

4. При одновременном введении в полупроводник донорных и акцепторных примесей характер проводимости (n - или p -тип) будет зависеть от того, какие из примесей создают повышенную концентрацию носителей заряда.

Акцепторные энергетические уровни лежат ниже донорных. Поэтому происходит своеобразная «компенсация примесей»: электроны доноров опускаются на свободные уровни акцепторов, и происходит рекомбинация электронов и дырок. Электроны доноров «закрепляются» на акцепторных атомах, и общее число носителей заряда в полупроводнике уменьшается. Так, например, если в германий с n -типом проводимости, обусловленной донорными примесями, вводится 10% трехвалентной примеси (от числа доноров), то это эквивалентно убыли донорных примесей на 10% — электроны доноров «заполняют дырки», созданные акцепторами. При этом электропроводность германия уменьшится. Наоборот, если в германий p -типа будет введена акцепторная примесь, то его электропроводность увеличится. Это связано с появлением новых свободных уровней, расположенных у верхнего края валентной зоны. На эти уровни будут дополнительно переходить электроны из валентной зоны германия, и число дырок в ней возрастает.

5. В заключение обратим внимание на одно очень существенное отличие свойств носителей заряда в полупроводниках от свойств электронов в металлах. Выше было указано (см. § 13.1), что в металлах число-носителей заряда и их энергия практически не зависят от температуры. В полупроводниках при любом характере их проводимости число носителей заряда значительно меньше, чем в металлах и, что особенно важно, концентрация носителей заряда и их энергия в е с ь м а с и л ь н о з а в и с я т о т т е м п е р а т у р ы: они возрастают при ее повышении.

§ 13.6. Выпрямляющее действие контакта металла с полупроводником

1. Изучение контактных явлений на границе полупроводника и металла привело к открытию **выпрямляющего действия** этого контакта на переменный электрический ток. Для пояснения выпрямляющего действия такого контакта воспользуемся зонной теорией твердых тел.

Рассмотрим вначале более простой случай контакта металлов 1 и 2 с различными работами выхода A_1 и A_2 , т.е. с различной высотой верхнего заполненного электронами энергетического уровня Ферми (рис. 13.17).

Пусть в противоположность тому, что мы предполагали в § 10.2, $A_1 < A_2$. В первом металле электронами заполнены более высокие энергетические уровни, чем во втором. Поэтому электроны будут переходить через поверхность контакта преимущественно в направлении от металла 1 к металлу 2, вследствие чего первый металл заряжается положительно, а второй — отрицательно. Одновременно происходит относительное смещение энергетических уровней электронов в контак-

тирующих металлах. В металле, заряжающемся отрицательно, все уровни смещаются в верх, а в металле, заряжающемся положительно, — вниз. В состоянии равновесия уровни Ферми в обоих металлах совпадают (рис. 13.18).

Это можно доказать, исходя из законов термодинамики (в состоянии устойчивого равновесия свободная энергия системы должна быть ми-

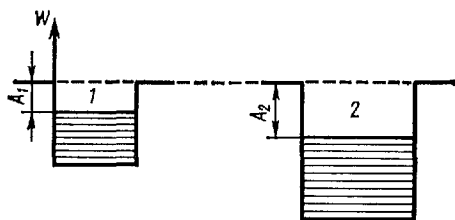


Рис. 13.17

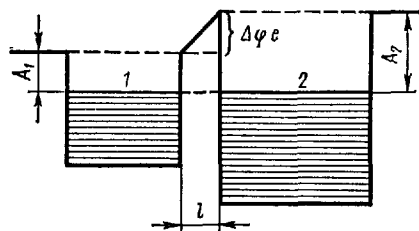


Рис. 13.18

нимальной). Выравнивание уровней Ферми в контактирующих металлах в известной мере аналогично выравниванию уровней однородной жидкости в двух сообщающихся сосудах.

2. Из рис. 13.18 видно, что внешняя контактная разность потенциалов $\Delta\varphi = \Delta\varphi'_{12}$ (см. § 10.1) зависит только от разности работ выхода A_1 и A_2 и выражается формулой (10.3). Если энергия Ферми W_{F1} и W_{F2} двух контактирующих металлов неодинакова, то между металлами имеется внутренняя контактная разность потенциалов, которая в отличие от (10.4), равна

$$\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = (W_{F1} - W_{F2})/e.$$

Изменение потенциала от φ_1 до φ_2 происходит в пределах двойного электрического слоя толщиной l , возникающего у поверхности контакта металлов (рис. 13.19).

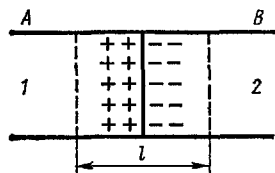


Рис. 13.19

3. Двойной электрический слой (рис. 13.19) подобен плоскому конденсатору, в котором заряды распределены не на поверхности обкладок, а по всему его объему. Принимая в первом приближении, что концентрация n_0 электрических зарядов в двойном слое равна концентрации свободных электронов в металле (10^{22} см⁻³) и что эти заряды целиком сосредоточены на плоскостях A и B , ограничивающих двойной слой, легко найти связь между толщиной l этого слоя и контактной разностью потенциалов $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = q/C,$$

где $q = en_0(l/2)S$ — заряд «пластин» конденсатора AB , S — площадь поверхности контакта, $C = \epsilon_0 S/l$ — емкость конденсатора AB . Таким образом,

$$\Delta\varphi = en_0 l^2 / 2\epsilon_0 \quad \text{и} \quad l = \sqrt{2\epsilon_0 \Delta\varphi / en_0}.$$

Полагая $\Delta\varphi = 1$ В, найдем, что $l \approx 1,6 \cdot 10^{-10}$ м. Следовательно, толщина двойного слоя имеет такой же порядок величины, что и межузельные расстояния в решетке металла.

Следовательно, для создания реально существующих контактных разностей потенциалов в несколько вольт достаточно, чтобы ничтожная доля свободных электронов, имеющих в 1 см^3 металла, перешла из одного металла в другой. Практически это не изменяет удельного сопротивления контактного слоя металлов по сравнению с удельным сопротивлением всего остального их объема. Поэтому электрический ток проходит через контакт двух металлов, так же как и в самих металлах. Иными словами, контактный слой проводит электрический ток в обоих направлениях ($1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 1$) одинаково хорошо и не дает эффекта выпрямления, который всегда связан с одной стороной проводимостью.

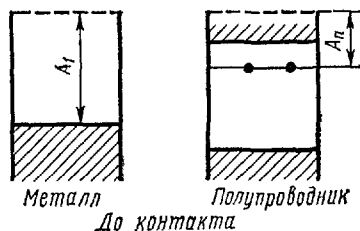


Рис. 13.20

4. Рассмотрим теперь более важный случай контакта металла с полупроводником. Для определенности выберем полупроводник n -типа. Сделаем важное для дальнейшего предположение, что работа выхода A_1 электрона из металла больше, чем его работа выхода A_n из n -полупроводника. Расположение зоны проводимости металла, целиком заполненной зоны полупроводника и его донорных уровней до контакта показано на рис. 13.20. При соприкосновении металла с полупроводником электроны с донорных уровней будут переходить в металл. Приконтактный слой n -полупроводника обеднится электронами и зарядится положительно, а металл получит отрицательный заряд. Между металлом и полупроводником образуется двойной электрический слой. Однако условия для создания этого слоя существенно иные, чем в случае контакта двух металлов. Это связано со значительно меньшей концентрацией электронов проводимости в n -проводнике по сравнению с металлом (10^{15} см^{-3} вместо 10^{22} см^{-3}). В поверхностном слое полупроводника площадью в 1 см^2 и толщиной около 10^{-8} см находится 10^7 электронов. Если рассматривать двойной слой как плоский конденсатор, то можно показать, что при толщине двойного слоя, равной 10^{-8} см , на границе металла с полупроводником создавалась бы ничтожная разность потенциалов $\Delta\varphi$ порядка 10^{-3} В. Между тем из опытов известно, что $\Delta\varphi$ составляет несколько вольт. Это соответствует толщине контактного слоя $l \approx 10^{-4} \text{ см}$. Таким образом, вследствие сравнительно малой концентрации электронов проводимости в полупроводнике толщина контактного слоя в нем приблизительно в 10 000 раз больше, чем в металле.

5. В контактном слое полупроводника почти нет свободных электронов. Поэтому электрическое сопротивление этого слоя значительно больше, чем остального объема полупроводника. Такой слой называется запирающим слоем. Он является причиной выпрямляющего

(«вентильного») действия контакта металла с полупроводником на переменный ток.

Рассмотрим подробнее влияние направления внешнего электрического поля на размеры и сопротивление контактного слоя. Если поле направлено от металла к полупроводнику¹, то электроны втягиваются из объема полупроводника в контактный слой, что приводит к уменьшению его толщины l и сопротивления. В этом направлении, называемом **пропускным**, ток может проходить через контакт металла с полупроводником. Если же внешнее поле направлено от полупроводника к металлу, то электроны вытесняются из двойного слоя в глубь полупроводника, увеличивая толщину запирающего слоя и его сопротивление. В этом направлении контакт металла с полупроводником практически не пропускает тока. Это направление называется **запирающим**. Таким образом, контакт металла с n -полупроводником обладает односторонней проводимостью и выпрямляет переменные токи.

Кроме примера, который мы рассмотрели, возможен случай, когда n -полупроводник имеет большую работу выхода, чем металл ($A_n > A_1$). При этом электроны переходят из металла в полупроводник и сопротивление контактного двойного слоя будет меньше, чем остального объема полупроводника. Контакт металла с таким полупроводником не образует запирающего слоя и не оказывает выпрямляющего действия на переменные токи.

§ 13.7. Понятие о полупроводниковых диодах

1. Рассмотрим явления, которые происходят при соприкосновении двух полупроводников. Наибольший практический интерес представляет контакт двух полупроводников с разными типами примесной проводимости. Этот контакт является основой работы полупроводниковых приборов.

Граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой — дырочную проводимость, называется **электронно-дырочным переходом** (p - n -переход). Он может быть осуществлен в одном и том же кристалле полупроводника, если в нем из соответствующих примесей созданы области различной (n и p) проводимости. Обычно области различной проводимости полупроводника создают либо обработкой однородных монокристаллов, либо при выращивании монокристаллов. Так, если при выращивании монокристалла германия в расплавленный металл вводить необходимые примеси, то получается монокристалл, в котором имеются последовательно расположенные области с различным типом проводимости. В однородном монокристалле германия p - n -переход можно создать при местной термической обработке. Если германий нагреть до 850°C и затем

¹ Это означает, что металл соединен с положительным полюсом источника тока, а полупроводник — с отрицательным.