

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Контактные явления – происходящие на границах областей с различными свойствами. Различают:

- 1) ***pn-переходы – электронно-дырочные переходы*** – между областями с ***различным типом электропроводности*** (т.е. между областями донорного и акцепторного полупроводника).
- 2) Переходы между областями с одним и тем же типом электропроводности, но с ***различной концентрацией примеси***:
 - а. ***p⁺p-переходы*** – дырочно-дырочные переходы;
 - б. ***n⁺n-переходы*** – электронно-электронные переходы.

Здесь p⁺ и n⁺ - области с большим значением концентрацией примеси (их называют *высоколегированными* областями).

- 3) Переходы между областями веществ ***различного класса*** – между полупроводником и металлом.

Образование симметричного pn-перехода

Симметричным называется pn-переход, возникающий между областями акцепторного и донорного полупроводника с одинаковыми концентрациями примесей: $N_a=N_d$.

Рассмотрим численный пример. Допустим, в исходный полупроводник с собственной концентрацией носителей заряда $p_i=n_i=10^{13} \text{ см}^{-3}$ вносятся примеси $N_a=N_d=10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Для рабочего диапазона температур характерно то, что концентрация основных носителей заряда примерно равна концентрации соответствующей примеси –

$$p_p \approx N_a; \quad n_n \approx N_d.$$

Для донорного полупроводника из постоянства произведений концентраций носителей

$$p_n n_n = p_i n_i$$

получаем концентрацию неосновных носителей.

$$p_n = \frac{p_i n_i}{n_n} = \frac{p_i n_i}{N_d} = \frac{10^{13} \cdot 10^{13}}{10^{18}} = 10^8$$

Для акцепторного полупроводника из постоянства произведений концентраций носителей

$$p_p n_p = p_i n_i$$

получаем концентрацию неосновных носителей

$$n_p = \frac{p_i n_i}{p_p} = \frac{p_i n_i}{N_a} = \frac{10^{13} \cdot 10^{13}}{10^{18}} = 10^8.$$

Проанализируем полученные числовые значения для каждого носителя заряда. Так, для электронов в донорном полупроводнике концентрация составляет $n_n=10^{18}$, в акцепторном – $n_p=10^8$. Иными словами, в донорном полупроводнике в единице объема свободных электронов в 10 000 000 000 (10 миллиардов) раз больше, чем в акцепторном. Поэтому на границе раздела областей донорного и акцепторного полупроводника возникает направленное движение электронов из донорной области в акцепторную, т.е. из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией. Такое движение называется диффузионным.

Так, для дырок в акцепторном полупроводнике концентрация составляет $n_n=10^{18}$, в донорном – $n_p=10^8$. Иными словами, в акцепторном полупроводнике в единице объема вакансий в 10 000 000 000 (10 миллиардов) раз больше, чем в донорном. Поэтому на границе раздела областей донорного и акцепторного полупроводника возникает диффузионное движение дырок из акцепторной области в донорную.

Таким образом, в результате диффузии основные носители оказываются выброшенными в соседнюю область, где они становятся неосновными носителями. Поэтому на границе между донором и акцептором нарушается изначальный баланс между ионами примеси и основными носителями – основные носители выброшены, а ионы, естественно, остались на своих местах (в узлах кристаллической решетки). Со стороны донорной области это будет слой нескомпенсированных положительных, а со стороны акцепторной области – слой нескомпенсированных отрицательных ионов. Они образуют так называемый запирающий слой pn-перехода.

Термин «запирающий» отражает тот факт, что ионы «сопротивляются» диффузионному движению основных носителей в соседнюю область.

Кроме того, слой pn-перехода часто называют обедненным слоем. Термин «обедненный» отражает тот факт, что он практически не содержит ос-

новых носителей, вытесненных за счет диффузии в соседний слой: из донорной области ушли электроны, из акцепторной – дырки.

Нескомпенсированные ионы примеси в силу своего заряда притягивают недостающие им носители заряда из соседней области (свои «проскакивают мимо» из-за диффузии). Начинается встречное с диффузией дрейфовое движение неосновных носителей, обусловленное статическим полем объемного заряда: из акцепторной области в донорную возвращаются электроны, из донорной области в акцепторную дрейфуют дырки.

Конкретному значению температуры соответствует определенная интенсивность этих двух уравнивающих друг друга потоков носителей заряда – диффузионного и дрейфового. В целом кристалл полупроводника остается электрически нейтральным. Этому состоянию соответствует на вольт-амперной характеристике полупроводникового диода точка, совпадающая с началом координат.

Слои нескомпенсированных ионов примеси (положительных со стороны донорного полупроводника и отрицательных со стороны акцепторного) можно сравнить с обкладками конденсатора. Естественно, численная величина объемного заряда с обеих сторон одинакова, заряды противоположны, как в любом конденсаторе.

Поэтому количество положительных нескомпенсированных ионов в полупроводнике n-типа и отрицательных нескомпенсированных ионов в полупроводнике p-типа будет одинаковым.

В рассматриваемом случае концентрация акцепторной и донорной примесей одинакова. Иными словами, количество ионов примесей обоих знаков в единице объема с обеих сторон от границы раздела областей с различным типом электропроводности одинаково. Следовательно, толщина рп-перехода распределена равномерно между донорным и акцепторным полупроводником:

$$l_a = l_d.$$

Симметричный рп-переход не представляет практической ценности, поскольку не обеспечивает вентильных свойств.

Образование несимметричного рп-перехода

Несимметричным называется рп-переход, возникающий между областями акцепторного и донорного полупроводника с неодинаковыми концентрациями примесей. Наиболее востребованным оказался случай, когда концентрация акцепторной примеси значительно выше концентрации донорной примеси:

$$N_a \gg N_d.$$

Рассмотрим численный пример. Допустим, в исходный полупроводник с собственной концентрацией носителей заряда $p_i = n_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ вносятся примеси $N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Независимо от соотношения концентраций примесей, для рабочего диапазона температур характерно то, что концентрация основных носителей заряда примерно равна концентрации соответствующей примеси –

$$p_p \approx N_a; \quad n_n \approx N_d.$$

Для донорного полупроводника произведение концентраций носителей осталось таким же –

$$p_n n_n = p_i n_i.$$

Так же, как в случае симметричного рп-перехода, получаем концентрацию неосновных носителей:

$$p_n = \frac{p_i n_i}{n_n} = \frac{p_i n_i}{N_d} = \frac{10^{13} \cdot 10^{13}}{10^{15}} = 10^{11}$$

Для акцепторного полупроводника из постоянства произведений концентраций носителей

$$p_p n_p = p_i n_i$$

получаем концентрацию неосновных носителей

$$n_p = \frac{p_i n_i}{p_p} = \frac{p_i n_i}{N_a} = \frac{10^{13} \cdot 10^{13}}{10^{18}} = 10^8.$$

Проанализируем полученные числовые значения для каждого носителя заряда.

Так, для электронов в донорном полупроводнике концентрация составляет $n_n=10^{15}$, в акцепторном – $n_p=10^8$. Иными словами, в донорном полупроводнике в единице объема свободных электронов в $10^7=10\,000\,000$ (10 миллионов) раз больше, чем в акцепторном. Поэтому на границе раздела областей донорного и акцепторного полупроводника возникает диффузия.

Так, для дырок в акцепторном полупроводнике концентрация составляет $p_p=10^{15}$, в донорном – $p_n=10^8$. Иными словами, в акцепторном полупроводнике в единице объема вакансий в $10\,000\,000$ (10 миллионов) раз больше, чем в донорном. Поэтому на границе раздела областей донорного и акцепторного полупроводника возникает диффузионное движение дырок из акцепторной области в донорную. Видно, что отношение концентраций одного и того же носителя одно и то же и составляет 10^7 раз.

Конкретному значению температуры соответствует определенная интенсивность этих двух уравнивающих друг друга потоков носителей заряда – диффузионного и дрейфового. В целом кристалл полупроводника остается электрически нейтральным. Этому состоянию соответствует на вольт-амперной характеристике полупроводникового диода точка, совпадающая с началом координат.

Как и в случае симметричного рп-перехода, количество положительных нескомпенсированных ионов в полупроводнике n-типа и отрицательных нескомпенсированных ионов в полупроводнике р-типа будет одинаковым.

В рассматриваемом случае концентрация акцепторной примеси значительно больше концентрации донорной примеси. Иными словами, количество ионов в единице объема для акцепторной примеси больше, чем для донорной. Поэтому ионы акцепторной примеси располагаются друг от друга на меньших расстояниях, чем ионы донорной примеси. Поэтому одно и то же количество нескомпенсированных ионов в акцепторной области займет меньший объем, чем нескомпенсированные ионы в донорной области. Следовательно, толщина рп-перехода распределена неравномерно между донорным и акцепторным полупроводником:

$$l_a \ll l_d.$$