

【助成 40-25】

## 光生成キャリアの空間分離を特徴とする量子ドット太陽電池の開発

豊橋技術科学大学 電気電子情報工学系 准教授 山根啓輔

### 〔研究の概要〕

我々は InP 積層量子ドットを Si 格子整合系埋め込み層 (Ga(As)PN)で埋め込んだ Type-II バンドアライメントを III-V/Si 多接合太陽電池のトップセルとして提案した。電子/正孔の空間分離に必要な伝導帯および価電子帯のバンドオフセットを実現するためのドットサイズを、計算機趣味レーションを用いて導出した。InP 量子ドットの設計値を直径 10 nm, 高さ 4 nm とし、InP 量子ドットと GaPN 埋め込み層を組み合わせた太陽電池構造の作製を行った。本研究を通して、InP 量子ドットを希薄窒化物結晶で埋め込むことに初めて成功し、提案した InP/III-V-N 系 type-II 量子ドット太陽電池の作製が可能であることを示すことができた。

### 〔研究経過および成果〕

大面積・低環境負荷の高効率太陽電池の作製を最終目標とし、図 1 に示す希薄窒化物半導体と量子ドットを組み合わせた新たなデバイスコンセプトを提案する。これにより、受光により生じた正電荷と負電荷の対消滅（太陽電池の電流値低下）を劇的に抑制することができる。具体的には、量子ドットに正電荷、希薄窒化物層に負電荷が分離され、外部負荷に取り出す。たとえるならば、駅の上り階段と下り階段を分ける構造をとることで、混雑を緩和することに相当する（専門的には type-II バンドアライメントの積層量子ドットを太陽電池に応用するものである）。本太陽電池が実現できれば、航空機・自動車等への設置、災害時の非常用電源としての活用が期待できる。

本構想を実現するためには、最適成長温度域の異なる InP と GaPN 系材料を同時可能な条件を模索する必要がある。結晶成長には RF-MBE 法を用いた。成長温度については、InP の窒化がほとんど生じないこと、目的の量子ドットサイズが実現

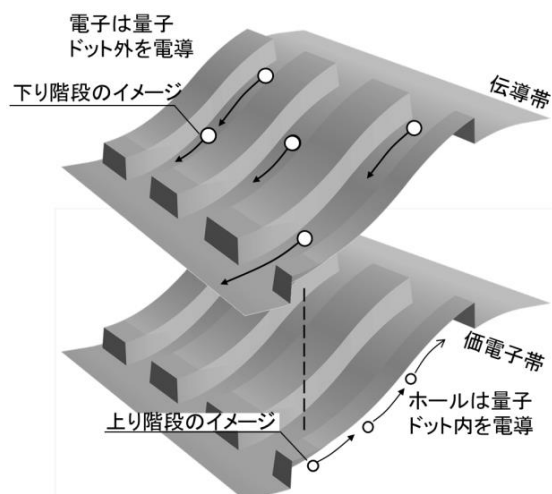


図 1 提案する太陽電池のエネルギーバンド図

できること、GaPN の成長が可能なことの 3 点を考慮して、480°C を採用した。窒素源には RF ラジカルセルを用い、InP 量子ドットの成長中もブライトモードで使用した。GaP 基板上に GaP バッファ層を成長後、InP 量子ドットを成長し、GaPN 埋め込み層を続けて成長した。InP 量子ドットの設計値は、事前検討[2]から直径 10 nm, 高さ 4 nm とした。また、埋め込み層を 4 nm 成長した後、InP

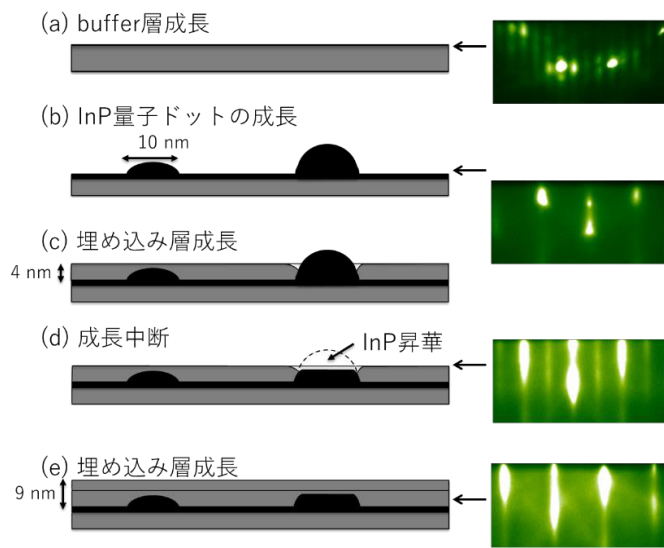


図2 成長中のRHEED像の変化.

量子ドットの高さをそろえるための成長中断を設け、その後残りの6 nmの埋め込み層を成長して完全に埋め込みを行った。図2に成長中の反射高速電子回折(RHEED)像を示す。InP成長中はドットの形成を示すスポットパターンがGaP層のストリークパターンの内側に観察されている。その後GaPNによる埋め込みを行うと、再びストリークパターンが表れた。図3にGaPN埋め込み層成長後の原子間力顕微鏡(AFM)像を示す。RMS値は0.14 nmであり、平坦なGaPN層を成長することができている。今後この工程を繰り返すことで光吸収層の結晶成長が可能と考えられる。本研究を通して、InP量子ドットを希薄窒化物結晶で埋め込むことに初めて成功し、InP/III-V-N系type-II量子ドット太陽電池の作製が可能であることを示すことができた。

[1] José Alberto Piedra Lorenzana et al., JJAP 60, 045502 (2021).

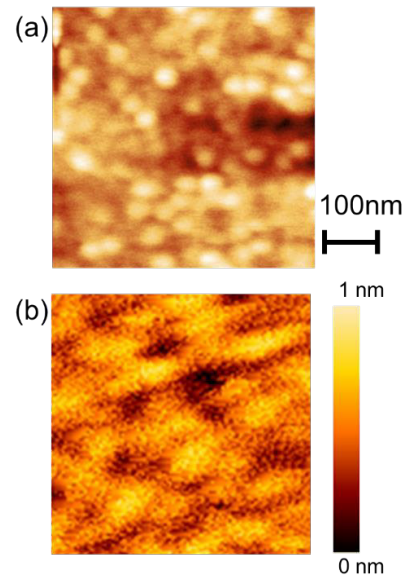


図3 表面AFM像(a)量子ドット(b)埋め込み層成長後

[2] 有本岳史他,第82回秋応物,23p-P06-3(2021)

[発表論文]

1. 山根啓輔, 若原昭浩, InP/GaP系Type-II量子ドット太陽電池構造におけるバンドオフセットのドットサイズ依存性, 第5回結晶工学xISYSE合同研究会, P-13, 11.18, 2022, 大阪大学吹田キャンパス, 大阪府吹田市, ポスター.
2. 有本岳史, 山根啓輔, 若原昭浩, InP/GaPN系Type II量子ドット太陽電池構造の作製, 第70回応用物理学会春季学術講演会, 16p-A301-4, 3.14-3.18, 2023, 上智大学四谷キャンパス, 東京都, 口頭発表.
3. 平井健登, 山根啓輔, 若原昭浩, 大島武, 中村徹哉, 今泉充, 希薄窒化物結晶の結合状態制御に向けたGaPN混晶への電子線照射試験(2), 第70回応用物理学会春季学術講演会, 16p-A301-3, 3.14-3.18, 2023, 上智大学四谷キャンパス, 東京都, 口頭発表.