

次世代太陽電池や水素エネルギー製造に 利用可能な高効率太陽電池の開発

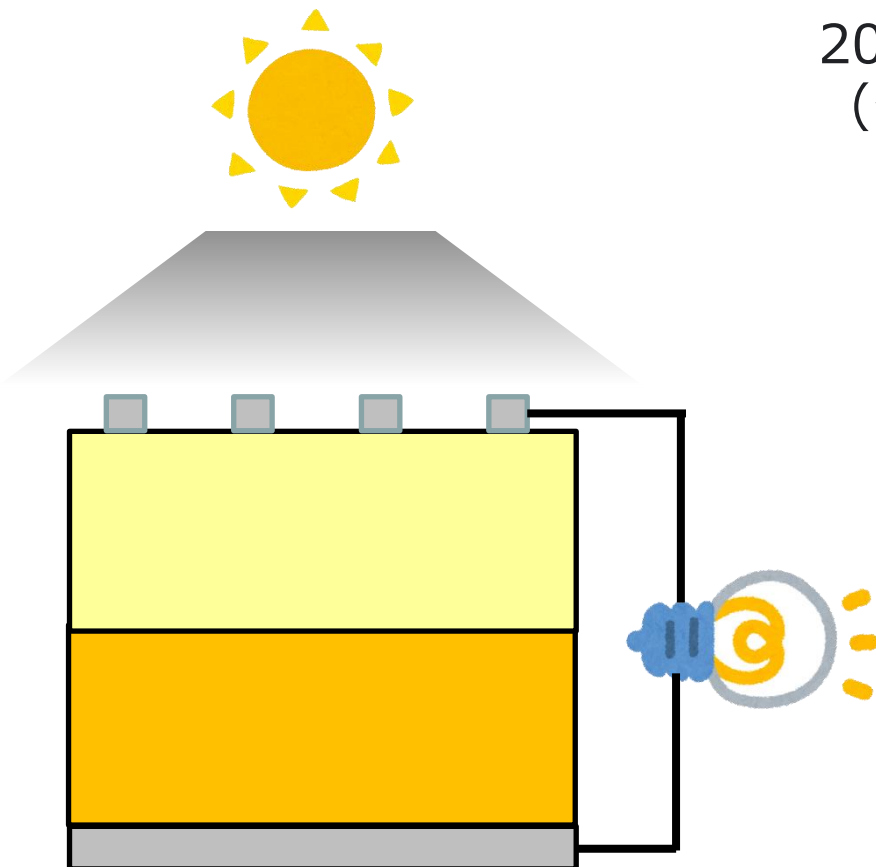
神戸大学 大学院工学研究科 電気電子工学専攻
准教授 朝日 重雄

2023年10月19日

従来技術とその問題点

本技術は変換効率50%を超える超高効率太陽出用電池を実現するための技術です

2023年市販太陽電池モジュールの変換効率
(シリコン単接合型太陽電池に分類)



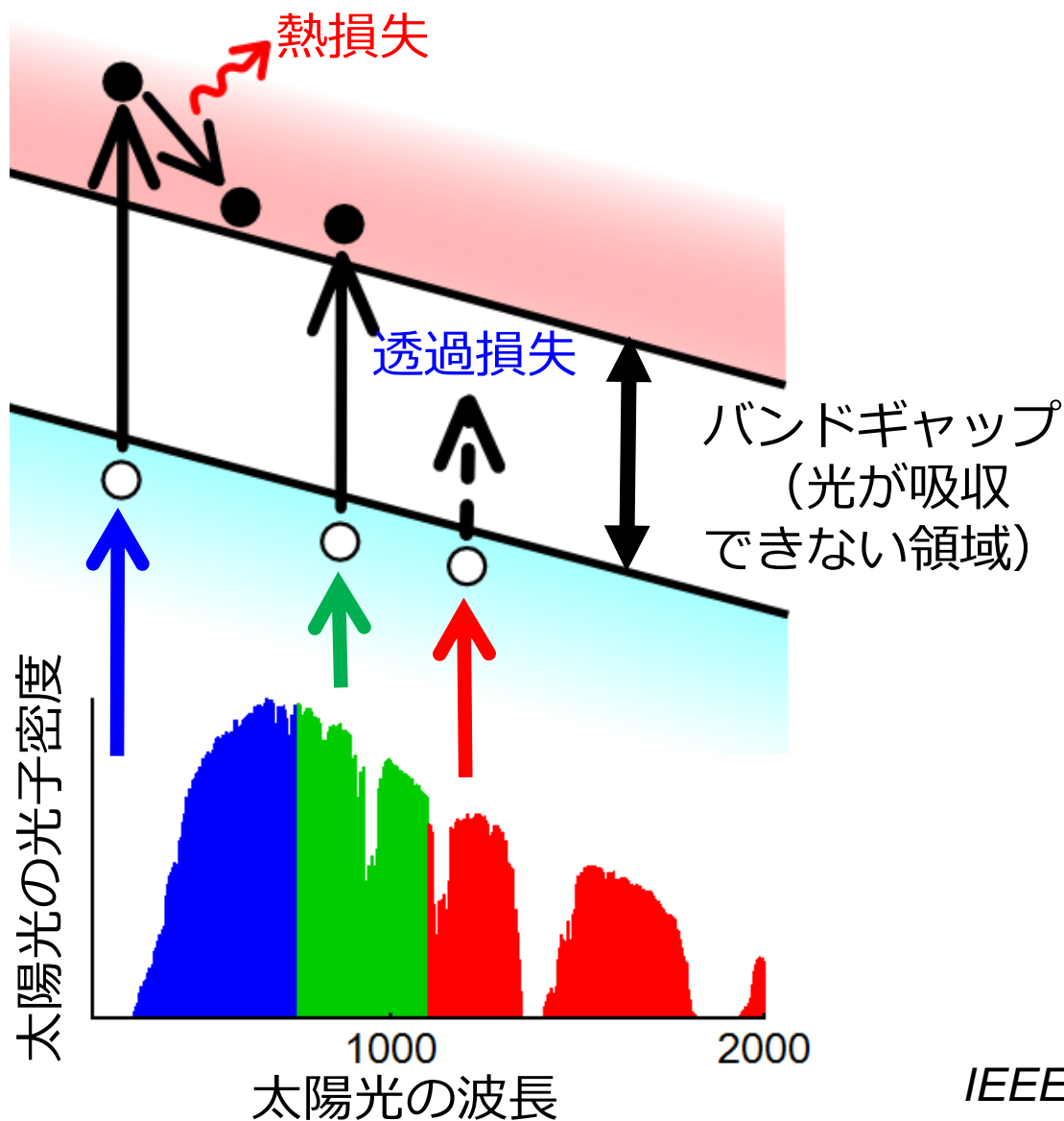
メーカー	変換効率
A社	20.0%
B社	21.0%
C社	20.8%
D社	20.2%

研究室レベルのシリコン太陽電池セルの
最高変換効率：**26.8%**

Prog. Photovolt. Res. Appl. **31**, 651 (2013)

太陽電池の変換効率の向上に余地がある

太陽電池の変換効率上限を決める要素



波長が長いほどエネルギーが小さい

バンドギャップより小さな
エネルギーの光子

太陽電池で吸収できずに透過
透過損失

バンドギャップより大きな
エネルギーの光子

太陽電池で吸収後、
熱を出してエネルギー放出

熱損失

シリコン単接合型太陽電池
の変換効率上限は**29.8%**

IEEE Trans. Electron Devices, **31**, 711 (1984)

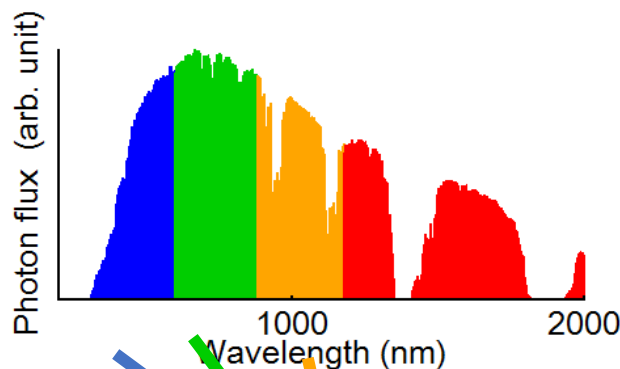
J. Appl. Phys., **32**, 510 (1961)

実現されている超高効率太陽電池

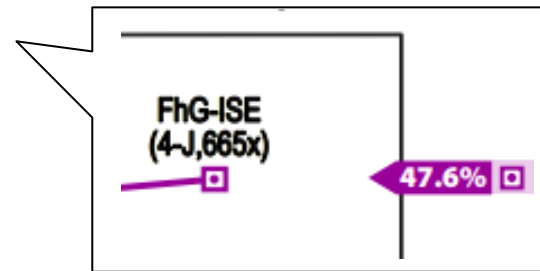
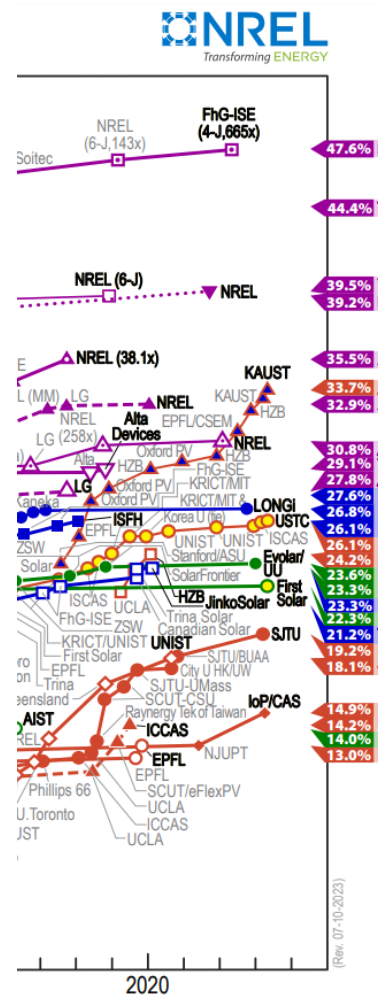
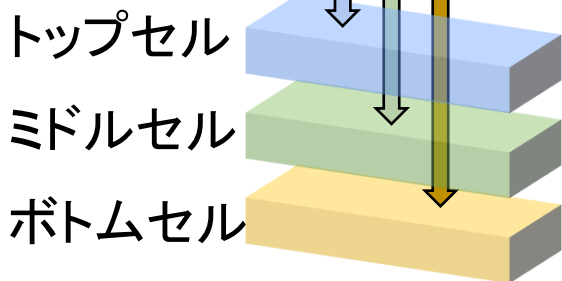
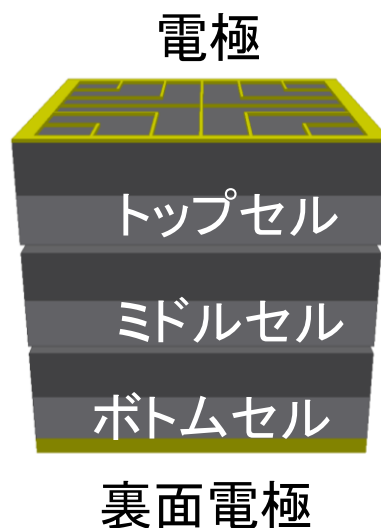
いくつか高効率太陽電池のコンセプトがある中で多接合型太陽電池が実証されている。
現在の世界最高効率は4接合型で**47.6%**。

低コスト化に課題がある。

太陽電池の変換効率チャート

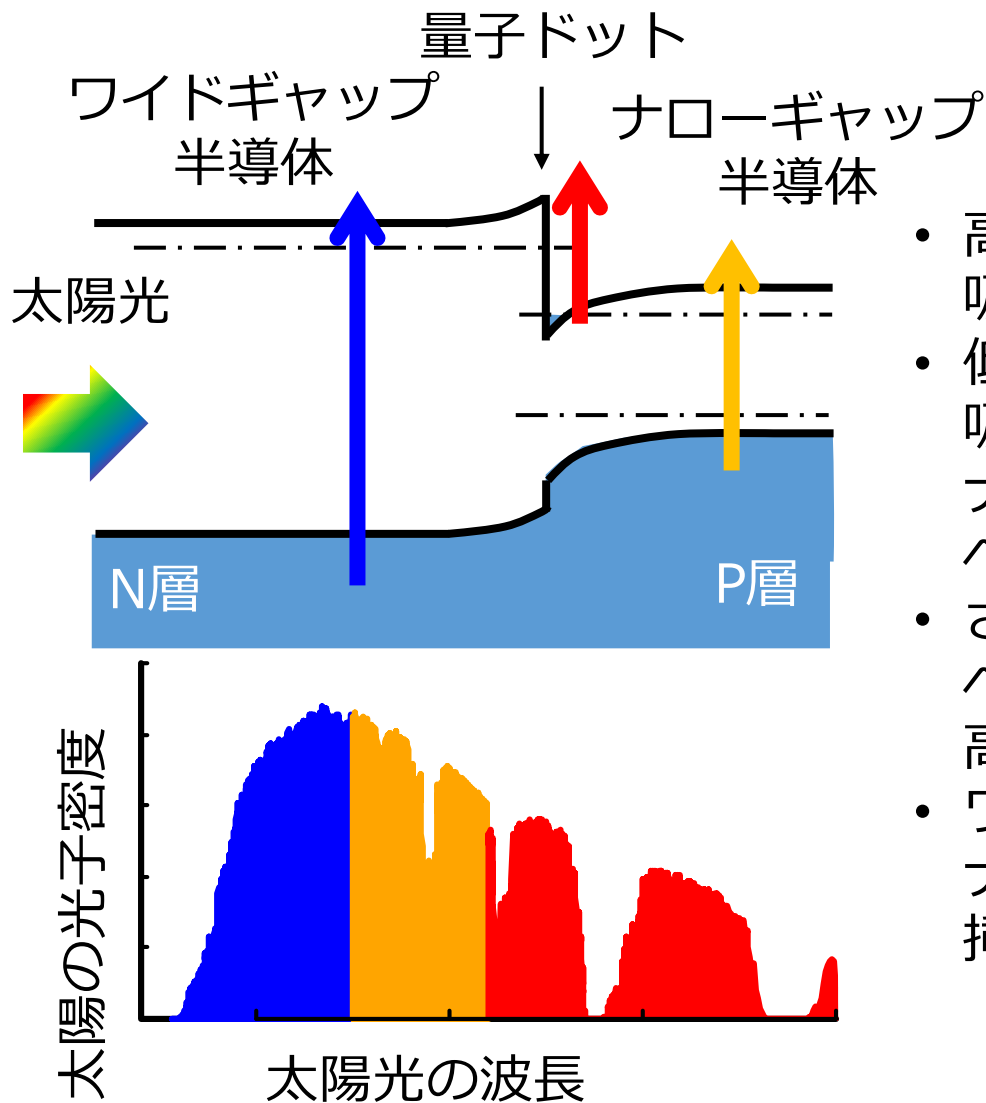


三接合太陽電池の例



<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

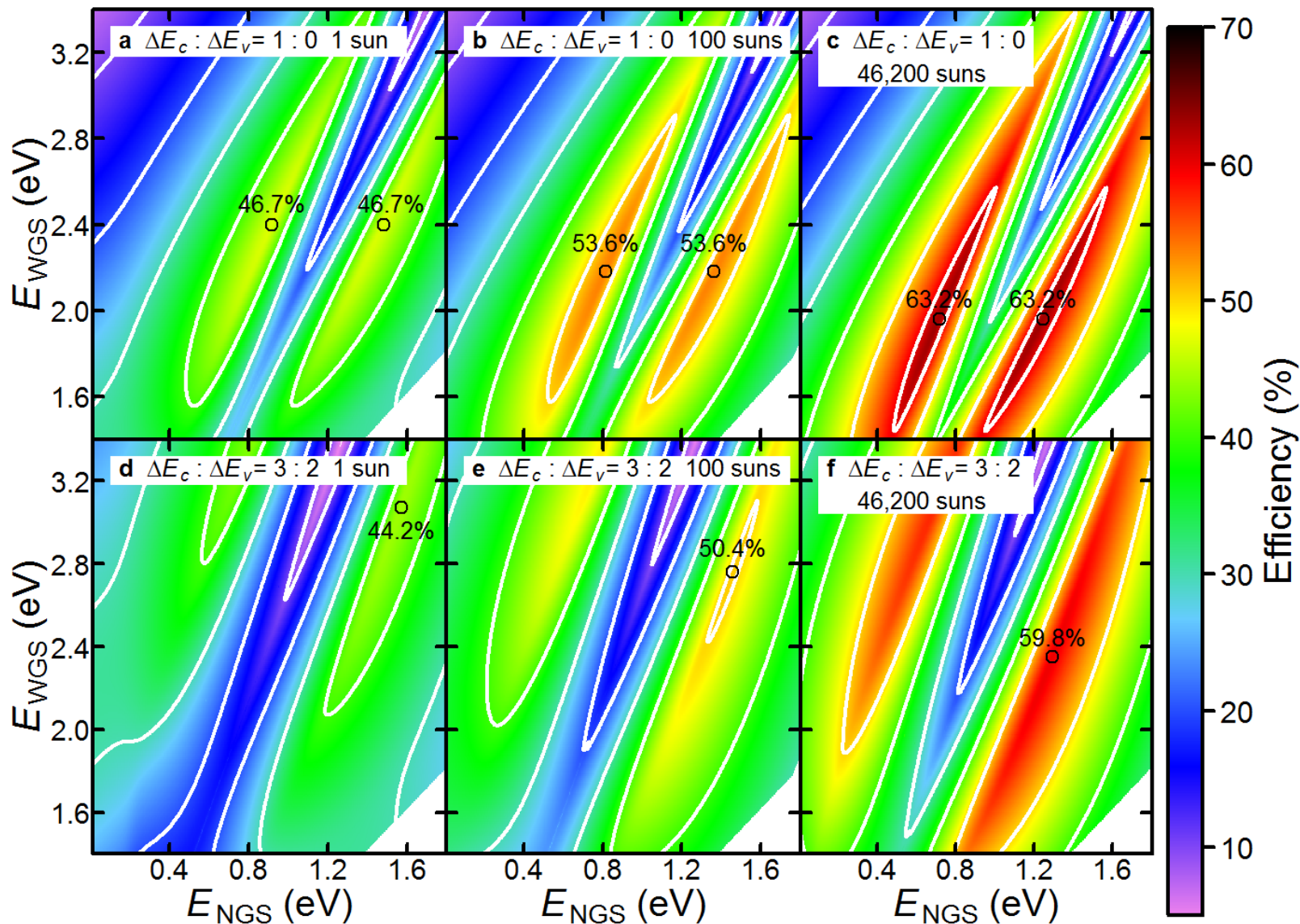
2段階フォトンアップコンバージョン 太陽電池 (TPU-SC) 2017年に提案



- 高エネルギー光子をワイドギャップ半導体で吸収させ、電流を取り出す。
- 低エネルギー光子をナローギャップ半導体で吸収させ、ナローギャップ半導体とワイドギャップ半導体のヘテロ界面に電子を蓄積させる。
- さらに低エネルギー光子の吸収によりヘテロ界面に蓄積された電子を励起、高効率アップコンバージョンを起こす。
- ワイドギャップ半導体とナローギャップ半導体の境界に量子ドットを挿入しアップコンバージョンを増強する。

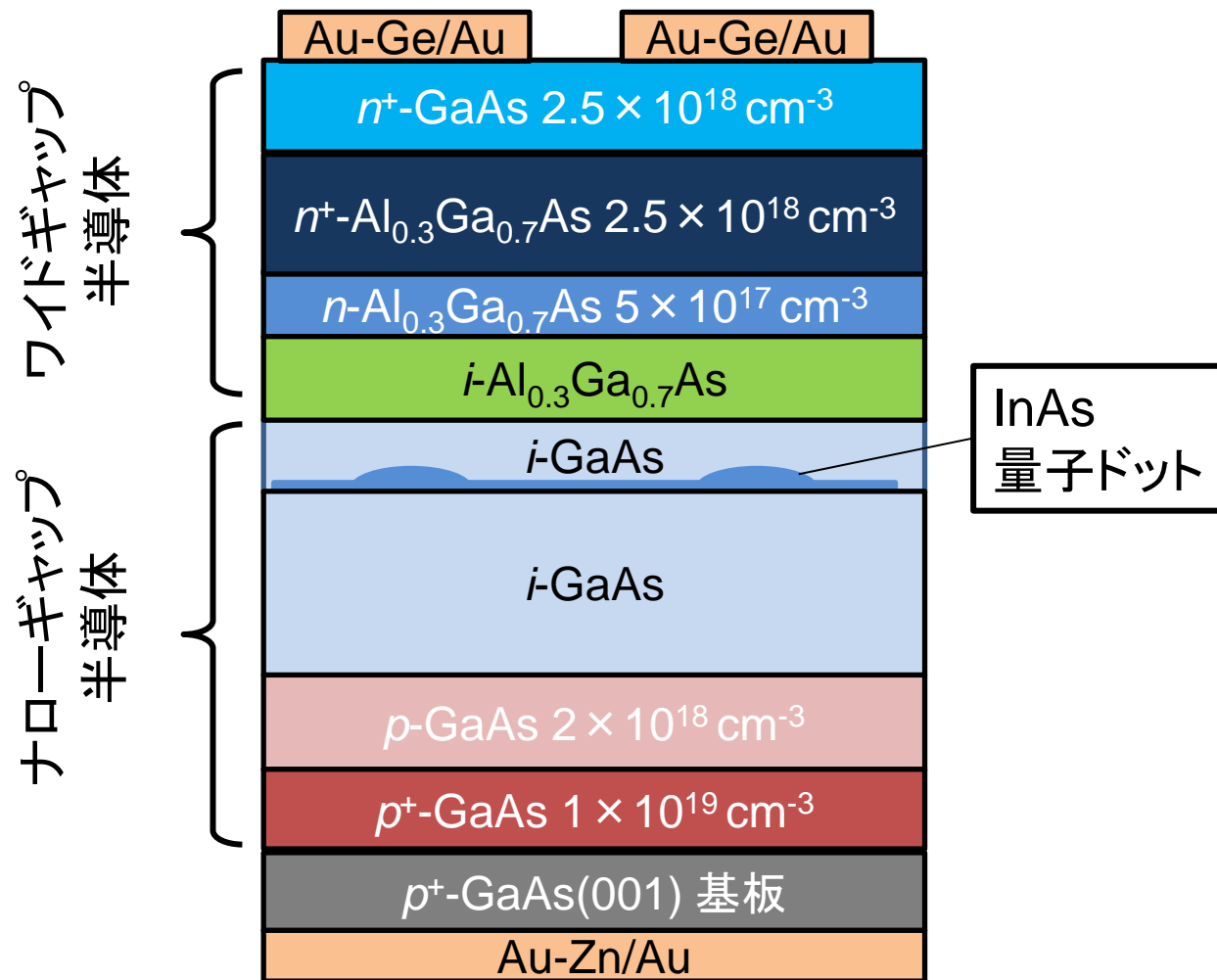
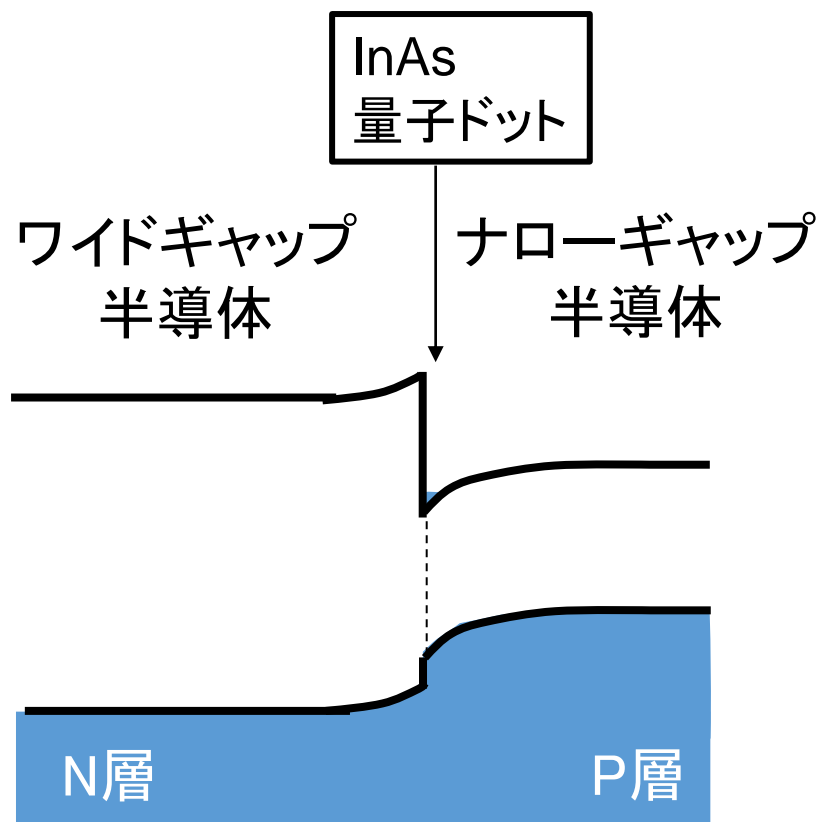
3つの吸収層で熱損失・透過損失を低減する高効率化する。
多接合型太陽電池より簡単な構造で低コスト化が可能か？

アップコンバージョン太陽電池の 理論変換効率



理論変換効率で最大60%到達可能

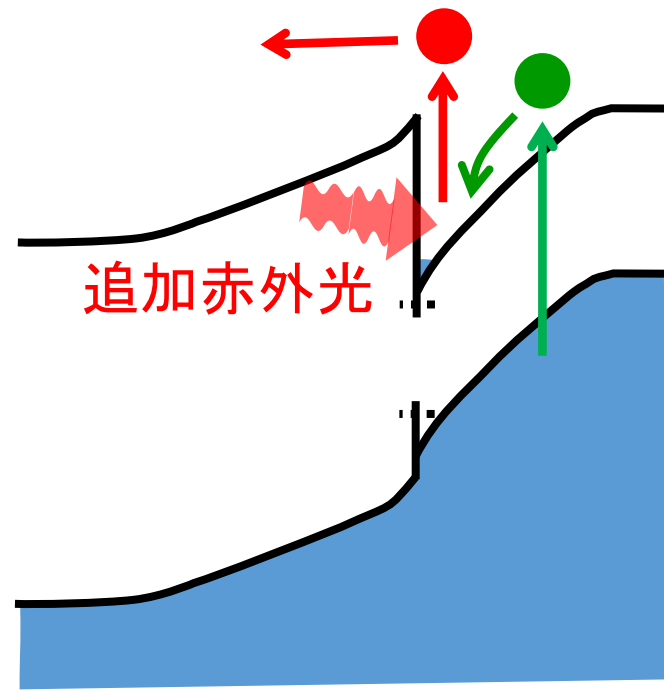
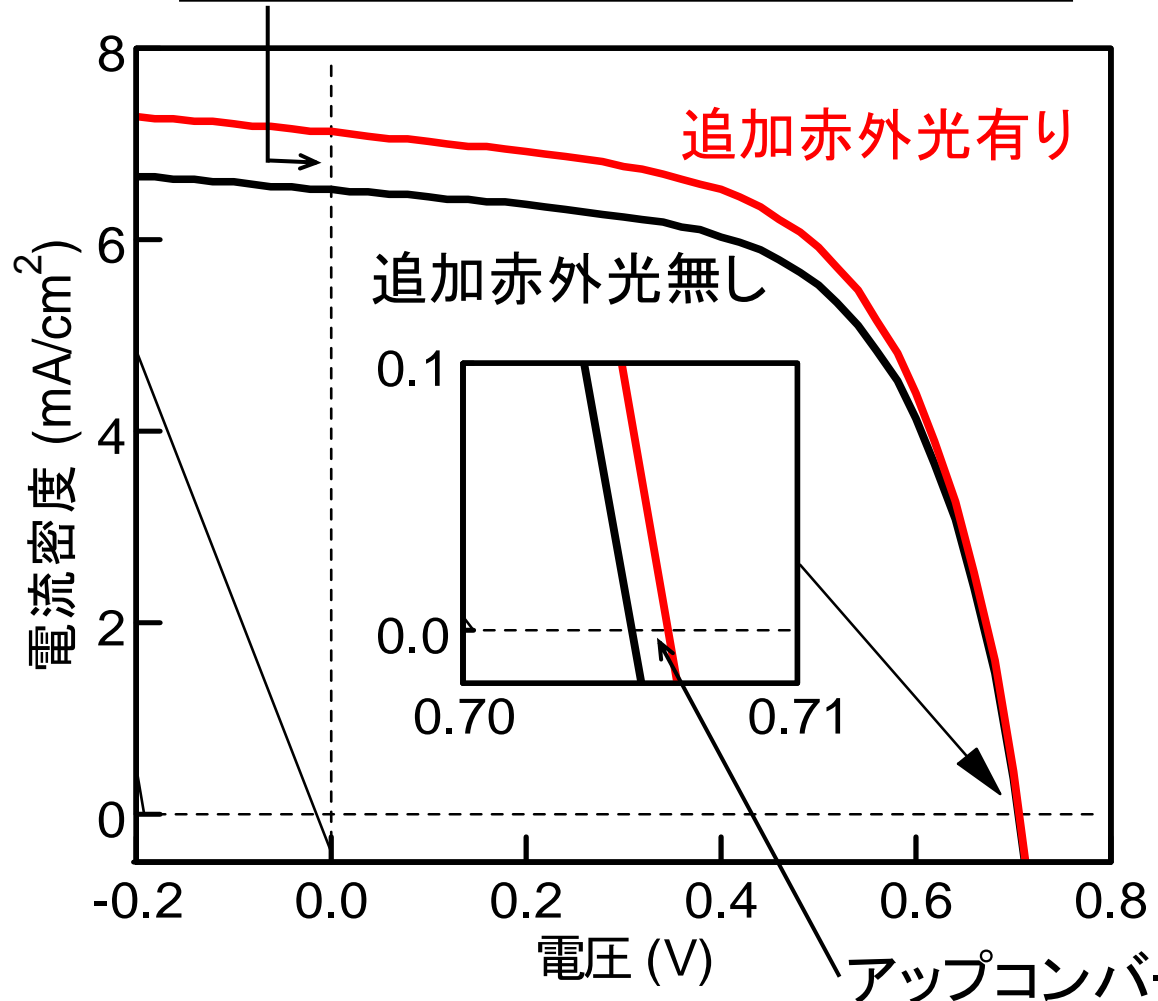
アップコンバージョン太陽電池の作製



固体ソース分子線エピタキシ法で太陽電池を作製。
13族と15族の化合物半導体であるGaAsとAlGaAsで構成。
ワイドギャップ半導体とナローギャップ半導体の境界にInAs量子ドットを挿入。

大きなアップコンバージョン電流の観測

アップコンバージョンによる電流上昇

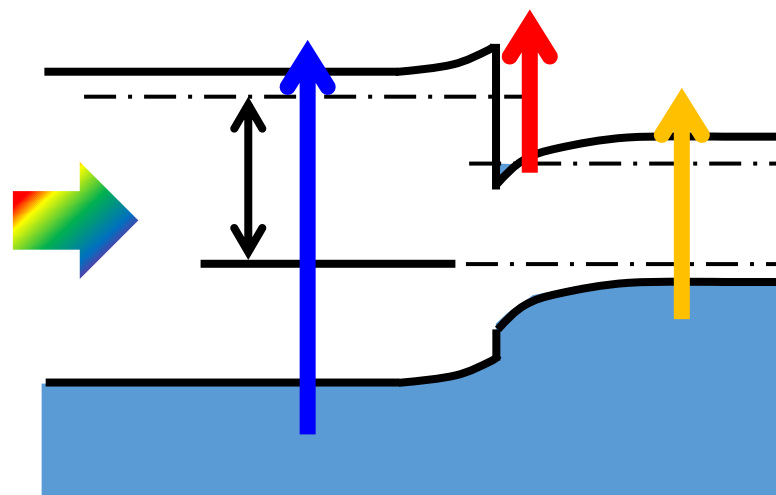


低エネルギー光子による電流上昇が既存技術の100倍以上向上。
低エネルギー光子による電圧上昇を世界で初めて観測。
→ アップコンバージョン太陽電池が高効率太陽電池となり得ることを実験で実証。

アップコンバージョン太陽電池の課題

高効率太陽電池実現に向けて

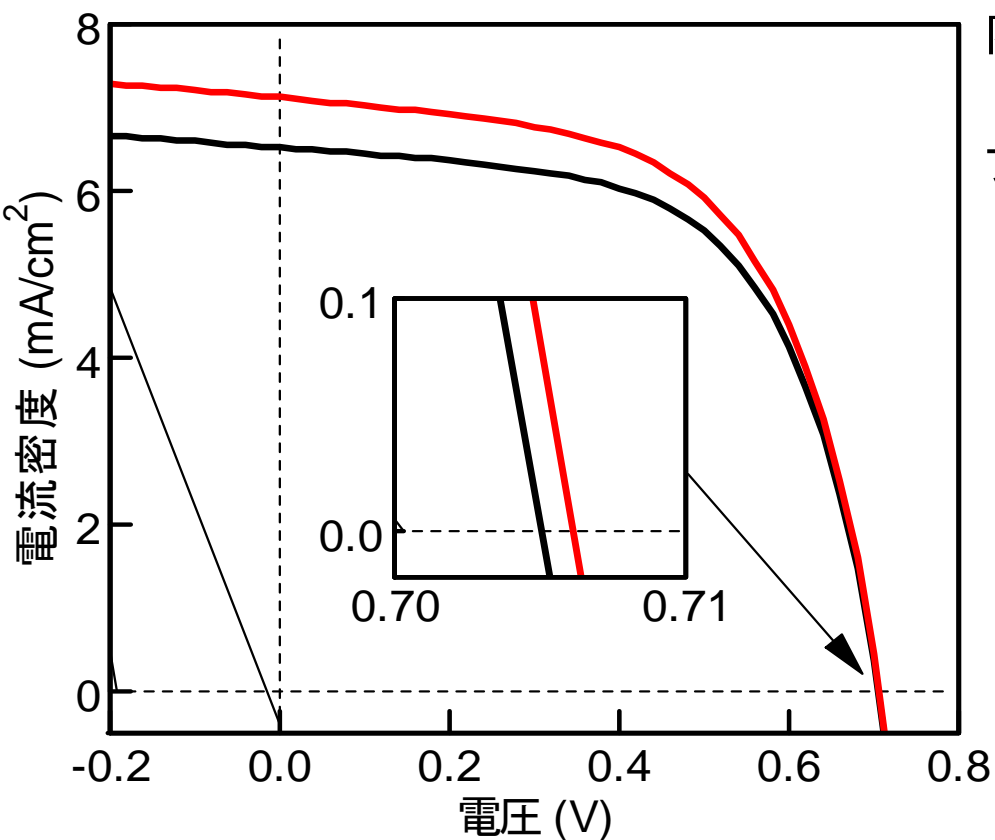
- アップコンバージョン効率の向上
(あと10倍向上すれば高効率が見えてくる)
- 開放電圧の向上



次のスライドから今回新たに開発した
技術の紹介になります。

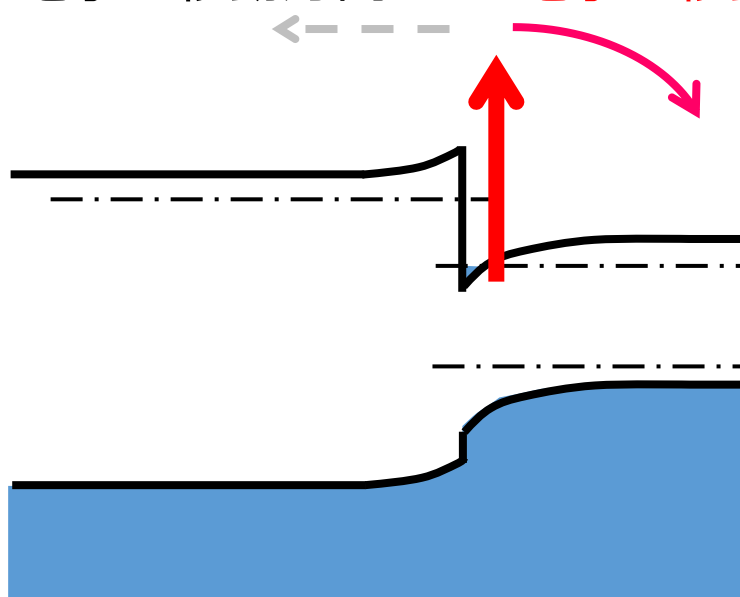
今回の技術で克服する課題

従来のアップコンバージョン太陽電池は大きな電流上昇と比較し、開放電圧の上昇が小さい。理由として開放電圧付近では内部電界が小さくなり、アップコンバージョンした電流の多くが拡散でナローギャップ半導体側に戻ってしまうため。



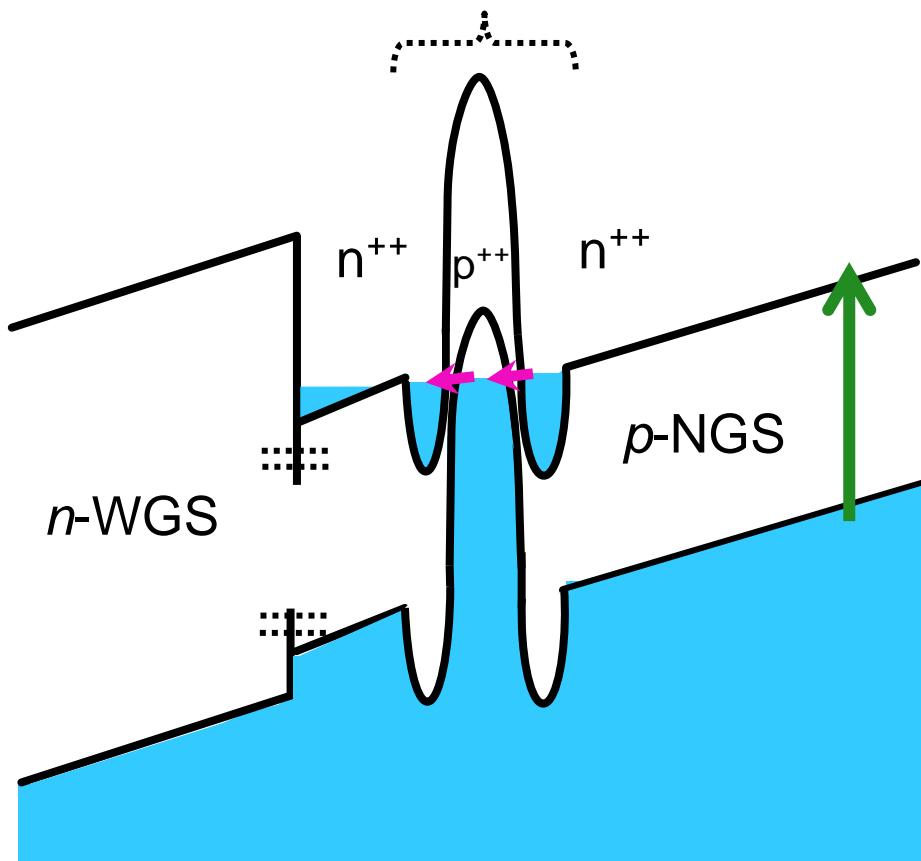
期待される
電子の移動方向

実際の
電子の移動方向



新技術「ダブルトンネル接合」の特徴

ダブルトンネル接合



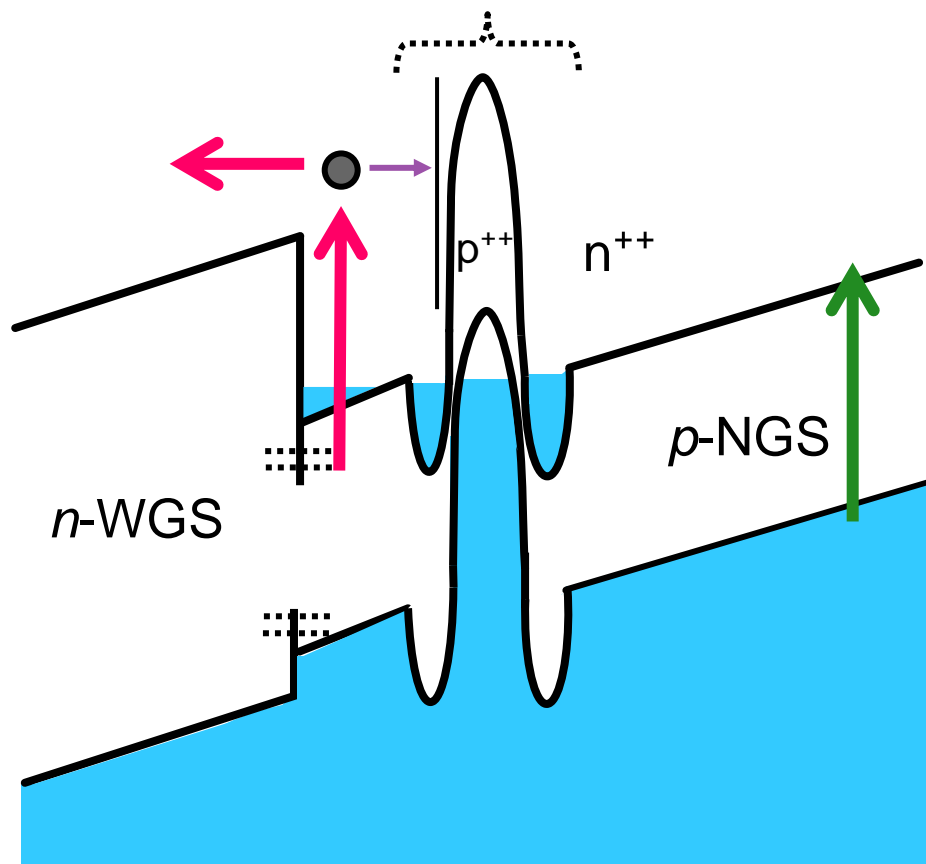
ヘテロ界面近傍のNGS側に、新たに**ダブルトンネル接合**を設置。
TPUによる開放電圧上昇効果を増強させることを期待。

トンネル接合層の期待される役割
障壁層を構成するp⁺⁺層を挟むように2層のn⁺⁺層を設置。

2回の**バンド間トンネリング**により、NGS側からの電子をヘテロ界面近傍の量子ドットへと供給。

新技術「ダブルトンネル接合」の特徴

ダブルトンネル接合



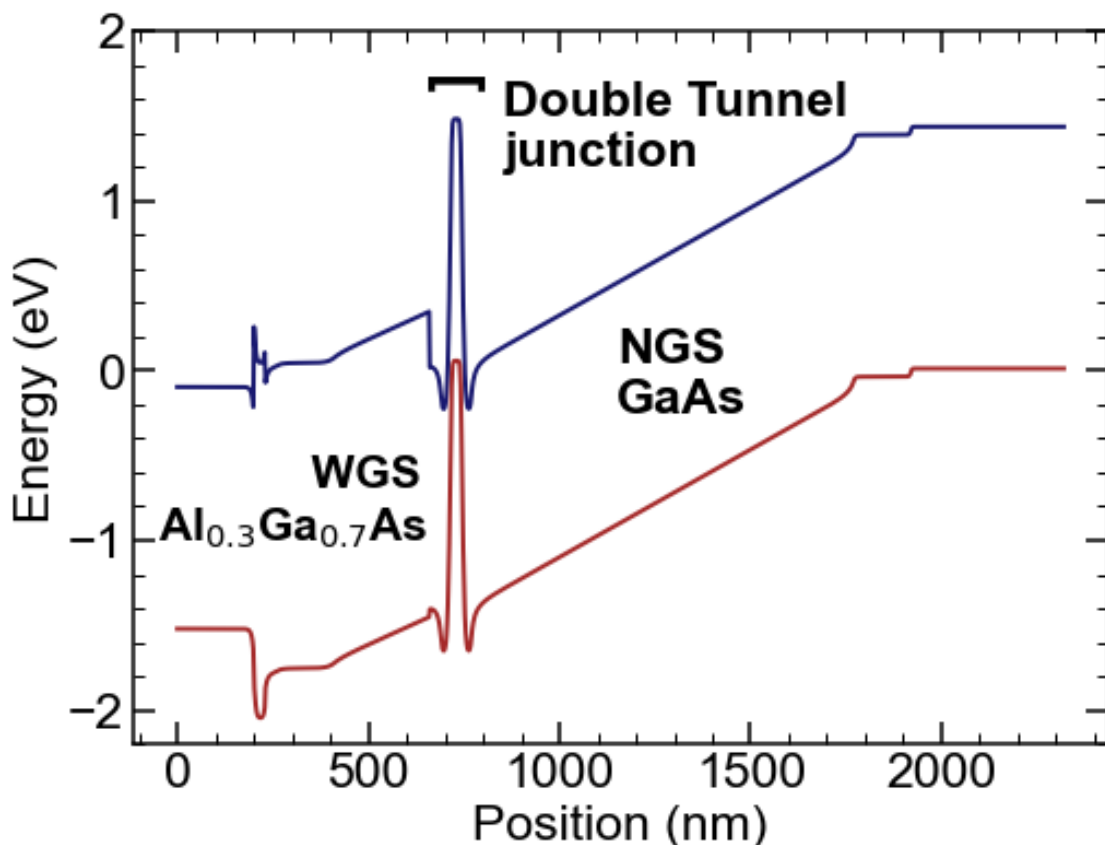
ヘテロ界面近傍のNGS側に、新たに**ダブルトンネル接合**を設置。**TPUによる開放電圧上昇効果を**増強させることを期待。

障壁層としての役割

ヘテロ界面にて励起した電子のNGS側への拡散を抑制する。
p⁺⁺層の障壁層としての効果を期待。

半導体シミュレーターソフトによる 提案構造の確認

COMSOL Multiphysicsによる
短絡状態でのバンド構造

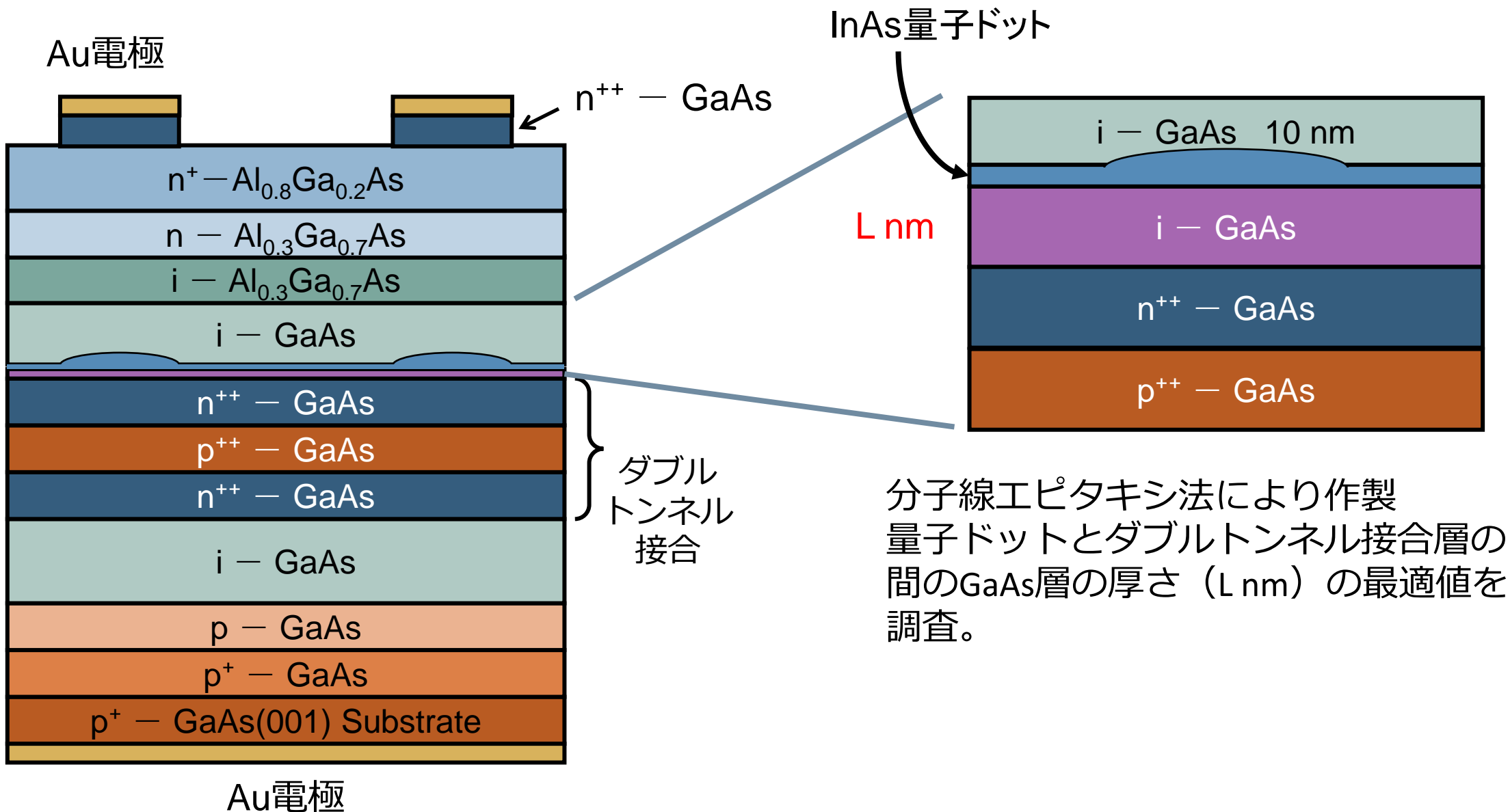


ダブルトンネル接合	ドナー/アクセプター濃度
n ⁺⁺ 層	1.0×10 ¹⁹ (/cm ³)
p ⁺⁺ 層	3.0×10 ¹⁹ (/cm ³)
n ⁺⁺ 層	1.0×10 ¹⁹ (/cm ³)

※簡単のためInAs量子ドットは考慮していない。

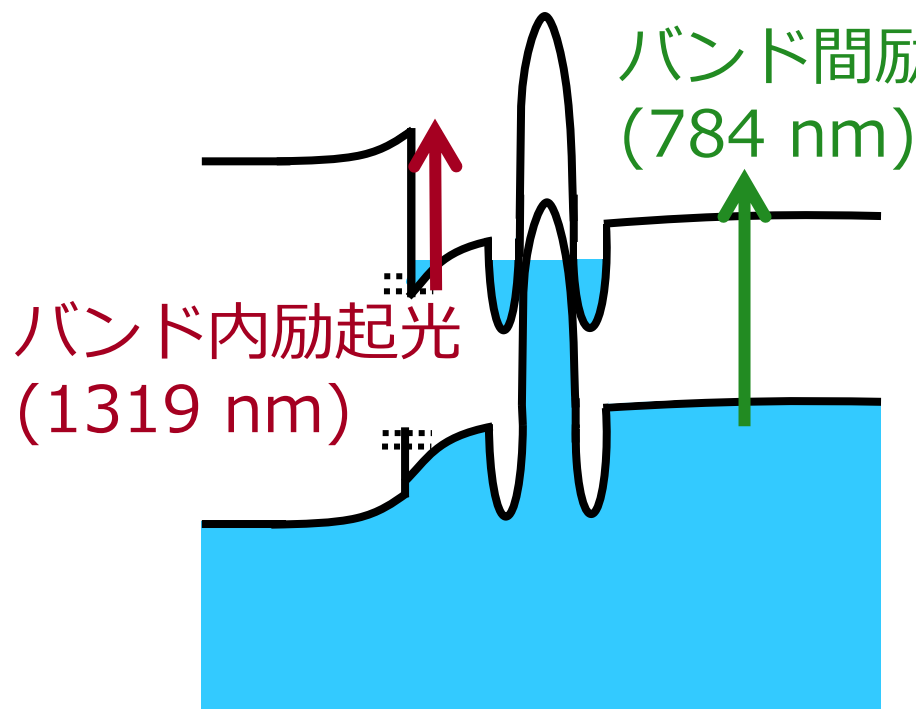
シミュレーターソフトにより
想定通りのバンド構造が形成されていることを確認

提案技術の実験実証 実証用太陽電池の作製



提案技術の実験実証

アップコンバージョンによる
電流電圧変化の励起光強度依存性



GaAsでのバンド間励起

励起光波長：784 nm

励起光強度： P_{inter} 固定

ヘテロ界面におけるバンド内励起

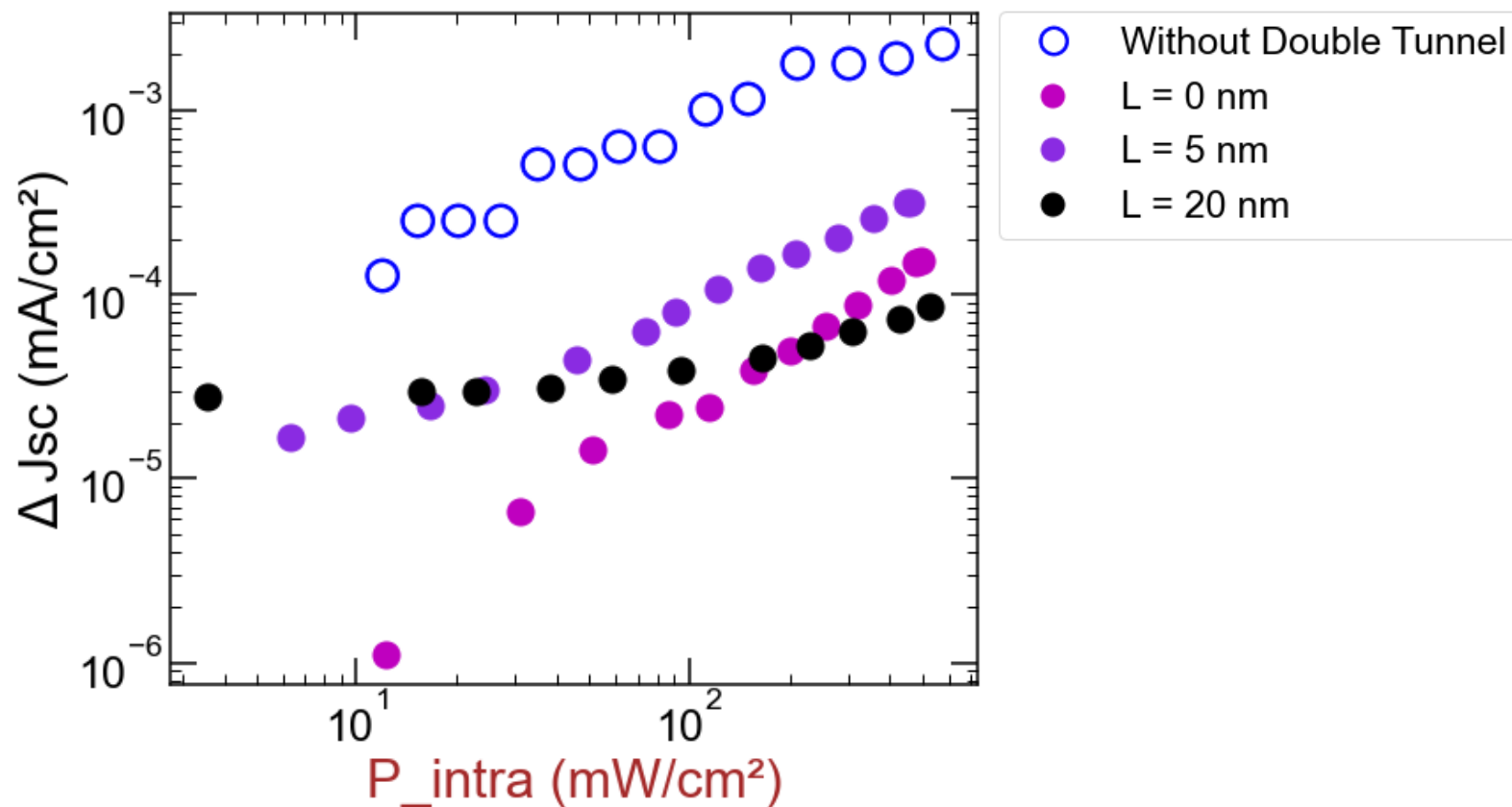
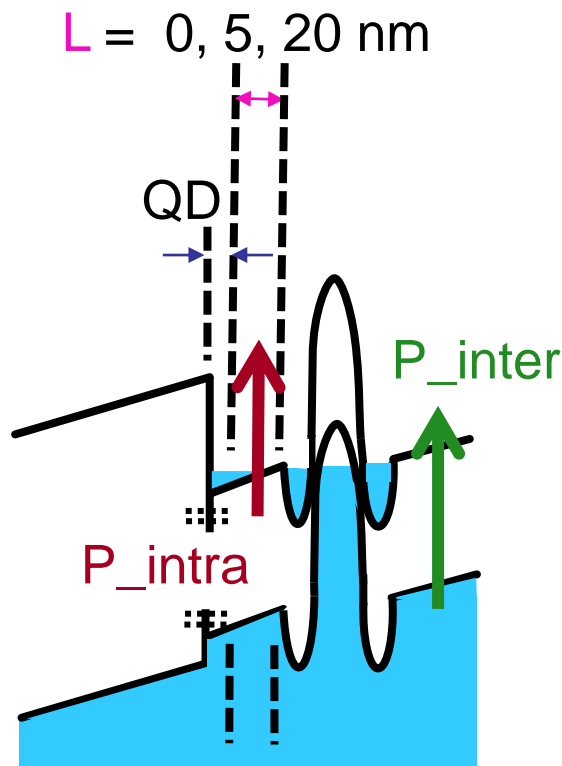
励起光波長：1319 nm

励起光強度： P_{intra} 変化

(25~500 mW/cm²)

- ⇒ 赤外光照射による短絡電流密度と開放電圧の上昇 (ΔJ_{sc} , ΔV_{oc})を測定。
- ⇒ ダブルトンネル接合による電圧上昇効果の増強を確認。

アップコンバージョン電流 (ΔJ_{sc}) の バンド内励起光強度 (P_{intra}) 依存性



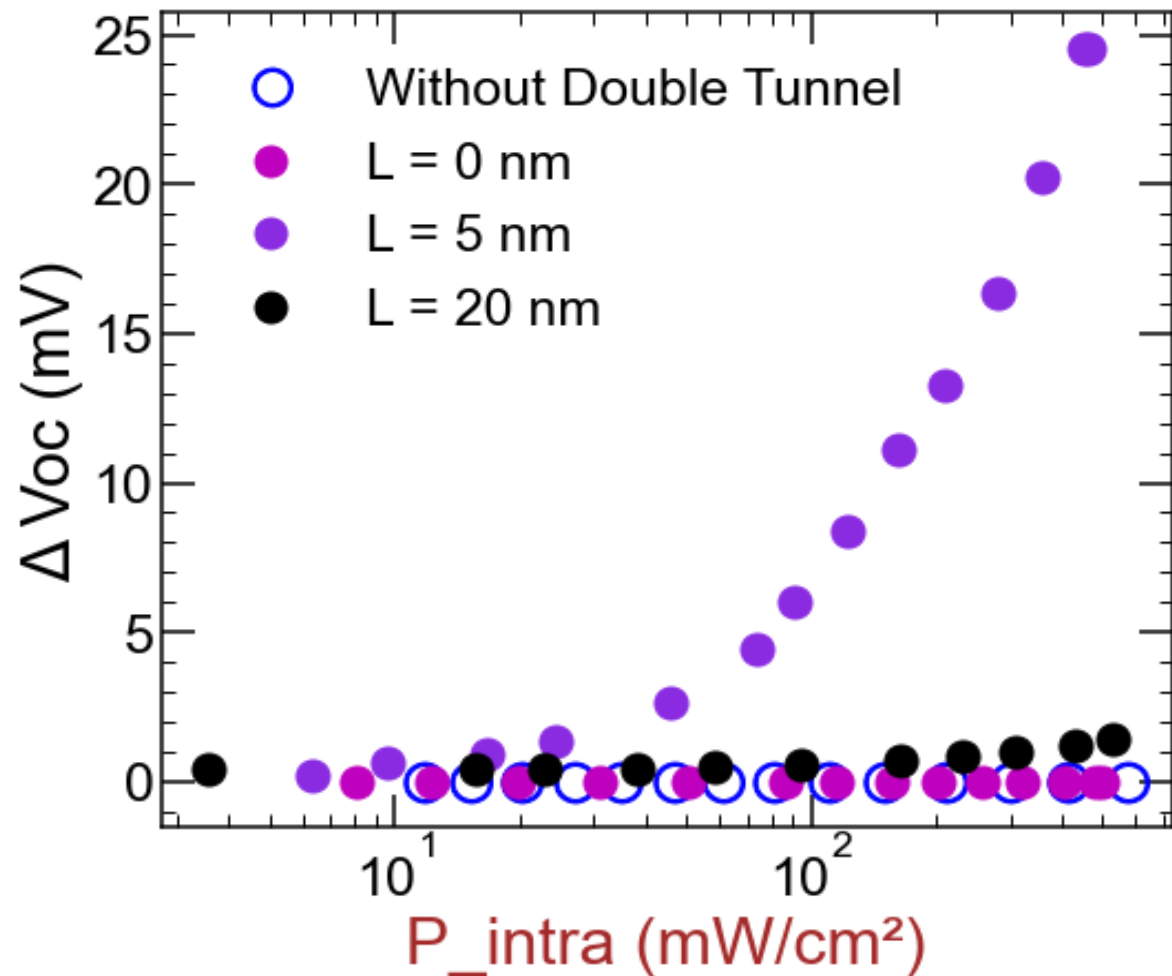
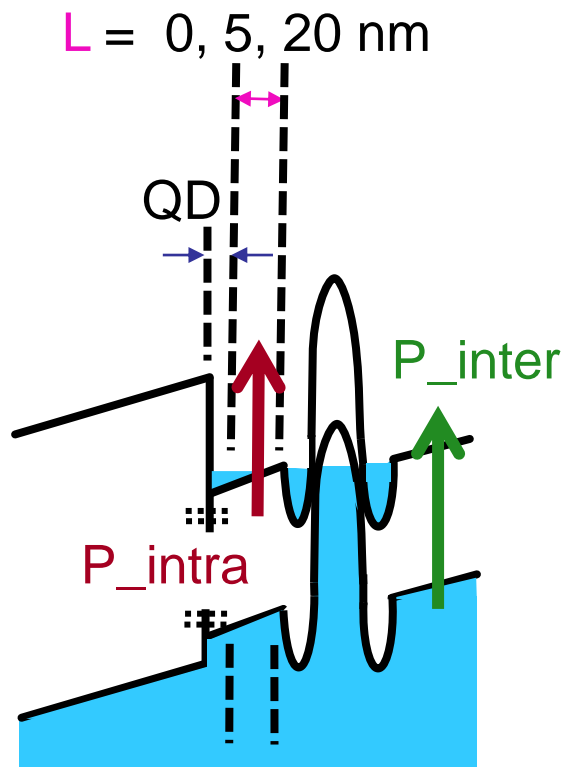
P_{inter} :
0.035 mW/cm²

P_{intra} :
25~500 mW/cm²

ダブルトンネル接合なしのTPU-SCと比較し、非常に小さな値となった。

n^{++} 層の電界によって、電子がNGS側へドリフトした可能性。
変調ドーピングによる内部電界を制御で改善が可能。

アップコンバージョンによる電圧上昇 (ΔV_{oc}) の バンド内励起光強度 (P_{intra}) 依存性



P_{inter} :
0.035 mW/cm²

P_{intra} :
25~500 mW/cm²

$L = 5 \text{ nm}$
アップコンバージョンによる大きな電圧上昇が確認された。
適切なバッファ層膜厚により、
ダブルトンネル接合における障壁層効果が表れた。

新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来のアップコンバージョンは大きな電流増加は実証していたが、電圧上昇が少ないことが課題であった。
- 今回提案するダブルトンネル構造によりアップコンバージョンによる大きな電圧上昇が可能となった。
- 本技術(ダブルトンネル構造)により、低コストかつ変換効率50%の実現可能性がある高効率なアップコンバージョン太陽電池の実現に近づいたと考えている。

本技術の想定される用途

- 高効率太陽電池
今回はGaAs、AlGaAsで実験実証を行っているが本技術は材料系に制限されないと考えている。
→ シリコン、ペロブスカイト系材料でも本技術を適用可能（実証実験中）。
- 高効率太陽電池を利用した太陽光による水素エネルギー製造
- 高効率なバンド内遷移を利用して、高効率赤外線センサへの応用が可能（実証実験中）。

実用化に向けた課題

- 提案技術による高効率太陽電池の実現は未達成であるが、原理実証までは実施済みある。
(現在の太陽電池の変換効率は10%程度)
- 変調ドーピング、量子ドットの最適化などで現状からさらに10倍以上のアップコンバージョン効率の向上を目指す。
- 別材料を使用したアップコンバージョン太陽電池の実現も目指す。

企業様への期待

- 製造技術、具体的な利用法のアイデアを持つ企業との長期的な視点での共同研究を希望
- 技術課題の解決を共に行っていただける企業との共同研究を希望
- 太陽電池に関する技術を保有、開発中あるいは導入を考えている企業には本技術の導入が有効と思われる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 高効率太陽電池
- 出願番号 : 特願2023-142969
- 出願人 : 神戸大学
- 発明者 : 朝日重雄、喜多隆、
松沢光一郎

お問い合わせ先

神戸大学

産官学連携本部 産学連携・知財部門

TEL 078 - 803 - 5945

FAX 078 - 803 - 5389

e-mail oacis-sodan@office.kobe-u.ac.jp