

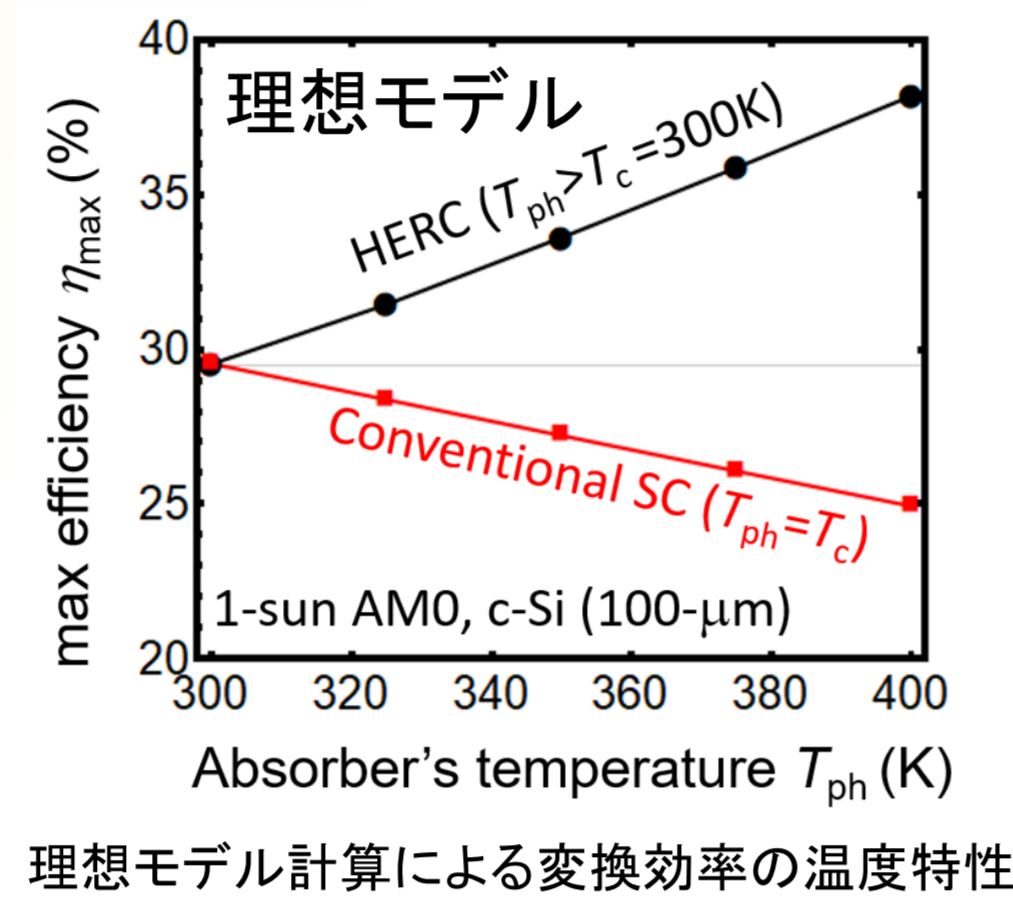
熱回収型太陽電池(タイプI)の理論的進展: 非輻射再結合とバンドギャップ縮小の影響

上出健仁¹、望月敏光¹、秋山英文²、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、2 東京大学 物性研究所

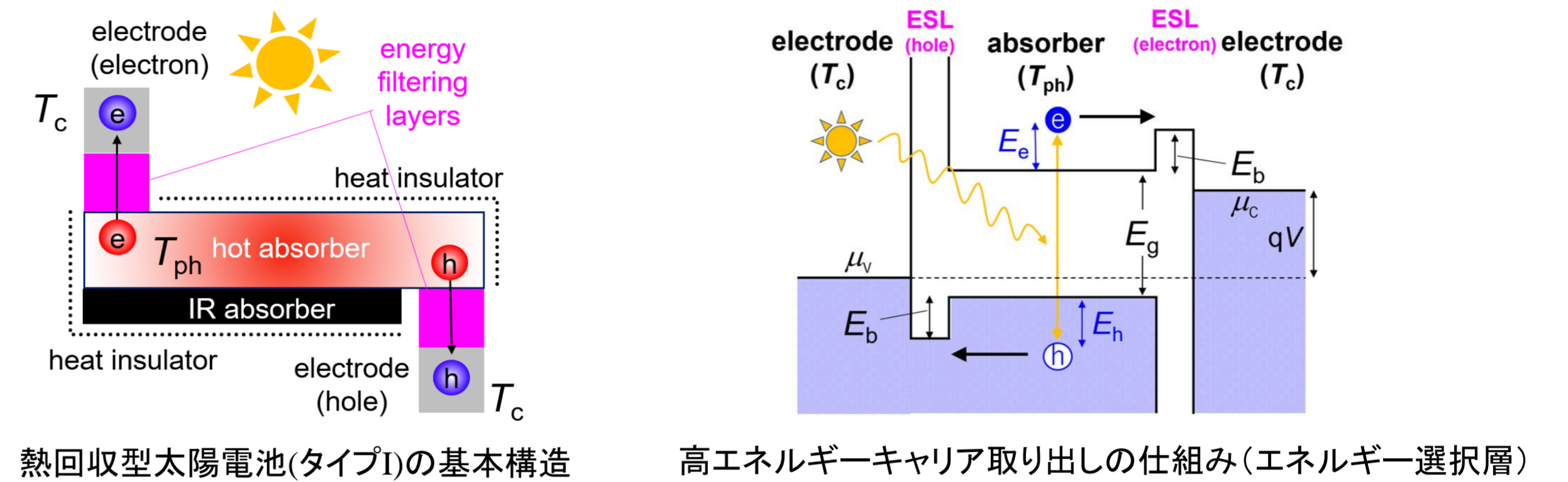
研究の目的

- 高温時に変換効率が向上する正の温度特性(通常とは逆の特性)を持つ「熱回収型太陽電池」を理論提案している。(タイプI=ワイドギャップ半導体利用、タイプII=熱電変換素子利用)
- 熱回収型タイプIの特性は、理想太陽電池(キャリア寿命が輻射再結合で決まる場合)についてのみ試算を行った。
- 現実的な要素(非輻射再結合とバンドギャップの縮小効果)を考慮したモデル計算により、熱回収型太陽電池が実際に応用できるか検証する。



熱回収型太陽電池(タイプI)

熱を光吸収体内に蓄えて吸収体自体を温め、さらに高エネルギーキャリアを選択的に取り出すことにより、通常は棄てられる熱の一部が回収されSQ限界を超える高い変換効率が得られる太陽電池。結晶シリコン太陽電池にも適用可能な産総研のアイデア。



結果1: 非輻射再結合の影響

非輻射再結合が存在する普通の太陽電池の特性 ($T_{ph}=T_c=300$ K, 1 sun, 結晶シリコン)

	non-radiative lifetime τ_{nr} (ms)			
	0.1	1	10	$+\infty$
η_{max} (%)	20.0	24.3	28.1	29.5
V_{oc} (V)	0.687	0.802	0.859	0.868
FF	0.745	0.775	0.834	0.869
J_{sc}/J_{sun}	1.000	1.000	1.000	1.000

※Si太陽電池のレコード
=26.7% (Kaneka, HIT)

非輻射再結合が存在する熱回収型太陽電池(タイプI)の特性 ($T_{ph}=400$ K, $T_c=300$ K, 1 sun, 結晶シリコン)

	non-radiative lifetime τ_{nr} (ms)			
	0.1	1	10	$+\infty$
η_{max} (%)	24.9	30.6	35.8	38.2
V_{oc} (V)	0.840	0.991	1.089	1.110
FF	0.778	0.804	0.850	0.880
J_{sc}/J_{sun}	0.972	0.980	0.988	0.998
E_b^{opt} (eV)	0.32	0.39	0.45	0.47

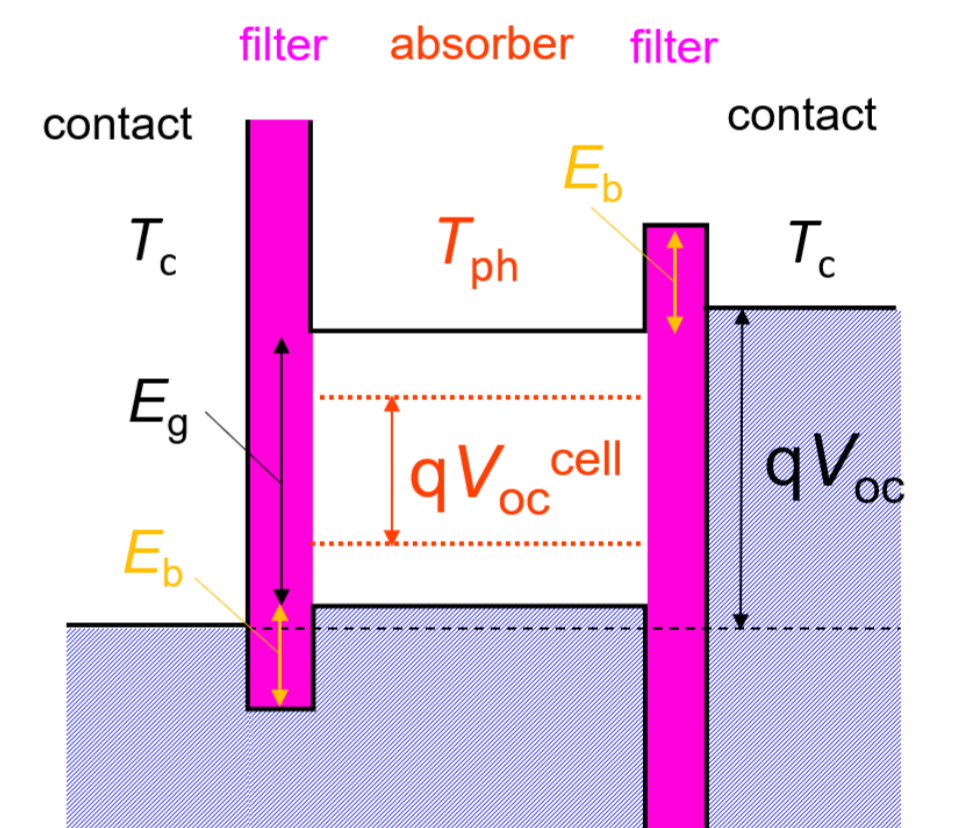
同じ品質(同じ非輻射再結合寿命)の結晶シリコンを用いた場合と比較すれば、いずれの場合も熱回収効果により変換効率の上昇(正の温度特性)がみられる。
→ 熱回収効果は非輻射再結合に強い耐性がある。

非輻射再結合へ耐性があることの二つの理由

- 熱回収型太陽電池の正の温度特性は、主に開放電圧の温度特性(下の式)に起因している。開放電圧の正の温度係数は、開放電圧の値そのものによらず、エネルギー選択層の障壁によってのみ決まる。このため、正の温度特性は結晶の品質(キャリア非輻射寿命)によらないことになる。

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{2E_b}{qT}$$

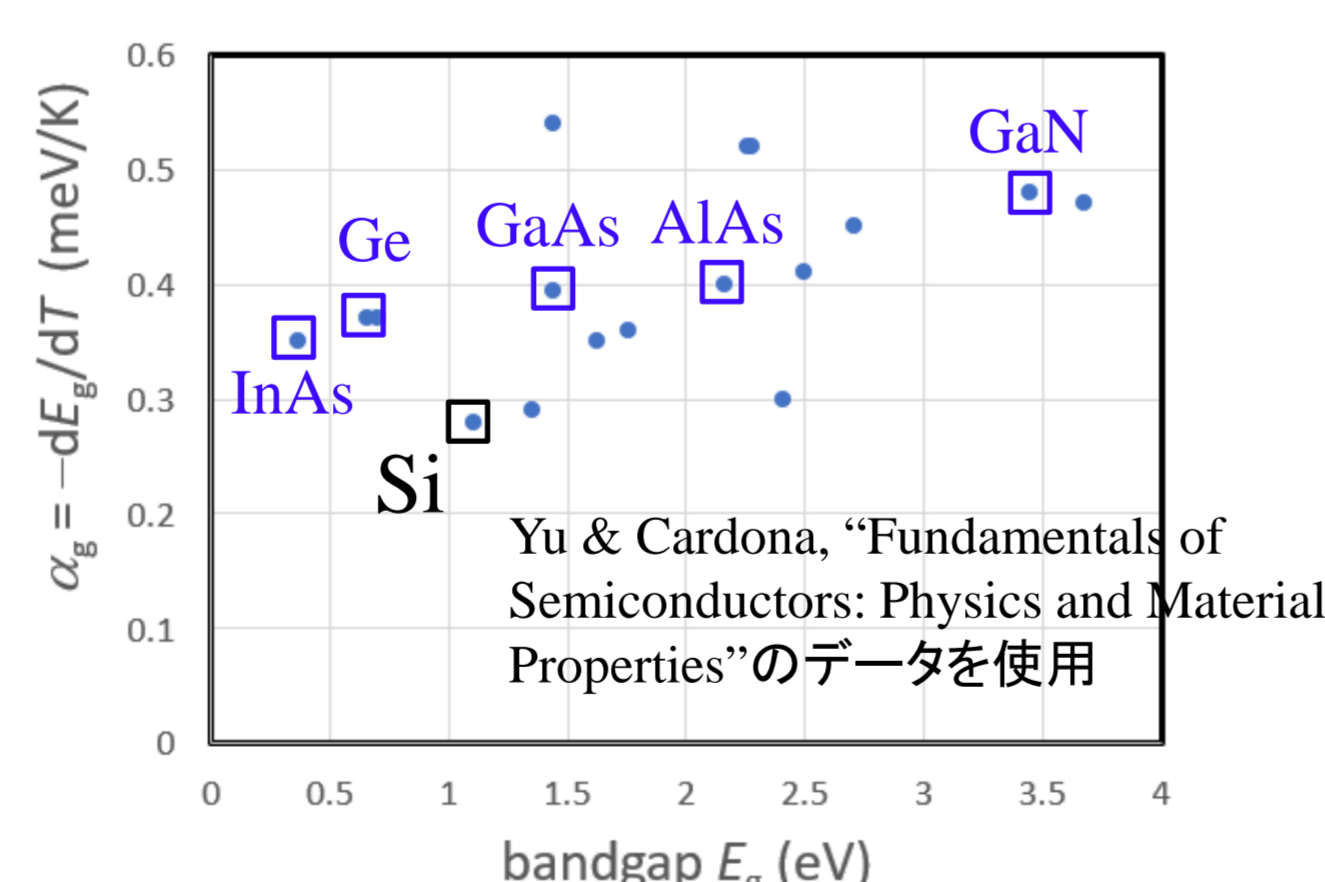
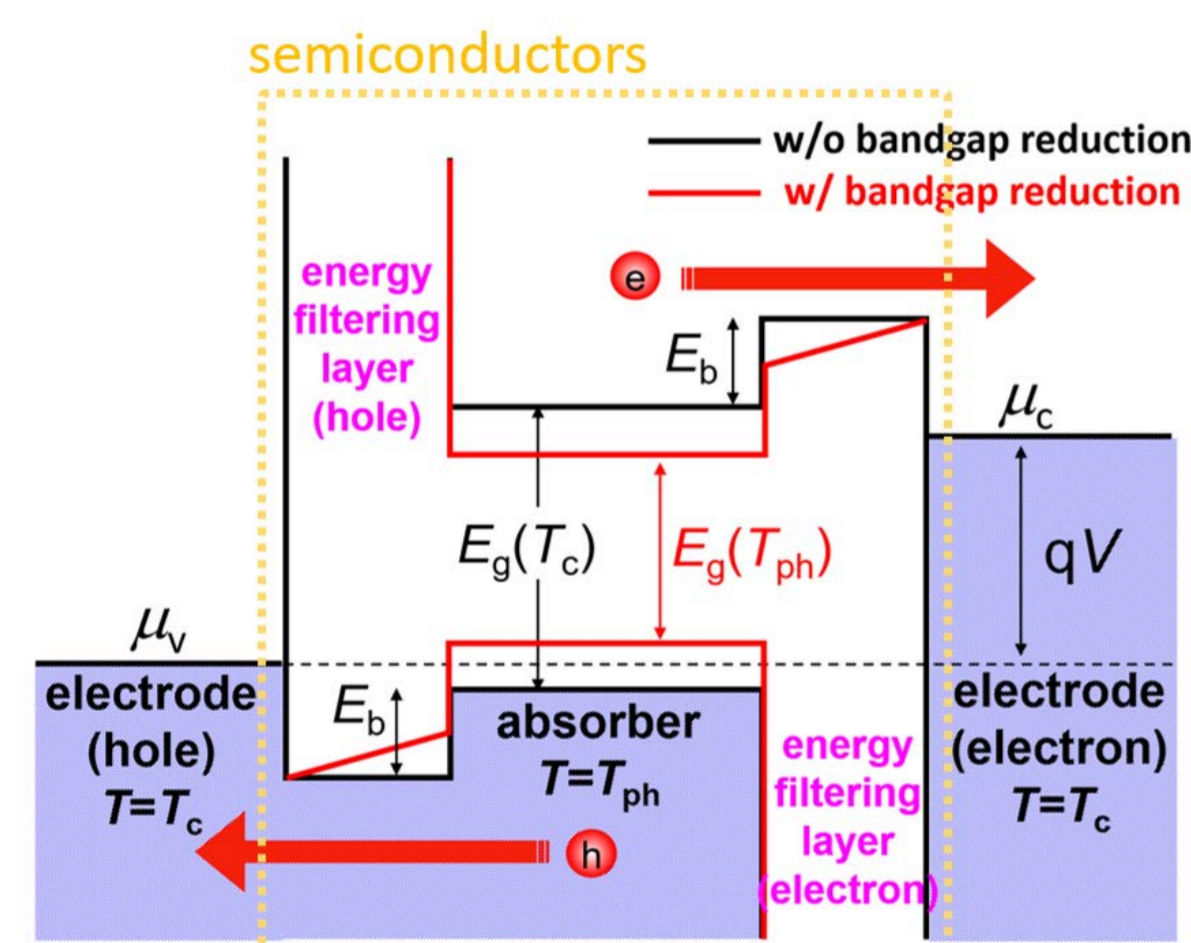
K. Kamide et al., Phys. Rev. Applied, 12, 064001 (2019).



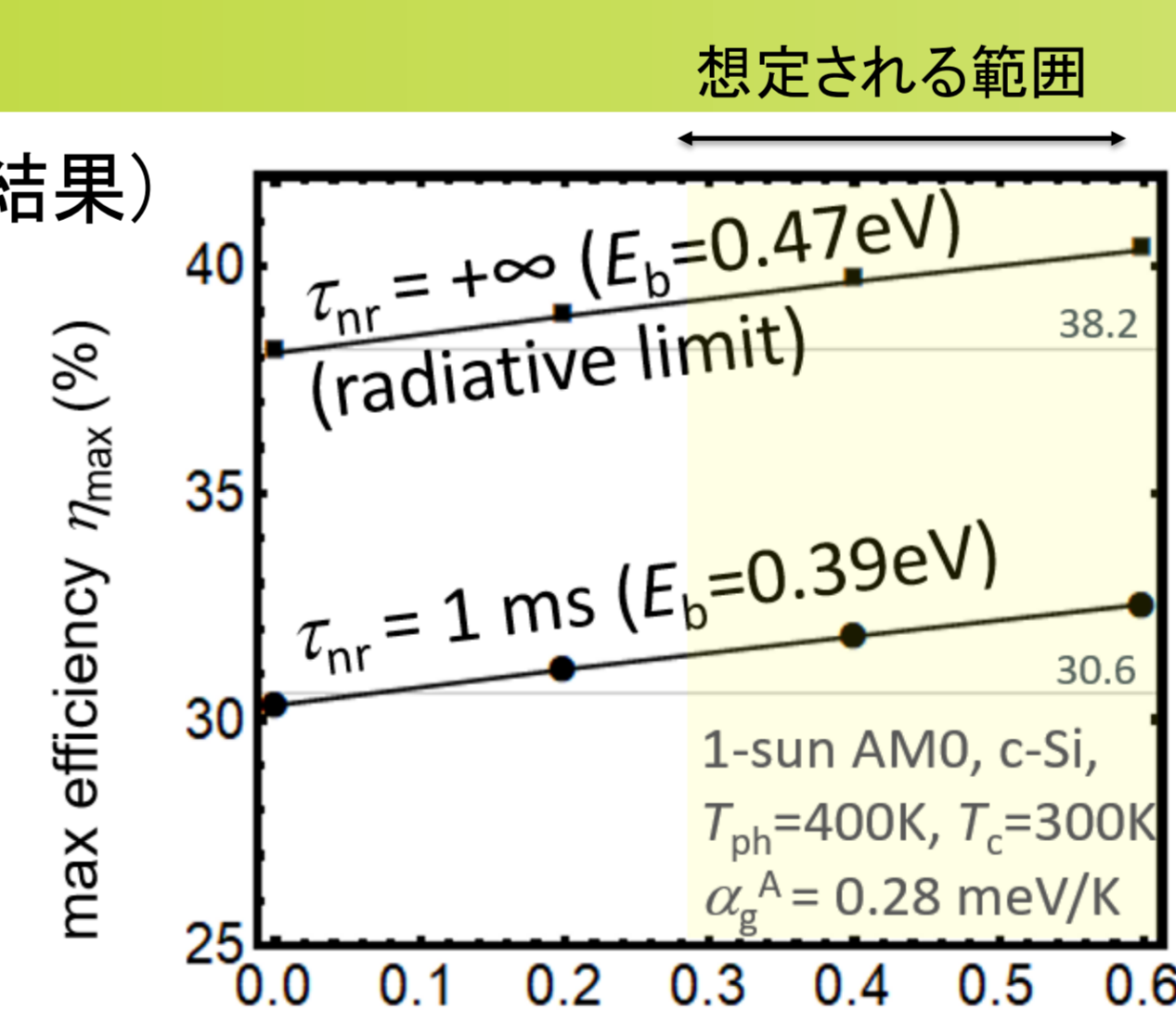
- 非輻射再結合によるエネルギー損失は吸収体を温める熱となるため、その一部は熱回収型構造により電力として回収される。このため、通常の太陽電池より非輻射再結合による性能低下は抑えられる。

結果2: バンドギャップ縮小の影響

熱回収型太陽電池では、高温化した吸収体を用いるため吸収体(結晶シリコン)のバンドギャップが縮む。単純には、開放電圧を低下させる一方で短絡電流を増加させる効果があると予想される。さらに、エネルギー選択層内部の温度上昇も起こるため、最終的なデバイス特性への影響は、単純には予想できない。



(計算結果)



エネルギー選択層材料のバンドギャップ縮小係数 α_g^F (meV/K)

エネルギー選択層材料のバンドギャップ縮小は正に働き、熱回収効果をより高める。吸収体とエネルギー選択層の寄与を合わせるとバンドギャップ縮小は良い影響を与え効率をさらに増加させる。

バンドギャップ縮小が良い効果を与える理由

エネルギー選択層内には温度勾配が存在するため、バンドプロファイルにも勾配が発生。この勾配は、吸収体から電極(順方向)へのキャリアの流出を促進し、電極から吸収体(逆方向)への流入を抑制する効果がある。このラチェットの効果により、エネルギー選択層のバンドギャップ縮小が開放電圧の特性に正の寄与を生む:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{2E_b}{qT} + \frac{\alpha_g^F - \alpha_g^A}{q}$$

α_g^A : 光吸収層(Si)のバンドギャップ縮小係数
 α_g^F : エネルギー選択層のバンドギャップ縮小係数

結論

- 熱回収型太陽電池(タイプI)のコンセプトは、非輻射再結合やバンドギャップ縮小が存在する現実の太陽電池にも応用できることを理論的に確認した。
- この知見により本コンセプトの結晶シリコン太陽電池への応用への期待がより確かなものとなった。

参考文献

- (熱回収型太陽電池:タイプI)
- [1] K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. 12, 064001 (2019).
 - [2] 上出他, PCT/JP2018/043782 (W I P O) (2018).
 - [3] K. Kamide et al., 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), pp. 1817-1821 (2018).
 - [4] K. Kamide et al., 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 2175-2177 (2020).
- (熱回収型太陽電池:タイプII)
- [5] 上出他, PCT/JP2019/045804 (W I P O) (2019).
 - [6] 上出他, 第66回応用物理学会春季学術講演会 11a-W321-5 (2019).
 - [7] K. Kamide et al., PVSEC-29 (Xian, China, 2019).