

## 研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系	助教	山根 啓輔

### 研究テーマ

高効率太陽電池に向けた光生成キャリアの空間分離促進型pn接合

### 研究報告

#### 1. 研究の背景と目的

安価で高効率な太陽電池の実現に向けてシリコン(Si)基板上III-V族多接合太陽電池の実現が期待されている。Siをボトムセルとする2接合太陽電池の場合、トップセルにバンドギャップ 1.7 eV の材料を積層することで、37%の変換効率が得られる。この条件を満たす数少ない材料候補として GaAsPN 混晶が挙げられる。先行研究において、GaAsPN 太陽電池デバイスの作製には成功したが、十分な変換効率の達成には至っていない。

そこで、高効率太陽電池の試作に向け、Fig.1 に示すような光照射により生成した電子と正孔を空間的に分離できるバンド構造を提案する。これにより、再結合を抑制し、効率的に外部に電流を取り出すことを可能にする。一般的なpn接合太陽電池構造では、生成された電子と正孔が同一空間を流れるため、両者の再結合が生じ、光電流が低下する。これに対し、本提案構造では光生成された正孔を最近接の量子ドット内へ、電子を量子ドット外へ分離することで、両者を空間的に分離することができる。

本研究では、InP系量子ドットをGaAsPN系材料で埋め込むことにより、等しいバンドギャップで、バンドオフセットを持つアライメントを実現する。これにより、ホールは量子ドット内を、電子は量子ドット外を電導させることを可能にする。本申請課題では、InP/GaAsPN系量子ドットのバンドアライメントを設計し、その基本構造となるInP/GaP積層量子ドットの作製に取り組んだので報告する。

#### 2. 研究成果および考察

はじめに、構成材料の選定を行った。基板には大面積化が可能なSi、バリア材料にはSi格子整合系であるGaP、GaPN、GaAsPNを用い、量子ドット材料には自己形成とType-IIバンドアライメント形成が期待できるInPを選定した。GaPNの組成比はSiと高いレベルで格子整合するN:2%、GaAsPNの組成比は実験的に、1.7 eVのバンドギャップが得られているAs:19%、P:76%、N:5%とした。

次に、計算ソフト上で単一量子ドットをバリア材料で埋め込んだ構造を仮定し、バンド構造計算からType-IIバンドアライメントが得られる条件の選定を行った。その結果、バリア材料をGaAsPN、量子ドットをInP(直方体形)とし、そのサイズを20×20×5 nm程度とすることで、バリア材料に電子、

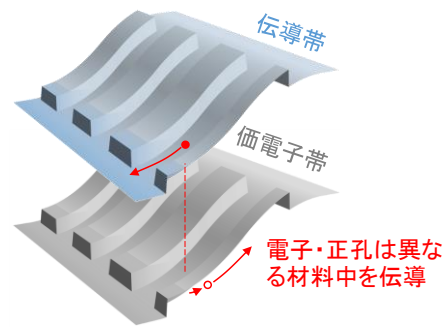


Fig.1 電子正孔分離型太陽電池の概念図

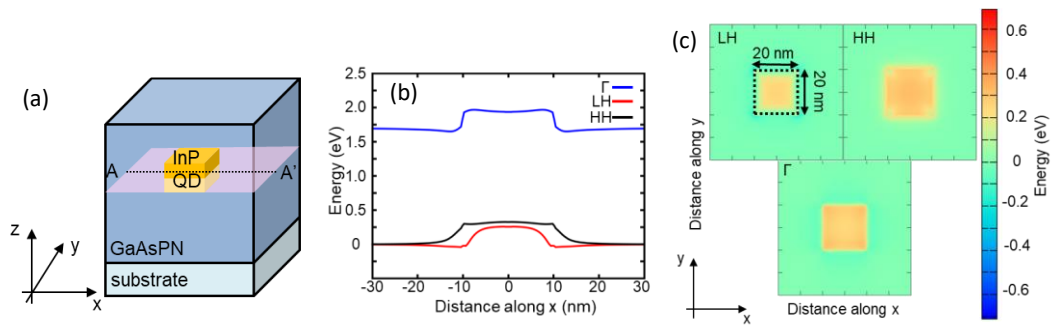


Fig.2 InP/GaAsPN量子ドットのバンド計算.(a)単一量子ドットを用いた計算モデル, (b)面内方向のバンドアライメント, (c)ドット面内のポテンシャル分布.

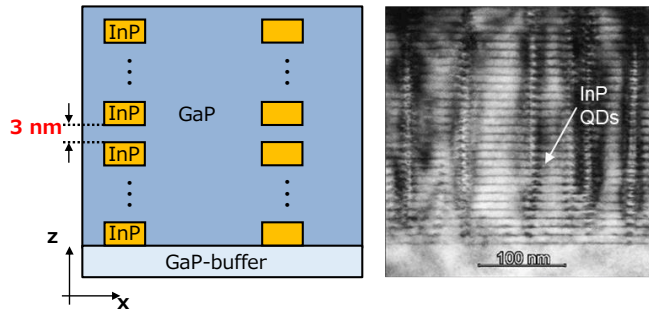


Fig.3 InP/GaP積層量子ドットの断面TEM像

量子ドットに正孔を空間分離可能な Type-II バンドアライメントを得ることができた。その具体例を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (b) (c)に示すように量子ドット内では電子のエネルギーが高く、ホールエネルギーが小さい。すなわち、ホールを量子ドット内に選択的に閉じ込めることが可能と考えられる。

次に積層方向へのキャリア伝導について検証するために、積層間隔 3nm、積層数 50 の積層量子ドット構造を仮定し、バンド構造および波動関数分布の計算を行った。その結果として、正孔の波動関数が積層方向に沿って繋がりが、ミニバンドの形成を確認することができた。また、積層量子ドット部と GaAsPN バルク間の価電子帯オフセットは約 200 meV、伝導帯オフセットは約 100 meV 確保できており、積層量子ドット部に正孔、バリア材料に電子を空間分離した状態で伝導可能であることを計算的に示すことができた。

最後に、実験的取り組みとして、本構想の基本構造となる InP/GaP 積層量子ドットを分子線エピタキシー法により作製した。Fig. 3 に構造図と断面透過型電子顕微鏡像を示す。今回の計算で導かれた最適サイズ（ベースサイズ 15 nm~20 nm、高さ 3 nm~5 nm）の量子ドットを GaP 基板上に積層することに成功した。

### 3. 将来展望

今回の結果から、提案した構造が原理的・実験的に実現可能であることが示された。この結果を基に、太陽電池デバイスに組み込むことを予定している。さらに、将来的な展開として、GaPN-InP / GaAsPN-InPN/Si の三接合化（理論変換効率 42%）、独自開発している Si 基板上エピタキシャルリフトオフプロセスによる軽量・フレキシブル化を予定している。本研究は Si 格子整合系化合物半導体材料のバンドアライメント設計に新たな方向性を与えるものであり、化合物太陽電池の多面的な発展に寄与するものと期待している。

#### 4. 研究発表

##### 論文

- [1] José Alberto Piedra-Lorenzana, Keisuke Yamane, Akihito Hori, Akihiro Wakahara "Growth of phosphide-based type-II stacked quantum dots for III-V/Si photovoltaic applications" Jpn. J. Appl. Phys 60 (2021) 045502.

##### 学会発表

- [1] 有本岳史, 山根啓輔, 堀礼人, 若原昭浩, 太陽電池応用に向けた InP/GaP 系 Type II 量子ドット構造におけるバンドオフセットの検討, 第82回応用物理学会秋季学術講演会 発表予定
- [2] 堀礼人, 山根啓輔, Jose A. Piedra-Lorenzana, 若原昭浩, 高効率III-V/Si多接合太陽電池実現に向けたType II InP/GaAsPN量子ドットの設計, 第3回結晶工学xISYSE合同研究会, P-16, 12. 23, 2020, Zoom, オンライン開催, 口頭発表、ポスター発表.
- [3] 江湖俊仁, 山根啓輔, 新井智也, 濱本大輝, 若原昭浩, III-V/Siタンデム型太陽電池の実現に向けたGaAsPNサブセルの設計, 第30回日本MRS年次大会, G-09-001, 12. 9-12. 11, 2020, Zoom, オンライン開催, 口頭発表.
- [4] 新井智也, 山根啓輔, 江湖俊仁, 濱本大輝, 若原昭浩, Si 基板上格子整合系 GaAsPN 太陽電池の作製(2), 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 18a-Z24-1, 3. 16-3. 19, 2021, zoom, オンライン開催, 口頭発表.