

キャリア熱緩和・取り出し時間を含む太陽電池の非平衡理論

Nonequilibrium theory of solar cells including finite thermalization and extraction time

産総研¹, 東大物性研², ○上出 健仁¹, 望月 敏光¹, 秋山 英文², 高遠 秀尚¹

AIST¹, ISSP, Univ. Tokyo² ○K. Kamide¹, T. Mochizuki¹, H. Akiyama², H. Takato¹

E-mail: kenji.kamide@aist.go.jp

太陽電池の変換効率が理想的な状況でどこまで上げられるか、その効率限界は研究到達目標の一つの指針を与える。効率限界については Shockley と Queisser による SQ 理論[1]が古くから知られ、これを用いるとバンドギャップ 1.12eV のシリコンでは 29.5 %程度(AM0, 太陽光=6000K 黒体放射)の値が見積もられる。

一方、SQ 理論ではいくつかの強い条件が前提として用いられる。例えば(1)太陽光の吸収により生成されたキャリアが瞬時に熱化しセル半導体の中で電極の化学ポテンシャル($\equiv \mu_{CN}$)を有する擬熱平衡分布(フェルミ・ディラック分布 f^{FD})を形成すること、(2)光生成キャリアが電極に瞬時に取り出されること、この二点がある。しかし、実際にはピコ秒(10^{-12} 秒)程度と短いとはいえ、キャリアが熱化し擬熱平衡分布を形成するまでに有限の熱緩和時間(フォノン緩和時間 $\equiv \tau_{ph}$)がかかる。また、光生成キャリアが電極に取り出されるまでに本来は有限の取り出し時間($\equiv \tau_{out}$)がかかる。今回、キャリアの熱緩和と取り出しのダイナミクスを考慮したモデル(図 1(a))に基づき、キャリアが熱平衡状態にない状況でも成立する枠組みへと理論を拡張し定式化を行った。本理論に従えば、図 1(b)に示すように取り出し時間 τ_{out} をパラメータとして、(i) $\tau_{out} \gg \tau_{out}^{ul}$ 、(ii) $\tau_{out}^{ul} \gg \tau_{out} \gg \tau_{ph}$ 、(iii) $\tau_{out} \ll \tau_{ph}$ の3領域において、太陽電池のデバイス特性が大きく異なることが予想される。例えば、領域(i)ではセル内キャリアの化学ポテンシャル μ_{CN}^{cell} が電極の化学ポテンシャル μ_{CN} と優位にずれることが示される。(i)と(ii)の境界を与える時間 τ_{out}^{ul} はセル半導体の種類のみならずセルの膜厚に強く依存するが、例えば 100 μm のセル厚をもつ Si 太陽電池に対しては $\tau_{out}^{ul} \sim 1$ ミリ秒程度が見積もられる。図 1(c)にセル厚が 100 μm の Si 太陽電池の変換効率限界を取り出し時間の関数としてプロットした。 τ_{out} が 1 ミリ秒を超えると変換効率は Si の SQ 限界値 29.5%から大幅に下がることが分かる。今後、本理論に基づき取り出し時間が熱化時間より短い、所謂ホットキャリア太陽電池[2]の領域 (iii) $\tau_{out} \ll \tau_{ph}$ に着目し SQ 理論が与える効率がどの程度変更するか明らかにする予定である。

【文献】[1] W. Shockley, and H. J. Queisser, J. Appl. Phys. **32**, 510 (1961). [2] R.T. Ross, and A. J. Nozik, J. Appl. Phys. **53**, 3813 (1982). 【謝辞】本研究は科研費 (15K20931) の支援を受けている。

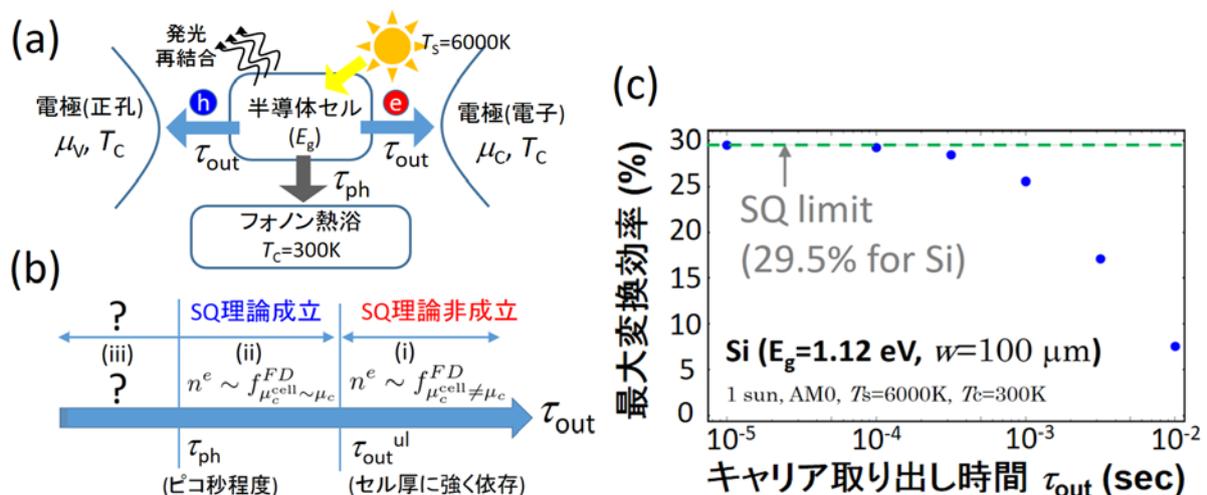


図 1. (a) 本理論モデル (b) キャリア取り出し時間に関する太陽電池特性の異なる 3 領域を示す (c) Si 太陽電池の変換効率限界 (τ_{out} の関数として(i)~(ii)にまたがる領域でプロットした)