

ホットキャリア太陽電池における バレー間散乱利用の理論的検証

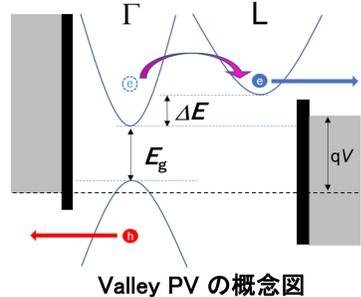
上出健仁

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

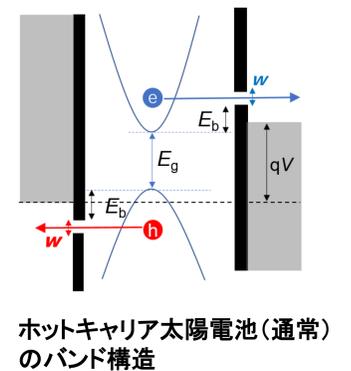
2019年にD. Ferry(アリゾナ州立大)はバレー間フォノン散乱によりホットキャリアの熱緩和を抑制するValley PVを、ホットキャリア太陽電池(HCSC[1])実現への近道となるコンセプトとして提案した[2]。この興味深い提案について、オクラホマ大-アリゾナ州立大の研究グループが検証実験を始めたが、今のところはっきりした効果は示されていない[3,4]。

デバイス特性は、提案[2]で推定値(外挿値)が与えられているのみで十分に示されていない。提案通り、従来のHCSCを向上させる効果が得られるか、非平衡理論[5,6]を用い検証する。



ホットキャリア太陽電池(HCSC)とバレー間散乱

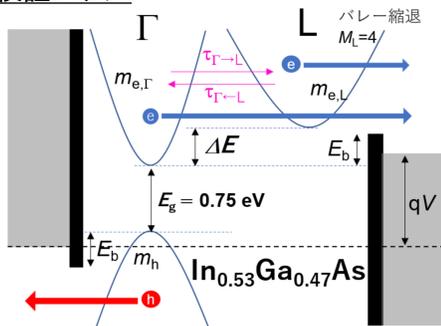
ホットキャリア太陽電池は光生成後に存在するホットキャリアを高速に取り出すことで熱化損失を回避し高い変換効率(理想的には80%以上[1])を実現できる太陽電池の古くから知られたコンセプトである。キャリア取り出し実現条件(=高速+エネルギー選択)が厳しく今のところ実現されていない。最近、バレー間散乱を利用すれば高速取り出しの条件が緩和され実現可能になると提案された[2]。



理論検証

バレー間散乱が強く働く場合に、従来のHCSCと比較し正の効果(デバイス特性を改善する/実現条件が緩和されるなど)が付与されるか理論検証する。

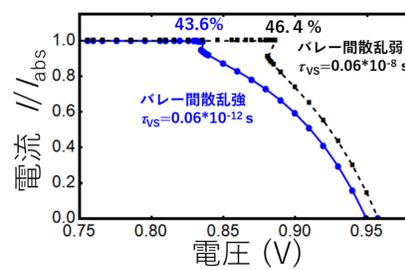
検証モデル



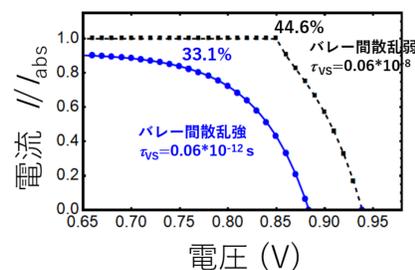
1000倍集光、光吸収層厚 = 100 nm、直接遷移($\Gamma-\Gamma$)の吸光度=1、間接遷移($\Gamma-L$)の吸光度=10⁻³

① バレー間散乱が良いHCSCをより特性改善するか?

(設定1) $\Delta E = 0.5$ eV, $E_b = 0.3$ eV
平衡化時間 = 1 ps,
取り出し時間 = 10 ps,
熱化時間 = 1000 ps (1 ns)



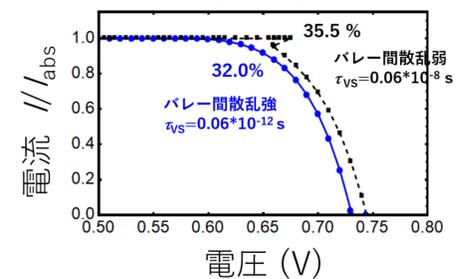
(設定2) $\Delta E = 0.3$ eV, $E_b = 0.3$ eV
平衡化時間 = 1 ps,
取り出し時間 = 10 ps,
熱化時間 = 1000 ps (1 ns)



否: 高速なバレー間散乱の導入により逆に電圧が下がり最大効率も低下。
(46.4% → 43.6%, 44.6% → 33.1%)

② バレー間散乱が悪いHCSCを特性改善/実現条件を緩和するか?

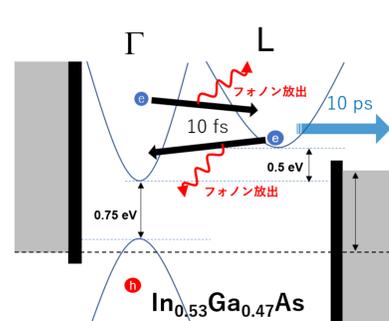
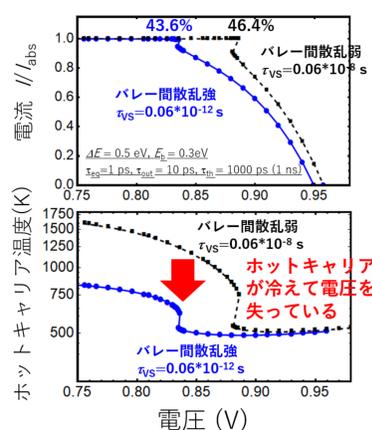
(設定3) $\Delta E = 0.2$ eV, $E_b = 0.2$ eV
平衡化時間 = 1 ps, 取り出し時間 = 10 ps,
熱化時間 = 100 ps (0.1 ns)



否: バレー間散乱の導入によりHCSCの特性はさらに低下。(35.5% → 32.0%)
つまり、実現条件の緩和にも寄与しない。

考察

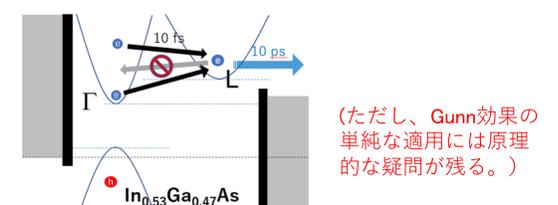
解釈: 熱緩和を抑制できそうなのに、なぜ?



バレー間散乱は格子への熱放出を伴い、かつ、双方向的に起こる($\Gamma \leftrightarrow L$)。これがキャリア取り出しの前に頻繁に起こるため、キャリア温度を低下させる。提案[2]とは逆に格子温度へのエネルギー緩和を早める。

どうしたらうまく働くか

(可能性1) 何らかの仕掛けで散乱が一方向的($\Gamma \rightarrow L$)になる場合



(ただし、Gunn効果の単純な適用には原理的な疑問が残る。)

(可能性2) バレー間フォノンが高温化する場合(ホットフォノン)

特性改善が期待され、高速取り出しの条件も緩和される。この場合、高温フォノン温度への熱緩和がまず起こるので、コンセプトや特性は熱回収型太陽電池[8]に近くなる。

結論

- バレー間散乱が従来のホットキャリア太陽電池を改善するかどうか太陽電池の非平衡理論を用い理論検証した。
- バレー間散乱がフォノン放出を伴う双方向の過程である限り、正の効果を引き出すことは難しそう。
- 散乱に一方向性を与える何らかの仕掛け(ラチェット[9])が、正の効果を引き出すために必要になるのではないかと考えられる。

参考文献

- R. T. Ross and A. J. Nozik, J. Appl. Phys. **53**, 3813 (1982).
- D. Ferry, Semicond. Sci. Technol. (SST) **34**, 044001 (2019).
- H. Esmailpour et al., Nature Energy **5**, 336 (2020).
- D. K. Ferry et al., J. Appl. Phys. **128**, 220903 (2020).
- K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. **10**, 044069 (2018).
- K. Kamide, J. Appl. Phys. **127**, 183102 (2020).
- 上出, 第81回応用物理学学会秋季学術講演会 10a-Z15-14 (2020).
- K. Kamide et al., Phys. Rev. Appl. **12**, 064001 (2019).
- M. Yoshida et al., Appl. Phys. Lett. **100**, 263902 (2012).