

5 非平衡状態のキャリア

5-1 非平衡状態の例

キャリアの発生

半導体に光や熱のエネルギーを与えると、キャリアが生成される(熱的励起、光学的励起)。

例えば、半導体のバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光が照射されると、そのエネルギーを電子が吸収して伝導帯に励起し、価電子帯に正孔が生じる(電子・正孔対の生成)。

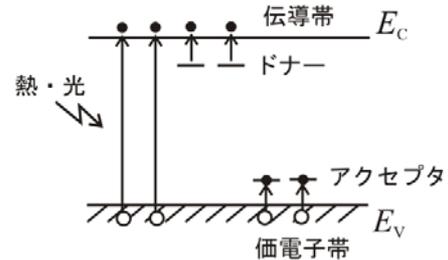


図 1 キャリアの発生機構

5-2 少数キャリアの発生と消滅

例として n 型半導体中の少数キャリアである正孔を考える。

今、単位時間あたりに発生する正孔密度を G 、消滅する正孔密度を R とする。熱エネルギーにより発生する密度を G_T 、光エネルギーによる密度を G_L とすると、 $G = G_L + G_T$ で表せるとする。

外部エネルギーにより増加した正孔密度 p_n は、平衡状態での密度 p_{n0} と増分 Δp_n の和で表される($p_n = p_{n0} + \Delta p_n$)。よって、単位時間あたりの正孔密度の増加は

$$\frac{dp_n}{dt} = G - R = G_L + G_T - R \quad \dots(5.3)$$

である。

光エネルギーがない場合($G_L = 0$)、

$$\frac{dp_n}{dt} = G_T - R \quad \dots(5.4)$$

であるので、時間変化を考えると、

$$\frac{dp_n}{dt} = \frac{dp_{n0}}{dt} + \frac{d(\Delta p_n)}{dt}$$

ここで、再結合の割合 R と少数キャリアの数は比例関係にあるので、キャリアが発生してから消滅するまでの時間を少数キャリアの寿命 τ_h とすると、 R は $1/\tau_h$ を比例定数として

$$R = \frac{1}{\tau_h} p_n = \frac{1}{\tau_h} (p_{n0} + \Delta p_n) \quad \dots(5.5)$$

となる。

特別な場合として、熱平衡状態(定常状態)を考える。熱平衡状態では、キャリアの発生と消滅の割合は等しくなるので(5.5)式は

$$G_T = R = \frac{1}{\tau_h} p_{n0} \quad \dots(5.6)$$

これより、(5.5)式と(5.6)式を(5.4)式に代入することで微分方程式

$$\frac{d(\Delta p_n)}{dt} = \frac{1}{\tau_h} p_{n0} - \frac{1}{\tau_h} (p_{n0} + \Delta p_n) = -\frac{\Delta p_n}{\tau_h} = -\frac{1}{\tau_h} (p_n - p_{n0}) \quad \dots(5.10)$$

が得られる。この微分方程式を、初期条件として

$$t = 0 \text{ のとき、} \Delta p_n = \Delta p_n(0)$$

であるとしてとくと、方程式の解

$$\Delta p_n = \Delta p_n(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_h}\right) \quad \dots(5.13)$$

が得られる。

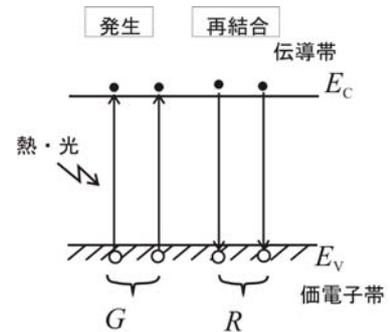


図 2 正孔の発生と消滅

$\frac{\Delta p_n}{\Delta p_n(0)} = \exp\left(-\frac{t}{\tau_h}\right)$ のグラフを考えると図 3 のような特性を示す。すなわち、時間 0 で発生した正孔(過剰なキャリア分)は時間 t が経過するに従って減少している。ここで、発生した正孔が $\frac{1}{e} \approx 0.368$ (36.8%) に減少する時間を、正孔の寿命(life time) τ_h という。

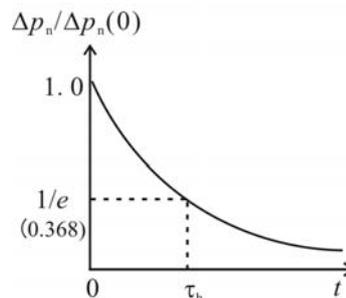


図 3 過剰キャリアの減少

光エネルギーがある場合は、光によって発生する密度 G_L を考慮して、

$$\frac{d(\Delta p_n)}{dt} = G_L - \frac{\Delta p_n}{\tau_h} = G_L - \frac{1}{\tau_h}(p_n - p_{n0}) \quad \dots(5.12)$$

と表すことができる。

通常は、非平衡状態の実現は光照射を一般化して、 G_L (光照射による発生) $\Rightarrow G_h$ (正孔の発生) と置き換えて次の式で表す。

$$\frac{d(\Delta p_n)}{dt} = G_h - \frac{1}{\tau_h}(p_n - p_{n0}) \quad \dots(5.14)$$

5-3 再結合

再結合 : 伝導電子と正孔が結びついて消滅する過程。結合過程により次のように分けられる。

再結合中心 : ドナー、アクセプタ以外の不純物や格子欠陥などがつくるエネルギー準位で、電子と正孔を再結合させる仲介の役割をする。

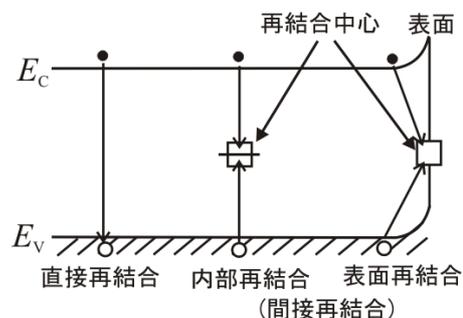


図 4 キャリアの再結合

・ **直接再結合**(direct recombination)

伝導帯の電子と価電子帯の正孔が直接再結合する。

・ **内部再結合**(body recombination)、**表面再結合**(surface recombination)

再結合中心(recombination center)を介して間接的に電子と正孔が再結合する。

再結合中心による再結合

- (1) 伝導帯の電子が再結合中心に捕獲(trap)される。
- (2) 再結合中心はマイナスに帯電し、正孔を捕獲する準位となる(正孔トラップ)。
- (3) マイナスにイオン化したトラップに正孔が引き寄せられる(正孔の捕獲)。
- (4) 電子と正孔が再結合し、トラップは電氣的に中性になる。

捕獲中心(trapping center)

キャリアを一時的に捕獲するが、再結合する前に再び放出する準安定なエネルギー準位

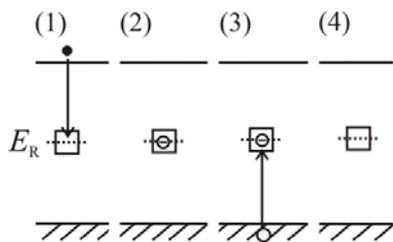


図 5 再結合中心による再結合

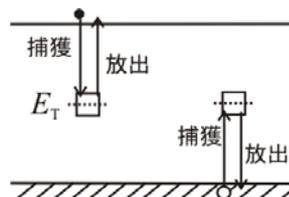


図 6 捕獲中心