

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Барьеры в полупроводниковых структурах

Практикум

Рекомендовано методической комиссией физического факультета для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки: 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Нижний Новгород
2016

УДК 621.38
ББК 32.852
П 53

П-53 Барьеры в полупроводниковых структурах: Авторы: Демидов Е.С., Павлов Д.А., Сдобняков В.В., Карзанов В.В., Кузнецов Ю.М., Шилиев П.А. Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. – 29 с.

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент Перов А.А.

Пособие посвящено изучению барьеров металл - полупроводник и структур на основе гетеропереходов.

Практикум предназначен для студентов физического факультета ННГУ в качестве пособия при подготовке по курсу «Физика низкоразмерных систем».

Авторы выражают большую благодарность студентам групп 05115, 05116, 05125 и 05126 за активное участие в подборе задач.

Ответственный за выпуск:
председатель методической комиссии
физического факультета ННГУ, к.ф.-м.н., доцент Сдобняков В.В.

УДК 621.38
ББК 32.852

© Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2016

Содержание

1. Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки	4
1.1. Определение барьера Шоттки.....	4
1.2. Энергетические диаграммы барьера Шоттки.....	4
2. Гетеропереходы.....	6
2.1. Определение гетероперехода.....	6
2.2. Энергетическая диаграмма идеального гетероперехода.....	6
2.3. Распределение электрического поля и потенциала в идеальном гетеропереходе.....	9
2.4. Построение энергетических диаграмм гетеропереходов.....	14
2.5. Требования к материалам, образующих гетеропереход. Правило Вегарда.....	16
3. Задачи для самоконтроля.....	21
Вопросы для самоконтроля:.....	27

1. Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки

1.1. Определение барьера Шоттки

Первые исследования выпрямляющих свойств контактов металл-полупроводник обычно приписывают Брауну, обнаружившему в 1874 г. зависимость полного сопротивления контактов от полярности приложенного напряжения и особенностей их изготовления. Практическое использование выпрямляющих свойств точечного контакта началось с 1904 г.

В 1938 г. Шоттки высказал предположение, что потенциальный барьер создается неподвижным пространственным зарядом в полупроводнике, а не за счет возникновения между металлом и полупроводником промежуточного химического слоя. Такой барьер называют барьером Шоттки.

Контакты металл-полупроводник широко используются для выпрямления тока, в качестве одного из основных элементов ряда полупроводниковых СВЧ-устройств, а также для исследования фундаментальных физических параметров полупроводниковых материалов и поэтому изучены достаточно подробно.

1.2. Энергетические диаграммы барьера Шоттки

Энергетическая диаграмма для полупроводника и металла, не приведенных в соприкосновение приведена на рис. 1а (уровень Ферми в металле выше, чем в полупроводнике) и рис. 1б (уровень Ферми в металле ниже, чем в полупроводнике).

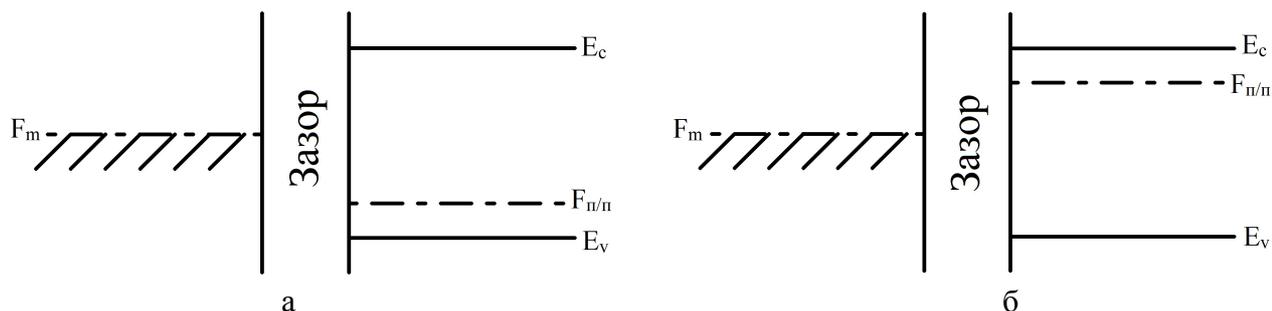


Рис. 1. Энергетические диаграммы металла и полупроводника, которые не приведены в контакт

При идеальном контакте металла с полупроводником (т.е. при отсутствии каких-либо промежуточных слоев, отличающихся химическим составом, и без учета поверхностных состояний на границе раздела) происходит диффузия электронов преимущественно из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода. Под *работой выхода электронов (F)* будем понимать энергию, необходимую для перевода электрона с уровня Ферми на потолок верхней свободной зоны.

Переходный слой, в котором существует контактное (или диффузионное) электрическое поле и который образован в результате контакта между металлом и полупроводником, называют *переходом Шоттки*.

В результате перераспределения зарядов энергетические зоны искривятся в зависимости от изначального расположения уровней Ферми в металле и в полупроводнике, как это проиллюстрировано на рис. 2а (в случае, когда уровень Ферми в металле изначально выше, чем в полупроводнике) и на рис. 2б (в обратном случае). Образуется область пространственного заряда (ОПЗ).

При приложении внешнего потенциала на металл, можно изменять (увеличивать или уменьшать) потенциальный барьер для носителей зарядов.

Очевидно, что для создания омического контакта (без искривления зон) уровень Ферми в полупроводнике и в металле должен быть одинаков.

Характерной особенностью выпрямляющего перехода Шоттки в отличие от p-n перехода является разная высота потенциальных барьеров для электронов и для дырок, что позволяет уменьшить влияние инжекции неосновных носителей зарядов (уменьшение обратных токов, что приводит к улучшению качества выпрямляющих свойств диода, созданного на данной структуре).

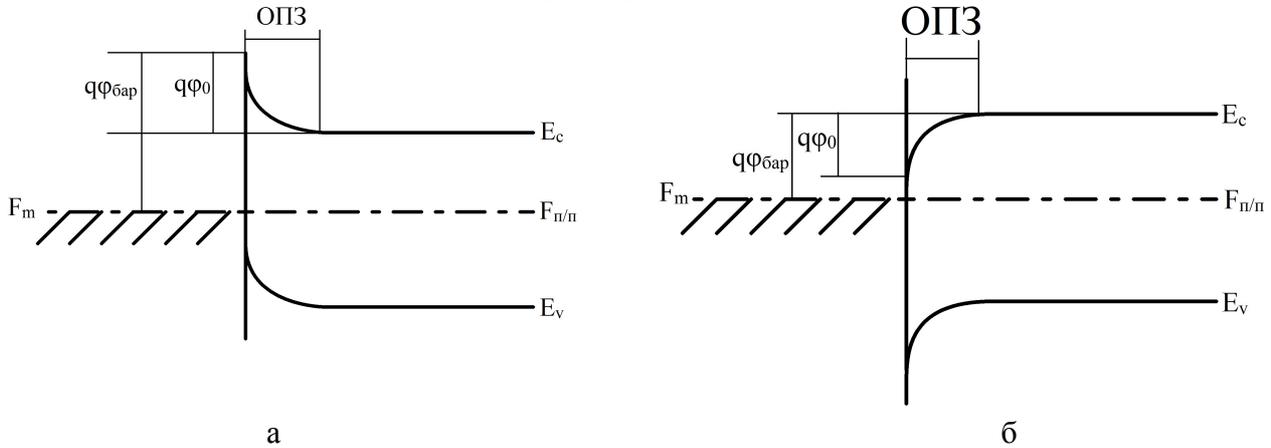


Рис. 2. Выпрямляющий контакт на основе барьера Шоттки

Из рис. 1 и 2 можно заключить, что контактная разность потенциалов равна разности работ выхода из металла и полупроводника:

$$\varphi_0 = F_m - F_{n/p}, \quad (1)$$

а высота потенциального барьера равна разности работы выхода из металла и электронного средства полупроводника:

$$\varphi_{бар} = \varphi_0 - (F_m - \chi_{n/p}) \quad (1.a)$$

Толщина слоя ОПЗ можно рассчитать, решив уравнение Пуассона, решение которого представлено в [1].

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{|e|n_0} (\varphi_0 - U)}, \quad (2)$$

Где $|e|$ – заряд электрона

ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника

$\varepsilon_0 = 0.885 \cdot 10^{-11}$ Ф/м – электрическая постоянная (система СИ)

n_0 – концентрация свободных электронов в полупроводнике

U – внешний потенциал на металле

Задача

Рассчитайте контактную разность потенциалов при создании контакта Si-Au. $N_d = 10^{16}$ см⁻³. Рассчитайте толщину слоя ОПЗ при нулевом смещении металла ($V = 0$).

Решение:

Для кремния можно записать:

$$N_d = N_c \text{Exp}\left[\frac{\chi - F_{n/p}}{kT}\right]$$

N_c – плотность состояний в зоне проводимости

Выразим уровень Ферми:

$$F_{n/p} = \chi - kT \cdot \ln \left[\frac{N_d}{N_c} \right]$$

Контактную разность потенциалов рассчитаем по формуле:

$$\varphi_0 = F_M - F_{п/п} \approx 1.08 \text{ эВ}$$

Толщину слоя ОПЗ можно рассчитать по формуле (2):

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{|e|n_0}} \varphi_0 \approx 0.38 \text{ мкм}$$

Ответ: $\varphi_0 = 1.08 \text{ эВ}$, $d = 0.38 \text{ мкм}$.

2. Гетеропереходы

2.1. 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.

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.

2.2. Энергетическая диаграмма идеального гетероперехода

Для построения энергетической диаграммы часто применяют простое «правило электронного сродства» (в англоязычной литературе – правило Андерсона), 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 $E_{g2} > E_{g1}$;
- сродство 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.

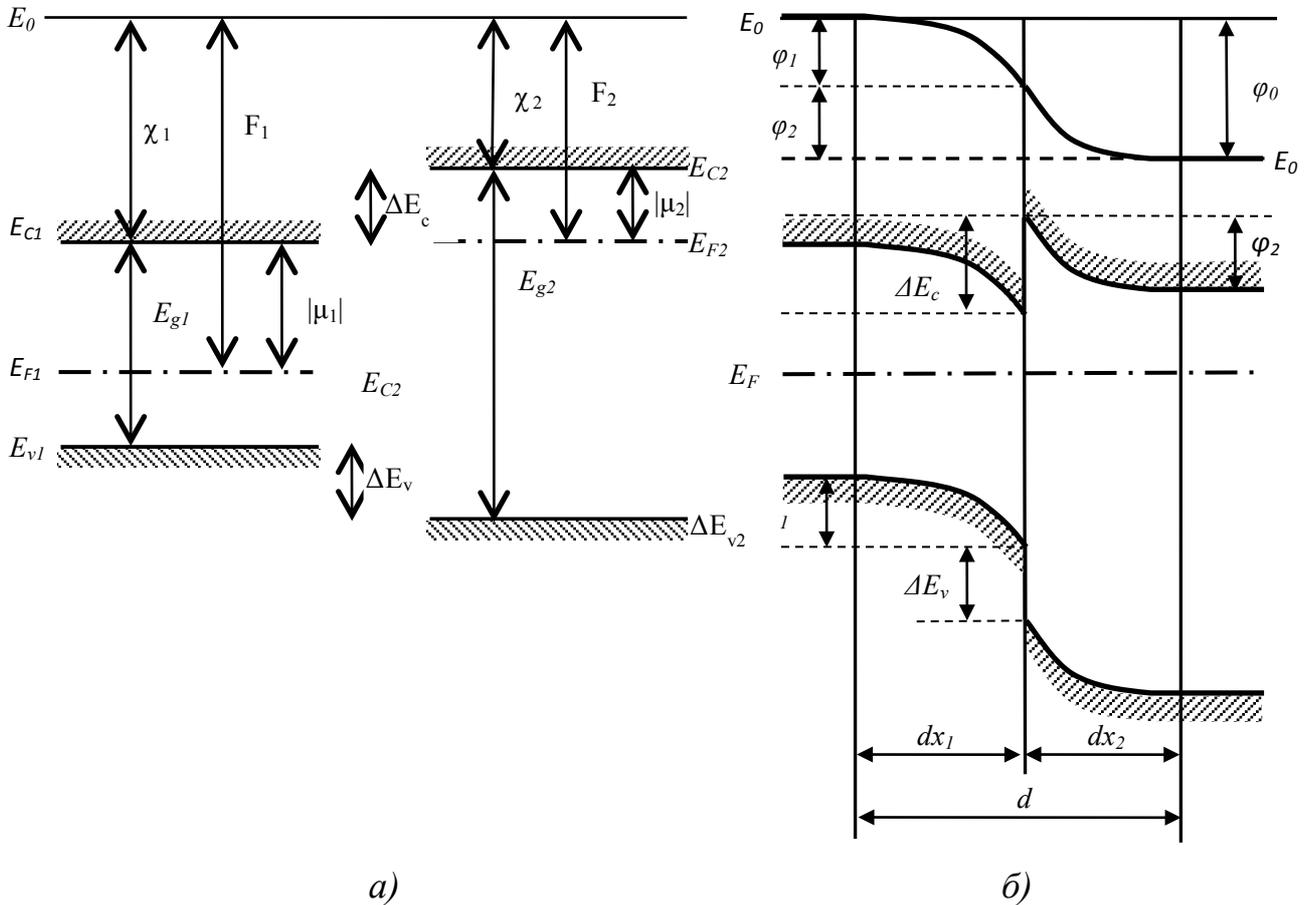


Рис. 3. Энергетические диаграммы полупроводников (а) и диаграмма идеального гетероперехода (б)

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

$$\varphi_0 = (E_{F_2} - E_{F_1})/|e| \quad (3)$$

и образуется область пространственного заряда шириной d (см. рис.3).

При таком построении видно, что из-за различия электронного сродства 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

$$\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2 \quad (4)$$

Аналогично формируется и разрыв валентной зоны. Он равен:

$$\Delta E_v = E_{g_2} - E_{g_1} - \Delta E_c \quad (5)$$

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

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 (broken-gap). Классический пример – гетеропереход InAs-GaSb.

Экспериментально измеренные параметры основных типов гетеропереходов изображены на Рис. 4.

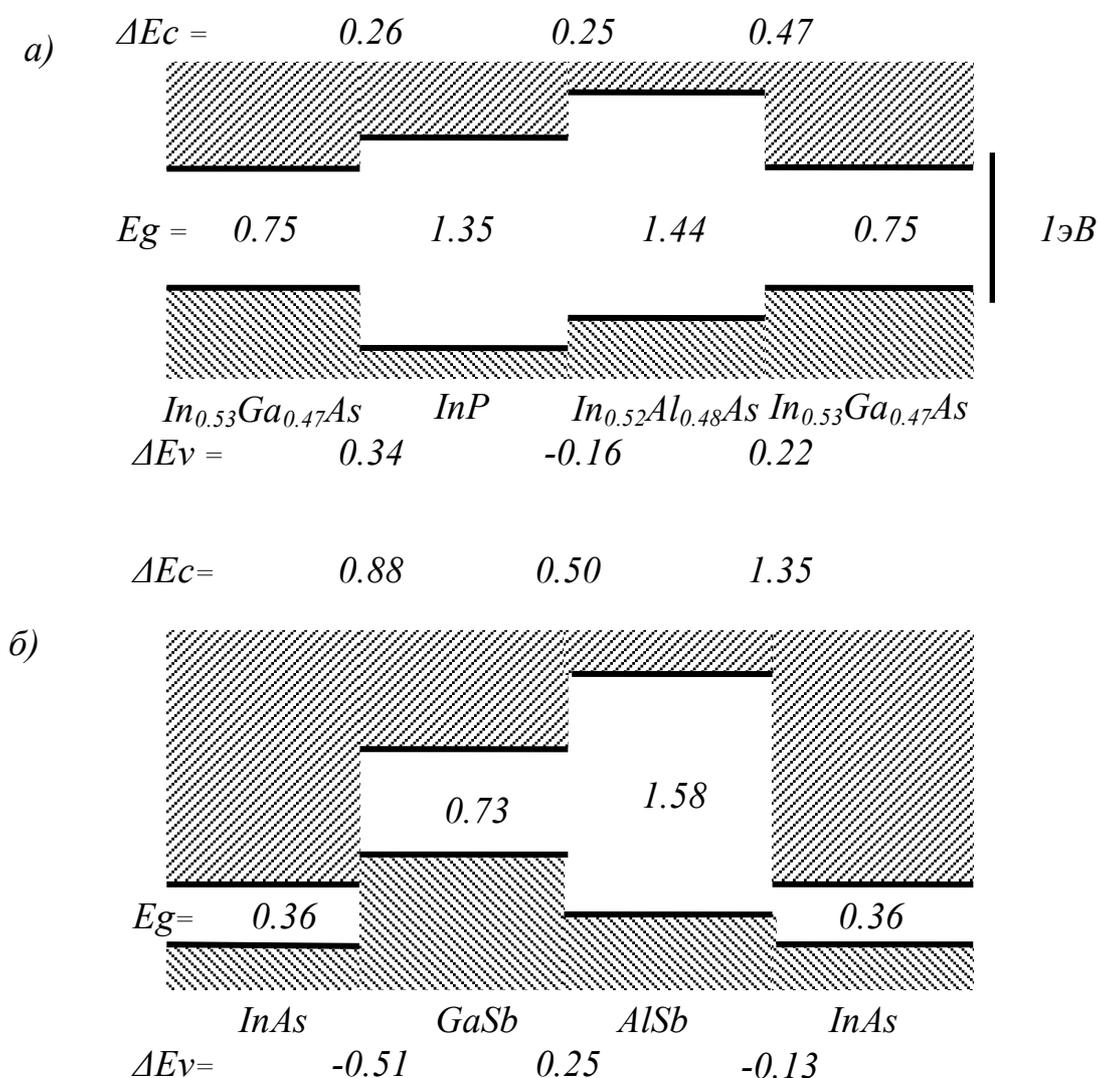


Рис. 4. Экспериментально определенные разрывы валентной зоны и зоны проводимости двух наиболее близких по параметрам решетки гетеропар: а) In_{0,53}Ga_{0,47}As-In_{0,52}Al_{0,48}As-In_{0,53}Ga_{0,47}As- InP и б) InAs-GaSb-AlSb

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

$$Q = \frac{\Delta E_c}{\Delta E_g}, \quad (6)$$

где

$$\Delta E_g = E_{g_2} - E_{g_1} \quad (7)$$

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.

Для вычисления положения уровня Ферми относительно дна зоны проводимости потребуются 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

$$F_1 = -kT \ln \frac{N_c}{N_d} \quad (8)$$

для дырочного:

$$F_2 = -kT \ln \frac{N_v}{N_a} - \Delta E_g, \quad (9)$$

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

В справочниках обычно приведены величины эффективных масс плотности состояний для электронов m_e и дырок m_h . Тогда N_c и N_v вычисляются по формулам

$$N_c = \frac{2(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \quad N_v = \frac{2(2\pi m_h kT)^{3/2}}{h^3} \quad (10)$$

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

$$m_d = M^{2/3} (m_{\perp}^2 m_{\parallel})^{1/3} \quad (11)$$

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

$$m_h^{3/2} = m_{lh}^{3/2} + m_{hh}^{3/2} \quad (12)$$

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

$$\varphi_0 = |F_1 - F_2| \quad (13)$$

Найдем распределение потенциала и электрического поля в гетеропереходе.

2.3. Распределение электрического поля и потенциала в идеальном гетеропереходе

Рассмотрим гетеропереход, образованный двумя полупроводниковыми материалами с различным типом проводимости, и различным коэффициентом диэлектрической проницаемости.

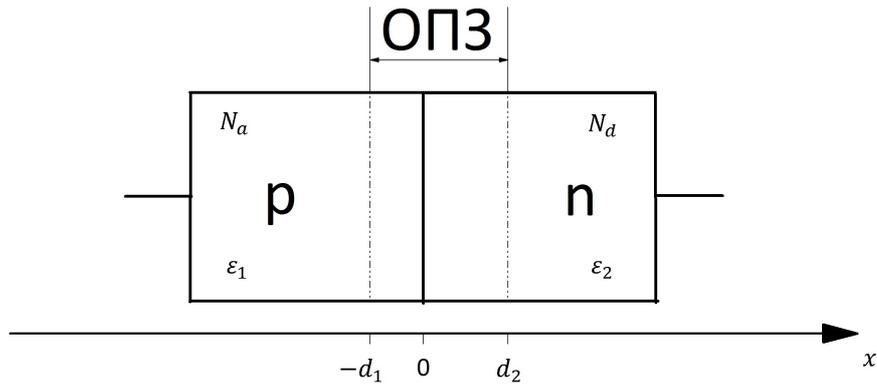


Рис. 5. p-n-переход, образованный двумя разнородными (а также с разным типом проводимости) полупроводниками (ОПЗ – область пространственного заряда)

Для нахождения распределения поля и потенциала необходимо решить одно уравнение из системы уравнений Максвелла:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho, \quad (14)$$

где \mathbf{D} – вектор электрической индукции, ρ – объёмная плотность свободных зарядов в объёме полупроводника.

Для изотропного проводника можно записать:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \quad (15)$$

Выражение (14) подставляем в (15), получаем:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} \quad (16)$$

Скалярный потенциал электрического поля определяется следующим образом:

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi \quad (17)$$

С учетом (17) выражение (16) примет вид:

$$-\operatorname{div}(\operatorname{grad} \varphi) = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} \quad (18)$$

Используем известное выражение из векторного анализа:

$$\Delta \varphi = \operatorname{div}(\operatorname{grad} \varphi) \quad (19)$$

Подставляем (19) в (18):

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} \quad (20)$$

Для плотности зарядов в объеме полупроводника можно записать:

$$\rho = |e| \cdot (p - n + N_d - N_a), \quad (21)$$

где

p – концентрация дырок

n – концентрация электронов

N_d – концентрация донорной примеси

N_a – концентрация акцепторной примеси

Поскольку система двух полупроводников находится в равновесии, можно записать:

$$p - n = 0 \quad (22)$$

$$\rho = |e| \cdot (N_d - N_a) = |e| \cdot N(\vec{r}) \quad (23)$$

$N(\vec{r})$ – общее распределение примеси во всем объеме полупроводника (задаётся технологией получения полупроводникового материала).

С учетом (23) выражение (20) примет вид:

$$\Delta \varphi = -\frac{|e| \cdot N(\vec{r})}{\epsilon \epsilon_0} \quad (24)$$

Будем решать одномерную задачу:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{|e| \cdot N(x)}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (25)$$

Выражение (17) можно записать в ином виде:

$$E(x) = -\frac{d\varphi}{dx} \quad (26)$$

Используя (25) и (26) можно найти распределение поля:

$$E(x) = \frac{|e|}{\varepsilon\varepsilon_0} \int N(x)dx \quad (27)$$

Интегрируя выражение (27) еще раз найдем распределение потенциала:

$$\varphi(x) = -\frac{|e|}{\varepsilon\varepsilon_0} \int \left\{ \int N(x)dx \right\} dx \quad (28)$$

Выражение (28) можно записать в более компактной форме:

$$\varphi(x) = -\int E(x)dx \quad (29)$$

Будем рассматривать случай резкого р-п-перехода (переход от одного полупроводника к другому происходит скачкообразно, следовательно, скачкообразно изменяются и параметры полупроводника, такие как диэлектрическая проницаемость и концентрация примеси).

Функция распределения примеси в случае резкого перехода запишется в виде:

$$\begin{cases} N(x < 0) = -N_a \\ N(x > 0) = N_a \end{cases} \quad (30)$$

$x = 0$ – плоскость перехода.

Найдем распределение поля и потенциала для каждого полупроводника в отдельности. Запишем начальные условия для интересующих нас функций:

$$\begin{cases} x < 0 \\ N(x) = -N_a \\ E_1(-d_1) = 0 \\ \varphi_1(-d_1) = 0 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 \end{cases} \quad (31)$$

Подставляя (31) в (27), получим:

$$E_1(x) = -\frac{|e|}{\varepsilon_1\varepsilon_0} \int N_a dx \quad (32)$$

Проинтегрируем:

$$E_1(x) = -\frac{|e| \cdot N_a}{\varepsilon_1\varepsilon_0} \cdot x + const \quad (33)$$

Константу интегрирования найдём из начальных условий (31):

$$E_1(-d_1) = 0 = \frac{|e| \cdot N_a}{\varepsilon_1\varepsilon_0} \cdot d_1 + const \quad (34)$$

$$const = -\frac{|e| \cdot N_a}{\varepsilon_1\varepsilon_0} \cdot d_1 \quad (35)$$

Подставляя (35) в (33), найдем распределение поля в полупроводнике р-типа:

$$E_1(x) = -\frac{|e| \cdot N_a}{\varepsilon_1\varepsilon_0} \cdot x - \frac{|e| \cdot N_a}{\varepsilon_1\varepsilon_0} \cdot d_1 \quad (36)$$

Выражение (36) можно немного упростить:

$$E_1(x) = -\frac{|e| \cdot N_a}{\varepsilon_1\varepsilon_0} \cdot (x + d_1) \quad (37)$$

Теперь, зная поле, можно найти распределение потенциала с помощью выражения (29):

$$\varphi_1(x) = \frac{|e| \cdot N_a}{\varepsilon_1 \varepsilon_0} \cdot \int (x + d_1) dx \quad (38)$$

Интегрируем:

$$\varphi_1(x) = \frac{|e| \cdot N_a}{2\varepsilon_1 \varepsilon_0} \cdot (x + d_1)^2 + const \quad (39)$$

Константу интегрирования по аналогии находим из начальных условий (31):

$$\varphi_1(-d_1) = 0 = const \quad (40)$$

Подставляем (40) в (39), находим распределение потенциала:

$$\varphi_1(x) = \frac{|e| \cdot N_a}{2\varepsilon_1 \varepsilon_0} \cdot (x + d_1)^2 \quad (41)$$

Теперь найдем распределение потенциала и поля для второго полупроводника. Также запишем начальные условия:

$$\begin{cases} x > 0 \\ N(x) = N_d \\ E_2(d_2) = 0 \\ \varphi_2(d_2) = \varphi_0 \\ \varepsilon = \varepsilon_2 \end{cases} \quad (42)$$

где φ_0 – контактная разность потенциалов между двумя полупроводниками.

Вывод распределений аналогичен тому, который был представлен выше. Поэтому читателю в качестве упражнения предлагается проделать вывод самостоятельно. Приведем конечные результаты:

$$E_2(x) = -\frac{|e| \cdot N_d}{\varepsilon_2 \varepsilon_0} \cdot (d_2 - x) \quad (43)$$

$$\varphi_2(x) = \varphi_0 - \frac{|e| \cdot N_d}{2\varepsilon_2 \varepsilon_0} \cdot (d_2 - x)^2 \quad (44)$$

Зная распределение поля и потенциала в обеих областях, можно построить график зависимости $\varphi(x)$ и $E(x)$:

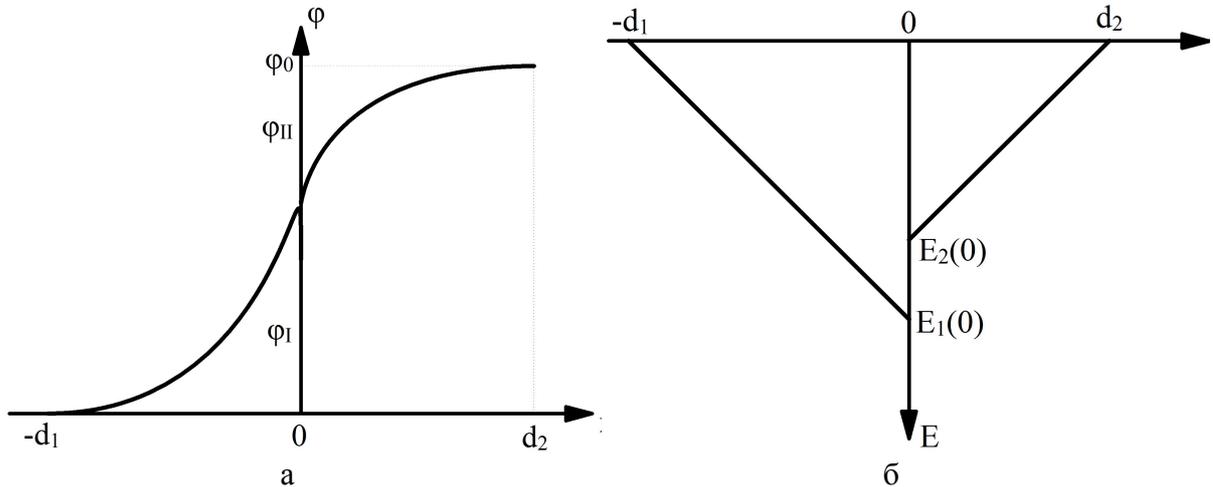


Рис. 6. а - распределение потенциала, б - распределение электрического поля

Можно рассчитать величину области пространственного заряда. Для этого воспользуемся условием равенства потенциала на границе раздела двух полупроводников:

$$\varphi_1(0) = \varphi_2(0) \quad (45)$$

Расписывая (45), получаем:

$$\varphi_0 = \frac{|e| \cdot N_a}{2\varepsilon_2 \varepsilon_0} d_2^2 + \frac{|e| \cdot N_a}{2\varepsilon_1 \varepsilon_0} d_1^2 \quad (46)$$

Величину контактной разности потенциалов можно представить в виде:

$$\varphi_0 = \varphi_I + \varphi_{II} \quad (47)$$

Используя (46) и (44) можно найти φ_I и φ_{II} :

$$\begin{cases} \varphi_I = \frac{|e| \cdot N_a}{2\varepsilon_1\varepsilon_0} d_1^2 \\ \varphi_{II} = \frac{|e| \cdot N_d}{2\varepsilon_2\varepsilon_0} d_2^2. \end{cases} \quad (48)$$

Из (44) можно выразить толщину слоя ОПЗ в обоих полупроводниках

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_1\varepsilon_0}{|e| \cdot N_a} \cdot \varphi_I}; \\ d_2 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_2\varepsilon_0}{|e| \cdot N_d} \cdot \varphi_{II}}. \end{cases} \quad (49)$$

Необходимо найти потенциалы φ_I и φ_{II} . Из уравнения электронейтральности:

$$|Q^+| = |Q^-| \quad (50)$$

Q^+ - общий положительный заряд в объеме полупроводника

Q^- - общий отрицательный заряд в объеме полупроводника

Распишем (50) в интегральном виде:

$$-\int_{-d_1}^0 N_a dx + \int_0^{d_2} N_d dx = 0 \quad (51)$$

Интегрируем (51):

$$-N_a d_1 + N_d d_2 = 0 \quad (52)$$

Из (52) можно получить:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{N_d}{N_a} \quad (53)$$

Отношение областей ОПЗ в полупроводниках можно также выразить из (49):

$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 N_d \varphi_I}{\varepsilon_2 N_a \varphi_{II}}} \quad (54)$$

Приравняв правые части (53) и (54), и используя (47), получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\varphi_I}{\varphi_{II}} = \frac{\varepsilon_2 N_d}{\varepsilon_1 N_a} \\ \varphi_0 = \varphi_I + \varphi_{II}. \end{cases} \quad (55)$$

Из системы (55) можно легко найти φ_I и φ_{II} :

$$\begin{cases} \varphi_I = \varphi_0 \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_1 N_a}{\varepsilon_2 N_d}} \\ \varphi_{II} = \varphi_0 \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_2 N_d}{\varepsilon_1 N_a}}. \end{cases} \quad (56)$$

Теперь можно найти величину ОПЗ, подставив (56) в (49) и сложив два уравнения:

$$d = d_1 + d_2 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2}{|e|(\varepsilon_1 N_a + \varepsilon_2 N_d)} \cdot \frac{N_d^2 + N_a^2}{N_a N_d} \varphi_0} \quad (57)$$

При приложении внешнего напряжения (V) формула определения величины ОПЗ примет вид:

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2}{|e|(\varepsilon_1N_a + \varepsilon_2N_d)} \cdot \frac{N_d^2 + N_a^2}{N_aN_d}} (\varphi_0 - V) \quad (58)$$

Из формулы (58) видно, что при подаче отрицательного потенциала толщина слоя ОПЗ увеличивается.

Появляется возможность управлять величиной ОПЗ с помощью легирования полупроводников.

Как видно из рис.6б в общем случае зависимость электрического поля на границе раздела двух полупроводников терпит разрыв. Можно найти условие, при котором этого разрыва не будет. Для этого необходимо приравнять функции (37) и (43) в точке $x = 0$, используя при этом соотношения (49) и (56).

После нетрудных математических преобразований получим условие, при котором поле не претерпевает разрыва:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (59)$$

Следовательно, поле не будет претерпевать разрыв при равенстве коэффициентов диэлектрической проницаемости полупроводников. Любопытно, что уровнем легирования (величиной N_d и N_a) управлять величиной разрыва поля нельзя. В частности, условие (59) реализуется, когда в качестве полупроводников р и n типов используется один и тот же полупроводник, то есть формируется гомопереход.

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 $Al_xGa_{1-x}As$ (см. рис.7). Низший минимум в $Al_xGa_{1-x}As$ изменяется от прямого расположения (минимум в Г) зон до непрямоугольной структуры (минимум в X) при содержании Al $x \approx 0.45$.

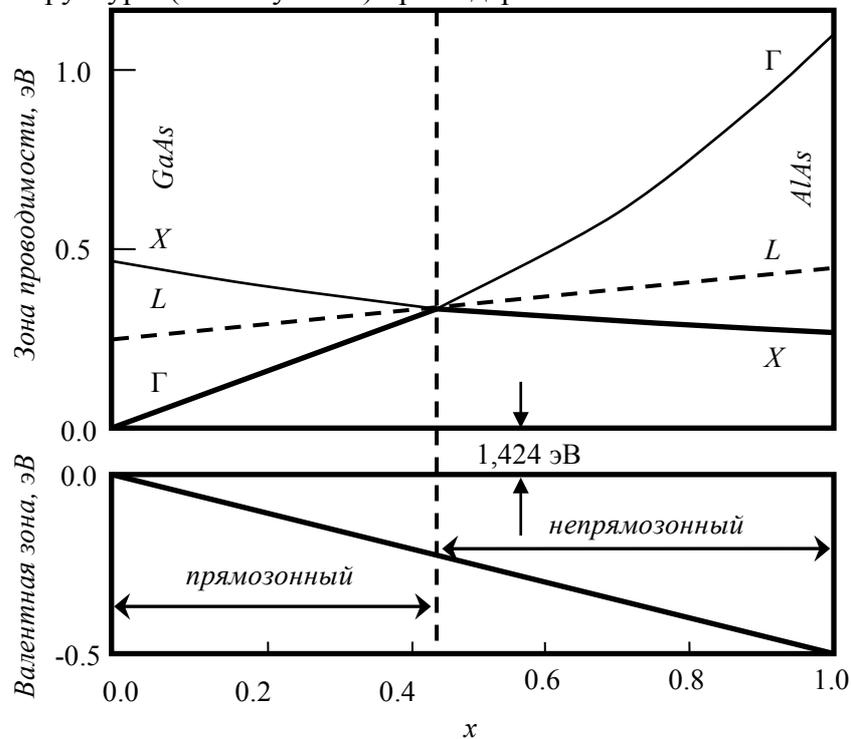


Рис. 7. Расположение валентной зоны и зоны проводимости в $Al_xGa_{1-x}As$

2.4. Построение энергетических диаграмм гетеропереходов

Покажем простой способ построения энергетической диаграммы на конкретном примере. Пусть требуется построить энергетическую диаграмму p-GaAs - n-Al_{0.3}Ga_{0.7}As. Используя справочные данные (см. табл.1), находим ширину запрещенной зоны и электронное сродство для материалов гетеропары. При этом учитываем, что при $x = 0.3$ минимум зоны проводимости твердого раствора Al_xGa_{1-x}As лежит в точке Г (см. рис. 7). Для GaAs получаем $E_{g1} = 1.424$ эВ и $\chi_1 = 4.07$ эВ, а для Al_{0.3}Ga_{0.7}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 Al_{0.2}Ga_{0.8}As в отсутствие контакта. Относительно энергии электрона в вакууме их следует располагать, используя определение электронного сродства.

Разрыв зоны проводимости:

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

и разрыв валентной зоны:

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

В данном случае $\Delta E_c > 0$, $\Delta E_v > 0$, таким образом, этот гетеропереход относится к гетеропереходу I типа - дно зоны проводимости Al_{0.3}Ga_{0.7}As лежит выше дна зоны проводимости GaAs, а потолок валентной зоны Al_{0.3}Ga_{0.7}As лежит ниже потолка валентной зоны GaAs (см. рис.8, а).

Далее нарисуем уровни Ферми в двух полупроводниках в соответствии с уровнем легирования (рис. 8, б). В данном примере считаем полупроводники невырожденными и просто располагаем уровень ферми в GaAs ближе к потолку валентной зоны, а в Al_{0.3}Ga_{0.7}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-Al_{0.3}Ga_{0.7}As (рис. 8, б).

Соединим плавной пунктирной линией уровни E_c' , E_v' и E_c , E_v в GaAs (рис. 8, в). Точный вид кривой можно построить по выражениям (13), (15). На последнем этапе нарисуем разрывы зон (рис. 8, г).

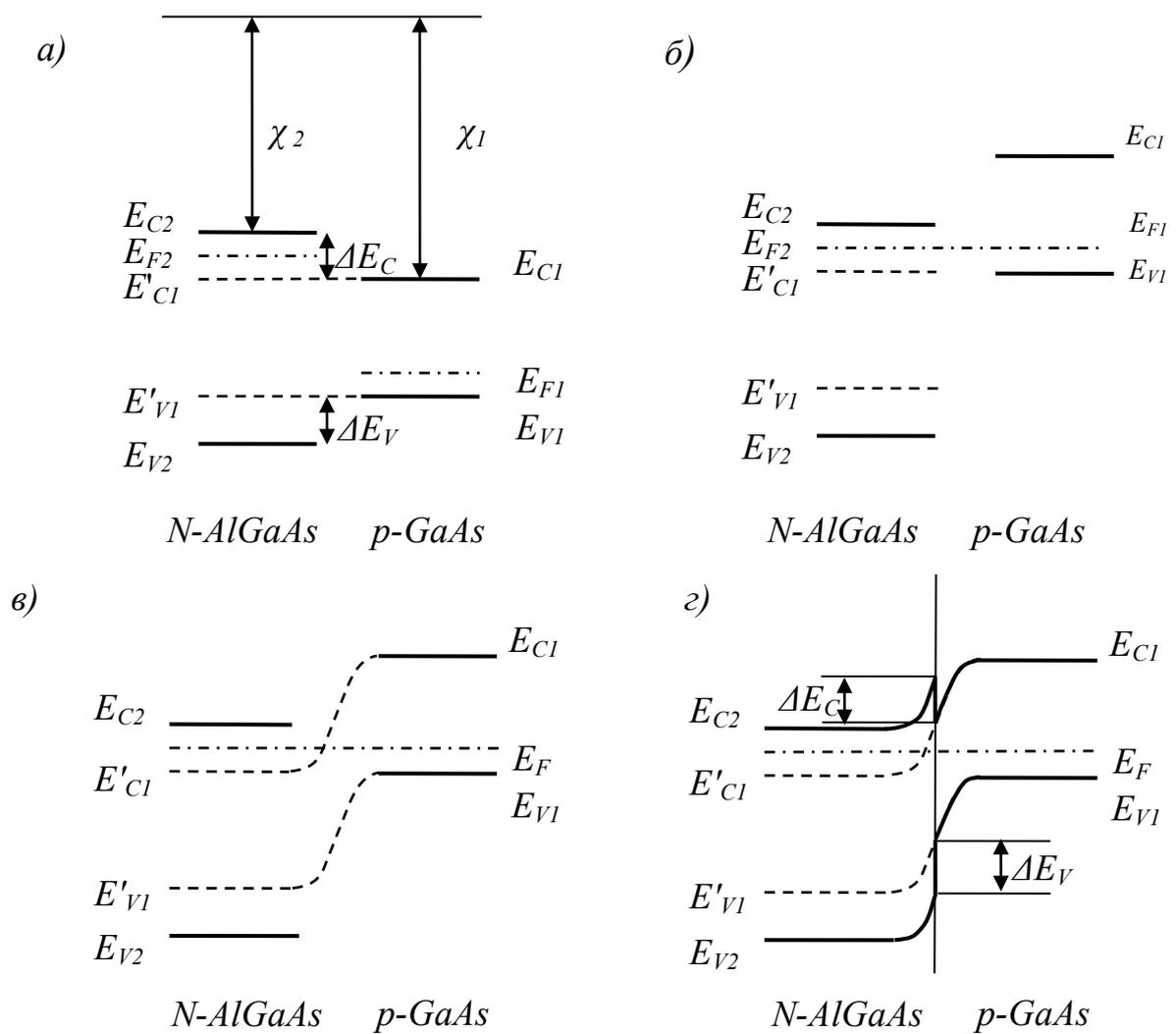


Рис. 8. Пример построения энергетической диаграммы гетероперехода P-GaAs-n-AlGaAs

2.5. Требования к материалам, образующих гетеропереход. Правило Вегарда

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 рис. 9 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.

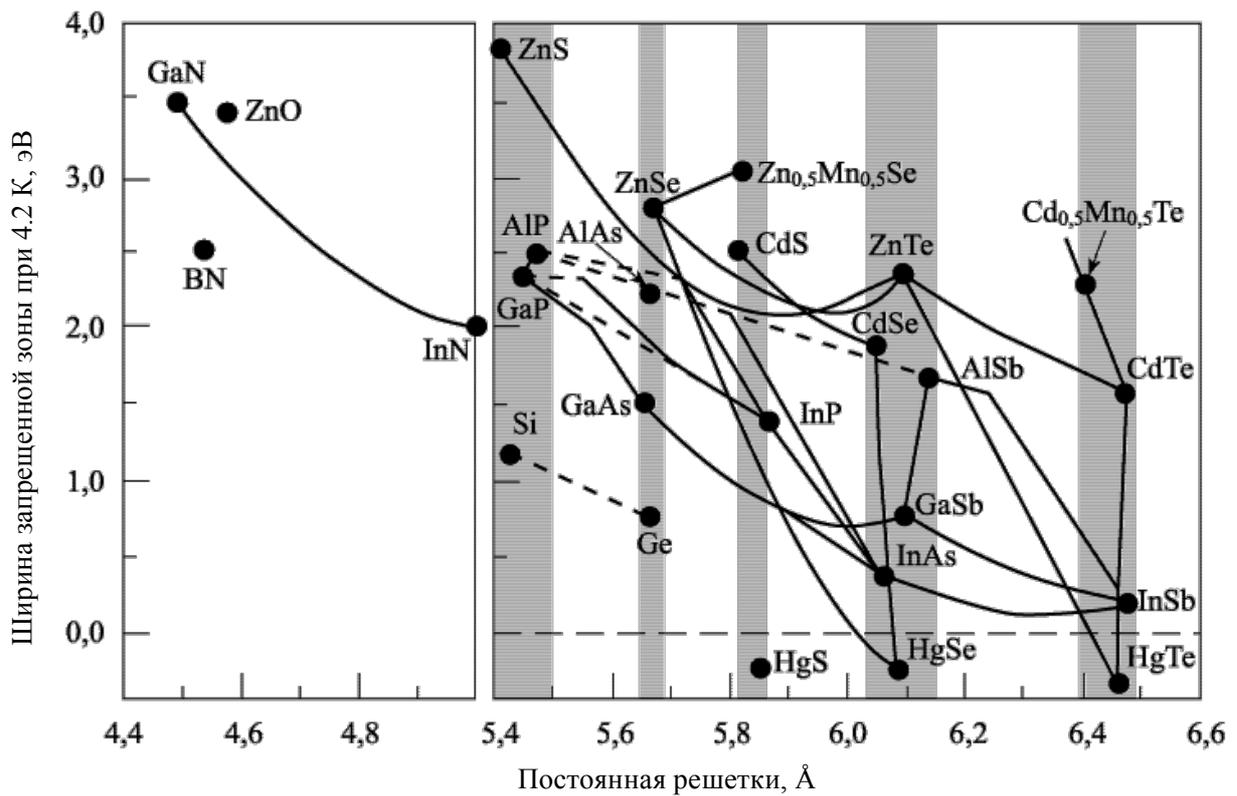


Рис. 9. График зависимости ширины запрещенной зоны при низкой температуре от постоянной решетки для ряда полупроводников со структурой алмаза и цинковой обманки. Затененные области объединяют группы полупроводников с близкими постоянными решеток. Полупроводники, соединенные сплошными линиями, образуют между собой стабильные твердые растворы. Отрицательное значение, приведенное для энергии запрещенной зоны HgSe, является спорным. Штриховые линии указывают на непрямые запрещенные зоны

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. Θ – параметр решетки

$$\theta_{ABC} = (1 - x)\theta_{AC} + x\theta_{BC} \quad (60)$$

$$\theta_{ABCD} = xy\theta_{AC} + x(1 - y)\theta_{AD} + (1 - x)y\theta_{BC} + (1 - x)(1 - y)\theta_{BD} \quad (61)$$

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 различны. 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: $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ и $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$.

Задачи

1. Рассчитайте контактную разность потенциалов $n-n^+$ -гомоперехода, сформированного на контакте двух кристаллов с уровнем легирования $N_{d1} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $N_{d2} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре.

Решение:

Для первого полупроводника можно записать:

$$N_{d1} = N_c \text{Exp}\left[\frac{E_c - F_1}{kT}\right]$$

Выразим уровень Ферми:

$$F_1 = E_c - kT \cdot \ln\left[\frac{N_{d1}}{N_c}\right]$$

По аналогии для второго полупроводника:

$$F_2 = E_c - kT \cdot \ln\left[\frac{N_{d2}}{N_c}\right]$$

Контактная разность потенциалов:

$$\varphi_0 = F_1 - F_2 = kT \cdot \ln\left[\frac{N_{d1}}{N_{d2}}\right] \approx 0.12 \text{ эВ}$$

Ответ: $\varphi_0 = 0.12 \text{ эВ}$.

2. 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 и вольтамперную характеристику полученного диода. Концентрация мелких доноров в кремнии $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация мелких акцепторов в германии $N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. рассчитайте величину ОПЗ при нулевом смещении ($V = 0$).

Решение:

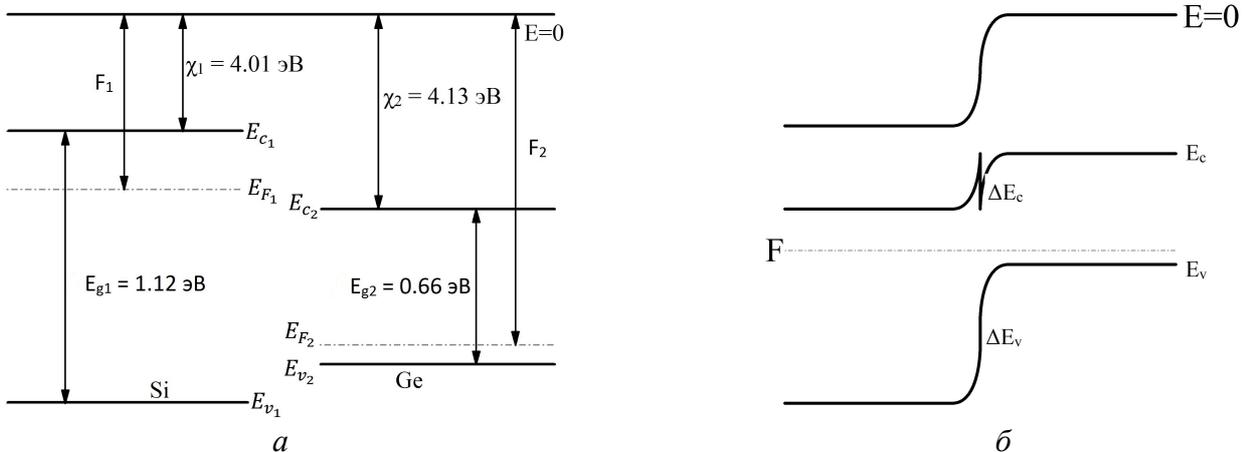


Рис. 10. Энергетические диаграммы, а – до совмещения полупроводников, б – после совмещения полупроводников

$$\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1 = 0.12 \text{ эВ}$$

$$\Delta E_v = \chi_1 + E_{g1} - \chi_2 - E_{g2} = 0.34 \text{ эВ}$$

Используем выражение для определения концентрации свободных носителей в полупроводнике:

$$N_d = N_c \text{Exp}\left[\frac{E_{c1} - F_1}{kT}\right].$$

Из него найдем выражение для определения уровня Ферми в первом полупроводнике:

$$F_1 = E_{c1} + kT \ln\left[\frac{N_c}{N_d}\right]$$

По аналогии найдем уровень ферми во втором полупроводнике:

$$F_1 = E_{v2} - kT \ln\left[\frac{N_v}{N_a}\right]$$

Плотности состояний в валентной зоне и в зоне проводимости в полупроводниках можно рассчитать по формулам:

$$N_c = 2 \frac{(2\pi mk)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \cdot (m_n^* T)^{\frac{3}{2}} = 4.83 \cdot 10^{15} \cdot (m_n^* T)^{\frac{3}{2}} = 2.82 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

$$N_v = 4.83 \cdot 10^{15} \cdot (m_p^* T)^{\frac{3}{2}} = 5.65 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

где m – масса покоя свободного электрона

Контактную разность потенциалов найдем по формуле:

$$\varphi_0 = F_1 - F_2 = kT \ln\left[\frac{N_c N_v}{N_d N_a}\right] - \Delta E_{g2} - \Delta E_c = 0.42 \text{ эВ}$$

Нарисуем вольтамперную характеристику полученного диода:

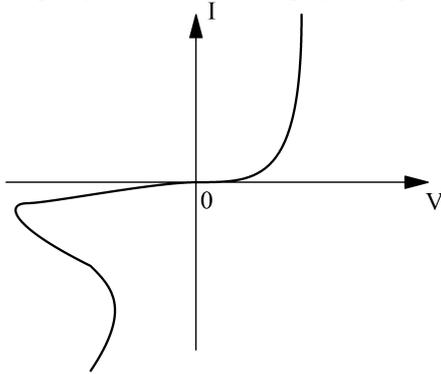


Рис. 11. Вольтамперная характеристика полученной структуры

Участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением связан с тепловым пробоем диода. [3]

Величину ОПЗ можно рассчитать, используя формулу (57):

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2}{|e|(\varepsilon_1 N_a + \varepsilon_2 N_d)} \cdot \frac{N_d^2 + N_a^2}{N_a N_d}} \cdot \varphi_k \approx 0.35 \text{ мкм}$$

Ответ: $\Delta E_c = 0.12 \text{ эВ}$, $\Delta E_v = 0.34 \text{ эВ}$, $\varphi_0 = 0.42 \text{ эВ}$, $d = 0.35 \text{ мкм}$.

3. Используя данные из приложения, определите по обобщенному правилу Вегарда состав $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, который без напряжений может быть выращен на подложке InP .

Решение:

Выпишем параметры решеток используемых материалов:

$$a_{\text{InAs}} = 0.6058 \text{ нм}$$

$$a_{\text{GaAs}} = 0.5653 \text{ нм}$$

$$a_{\text{InP}} = 0.5869 \text{ нм}$$

Для того, чтобы состав вырос без напряжений на подложке InP , должно быть выполнено условие:

$$a_{\text{InxGa1-xAs}} = a_{\text{InP}}$$

Используем правило Вегарда:

$$a_{In_xGa_{1-x}As} = a_{InAs} + x(a_{GaAs} - a_{InAs})$$

Выразим x :

$$x = \frac{a_{In_xGa_{1-x}As} - a_{InAs}}{a_{GaAs} - a_{InAs}} \approx 0.4667 \text{ нм}$$

Ответ: $In_{0.47}Ga_{0.53}As$.

3. Задачи для самоконтроля

1.1. Рассчитайте контактную разность потенциалов при создании контакта: а) Si – Pt; б) Si – Al; в) Si – W. $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Ответ: а) $\varphi_0 = 1.32 \text{ эВ}$; б) $\varphi_0 = -0.05$; в) $\varphi_0 = 0.56$.

1.2. Для структур из задачи 1.1. рассчитайте величину ОПЗ:

Ответ: а) $d = 0.42 \text{ мкм}$; б) $d = 0.08 \text{ мкм}$; в) $d = 0.27 \text{ мкм}$.

1.3. Рассчитайте концентрацию доноров в кремнии, чтобы при создании контакта с, а) Ag; б) Al; в) Sb; получался омический контакт. Подумать, какой металл лучше всего подойдет для создания омического контакта с собственным кремнием.

Ответ: а) $N_d = 4.8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$; б) $N_d = 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; в) $N_d = 1.43 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

1.4. Рассчитайте концентрацию доноров в германии, чтобы при создании контакта с, а) Ag; б) Al; в) Sb; получался омический контакт. Подумать, какой металл лучше всего подойдет для создания омического контакта с собственным германием.

Ответ: а) $N_d = 2.1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; б) $N_d = 3.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; в) $N_d = 6.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

1.5. Из предлагаемого набора металлов (см. таблицу 3) выбрать материал «омического» контакта для кремния р- и n-типа проводимости. Энергия электронного сродства для кремния $\chi = 4,05 \text{ эВ}$; ширина запрещенной зоны $E_g = 1,12 \text{ эВ}$; уровень легирования кремния $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (р-тип), $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (n-тип).

1.6. Рассчитать и построить энергетические диаграммы контактов Ni-nSi и Ni-pSi (определить $\varphi_{\text{конт}}$, $\varphi_{\text{бар}}$, толщину ОПЗ δ). Уровни легирования кремния n- и р-типа принять равными $N_D = N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, эффективная плотность состояний в зонах кремния $N_c = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_v = 1,02 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Работа выхода для никеля $\Phi = 4,5 \text{ эВ}$, энергия электронного сродства для кремния $\chi = 4,05 \text{ эВ}$.

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

Ответ: $\varphi_0 = 0.20 \text{ эВ}$.

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

Ответ: $\varphi_0 = 0.86 \text{ эВ}$.

2.3. Рассчитайте контактную разность потенциалов гомоперехода, сформированного на контакте двух невырожденных полупроводников р- и n-типа: Ge. $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Ответ: $\varphi_0 = 0.44 \text{ эВ}$.

2.4. Рассчитать и построить энергетическую диаграмму резкого симметричного р-n-перехода в кремнии при $T = 300 \text{ К}$ (определить φ_k , δ_n , δ_p , C_0). $\varepsilon = 12$, $N_A = N_D$

$= 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_c = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_v = 1,02 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Какая доля тока будет переноситься электронами, а какая дырками?

- 2.5. Рассчитать и построить энергетическую диаграмму резкого симметричного p^+ - n -перехода в германии при $T = 300 \text{ К}$ (определить ϕ_k , δ_n , δ_p , C_6). $E_g = 0,66 \text{ эВ}$, $\epsilon = 16$, $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_c = 1,04 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_v = 6,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Какая доля тока будет переноситься электронами, а какая дырками?
- 2.6. Германиевый диод имеет обратный ток насыщения $I_0(\text{Ge}) = 10^{-6} \text{ А}$, а кремниевый тех же размеров $I_0(\text{Si}) = 10^{-8} \text{ А}$. Какие напряжения прямого смещения будут на этих диодах при протекании тока 100 мА ?
- 2.7. Кремниевый n^+ - p - переход освещается «красным» светом ($\lambda = 0,7 \text{ мкм}$). Какую плотность тока короткого замыкания следует ожидать, если интенсивность освещения $J = 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, коэффициент поглощения $\gamma = 10^3 \text{ см}^{-1}$, квантовый выход β принять равным единице.
- 2.8. Вычислить малосигнальные параметры (дифференциальное сопротивление и емкость) для германиевого p^+ - n -диода с длинной базой $W_n = 0,3 \text{ мм}$ при прямом и обратном смещении $V = \pm 0,3 \text{ В}$, если $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_c = 1,04 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_v = 6,11 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, время жизни $\tau_p = \tau_n = 10^{-4} \text{ с}$, площадь p - n -перехода $S = 1 \text{ мм}^2$.
- 2.6. Рассчитайте для идеального гетероперехода n - Si - p - Ge 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. Концентрация мелких доноров в кремнии $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация мелких акцепторов в германии $N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Ответ: со стороны n - Si : $Q_1 = 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2 = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $d_1 = 0,3 \text{ мкм}$, $E_1 = 2,25 \cdot 10^4 \text{ В/см}$, $\phi_1 = 0,35 \text{ эВ}$; со стороны p - Ge : $Q_1 = -1,5 \cdot 10^{11} \text{ Кл/см}^2$, $d_2 = 0,075 \text{ мкм}$, $E_2 = 1,69 \cdot 10^4 \text{ В/см}$, $\phi_2 = 0,066 \text{ эВ}$. Барьер для движения электронов из кремния в германий равен $\phi_1 = 0,35 \text{ эВ}$, для движения дырок из германия в кремний равен $\phi_0 + \Delta E_V = 0,75 \text{ эВ}$.

- 2.7. 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. рис. 2)? Нарисуйте вольтамперные характеристики полученных структур, сравните их (качественно) с ВАХ диодов из кремния и германия.

Ответ: а) $\Delta E_C = 0,56 \text{ эВ}$, $\Delta E_V = -0,17 \text{ эВ}$; б) $\Delta E_C = 0,86 \text{ эВ}$, $\Delta E_V = -0,46 \text{ эВ}$.

- 2.8. Используя правило Андерсона, нарисуйте зонную диаграмму при комнатной температуре для гетероструктуры p - $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ – n - GaAs . Какие типы зарядов,

может захватывать данная структура на гетерогранице? Как изменится зонная диаграмма при приложении постоянного потенциала V ? Нарисуйте вольтамперные характеристики полученных структур, сравните их (качественно) с ВАХ диодов из кремния и германия.

Ответ: данная структура может захватывать дырки.

2.9. 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 изменится в случае нелегированного гетероперехода III типа (например, InAs-GaSb)?

2.10. Рассчитайте контактную разность потенциалов и изобразите энергетическую диаграмму p-n перехода на основе GaAs при следующих параметрах легирования: $N_D=2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $N_A=10^{23} \text{ м}^{-3}$, $N_C=4.7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $N_V=7 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Нарисуйте вольтамперные характеристики полученных структур, сравните их (качественно) с ВАХ диодов из кремния и германия.

Ответ: $\phi_0 = 1.19$ эВ.

2.11. 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:

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

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: $\phi_0 = 1.52$ эВ.

3.1. Используя данные из приложения, определите по обобщенному правилу Вегарда состав In_xAl_{1-x}As, который без напряжений может быть выращен на подложке InP.

Ответ: In_{0,48}Ga_{0,52}As.

Приложение

В Таблицах 1, 2 и 3 приведены некоторые параметры полупроводников и металлов, наиболее часто использующихся для создания гетероструктур и структур с барьером Шоттки. Здесь применены следующие обозначения:

a	<i>период кристаллической решетки</i>
ΔE_g	<i>ширина запрещенной зоны</i>
χ	<i>сродство к электрону</i>
m_e^*	<i>эффективная масса электронов</i>
m_h^*	<i>эффективная масса дырок</i>
ε	<i>относительная диэлектрическая проницаемость</i>
μ_n	<i>подвижность электронов</i>
μ_p	<i>подвижность дырок</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 [3].

Параметр	GaAs	AlAs	$Al_xGa_{1-x}As$
a, нм	0.56533	0.56611	$0.56533+0.00078x$
E_g , эВ	1.424	2.16	$1.424+1.247x, x < 0.45$ $1.656+0.215x+0.143x^2, x > 0.45$
χ , эВ	4.07	3.5	$4.07-1.1x, x < 0.45$ $3.65-0.14x, x > 0.45$
m_e^*	0.067	0.150	$0.067+0.083x$
m_h^*	0.45	0.5	$0.082+0.071x$
ϵ	12.7	10.06	$13.18-3.12x$

Таблица 2

Некоторые параметры наиболее часто используемых для создания гетеропереходов материалов при $T = 300K$ [3]

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
E_g , эВ	1.12	0.66	1.42	2.15	0.35	2.27	1.34	0.75	1.62	0.18
χ , эВ	4.01	4.13	4.07	3.51	4.92	4.3	4.38	4.06	3.65	4.59
m_e	1.08	0.55	0.067	0.150	0.028	0.13	0.077	0.045	0.11	0.014
m_h	0.56	0.37	0.45	0.5	0.33	0.8	0.40	0.39	0.39	0.6
ϵ	11.9	16.2	12.2	10.1	15.1	11.1	12.6	15.7	12.0	16.8
$\mu_n, m^2B^{-1}c^{-1}$	0.14	0.39	0.92	0.1	3.3	0.02	0.5	0.77	0.02	8
$\mu_p, m^2B^{-1}c^{-1}$	0.045	0.19	0.04	0.01	0.05	0.012	0.01	0.1	0.04	0.13

Работа выхода некоторых металлов

Металл	F_M , эВ
Ag	4.63
Al	4.16
Au	5.29
Pt	5.53
Ni	5.20
W	4.77
Sn	4.42

Вопросы для самоконтроля:

1. Контакт металл – полупроводник. Зонная диаграмма контакта
2. Омический контакт. Условия создания, свойства
3. Диоды на основе барьера Шоттки^[2]
4. Свойства барьера Шоттки. ВАХ перехода металл – полупроводник^[3]
5. Факторы, определяющие быстродействие диодов Шоттки^[2]
6. Определение идеального гомоперехода
7. Определение идеального гетероперехода
8. Энергетическая диаграмма идеального гомоперехода
9. Энергетическая диаграмма идеального гетероперехода
10. Расчет поля и потенциала в гетеропереходе
11. Вывод распределения поля и потенциала для гомоперехода как частный случай гетероперехода
12. Правило Вегарда. Физический смысл. Условие создание гетеропары
13. Расчет ВАХ диода на основе гетероструктуры^[3]
14. Принцип работы биполярного транзистора^[2]
15. Определение МДП – структур^[2]
16. Принцип работы полевого транзистора с индуцированным каналом^[2]

Список литературы

1. Физика полупроводниковых приборов/ Зи С/ в 2-х книгах. Кн. 1/ Пер. с англ. — 2-е перераб. и доп. изд. — М.: Мир, 1984. — 456 с. ил.
2. Полупроводниковые приборы/ Пасынков В. В., Чиркин Л. К./ Учебное пособие. 9-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2009. — 480 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература)
3. Твердотельная электроника/ Гуртов В. А./ учебное пособие — 2-е изд., доп. Москва: Техносфера 2005. — 408 с.
4. Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход. Учебно-методическое пособие. /Сост. Шилиев П.А., Павлов Д.А. — Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. — 18 с.
5. 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.

