

熱回収型太陽電池の特性シミュレーション

上出健仁¹・望月敏光¹・秋山英文^{2,3}・高遠秀尚¹

¹産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 太陽光チーム
²東京大学物性研究所、³OPERANDO-OIL

研究の概要

- シリコン太陽電池(単一吸収体)の変換効率は研究レベルで詳細釣り合い限界(SQ限界[1])はシリコンで29%程度)に近い値まで到達した(現在セル効率最高報告値はカネカの26.7% [2])
- シリコン太陽電池を今後さらに向上させるためには、詳細釣り合いに制限されない新しい動作原理に基づく太陽電池の開発が必要となる
- 我々が最近提案した非平衡太陽電池『熱回収型太陽電池』は、SQ限界に制限されない高効率太陽電池である
- 理論シミュレーションにより熱回収型太陽電池のデバイス特性を明らかにし、高温吸収体を利用するにも関わらず高い効率が得られる仕組みを明らかにした

熱回収型太陽電池の構造とコンセプト [5-7]

- 吸収体と電極の温度差(非平衡条件)を利用し熱も回収できる
- 詳細釣り合い限界(SQ限界[1])を越す高効率化が可能
- ホットキャリア太陽電池[3]と異なり、超高速キャリア取り出しが不要のためシリコンにも適用可能

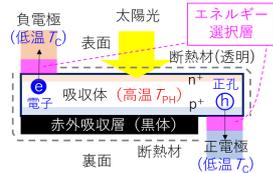


図1 熱回収型太陽電池の基本構造

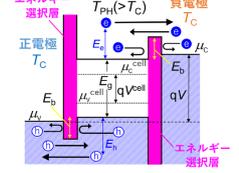


図2 エネルギー選択層の働き

デバイス特性シミュレーション (太陽電池の非平衡理論 [4] に基づく計算、1 sun、結晶シリコン、厚み w = 100 μm)

部分平衡理論 (熱緩和時間より遅い取り出し時間 τ_{out} で成立する)

$$(i) I = I_{sun}(h\nu > E_g) - I_{rad}(V_{cell}, T_{PH})$$

$$(ii) I = q \frac{w}{\tau_{out}} \int_{E_b}^{\infty} \mathcal{D}_e(E_g + E_e) (f_{\mu_{cell}, T_{PH}} - f_{\mu_c, T_C}) dE_e$$

$$(iii) P_{Q_{in}} + P_T > 0 \quad (\text{太陽光照射で吸収体を高温に保つ熱流が供給される必要条件})$$

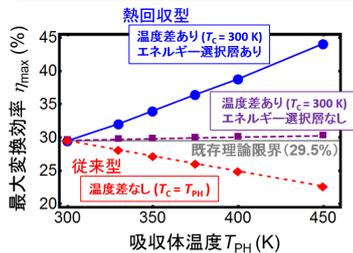


図3 理論効率(熱回収型と従来型の比較)

- 吸収体温度の上昇により効率が增加(10 Kあたり約1%)
- 温度特性(正)は従来型(負)と逆
- エネルギー選択層の利用により効率が顕著に増加

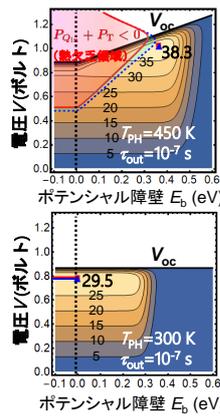


図4 変換効率(%)の等値線図

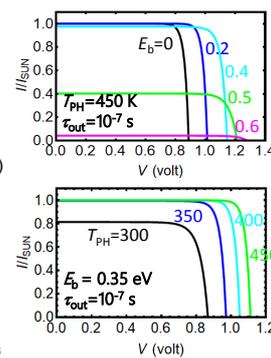


図5 電流-電圧特性 (上はEb依存性、下はTph依存性)

表1 デバイス特性 (Eb 依存性)

T _{PH} (K)	E _b (eV)	J _{sc} (J _{sun})	V _{oc} (V)	FF	η _{max} (%)
450	0	1.0	0.89	0.87	30.3
450	0.2	1.0	1.01	0.88	35.0
450	0.4	0.98	1.14	0.86	37.6
450	0.5	0.4	1.21	0.83	15.8
450	0.6	0.04	1.28	0.83	1.8

表2 デバイス特性 (Tph 依存性)

T _{PH} (K)	E _b (eV)	J _{sc} (J _{sun})	V _{oc} (V)	FF	η _{max} (%)
300	0.35	0.91	0.87	0.80	22.1
350	0.35	1.0	0.97	0.86	32.6
400	0.35	1.0	1.05	0.88	36.3
450	0.35	1.0	1.11	0.89	38.8

考察 (なぜ熱回収型は吸収体が高温化するのに効率が上がるのか?) [8]

高効率化は開放電圧の増加によるものである(表1, 2)。簡単な解析により、開放時の内部電圧(V_{oc}^{cell})と電極間電圧(V_{oc})は、 $T_{PH}=T+dT$, $T_C=T$ とすると、次式で近似できる

$$\frac{dV_{oc}^{cell}}{dT} = -\frac{E_g/q - V_{oc}}{T}, \quad (1) \text{ 温度上昇による内部電圧の低下}$$

$$\frac{d(V_{oc} - V_{oc}^{cell})}{dT} = \frac{E_g/q - V_{oc}}{T} + \frac{2E_b/q}{T} \quad (2) \text{ 温度差による熱起電力の増加}$$

- $dV_{oc}/dT = (1)+(2) = 2E_b/(qT)$ により与えられる (エネルギー選択層の利用時に大きな正の温度特性が得られることを説明する)
- 吸収体の温度上昇により内部電圧は下がるが、温度差により生じる熱起電力がそれを凌駕するため、熱回収型太陽電池は高い効率が得られる

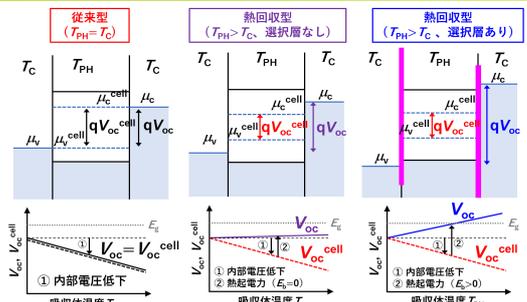


図6 開放条件の電圧(内部・外部)の温度変化(熱回収型と従来型の比較)

結論

- 熱回収型太陽電池の実現によりシリコン太陽電池の変換効率は今後さらに改善することができる
- 吸収体温度が電極温度より高くなる場合に、エネルギー選択層を利用することで、SQ限界値(Siで29%)を大きく超えることができる
- 正の温度特性が得られる主要因は、温度差により発生する熱起電力であることが判明した
- 吸収体内に熱を溜め大きな温度差を得る熱流制御が、熱回収型太陽電池の実現に必要な要素技術となる

参考文献

- W. Shockley and H. J. Queisser, *J. Appl. Phys.*, 32, 510 (1961).
- M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, and A. W. Y. Ho-Baillie, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.* 26, 427 (2018).
- R. T. Ross and A. J. Nozik, *J. Appl. Phys.*, 53, 3813 (1982).
- K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato, *arXiv:1802.01761* (2018).
- 上出他、特願2017-241808.
- 上出他、第65回応用物理学学会春季学術講演会、17a-D101-6 (2018).
- K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato, *Proc. 45th IEEE PVSC* (2018).
- 上出他、第79回応用物理学学会秋季学術講演会、20a-136-7 (2018).