第１３回　pn 接合の電流－電圧特性（ダイオード特性）

※本日の講義のポイント

ｐｎ接合の電流－電圧特性において整流特性が観察される物理的意味を理解する。

pn 接合の電流－電圧特性（ダイオード特性）

(a) 少数キャリア連続の式を用いた解析（キャリア分布→拡散電流と再結合電流）

（仮定）電流成分として、簡単化のため、空乏層での再結合がないとする

（図は順方向バイアス時）

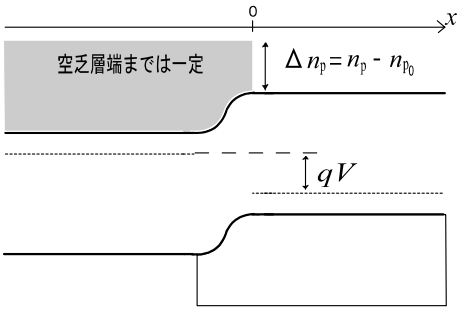
・電子の拡散と再結合による電流の導出

１．ｐｎ接合に順方向バイアス V を印加

２．ｎ側のフェルミ準位が上がる

３．ｐｎ接合のｐ層中の空乏層端の伝導帯の電子濃度が増える

４．この過剰な電子がｐ層中を少数キャリアとして拡散する。



（ｉ）ｐ層での少数キャリアのキャリア分布の導出

少数キャリア連続の方程式：（ｐ型領域でのｘ＞０での少数キャリアとしての電子）

電界 $F = 0$、キャリア生成 $G = 0$ より、

$$D_e \frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_e} = 0$$

ただし空乏層端を $x = 0$ とする

境界条件：

①ｐ層の空乏層端 $x = 0$ での電子密度 $n_p(0)$ を求める：

ｎ型領域の空乏層端での電子濃度　$n_{n0} = N_C \exp\left(-\frac{E_{Cn} - E_{Fn}}{kT}\right)$

ｐ型領域の空乏層端での電子濃度　$n_{p0} = N_C \exp\left(-\frac{E_{Cp} - E_{Fp}}{kT}\right)$

拡散電位　$V_D = \frac{E_{Cp} - E_{Cn}}{q}$ より、

$$\frac{n_{p0}}{n_{n0}} = \exp\left(-\frac{E_{Cp} - E_{Cn}}{q}\right) = \exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right)$$

したがって、$n_{p0} = n_{n0} \exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right)$

外部電圧Vを加えると、

$$n_p(0) = n_{n0}\exp\left(-\frac{q(V_D - V)}{kT}\right) = n_{n0}\exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right)\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) = n_{p0}\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

したがって、$\Delta n_p(0) = n_{p0}\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right]$

②ｐ層の終端での電子密度：$x = \infty$を仮定し　$\Delta n_p = 0$

（$x = \infty$の意味→全て再結合するのに十分な長さ）

→少数キャリア分布（微分方程式の解）

$$\Delta n_p(x) = \Delta n_p(0)\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right)$$

ただし、少数キャリア拡散長$L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$

L_eは少数キャリアが再結合するまでに拡散する長さを表す。

したがって、$\Delta n_p(x) = n_{p0}\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right]\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right)$

（ⅱ）**拡散電流**の導出

$$I_e = qD_e\frac{d\Delta n_p}{dx} = -\frac{qD_e}{L_e}\Delta n_p(0)\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right)$$

（ｐｎ接合のｐ型領域における少数キャリア（電子）による拡散電流）

（iii）電子の拡散と再結合による電流の導出

拡散する少数キャリアの減少分は、全て再結合に行き着くと考える。

（電荷保存の法則を満たす）

→電子による全電流＝**拡散電流＋再結合電流＝x=0 における拡散電流**

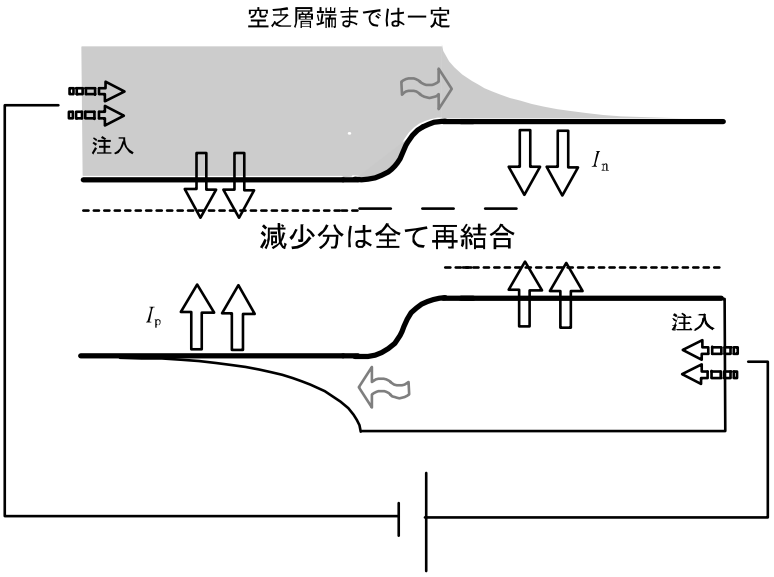
n 層から p 層に注入される電子による全電流

$$I_n = I_e + I_h = -\frac{qD_e}{L_e}\Delta n_p(0) = -\frac{qD_e n_{p0}}{L_e}\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right]$$

・p 層から n 層に注入される正孔の拡散と再結合による電流の導出

電子に関する導出と同様に得られる

$$I_p = -\frac{qD_h p_{n0}}{L_h}\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right]$$



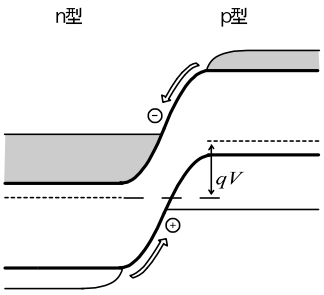
ｐｎ接合の電流－電圧特性

ｘ軸の定義を電圧方向の定義とあわせて正孔電流と電子電流の和をとる

$$I = -I_p + I_n = I_0\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right]$$

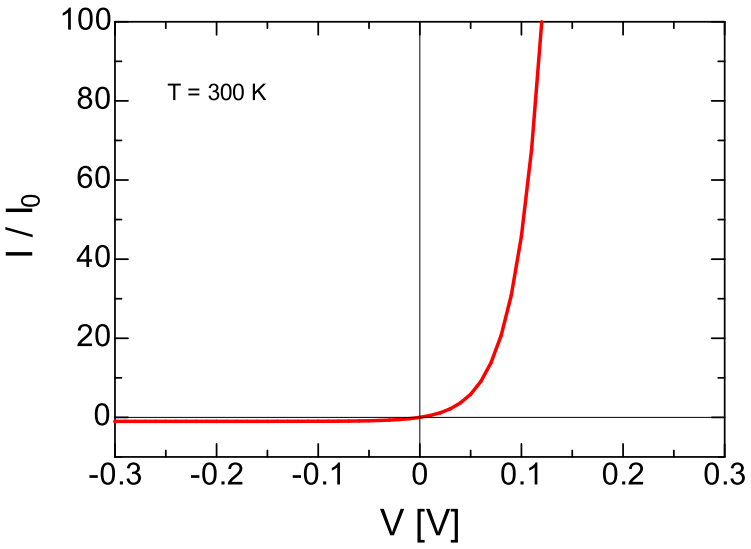
$$I_0 = q\left(\frac{D_e n_{p0}}{L_e} + \frac{D_h p_{n0}}{L_h}\right)$$

（ただし $V<0$ においても成り立つ、右図）



逆方向飽和電流：逆バイアス特性（$V<0$）で流れる飽和電流 $-I_0$

ｐｎ接合の理想的な電流－電圧特性



ｐｎ接合の接合容量

空乏層にはイオンとして固定電荷が蓄積されており、電圧依存の容量とみなせる。

$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{W} = \left[\frac{q\varepsilon_r \varepsilon_0 N_A N_D}{2(N_A + N_D)} \frac{1}{(V_D - V)} \right]^{\frac{1}{2}}$$ （単位面積当たりの微分容量）

特徴:コンデンサの容量の定義式と同じ形をしている。

接合容量（$1/C^2$）は電圧Vに比例する

不純物濃度が高いほど、空乏層幅は狭くなる

空乏層は、不純物濃度が低い方に広がる

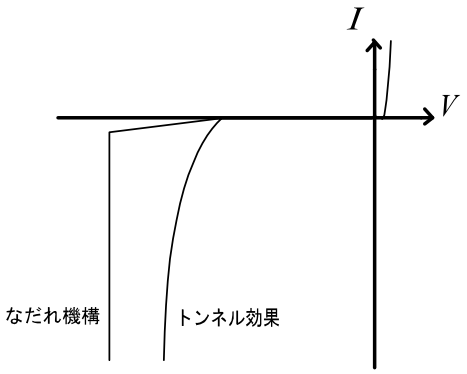
空乏層内の電荷は短絡しても放電しない

(b)電流－電圧特性の実際

・逆方向降伏特性

逆方向バイアスを大きくしていくとある電圧で急激に電流が増大し温度依存性を示す。

→なだれ機構、トンネル効果によって引き起こされる。



・本来空乏層での再結合は考えられるべき要素であり

拡散電流＋空乏層内再結合電流

$$I = I_0 \exp(\frac{qV}{kT}) + \frac{qWn_i}{2\tau} \exp(\frac{qV}{2kT})$$

このとき$I \propto \exp(\frac{qV}{nkT})$のようにｎを用いてその特性を表現し、ｎをダイオードのｎ値と呼ぶ。