

速度方程式 (rate equation)

長谷 貴志

トラップが存在する場合のバンド構造は図 1 のようになる。このとき、トラップは電子と正孔に対して 4 種類の振る舞いをする。

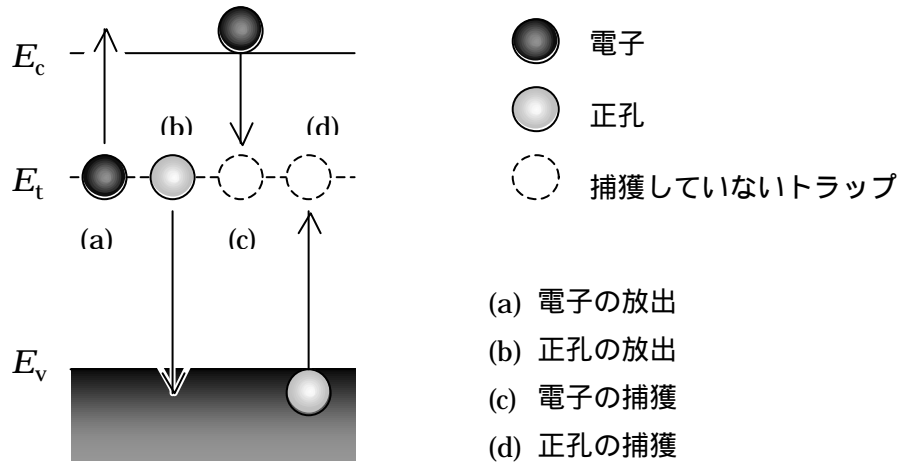
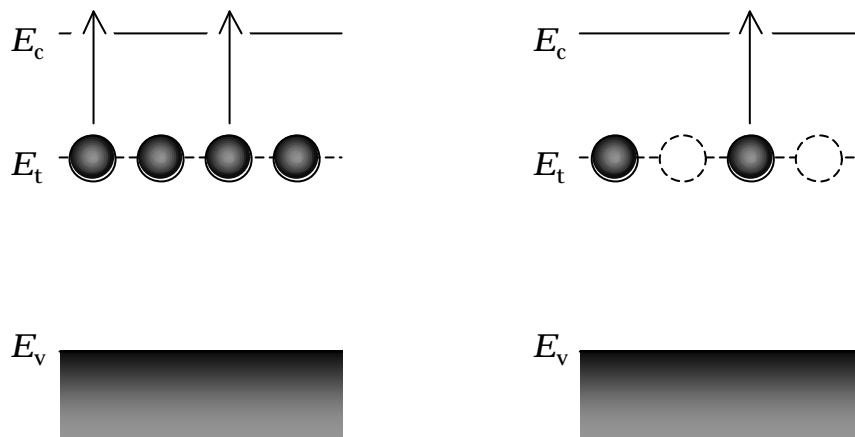


図 1 トラップの振る舞い

単位体積あたりのトラップ密度は N_t 、単位体積あたりのトラップされている電子の密度は n_t 、伝導帯の電子密度は n 、価電子帯の正孔密度は p である。

(a) : 電子がトラップから放出される場合

放出元であるトラップに電子が占められている密度は n_t である。この時、時間と共に放出される電子の数は図 2 に示すように、トラップされている電子の密度が多いほど多く、トラップされている電子の密度に比例する。



トラップの捕獲数多い 電子の放出量多い トラップの捕獲数少ない 電子の放出量少ない

図 2 捕獲されている電子の数による放出量の違い

ゆえに時間経過によってトラップから放出される電子の数は

$$\frac{dn_t}{dt} = -e_n n_t \quad (1)$$

となり、比例定数 e_n に比例する。この e_n を電子の放出割合という。

(b) : 正孔がトラップから放出される場合

図 3 に示すように、正孔がトラップされている数は、言い換えると価電子帯からの電子をトラップできる所の数になる。つまり、電子がトラップされていない数、 $N_t - n_t$ となる。正孔の放出も、トラップされている正孔の密度に比例する。

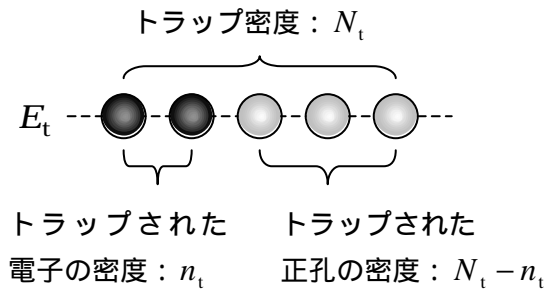


図 3 トラップ密度とトラップされた電子と正孔との対応

よって、時間経過によってトラップから放出される電子の数は

$$\frac{dn_t}{dt} = e_p (N_t - n_t) \quad (2)$$

となる。この e_p を正孔の放出割合という。

(c) : 電子がトラップに捕獲される場合

このとき、放出の場合とは異なり、伝導帯にある電子の密度だけでなく、トラップに捕獲できる残りの数も考えなければならない。なぜならば図 4 のように、伝導帯に多数の電子があっても、すでに多数の電子がトラップに捕獲されていればその数に比例して、捕獲できる電子の数が減少するからである。

この場合、時間経過によってトラップに捕獲される電子の数は、伝導帯の電子密度 n と、トラップに捕獲することができる電子の数 $N_t - n_t$ を考慮すると、

$$\frac{dn_t}{dt} = nc_n (N_t - n_t) \quad (3)$$

となる。この c_n を電子の捕獲係数と呼ぶ。

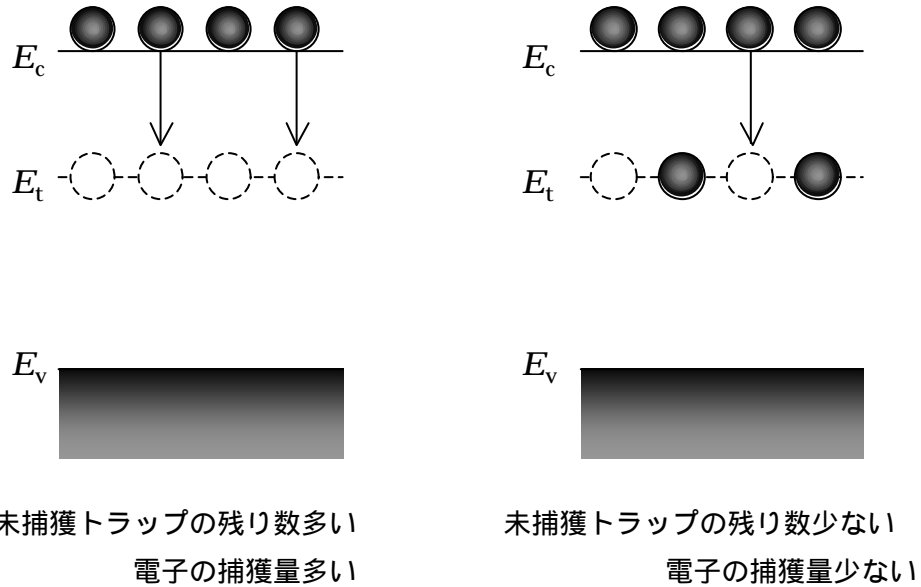


図 4 捕獲されている電子の数による放出量の違い

(d) : 正孔がトラップに捕獲される場合

この場合も、価電子帯にある正孔の密度だけでなく、トラップに捕獲することができる数も考えなければならない。時間経過によってトラップに捕獲される電子の数は、価電子帯の正孔密度 p と、トラップに捕獲することができる正孔の数 n_t を考慮して、

$$\frac{dn_t}{dt} = -pc_p n_t \quad (4)$$

となる。この c_p を正孔の捕獲係数と呼ぶ。

なお、放出割合は電子と正孔が放出される割合を示すが、捕獲係数は捕獲される割合ではなく捕獲されやすさを示している。また、これら 4 つのパラメータ e_n 、 e_p 、 c_n 、 c_p は、トラップによって決まっている。

そして、これら 4 種類を考慮した式は、(1) ~ (4) 式より、

$$\frac{dn_t}{dt} = -e_n n_t + e_p (N_t - n_t) + nc_n (N_t - n_t) - pc_p n_t \quad (5)$$

となり、この式は速度方程式 (rate equation) と呼ばれている。この式はトラップと電子、正孔が直に対応しているので、ITS、TSC、DCTS 等のトラップ評価に用いられている。

