

4-5 キャリアの再結合

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)。

キャリアの再結合

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。

・ **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。

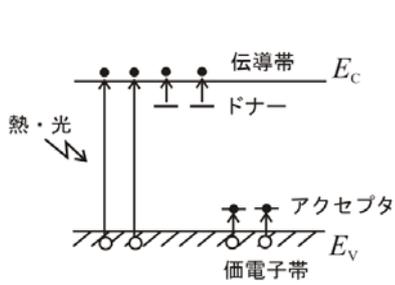


図1 キャリアの発生機構

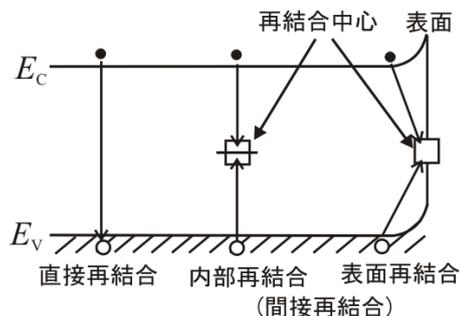


図2 キャリアの再結合

4-5-1 再結合中心と捕獲中心

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。

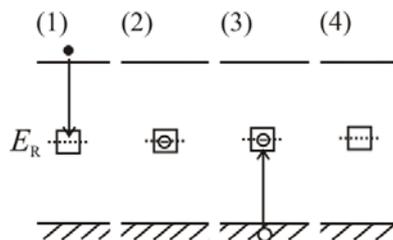


図3 再結合中心による再結合

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

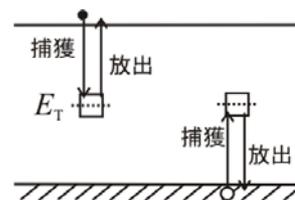


図4 捕獲中心

4-5-2 直接再結合

熱平衡時

熱平衡状態における電子および正孔密度を n_0 、 p_0 とし、キャリアの再結合の確率(recombination rate)を r とすると、これらは比例の関係にある。

$$r = R \cdot n_0 \cdot p_0$$

ここで、 R は再結合係数(recombination coefficient)である。また、キャリアの発生度(generation rate)を g とすると、熱平衡状態ではキャリアの発生と再結合する割合は等しいので、

$$g = r = R \cdot n_0 \cdot p_0 = R \cdot n_i^2 \quad \dots(4.21)$$

となる。

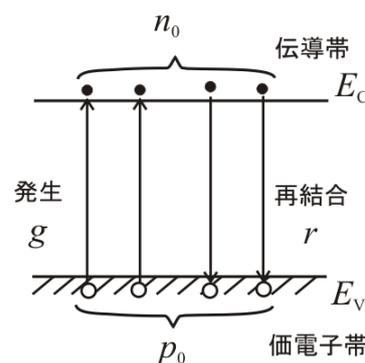


図5 キャリアの発生と再結合

非平衡時

半導体試料に一時的に光や熱のエネルギーを加えると、過剰キャリアが発生する。そのキャリアの増分は、

$$\Delta c = \Delta n = \Delta p$$

Δc の時間的な変化の割合を考えると、

$$\frac{d\Delta c}{dt} = g - r \cong -R(n_0 + p_0)\Delta c \quad \dots(4.23)$$

となる。ここで、 $\tau = 1/R(n_0 + p_0)$ とおくと、上式は

$$\frac{d\Delta c}{dt} = -\frac{1}{\tau}\Delta c$$

この微分方程式を、 $t = 0$ の時 $\Delta c = \Delta c_0$ であるという初期条件を使って解くと

$$\Delta c = \Delta c_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \dots(4.24)$$

という解が得られる。 τ はキャリアの寿命(life time)といい、発生した過剰キャリアが $1/e$ ($\cong 0.368$) に減少するまでの時間を表している。しかしながら、実測したキャリアの寿命は、上記の計算で求めた値よりも3桁ほど小さい。このことは、直接再結合による寄与は小さく、キャリアの再結合は再結合中心を介して行われていることを示している。

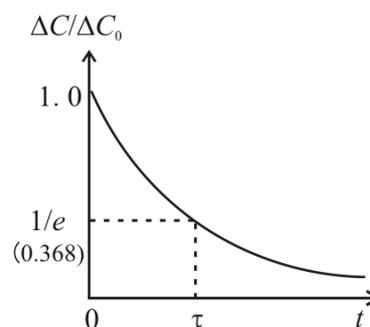


図6 過剰キャリアの減少

4-5-3 内部再結合

キャリアの寿命は半導体の純度や結晶性が高い程長くなる。再結合中心は半導体内に含まれる不純物や結晶の格子欠陥によって生じる準位であり、この準位が増加するとキャリアの再結合が促進され、キャリアの寿命が短くなる。再結合準位は禁制帯の中央付近に位置している(深い準位にある)時、最も効率よく再結合中心として働く。Si では Au、Cu、Fe などが、GaAs では Fe、Cr、O などが禁制帯の中心付近に不純物準位をつくり、再結合中心として適している。一般に真性半導体のときキャリアの寿命が長く、不純物が多くなると寿命は減少する。

4-5-4 表面再結合

半導体結晶の表面でも、表面原子には結合する相手がいない**未結合手(ダングリングボンド dangling bond)**が存在する。この未結合手は化学的に不安定なため気体分子を吸着してエネルギー準位を形成する。これを**表面準位(surface energy level)**といい、この準位が再結合中心として働くことになる。