

熱回収型太陽電池の設計と実証実験

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

- 結晶シリコン太陽電池の変換率は研究レベルで詳細釣り合い限界(SQ限界[1]、シリコンで約29%)に近づいた(カネカ、26.7% [2])。
- 我々は結晶シリコンを用いてSQ限界を越すことのできる『熱回収型太陽電池』を提案しており[3]、実現に向け開発を進めている。
- 高い変換効率の得られるエネルギー選択層利用型(タイプI)において、エネルギー選択層(半導体)に求められる物性を明確化し[4-6]、適した材料を探索した。
- エネルギー選択層を一般の熱電変換材料(ビスマス・テルル)で代替するタイプIIを考案し最適設計を明らかにした[7]。
- これに基づきデバイスを作製し実証実験を進めている[8]。

熱回収型太陽電池の構造とコンセプト

- 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[9]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

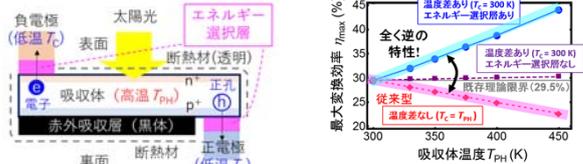


図1 熱回収型太陽電池(タイプI)の構造

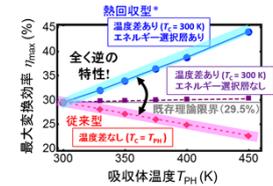


図2 タイプIの理論効率 (100 μm c-Si)

タイプI(エネルギー選択層利用型)の設計のための理論的検討

- 熱回収型太陽電池(タイプI)はエネルギー選択層の両端の温度差で生じる電圧上昇(ゼーベック効果)により高い効率が得られる太陽電池である。
- エネルギー選択層は適した障壁高さを与えるバンドオフセットを持つ必要がある。加えて、低い熱伝導率κと高い電気伝導率σを持つことが求められる。
- これらの物性値に必要な条件を数値的に評価した(吸収体に結晶シリコンを用いる場合、 $\kappa/\sigma < 10^{-3} \text{ V}^2/\text{K}$ が正の温度特性を得るために必要)。

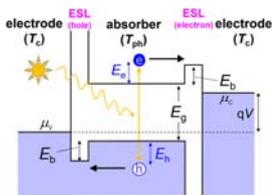


図3 エネルギー選択層(半導体)

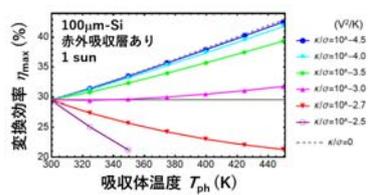


図4 理論変換効率(エネルギー選択層の熱伝導率と電気伝導率を考慮)

- 熱回収型太陽電池(タイプI)のエネルギー選択層はハイパスフィルタ(半無限の帯域)として働く。
- 一方、類似の構造をもつホットキャリア太陽電池では狭帯域のバンドパスフィルタを用いることでより高い変換効率を得られる。
- 熱回収型(タイプI)でもパスバンドの狭帯域化によりさらに高効率化が可能か調べ、現実的な範囲(500 K以下)では狭帯域化のメリットは無いことを明らかにした。

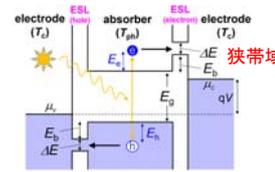


図5 エネルギー選択層(狭帯域)

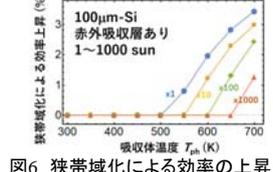


図6 狭帯域化による効率の上昇(異なる集光倍率、吸収体温度の関数として)

タイプII(熱電変換材料利用型)の設計のための理論的検討と実証実験

- エネルギー選択層の代わりに熱電変換材料を用いることでも、温度上昇による吸収体での電圧ロスに打ち勝つだけの十分な電圧上昇(大きなゼーベック係数)が得られれば、正の温度特性をもつ熱回収型太陽電池は実現できる(タイプII)。
- 吸収体に結晶シリコンを用いる場合、市販の熱電材料(ビスマステルル)でもそのようなデバイスは実現可能であることを明らかにした。
- 設計の最適化を行い、現在実証実験を進めている(開放電圧上昇は得られたが効率上昇はまだ得られていない)。

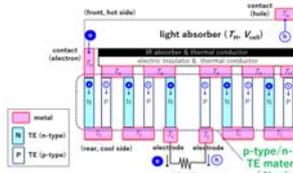


図6 熱回収型太陽電池(タイプII)

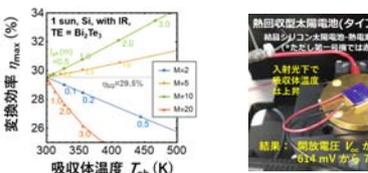


図7 理論変換効率(対数 M)

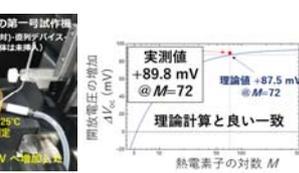


図8 予備検証実験(M=72): セットアップ(左)と結果(右)



図9 デバイス(左、M=9)と赤外線サーモグラフィ像(右、光照射下 4.6 suns、下面 25°C)

今後の予定

(タイプI)

エネルギー選択層に適した材料を選定しデバイスを作製し、まずは開放電圧の上で熱回収効果を確認する。その後、変換効率の上で効果を確認し、原理の実証を行う。

(タイプII)

理想条件でない太陽電池セルを用いた場合の最適設計を見直し、変換効率の上での熱回収効果を確認する。

参考文献

- [1] W. Shockley and H. J. Queisser, J. Appl. Phys., 32, 510 (1961).
- [2] M. A. Green *et al.*, Prog. Photovoltaics: Res. Appl. 26, 427 (2018).
- [3] 上出他、特開2019-110192
- [4] K. Kamide *et al.*, Proc. 7th WCPEC, p. 1817 (2018).
- [5] K. Kamide *et al.*, Phys. Rev. Appl., in print (2019).
- [6] K. Kamide *et al.*, PVSEC-29 (2019).
- [7] 上出他、特願2018-237064
- [8] 上出他、第66回応用物理学学会春季学術講演会、11a-W321-5 (2019).
- [9] R. T. Ross and A. J. Nozik, J. Appl. Phys., 53, 3813 (1982).