第１２回　pn 接合

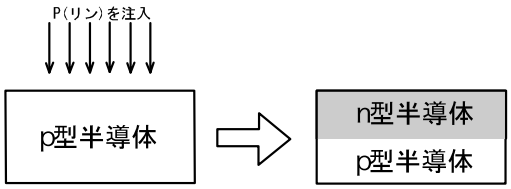
※本日の講義のポイント

ｐ型半導体とｎ型半導体を結晶レベルで接合させたｐｎ接合において、ｐｎ接合の形成過程、バンド図の物理的意味、バンド図の描き方を理解する。

ｐｎ接合の作製法

イオン打ち込みと呼ばれる手法や熱拡散法と呼ばれる手法により不純物を過剰に注入することで作製される。

例）

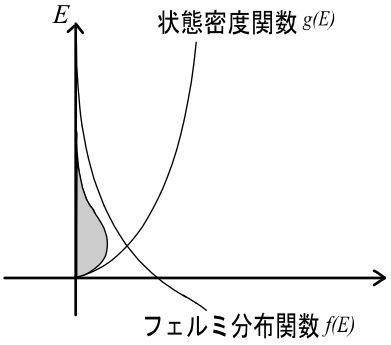


pn 接合における現象の理解

(a) キャリアの濃度

バンドにおける電子・正孔分布＝$f(E)\times g(E)$

($g(E)\propto E^{1/2}$)

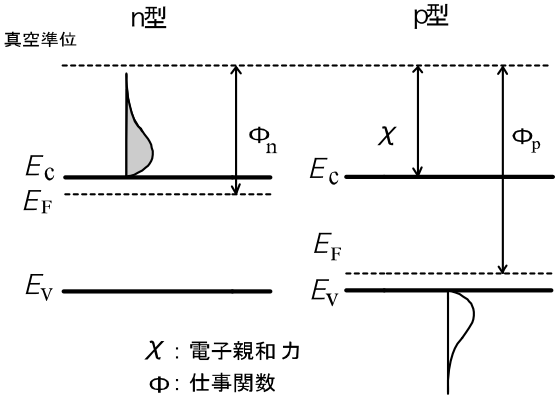


(b) 接合の過程

（ｉ）ｐ型ｎ型それぞれの真空準位をそろえたバンド図が描かれる。

（等しい材料を用いていると仮定

→E_c, E_v は左右で等しい）



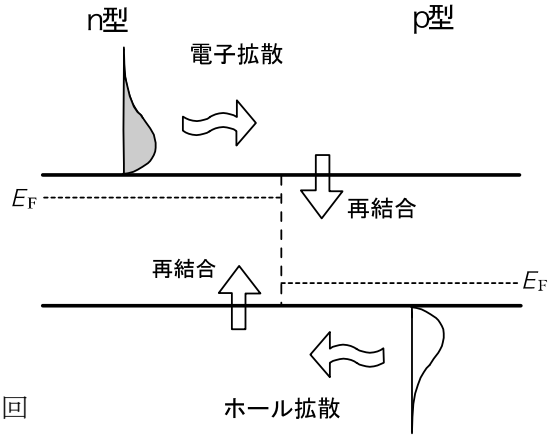
（ii）ｐ型ｎ型を接合させた瞬間、電子分布の偏り、正孔分布の偏りが発生

→電子・正孔は**拡散**する

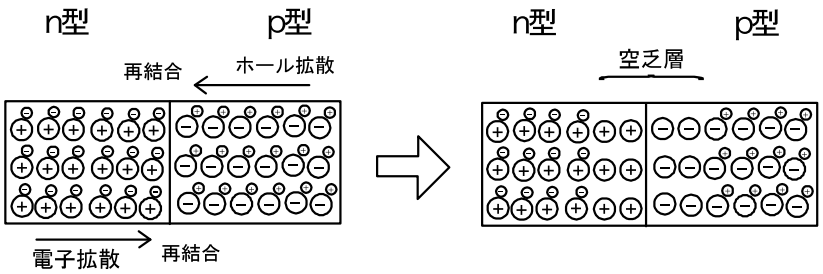
（iii）拡散した電子と正孔の対が結合する。

（**再結合**）

→イオンのみ存在する**空乏層**が形成される。



ドナー原子とアクセプター原子の不純物原子モデルで表す。



（ⅳ）空乏層内固定電荷：

アクセプターイオンとドナーイオン

空間電荷層そ形成

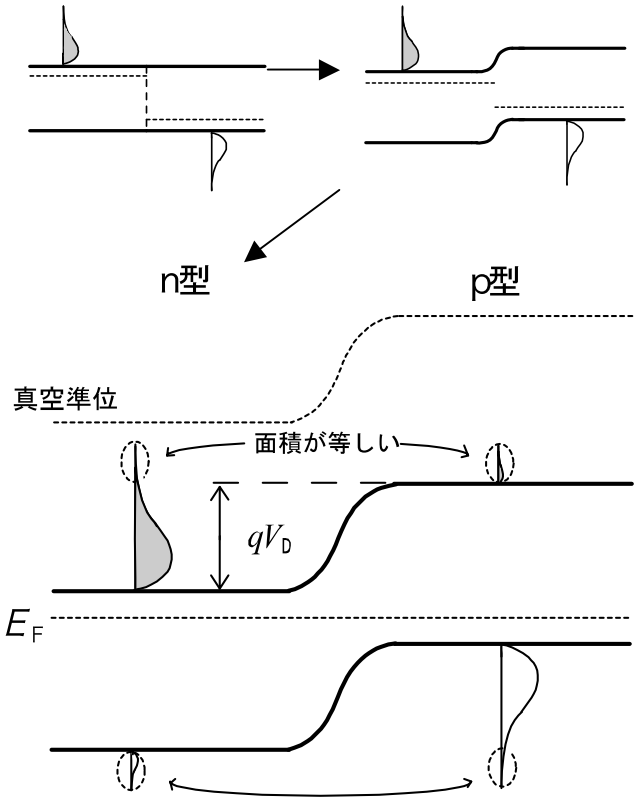
→電界が発生

→ポテンシャルが曲がる

＝バンド図が曲がる

→拡散とドリフトがバランスし、

熱平衡状態になる



ｎ型の少数キャリアである正孔と

同じエネルギーを持つ

ｐ型の多数キャリアである正孔の

濃度は同じになる。

同様に、

ｐ型の少数キャリアである電子と

同じエネルギーを持つ

ｎ型の電子濃度は同じになる。

拡散（内蔵）電位　V_D：

接合直後のフェルミ準位の差

＝バンドの曲がり

注意）ｐｎそれぞれの領域でのフェルミ準位は電子と正孔の分布状態を示す指標であるが、

バンド図の空乏層におけるフェルミ準位は必ずしもそれを表してはいない。

(c) バンド図の曲がり（空乏層）の定量的議論

・拡散電位 V_D の導出

接合前のｐ層のフェルミ準位とｎ層のフェルミ準位を一致させるように拡散電位 V_D は生じる

ｐ層ｎ層それぞれの物性値→フェルミ準位を求め、差を素電荷ｑで割る。

定義：接合前のｎ層のフェルミ準位 E_{Fn}、ｐ層のフェルミ準位 E_{Fp}

$$E_{Fn}:\ n = N_C \exp(-\frac{E_C - E_{Fn}}{kT}) \leftrightarrow E_{Fn} = E_C - kT\ln\frac{N_C}{n}$$

$$E_{Fp}:\ p = N_V \exp(-\frac{E_{Fp} - E_V}{kT}) \leftrightarrow E_{Fp} = E_V + kT\ln\frac{N_V}{p}$$

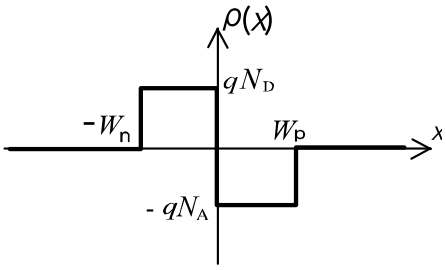
拡散電位：$V_D = \dfrac{E_{Fn} - E_{Fp}}{q}$

・ポテンシャル形状 $\phi(x)$ の導出

ｐｎ接合に電圧 V を印加することを仮定する（V の極性はｐ側に正、ｎ側に負の電位）

① ポアソンの方程式：

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$



②電荷密度分布の仮定：階段接合近似(右図)

③境界条件：両端での電圧

：ポテンシャルは滑らかに連続

④定義：ｎ側空乏層幅 W_n，ｐ側空乏層幅 W_p

ポテンシャル基準点 $\phi(-W_n) = 0$

x 軸の基準点＝ｐｎ接合界面

ポアソン方程式と電荷密度分布の仮定より

$$\begin{cases} x \le -W_n & : \dfrac{d^2\phi}{dx^2} = 0 & \rightarrow \phi_1 \text{とおく} \\ -W_n \le x \le 0 & : \dfrac{d^2\phi}{dx^2} = -\dfrac{qN_D}{\varepsilon_r\varepsilon_0} & \rightarrow \phi_2 \text{とおく} \\ 0 \le x \le W_p & : \dfrac{d^2\phi}{dx^2} = \dfrac{qN_A}{\varepsilon_r\varepsilon_0} & \rightarrow \phi_3 \text{とおく} \\ W_p \le x & : \dfrac{d^2\phi}{dx^2} = 0 & \rightarrow \phi_4 \text{とおく} \end{cases}$$

境界条件より

$$
\begin{cases}
x=-W_n & \phi_1(-W_n)=\phi_2(-W_n) & \phi_1'(-W_n)=\phi_2'(-W_n) \\
x=0 & \phi_2(0)=\phi_3(0) & \phi_2'(0)=\phi_3'(0) \\
0\le x\le W_p & \phi_3(W_p)=\phi_4(W_p) & \phi_3'(W_p)=\phi_4'(W_p) \\
x=-\infty & \phi_1(-\infty)=0 & \\
x=\infty & \phi_4(\infty)=(V-V_D) &
\end{cases}
$$

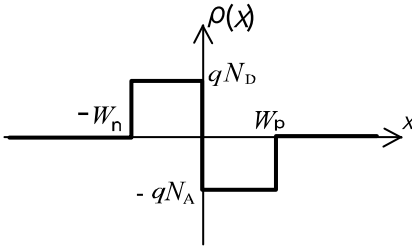
両端の x 座標±∞における条件の意味

・ｐｎ接合した半導体の長さが、形成される空乏層よりも長い。

・この両端の領域において、ポテンシャルは発散しない→$\phi_1'=\phi_4'=0$

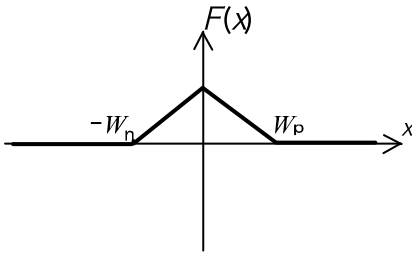
未知数：積分定数６つ　W_n　W_p　の計８つ
条件式: ８つ

→全て解析的に求まる



・ポテンシャル分布

$$
\begin{cases}
\phi_1=0 \\
\phi_2=-\dfrac{qN_D}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}(x+W_n)^2 \\
\phi_3=\dfrac{qN_A}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}(x-W_p)^2-\dfrac{q}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}(N_AW_p^2+N_DW_n^2) \\
\phi_4=(V-V_D)
\end{cases}
$$

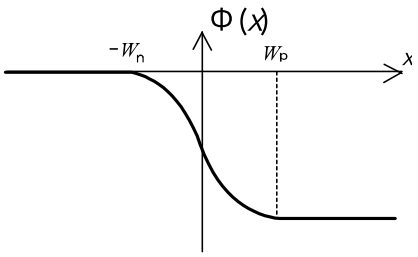


ただし、ｎ層の空乏層内の全電荷量がｐ層内の空乏層内の全電荷量と等しいので、$N_DW_n=N_AW_p$ の関係が成り立つ。この条件は、電荷中性条件に相当する。

また、$\phi_3(W_p)=\phi_4(W_p)$ より、$-V+V_D=\dfrac{q}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}(N_AW_p^2+N_DW_n^2)$ が成り立つ。

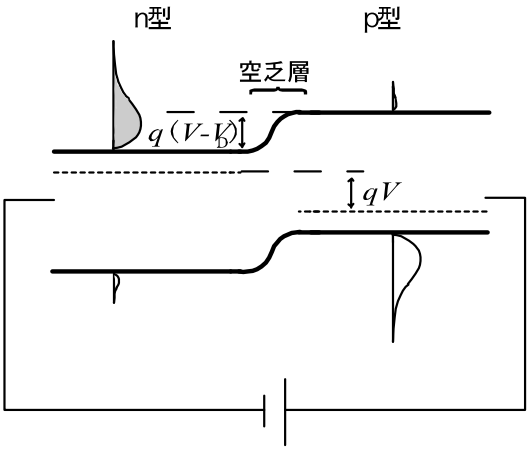
・空乏層幅 W

$$
\begin{cases}
W_n = \left[\dfrac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{qN_D}\dfrac{N_A}{N_A+N_D}(V_D-V)\right]^{\frac{1}{2}} \\[2ex]
W_p = \left[\dfrac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{qN_A}\dfrac{N_D}{N_A+N_D}(V_D-V)\right]^{\frac{1}{2}} \\[2ex]
W = W_n + W_p = \left[\dfrac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{q}\left(\dfrac{1}{N_A}+\dfrac{1}{N_D}\right)(V_D-V)\right]^{\frac{1}{2}}
\end{cases}
$$

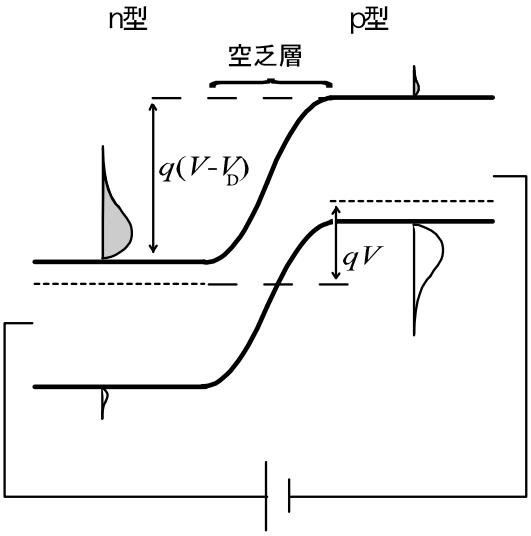


接合容量　$C = \dfrac{\varepsilon_0\varepsilon_r}{W} = \left[\dfrac{q\varepsilon_r\varepsilon_0 N_A N_D}{2q(N_A+N_D)(V_D-V)}\right]^{\frac{1}{2}}$

・電圧印加時のバンド図



順方向バイアス（$V>0$）



逆方向バイアス（$V<0$）