

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических заданий по дисциплине
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»

для студентов специальности

1-36 04 02 «Промышленная электроника»

дневной и заочной форм обучения

Часть II

УДК 538.91, 548.73, 378.147:53
ББК 74.265.1 я 73

Методические указания предназначены для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» дневной и заочной форм обучения для выполнения практических и контрольных заданий по физическим основам электронной техники. Содержат основные теоретические сведения, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения, контрольные задания и рекомендуемую литературу. Издаётся в 2 частях. Часть 2.

Составители: И.С. Янусик, ст. преподаватель
А.И. Пинчук, к.ф.-м.н., доцент

Рецензент: В.С. Костко, к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики
БрГТУ им. А.С. Пушкина

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОСНОВЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ И КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ	4
2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЁРДЫХ ТЕЛ	11
3. ОСНОВЫ СТАТИСТИКИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МЕТАЛЛАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ	25
4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНТАКТОВ МАТЕРИАЛОВ	36
5. ЛИТЕРАТУРА	49

1. ОСНОВЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ И КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ

1.1 Краткие теоретические сведения

В изолированных атомах электроны обладают дискретным спектром, т.е. они могут иметь только строго определённые значения энергии, которым соответствуют отдельные энергетические уровни атома. В кристаллах атомы уже нельзя считать изолированными - они образуют единую систему, в которой электроны всех атомов обобществлены. Взаимное влияние друг на друга электрических полей отдельных атомов кристалла ведёт к тому, что волновые функции их электронов перекрываются. Для электронов, находящихся на внешних электронных оболочках, это перекрытие будет значительным, в то время как для внутренних электронов оно может быть очень мало. В результате перекрытия волновых функций, каждый электронный уровень изолированного атома заменяется в кристалле целым интервалом энергий – происходит расщепление уровней в энергетические зоны.

Ширина образующихся зон определяется степенью перекрытия волновых функций. Поэтому глубокие энергетические уровни внутренних электронов образуют узкие зоны, а уровни внешних электронов расщепляются в широкие зоны.

Количество подуровней в каждой зоне одинаково и определяется числом повторяющихся в кристалле структурных единиц, т.е. равно числу элементарных решёток в данном кристалле. В общем случае число элементарных ячеек можно определить как N/A , где N – количество атомов в кристалле, а A – базис решётки. Так как в простых решётках $A = 1$, то в этом случае каждая зона будет состоять из N подуровней.

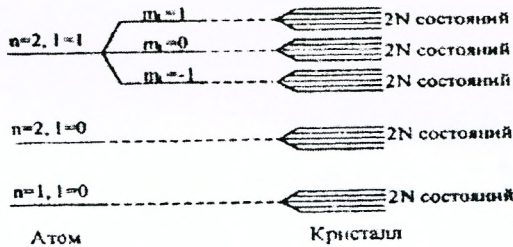


Рисунок 1.1 – Расщепление уровней изолированного атома в зоны при образовании кристалла

В кристалле, состоящем из N атомов, исходному энергетическому уровню изолированного атома, определяемому квантовыми числами l и n , соответствует энергетическая зона из $(2l+1)N$ подуровней, на каждом из которых в соответствии с принципом Паули, может находиться по два электрона (рис. 1.1)

Зоны, образующиеся в результате расщепления энергетических уровней атомов, называются *разрешёнными зонами*. Они включают в себя интервалы энергий, разрешённые для электронов в кристалле. Разрешённые зоны разделены интервалами энергий, которые запрещены для электронов. Соответственно эти интервалы называются *запрещёнными зонами*.

Если порядковый номер элемента в периодической таблице – Z , то на атом приходится Z электронов и полное число электронов в кристалле будет равно NZ . Эти электроны заполняют разрешённые зоны, начиная с самой нижней вплоть до какой-то верхней зоны, которая заполняется валентными электронами.

Если верхняя зона при $T = 0\text{K}$ заполнена полностью, то она называется *валентной*, а следующая над ней полностью свободная зона *зоной проводимости* (рис. 2)



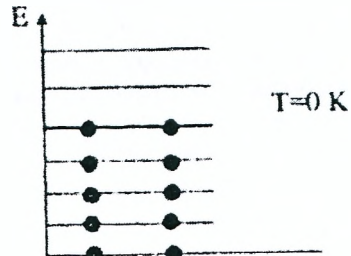
Где E_c – обозначение дна зоны проводимости;
 E_v – ... потолка валентной зоны;
 E_g – ... ширины запрещённой зоны

Рисунок 1.2 – Зонная структура твёрдых тел

В валентной зоне свободные уровни отсутствуют, и под действием внешнего поля электроны перемещаться не могут, т.к. не могут изменить свою энергию. Если в веществе при температуре, не равной 0K, какие – либо электроны в валентной зоне приобретают достаточную тепловую энергию для преодоления запрещённой зоны и перехода в зону проводимости, то они становятся носителями заряда и участвуют в электропроводности, поскольку в зоне проводимости для них имеется возможность увеличить свою энергию в электрическом поле. Такие вещества называются *полупроводниками*. Для них $E_g < 2.5 - 3$ эВ. При большей ширине запрещённой зоны в нормальных условиях электронам не хватает тепловой энергии для перехода в зону проводимости, и такие вещества будут *диэлектриками*.

Если валентная зона заполнена не полностью, то уже при $T = 0\text{K}$ электроны под действием поля могут переходить на вышележащие свободные энергетические уровни, обеспечивая электропроводность. В этом случае валентная зона одновременно является и зоной проводимости, а запрещённая зона отсутствует (рис. 1.3). Такие вещества являются *проводниками (металлами)*. К проводникам также относят вещества, у которых при 0°K валентная зона заполнена полностью, но она перекрывается в пространстве с зоной проводимости, образуя единую зону.

Рисунок 1.3 – Заполнение энергетических уровней электронами в металле при $T = 0\text{K}$



Существуют общие правила для классификации веществ по их способности к электропроводности:

1. Если элемент имеет нечётную валентность и его элементарная ячейка содержит нечётное число атомов, то это вещество – металл.

2. Если в элементарной ячейке чётное число атомов, а элемент имеет нечётную валентность, то получаем зонную структуру диэлектрика или полупроводника.

3. Если валентность элемента чётная, то вещество является диэлектриком или полупроводником, если только валентная зона и зона проводимости такого кристалла не перекрываются в пространстве, в противном случае это металл.

В отличие от свободного электрона, на электрон, движущийся в кристалле под действием электрического поля с напряжённостью \vec{E} , со стороны решётки действует периодическое поле ионов. При этом работа внешней силы $\vec{F} = q\vec{E}$ может переходить как в кинетическую энергию электрона, так и в потенциальную энергию взаимодействия с решёткой или перераспределяться между ними. Движение, совершаемое свободным электроном под действием силы \vec{F} , описывается вторым законом Ньютона:

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad (1.1)$$

где m_e – масса электрона, \vec{a} – его ускорение, приобретаемое под действием силы \vec{F} .

В случае движения электрона в кристалле, внешний вид уравнения (1.1) можно сохранить, если вместо массы электрона m_e ввести величину m_n^* – *эффективную массу*, учитывающую влияние периодического поля решётки на движение электрона:

$$m_n^* = \hbar^2 \left(\frac{d^2 E}{dk^2} \right)^{-1} \quad (1.2)$$

Эффективная масса m_n^* в зависимости от вида функции $E(k)$ может быть больше массы электрона или меньше её. В любом случае она, как и обычная масса, характеризует инерционные свойства электрона.

Рассмотрим зону, полностью заполненную электронами. Электроны, расположенные на верхних энергетических уровнях, имеют отрицательный заряд и эффективную массу меньше нуля ($m^* < 0$). Если удалить один электрон с такого уровня, то освободившийся уровень будет вести себя как положительно заряженная частица с эффективной массой больше нуля ($m^* > 0$), численно равной массе m^* удалённого электрона. Такая квазичастица называется *дыркой*. Энергия дырки увеличивается при её перемещении от потолка ко дну валентной зоны, т.е. в направлении, обратном случаю для электрона.

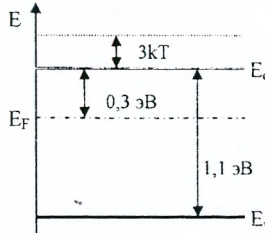
По типу электропроводности полупроводники подразделяют на собственные и примесные. *Собственными полупроводниками* называются полупроводники без примесей. Проводимость в них осуществляется собственными носителями зарядов – электронами и дырками, причём их концентрации равны, т.е. $n = p = n_i$

1.2. Примеры решения задач

1. Уровень Ферми полупроводника находится на 0,3 эВ ниже дна зоны проводимости. Какова вероятность того, что при комнатной температуре энергетические уровни, расположенные на расстоянии $3kT$ выше дна зоны проводимости, заняты электронами? Какова вероятность того, что уровень у потолка валентной зоны содержит дырки, если ширина запрещённой зоны 1,1 эВ?

Решение

Зонная структура полупроводника для данного случая показана на рисунке:



Для электронов проводимости (или дырок) правомерно использовать как распределение Максвелла – Больцмана, так и распределение Ферми–Дирака, поскольку при $E \gg E_F$, единицей в знаменателе $f_{\Phi-D}$ можно пренебречь и $f_{\Phi-D} \rightarrow f_{M-B}$ E_F

$$f_{\Phi-D}(E, T) = \left[\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1}$$

Имеем: $E - E_F = 3kT - (-0,3 \text{ эВ}) = 0,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} + 3kT$ (Дж)

При $T = 290\text{K}$ разность $E - E_F = 4,8 \cdot 10^{-20} + 1,2 \cdot 10^{-20} = 6 \cdot 10^{-20}$ (Дж)

Тогда

$$f_{\Phi-D}(E, T) = [\exp(14,99) + 1]^{-1} = 3,08 \cdot 10^{-7}$$

Для второй части задачи имеем

$$E - E_F = -1,1 \text{ эВ} - (-0,3 \text{ эВ}) = -0,8 \text{ эВ} = -1,28 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}$$

Вероятность заполнения электронами уровня у потолка валентной зоны:

$$f_{\Phi-D}(E, T) = [\exp(-31,98) + 1]^{-1} = [1,286 \cdot 10^{-14} + 1] \approx 1$$

Для дырок соответствующая вероятность будет равна

$$1 - f_{\Phi-D}(E, T) = 1 - \frac{1}{1,29 \cdot 10^{-14} + 1} = \frac{1,29 \cdot 10^{-14}}{1,29 \cdot 10^{-14} + 1} \approx 1,29 \cdot 10^{-14}$$

1.3. Задачи для самостоятельного решения

1. На какое количество подуровней расщепляется р-уровень изолированно-го атома при образовании кристалла.

2. Кристаллическое вещество имеет кубическую структуру. Постоянная решётки $a = 0,25$ нм. Для образца объёмом 1 см^3 вычислить: а) число уровней в каждой энергетической зоне; б) расстояние между уровнями в энергетической зоне шириной 1 эВ.

3. Кристалл имеет кубическую структуру. Определить расстояние между уровнями в энергетической зоне шириной 1 эВ. Как изменится среднее расстояние между уровнями, если первоначальный объём кристалла, равный 1 см^3 , уменьшится в 10 раз? Постоянная решётки $a = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

4. Вместо распределения Ферми – Дирака используют распределение Максвелла – Больцмана. Определить относительную ошибку такой замены при $E - E_F = kT$ и $E - E_F = 4kT$.

5. Показать, что вероятность того, что электрон в кристалле обладает энергией, превышающей энергию Ферми E_F на величину ΔE , в точности совпадает с вероятностью отсутствия электрона в состоянии, энергия которого меньше значения E_F на ту же величину ΔE .

6. Энергия Ферми для кристалла серебра равна 5,5 эВ. Для серебра при температуре, немного меньшей точки плавления 1230К, найти вероятность того, что электрон имеет энергию 5,0 и 5,6 эВ.

7. Во сколько раз изменится вероятность заполнения электронами энергетического уровня в металле, если уровень расположен на 0,1 эВ ниже уровня Ферми и температура изменится от 200 до 500К?

8. Вычислить, во сколько раз изменится вероятность заполнения электронами в металле энергетического уровня, расположенного на 0,1 эВ выше уровня Ферми, если температуру металла повысить с 300 до 1000К.

9. Кристаллическое вещество имеет кубическую структуру. Постоянная решётки $a = 0,45 \text{ нм}$. Для образца объёмом 1 см^3 вычислить число уровней в каждой энергетической зоне.

10. Используя распределение Ферми-Дирака, рассчитать при 300К вероятность заполнения электронами энергетического уровня, лежащего выше уровня Ферми на а) 0,1 эВ; б) 1,0 эВ и ниже уровня Ферми на 0,1 эВ.

11. В образце кремния n- типа при комнатной температуре уровень Ферми равен 0,244 эВ; принимая энергию активации донорного уровня $E_c - E_d = 50 \text{ мэВ}$, определить вероятность того, что донорный уровень занят.

12. Определить положение уровня Ферми в образце кремния, легированного атомами фосфора, если $E_c - E_d = 0,044 \text{ мэВ}$ и при $T = 153\text{К}$ доля ионизированных атомов примеси составляет 95 %.

13. Определить температуру, при которой в твёрдом проводнике вероятность найти электрон с энергией 0,5 эВ над уровнем Ферми равна 2%.

14. В образце германия, легированного атомами мышьяка, доля ионизированных атомов примеси при $T = 150\text{К}$ составляет 90%. Определить относительную долю ионизированной примеси при $T = 50$ и 300К , если $E_c - E_d = 0,05 \text{ эВ}$.

15. Ширина запрещённой зоны чистого полупроводника равна 1 эВ. Вычислить вероятность заполнения уровня вблизи дна зоны проводимости при 300 К. Изменится ли эта вероятность, если на полупроводник действует электромагнитное излучение: а) с длиной волны 1,0 мкм; б) с длиной волны 2,0 мкм.

16. Уровень Ферми расположен на 0,3 эВ ниже дна зоны проводимости. Какова вероятность того, что при комнатной температуре энергетические уровни, расположенные на 3 эВ выше дна зоны проводимости, заняты электронами?

17. В чистом германии ширина запрещённой зоны равна 0,72 эВ. Насколько надо повысить температуру по сравнению с 300К, чтобы число электронов проводимости увеличилось в 2 раза?

18. Ширина запрещённой зоны равна 0,72 эВ. Какова вероятность того, что уровень у потолка валентной зоны содержит дырки, если при $T = 300\text{К}$ уровень Ферми находится на 0,07 эВ ниже дна зоны проводимости?

19. Уровень Ферми полупроводника находится на 0,01 эВ выше потолка валентной зоны. Рассчитать вероятность появления дырки на верхнем уровне валентной зоны при 300К и при 80 К.

20. Уровень Ферми полупроводника находится на 0,01 эВ выше потолка валентной зоны. Рассчитать вероятность нахождения электрона на дне зоны проводимости при 300К, если ширина запрещённой зоны полупроводника 0,67 эВ.

21. Определить вероятность заполнения электронами энергетического уровня, расположенного на 10 кТ выше уровня Ферми. Как изменится вероятность заполнения этого уровня электронами, если температуру увеличить в 2 раза?

22. В кремнии, легированном атомами бора, доля ионизированных атомов примеси при $T = 150\text{К}$ составляет 85 %. Определить относительную долю ионизированной примеси при $T = 50$ и 300К, если $E_c - E_v = 0,1$ эВ.

23. В образце кремния n -типа при комнатной температуре уровень Ферми равен 0,44 эВ; принимая энергию активации донорного уровня $E_c - E_d = 50$ мэВ, определить вероятность того, что уровень E_d свободен.

24. Кристалл имеет ОЦК решётку с постоянной решётки $a = 2,5 \cdot 10^{-10}$ м. Для образца объёмом 1 см^3 вычислить среднее расстояние между уровнями в энергетической зоне шириной 1 эВ.

25. Определить температуру, при которой вероятность обнаружения электрона в зоне проводимости чистого германия равна 2 %.

1.4. Теоретические вопросы

1. Опишите сущность адиабатного и одноэлектронного приближения.
2. Опишите процесс образования и характер энергетических зон для случая сильносвязанных электронов (модель сильной связи).
3. Объяснить причины образования энергетических зон в кристалле. Чем определяются ширина энергетической зоны?
4. Записать периодические граничные условия вдоль ОХ для кристалла длиной L и получить возможные значения волнового вектора \vec{k} .
5. Что описывает модель Кронига – Пенни?
6. Какие основные выводы следуют из рассмотрения поведения в кристалле слабосвязанных электронов (модель слабой связи)?
7. Записать функцию Блоха и объяснить её физический смысл.
8. В каких пределах ограничены физически различные значения волнового вектора \vec{k} в кристалле? Привести дисперсионную зависимость $E(\vec{k})$ для электрона, движущегося в кристалле.
9. Дать определение зонам Бриллюэна. Что называется приведённой зоной Бриллюэна?

10. В чём заключается причина разрывов в энергетическом спектре электрона проводимости (причина существования запрещённых зон)?
11. Чем определяется ширина запрещённой зоны в полупроводниках?
12. Чем определяется число уровней в энергетической зоне для простых и сложных решёток?
13. Какие вещества называют проводниками и полупроводниками в зонной теории?
14. Как влияют валентность элемента и число электронов в его элементарной ячейке на электрические свойства вещества? Объяснить.
15. Представить и сравнить зонные диаграммы для случаев образования металлов, полупроводников и диэлектриков.
16. Получить выражение для эффективной массы электрона.
17. Приведите рисунки образования в кристалле Si или Ge донорной и акцепторной типов проводимости.
18. Где расположены энергетические уровни в примесных полупроводниках? Привести энергетические диаграммы. Сравнить величину энергии активации примеси с энергией тепловых колебаний атомов кристалла.
19. Почему примесный уровень в полупроводнике дискретен?
20. Охарактеризовать свойства компенсированных полупроводников.
21. В чём различие между вырожденными коллективами и невырожденными?
22. Какой статистической функцией описываются невырожденные коллективы? Дать характеристику этой функции.
23. Что характеризуют статистические функции распределения? Записать формулы распределения Максвелла – Больцмана и Ферми – Дирака. Привести их графики при различных температурах.
24. В чём состоит существенное различие между функциями распределения Максвелла – Больцмана и распределения Ферми – Дирака и при каких условиях используется каждая из этих функций?
25. В чём заключается физический смысл уровня Ферми в металлах? Чем определяется местоположение E_F в металлах?
26. Как определить скорость движения электрона в кристалле исходя из дисперсионной зависимости $E(k)$? Когда она достигает максимума?
27. В чём различие положения уровня Ферми в собственном и сильнолегированном полупроводниках. Приведите энергетические диаграммы.
28. Что такое эффективная масса электрона? Объяснить её физический смысл.
29. Перечислить основные свойства эффективной массы электрона. Когда эффективная масса перестаёт служить аналогом массы электрона?
30. Охарактеризовать понятие «дырки» с точки зрения зонной теории. Что представляет собой дырка физически?

2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

2.1 Краткие теоретические сведения

При приложении к проводнику электрического поля напряжённости \mathcal{E} нём возникает электрический ток, плотность которого согласно закону Ома пропорциональна \mathcal{E} :

$$\vec{j} = \sigma \vec{\mathcal{E}} \quad (2.1)$$

Коэффициент пропорциональности σ называется *удельной электропроводностью* проводника. Она измеряется в $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ или $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. У хороших проводников, таких, например как металлы, $\sigma = 10^7 - 10^8 \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; у хороших диэлектриков $\sigma = 10^{-12} - 10^{-14} \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Часто удобнее пользоваться не удельной электропроводностью, а удельным сопротивлением ρ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.2)$$

Удельное сопротивление измеряется в (Ом·м). У металлов $\rho \approx 10^{-7} - 10^{-8}$ Ом·м, у диэлектриков $\rho \approx 10^{12} - 10^{14}$ Ом·м.

Возникновение тока в проводнике свидетельствует о том, что под действием поля электроны приобретают направленное движение. Такое направленное движение называют *дрейфом* электронов, а среднюю скорость этого движения – *дрейфовой скоростью* V_d . Дрейфовая скорость равна:

$$\vec{V}_d = -\frac{e\vec{\mathcal{E}}}{m_n^*}, \quad (2.3)$$

где m_n^* – *эффективная масса* электрона. Так как заряд электрона отрицателен, то дрейф происходит в направлении, противоположном $\vec{\mathcal{E}}$.

Плотность тока \vec{j} и дрейфовая скорость связаны соотношением:

$$\vec{j} = en\vec{V}_d, \quad (2.4)$$

где e – заряд электрона, n – концентрация электронов.

Подвижность носителей определяется как средняя дрейфовая скорость отнесенная к единице напряженности электрического поля. Она учитывает влияние процессов рассеяния на движение носителей заряда в кристалле: чем сильнее рассеяние, тем меньше подвижность носителей.

$$\mu = \frac{V_d}{\mathcal{E}} = \frac{e\tau}{m_n^*}, \quad [\mu] = \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \quad (2.5)$$

где τ – время релаксации (время свободного пробега при одном соударении), m_n^* – эффективная масса электрона.

Если бы время τ ничем не ограничивалось, то дрейфовая скорость V_d непрерывно возрастала бы. Однако из-за процессов рассеяния электрон под действием поля движется ускоренно лишь на небольшом отрезке пути между двумя последовательными актами рассеяния, называемом длиной свободного про-

бега λ . Затем он испытывает соударение ν раз до полной потери скорости в заданном направлении. Время релаксации можно определить как

$$\tau = \frac{\nu \lambda}{V}. \quad (2.6)$$

V – полная скорость движения электронов, ν - среднее число столкновений. Для полупроводников: $\vec{V} = |\vec{V}_{кс} + \vec{V}_d|$. Для металлов: $\vec{V} = |\vec{V}_F + \vec{V}_d|$. Так как обычно λ очень мала ($\lambda < 10^{-7}$ м), то направленная добавка дрейфовой скорости к скорости тепловой хаотического движения электрона при не очень сильных полях мала по сравнению со скоростью хаотического движения электрона $V_{кс} \gg V_d$. Поэтому можно считать $V \approx V_{кс}$ для полупроводников и $V \approx V_F$ для металлов. Поскольку $V_d \gg V_{кс}$, то соответственно время свободного пробега электронов в полупроводниках обычно больше, чем в металлах.

Т.к. подвижность связана с полной скоростью и эффективной массой обратно пропорциональной зависимостью:

$$\mu = \frac{e \cdot \lambda}{m_n^* \cdot V}, \quad (\nu=1), \quad (2.7)$$

$V_F \gg V_{кс}$, то подвижность электронов в металле обычно существенно ниже, чем полупроводников. В большинстве случаев в полупроводниках $m_n^* < m_p^*$, то соответственно $\mu_n > \mu_p$.

Электропроводность металла

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{m_n^*}, \quad (2.8)$$

$$\sigma = \frac{e^2 n \lambda}{2 m_n^* V_{кс}}, \quad (2.9)$$

$V_{кс}$ – среднеквадратичная скорость теплового хаотического движения молекул.

Если в электропроводности участвуют как электроны, так и дырки, то

$$j = e(nV_{дn} + pV_{дp}), \quad (2.10)$$

А проводимость

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (2.11)$$

Для собственного полупроводника $n = p = n_i$, поэтому полная электропроводность собственных полупроводников σ_i

$$\sigma_i = en_i(\mu_n + \mu_p), \quad (2.12)$$

где n_i – собственная концентрация носителей зарядов (электронов и дырок), μ_n и μ_p - подвижности электронов и дырок соответственно.

Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике:

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi \sqrt{m_n m_p} \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (2.13)$$

Если необходимо учитывать участие в проводимости полупроводников p- и n- типов неосновных носителей, то для определения концентраций следует использовать закон действующих масс:

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (2.14)$$

В металлах в процессе переноса участвуют только электроны, расположенные вблизи уровня Ферми, поэтому они имеют одинаковые V_F и λ_F . Поэтому:

$$\mu_n = \frac{e \cdot \tau_F}{m_n^*}; \quad \sigma = \frac{e^2 \cdot n}{m_n^*} \cdot \tau_F = \frac{n \cdot e^2}{m_n^*} \cdot \frac{\lambda_F}{V_F} \quad (2.15)$$

Скорость электронов на уровне Ферми определяется из соотношения

$$\frac{mV_F^2}{2} = E_F \quad (2.16)$$

Температура Ферми:

$$T_F = \frac{E_F}{k} \quad (2.17)$$

Электропроводность кристалла σ определяется произведением подвижности носителей заряда в нём и их концентрации:

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu \quad (2.18)$$

Величину подвижности μ носителей заряда в полупроводниках ограничивают два основных механизма рассеяния: рассеяние на тепловых колебаниях атомов и рассеяние на ионах примеси из-за взаимодействия движущегося заряда с полем заряжённого иона.

В области низких температур подвижность главным образом обусловлена ионами примесей, влияние которых на движение электронов тем больше, чем большую часть времени эти заряды находятся в отклоняющем поле ионов. С ростом температуры тепловая скорость движения электрона увеличивается, что ведёт к росту длины свободного пробега и, следовательно, подвижности. Подвижность растёт до тех пор, пока не станет существенной роль тепловых колебаний атомов решётки.

В случае достаточно чистого металла основным механизмом рассеяния является рассеяние на тепловых колебаниях атомов решётки – на фононах.

На температурной зависимости концентрации носителей заряда в легированном полупроводнике можно выделить три области

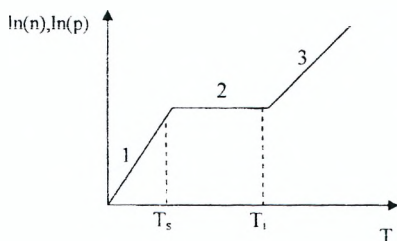


Рисунок 2.1 – Концентрационная зависимость носителей заряда в легированном полупроводнике от температуры

1) $T < T_s$ (область низких температур) – происходит увеличение концентрации носителей заряда за счёт ионизации примесей в соответствии с выражением:

$$n = \sqrt{N_c N_d} \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right), \quad (2.19)$$

где $N_c = 2\left(\frac{2\pi kT m_n^*}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$ – эффективная плотность состояний в зоне проводимости,

N_d – концентрация атомов примеси, E_d – энергия активации примеси, k – постоянная Больцмана;

2) $T_s < T < T_i$ – все примесные атомы ионизированы, $n = N_d = \text{const}$;

3) $T > T_i$ (область высоких температур) происходит переход к собственной проводимости. При изменении температуры концентрация носителей возрастает по закону:

$$n = n_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (2.20)$$

где $N_v = 2\left(\frac{2\pi kT m_p^*}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$ – эффективная плотность состояний в валентной зоне.

В областях низкой и высокой температуры изменение концентрации носителей происходит по экспоненциальному закону, а подвижности – по закону $T^{\frac{1}{2}}$, то есть концентрация зависит от температуры значительно сильнее, чем подвижность. Поэтому электропроводность будет также практически зависеть от температуры, как и концентрация. Удельные проводимости легированного и собственного полупроводника можно выразить в виде:

$$\sigma_n = \sigma_{n0} e^{-\frac{E_g}{2kT}}, \quad (2.21)$$

$$\sigma_i = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}, \quad (2.22)$$

где σ_{n0} и σ_0 – коэффициенты, вобравшие в себя все предэкспоненциальные, слабо зависящие от температуры множители.

Зависимость σ_i от T удобно представлять в полулогарифмических координатах:

$$\ln \sigma_i = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2kT} \quad (2.23)$$

В области 2 вся примесь уже ионизирована, и зависимость $\sigma(T)$ определяется зависимостью $\mu(T)$. Если основным механизмом рассеяния носителей в области 2 является рассеяние на тепловых колебаниях, то $\mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$ и σ на этом участке будет падать (участок 1 на рис. 2.2), а если преобладает рассеяние на ионах примеси, то $\mu \sim T^{-2}$ и σ возрастает (участок 2)

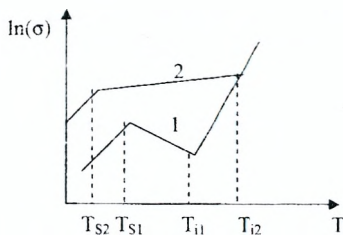
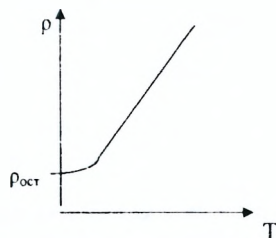


Рисунок 2.2 – Температурная зависимость проводимости легированного полупроводника

В металлах концентрация носителей заряда от температуры практически не зависит, поэтому температурная зависимость проводимости σ , а следовательно, и удельного сопротивления $\rho = \frac{1}{\sigma}$, определяется зависимостью $\mu(T)$. Общая зависимость представлена на рис 2.3.

Рисунок 2.3 – Зависимость удельного сопротивления металла от температуры



При $T \approx 0K$ электропроводность образца $\sigma = \text{const} = \rho_{\text{ост}}$, которое представляет собой остаточное сопротивление, обусловленное наличием структурных дефектов. При несколько более высоких температурах $\sigma \sim T^{-5}$, а $\rho \sim T^5$. В дальнейшем удельное сопротивление металлов ρ растёт пропорционально T . Тогда изменение удельного сопротивления, может быть выражено соотношением:

$$\rho_2 = \rho_1(1 + \alpha_{\rho 1}(T_2 - T_1)), \quad (2.24)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления металлов при T_1 и T_2 , причём $T_2 > T_1$. $\alpha_{\rho 1}$ – температурный коэффициент удельного сопротивления, отнесённый к началу диапазона температур:

$$\alpha = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1(T_2 - T_1)} \quad (2.25)$$

Соотношение для сопротивления активного металлического проводника будет иметь вид:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha_R(T_2 - T_1)] \quad (2.26)$$

Закон Ома $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ выполняется в полупроводниках только для электрических полей сравнительно слабых по величине. Т.к. $\sigma = e \cdot n \cdot \mu$, то j будет прямо пропорционально ϵ до тех пор, пока n и μ не зависят от ϵ . Поскольку $V_D = \mu_n \cdot \epsilon$ и $\mu = \frac{e \cdot \lambda}{m_n^* \cdot V}$, где V – полная скорость электрона $\vec{V} = |\vec{V}_{\text{теп}} + \vec{V}_D|$, то подвижность μ будет зависеть от величины напряжённости поля ϵ с того момента, когда скорость V

перестанет быть постоянной, т.е. когда добавкой V_d , приобретаемой во внешнем поле, нельзя пренебречь по сравнению с тепловой скоростью $V_{кв}$. Таким образом, критерием слабого поля является условие:

$$V_d \ll V_{кв} \quad (*)$$

Т.к. энергия электрона, накапливаемая в электрическом поле, равна:

$$E_d = \frac{m_n^* \cdot V_d^2}{2} = q \cdot \mathcal{E} \cdot \lambda, \quad (2.27)$$

$$E_T = \frac{m_n^* \cdot V_T^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (2.28)$$

То из (*) критерий слабого поля запишется в виде:

$$q \cdot \mathcal{E} \cdot \lambda \ll 3/2 \cdot k \cdot T \quad (2.29)$$

Критическое поле $\mathcal{E}_{кр}$, при котором начинают проявляться эффекты сильного поля, будет определяться равенством этих двух составляющих энергии электрона, т.е. когда: $V_d \sim V_{кв}$

Тогда
$$E_{кр} = \frac{3}{2} \frac{kT}{q \cdot \lambda} \quad (2.30)$$

Наличие в твёрдом теле электронного газа обуславливает не только перенос электрического заряда под действием поля $\vec{\mathcal{E}}$, приводящий к появлению электрического тока, но и перенос теплоты при наличии градиента температуры. Связь между электропроводностью твёрдых тел и теплопроводностью, закон Видемана – Франца – Лоренца:

$$\frac{K}{\sigma} = 3 \left(\frac{e}{k} \right)^2 = LT, \quad (2.31)$$

где K - теплопроводность, $(e/k)^2 \equiv L$ - число Лоренца.

Холловская разность потенциалов:

$$U_H = R_H I B d, \quad (2.32)$$

где R_H - постоянная Холла; B - индукция магнитного поля; I - сила тока в образце, d - ширина образца в направлении поля.

Постоянная Холла для полупроводников, обладающих носителями заряда одного вида (n или p):

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{en} = \frac{\mu}{\sigma} \quad (2.33)$$

Постоянная Холла для проводников:

$$R_H = -\frac{1}{en} \quad (2.34)$$

Угол Холла φ определяется из соотношения:

$$\operatorname{tg} \varphi = -R \sigma B \quad (2.35)$$

2.2. Примеры решения задач

1. Рассчитайте величину коэффициента Холла для серебра по известным значениям плотности и молярной массы.

Решение

Коэффициент Холла для серебра находится из формулы

$$R_H = -\frac{1}{en}$$

Каждый атом серебра отдает в зону проводимости один электрон, поэтому концентрация электронов равна числу атомов n в единице объема

$$n = \frac{N_A \rho}{M},$$

здесь N_A – число Авогадро, ρ – плотность, M – молярная масса.

Тогда:

$$R_H = -\frac{1}{e} \frac{M}{N_A \rho}$$

$$R_H = -\frac{0,108}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 10,5 \cdot 10^3} = -1,06 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл.}$$

2. Какова концентрация носителей заряда собственного германия при температуре 27°C , если его удельное сопротивление $0,47\text{ Ом}\cdot\text{м}$, подвижность электронов $\mu_n = 0,38 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и дырок $\mu_p = 0,18 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Решение

Электропроводность обратно пропорциональна удельному сопротивлению, тогда

$$\sigma = \frac{1}{\rho_e} = en(\mu_n + \mu_p) \Rightarrow n = \frac{1}{\rho_e e(\mu_n + \mu_p)}$$

Произведя вычисления, получим:

$$n = 2,37 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$$

3. Градиент потенциала в образце кремния собственной проводимости составляет 400 В/м . Подвижности электронов и дырок соответственно равны:

$\mu_n = 0,12 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, и $\mu_p = 0,025 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Определить для этого образца:

а) скорости дрейфа электронов и дырок;

б) удельное сопротивление кремния собственной проводимости, полагая, что концентрация собственных носителей заряда $2,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

в) полный дрейфовый ток, если площадь поперечного сечения образца равна $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Решение

1. Скорость дрейфа электронов и дырок вычисляем по формулам:

$$V_{\text{дн}} = \mu_n \cdot \epsilon = 0,12 \cdot 400 = 48 \text{ м/с};$$

$$V_{\text{др}} = \mu_p \cdot \epsilon = V_{\text{др}} = 0,025 \cdot 400 = 10 \text{ м/с};$$

2. Удельное сопротивление ~~кремния собственной проводимости:~~

$$\rho_i = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{n_i \cdot e(\mu_n + \mu_p)} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{16} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (0,12 + 0,025)} = 1,73 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

3. Полный дрейфовый ток:

$$I = n_e \cdot e(V_{jn} - V_{jp})S = 2.5 \cdot 10^{16} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} (48 + 10) \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 0.69 \text{ мА}$$

4. Вычислить длину свободного пробега электронов в меди при $T = 300\text{К}$, если её удельное сопротивление при этой температуре равно $0,017 \text{ мОм}\cdot\text{м}$.

Решение

Удельное сопротивление образца связано с его удельной проводимостью соотношением $\rho = \frac{1}{\sigma}$.

Для металла:

$$\sigma = \frac{n \cdot e^2}{m_n^*} \cdot \frac{\lambda_F}{V_F}$$

Поскольку V_F можно определить из формулы $\frac{mV_F^2}{2} = E_F$,

$$\text{то } \sigma = \frac{n \cdot e^2 \lambda_F}{\sqrt{2m_n^* E_F}}$$

Энергия Ферми выражается через концентрацию в соответствии с выражением $n = \frac{8}{3}\pi \left(\frac{2E_F m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$. Тогда для удельного сопротивления имеем

$$\rho = \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{h \cdot n^{\frac{1}{3}}}{e^2 \cdot n \cdot \lambda} = \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{h}{e^2 n^{\frac{2}{3}} \lambda}$$

Концентрация свободных электронов в меди: $n = d \cdot \frac{N_A}{M}$,

где d – плотность меди, N_A – число Авогадро, M – молярная масса меди.

$$n = \frac{8920 \cdot 6.02 \cdot 10^{23}}{63.54 \cdot 10^{-3}} = 8.45 \cdot 10^{28} \cdot \text{м}^{-3}$$

Следовательно, длина свободного пробега электронов Ферми в меди

$$\lambda_F = \left(\frac{3}{8 \cdot 3.14} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{6.62 \cdot 10^{-34}}{(1.6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot (8.45 \cdot 10^{28})^{\frac{2}{3}} \cdot 0.017 \cdot 10^{-6}} = 3.89 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$

2.3. Задачи для самостоятельного решения

1. В медном проводнике с площадью поперечного сечения $0,2 \text{ см}^2$ идёт ток 1А . Какова средняя скорость дрейфа электронов?

Ответ: $0,37 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$.

2. Чему равна подвижность электронов натрия при 0°C , если электропроводность его $0,23 \cdot 10^8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а концентрация носителей заряда $2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$?

Ответ: $0,56 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

3. Отношение электропроводностей серебра и меди при одинаковой температуре равно $6,12/5,76$. Вычислить отношение подвижностей электронов в этих металлах, считая, что на каждый атом приходится по одному свободному электрону.

Ответ: $1,5$.

4. Электропроводность меди $6 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Определить время релаксации электрона, считая, что каждый атом меди в твёрдом состоянии отдаёт в зону проводимости один валентный электрон.

Ответ: $0,25 \cdot 10^{-13} \text{ с}$.

5. Вычислить среднюю длину свободного пробега электронов проводимости натрия при комнатной температуре. Электропроводность натрия $0,23 \cdot 10^8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Ответ: $4,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$.

6. Электропроводность меди $6 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Определить теплопроводность меди при указанной температуре, если число Лоренца $2,23 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{Ом} \cdot \text{К}^{-2}$.

Ответ: $365 \text{ Дж} / \text{К} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$.

7. Вычислите число Лоренца для калия, если его удельное электросопротивление $\rho_e = 6,23 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а теплопроводность $\kappa = 97,1 \text{ Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$ при 300 К .

Ответ: $2,21 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{Ом} / \text{К}^2$.

8. Исходя из закона Видемана-Франца, рассчитайте теплопроводность кадмия при температуре $T = 293 \text{ К}$, если его удельное электросопротивление $\rho_e = 7,57 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а число Лоренца $L = 2,42 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{Ом} / \text{К}^2$.

Ответ: $94 \text{ Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$.

9. Удельное сопротивление серебряного провода при комнатной температуре $1,54 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Вычислить среднюю скорость дрейфа электронов при напряжённости электрического поля вдоль провода $1 \text{ В} / \text{см}$, полагая, что в 1 м^3 серебра находится $5,8 \cdot 10^{28}$ электронов проводимости. Определить подвижность и время релаксации электронов.

Ответ: $6,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$; $0,39 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

10. Вычислить скорость дрейфа электрона меди при наложении электрического поля напряжённостью $100 \text{ В} / \text{м}$. Подсчитать отношение скорости дрейфа к скорости Ферми, если уровень Ферми для меди равен 7 эВ .

Ответ: $1,56 \cdot 10^{-6} \text{ м} / \text{с}$; $0,19 \cdot 10^6$.

11. Концентрация свободных электронов железа $8,5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ и его удельное сопротивление при температуре 20°C равно $9,71 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Найти при той же температуре время релаксации, среднюю длину свободного пробега электронов и их подвижность.

Ответ: $4,3 \cdot 10^{-15} \text{ с}$; $6,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}$; $7,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$.

12. Удельная проводимость металла $10 \text{ МОм}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Вычислить среднюю длину свободного пробега электрона в металле, если концентрация свободных электронов 10^{23} м^{-3} . Среднюю скорость хаотического движения электронов принять равной $10 \text{ Мм} / \text{с}$.

Ответ: 71 нм .

13. В медном проводнике площадью $0,4 \text{ см}^2$ сила тока $1,5 \text{ А}$. Найти среднюю скорость дрейфа электронов, если концентрация носителей заряда $8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Ответ: $0,3 \text{ м} / \text{с}$

14. В серебре объёмом 1 м^3 находится приблизительно $5,8 \cdot 10^{28}$ электронов проводимости. Найти среднюю скорость дрейфа электронов при наложении напряжённости электрического поля $10 \text{ В} / \text{см}$ вдоль проводника.

Ответ: $0,68 \text{ м} / \text{с}$.

15. Считая, что каждый атом меди в твёрдом состоянии отдаёт в зону проводимости один валентный электрон, найти время релаксации электрона. Удельное сопротивление меди $17,2 \text{ нОм}\cdot\text{м}$.

Ответ: $0,26 \cdot 10^{-13} \text{ с}$.

16. Концентрация свободных электронов натрия $2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Определить температуру Ферми и скорость электронов на уровне Ферми.

Ответ: $3,5 \cdot 10^4 \text{ К}$; 10^6 м/с .

17. Вычислить постоянную Холла для меди. Молярная масса меди $63,5 \text{ кг/моль}$, плотность её 8890 кг/м^3 .

Ответ: $0,74 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{кг}$.

18. Вычислить концентрацию и подвижность электронов натрия, если для него коэффициент Холла и удельное электросопротивление равны:

$R_H = -2,35 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$ и $\rho_e = 4,35 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ соответственно.

Ответ: $2,7 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$; $5,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

19. Через золотую фольгу толщиной $d = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, помещенную в магнитное поле индукцией $B = 1,2 \text{ Тл}$, пропускается ток $I = 1,5 \text{ А}$. Вычислите коэффициент Холла золота, если измеренная э.д.с. Холла $U_H = 1,5 \text{ мкВ}$. Сравните экспериментальное значение коэффициента Холла R_s с расчетным R_p в предположении, что на один атом приходится один валентный электрон. Плотность золота $\rho = 19,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, молярная масса $M = 0,197 \text{ кг/моль}$.

Ответ: $R_s = 0,83 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$, $R_p = 1,06 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$.

20. Вычислить удельное сопротивление германиевого полупроводника p-типа при плотности дырок $3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Сравнить с сопротивлением полупроводника n-типа при той же концентрации электронов.

Ответ: $0,115 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $0,054 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

21. Удельное сопротивление собственного германия при 27°C составляет $0,47 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Полагая, что подвижности электронов и дырок соответственно равны $0,38$ и $0,18 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, вычислить плотность носителей тока при 27°C .

Ответ: $2,3 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-3}$.

22. Определить электропроводность германия, который содержит индий в концентрации $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и сурьму в концентрации 10^{21} м^{-3} .

Ответ: $636,8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

23. Вычислить скорость дрейфа электронов и дырок в германии при комнатной температуре в поле напряжённостью 1000 В/м .

Ответ: 380 м/с ; 180 м/с .

24. Образец из полупроводника прямоугольной формы размерами $0,2 \times 0,2 \times 0,05 \text{ см}$ имеет 10^{21} свободных зарядов в 1 м^3 при 20°C . К двум противоположным узким граням приложено напряжение 20 В . Вычислить величину тока, полагая подвижность носителей зарядов равной $0,03 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Ответ: $4,8 \cdot 10^{-2} \text{ А}$.

25. Образец германия n-типа толщиной 1 мм с концентрацией электронов 10^{20} м^{-3} помещён в магнитное поле с индукцией $0,1 \text{ Тл}$. Определить величину ЭДС Холла при силе тока 1 А , протекающего через образец.

Ответ: $6 \cdot 10^{-3} \text{ В}$.

26. Удельная проводимость и коэффициент Холла индия соответственно равны: $4 \cdot 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и $10^{-2} \text{ м}^3/\text{Кл}$. Считая, что проводимость осуществляется зарядами одного знака, определить их концентрацию и подвижность.

Ответ: $4 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

27. Удельное сопротивление монокристалла кремния р-типа при комнатной температуре (300К) составляет $9 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Чему должен равняться коэффициент Холла, если подвижность дырок $0,04 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$?

Ответ: $36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Кл}$.

28. Коэффициент Холла и удельное сопротивление полупроводника соответственно равны $-3,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$ и $8,93 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Для определения эффекта Холла к образцу приложено магнитное поле с магнитной индукцией $B = 0,5 \text{ Тл}$. Найти угол Холла.

Ответ: $1^\circ 12'$.

29. Вычислить коэффициент Холла для кристаллов германия с концентрацией индия и сурьмы соответственно 10^{23} и 10^{24} м^{-3} .

Ответ: $-0,55 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{Кл}$.

30. Вычислить концентрации собственных и примесных носителей тока в германии, содержащем $5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ атомов мышьяка, при комнатной температуре.

Ответ: $2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

31. Сколько электронов и дырок образуется в кристалле при поглощении им 10^4 Дж световой энергии с длиной волны 2000 А ? Какой заряд потечёт по внешней цепи кристалла, если приложенное к нему электрическое поле достаточно сильно, чтобы доставить все свободные носители заряда к электродам? Квантовый выход равен 1.

Ответ: $0,48 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$; $0,3 \cdot 10^{15}$.

32. Определить концентрацию свободных электронов в металле при температуре 0К . Энергию Ферми принять равной 1 эВ .

Ответ: $4,57 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$.

33. Определить отношение концентраций свободных электронов при $T=0$ в литии и цезии, если известно, что уровни Ферми в этих металлах соответственно равны $4,72 \text{ эВ}$, $1,53 \text{ эВ}$.

Ответ: $5,41$.

34. Определить уровень Ферми в собственном полупроводнике, если энергия активации равна $0,1 \text{ эВ}$. За нулевой уровень отсчёта кинетической энергии электронов принять низший уровень зоны проводимости.

Ответ: $-0,05 \text{ эВ}$.

35. Собственный полупроводник (германий) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление $0,48 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Определить концентрацию носителей заряда, если подвижность электронов и дырок соответственно равны $0,36$ и $0,16 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Ответ: $2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

36. Удельная проводимость кремния с примесями равна 112 Ом/м. Определить подвижность дырок и их концентрацию, если постоянная Холла равна $3,66 \cdot 10^{-4}$ м³/Кл. Принять, что проводник обладает только дырочной проводимостью.

Ответ: $3,5 \cdot 10^{-2}$ м²/В·с; $2 \cdot 10^{22}$ м⁻³.

37. Полупроводник в виде тонкой пластины шириной 1 см и длиной 10 см помещён в однородное магнитное поле с индукцией 0,2 Тл. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости пластины. К концам пластины (по направлению длины) приложено постоянное напряжение 300 В. Определить холловскую разность потенциалов на гранях пластины, если коэффициент Холла $0,1$ м³/Кл, удельное сопротивление 0,5 Ом·м.

Ответ: 1,2 В.

38. Тонкая пластина из кремния шириной 2 см помещена перпендикулярно линиям магнитного поля ($B = 0,5$ Тл). При плотности тока 2 мкА/мм², направленного вдоль пластины, холловская разность потенциалов оказалась равной 2,8 В. Определить концентрацию носителей тока.

Ответ: $5,25 \cdot 10^{16}$ м⁻³.

39. Сравнить электропроводность чистого германия при -40°C и $+100^\circ\text{C}$. Энергия активации для германия 0,72 эВ.

Ответ: $\sigma_1/\sigma_2 = 0,66 \cdot 10^6$.

40. Собственная электропроводность германия при 27°C $2,13$ Ом⁻¹·м⁻¹, подвижность электронов и дырок соответственно 0,38 и 0,18 м²/В·с. Вычислить плотность тока и постоянную Холла.

Ответ: $2,4 \cdot 10^{19}$ А/м²; $0,094$ м³/Кл.

41. Найти удельное сопротивление германиевого полупроводника р-типа при плотности дырок $3 \cdot 10^{20}$ м⁻³ и сравнить его с сопротивлением полупроводника п-типа при той же концентрации электронов. Подвижность дырок в германии 0,18 м²/В·с, электронов 0,38 м²/В·с.

Ответ: 0,12 Ом·м; 0,05 Ом·м.

42. Ширина запрещённой зоны алмаза 6 эВ. Найти длинноволновую границу поглощения света алмазом.

Ответ: $2,07 \cdot 10^{-7}$ м.

43. Во сколько раз изменится электропроводность чистого германия при повышении температуры от -23°C до $+27^\circ\text{C}$? Ширина запрещённой зоны для германия равна 0,74 эВ.

Ответ: в 17,5 раза.

44. Удельное сопротивление германия при 27°C 0,47 Ом·м. Найти концентрацию носителей заряда в германии. Принять для германия подвижность электронов и дырок 0,38 м²/(В·с) и 0,18 м²/(В·с).

Ответ: $2,37 \cdot 10^{19}$ м⁻³.

45. Во сколько раз концентрация носителей тока в чистом сплаве InSb при температуре 400 К больше, чем при 300 К? Ширина запрещённой зоны для InSb 0,18 эВ.

Ответ: в 3,67 раза.

46. Найти электропроводность германия, если известно, что в нём содержится индия в концентрации 10^{22} м^{-3} и сурьмы в концентрации 10^{21} м^{-3} . Принять подвижность в германии электронов $\mu_n = 0,38 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и дырок $\mu_p = 0,18 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Ответ: $350 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$.

47. Определить проводимость кремния при 300К, легированного элементом 3 группы, причём на каждые 10 атомов кремния приходится один примесный атом. Концентрация атомов в решётке кремния $4,5 \cdot 10^{28} \text{ атомов/м}^3$. Подвижности электронов и дырок соответственно равны $\mu_n = 0,4 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $\mu_p = 0,2 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Собственная концентрация носителей $2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

2.4. Теоретические вопросы

1. Понятие удельной электропроводности. Удельная электропроводность металлов и диэлектриков.

2. Какую скорость называют дрейфовой? Связь дрейфовой скорости с напряжённостью внешнего поля, с плотностью тока.

3. Дать определение физического смысла подвижности носителей заряда. Какие факторы определяют величину подвижности? Почему обычно подвижность электронов больше, чем дырок?

4. Написать выражение, связывающее удельную проводимость со средней скоростью хаотического движения.

5. Закон Видемана – Франца – Лоренца. Связь электропроводности с теплопроводностью.

6. Зависимость удельной электропроводности от температуры.

7. Гальваномагнитный эффект Холла. Постоянная Холла. Как, измерив постоянную Холла можно определить тип носителей заряда в полу-проводнике.

8. Сравнить по величине скорости хаотического движения носителей зарядов в металлах и полупроводниках? Объяснить различие.

9. Как зависит от температуры концентрация носителей заряда в легированных полупроводниках? Привести зависимости $\ln(n)$ от T и объяснить.

10. Чем определяется собственная концентрация носителей n_i в полупроводниках?

11. Оценить изменение концентрации носителей в металлах с ростом температуры.

12. Почему при расчётах электропроводности проводников учитывается полная концентрация носителей заряда, если реально в проводимости участвуют только ферми – электроны?

13. Дать сравнительный анализ механизмов увеличения концентрации носителей заряда в полупроводниках, находящихся в сильных полях.

14. Как зависит величина времени свободного пробега электронов от напряжённости внешнего поля и температуры в случаях: а) полупроводника; б) металла?
15. Где больше подвижность носителей заряда в металлах или полупроводниках? Почему?
16. В каких случаях электропроводность полупроводников увеличивается с ростом температуры, а в каких уменьшается?
17. Объяснить зависимость $\mu(T)$ для легированного полупроводника.
18. Привести график и дать объяснения зависимости проводимости легированного полупроводника от температуры.
19. Дать анализ температурной зависимости удельного сопротивления металлов. Привести график зависимости.
20. Какие основные факторы обуславливают нарушение закона Ома в полупроводниках в сильных электрических полях?
21. Представить зависимость подвижности носителей заряда от температуры. Дать объяснения.
22. Как, используя температурную зависимость электропроводности полупроводника, определить величину его ширины запрещённой зоны?
23. Как можно экспериментально определить энергию активации примеси в полупроводнике?
24. Может ли высокое, близкое к собственному, удельное сопротивление полупроводника свидетельствовать о высокой степени его чистоты?
25. Почему рассеяние на ионах примеси относительно слабо сказывается на подвижности носителей заряда при высоких температурах?
26. Записать и дать обоснование критерию слабого поля.
27. Каким образом влияет величина напряжённости электрического поля на подвижность носителей заряда в области сильных полей?
28. Назвать основные эффекты, наблюдаемые в полупроводниках в сильных электрических полях.
29. Описать равновесное и неравновесное состояние электронного газа в полупроводнике и металле.
30. Как влияет увеличение температуры на энергию теплового движения носителей заряда в полупроводниках и металлах?

3. ОСНОВЫ СТАТИСТИКИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МЕТАЛЛАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ.

3.1. Краткие теоретические сведения

Количество энергетических уровней $N_0^E(E)$, лежащих в интервале от 0 до E , в кристалле объемом V определяется выражением

$$N_0^E(E) = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{2E m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot V \quad (3.1)$$

В соответствии с принципом Паули на каждом энергетическом уровне может находиться по два электрона с разными ориентациями спина. Поэтому число квантовых состояний с энергиями от 0 до E будет в два раза выше:

$$N_0^E(E) = \frac{8}{3} \pi \left(\frac{2E m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot V \quad (3.2)$$

Для кристалла единичного объема $V = 1$.

Обозначим через dN число разрешенных состояний, приходящихся на единицу объема и лежащих в пределах от E до $E + dE$. Тогда число состояний, приходящихся на единичный интервал энергии dE , есть плотность энергетических состояний:

$$N(E) = \frac{dN(E)}{dE} \quad (3.3)$$

С учетом (3.2) плотность состояний будет равна:

$$\frac{dN_0^E(E)}{dE} = N(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot E^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

Таким образом, плотность энергетических состояний (уровней) $N(E) \sim E^{1/2}$, т.е. увеличивается с ростом E и возрастает с увеличением m^* .

Распределение электронов в металле

Согласно зонной теории, последняя разрешенная зона металла заполнена электронами не полностью. При $T = 0\text{K}$ электроны последовательно заполняют энергетические уровни с низшего до уровня Ферми. *Уровень Ферми* отделяет занятые состояния от свободных, т.е. E_F - это максимальная энергия, которой могут обладать электроны при $T = 0\text{K}$.

Выражение (3.2) описывает число разрешенных квантовых состояний для электронов, имеющих энергии от 0 до E . Следовательно, число в металле можно определить, используя (3.2):

$$n = \frac{8}{3} \pi \left(\frac{2E_F m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.5)$$

Отсюда

$$E_F = \frac{h^2}{2m_n^*} \left(\frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3} \quad (3.6)$$

Подставляя в (3.6) константы и принимая для металлов $n = 10^{28} \text{ м}^{-3}$, получаем оценку для $E_F \approx 5 \text{ эВ}$. Это очень большая величина. Обычные молекулы газа имели бы такую энергию при $T \approx 40000^\circ\text{С}$. Максимальная скорость ферми – электронов

$$V_F = \sqrt{\frac{2E_F}{m_n^*}} \approx 10^6 \text{ м/с} \quad (3.7)$$

и практически не зависит от температуры, так как, например, при 300К энергия тепловых колебаний решетки $3/2kT$ оказывается порядка 0.04 эВ, т.е. значительно меньше, чем E_F . При $T \neq 0\text{К}$ часть электронов под действием теплового возбуждения переходит на уровни, лежащие выше E_F . Средняя энергия теплового возбуждения одного электрона - порядка кТ. Для всех температур, меньших температуры плавления металла, величина кТ в сотни раз меньше E_F . Поэтому тепловому возбуждению подвергаются только электроны, находящиеся в узком слое уровней энергии толщиной порядка кТ, расположенном непосредственно под уровнем Ферми. Большая же часть электронов остается на своих местах, так как для них энергии теплового возбуждения недостаточно, чтобы перескочить на свободный уровень, лежащий выше уровня Ферми, а все уровни с близкими значениями энергии уже заняты другими электронами и их дополнительное заполнение запрещено принципом Паули. Оценим число термически возбужденных электронов (Δn). При $T = 0\text{К}$ в интервале значений энергии от 0 до E_F находится N электронов. При $T > 0\text{К}$ тепловому возбуждению подвергаются только электроны, лежащие в полосе кТ вблизи уровня Ферми E_F . Число электронов, приходящихся на полосу кТ, равно $kT/E_F \cdot N$

Считая, что возбуждению подвергается половина из них, получаем

$$\Delta n = \frac{kTN}{2E_F} \quad (3.8)$$

Подставляя константы и полагая, что $E_F \approx 5\text{эВ}$, а $kT = 0,025\text{эВ}$ (при $T=300^\circ\text{С}$), получаем, что $\Delta n \approx 0,01 \cdot N$.

По тем же причинам участвовать в электропроводности могут только электроны с энергией, близкой к уровню Ферми. Различные процессы рассеяния при токопереносе препятствуют переводу ферми-электронов на свободные энергетические уровни, расположенные значительно выше E_F , что не позволяет участвовать в электропереносе электронам с низших уровней, поэтому в случае металлов следует различать свободные электроны и электроны проводимости, число которых значительно меньше.

Таким образом, распределение электронов в металле при любой температуре мало отличается от распределения при температуре, равной нулю, т.е. концентрация носителей в металле от температуры практически не зависит.

Концентрация носителей заряда и положение уровня Ферми в полупроводниках

Число электронов в зоне проводимости с энергиями от E до $E+dE$ будет определяться произведением плотности уровней в зоне проводимости на вероятность их заполнения, т.е.

$$dn = N(E) \cdot f_{MB}(E, T) dE, \quad (3.9)$$

где $N(E)$ - плотность квантовых состояний, а $f_{MB}(E, T)$ - функция распределения Максвелла-Больцмана.

Тогда количество электронов в зоне проводимости будет равно:

$$n = \int_{E_1}^{E_2} N(E) \cdot f_{MB}(E, T) dE, \quad (3.10)$$

где E_1 и E_2 - границы зоны проводимости.

Обычно отсчет энергии электронов в полупроводнике производят от уровня $E_c = 0$. В качестве верхней границы зоны можно положить $E_2 = \infty$, так как число электронов, находящихся в зоне, резко уменьшается с увеличением их энергии. Тогда из (3.10) можно получить

$$n = 2 \left(\frac{2\pi k T m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) = N_c \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right), \quad (3.11)$$

где

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi k T m_n^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.12)$$

есть *эффективная плотность состояний в зоне проводимости*.

В случае акцепторного полупроводника число дырок в валентной зоне определяется аналогично, но при этом вероятность образования дырки в зоне равна $1 - f_{MB}(E, T)$, где $f_{MB}(E, T)$, – вероятность нахождения электрона на уровне E при температуре T . Интегрирование ведется в пределах от $-\infty$ до E_v . Тогда соответствующее выражение для дырок имеет вид

$$p = N_v \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right), \quad (3.13)$$

где

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi k T m_p^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (3.14)$$

есть *эффективная плотность состояний в валентной зоне*

Если отсчет энергии ведется от уровня E_c , то $E_v = -E_g$, где E_g - ширина запрещенной зоны полупроводника, и

$$p = N_v \cdot \exp\left(-\frac{E_F + E_g}{kT}\right) \quad (3.15)$$

Формулы (3.11) и (3.15) справедливы как для собственных, так и для примесных полупроводников. Однако значения E_F в этих случаях различны.

В собственном полупроводнике носители образуются при переходе электрона из валентной зоны в зону проводимости с образованием пары свободных носителей электрона и дырки. Концентрации электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне равны, т.е. $n = p = n_i$; - собственная концентрация носителей. Очевидно, что n_i определяется величиной ширины запрещенной зоны E_g данного полупроводника и его температурой T .

Перемножим (3.11) и (3.15):

$$n \cdot p = N_c \cdot N_v \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2 \quad (3.16)$$

Откуда для собственной концентрации получаем:

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (3.17)$$

Для заданных значений E_g и T произведение $n \cdot p = n_i^2 = \text{const}$.

Соотношение

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (3.18)$$

носит название *закона действующих масс*. В случае термодинамического равновесия он справедлив и для примесных полупроводников, устанавливая связь между концентрациями основных и неосновных носителей в легированном полупроводнике:

$$n_n \cdot p_n = n_i^2 \quad (3.19)$$

$$n_p \cdot p_p = n_i^2 \quad (3.20)$$

Разделив почленно (3.11) на (3.15), логарифмируя полученное выражение и учитывая, что $\ln(n/p) = 0$, можно получить выражение для определения уровня Ферми:

$$E_F = -\frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} kT \cdot \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right) \quad (3.21)$$

Таким образом, при $T = 0\text{K}$ уровень Ферми в собственном полупроводнике находится посередине запрещенной зоны, а с увеличением температуры он смещается к E_c , если $m_p^* > m_n^*$, или опускается к E_v , если $m_p^* < m_n^*$.

При увеличении температуры кристалла возрастает амплитуда тепловых колебаний атомов решетки, в результате чего усиливается перекрытие волновых функций их электронов. В свою очередь это вызывает увеличение ширины зоны проводимости и, валентной зоны и соответственное уменьшение ширины запрещенной зоны. Изменение E_g с ростом T описывается соотношением:

$$E_g(T) = E_g(0) - b \cdot T, \quad (3.22)$$

где $E_g(0)$ - ширина запрещенной зоны при $T = 0\text{K}$, b [эВ/К] - коэффициент изменения E_g .

В примесных полупроводниках носители заряда образуются за счёт ионизации примеси и из-за перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Если известен уровень Ферми E_F , то определить концентрацию носителей заряда можно, используя полученные ранее формулы (3.11) и (3.15). Однако положение уровня Ферми в этом случае требует определения.

Пусть имеется полупроводник n-типа с концентрацией доноров N_d . При низких температурах, когда энергия тепловых колебаний $E_T = 3/2kT$ значительно меньше, чем энергия активации атомов примеси E_d , примесные электроны находятся на донорном уровне и зона проводимости полностью свободна. При увеличении температуры кристалла тепловая энергия E_T , сообщаемая атомам примеси, возрастает, и электроны начинают переходить с примесного уровня в зону проводимости, т.е. происходит ионизация атомов донорной примеси. В случае акцепторного полупроводника процесс ионизации примеси ведет к образованию носителей заряда в валентной зоне - дырок. В обоих случаях рост концентрации носителей заряда с изменением температуры происходит по экспоненциальному закону:

$$n = (N_c N_d)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right), \quad (3.23)$$

$$p = (N_v N_a)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right), \quad (3.24)$$

при этом отсчет энергии примесного уровня ведется от края зоны.

Положение уровня Ферми при этом для донорного и акцепторного полупроводников определяется соответственно выражениями:

$$E_{Fn} = -\frac{E_d}{2} + \frac{kT}{2} \cdot \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right), \quad (3.25)$$

$$E_{Fp} = -\frac{E_a}{2} + \frac{kT}{2} \cdot \ln\left(\frac{N_v}{N_a}\right) \quad (3.26)$$

При температуре $T = T_s$, соответствующей условию $E_T = 3/2kT_s \approx E_d$, практически вся примесь будет ионизирована, и дальнейшее увеличение температуры кристалла вплоть до $T = T_i$, уже не будет влиять на концентрацию носителей - она будет оставаться постоянной и равной концентрации введенной примеси N_d или N_a . (рис.2.1 стр.15, участок 2). В соответствии с (3.11)

$$n = N_d = N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_F}{kT_s}\right) \quad (3.27)$$

Исходя из (3.27), при последующем увеличении температуры изменение $E_F(T)$ будет происходить линейно в соответствии с выражением:

$$E_F = kT \cdot \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (3.28)$$

При достаточно высоких температурах $T > T_i$ начнётся ионизация атомов самого кристалла: под действием возрастающей тепловой энергии валентные электроны приобретают способность к преодолению запрещённой зоны с образованием пары носителей – электрона в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Процесс увеличения концентрации собственных носителей заряда.

как следует из (3.17), зависит от температуры тоже экспоненциально (рис. 2.1., участок 3, стр.14). Когда концентрация собственных носителей заряда превысит концентрацию введенной в полупроводник примеси, т.е. при выполнении условия $p_i > N_d$ или $n_i > N_a$, проводимость в кристалле станет собственной, а уровень Ферми совпадает с E_F для собственного полупроводника.

Так как энергия активации примеси E_d (для акцепторов E_a) составляет около 0,01 эВ, а энергия тепловых колебаний атомов решётки E_T при 300К приблизительно равна 0,04 эВ, т.е. $E_d \ll E_T$, то в нормальных условиях вся примесь уже полностью ионизирована. Следовательно, концентрация носителей в примесном полупроводнике при 300К определяется концентрацией введенной примеси N_d или N_a .

Если в полупроводнике одновременно присутствуют как донорная, так и акцепторная примеси, то полупроводник называется компенсированным. Электроны донорной примеси, стремясь занять состояния с минимальной энергией, будут переходить на акцепторные уровни, ионизируя акцепторы. Тип проводимости при этом будет определяться разностью концентраций доноров и акцепторов. Если $N_d > N_a$, то образец n-типа, а если $N_d < N_a$, то p-типа. При равенстве концентраций доноров и акцепторов полупроводник называют полностью скомпенсированным. В этом случае проводимость в полупроводнике будет обусловлена собственными носителями заряда, однако из-за большого количества ионов примесей электропроводность такого полупроводника будет существенно ниже, чем собственного.

При нормальных условиях энергия, необходимая для образования носителей заряда, приобретает за счет тепловых колебаний атомов. Обмениваясь энергией при своем взаимодействии с решеткой в процессе движения, носители заряда находятся в тепловом равновесии с кристаллической решеткой. Поэтому их называют равновесными (стационарными) и обозначают n_0 , p_0 .

Появление в полупроводнике свободных носителей заряда может быть связано также с действием внешней энергии. Например, под действием света или ионизирующих частиц, в процессе инжекции и т.д.. В локальном объеме полупроводника возникают избыточные (по сравнению с равновесными) носители заряда Δn , а полная концентрация носителей в нем становится равной: $n = n_0 + \Delta n$. В момент генерации избыточные носители не находятся в тепловом равновесии с решеткой и их называют *неравновесными*.

После прекращения воздействия концентрация неравновесных носителей Δn вследствие процессов рекомбинации быстро убывает. Среднее время, которое проводит носитель заряда в свободном состоянии, называется временем жизни неравновесных носителей τ_n . Так как каждый избыточный носитель живет в среднем τ_n секунд, то за одну секунду успеет прорекомбинировать $\Delta n / \tau_n$ электронов, где Δn - избыточная концентрация в данный момент времени.

Тогда скорость рекомбинации неравновесных электронов

$$R_n = -\frac{d\Delta n}{dt} = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (3.29)$$

Откуда для $\Delta n(t)$ получаем

$$\Delta n(t) = \Delta n \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right), \quad (3.30)$$

где Δn_0 - концентрация избыточных электронов в момент выключения внешнего воздействия ($t = 0$).

Образование неравновесных носителей заряда в какой-либо области полупроводника ведёт к установлению градиента концентрации носителей заряда в кристалле - для одномерного случая dn/dx . В результате в объеме полупроводника наблюдается процесс диффузии носителей заряда, стремящийся выровнять разность концентрации. *Диффузией* называют процесс перемещения носителей заряда в направлении убывания их концентрации за счёт собственного теплового хаотического движения. Плотность диффузионного тока $j_{n \text{ диф}}$ определяется законом Фика:

$$j_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (3.31)$$

Если избыточные носители – электроны. Если же носители – дырки, то

$$j_p = -qD_p \frac{dp}{dx}, \quad (3.32)$$

где D_n и D_p – коэффициенты диффузии.

При одинаковом направлении градиента концентрации из-за различия в знаках заряда диффузионные токи текут в противоположных направлениях.

Коэффициенты диффузии D_n и D_p [$\text{м}^2/\text{с}$], так же как и подвижности носителей заряда μ_n , μ_p определяются процессами рассеяния. Связь между соответствующими коэффициентами устанавливают соотношения Эйнштейна:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad (3.33)$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad (3.34)$$

3.2. Примеры решения задач

1. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при $T = 300\text{К}$, если ширина запрещённой зоны $1,12 \text{ эВ}$, а эффективные массы электронов и дырок соответственно составляют $m_n^* = 1.05m_0$; $m_p^* = 0.56m_0$, где m_0 – масса свободного электрона.

Решение

Концентрация собственных носителей заряда определяется по формуле

$$n = n_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

Эффективная плотность состояний для электронов в зоне проводимости

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi k T m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} = \frac{2(2 \cdot 3.14 \cdot 1.05 \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{3/2}}{(6.62 \cdot 10^{-34})^3} = 2.69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

Эффективная плотность состояний для дырок в валентной зоне

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi k T m_p^*}{h^2} \right)^{3/2} = \frac{2(2 \cdot 3.14 \cdot 0.56 \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{3/2}}{(6.62 \cdot 10^{-34})^3} = 1.05 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

Отсюда следует, что собственная концентрация носителей заряда составит

$$n_i = 10^{25} \cdot \sqrt{2.69 \cdot 1.05} \exp\left(-\frac{1.12}{2 \cdot 8.625 \cdot 10^5 \cdot 300}\right) = 7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

2. Найти положение уровня Ферми в собственном германии при 300К, если известно, что ширина запрещённой зоны $E_g = 0.665$ эВ. а эффективные массы для электронов и дырок соответственно составляют: $m_n^* = 0.55m_0$, $m_p^* = 0.388m_0$

Решение

Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике определяется выражением:

$$E_F = -\frac{E_g}{2} + \frac{3}{4}kT \cdot \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)$$

Таким образом,

$$E_F = -\frac{0.665}{2} + \frac{3}{4} \cdot 8.625 \cdot 10^{-5} \cdot 300 \ln\left(\frac{6.04 \cdot 10^{24}}{1.02 \cdot 10^{25}}\right) = 0.326 \text{ эВ}$$

3.3. Задачи для самостоятельного решения

1. Определить положение уровня Ферми при 300К в кристалле германия, легированного мышьяком до концентрации 10^{23} м^{-3} .
2. Вычислить энергию Ферми, концентрацию носителей заряда и собственную проводимость германия при 300К, если эффективные массы электронов и дырок соответственно равны: $m_n^* = 0.12m_0$, $m_p^* = 0.2m_0$. Ширина запрещённой зоны 0,72 эВ, а подвижности $\mu_n = 0.39 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; $\mu_p = 0.19 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$;
3. Кристалл арсенида индия легирован серой так, что избыточная концентрация доноров $N_d - N_a = 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Можно ли считать, что при температуре 300К электрические параметры этого полупроводника близки параметрам собственного арсенида индия, если эффективные массы электронов $m_n^* = 0.023m_0$, дырок $m_p^* = 0.43m_0$? Ширина запрещённой зоны (эВ) InAs изменяется по закону $0,462 - 3,5 \cdot 10^{-4}T$.
4. Определить, как изменится концентрация дырок в германии, содержащем мелкие доноры в концентрации $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, при его нагревании от 300К до 400К. При расчёте использовать данные предыдущей задачи.
5. Вычислить положение уровня Ферми при $T = 300\text{К}$ в кристаллах германия, содержащих $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ атомов мышьяка и 10^{22} м^{-3} атомов бора.
6. Определите положение уровня Ферми в германии n-типа при $T = 300\text{К}$, если на $1 \cdot 10^6$ атомов германия приходится 1 атом примеси. Концентрация атомов в германии $4,4 \cdot 10^{28} \text{ атомов/м}^3$. Ширина запрещённой зоны 0,72 эВ. Донорный примесный уровень расположен на 0,01 эВ ниже дна зоны проводимости, а $m_n^* = 1.0005m_0$.
7. В собственном германии ширина запрещённой зоны при 300К равна 0,665 эВ. Насколько надо повысить температуру, чтобы число электронов в зоне проводимости увеличилось в 2 раза?
8. Определить положение уровня Ферми в кристалле арсенида галлия, легированного цинком до концентрации 10^{23} м^{-3} , при температуре а) 300К; б) 400К. Считать, что при комнатной температуре все атомы ионизированы.
9. Время жизни носителей заряда в полупроводнике n-типа со шлифованной поверхностью $78 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. У образца, поверхность которого протравлена кислотой, — $340 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Найти диффузионную длину электрона при 300К в обоих образцах, если подвижность $\mu_n = 0.36 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$

10. В полупроводниковом кристалле образовалась избыточная концентрация носителей заряда 10^{20} м^{-3} . Начальная скорость уменьшения концентрации $5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Определить время жизни неравновесных носителей заряда и значение избыточной концентрации носителей через 2 мс после прекращения внешнего возбуждения.
11. Определить время жизни τ электронно-дырочных пар, если в момент времени $t_1 = 10^{-4} \text{ с}$ после выключения генерации концентрация неравновесных носителей оказалась в 10 раз больше, чем в момент времени $t_2 = 10^{-3} \text{ с}$.
12. Определить диффузионную длину дырок, если концентрация неравновесных носителей на расстоянии $x_1 = 2 \text{ мм}$ от точки генерации равна $\Delta p_1 = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а на расстоянии $x_2 = 4,3 \text{ мм}$ от точки генерации равна $\Delta p_2 = 0^{19} \text{ м}^{-3}$.
13. Вычислить энергию Ферми, концентрацию носителей заряда и собственную проводимость германия при 300К, если $m_n^* = 1.12m_0$; $m_p^* = 0.2m_0$, $E_g = 0,75 \text{ эВ}$; $\mu_n = 0.39 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\mu_p = 0.19 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.
14. Оценить долю электронов в меди, которые при её нагревании до 100°C выйдут за пределы уровня Ферми, $E_F = 7 \text{ эВ}$.
15. Определить время жизни τ электронно-дырочных пар, если в момент времени $t_1 = 10^{-5} \text{ с}$ после выключения внешнего источника неравновесная концентрация носителей оказалась в 100 раз больше, чем в момент времени $t_2 = 10^{-3} \text{ с}$.
16. Концентрация доноров в полупроводнике равна 10^{22} м^{-3} . При некоторой температуре уровень Ферми совпадает с уровнем примеси. Какова концентрация электронов проводимости в полупроводнике при этой температуре?
17. Найти время жизни неравновесных носителей заряда τ в полупроводнике, если их стационарная концентрация при воздействии источника возбуждения составляет 10^{20} м^{-3} , а начальная скорость уменьшения этой концентрации при отключении источника возбуждения равна $7,1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Определить избыточную концентрацию через $t = 2 \text{ мс}$ после отключения источника возбуждения.
18. В некоторой точке однородного электронного полупроводника световым зондом генерируются пары носителей. Определить диффузионную длину электронов, если концентрация неравновесных носителей на расстоянии $x_1 = 4 \text{ мм}$ от зонда равна $p_1 = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, а на расстоянии $x_2 = 6,3 \text{ мм}$ $p_2 = 10^{20} \text{ м}^{-3}$.
19. На одной стороне образца германия n-типа имеется инжектирующий контакт. При некотором напряжении смещения концентрация дырок у контакта увеличивается до 10^{20} м^{-3} . Удельное сопротивление образца $\rho = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, время жизни носителей $\tau = 10^{-4} \text{ с}$, подвижности электронов и дырок $\mu_n = 0.36 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\mu_p = 0.17 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и концентрация собственных носителей $1,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. вычислить а) отношение концентрации основных и неосновных носителей тока; б) диффузионную длину для дырок; в) плотность дырочного тока.
20. Определить минимальную длину волны де Бройля для свободных электронов при $T \approx 0\text{К}$ в золоте, имеющем решётку ГЦК ($a = 4,08 \text{ \AA}$), если на каждый атом кристалла приходится 1 свободный электрон.
21. Кристалл цезия имеет энергию Ферми, равную 1,5 эВ. Найти отношение дебройлевской длины волны ферми-электронов в кристалле к среднему расстоянию между свободными электронами.

22. Определить отношение концентраций свободных электронов при $T = 0\text{К}$ в литии и цезии, если известно, что уровни Ферми в этих металлах равны $E_F = 4.72\text{ эВ}$; $E_F = 1.53\text{ эВ}$.
23. Во сколько раз число свободных электронов, приходящихся на один атом металла при $T = 0\text{К}$, больше в алюминии, чем в меди, если уровни Ферми соответственно равны $E_F = 11.7\text{ эВ}$; $E_F = 7.0\text{ эВ}$?
24. Определить число электронов, которое приходится на один атом натрия при $T = 0\text{К}$. Уровень Ферми для натрия $E_F = 3.12\text{ эВ}$. Плотность натрия $\rho = 970\text{ кг/м}$, молярная масса $M = 22,209\text{ г/моль}$.
25. Металл находится при $T = 0\text{К}$. Определить, во сколько раз число электронов с кинетической энергией от $E_F/2$ до E_F , числа электронов с энергией от 0 до $E_F/2$?
26. Образец кремния n-типа при $T = 300\text{К}$ имеет удельное сопротивление $5\text{ Ом}\cdot\text{см}$, подвижность электронов $0,16\text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; концентрация свободных носителей $1,4 \cdot 10^{16}\text{ м}^{-3}$. Эффективное число состояний в зоне проводимости 10^{19} м^{-3} . Определить: а) концентрацию электронов и дырок; б) положение уровня Ферми; в) вероятность того, что донорный уровень заполнен, если $E_c - E_d = 50\text{ мэВ}$.
27. Определить относительное число свободных электронов $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)$ в металле при $T = 0\text{К}$, кинетическая энергия которых отличается от энергии Ферми не более чем на 2%.
28. Концентрация электронов в собственном полупроводнике при $T = 400\text{К}$ равна $1,38 \cdot 10^{21}\text{ м}^{-3}$. Найти произведение эффективных масс электрона и дырки, если известно, что ширина запрещённой зоны определяется как $E_g = 0.785 - 4 \cdot 10^{-4}\text{ ТэВ}$.

3.4. Теоретические вопросы

1. Описать механизмы образования носителей заряда в полупроводниках (примесных и собственных) и металлах. Показать их на энергетических диаграммах.
2. Получить формулу для определения плотности электронных состояний $N(E)$.
3. Как зависит плотность электронных состояний в разрешённых зонах от энергии электрона? Привести графики зависимости $N(E)$ для полупроводника и металла.
4. Зависит ли средняя энергия свободных электронов в металле от числа атомов в кристалле? Если да, то как?
5. Привести формулы для определения концентрации носителей заряда в полупроводниках, когда известно положение уровня Ферми. Объяснить физический смысл входящих в них величин.
6. Получить выражения для вычисления собственной концентрации носителей заряда (n_i) в полупроводнике и определения его уровня Ферми E_F .
7. Привести формулы для вычисления концентрации носителей n и p в примесных полупроводниках с энергией активации примесей E_d и E_a соответственно. Объяснить физический смысл входящих в них величин.
8. Привести зависимость $E_F(T)$ в донорном полупроводнике. Объяснить.
9. Привести зависимость $E_F(T)$ в акцепторном полупроводнике. Дать соответствующие объяснения.

10. Описать механизмы образования носителей заряда в компенсированном полупроводнике? Привести энергетическую диаграмму.
11. Где расположен E_F в полностью компенсированном полупроводнике? Привести энергетическую диаграмму.
12. Дать определение и описать основные свойства вырожденных полупроводников.
13. Где расположен E_F в вырожденном полупроводнике. Привести рисунок
14. Как зависит от температуры концентрация носителей заряда в легированном полупроводнике? Привести зависимость $\ln n(T)$. Дать объяснения
15. Привести зависимость концентрации носителей заряда в проводниках от температуры. Дать ей объяснения
16. Как и почему изменяется местоположение уровня Ферми в проводнике с увеличением температуры?
17. Как изменяется энергия носителей заряда в полупроводниках и металлах с увеличением температуры?
18. Какой физический смысл имеют коэффициенты N_c и N_v в формулах (3.11) и (3.13)?
19. Дать определения провесам генерации и рекомбинации. Какие факторы определяют скорости генерации и рекомбинации носителей заряда?
20. Описать основные механизмы рекомбинации.
21. Почему в обычных полупроводниках межзонная рекомбинация, как излучательная так и безызлучательная маловероятны?
22. Описать процессы фононной и фотонной рекомбинаций. При каких условиях фотонная рекомбинация в полупроводниках преобладает?
23. Описать механизмы рекомбинации через локальные уровни ловушек (теория Холла, Шокли, Рида).
24. Как влияет положение энергетического уровня примесного атома в запрещённой зоне полупроводника на вероятность генерации и рекомбинации носителей заряда в нём?
25. В чём различие между равновесными и неравновесными носителями заряда в полупроводнике? Дать определение процессам инжекции и экстракции.
26. Время жизни каких носителей заряда (основных или неосновных) определяет концентрацию неравновесных носителей? Объяснить.
27. Получить формулу, описывающую уменьшение концентрации неравновесных носителей с течением времени $\Delta n(t)$ после прекращения внешнего воздействия.
28. Описать процессы токопереноса при наличии в объёме полупроводника градиента концентрации. Что описывают законы Фика?
29. Какой физический смысл имеют следующие характеристики: время жизни неравновесных носителей заряда τ ; диффузионная длина электронов L_n ; коэффициент диффузии электронов D_n
30. До каких пор будет происходить увеличение избыточной концентрации носителей заряда в полупроводнике под действием периодических прямоугольных импульсов света? Какие параметры световых импульсов и как будут влиять на величину Δn ?

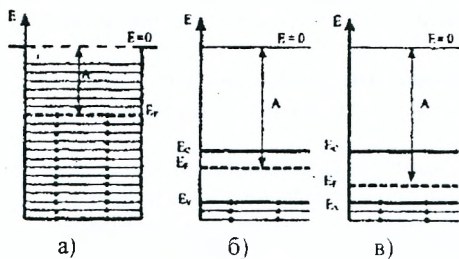
4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНТАКТОВ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Краткие теоретические сведения

Свойства контакта определяются переходным сопротивлением, возникающим между контактирующими материалами. Различают три основные группы электрических контактов: 1) *линейные (омические)* контакты обладают очень малым сопротивлением. Они не искажают форму сигнала. Их ВАХ линейная и они неинжектирующие; 2) *нелинейные (выпрямляющие)* контакты обладают малым сопротивлением в пропускающем направлении и очень большим в запиорном. Их ВАХ нелинейная; 3) - *инжектирующие* контакты обладают способностью к инжекции неосновных носителей заряда только в одном направлении.

Рассмотрим факторы и процессы, определяющие свойства переходного сопротивления образующегося контакта. Между электронами проводимости и ионами решетки кристалла имеются определённые силы связи, поэтому потенциальная энергия этих электронов намного меньше энергии свободных электронов в вакууме ($E = 0$). Следовательно, электроны в кристалле находятся в потенциальной яме, для выхода из которой необходимы затраты энергии по преодолению сил, действующих на них со стороны кристалла. Энергию $E = A$, которую нужно сообщить электрону, чтобы он покинул кристалл, называют *работой выхода электрона*. Эту энергию электрон может приобрести за счет внутренней тепловой энергии самого кристалла или же под действием внешней энергии.

Для характеристики работы выхода используют *термодинамическую* (изотермическую) работу выхода, отсчитываемую от уровня Ферми (рис.4.1).



- а) - для случая металла;
- б) - для полупроводника n-типа;
- в) - для полупроводника p-типа

Рисунок 4.1 – Определение термодинамической работы выхода A :

При образовании контакта происходит преимущественный переход электронов из материала с меньшей работой выхода в материал, в котором работа выхода больше. В обычных условиях обмен электронами между контактирующими материалами производится за счет внутренней тепловой энергии. При плотном контакте, когда напротив заполненных энергетических уровней одного материала находятся свободные уровни другого материала, переход электронов может осуществляться также посредством туннельного эффекта. При $T = 0$ К такой способ обмена электронами является единственно возможным.

Контакт металл-металл

Рассмотрим плотный контакт двух металлов M_1 и M_2 с разными работами выхода A_1 и A_2 (рис.4.2).

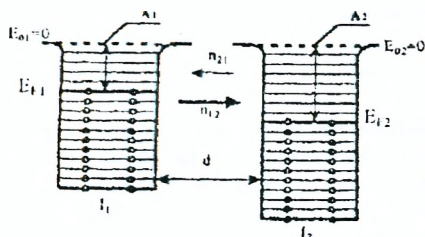
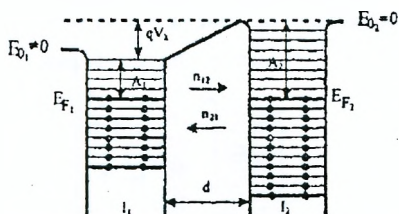


Рисунок 4.2 – Поток электронов n_{12} и n_{21} при контакте двух металлов в начальный момент времени

В первоначальный момент времени поток электронов n_{12} будет значительно больше, чем поток n_{21} . При этом M_1 заряжается положительно (в нем остаются нескомпенсированные ионы), а M_2 - отрицательно. Электрон, переходящий из M_1 в M_2 , переносит заряд $-q$, создавая разность потенциалов между металлами на контакте $-U$. Последующие электроны должны преодолевать возникающий потенциальный барьер $-qU$, величина которого непрерывно увеличивается с ростом числа перешедших в M_2 электронов. Работа, совершаемая электронами по преодолению энергетического барьера $-qU$, переходит в потенциальную энергию электронов, в результате чего все энергетические уровни в M_1 опускаются, а в M_2 поднимаются (рис.4.3).

Рисунок 4.3 – Энергетическая диаграмма контакта двух металлов в равновесном состоянии



Этот процесс будет происходить до тех пор, пока уровни Ферми в M_1 и M_2 не установятся на одной высоте. После чего против заполненных уровней M_1 окажутся заполненные уровни M_2 с той же плотностью электронов. При этом потенциальный барьер для электронов, движущихся направо, станет равным потенциальному барьеру для электронов, движущихся из M_2 в M_1 и поток n_{12} станет равным n_{21} .

Между металлами устанавливается равновесие, которому отвечает возникновение контактной разности потенциалов:

$$U_k = \frac{A_2 - A_1}{q} \quad (4.1)$$

Величина U_k составляет от 0,1 до нескольких вольт.

Концентрацию поверхностных электронов N_s , участвующих в образовании U_k , можно определить следующим образом. Напряженность поля на контакте толщиной d равна:

$$E = \frac{U_k}{d} = \frac{A_2 - A_1}{qd} \quad (4.2)$$

Так как поверхностная плотность заряда $q = \epsilon_0 E$, то

$$N = \frac{\rho}{q} = \frac{(A_2 - A_1)\epsilon_0}{q \cdot d}$$

Поскольку концентрация электронов в металлах очень велика, то в создании U_k участвуют всего около 1 % носителей заряда, находящихся на поверхности металла. Поэтому толщина образующегося двойного электрического слоя d будет очень мала - порядка постоянной кристаллической решетки, и удельное сопротивление этого слоя практически не будет отличаться от удельного сопротивления остального объема металлов. Кроме того, из-за малой толщины потенциального барьера d электроны приобретают возможность туннелировать сквозь него. В результате ток будет проходить одинаково хорошо в обоих направлениях, т.е. выпрямляющее действие контакта будет отсутствовать.

Контакт металл-полупроводник

На границе металла с полупроводником возможны как выпрямляющие, так и невыпрямляющие контакты. Это определяется типом проводимости полупроводника (n или p) и соотношением работ выхода контактирующих материалов.

Рассмотрим контакт металла с полупроводником донорного типа (n-типа), когда $A_{n/n} < A_m$ (рис. 4.4; 4.5).

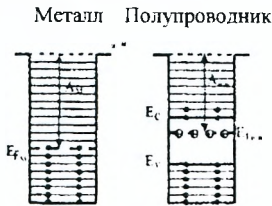
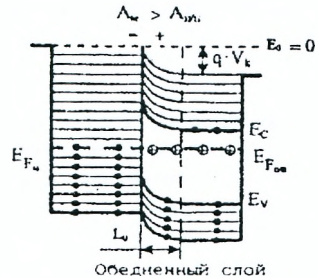


Рисунок 4.4 – Энергетические диаграммы металла и полупроводника n-типа до приведения в контакт $A_{n/n} < A_m$

При приведении в контакт электроны будут переходить из полупроводника в металл, заряжая его отрицательно. В полупроводнике при этом остается нескомпенсированный положительный объемный заряд неподвижных ионов донорной примеси, он заряжается положительно. В результате все энергетические уровни полупроводника будут понижаться относительно уровней металла до тех пор, пока в системе металл-полупроводник не установится единый уровень Ферми (рис.4.5).

Рисунок 4.5 – Энергетическая диаграмма выпрямляющего контакта металл-полупроводник n-типа



Между полупроводником и металлом возникает электрическое поле, тормозящее дальнейший переход электронов в металл. Поле отталкивает электроны в полупроводнике от контакта, и приповерхностный слой полупроводника

обедняется основными носителями – электронами. В результате, приповерхностный слой полупроводника будет обладать большим сопротивлением, из-за чего его называют запорным. Сам контакт при этом является выпрямляющим и носит название барьера Шоттки.

Процесс выравнивания уровней Ферми сопровождается возникновением контактной разности потенциалов U_k :

$$U_k = \frac{A_m - A_{n/n}}{q} \quad (4.3)$$

Так как концентрация носителей заряда в металле значительно больше, чем в полупроводнике, где плотность свободных электронов ограничена концентрацией введенной примеси, то практически всё контактное поле будет сосредоточено не в зазоре, а в слое объемного заряда полупроводника.

Ширина обедненного слоя в полупроводнике (шириной контактного слоя в металле пренебрегают вследствие его малости) может быть определена из выражения

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 U_k}{qn_n}} \quad (4.4)$$

Электрическое сопротивление контакта Шоттки зависит от полярности приложенного напряжения. Напряжение, поданное минусом на полупроводник, а плюсом на металл, является прямым: суммарное тормозящее поле в контакте уменьшается и возникает значительный ток электронов из полупроводника в металл. Характеристика ВАХ контакта Шоттки очень похожа на ВАХ р-п-перехода. Приборы с барьером Шоттки отличаются высоким быстродействием, поскольку их работа основана на переносе основных носителей: в них отсутствует накопление заряда неосновных носителей, время рассеивания которых ограничивает быстродействие прибора.

Если полупроводник n-типа, а $A_m < A_{n/n}$ (рис.4.6), то электроны переходят из металла в полупроводник, и в приконтактной области полупроводника образуется антизапирающий слой с малым удельным сопротивлением, обогащенный основными носителями заряда.

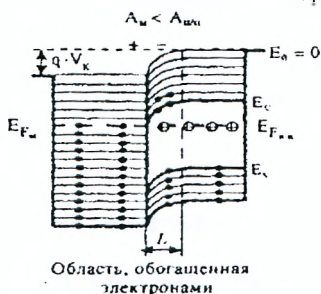


Рисунок 4.6 – Энергетическая диаграмма невыпрямляющего контакта металл-полупроводник n-типа

При применении к такому контакту электрического поля все напряжение будет падать не в металле, т.к. там концентрация носителей заряда велика, и не на контакте (слой обогащен электронами), а в объеме полупроводника. Но сопротивление объема полупроводника не зависит от направления внешнего поля. Поэтому такой контакт называется невыпрямляющим, или омическим.

В случае контакта металла с акцепторным полупроводником контакт Шоттки возникает, если $A_m < A_{\text{п/п}}$. Если же $A_m > A_{\text{п/п}}$ то контакт будет *омическим*, т.к. в этом случае при переходе электронов из полупроводника в металл, в полупроводнике образуется слой, обогащенный дырками.

Контакт полупроводник – полупроводник

Различают два вида контактов полупроводник-полупроводник:

гомопереходы - контакты между двумя различными полупроводниками, и *гетеропереходы* - переходы, образуемые на границе раздела областей с разными типами проводимости в едином объеме полупроводника. К ним относятся р-п-переходы.

По структуре р-п-переходы разделяются на *резкие* и *плавные*, *симметричные* и *несимметричные*.

Если концентрации примесей N_a , и N_d меняются на границе скачкообразно, то р-п-переход будет *резким*. В случае если концентрация доноров и акцепторов в переходе изменяется плавно, т.е. существует градиент концентрации примесей в переходе, то переход называется *плавным*.

Если концентрация одной примеси больше другой, образуется *несимметричный* р-п-переход, а в случае их равенства переход будет *симметричным*.

Если концентрация одной примеси превышает концентрацию другой на несколько порядков, то переход называют *односторонним* и обозначают n^+ -р, если $N_d \gg N_a$ и p^- -п, если $N_a \gg N_d$.

Рассмотрим процессы, происходящие на границе резкого симметричного р-п-перехода. Пусть концентрация акцепторов N_a , а концентрация доноров N_d . При нормальной температуре примеси полностью ионизированы, и концентрация электронов в п-области $n_n \approx N_d$, а концентрация дырок в р-области $p_p \approx N_a$.

Наряду с основными носителями n_n и p_p в обеих областях существуют также неосновные носители p_n и n_p , образующиеся за счёт тепловой генерации, связанной с переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости. Концентрации таких носителей заряда можно определить из закона действующих масс:

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n}, \quad (4.5)$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p}, \quad (4.6)$$

где n_i - концентрации собственных носителей заряда.

Так как $n_i \sim e^{-\frac{E_g}{2kT}}$, т.е. зависит от ширины запрещенной зоны E_g и

температуры T , то для данного полупроводника концентрация неосновных носителей определяется только температурой и сильно зависит от нее.

Поскольку концентрация дырок в р-области намного выше их концентрации в п-области, а концентрация электронов в п-области намного выше их концентрации в р-области, то в контактирующих областях полупроводника

возникают диффузионные потоки электронов из n-области в p-область и дырок из p-области в n-область. Электроны, перешедшие из n-области в p-область, рекомбинируют вблизи границы раздела этих областей с дырками p-области, а дырки, перешедшие из p- в n-область, рекомбинируют здесь с электронами этой области. В результате в приконтактном слое n-области практически не остается свободных электронов, в то время как в приконтактном слое p-области практически не остается дырок. При этом в слое n-области остаются некомпенсированные неподвижные ионы доноров, а в приконтактном слое p-области неподвижные отрицательные ионы акцепторов. Ширину образующегося слоя объемного пространственного заряда (ОПЗ) ионов доноров обозначим через d_n , а толщину соответствующего слоя ионов акцепторной примеси в p-области через d_p .

Возникновение на границе раздела n- и p-областей внутреннего поля ОПЗ ведёт к уменьшению потока основных носителей из одной области в другую, однако оно является ускоряющим для неосновных носителей, которые вытягиваются этим полем из областей n- и p- типа порядка диффузионной длины носителей L_p в n-области и L_n в p-области. Таким образом, через переход движутся два встречных потока: диффузионный поток, образованный основными носителями, и дрейфовый поток, образованный неосновными носителями.

Динамическое равновесие устанавливается при равенстве этих потоков. Поток неосновных носителей заряда определяется только температурой, т.к. их концентрация зависит от T. Поток основных носителей заряда будет превосходить поток неосновных до тех пор, пока образующаяся контактная разность потенциалов U_k не сравняет разность работ выхода электронов из обеих областей и уровни Ферми не совпадут.

Контактная разность потенциалов на границе p-n-перехода определяется выражением:

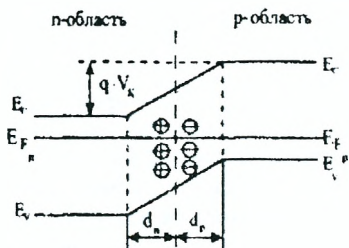
$$U_k = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{n_0}}{n_{p_0}} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{n_0} \cdot p_{p_0}}{n_i^2} \right) = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0} (d_n^2 n_{n_0} + d_p^2 p_{p_0}), \quad (4.7)$$

где n_{n_0} и p_{p_0} - концентрации основных носителей заряда в n- и p- областях соответственно; d_n и d_p - ширина области объемного заряда по обеим сторонам раздела электронного и дырочного полупроводников соответственно. Если переход симметричный, т.е. $d_p = d_n$, то его ширина будет равна:

$$d = d_p + d_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 U_k (n_{n_0} + p_{p_0})}{qn_{n_0} p_{p_0}}} \quad (4.8)$$

Переход электронов из n-области в p-область требует затраты энергии на преодоление потенциального барьера qU_k . Эта работа переходит в потенциальную энергию электронов, поэтому все энергетические уровни в p-области полны относительно уровней в n-области на величину $-qU_k$. При этом электроны из p-области, где они являются неосновными носителями, могут беспрепятственно переходить в n-область, а дырки из n-области в p-область.

Энергетическая диаграмма для равновесного состояния будет иметь вид, представленный на рис.4.7.



⊕ – ионы донорной примеси,
⊖ – ионы акцепторной примеси
Рисунок 4.7 – Энергетическая диаграмма р-п-перехода в равновесном состоянии;

В равновесном состоянии результирующий ток через переход равен нулю. При этом диффузионный ток основных носителей полностью скомпенсирован дрейфовым током неосновных носителей.

При подаче на переход внешнего напряжения U меняется ширина объемного заряда:

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_k \pm U)(n_{n_0} + p_{p_0})}{qn_n p_{p_0}}}, \quad (4.9)$$

Здесь знак "+" соответствует подаче на переход обратного напряжения, знак "-" – прямого. Выражение имеет смысл при прямых напряжениях $0 < U < U_k$.

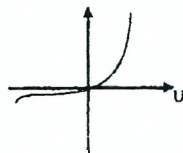
В несимметричном р-п-переходе концентрация примесей в одной области много меньше, чем в другой. Поэтому, полагая, например, $n_{n_0} \ll p_{p_0}$, получаем:

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_k \pm U)}{qN}}, \quad (4.10)$$

где N - концентрация примесей в слаболегированной области.

Изменение ширины ОПЗ вызывает соответствующее изменение высоты потенциального барьера. При прямом смещении (отрицательный потенциал подан на п-область) барьер для основных носителей уменьшается на величину $q(U_k - U)$, а при обратном увеличивается на величину $q(U_k + U)$, в то время как поток неосновных носителей всегда остается неизменным. В результате вольт-амперная характеристика р-п-перехода имеет вид, представленный на рис.4.8.

Рисунок 4.8 – Вид вольт-амперной характеристики р-п перехода



Ток через переход описывается выражением:

$$I(U) = qS \left(\frac{D_p}{L_p} \cdot p_{n_0} + \frac{D_n}{L_n} \cdot n_{p_0} \right) \cdot \left(\exp \frac{U}{kT} - 1 \right), \quad (4.11)$$

где p_{n_0} и n_{p_0} - концентрации неосновных носителей на границах перехода; D_p и D_n , L_p и L_n - соответственно коэффициенты диффузии и диффузионные длины неосновных дырок и электронов; S - площадь контакта (перехода).

При достаточно больших обратных напряжениях обратный ток через переход не зависит от приложенного напряжения и принимает постоянное значение

$$I_o = qS \left(\frac{D_p}{L_p} \cdot p_{n_0} + \frac{D_n}{L_n} \cdot n_{p_0} \right) \quad (4.12)$$

Обратный ток называется током насыщения или тепловым током. Поскольку он определяется концентрацией неосновных носителей, то его величина сильно возрастает при увеличении температуры.

Изменение толщины ОПЗ при изменении внешнего напряжения связано с изменением величины и размеров объемных зарядов ионов примесей в n- и p-областях. Следовательно, p-n-переход ведет себя как конденсатор. Так как емкость такого конденсатора связана с изменением высоты потенциального барьера, ее называют барьерной. При обратном напряжении уменьшается, а при прямом - увеличивается.

Оценить величину барьерной емкости можно, пользуясь формулой для расчёта ёмкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \quad (4.13)$$

Тогда для симметричного p-n - перехода

$$C_{бар} = S \sqrt{\frac{q \epsilon \epsilon_0 n_n p_p}{2(n_n + p_n)(U_k \pm U)}} \quad (4.14)$$

для резкого несимметричного

$$C_{бар} = S \sqrt{\frac{q \epsilon \epsilon_0 N}{2(U_k \pm U)}} \quad (4.15)$$

4.2. Задачи для самостоятельного решения

1. Определить контактную разность потенциалов, возникающую при соприкосновении двух металлов с концентрациями свободных электронов: $n_1 = 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, $n_2 = 1 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$

2. Зазор между пластинами плоского конденсатора $d = 1,00 \text{ мм}$. Одна из пластин изготовлена из платины (для которой работа выхода электрона $A = 5,29 \text{ эВ}$), другая - из алюминия (для которого $A = 3,74 \text{ эВ}$). Пластины закорочены медным проводом. Какова будет напряженность E электрического поля между пластинами? Как будет направлено поле?

3. Определить толщину запирающего слоя в контакте металла с полупроводником n-типа, если равновесная контактная разность потенциалов составляет $0,5 \text{ эВ}$, а концентрация доноров 10^{24} м^{-3} . Относительную диэлектрическую проницаемость полупроводника принять равной 10.

4. Разность работ выхода двух металлов составляет 2 эВ , толщина контактной зоны $3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Вычислить, сколько электронов переместится на участке граничной поверхности площадью $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

5. В германиевом диоде удельное сопротивление n-области при 300К составляет $10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, p-области $1^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Определить контактную разность потенциалов на p-n-переходе, если концентрация собственных носителей $n_i = 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, а подвижность дырок и электронов $\mu_p = 0.19 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; $\mu_n = 0.38 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

6. Определить величину контактной разности потенциалов в р-п-переходе, если концентрации носителей в п- и р-германии одинаковы и равны 10^{22} м^{-3} , температура перехода 300К.

7. Определить напряженность поля в зазоре между металлом и полупроводником, если $A_m = 5,3 \text{ эВ}$, $A_n = 6,2 \text{ эВ}$, а толщина зазора $d = 50 \text{ мкм}$.

8. Имеется кремниевый р-п-переход с концентрацией примесей $N_d = 10^3 N_a$, причем на каждые 10^8 атомов кремния приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов при температуре $T = 300\text{К}$. Концентрации атомов кремния N и ионизированных атомов n_i принять равными $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ и 10^{10} см^{-3} соответственно.

9. Удельное сопротивление р-области кремниевого полупроводника $\rho_p = 20 \text{ Ом см}$, а удельное сопротивление п-области 4 Ом см . Вычислить высоту потенциальной барьерной р-п-перехода при $T = 300\text{К}$. Концентрацию собственных носителей заряда принять $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, а подвижности носителей заряда $\mu_n = 0.14 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $\mu_p = 0.05 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

10. Кремниевый р-п-переход ($\epsilon = 12$) имеет площадь сечения $S = 1 \text{ мм}^2$ и барьерную емкость 300 пФ при обратном напряжении 10 В . Определить максимальную напряженность электрического поля в области пространственного заряда. Как изменится емкость, если обратное напряжение увеличить в два раза?

11. Вычислить для температуры 300°C контактную разность потенциалов р-п-перехода, сформированного в фосфиде индия, если равновесные концентрации носителей заряда в р- п-области одинаковы и равны 10^{17} см^{-3} , а собственная концентрация $n_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

12. В структуре с кремниевым р-п-переходом удельное сопротивление р-области: $\rho_p = 10^{-4} \text{ Ом см}$, а удельное сопротивление п-области: $\rho_n = 10^{-2} \text{ Ом см}$. Вычислить контактную разность потенциалов, если подвижности дырок $\mu_p = 0.05 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и электронов $\mu_n = 0.13 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а собственная концентрация $n_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

13. Концентрация доноров и акцепторов в п-области и р-области резкого р-п-перехода соответственно равны $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ и 10^{23} см^{-3} . Определить контактную разность потенциалов и плотность обратного тока насыщения, полагая, что при комнатной температуре коэффициенты диффузии для неосновных электронов и дырок составляет $10^{24} \text{ м}^2/\text{с}$ и $5 \cdot 10^{23} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно, а диффузионная длина $L_n = L_p = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Собственную концентрацию носителей заряда считать равной $n_i = 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

14. В монокристалле полупроводника длиной $0,2 \text{ мм}$ и площадью поперечного сечения $S = 10^{-6} \text{ м}^2$ образован р-п-переход. На торцах кристалла сформированы омические контакты для подключения внешнего напряжения, граница между п- и р- областями расположена посередине. Удельное сопротивление р-области $\rho_p = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом см}$, время жизни неосновных носителей заряда в ней $\tau = 75 \text{ нс}$. Удельное сопротивление п-области $\rho_n = 2,08 \cdot 10^{-2} \text{ Ом м}$, время жизни дырок в ней $\tau = 150 \text{ нс}$. Определить: а) контактную разность потенциалов, б) обратный ток насыщения; в) долю тока, создаваемую дырками. При расчете полагать, что в полупроводнике подвижность электронов $\mu_n = 0.3 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, подвижность дырок $\mu_p = 0.15 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, собственная концентрация носителей заряда при $T = 300\text{К}$ составляет $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

15. Структура с кремниевым р-п-переходом имеет удельную проводимость в р-области $\sigma_p = 10^3 \text{ См/м}$ и удельную проводимость п-области $\sigma_n = 20 \text{ См/м}$. Время жизни неосновных носителей заряда 5 и 1 мкс в р и п-областях соответственно. Определить: а) отношение дырочной составляющей тока в р-п-переходе к электронной; б) плотность обратного тока насыщения и плотность тока через р-п-переход при прямом напряжении 0,3В. Расчет производить для температуры $T = 300\text{К}$, полагая, что собственная концентрация носителей заряда $n_i = 1.4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, подвижность элект-ронов $\mu_n = 0.12 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, подвижность дырок $\mu_p = 0.05 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

16. Барьерная емкость р-п-перехода равна 200 пФ при обратном напряжении 2 В. Какое требуется обратное напряжение, чтобы она уменьшилась до 50 пФ, если контактная разность потенциалов $U_k = 0,85 \text{ В}$?

17. Области р- и п-диода с резким кремниевым переходом имеют удельное сопротивление 0,013 Ом·см и 44,5 Ом·см соответственно. В условиях термодинамического равновесия при комнатной температуре определить высоту потенциально-го барьера. Исходные данные: $\mu_p = 480 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $\mu_n = 400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $n_i = 1.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

18. Имеется германиевый ($\epsilon = 16$) р-п-переход, легированный примесями с концентрацией $N_a = 5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и $N_d = 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Вычислить: а) толщину области перехода, если максимальная напряженность электрического поля в ней составляет 10 В/м; б) контактную разность потенциалов.

19. Для диода с параметрами: $N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $S = 10^{-3} \text{ см}^2$; $D_p = 40 \text{ см}^2$; $T = 300\text{К}$; $n_i = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $d = 10^{-3} \text{ см}$, где d - толщина обедненной области, определить: а) равновесные концентрации носителей в р-и п-областях; б) контактную разность потенциалов; в) обратный ток насыщения I_0 , пренебрегая вкладом электронного тока, так как $N_a \gg N_d$.

20. Ток, проходящий через р-п-переход при большом обратном напряжении и $T = 300 \text{ К}$, равен: а) 1 мкА; б) 1 нА. Вычислить прямое напряжение на р-п-переходе при токе 1 мА.

21. Если к резкому р-п-переходу приложить переменное напряжение амплитудой 0,5В, то максимальная емкость перехода равна 2 пФ. Определить контактную разность потенциалов перехода, если при отсутствии внешнего напряжения емкость перехода равна 1 пФ.

22. Определить при температуре $T = 300\text{К}$ контактную разность потенциалов кремниевого р-п-перехода, если концентрация примесей $N_a = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $N_d = 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Концентрацию собственных носителей принять $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

23. Резкий р-п-переход имеет площадь поперечного сечения $S = 1 \text{ мм}^2$. Область р сильно легирована, так что ее удельное сопротивление в несколько раз меньше удельного сопротивления п-области. Удельное сопротивление п-области 5 Ом/см, а время жизни неосновных носителей заряда в ней 50 мкс. Определить обратный ток р-п-перехода и прямое напряжение при токе 1 мА. Подвижность электронов при $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $n_i = 10^{14} \text{ м}^{-3}$.

24. При прямом напряжении 0,1 В на р-п-переходе через него проходит определенный ток. Каким должно быть прямое напряжение, чтобы ток увеличился в 2 раза? Расчет провести для комнатной температуры ($T = 300\text{К}$).

25. Какое напряжение необходимо приложить к р-п-переходу при $T = 300\text{К}$, чтобы прямой ток через него был равен обратному току насыщения. При каком прямом напряжении прямой ток $I = 100 I_0$?

26. В кремниевом резком р-п- переходе п-область имеет удельное сопротивление $\rho_n = 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, время жизни неосновных носителей заряда в ней $\tau = 1 \text{ мкс}$, для р-области: $\rho_p = 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; $\tau = 5 \text{ мкс}$. Найти отношение дырочной составляющей к электронной. Определить плотность тока, протекающего через переход при прямом напряжении $0,3 \text{ В}$. Подвижности электронов и дырок в кремнии при $T = 300\text{К}$ соответственно равны: $\mu_n = 0,14 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $n_i = 10^{13} \text{ м}^{-3}$.

27. Определить барьерную емкость р-п-перехода и толщину слоя объемного заряда, если $N_d \gg N_a$, $N_a = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, площадь перехода $S = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, контактная разность потенциалов $U_k = 0,5\text{В}$, $\epsilon = 16$, внешнее смещение отсутствует.

28. Лавинный пробой в кремниевом диоде происходит, когда напряженность электрического поля достигает $250 \text{ кВ}/\text{см}$. Вычислить напряжение пробоя, если $N_a = 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $N_d = 10^{14} \text{ м}^{-3}$; $d_n = 90 \text{ мкм}$; $d_p = 10 \text{ мкм}$; $\epsilon = 12$.

29. Во сколько раз изменится барьерная емкость резкого р-п-перехода при увеличении обратного напряжения от 20 В до 100 В ?

30. В равновесном состоянии высота потенциального барьера р-п-перехода равна $0,2 \text{ В}$, $N_d \gg N_a$, $N_a = 3 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$; $\epsilon = 12$. Найти барьерную емкость р-п-перехода, соответствующую обратным напряжениям $0,1 \text{ В}$ и 10 В , если $S = 1 \text{ мм}^2$. Вычислить ширину области пространственного заряда перехода для этих напряжений. Чему она будет равна при прямом напряжении $0,1 \text{ В}$?

4.3. Теоретические вопросы

1. Назвать и дать характеристику свойств различных видов контактов, используемых в микроэлектронике, описать их функции и способы применения, привести примеры.

2. Дать определение работы выхода электрона из кристалла. Какие факторы определяют величину работы выхода материала? Показать на энергетических диаграммах величину термодинамической работы выхода для случаев металла, полупроводника собственного и полупроводника легированного.

3. Что называют пробоем р-п- перехода? Дать сравнительную характеристику различным механизмам пробоя и условий их возникновения.

4. Из полупроводниковых материалов с различными значениями запрещенных зон ($E_{g1} > E_{g2}$) по одной и той же технологии изготовили два диода. Привести рисунки ВАХ этих диодов и объяснить различия в ВАХ для прямого и обратного напряжений.

5. Чем обусловлено наличие сил, препятствующих выходу электрона из кристалла?

6. Дать определение термоэлектронной эмиссии и привести выражение для плотности термоэмиссионного тока.

7. В чем заключается эффект Шоттки для термоэлектронной эмиссии электронов? Привести рисунок.

8. Привести энергетическую диаграмму контакта двух металлов с различными работами выхода. Объяснить процессы, приводящие к установлению контактной разности потенциалов. Чем определяется величина контактной разности потенциалов?

9. Сравнить по величине области пространственного заряда, возникающего в контактах металл-металл, металл-полупроводник и в p-n-переходе.

10. В каких случаях образуются выпрямляющие контакты металла с полупроводником, а в каких невыпрямляющие? Привести энергетические диаграммы таких контактов для полупроводников n- и p- типов проводимости (4 диаграммы).

11. Дать определение омического контакта. Почему контакт металл-металл называют омическим? При каких условиях он будет выпрямляющим? Записать уравнение ВАХ такого контакта.

12. Привести классификацию p-n-переходов и описать основные способы их изготовления.

13. Охарактеризовать процессы установления стационарного состояния в равновесном p-n - переходе.

14. Привести энергетическую диаграмму барьера Шоттки для полупроводника p - типа. Назвать основные характеристики такого контакта. Какими преимуществами обладают диоды Шоттки?

15. Описать процессы, протекающие при приложении к барьеру Шоттки прямого и обратного напряжений (для полупроводников n- и p - типов). Объяснить ВАХ выпрямляющего контакта.

16. Какими должны быть соотношения между работами выхода металла и полупроводников n- и p - типов, чтобы между ними образовался невыпрямляющий контакт? Привести энергетические диаграммы таких контактов. Дать объяснение протекающих процессов.

17. Какие контакты называют выпрямляющими, а какие невыпрямляющими? Что лежит в основе такой классификации? Привести примеры.

18. Какие процессы приводят к образованию области объемного пространственного заряда (ОПЗ) в переходе? Чем образуется ОПЗ? Чем определяется его толщина?

19. Привести энергетические диаграммы p-n- перехода в равновесном состоянии и при подаче на него прямого и обратного напряжений.

20. Привести ВАХ p-n-перехода и объяснить зависимость тока при обоих включениях.

21. Что такое гетеропереход? Привести энергетические диаграммы гетеропереходов.

22. В чем отличие ВАХ реального p-n-перехода от идеального?

23. Сравнить обратные ветви ВАХ p-n-перехода и диода Шоттки. Объяснить различия.

24. Описать возможные механизмы перехода носителей заряда из одного материала в другой при образовании контакта.

25. Какой контакт между двумя полупроводниками является омическим? Привести энергетическую диаграмму такого контакта. Объяснить.

26. Какими характерными особенностями обладают гетеропереходы? Где и почему находят применение гетеропереходы в микроэлектронике?

27. Почему при прикладывании к p-n - переходу обратного напряжения величина обратного тока вначале возрастает, а затем остается неизменной.

28. Дать определения и сравнить свойства барьерной и диффузионной емкостей p-n - перехода.

29. Какой образуется контакт между металлом и полупроводником n-типа проводимости, если $A_m < A_{n/p}$? Ответ обосновать.

30. Какие факторы влияют на ВАХ диода Шоттки? Ответ обосновать.

Приложение
Основные физические постоянные

КОНСТАНТА	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ЧИСЛОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ
Скорость света в вакууме	c	$2,998 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	h	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
	$\hbar = h/2\pi$	$1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Число Авогадро	N_A	$6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Постоянная Больцмана	k	$1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Универсальная газовая постоянная	R	$2,067 \cdot 10^{16}$ с ⁻¹
Масса электрона	m_e	$9,1083 \cdot 10^{-31}$ кг
Заряд электрона		$1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса протона	m_p	$1,672 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

ЛИТЕРАТУРА

1. В.М. Варикаш, Ю.М. Хачатрян. Избранные задачи по физике твёрдого тела. – Мн.: Высшая школа, 1969.
2. В.М. Варыкаш, М.С. Цэдрык. Кіраўніцтва да рашэння задач па агульнай фізіцы. – Мн.: Выш. шк., 1995.
3. Д. Блейкмор. Физика твёрдого тела: пер. с англ. – М.: Мир, 1988.
4. Б.Н. Бушманов, Ю.А. Хромов. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1971.
5. В.М. Драко, В.И. Прокошин, В.Г. Шепелевич. Основы фононных и электронных процессов в кристаллах. – Гомель, 1999.
6. Г.И. Елифанов. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1997.
7. П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1985.
8. Сборник задач по курсу общей физики под ред. М.С. Цедрика. – М.: Просвещение, 1989.
9. А.Г. Чертов, А.А. Воробьёв. Задачник по физике. – М.: Высшая школа, 1981.
10. В.Г. Шепелевич. Сборник задач по физике металлов и металловедению. – Мн.: Тэхналогія, 2000.
11. П.С. Киреев. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1975.
12. В.А. Терехов. Задачник по электронным приборам. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
13. Л.Г. Березуцкий, И.В. Бондарь, И.А. Забелина. Методические указания и контрольные задания для студентов специальности «Проектирование и производство РЭС»: в 2 ч. – Мн.: БГУИР, 2000.
14. Мин Чен. Задачи по физике. – М.: Мир, 1978
15. И.Е. Иродов. Задачи по квантовой физике. – М.: Высшая школа, 1991

Учебное издание

Составители:

*Янусик Ирина Семёновна
Пинчук Александр Иванович*

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических заданий по дисциплине
«**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**»
для студентов специальности
1-36 04 02 «Промышленная электроника»
дневной и заочной форм обучения

Часть II

Ответственный за выпуск: **Янусик И.С.**
Редактор: **Строкач Т. В.**
Компьютерная вёрстка: **Боровикова Е.А.**
Корректор: **Никитчик Е.В.**

Подписано к печати 18.02.2010 г. Формат 60x84 ¹/₁₆ Бумага «Снегурочка».
Усл. п.л. 3,0. Уч.-изд. л. 3,25. Тираж 70 экз. Заказ № 211.
Отпечатано на ризографе Учреждения образования
«Брестский государственный технический университет»
224017, Брест, ул. Московская, 267.