

超高効率なタンデム型太陽電池 の構造の簡素化とその製造技術

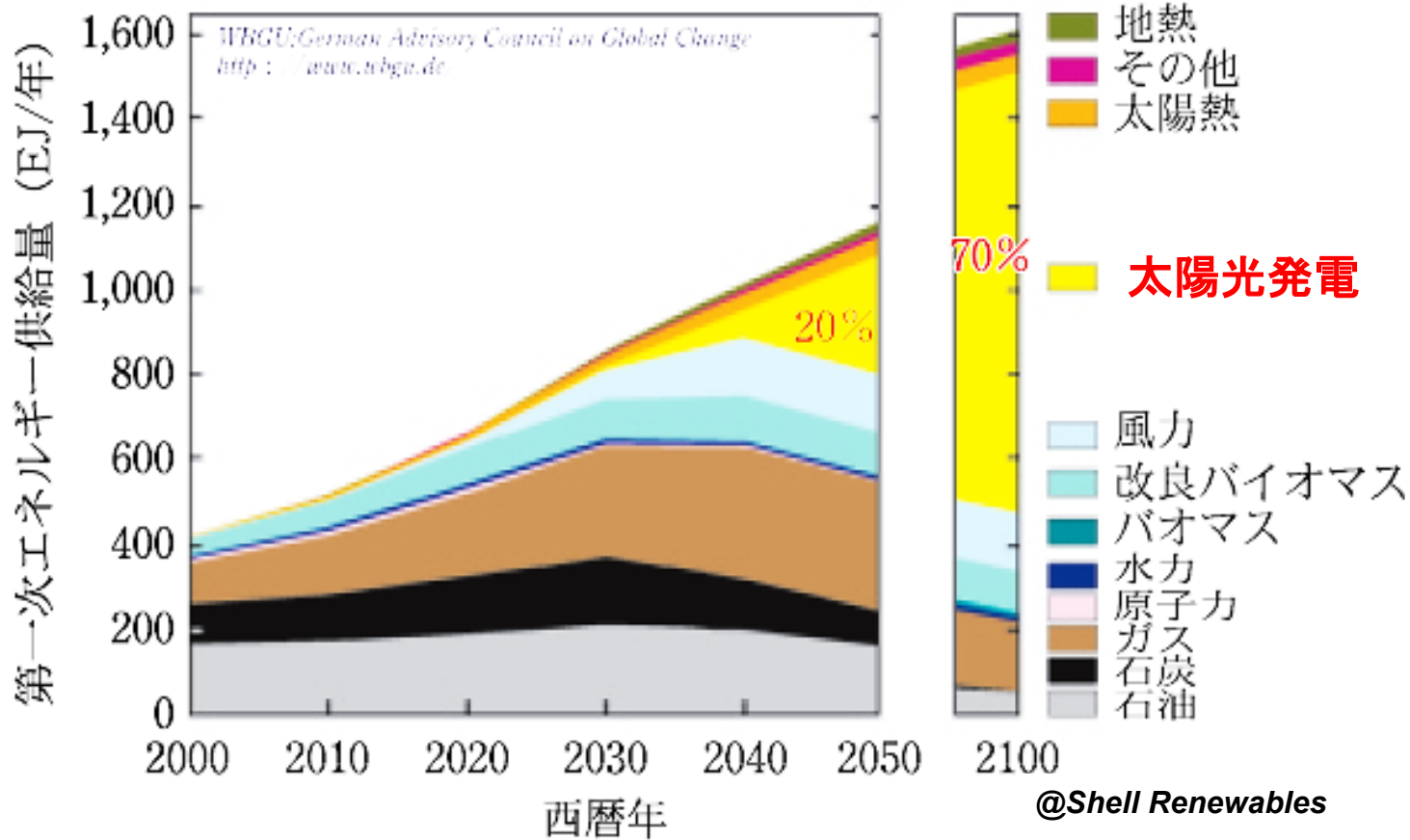
<タンデム型量子ドット超格子太陽電池>

横浜国立大学 大学院工学研究院
システムの創生部門
教授 向井 剛輝

2022年 6月 9日

太陽電池の将来ニーズ

深刻化する環境問題やエネルギー問題の解決手段



太陽光発電は、
現在は世界のエネルギーの**1%程度**



2100年には世界のエネルギーの**約70%**が
太陽光発電になると
考えられている

世界のエネルギービジョン

従来技術とその問題点<1>

一般に使用されている太陽電池のエネルギー変換効率(PCE)は、せいぜい10%台。理論的な最大値も30%程度。

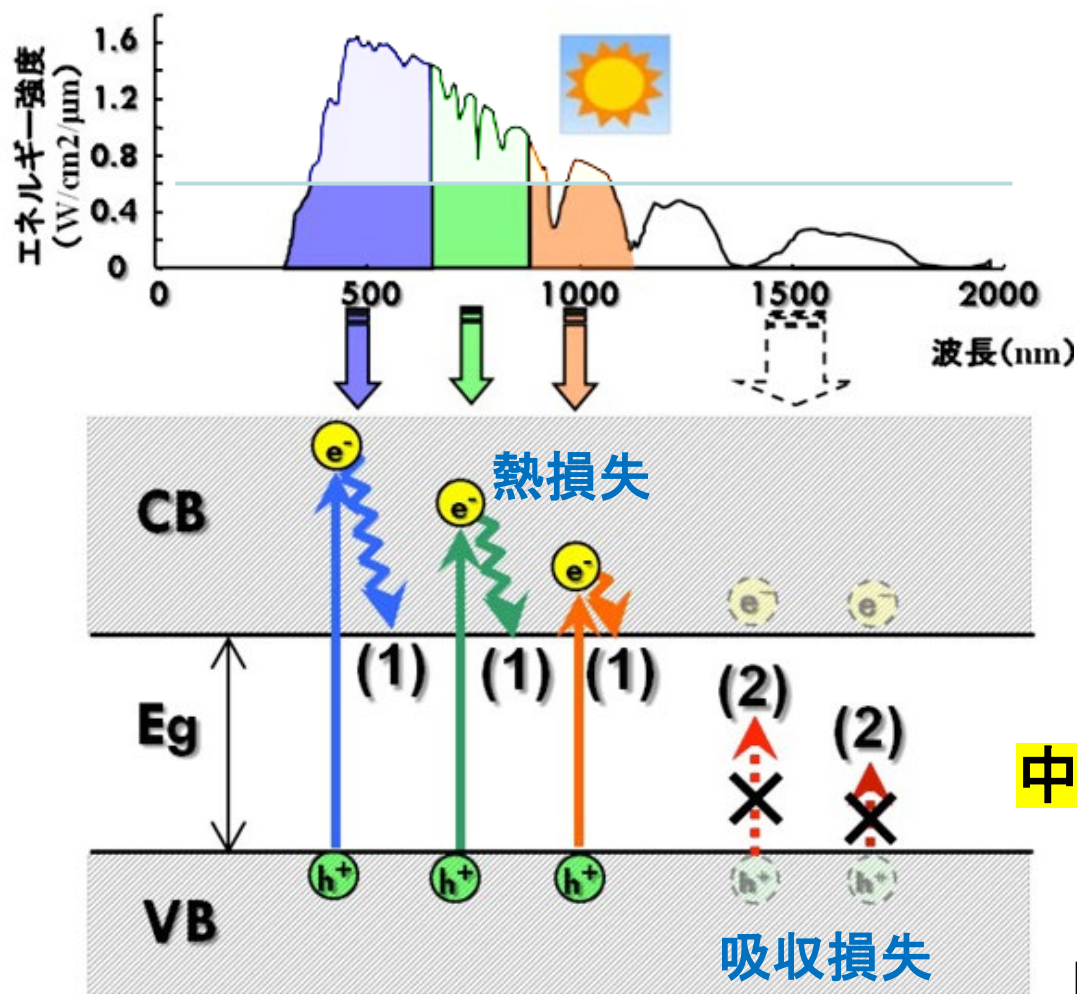
量子ドット(QD)超格子太陽電池が実現できれば、最大エネルギー変換効率は60%以上と見込まれているが、

エピタキシャル型QDでは良好な超格子が作れず、

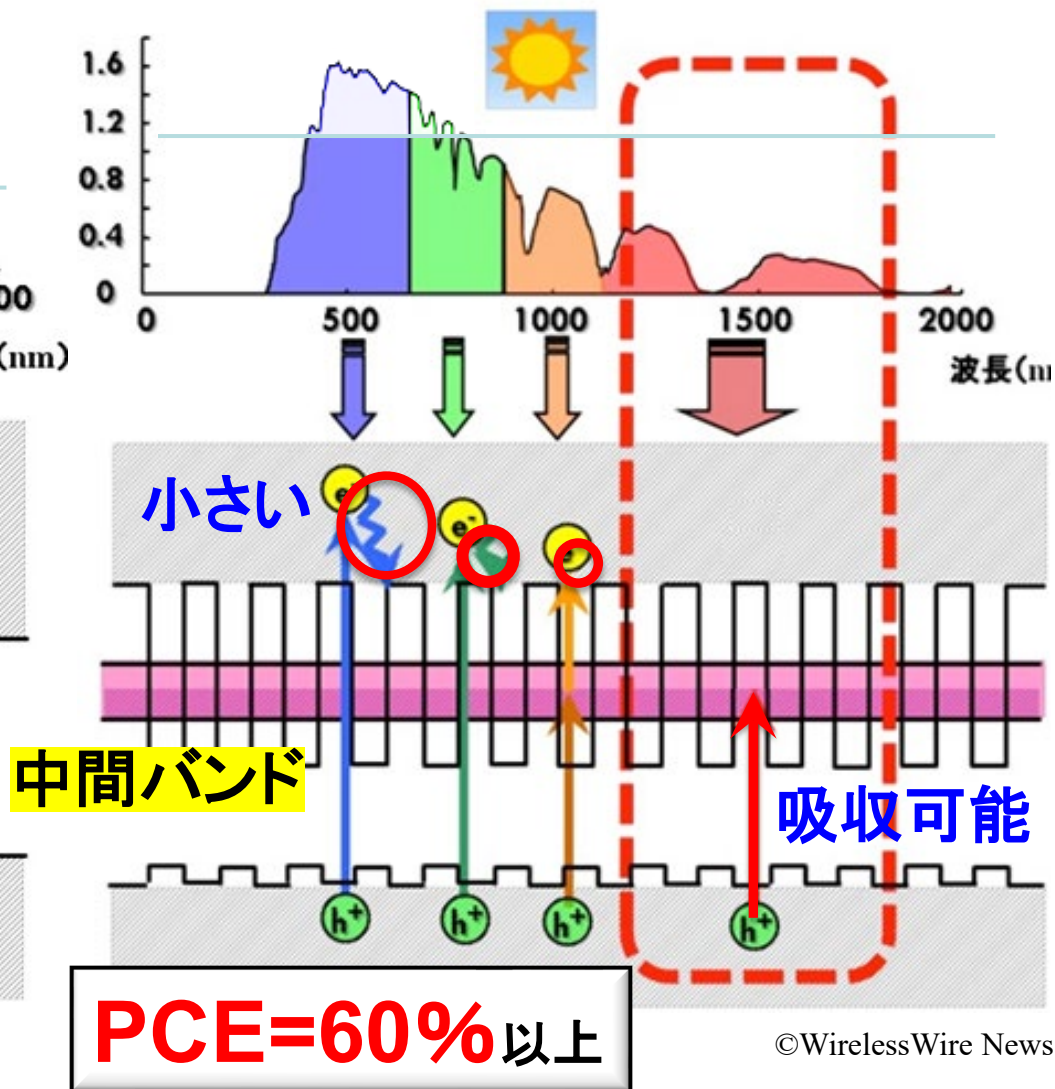
実現には至っていない。

量子ドット(QD)超格子における高い変換効率

一般的な結晶Si太陽電池

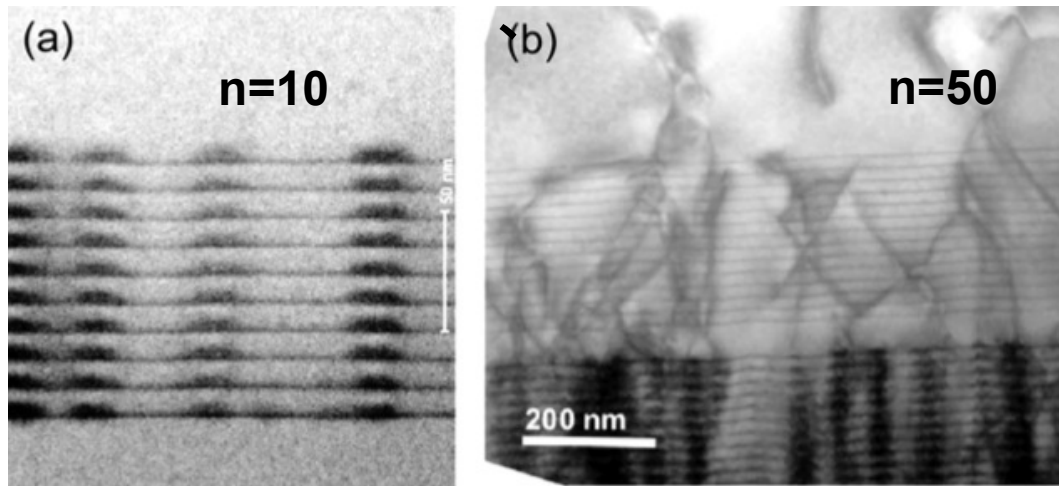


QD超格子太陽電池



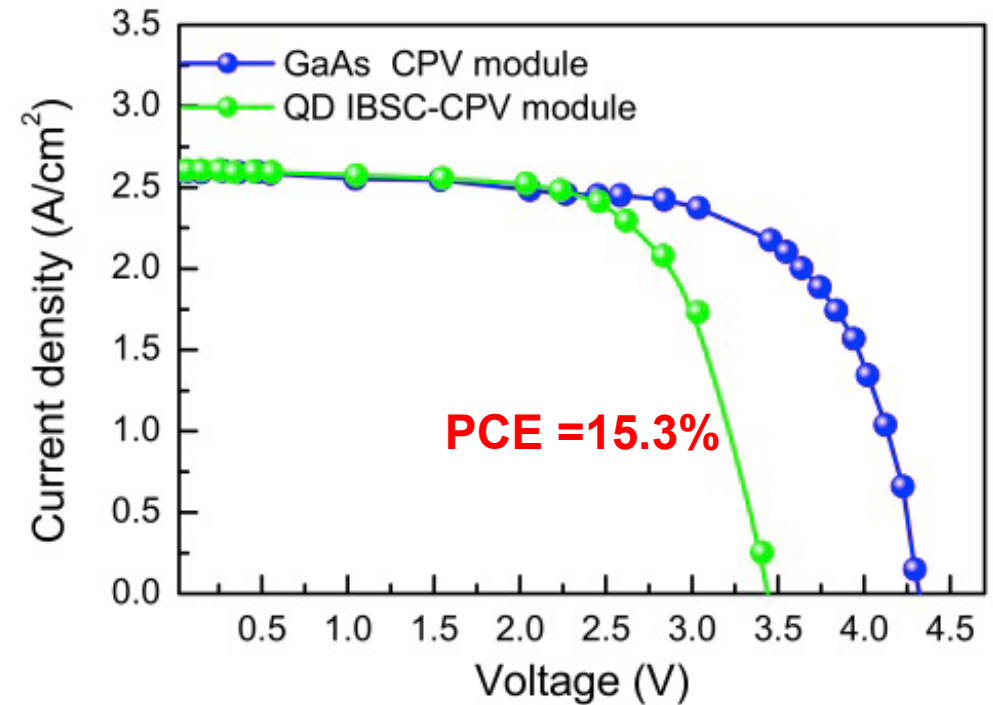
エピタキシャル型QDによる超格子太陽電池の試作

エピタキシャルQDを多層化して超格子を作製しようとする



A. Marti et al., APL 90, 233510, 2007.

サイズばらつき、QDの消失、
結晶欠陥が発生する



T. Sogabe et al., Sci. Rep. 4, 4792, 2014.

最大エネルギー変換効率15.3%
これは、通常のGaAs太陽電池
より悪い

従来技術とその問題点<2>

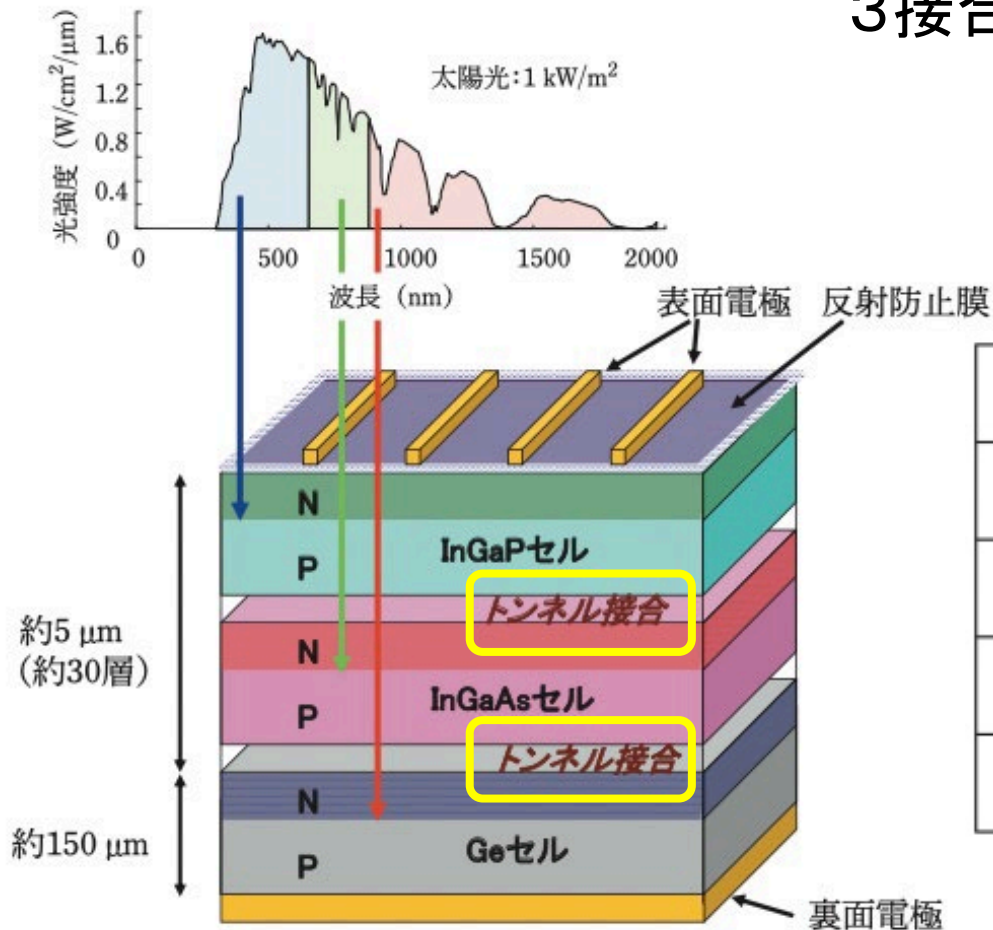
複数の光吸収層を積層することで、エネルギー変換効率(PCE)を向上させる技術(タンデム化)があるが、

光吸収層をポテンシャル・バリアなしに接続するためのトンネル接合層が必要となり、

エネルギー変換効率向上のための足枷となっている。高コスト化の原因でもある。

タンデム型太陽電池による高効率化

単接合セルから多接合(タンデム型)セルへ
→ III-V 族化合物半導体技術をベースとした
3接合構造太陽電池などの開発



多接合セルの理想状態での理論変換効率 (PCE)

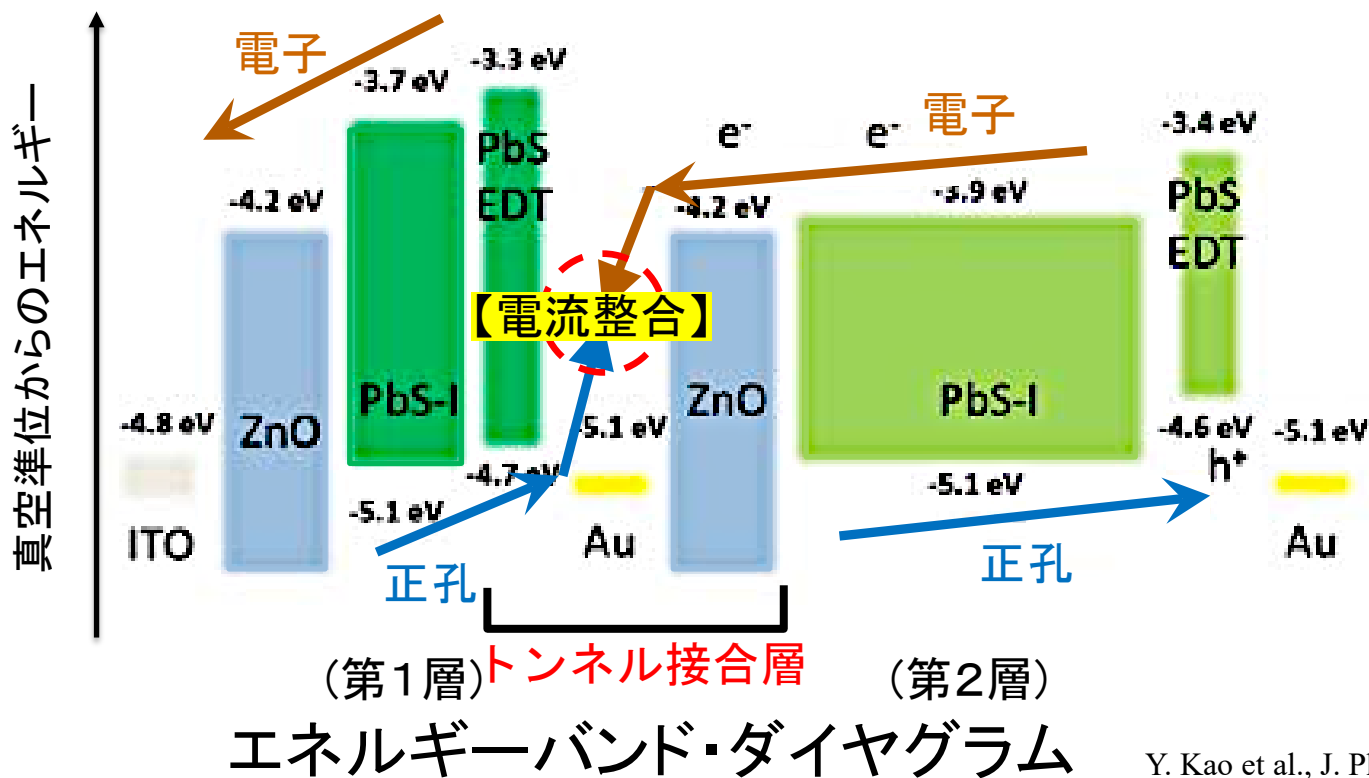
接合数	非集光	集光
1 接合	30.8%	40.8%
2 接合	42.9%	55.9%
3 接合	49.3%	63.8%
4 接合	53.2%	68.8%

応用物理 第 82 卷 第 3 号(2013)より

トンネル接合層の必要性

太陽電池のタンデム化では、光吸収層から電極までポテンシャル障壁なしでキャリアを流すため、光吸収層をトンネル接合層によって接続する必要がある。

この場合、各光吸収層で発生するキャリアの総量を一致させる必要（電流整合条件）がある。その結果、取り出せる電流量を増加させることができなかった。また、製造コストを上昇させていた。



各層のエネルギーバンドの真空準位に対する位置の違いが、接合部にポテンシャル障壁を作る（原理的な問題）

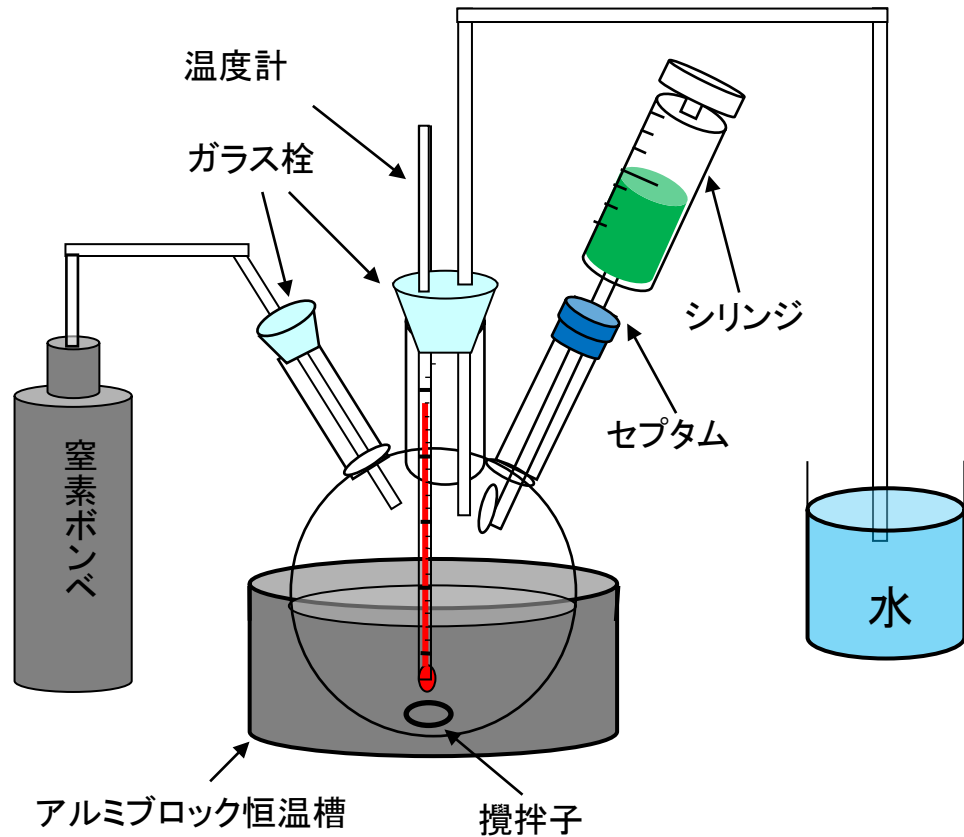
新技術の概要

1. コロイド型量子ドット(QD)で構成される超格子を光吸収層として使用して、タンデム型太陽電池を作製する。
2. QD超格子を使用した太陽電池は、単層でも60%以上のエネルギー変換効率を実現できるとして期待されている。
3. QD超格子を用いることで、従来はタンデム型太陽電池に必須と考えられていた、トンネル接合層が不要になる。

以上のブレークスルーによって、超高効率の太陽電池が実現できる。

コロイド型量子ドット(QD)の製造方法

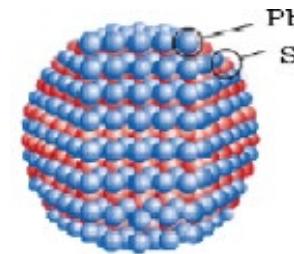
化学合成により、低コストで大量生産できる



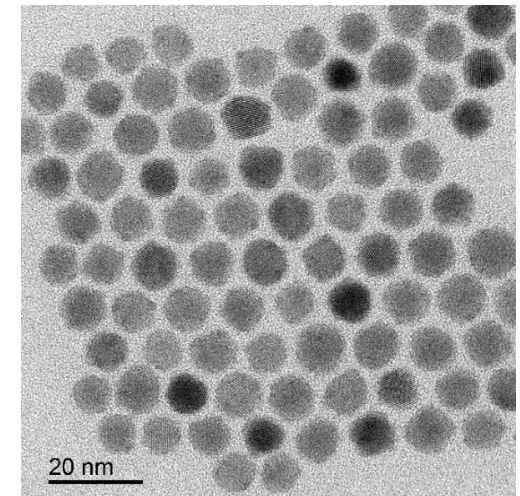
作製装置の構成



さまざまなサイズを含むQD溶液



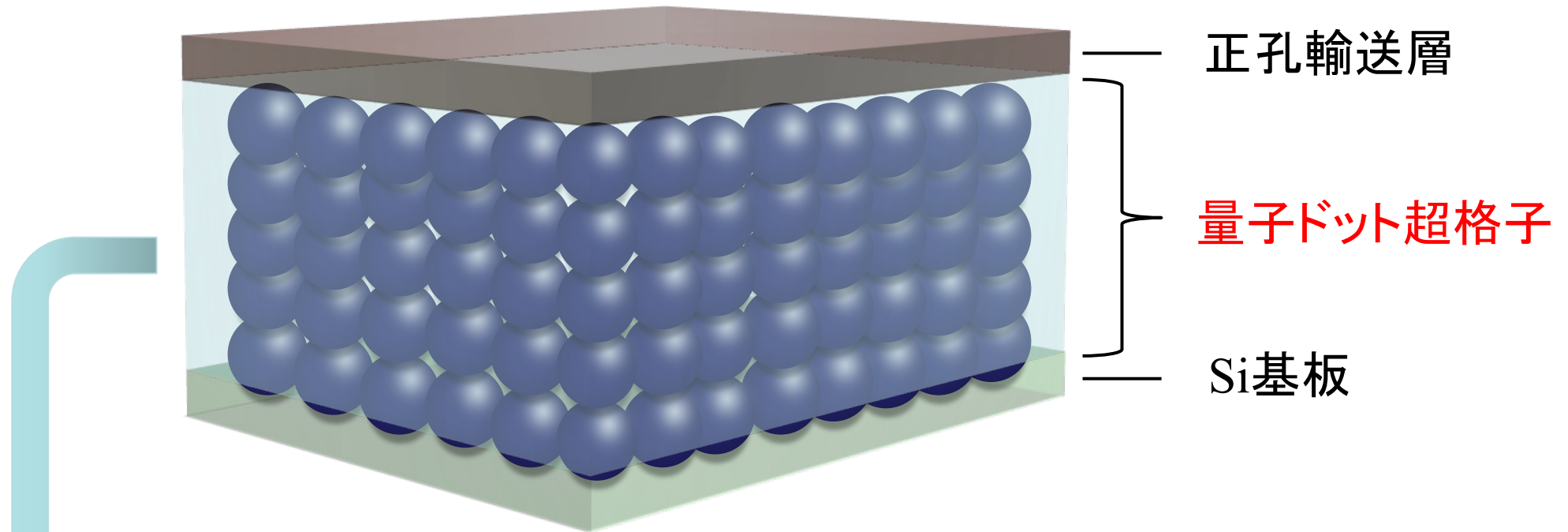
PbS QD



TEM像

低欠陥で球対称性に優れている

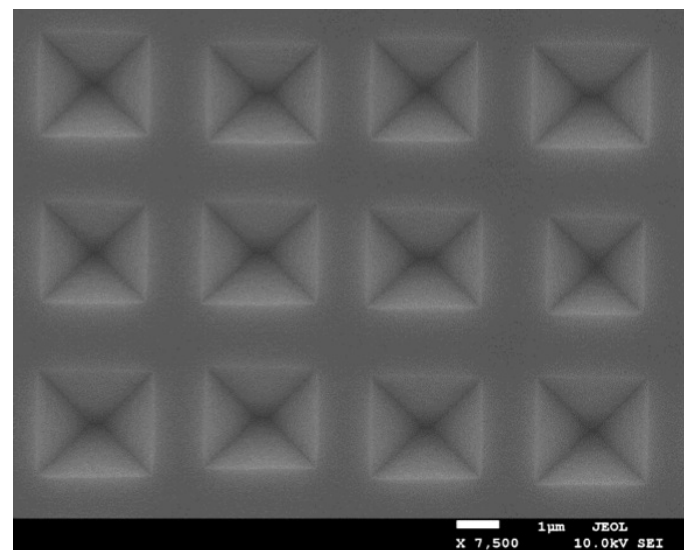
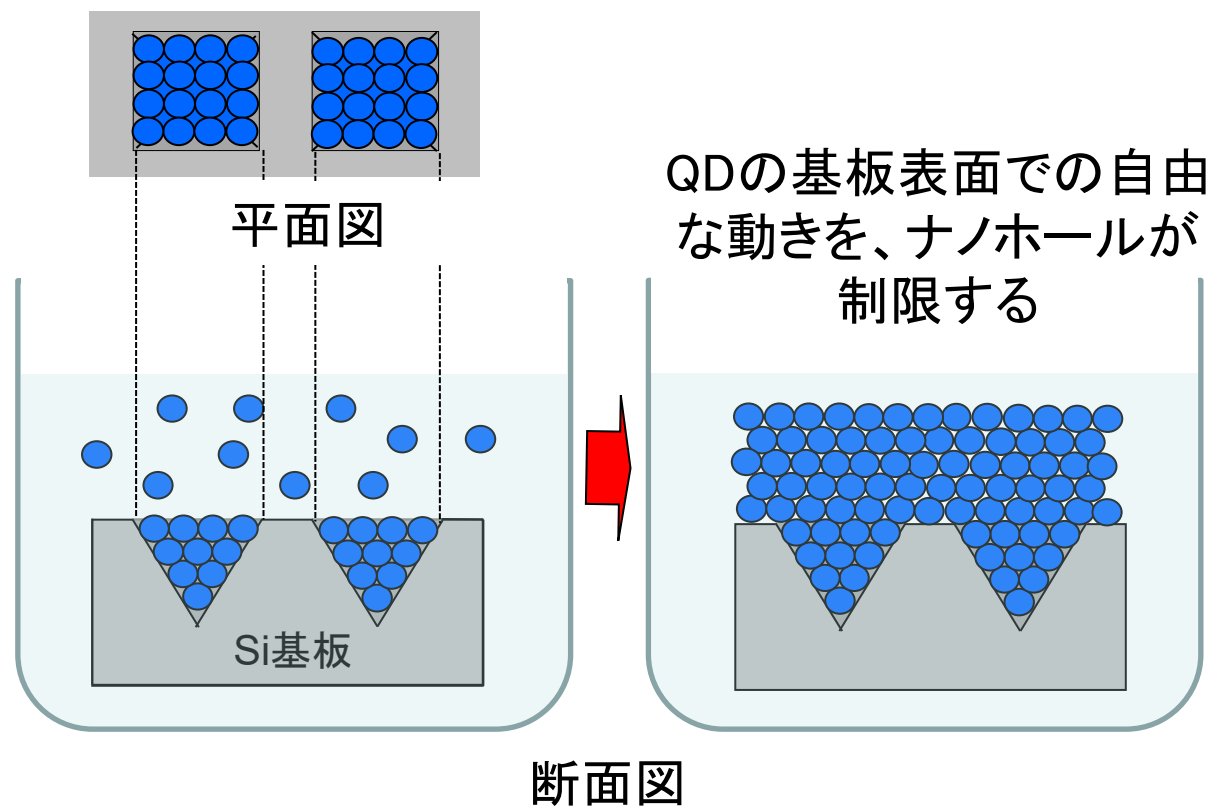
量子ドット超格子太陽電池の基本構造



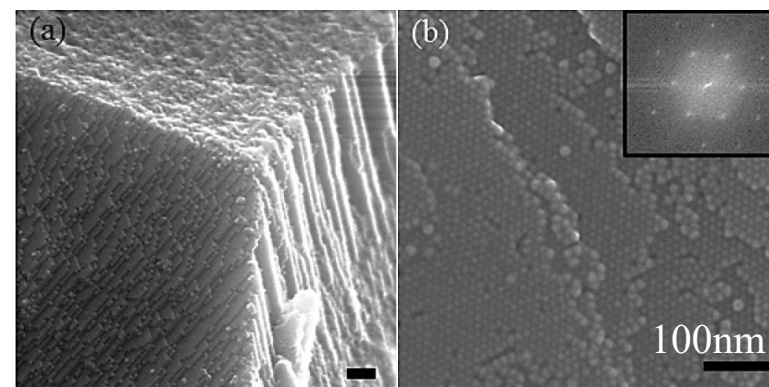
コロイド型QDを3次元的に周期配列させて超格子構造を作製する

コロイド型QD超格子の作製方法(テンプレート法)

QDを、溶媒中(トルエンなど)でSi基板上のマイクロホール(テンプレート)に沈降し、整列させる



テンプレートの電子顕微鏡写真

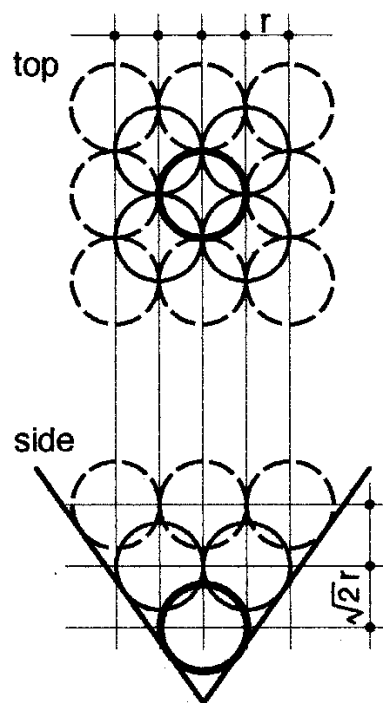


3次元的に配列したQDの例

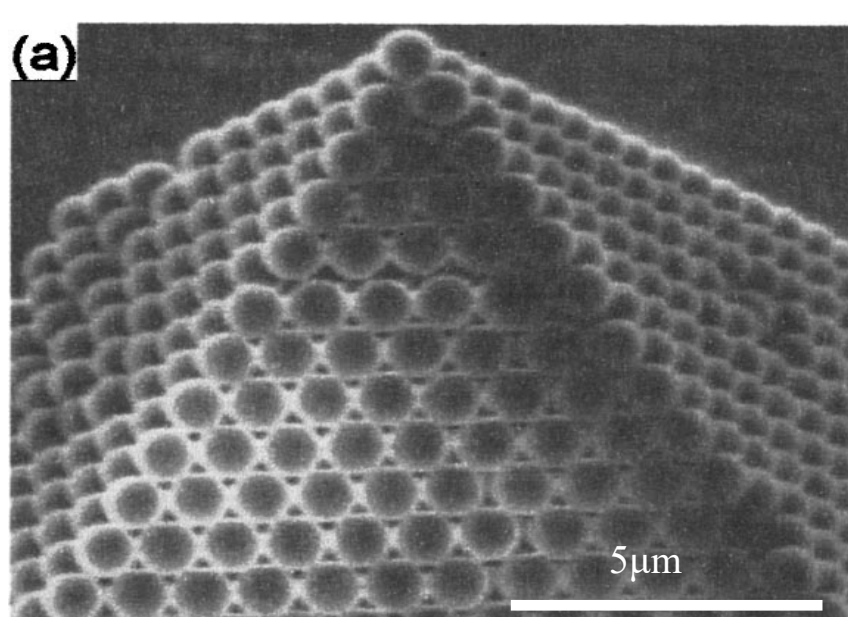
R. Li et al., JACS 136, 12047 (2014).

K. Mukai et al., Appl. Phys. Express 11, 085601 (2018).

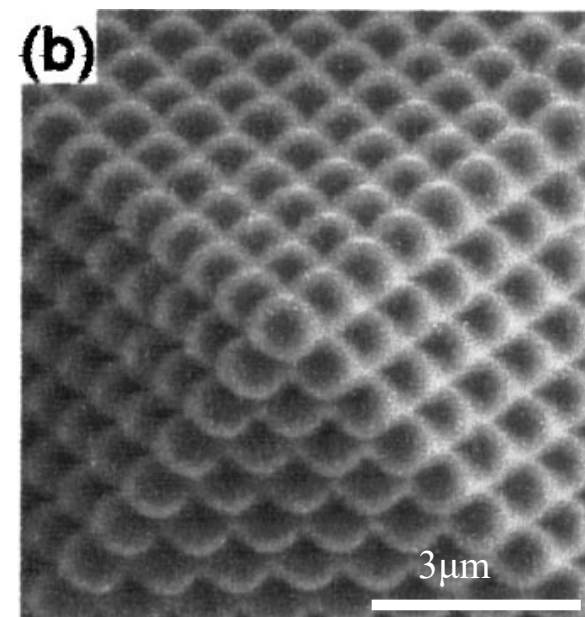
テンプレート法によるマイクロビーズの配列(例)



Scheme of ordering



Pyramidal colloid crystal (side)

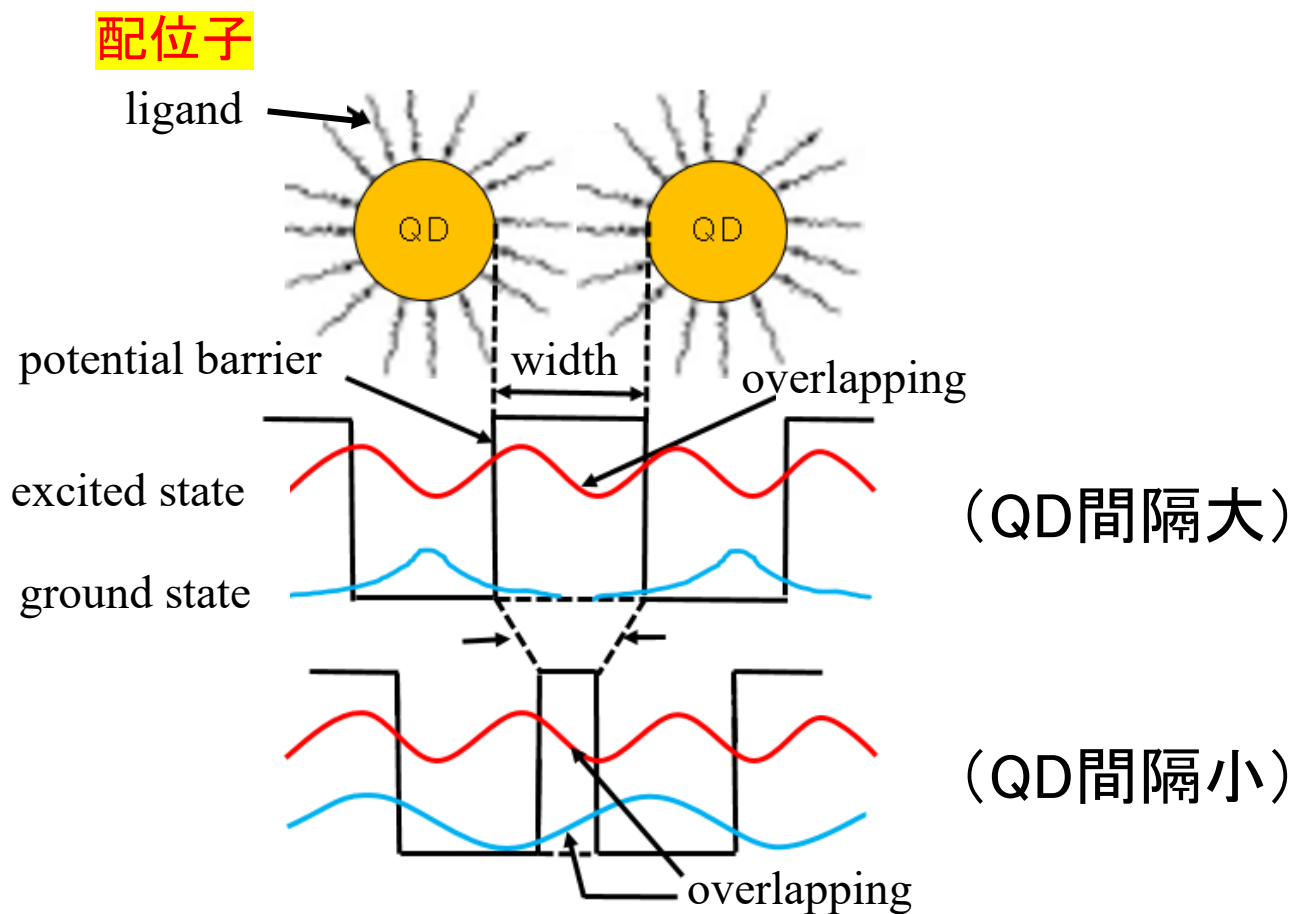


(top)

S. Matsuo et al., Appl. Phys. Lett. 82 (2003) 4283

サイズが大きいビーズでは、配列の様子がよくわかる。
サイズが小さいQDでも、同様の現象が起こる。

波動関数の混成による中間バンドの形成



離散量子エネルギー準位の波動関数が隣接するQD間で混成し、連続準位を形成して中間バンドとなる。

発明の内容と構成例1

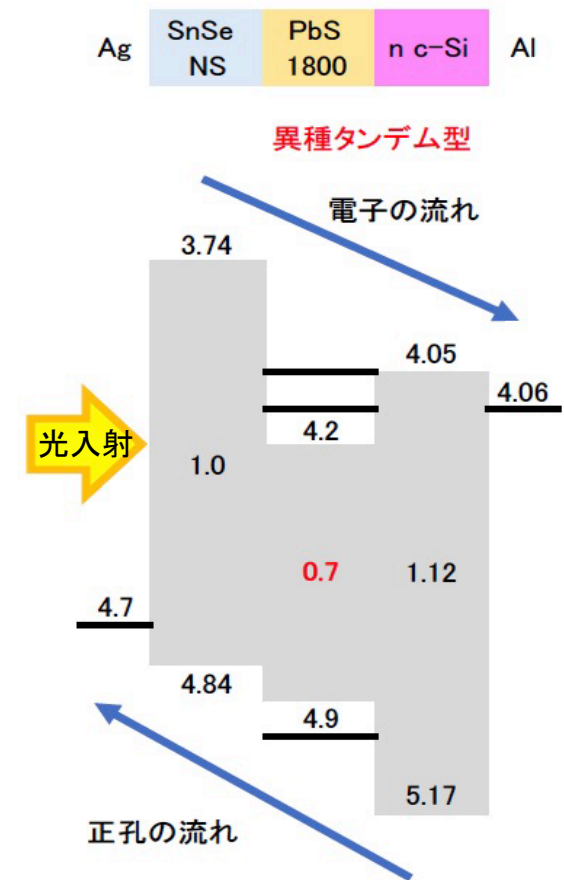
量子ドット(QD)超格子層を光吸収層として使用して、タンデム型太陽電池を作製する。

QD超格子層中の中間バンドの位置は、QDの状態によって制御でき、トンネル接合層なしでキャリア(電子・正孔)の電極への良好な流れを実現できる。

右図は、3層タンデム型QD超格子太陽電池のエネルギーバンド・ダイヤグラムの例。

光入射側の第1層としてSnSe ナノシート層が、第2層としてQD超格子層が、Si基板上に形成されている。

トンネル接合層なしで、電子・正孔ともに電極までスムーズに流れることができる。

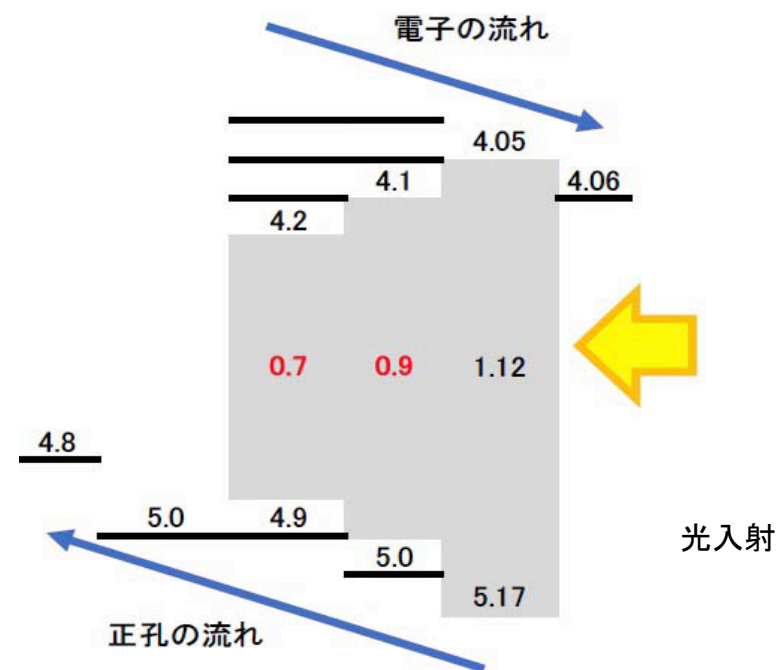


発明の別の構成例2



右図は、QD超格子層を第2層と第3層として配した、3層タンデム型QD超格子太陽電池のエネルギーバンド・ダイヤグラムの例。

この場合も、トンネル接合層なしで、電子・正孔ともに電極までスムーズに流れることができる。



中間バンドの位置は、QDの材料やサイズによって調整できる。

例えば、QD材料は、PbS, CdS, CdSe, CdTe, GaAs, GaSb, HgSe, HgTe, InAs, InP, InSb, PbSe, PbTe, ZnS, ZnSe, ZnTe, Ag₂S, SnSe, SnTe、あるいはこれらの混合組成である。

従来技術・競合技術との比較

- コロイド型QDを用いて超格子を実現する、新しい太陽電池製造技術を開発した。
- 中間バンドの構造を制御して、トンネル接合層を用いずに、太陽電池をタンデム化する技術の特許化した。

新技術の特徴

1. QD超格子太陽電池の製造上のブレークスルーを実現した
2. 従来はタンデム型太陽電池の構成に必要なだったトンネル接合層を不要にした
3. エピタキシャル型QDより大幅に安価なQDを使用できる

本発明の効果

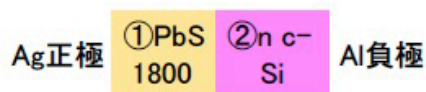
本発明では、量子ドット超格子をタンデム型太陽電池の光吸収層の全部あるいは一部に使用することで、トンネル接合層を不要にする。

その結果、電流整合条件が不要となり、各層で生成したキャリアを全て直接電極にて収集することができるようになる。

本発明によって、電極間電圧と生成電流を同時に向上させることができるようになった結果、非常に高効率な太陽電池が実現できる。

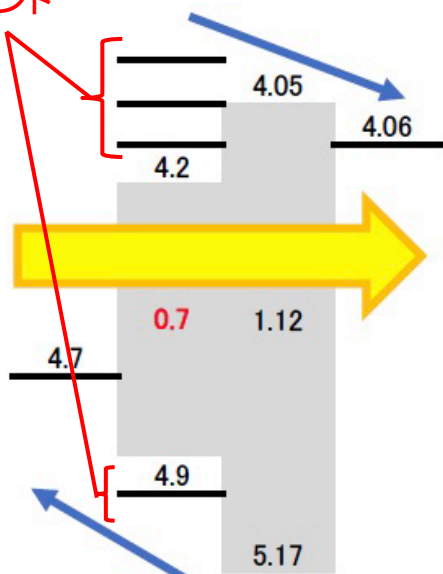
実施例1【2層タンデム型構造の場合の試算】

本発明



電子の流れ

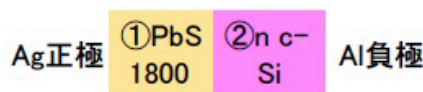
中間バンド



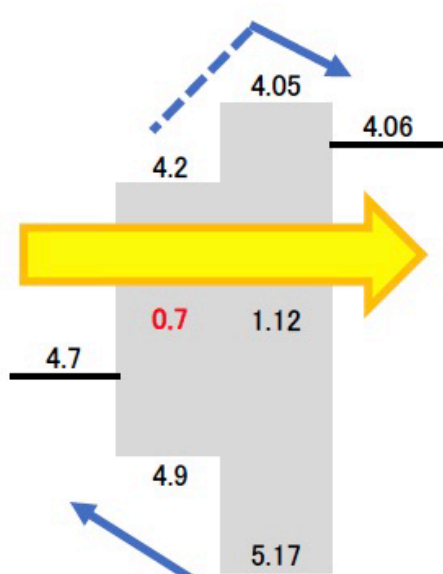
正孔の流れ

従来技術1

(量子ドット層が超格子でない)



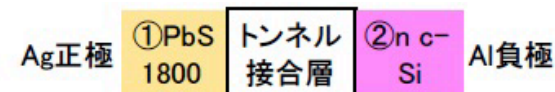
電子の流れ



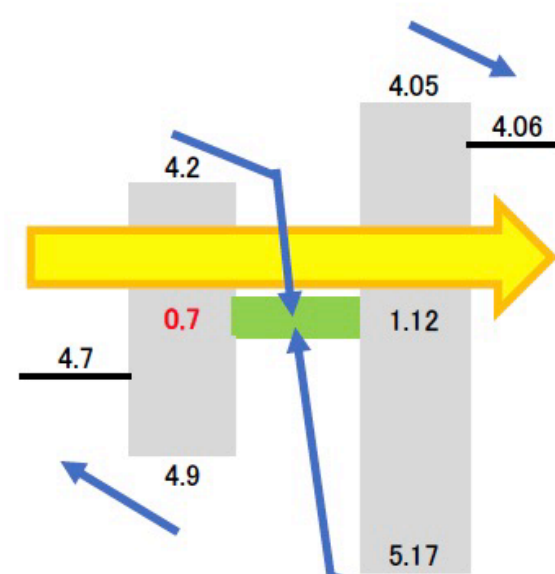
正孔の流れ

従来技術2

(トンネル接合層によって2層を結合)



電子の流れ



正孔の流れ

電流生成能(想定)

- ・超格子PbS QD層
= 40 mA/cm²
- ・通常のPbS QD層
= 15 mA/cm²
- ・c-Si基板
= 25 mA/cm²

出力:

(電極間電圧)
x(総電流)
x(FillFactor)

$$0.64 \text{ V} \times 65 \text{ mA/cm}^2 \times 0.8 = 33.28 \text{ mW/cm}^2$$

従来技術の約4.3倍

QD層が高抵抗となり
動作不良を起こす

$$0.64 \text{ V} \times 15 \text{ mA/cm}^2 \times 0.8 = 7.68 \text{ mW/cm}^2$$

実施例2【3層タンデム型構造の場合の試算】

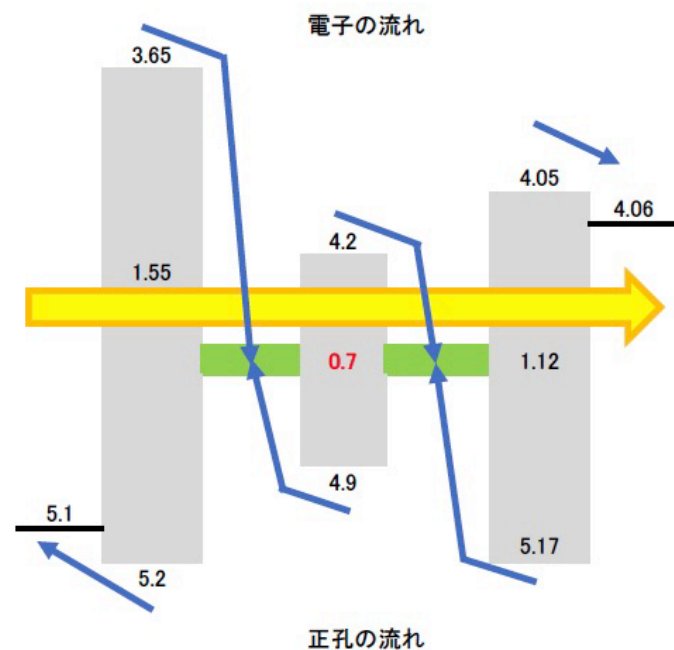
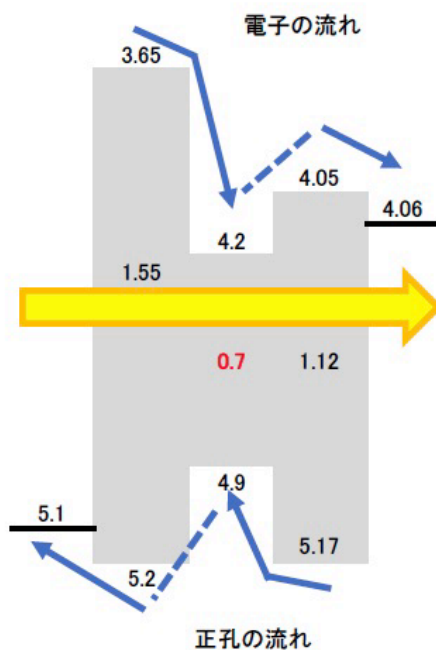
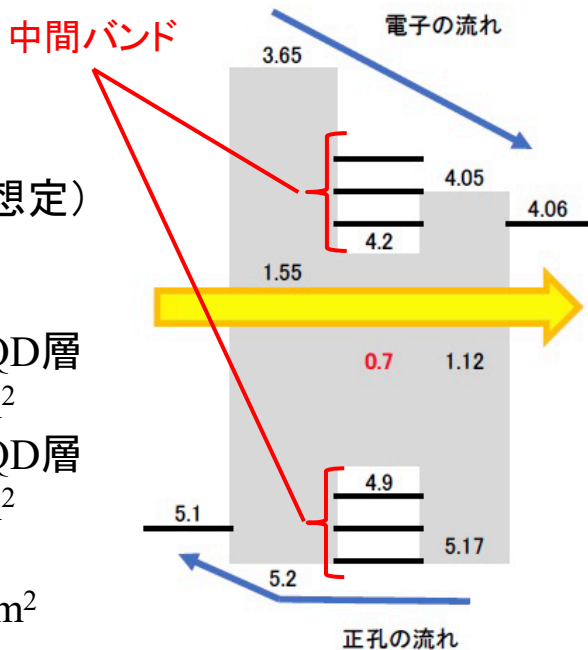
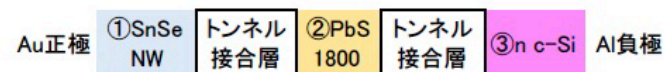
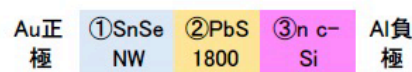
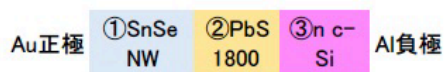
本発明

従来技術1

(量子ドット層が超格子でない)

従来技術2

(トンネル接合層によって2層を結合)



電流生成能(想定)

- ・SnSe NS層
= 10 mA/cm²
- ・超格子PbS QD層
= 40 mA/cm²
- ・通常のPbS QD層
= 15 mA/cm²
- ・c-Si基板
= 25 mA/cm²

出力:

$$1.04 \text{ V} \times 75 \text{ mA/cm}^2 \times 0.8 = 62.4 \text{ mW/cm}^2$$

(電極間電圧)
x(総電流)
x(FillFactor)

従来技術の約7.5倍

QD層が高抵抗となり
動作不良を起こす

$$1.04 \text{ V} \times 10 \text{ mA/cm}^2 \times 0.8 = 8.32 \text{ mW/cm}^2$$

実用化に向けた課題

- PbS量子ドットやSnSeナノシートの化学合成について、基本的な技術は開発済み。しかし、製品レベルとしては課題がある。
- 太陽電池の製造技術そのものについても、基本的な技術は開発済み。しかし、安定性・信頼性などに多くの課題がある。
- 各種要素技術を確立して高い性能を実証し、実用化に向けて研究を促進する必要がある。

企業への期待

- 超高効率量子ドット超格子太陽電池の実用化に向けた共同研究。
- 超高効率タンデム型太陽電池の実用化に向けた共同研究。
- 超高効率太陽電池の実用化事業への公的助成金への共同応募。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : タンデム型太陽電池、
およびその製造方法
- 出願番号 : 特願2021-177735
- 出願人 : 横浜国立大学
- 発明者 : 向井剛輝

お問い合わせ先

横浜国立大学 研究推進機構

産学官連携推進部門

横尾 泰

T E L : 045-339-4452

F A X : 045-339-3057

e-mail : sangaku-cd@ynu.ac.jp