

ショックレー-クワイサー限界における平衡条件の一考察

A consideration of equilibrium condition in Shockley-Queisser limit for solar cell efficiency

○波多腰 玄一¹, 伊賀 健一² (1. 早稲田大, 2. 東工大)

○Genichi Hatakoshi¹, Kenichi Iga² (1. Waseda Univ., 2. Tokyo Inst. Tech.)

E-mail: hatakoshi@aoni.waseda.jp

1. まえがき

ショックレー-クワイサー (以下 SQ と略す) 限界¹⁾は、太陽電池の理論限界としてしばしば引用される。SQ 理論は、熱平衡状態での発光再結合率 $F_c(0)$ が、環境温度における黒体放射の一部 F_{c0} と釣り合うという極めて単純な仮定に基づいている。すなわち、

$$F_c(0) = F_{c0} \quad (1)$$

$$F_{c0} = 2A \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_g}^{\infty} \frac{E^2 dE}{\exp[E/(k_B T)] - 1} \equiv AF_0 \quad (2)$$

ここで A は受光面積である。式(1)は自明の式に見えるが、不思議でもある。つまり半導体における再結合項は本来電子の統計に基づく半導体物性に依存するにもかかわらず、それに関するパラメーターはバンドギャップ E_g のみで、それ以外は光子の統計で表されていることである。また非発光再結合項はこの式には含まれない。そこで半導体物性を考慮した式を導き SQ 理論との比較を行った。

2. 半導体物性を考慮した太陽電池の効率

直接遷移型半導体における自然放出再結合確率は次式で与えられる²⁾。

$$R_{sp} = \frac{\sqrt{2\pi} e^2 \hbar n_r (E_g + 3k_B T / 2) E_p n p}{6\epsilon_0 m_0 c^3 (k_B T)^{3/2} (m_e + m_h)^{3/2}} \equiv Bnp \quad (3)$$

ここで m_e , m_h はそれぞれ電子, ホールの有効質量, n は電子密度, p はホール密度, n_r は屈折率である。式(3)を用いて、熱平衡状態における発光再結合率 $F_c(0)$ は以下で表される。

$$F_c(0) = (A/\alpha) R_{sp}(0) = (A/\alpha) B n_i^2 \equiv AF_1 \quad (4)$$

ここで α は吸収係数, n_i は真性キャリア密度である。

式(4)における吸収係数 α は、直接遷移型半導体では $E > E_g$ の領域で $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^{-1}$ の値をとる。厳密には式(4)をこの範囲で積分する必要があるが、簡単のため $\alpha = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ とし式(4)を計算し、SQ 理論における式(2)と比較した。結果を Fig.1 に示す。驚くべきことに両者は極めてよく一致している。

一方、非発光再結合率については、SQ 理論では理論式はなく、全再結合に対する発光再結合の割合を f_c という一定値のパラメーターで与えている。しかし半導体物性を考慮すると、 f_c は非発光再結合寿命 τ_n の他、キャリア密度およびバンドギャップにも依存するはずである。熱平衡状態における f_c の値を f_{c0} とすると、

$$f_{c0} = 2Bn_i\tau_n \quad (5)$$

が得られる²⁾。直接遷移型半導体について上式を

計算してみると、 f_{c0} は次式でよく近似できる。

$$f_{c0} = \frac{\tau_n}{8.8 \text{ [ns]}} \exp\left(-0.476 \frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (6)$$

これらの式を用いて計算した太陽電池の効率限界を Fig.2 に示す。

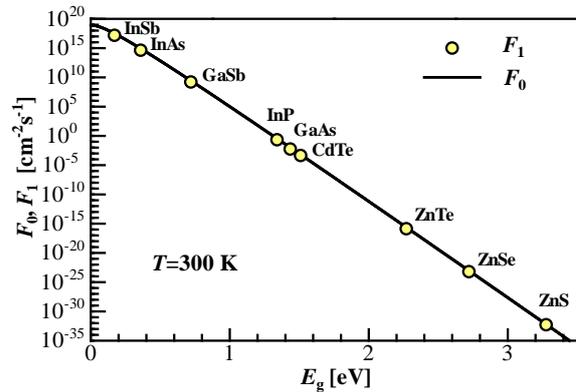


Fig. 1 Comparison of bandgap-dependent F_0 and calculated F_1 for various direct bandgap semiconductors.

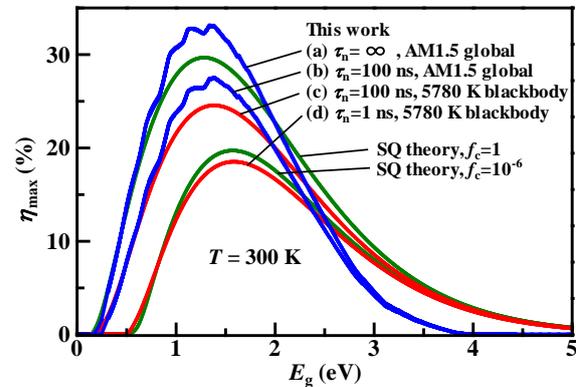


Fig. 2 Calculated efficiency for solar cell, considering the bandgap dependence of f_{c0} .

3. まとめ

半導体物性を考慮した f_{c0} を用いて太陽電池の効率限界を見積もった。実際の半導体物性を考慮した効率限界を与えるものといえよう。

参考文献

- 1) W. Shockley and H. J. Queisser: "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells", J. Appl. Phys. Vol. 32, pp. 510-519 (1961)
- 2) 伊賀健一, 波多腰玄一: 光エレクトロニクスの玉手箱 第42章, O plus E, Vol. 38, No.8 (2016)