем простой способ построения энергетической диаграммы на конкретном примере. Пусть требуется построить энергетическую диаграмму $p\text{-GaAs} - n\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Используя справочные данные (см. Таблица 1), находим ширину запрещенной зоны и электронное сродство для материалов гетеропары. При этом учитываем, что при $x=0.3$ минимум зоны проводимости твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ лежит в точке Γ (см. рисунок 4). Для GaAs получаем $E_{g1}=1.424$ эВ и $\chi_1=4.07$ эВ, а для $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ – $E_{g2}=1.798$ эВ и $\chi_2=3.74$ эВ.

Построение зонной диаграммы разобьем на несколько этапов. Сначала отдельно нарисуем зонные диаграммы для GaAs и $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ в отсутствие контакта. Относительно энергии электрона в вакууме их следует располагать, используя определение электронного сродства.

Сразу можно вычислить разрыв зон проводимости. Разрыв зоны проводимости:

$$\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1 = 4.07 - 3.74 = 0.33 \text{ эВ}$$

и разрыв валентной зоны:

$$\Delta E_v = E_{g2} - E_{g1} - \Delta E_c = (1.798 - 1.424 - 0.33) = 0.044 \text{ эВ.}$$

В данном случае $\Delta E_c > 0$, $\Delta E_v > 0$, таким образом, этот гетеропереход относится к гетеропереходу I типа - дно зоны проводимости $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ лежит выше дна зоны проводимости GaAs , а потолок валентной зоны $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ лежит ниже потолка валентной зоны GaAs (рисунок 5, а).

Далее нарисуем уровни Ферми в двух полупроводниках в соответствии с уровнем легирования (рисунок 5, б). В данном примере считаем полупроводники невырожденными и просто располагаем уровень ферми в GaAs ближе к потолку валентной зоны, а в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ – ближе к дну зоны проводимости. Проводим ряд вспомогательных линий, которые помогут

правильно построить диаграмму: это уровни E_c' , E_v' , являющиеся продолжением E_c , E_v GaAs в $n\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (рисунок 5, б).

Соединим плавной пунктирной линией уровни E_c' , E_v' и E_c , E_v в GaAs (рисунок 5, в). Точный вид кривой можно построить по выражениям (13), (15). На последнем этапе нарисуем разрывы зон (рисунок 5, г).

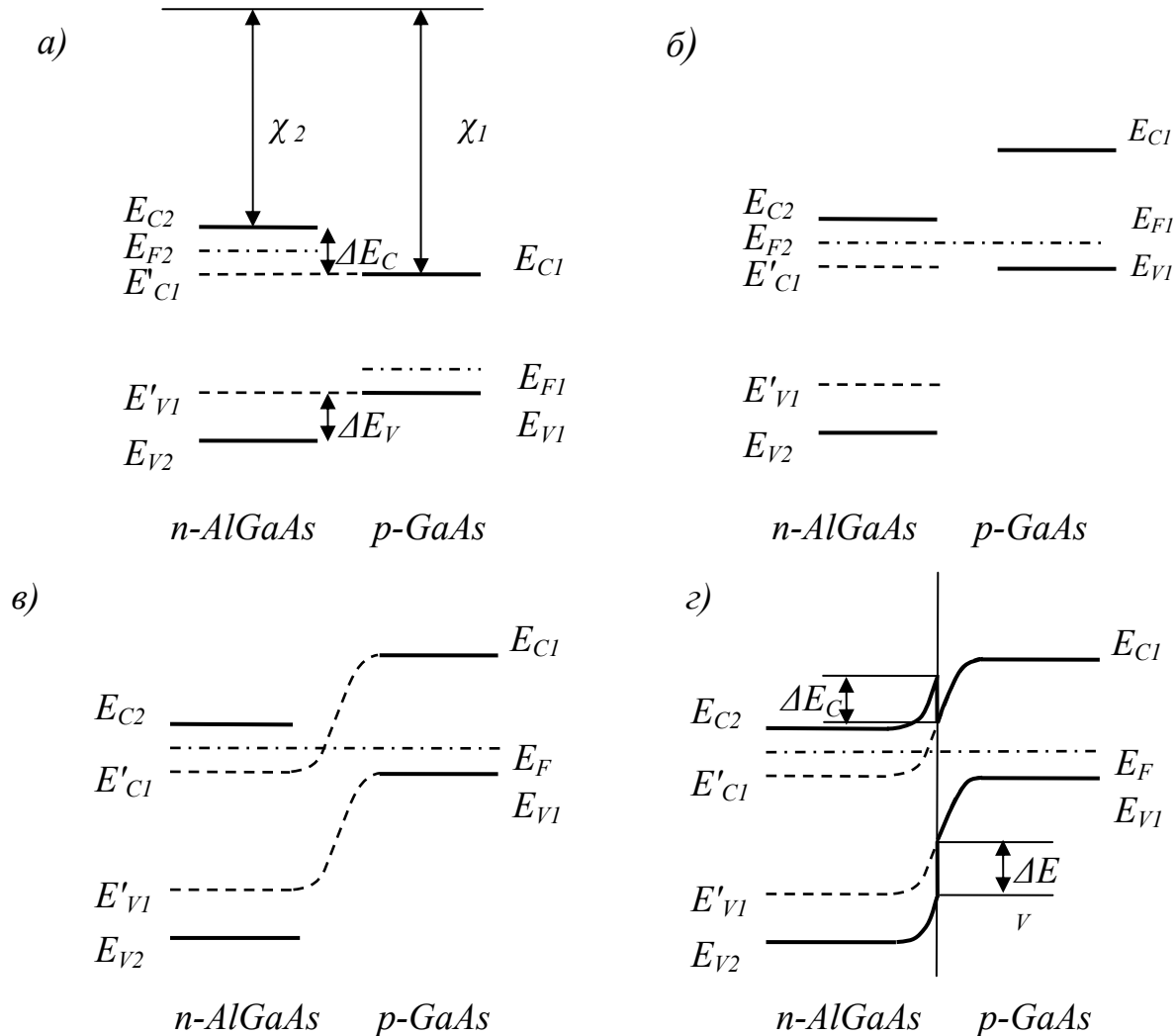


Рисунок 5. Пример построения энергетической диаграммы гетероперехода p-GaAs-n-AlGaAs.

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ОБРАЗУЮЩИМ ГЕТЕРОПЕРЕХОД

Для того чтобы в кристаллической решетке двух материалов, составляющих гетеропереход, не было дефектов, необходимо как минимум, чтобы два материала имели одну и ту же кристаллическую структуру и близкие периоды решеток. В этом случае структура получается без напряжений. Ясно, что не все материалы могут быть использованы для создания гетероперехода. На рисунке 1 представлены наиболее часто применяемые материалы для

создания гетеропереходов. Руководствуясь приведенным рисунком, можно создавать гетеропереходы «на заказ» с желаемой величиной разрыва зон или квантовую яму с заданной формой потенциала.

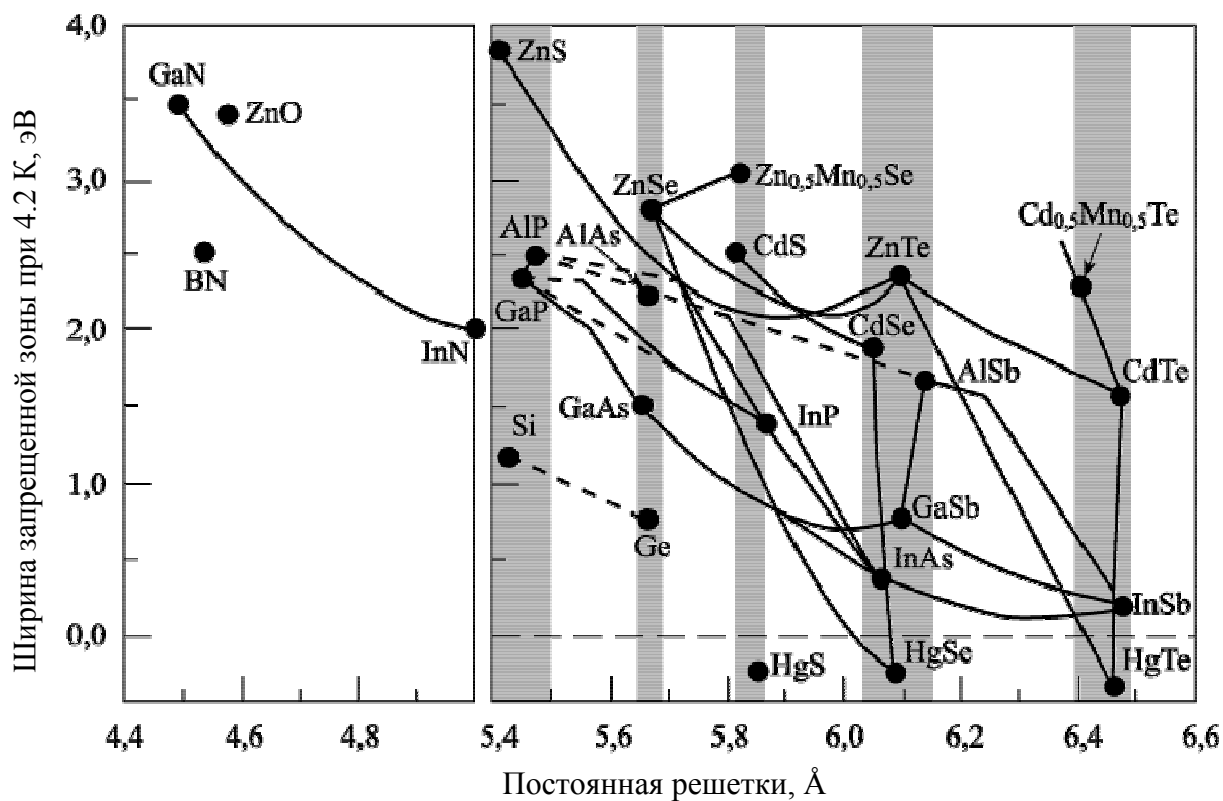


Рисунок 6. График зависимости энергии запрещенной зоны при низкой температуре от постоянной решетки для ряда полупроводников со структурой алмаза и цинковой обманки. Затененные области объединяют группы полупроводников с близкими постоянными решеток. Полупроводники, соединенные сплошными линиями, образуют между собой стабильные твердые растворы. Отрицательное значение, приведенное для энергии запрещенной зоны HgSe, является спорным. Штриховые линии указывают на непрямые запрещенные зоны [6].

При определении свойств тройных и четверных соединений можно пользоваться обобщенным правилом Вегарда. В этом случае тройной состав $A_xB_{1-x}C$ можно описать как сочетание двух, а четверной $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$, как сочетание трех или четырех двойных соединений. При этом значения физических параметров (Θ_{ABC} или Θ_{ABCD}) сложного соединения представляют собой средние значения параметров двойных соединений, взятых с весом, пропорциональным их доле:

$$\Theta_{ABC} = (1-x)\Theta_{AC} + x\Theta_{BC}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Theta_{ABCD} = & xy\Theta_{AC} + x(1-y)\Theta_{AD} + \\ & + (1-x)y\Theta_{BC} + \\ & + (1-x)(1-y)\Theta_{BD}. \end{aligned} \quad (21)$$

Для согласования эмпирических зависимостей с экспериментальными данными в правую часть этих соотношений вводят члены, квадратичные по x и y . В Таблице 1 приведены некоторые параметры наиболее распространенного тройного соединения AlGaAs.

Из правила Вегарда следует, что можно подобрать такой состав тройного соединения, при котором будут совпадать параметры решеток, но зонные параметры будут различные. Таким образом, можно получать гетеропереходы с заданными зонными параметрами. Так на подложке GaAs может быть выращен без значительных напряжений AlAs, а также твердый раствор $Al_xGa_{1-x}As$ практически любого состава. Как видно из графика у твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ период решетки меняется менее чем на 0.15% при изменении x от 0 до 1. Существует очень мало материалов, которые образуют гетеропереход с GaAs без напряжений.

Альтернативой подложки арсенида галлия является InP. Но на данной подложке могут быть без напряжений выращены только два твердых раствора: $Al_{0.48}In_{0.52}As$ и $Ga_{0.47}In_{0.53}As$.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Рассчитайте контактную разность потенциалов $n-n^+$ -гомоперехода, сформированного на контакте двух кристаллов с уровнем легирования $5 \cdot 10^{14}$ и $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре.

Ответ: $\phi_0 = 0.12 \text{ эВ}$.

2. Рассчитайте контактную разность потенциалов гомоперехода, сформированного на контакте двух невырожденных полупроводников p - и n -типа: а) PbS б) Si. $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Ответ: а) $\phi_0 = 0.20 \text{ эВ}$; б) $\phi_0 = 0.79 \text{ эВ}$.

3. Используя данные из приложения 1 рассчитайте разрывы зон проводимости ΔE_C и валентной зоны ΔE_V а также диффузионный потенциал ϕ_0 для гетероперехода $n\text{-Si-p-Ge}$. Постройте энергетическую диаграмму. Концентрацию мелких доноров в кремнии примите равной $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрацию мелких акцепторов в германии $N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Ответ: $\Delta E_C = 0.12 \text{ эВ}$, $\Delta E_V = 0.34 \text{ эВ}$, $\phi_0 = 0.41 \text{ эВ}$.

4. Рассчитайте для идеального гетероперехода $n\text{-Si-p-Ge}$ из предыдущей задачи толщину обедненных слоев, напряженности полей на границе раздела и контактные разности потенциалов, приходящиеся на каждый материал. Постройте энергетическую диаграмму. Определите, какой высоты потенциальные барьеры стоят на пути встречного движения через переход основных носителей.

Ответ: со стороны $n\text{-Si}$: $Q_1 = 2.4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2 = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $d_1 = 0.3 \text{ мкм}$, $E_1 = 2.25 \cdot 10^4 \text{ В}$, $\phi_1 = 0.35 \text{ эВ}$; со стороны $p\text{-Ge}$: $Q_1 = -1.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $d_2 = 0.075 \text{ мкм}$, $E_2 = 1.69 \cdot 10^4 \text{ В}$,

$\phi_1=0.35$ эВ. Барьер для движения электронов из кремния в германий равен $\phi_1=0.35$ эВ, для движения дырок из германия в кремний равен $\phi_0 + \Delta E_V=0.75$ эВ.

5. Используя правило Андерсона вычислите разрывы зоны проводимости и валентной зоны для гетероперехода а) GaAs-AlAs и б) InAs-GaSb. Как найденные величины согласуются с экспериментальными данными? (см. рисунок 2).

Ответ: а) $\Delta E_C=0.56$ эВ, $\Delta E_V=-0.17$ эВ; б) а) $\Delta E_C=0.86$ эВ, $\Delta E_V=-0.46$.

6. Используя правило Андерсона, нарисуйте зонную диаграмму при комнатной температуре для гетероструктуры p-Al_{0.2}Ga_{0.8}As – n-GaAs. Какие типы зарядов, может захватывать данная структура на гетерогранице? Как изменится зонная диаграмма при приложении постоянного потенциала V?

7. Схематически изобразите диаграмму p-n и n-p переходов на основе гетероперехода II типа и в каком случае электроны и дырки могут «захватываться» на интерфейсе. Что измениться в случае нелегированного гетероперехода III типа (например, InAs-GaSb)?

8. Рассчитайте контактную разность потенциалов и изобразите энергетическую диаграмму p-n перехода на основе GaAs при следующих параметрах легирования: $N_D=2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $N_A=10^{23} \text{ м}^{-3}$, $N_C=4.7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $N_V=7 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

Ответ: 1.19 эВ

9. Диод из предыдущей задачи замените гетеропереходом между n-Al_{0.3}Ga_{0.7}As и p-GaAs. Легирование Al меняется скачком. Сосчитайте положение уровня Ферми, нарисуйте диаграмму, и рассчитайте контактную разность потенциалов. Покажите, что контактную разность потенциалов вычисляется как:

$$eV = E_g^{(p)} + \Delta E_c - \left[E_c^{(n)} - E_F^{(n)} \right] - \left[E_F^{(p)} - E_v^{(p)} \right]$$

Две разности в скобках могут быть вычислены просто исходя из уровня легирования. Покажите, что эффект от замены GaAs на AlGaAs на n-стороне сводится к увеличению контактной разности потенциалов на ΔE_C .

Ответ: 1.52 эВ.

10. Используя данные из приложения, определите по обобщенному правилу Вегарда составы In_xGa_{1-x}As и In_xAl_{1-x}As, которые без напряжений могут быть выращены на подложке InP.

Ответ: 0.533 и 0.525.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В Таблицах 1,2 приведены некоторые параметры полупроводников, наиболее часто использующихся для создания гетероструктур. Здесь применены следующие обозначения:

a	<i>период кристаллической решетки</i>
$\hbar\omega_{LO}$	<i>энергия продольного фонона</i>
$\hbar\omega_{TO}$	<i>энергия поперечного фонона</i>
E_g^{Γ}	<i>прямой разрыв зон в точке Γ</i>
E_g^X	<i>прямой разрыв зон в точке X</i>
E_g^L	<i>прямой разрыв зон в точке L</i>
Δ	<i>величина спин-орбитального отщепления валентной зоны</i>
χ	<i>сродство к электрону</i>
m_{Γ}	<i>эффективная масса электронов в Γ-долине</i>
m_{Γ}^X	<i>поперечная эффективная масса электронов в Γ-долине</i>
m_L^X	<i>продольная эффективная масса электронов в X-долине</i>
m_{lh}	<i>эффективная масса легких дырок</i>
m_{hh}	<i>эффективная масса тяжелых дырок</i>
m_{so}	<i>эффективная масса спин-отщепленных дырок</i>
$\varepsilon(\varpi = 0)$	<i>относительная диэлектрическая проницаемость</i>

Эффективные массы электронов и дырок приведены в m/m_0 , где m_0 - масса покоя электрона.

Таблица 1. Некоторые параметры твердого раствора AlGaAs при комнатной температуре [5].

Параметр	GaAs	AlAs	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
a , нм	0.56533	0.56611	$0.56533+0.00078x$
$\hbar\varpi_{LO}$, мэВ	36.2	50.1	не интерполируется
$\hbar\varpi_{TO}$, мэВ	33.3	44.9	не интерполируется
E_g^Γ , эВ	1.424	3.018	$1.424+1.247x, x<0.45$ $1.656+0.215x+0.143x^2, x>0.45$
E_g^X , эВ	1.900	2.168	$1.900+0.125x+0.143x^2$
E_g^L , эВ	1.708	2.350	$1.708+0.642x$
ΔE_C^Γ , эВ	0	1.12	$0.773x, x<0.45$ $0.232-0.259x+1.147x^2, x>0.45$
ΔE_C^X , эВ	0.476	0.270	$0.476-0.349x+0.143x^2$
ΔE_C^L , эВ	0.284	0.452	$0.284+0.168x$
ΔE_V , эВ	0	0.474	$0.474x$
χ , эВ	4.07	3.5	$4.07-1.1x, x<0.45$ $3.65-0.14x, x>0.45$
m_Γ	0.067	0.150	$0.067+0.083x$
m_Γ^X	0.23	0.19	
m_L^X	1.3	1.1	
m_{lh}	0.082	0.153	$0.082+0.071x$
m_{hh}	0.5	0.5	
m_{so}	0.15	0.24	$0.15+0.09x$
$\varepsilon_h(\varpi = 0)$	13.18	10.06	$13.18-3.12x$

Разрывы $\Delta E_C^\Gamma, \Delta E_C^X, \Delta E_C^L$ в зоне проводимости отсчитываются от низа валентной зоны GaAs (Γ^6).

Таблица 2. Некоторые параметры наиболее часто используемых для создания гетеропереходов материалов [5].

Параметр	Si	Ge	GaAs	AlAs	InAs	GaP	InP	GaSb	AlSb	InSb
a , нм	0.5431	0.5658	0.5653	0.5660	0.6058	0.5451	0.5869	0.6096	0.6136	0.6479
$\hbar\omega_{LO}$, мэВ	64	37	36	50	30	51	43	29	42	24
$E_g^{(300K)}$, эВ	1.12	0.66	1.42	2.15	0.35	2.27	1.34	0.75	1.62	0.18
$E_g^{(0K)}$, эВ	1.17	0.74	1.52	2.23	0.42	2.35	1.42	0.81	1.69	0.23
$E_c^{(min)}$	X	L	Г	X	Г	X	Г	Г	X	Г
E_g^{Γ} , эВ	3.5	0.80	-	3.02	-	2.78	-	-	2.30	-
Δ , эВ	0.044	0.29	0.34	0.28	0.38	0.08	0.11	0.75	0.67	0.98
χ , эВ	4.01	4.13	4.07	3.51	4.92	4.3	4.38	4.06	3.65	4.59
m_{hh}	0.54	0.28	0.5	0.5	0.41	0.67	0.6	0.28	0.4	0.4
m_{lh}	0.15	0.044	0.082	0.15	0.026	0.17	0.12	0.050	0.11	0.02
m_{Γ}			0.067	0.150	0.022		0.077	0.04		0.014
m_L	0.92	1.64	1.3	1.1		4.8			1.0	
m_T	0.19	0.082	0.23	0.19		0.25			0.26	
ϵ	11.9	16.2	13.2	10.1	15.1	11.1	12.6	15.7	12.0	16.8
μ_n , $M^2 B^{-1} c^{-1}$	0.15	0.39	0.92		3.3	0.02	0.5	0.77	0.02	8
μ_p , $M^2 B^{-1} c^{-1}$	0.045	0.19	0.04		0.05	0.012	0.01	0.1	0.04	0.13

Литература

- 1 Щука А.А. Нанoeлектроника. М.:Физматкнига, 2007. - 464 с.
- 2 Anderson R.I. Experiments on Ge-GaAs heterojunctions // Solid State Elec., 1962, V.5, p.341.
- 3 Ильин В.И., Мусихин С.Ф., Шик А.Я. Варизонные полупроводники и гетероструктуры.-Спб.: Наука, 2000.-100 с.
- 4 Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников, 2000 г. - 678 с.
- 5 Davies J.H. The Physics of low-dimensional semiconductors, Cambridge University, 1998 г. - 438 с.
- 6 Ю П., Кардона М. Основы физики полупроводников / Пер. с англ. И.И. Решиной. Под ред. Б.П. Захарчени. — 3-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. — 560 с.

