

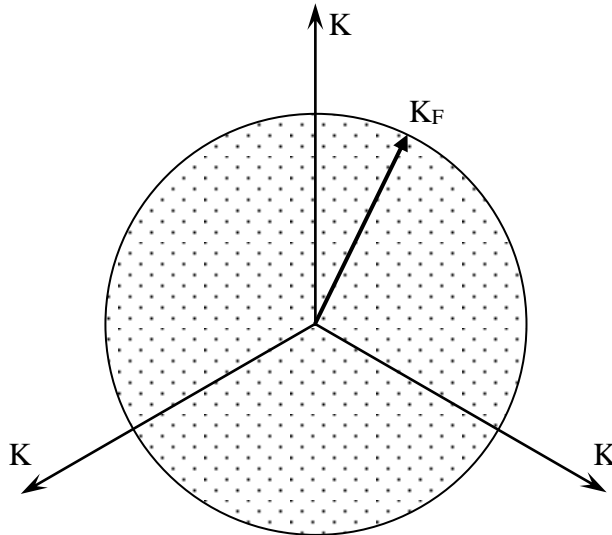
Энергия Ферми определяется как энергия электронов на высшем заполненном уровне

$$\varepsilon_f = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n_F \pi}{L} \right)^2 = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{N\pi}{2L} \right)^2$$

где n_F – квантовое число наивысшего занятого энергетического уровня. $2n_F = N$

где N – число электронов в объеме

В основном состоянии (1S) системы из N свободных электронов занятые состояния можно



описывать точками внутри сферы в K – пространстве. Энергия, соответствующая поверхности этой сферы, является энергией Ферми. Волновые векторы, «упирающиеся» в поверхность этой сферы, имеют длины, равные K_F , а сама поверхность называется поверхностью Ферми (в данном состоянии она является сферой). K_F - радиус этой сферы

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m}$$

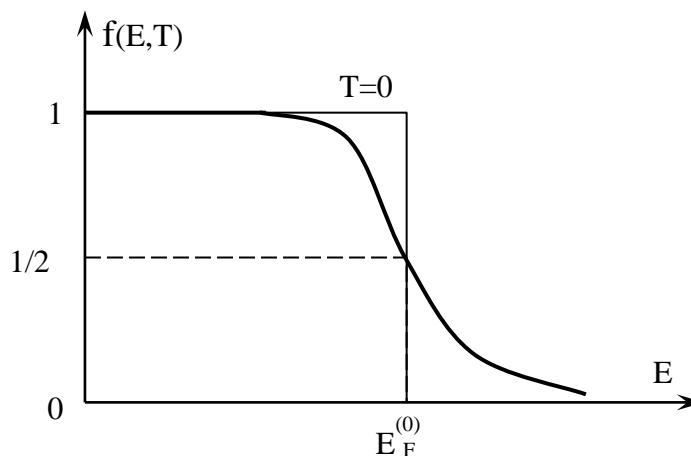
где ε_F – энергия электрона с волновым вектором \vec{k}_F , оканчивающимся на

поверхности сферы.

Радиус сферы Ферми K_F зависит лишь от концентрации частиц $\frac{N}{V}$ и не зависит от массы m

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{2/3} \quad V_F = \frac{\hbar k_F}{m} = \frac{\hbar}{m} \left(\frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{1/3}$$

Энергию Ферми можно определять как энергию таких квантовых состояний, вероятность заполнения которых частицей равна 1/2.



$$f(E, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \quad \text{если } E = E_F, \text{ то } f(E, T) = \frac{1}{2}$$

С точностью порядка единицы число состояний на единичный энергетический интервал вблизи энергии Ферми равно отношению числа электронов проводимости к энергии Ферми.

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left(3\pi^2 \frac{N}{V} \right)^{2/3} \Rightarrow P_{\max} = \hbar \left(3\pi^2 \frac{N}{V} \right)^{1/3}$$

Выводы

$$\frac{m_{\text{парал}}^*}{m_0} = 1,58; \quad \frac{m_{\text{перп}}^*}{m_0} = 0,082; \quad \frac{m_{P_1}^*}{m_0} = 0,04;$$

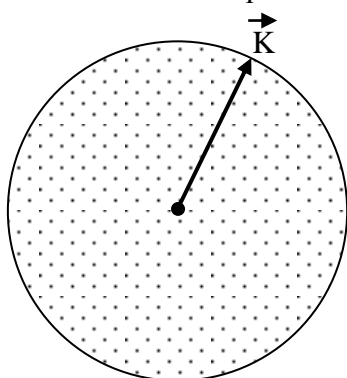
1. Эффективные массы: германий

$$\frac{m_{P_2}^*}{m_0} = 0,34; \quad \frac{m_{P_3}^*}{m_0} = 0,071$$

$$\frac{m_{\text{парал}}^*}{m_0} = 0,98; \quad \frac{m_{\text{перп}}^*}{m_0} = 0,19; \quad \frac{m_{P_1}^*}{m_0} = 0,16; \quad \frac{m_{P_2}^*}{m_0} = 0,52 \quad \frac{m_{P_3}^*}{m_0} = 0,24;$$

кремний

т.е. в валентной зоне германия и кремния имеются тяжелые и легкие дырки. Валентные зоны состоят из трех подзон.



2. Поверхность Ферми есть поверхность постоянной энергии

ε_F в \vec{K} пространстве. Поверхность Ферми при абсолютном

нуле $\varepsilon_F^{(0)}$ отделяет заполненные электронами состояния от незаполненных состояний. Сфера Ферми. Все состояния с $K < K_F$ являются занятыми.

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

3. Разнообразие свойств твердых тел и есть свидетельство разнообразия квазичастиц.

4. До последнего времени считалось, что электроны похожи друг на друга. Когда хотят подчеркнуть отличие электронов железа от электронов меди, то говорят, что они обладают различными поверхностями Ферми.

На всемирной выставке в Брюсселе здание отдает дань веку физики. Представляет правильную систему связанных между собой сфер, внутри которых выставочные помещения. Каждая из которых (сфера) представляет ион железа, потерявший один электрон. Это поверхность уровня Ферми.

У каждого металла только своя ему присущая форма поверхности Ферми, она ограничивает область импульсного пространства, занятого электронами проводимости при абсолютном нуле. Это визитные карточки различных металлов.

5. Свойства металлов определяются электронами на поверхности Ферми или вблизи нее.

6. Движение волнового пакета, связанного с волновым вектором \vec{K} описывается уравнением

$$\vec{F} = \hbar \frac{d\vec{K}}{dt}$$

Групповая скорость

$$V_g = \hbar^{-1} \nabla \varepsilon(\vec{K})$$

Если два различных металла привести в соприкосновение, то между ними возникает разность потенциалов, называемая контактной разностью потенциалов. Итальянский физик А. Вольта (1745—1827) установил, что если металлы Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd привести в контакт в указанной последовательности, то каждый предыдущий при соприкосновении с одним из следующих зарядится положительно. Этот ряд называется рядом Вольта. Контактная разность потенциалов для различных металлов составляет от десятых до целых вольт.

Вольта экспериментально установил два закона:

1. Контактная разность потенциалов зависит лишь от химического состава и температуры соприкасающихся металлов.
2. Контактная разность потенциалов последовательно соединенных различных проводников, находящихся при одинаковой температуре, не зависит от химического состава промежуточных проводников и равна контактной разности потенциалов, возникающей при непосредственном соединении крайних проводников.

Для объяснения возникновения контактной разности потенциалов воспользуемся представлениями зонной теории. Рассмотрим контакт двух металлов с различными работами выхода A_1 и A_2 , т.е. с различными положениями уровня Ферми (верхнего заполненного электронами энергетического уровня). Если $A_1 < A_2$ (этот случай изображен на рис. 330, а), то уровень Ферми располагается в металле 1 выше, чем в металле 2. Следовательно, при контакте металлов электроны с более высоких уровней металла 1 будут переходить на более низкие уровни металла 2, что приведет к тому, что металл 1 зарядится положительно, а металл 2 — отрицательно. Одновременно происходит относительное смещение энергетических уровней: в металле, заряжающемся положительно, все уровни смещаются вниз, а в металле, заряжающемся отрицательно, — вверх. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока между соприкасающимися металлами не установится равновесие, которое, как доказывается в статистической физике, характеризуется совпадением уровней Ферми в обоих металлах (рис. 330, б).

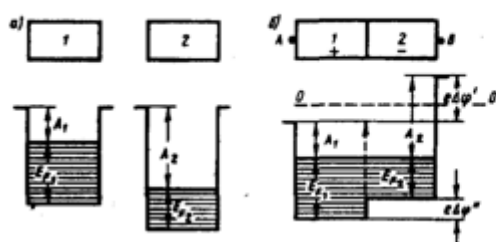


Рис. 330

- Сформулируйте законы Вольта.
- В чем причины возникновения контактной разности потенциалов?
- Объясните механизм возникновения контактной разности потенциалов согласно зонной теории.

Так как для соприкасающихся металлов уровни Ферми совпадают, а работы выхода A_1 и A_2 не изменяются (они являются константами металлов и не зависят от того, находятся металлы в контакте или нет), то потенциальная энергия электронов в точках, лежащих вне металлов в непосредственной близости к их поверхности (точки А и В на рис. 330, б), будет различной. Следовательно, между точками А и В устанавливается разность потенциалов, которая, как следует из рисунка, равна

$$\Delta\varphi' = (A_2 - A_1)/e. \quad (246.1)$$

Разность потенциалов (246.1), обусловленная различием работ выхода контактирующих металлов, называется внешней контактной разностью потенциалов. Чаще говорят просто о контактной разности потенциалов, подразумевая под ней внешнюю.

Если уровни Ферми для двух контактирующих металлов не одинаковы, то между внутренними точками металлов наблюдается внутренняя контактная разность потенциалов, которая, как следует из рисунка, равна

$$\Delta\varphi^* = (E_{F_1} - E_{F_2})/e. \quad (246.2)$$

В квантовой теории доказывается, что причиной возникновения внутренней контактной разности потенциалов является различие концентраций электронов в контактирующих металлах. Dj'' зависит от температуры T контакта металлов (поскольку наблюдается зависимость E_F от T), обуславливая термоэлектрические явления. Как правило, $Dj'' \ll Dj'$.

Если, например, привести в соприкосновение три разнородных проводника, имеющих одинаковую температуру, то разность потенциалов между концами разомкнутой цепи равна алгебраической сумме скачков потенциала во всех контактах. Она, как можно показать (предоставляем это сделать читателю), не зависит от природы промежуточных проводников (второй закон Вольты).

Внутренняя контактная разность потенциалов возникает в двойном электрическом слое, образуемом в приконтактной области и называемом контактным слоем. Толщина контактного слоя в металлах составляет примерно 10^{-10} м, т. е. соизмерима с междоузельными расстояниями в решетке металла. Число электронов, участвующих в диффузии через контактный спой, составляет примерно 2% от общего числа электронов, находящихся на поверхности металла. Столь незначительное изменение концентрации электронов в контактном слое, с одной стороны, и малая по сравнению с длиной свободного пробега электрона его толщина — с другой, не могут привести к заметному изменению проводимости контактного слоя по сравнению с остальной частью металла. Следовательно, электрический ток через контакт двух металлов проходит так же легко, как и через сами металлы, т.е. контактный слой проводит электрический ток в обоих направлениях (1 \rightarrow 2 и 2 \rightarrow 1) одинаково и не дает эффекта выпрямления, который всегда связан с односторонней проводимостью.

1.7.6. Контакт «металл – полупроводник»

В современных полупроводниковых приборах помимо контактов с p-n-переходом применяются контакты «металл – полупроводник».

Контакт «металл – полупроводник» возникает в месте соприкосновения полупроводникового кристалла n или p-типа проводимости с металлами. Происходящие при этом процессы определяются соотношением работ выхода электрона из металла A_m и из полупроводника A_p . Под работой выхода электрона понимают энергию, необходимую для переноса электрона с уровня Ферми на энергетический уровень свободного электрона. Чем меньше работа выхода, тем больше электронов может выйти из данного тела.

В результате диффузии электронов и перераспределением зарядов нарушается электрическая нейтральность прилегающих к границе раздела областей, возникает контактное электрическое поле и контактная разность потенциалов.

$$\Phi_{\text{конт}} = \frac{(A_{\text{М}} - A_{\text{П}})}{q} \quad (1.21)$$

Переходный слой, в котором существует контактное электрическое поле при контакте «металл – полупроводник», называется переходом Шоттки, по имени немецкого ученого В. Шоттки, который первый получил основные математические соотношения для электрических характеристик переходов.

Контактное электрическое поле на переходе Шоттки сосредоточено практически в полупроводнике, так как концентрация носителей заряда в металле значительно больше концентрации носителей заряда в полупроводнике. Перераспределение электронов в металле происходит в очень тонком слое, сравнимом с межатомным расстоянием.

В зависимости от типа электропроводности полупроводника и соотношения работ выхода в кристалле может возникать обедненный, инверсный или обогащенный слой носителями электрических зарядов.

1. $A_{\text{М}} < A_{\text{П}}$, полупроводник n-типа (рис. 1.23, а). В данном случае будет преобладать выход электронов из металла (M) в полупроводник, поэтому в слое полупроводника около границы раздела накапливаются основные носители (электроны), и этот слой становится обогащенным, т. е. имеющий повышенную концентрацию электронов. Сопротивление этого слоя будет малым при любой полярности приложенного напряжения, и, следовательно, такой переход не обладает выпрямляющими свойствами. Его иначе называют невыпрямляющим переходом.

2. $A_{\text{П}} < A_{\text{М}}$, полупроводник p-типа (рис. 1.24, б). В этом случае будет преобладать выход электронов из полупроводника в металл, при этом в приграничном слое также образуется область, обогащенная основными носителями заряда (дырками), имеющая малое сопротивление. Такой переход также не обладает выпрямляющим свойством.

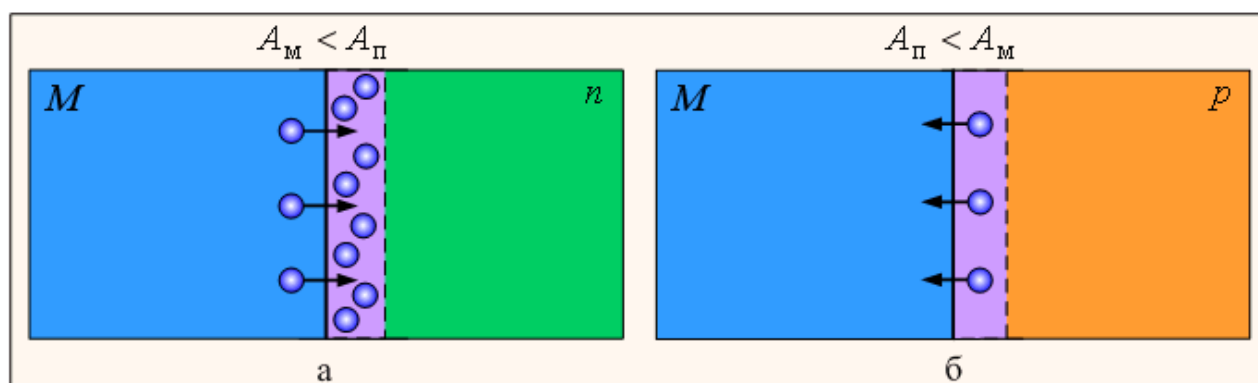


Рис. 1.23. Контакт «металл – полупроводник», не обладающий выпрямляющим свойством

3. $A_{\text{М}} > A_{\text{П}}$, полупроводник n-типа (рис. 1.24, а). При таких условиях электроны будут переходить главным образом из полупроводника в металл и в приграничном слое полупроводника образуется область, обедненная основными носителями заряда и

имеющая большое сопротивление. Здесь создается сравнительно высокий потенциальный барьер, высота которого будет существенно зависеть от полярности приложенного напряжения. Если $A_{\text{П}} \gg A_{\text{М}}$, то возможно образование инверсного слоя (р-типа). Такой контакт обладает выпрямляющим свойством.

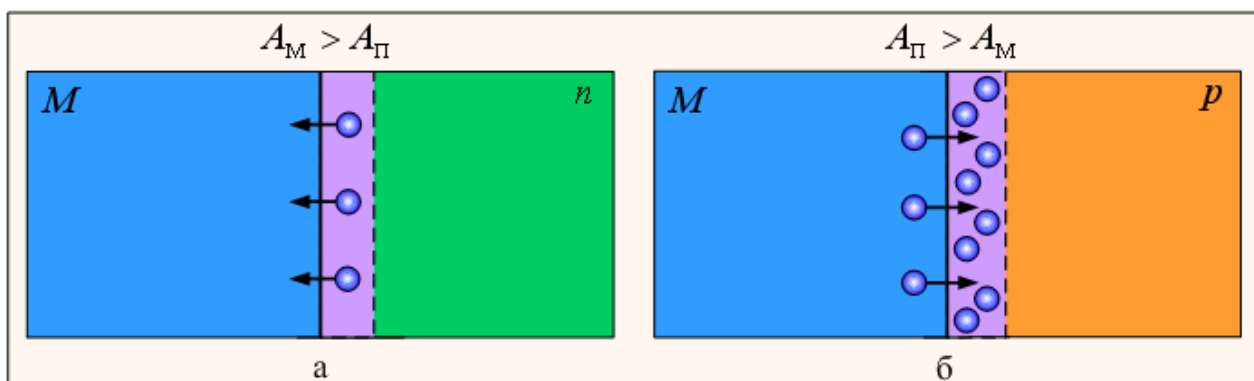


Рис. 1.24. Контакт «металл – полупроводник», обладающий выпрямляющим свойством

4. $A_{\text{П}} > A_{\text{М}}$, полупроводник р-типа (рис. 1.24, б). Контакт образованный при таких условиях обладает выпрямляющим свойством, как и предыдущий.

Отличительной особенностью контакта «металл – полупроводник» является то, что в отличие от обычного р-п-перехода здесь высота потенциального барьера для электронов и дырок разная. В результате такие контакты могут быть при определенных условиях неинжектирующими, т. е. при протекании прямого тока через контакт в полупроводниковую область не будут инжектироваться неосновные носители, что очень важно для высокочастотных и импульсных полупроводниковых приборов.