

Лекция 2

Электрические процессы в р-п-переходе в отсутствие внешнего напряжения

1. Время жизни носителей заряда
2. Дрейфовое движение носителей заряда.
3. Диффузионное движение носителей заряда.
4. Электрические процессы в *р-п*-переходе в отсутствие внешнего напряжения
5. Контактная разность потенциалов

Время жизни носителей заряда

$$p_0 = p_n + \Delta p(0)$$

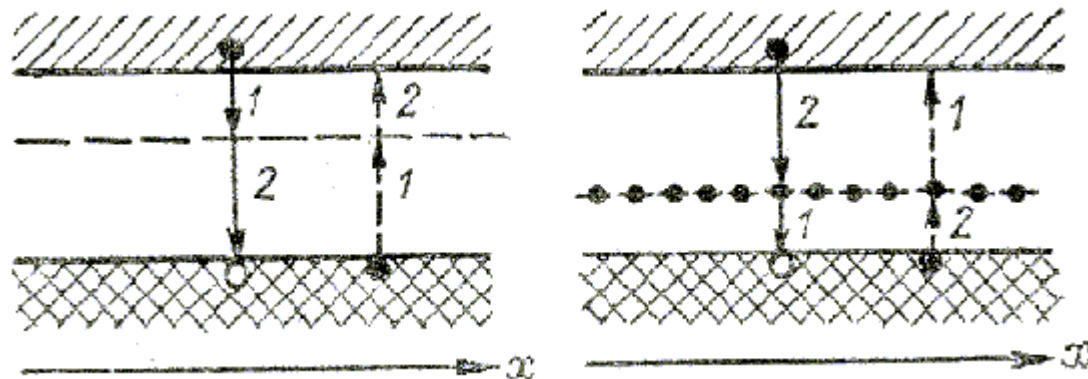
$$n_0 = n_n + \Delta n(0)$$

$$p_0/p_n \gg n_0/n_n \quad n_n \gg p_n$$

Спад начальной концентрации дырок $\Delta p(0)$: $\Delta p(t) = \Delta p(0) e^{-t/\tau_p}$

τ_p — характеристическая постоянная, называемая **временем жизни дырок** в электронном полупроводнике

Рекомбинационные ловушки - это примеси и дефекты, создающие в запрещенной зоне энергетические уровни $W_{рл}$, расположенные ближе к середине запрещенной зоны и способные поочередно захватывать носители заряда, как одного, так и другого знака. Таким образом обеспечивается переход электронов из зоны проводимости в валентную зону.



Дрейфовое движение носителей заряда

- **Дрейф** (дрейфовое движение) - направленное движение носителей заряда под воздействием электрического поля.
- **Диффузия** (диффузионное движение) - направленное движение носителей заряда под воздействием разности концентраций носителей заряда.

дрейфовый и диффузионный токи в полупроводниках

Скорость перемещения носителей заряда в кристалле:

$$v_{cp.n} = -\mu_n E \quad v_{cp.p} = \mu_p E$$

μ_n μ_p - подвижность электронов и дырок

$\mu_n > \mu_p$ для германия $\mu_n = 3800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $\mu_p = 1800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

Дрейфовое движение носителей заряда

Плотности дрейфовых составляющих тока в кристалле

$$J_{\text{др } n} = -qnv_{\text{ср. } n}$$

$$J_{\text{др } p} = qpv_{\text{ср. } p}$$

n, p — концентрации электронов и дырок в объеме полупроводника

$$J_{\text{др } n} = qn\mu_n E$$

$$J_{\text{др } p} = qp\mu_p E$$

Суммарная плотность тока, протекающего через полупроводник

$$J = J_{\text{др}} = J_{\text{др } n} + J_{\text{др } p} = qn\mu_n E + qp\mu_p E$$

В электронном полупроводнике дрейфовый ток обуславливается преимущественно электронами, а в дырочном — дырками.

В чистых полупроводниках плотность тока и проводимость увеличиваются с ростом температуры вследствие повышения концентрации носителей заряда. В примесных полупроводниках в рабочем диапазоне температур концентрация носителей заряда мало изменяется, так как ее определяет главным образом концентрация основных носителей заряда, созданная примесью (все атомы примеси ионизированы). В связи с этим плотность тока и проводимость здесь с ростом температуры несколько уменьшаются вследствие уменьшения подвижности ($\mu = T^{-3/2}$).

Диффузионное движение носителей заряда

Диффузионное движение носителей заряда возникает, когда имеется различие в концентрации электронов (дырок) в соседних слоях полупроводника. Носители заряда перемещаются **из слоя с большей концентрацией в слой с меньшей концентрацией**. Плотности потоков носителей заряда пропорциональны градиенту их концентрации

$$J_{\text{диф } n} = (-q)D_n \left(-\frac{dn}{dx} \right) = qD_n \frac{dn}{dx} \quad J_{\text{диф } p} = qD_p \left(-\frac{dp}{dx} \right) = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$(D_n), (D_p)$ - коэффициенты диффузии электронов и дырок

Коэффициент диффузии равен числу носителей заряда, диффундирующих за 1 с через площадку в 1 см² при единичном градиенте концентрации, размерность см²/с.

Соотношение Эйнштейна $D = \phi_T \mu$, $\phi_T = kT/q$ — тепловой потенциал

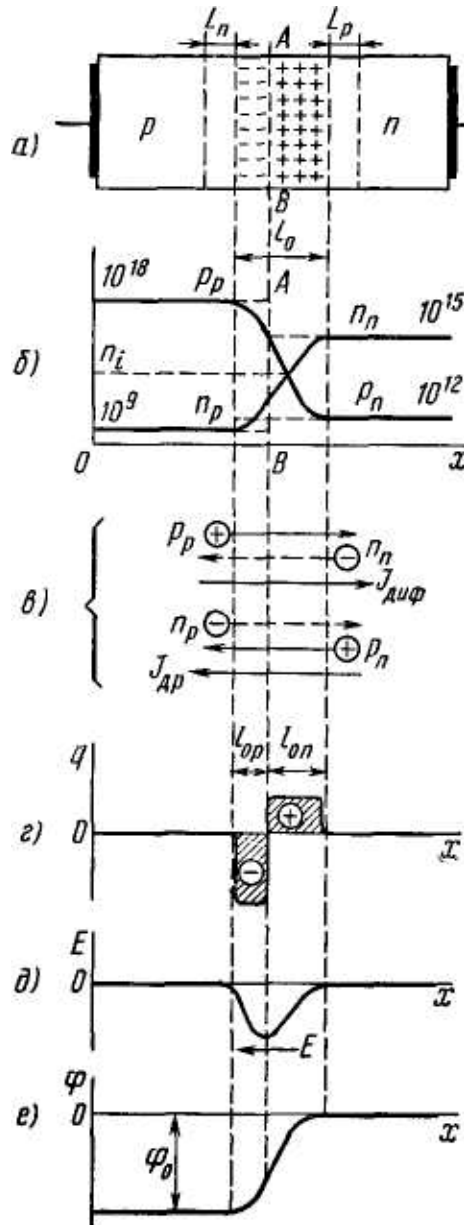
В кремнии при комнатной температуре $D_n = 32$ см²/с, $D_p = 12$ см²/с.

Диффузионная длина - расстояние, на котором избыточная концентрация носителей заряда уменьшается в e раз.

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

Электрические процессы в p - n -переходе в отсутствие внешнего напряжения



двухслойная p - n -структура

Распределение концентраций носителей заряда

диффузионный и дрейфовый токи

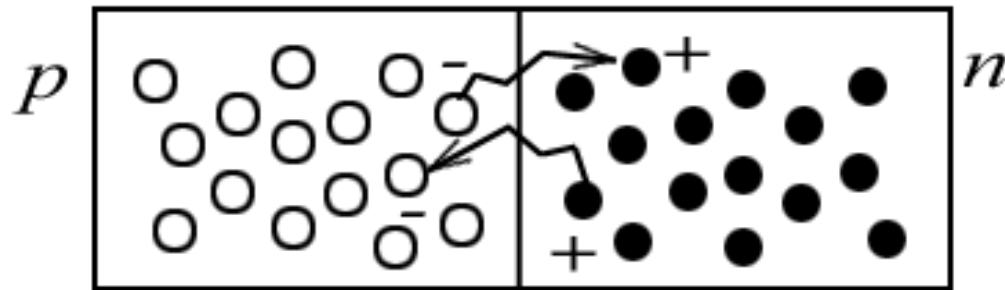
Кривая распределения объемного заряда в p - n -переходе

Электрическое поле перехода

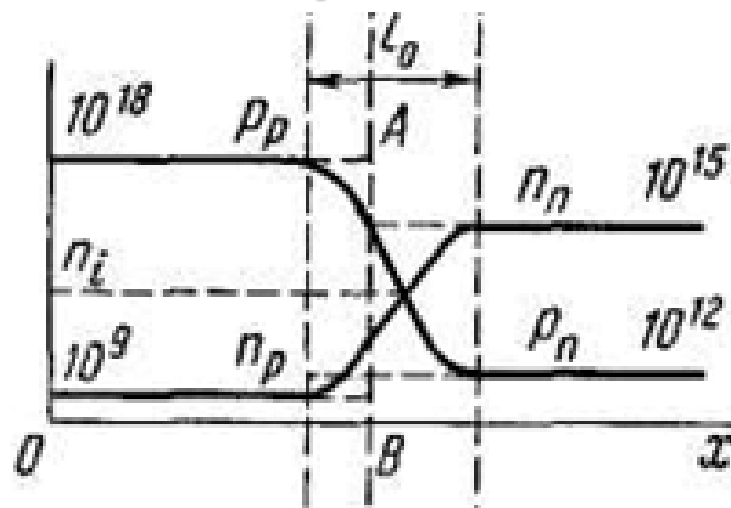
Распределение потенциала в перехода в p - n -переходе $\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{p_p}{p_n} = \varphi_T \ln \frac{n_n}{n_p}$

p-n-переход

Полупроводниковым p-n-переходом называют тонкий слой, образующийся в месте контакта двух областей полупроводников **акцепторного** и **донорного** типов. Обе области полупроводника, изображенные на рисунке, электрически нейтральны, поскольку как сам материал полупроводника, так и примеси электрически нейтральны. Отличия этих областей - в том, что левая из них содержит свободно перемещающиеся дырки, а правая свободно перемещающиеся электроны.



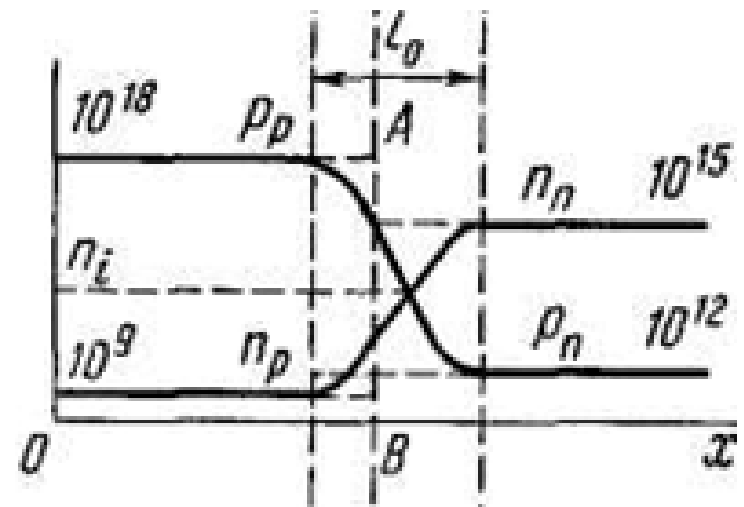
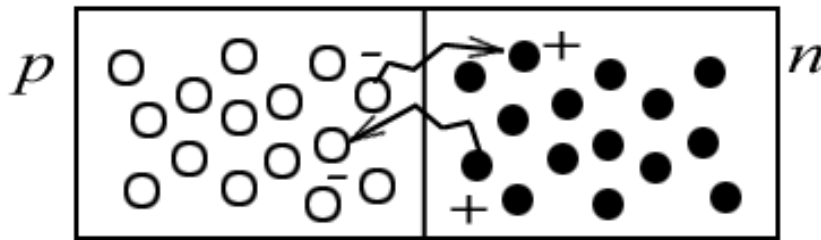
Распределение концентраций носителей заряда



Наибольшее распространение получили p - n -структуры с неодинаковой концентрацией внесенных акцепторной N_a и донорной N_d примесей, т.е. с неодинаковой концентрацией основных носителей заряда в слоях $p_p \approx N_a$ и $n_n \approx N_d$. Типичными являются структуры с $N_a \gg N_d$ ($p_p \gg n_n$). Распределение концентраций носителей заряда для таких структур показано на рисунке на примере германия, где приняты $p_p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $n_n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Концентрация собственных носителей заряда в германии при комнатной температуре $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Концентрации неосновных носителей заряда, существенно меньшие концентраций основных носителей заряда, составят для рассматриваемой структуры $n_p = 10^9 \text{ см}^{-3}$.

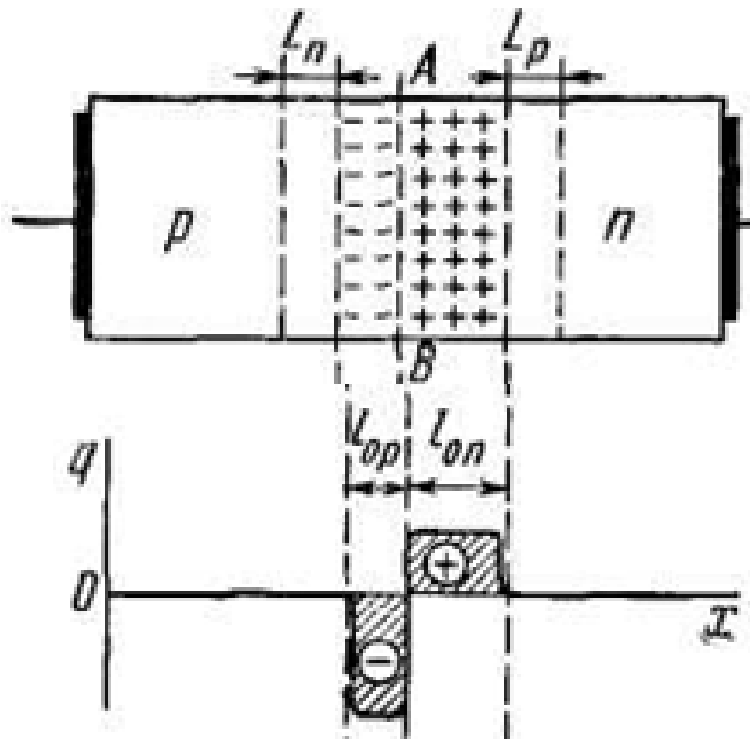
Процессы в p - n -переходе

В приграничной области под действием разности концентраций возникает диффузионное движение основных носителей заряда во встречном направлении через границу раздела. Дырки из p -области диффундируют в n -область, электроны из n -области—в p -область. Дырки, вошедшие в n -область, рекомбинируют с электронами этой области, а электроны, вошедшие в p -область, — с дырками p -области. Вследствие двух факторов (ухода основных носителей заряда из приграничных областей и их рекомбинации с носителями заряда противоположного знака) концентрации основных носителей заряда (p_p и n_n) в обеих приграничных областях, суммарная ширина которых l_0 , снижаются. Кроме того, снижение концентрации носителей заряда одного знака сопровождается повышением концентрации носителей заряда другого знака. Вследствие этого в приграничной p -области повышается концентрация электронов, а в приграничной n -области — концентрация дырок.



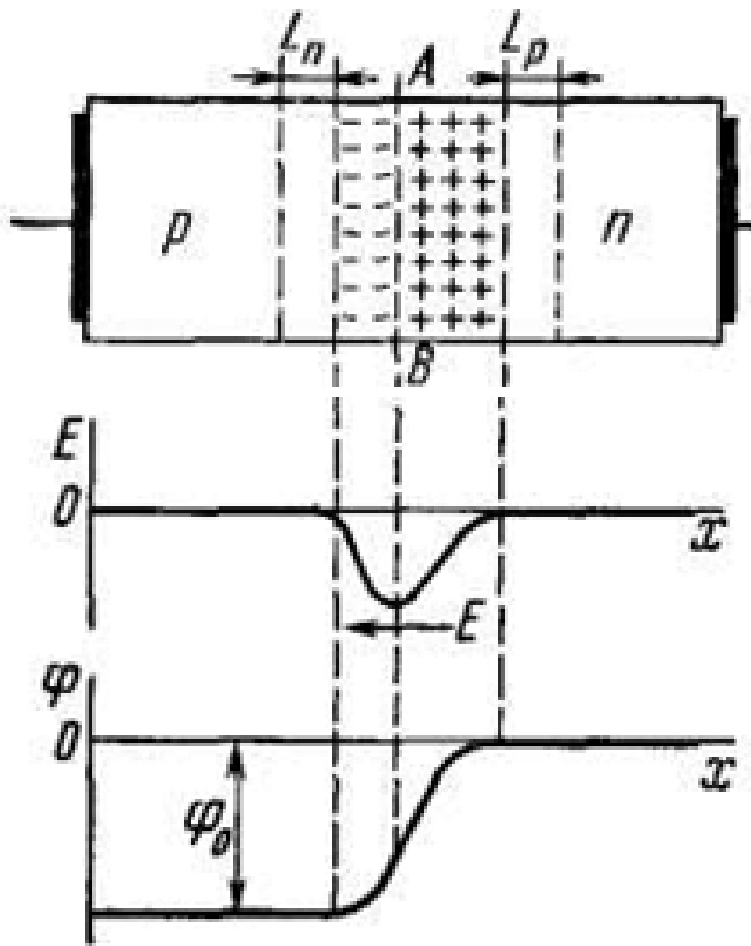
Формирование объемных зарядов

Важнейшим следствием диффузионного движения носителей заряда через границу раздела слоев является появление в приграничных областях **объемных зарядов**, создаваемых ионами атомов примесей. Так, при уходе дырок из p -слоя в нем создается некомпенсированный отрицательный объемный заряд за счет оставшихся отрицательных ионов акцепторных атомов примеси. Электроны же, ушедшие из n -слоя, оставляют здесь некомпенсированный положительный объемный заряд, создаваемый положительными ионами донорных атомов примеси.



Электрическое поле и разность потенциалов

Ввиду наличия объемного заряда в p - n -переходе создаются электрическое поле и разность потенциалов.



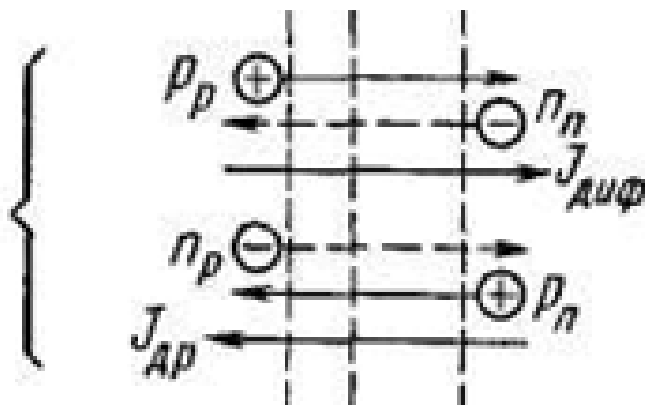
Внутреннее электрическое поле, созданное объемными зарядами, является фактором, под действием которого обеспечивается равенство потоков носителей заряда через переход в обоих направлениях.

Это обуславливается тем, что внутреннее электрическое поле с потенциальным барьером φ_0 создает тормозящее действие для основных и ускоряющее — для неосновных носителей заряда.

Таким образом, внутреннее электрическое поле приводит к уменьшению плотности диффузионного тока $J_{\text{диф}}$ через переход и появлению встречного ему дрейфового тока плотностью $J_{\text{др}}$.

Диффузионный и дрейфовый токи

Плотность диффузионного тока $J_{\text{диф}}$, обусловленного основными носителями заряда направлена вдоль оси x и состоит из потока дырок, перемещающихся под действием диффузии из p -области в n -область, и потока электронов, диффундирующих из n -области в p -область.



Плотность дрейфового тока $J_{\text{др}}$ создается неосновными носителями заряда прилегающих к p - n -переходу слоев с толщиной, равной диффузионной длине: L_n — для электронов p -слоя и L_p — для дырок n -слоя.

Контактная разность потенциалов

Равенству нулю тока через переход в отсутствие внешнего напряжения соответствует уменьшение диффузионной составляющей тока до величины его дрейфовой составляющей. Равенство составляющих тока $J_{\text{диф}} = J_{\text{др}}$ создается установлением соответствующей величины потенциального барьера φ_0 в p - n -переходе.

Величина потенциального барьера φ_0 (**контактная разность потенциалов**):

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{p_p}{p_n} = \varphi_T \ln \frac{n_n}{n_p}$$

Более сильное влияние температуры на концентрацию неосновных носителей заряда, чем влияние на величину φ_T , приводит к тому, что с ростом температуры высота потенциального барьера уменьшается. При комнатной температуре для германия $\varphi_0 = 0,3 \div 0,5$ В, а для кремния $\varphi_0 = 0,6 \div 0,8$ В.