

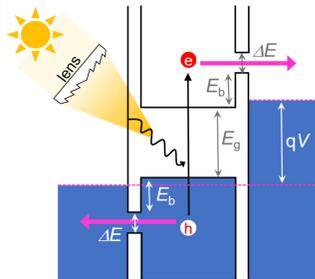
ホットキャリア太陽電池のI-V特性と安定性に関する理論研究

上出健仁

産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター

研究の目的

- ホットキャリア太陽電池 (HCSC [1]) は高速キャリア取り出しにより熱化損失を低減し高い変換効率を実現できる太陽電池のコンセプトであり、その変換効率限界はよく調べられている[2,3]。
- 一方、I-V特性についてはモデルにより異なるタイプのIV曲線が得られており踏み込んだ議論はされておらず十分理解されていない。
- I-V特性について動作安定性も含め理解するために、太陽電池の非平衡理論[4]を用い解析を行った[5,6]。



HCSCの概念図

先行研究: いくつかの理論モデルとI-V特性

文献によりI-V曲線が異なり通常期待される滑らかなもの(下記 1./2.)ばかりでなくヒステリシスが見られたり(3.)、短絡条件付近で信頼性の低い結果しか得られない(1.)など、現状、HCSCのI-V特性の理解は不十分。

1. 粒子数保存モデル(Ross and Nozik, 1982 [1])

HCSCの初期理論。吸収された光子数と生成されたキャリア(電子正孔対)の生成数とが一致する。

2. II-ARモデル (P. Würfel, 1997 [7])

キャリア間相互作用が強く多重キャリア生成・消滅過程(インパクトイオン化 (II) とオージェ再結合(AR))が高速に起こる極限のHCSC理論。

3. レート方程式モデル(竹田他 2010~ [2, 3])

キャリアダイナミクスを現象論的に緩和時間で記述するHCSCのモデル。

結果1: インパクトイオン化とオージェ再結合を考慮しない場合のI-V特性と動作安定性

方法

非平衡理論[2-4]+線形安定性解析[5,6]

太陽電池のキャリアダイナミクスを考慮した微視的レート方程式(非平衡理論[4])

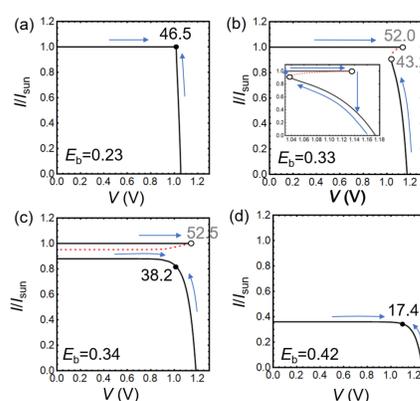
$$\frac{d}{dt}n_E = R_E^{\text{sun}} - R_E^{\text{rad}} - R_E^{\text{out}} - R_E^{\text{eq}} - R_E^{\text{th}}$$

光注入 発光再結合 取り出し 平衡化(電子間相互作用) 熱化(電子-格子相互作用)

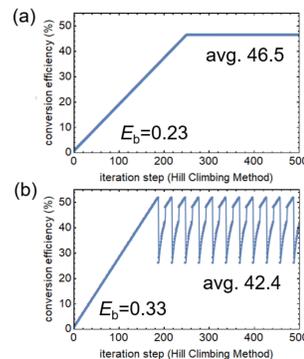
で定常状態におけるキャリアの分布関数を決定し、これを用いてI-V特性を決定。さらに定常解の周りで方程式を線形化しI-V曲線上各点の線形安定性を調べる[5,6]。

結果

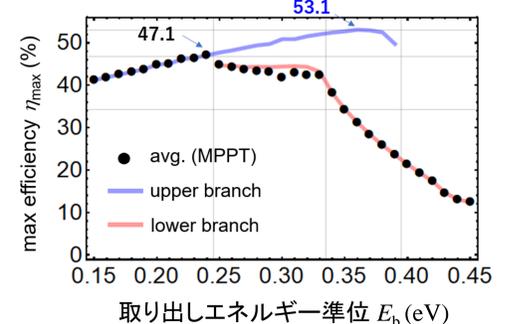
(現実的な設定) 1000倍集光, $E_g=0.93$ eV, 吸収体厚=100 nm, $\Delta E=0.1$ eV, 平衡化時間 = 1 ps, 熱化時間 = 1 ns, 取り出し時間=10 ps



最大効率を与える最適取り出し準位付近(E_b)でI-V曲線が分岐する。負性抵抗を示す分岐(赤線)は不安定のためヒステリシスを示す。MPPT(最大電力点追従)を用いた実際の出力に影響。



I-V特性にヒステリシスがある場合、MPPT(hill-climbing法)による出力の時間変化に振動が発生し、平均出力が大きく低下する。

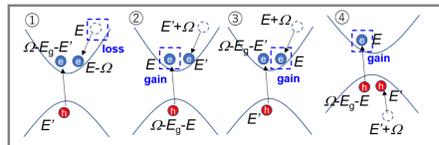


I-V特性にヒステリシスが生じる場合、MPPTによる平均効率が大きく下がる為、ヒステリシスの生じない少し低めの取り出しエネルギー準位が良い選択となることが分かる。

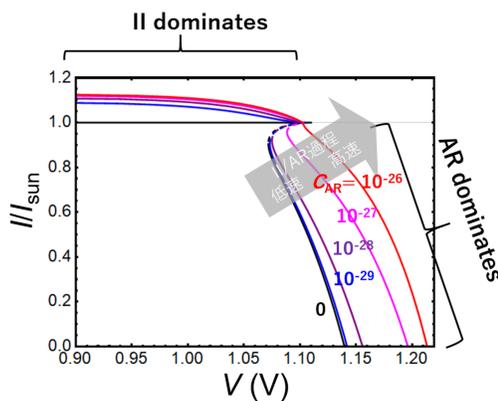
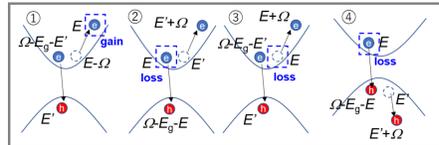
結果2: インパクトイオン化とオージェ再結合の影響

現実には存在する多重キャリア生成・消滅過程を、物質定数であるオージェ再結合係数 C_{AR} (cm^6/s)により考慮しその影響を調べる。

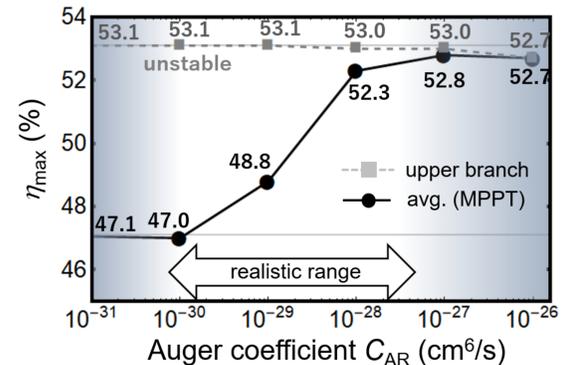
インパクト・イオン化過程(II)



オージェ再結合過程(AR)



多重キャリア生成・消滅過程が高速に起こる(C_{AR} が大きい)とI-Vヒステリシス(不安定性)を低減できることが明らかになった。



多重キャリア生成・消滅過程が高速に起こるほどMPPTによる平均効率が向上する。なるべく大きな C_{AR} を持つ材料を吸収体にすべきという材料選択指針が得られた。

結論

- 太陽電池の非平衡理論と線形安定性解析により、安定性動作条件におけるホットキャリア太陽電池のI-V特性と変換効率を調べた。
- 高効率なホットキャリア太陽電池ではI-Vヒステリシスが生じ得るが、取り出しエネルギーを少し低めに選択することでそれに伴う動作不安定性を回避できる。
- 多重キャリア生成過程がヒステリシスや不安定性を抑制し実デバイスの効率を向上させることから、オージェ再結合係数の大きな材料を選択すべきという指針が得られた。

参考文献

- [1] R. T. Ross and A. J. Nozik, J. Appl. Phys. **53**, 3813 (1982).
- [2] Y. Takeda et al., Appl. Phys. Exp. **3**, 104301 (2010).
- [3] Y. Takeda et al., J. Appl. Phys. **118**, 124510 (2015).
- [4] K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. **10**, 044069 (2018).
- [5] 上出, 第80回応用物理学学会秋季学術講演会 20a-B12-1 (2019).
- [6] K. Kamide, J. Appl. Phys. **127**, 183102 (2020).
- [7] P. Würfel, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **46**, 43 (1997).