

# 量子ドットtype-I及びtype-II共存型太陽電池の研究

相原 健人・太野垣 健・中元 嵩\*・岡野 好伸\*・菅谷 武芳  
 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進多接合デバイスチーム  
 \*東京都市大学

### 研究背景

中間バンド太陽電池は、高い電圧を維持したまま、光電流を増加させることにより、高い変換効率を達成することが期待される新概念太陽電池である。1) 本研究では、ワイドバンドギャップ宿主材料を用いた、量子ドット(QDs)型中間バンド太陽電池の基礎特性を評価し、ドット挿入による影響を議論する。

**中間バンド太陽電池のコンセプト**

本チームでは、ワイドバンドギャップ宿主で、電荷分離型と呼ばれるQDs type-IIを形成可能な、InGaP中のInP QDsを提案し<sup>2)</sup>、光キャリアの輸送特性の向上等を検討し、素子構造の設計、作製、及び、検証実験を行ってきた。

### 目的

InGaP中にInP量子ドット  
 type-I QDs (電荷閉じ込め型)    type-II QDs (電荷分離型)

**開放電圧の減少を抑制する素子構造の検討<sup>3)</sup>**

front i-layerをQDs層の前に挿入させることでQDs層に高い電界が生じなくなり、熱脱出機構を抑制可能な素子構造を設計

量子ドット type-I&type-IIが共存したInGaP中のInP QDs太陽電池を作製し、技術課題である電圧降下の原因を明確にする。

**【各構造の長所】**  
 type-I: 効率的な光励起キャリアの生成  
 type-II: 光励起キャリアの再結合の抑制

### 実験

#### 試料詳細

- 試料は分子線エピタキシー法を用いて作製<sup>4)</sup>
- 素子はn-i-p In<sub>0.48</sub>Ga<sub>0.52</sub>P太陽電池構造
- 二種類のQDs太陽電池とInGaP太陽電池  
 (a) i-layerの無い試料: w/o i-layer  
 (b) i-layerの有る試料: with i-layer  
 (c) QDsの無いInGaP太陽電池: w/o QDs

発光測定より確認した二つの成分

※(b)ではλ > 630 nmの光子は、ドット挿入層に届かなくなる

### 結果

#### 1. 電流電圧測定

● 太陽電池特性

	w/o i-layer	with i-layer	w/o QDs
η (%)	12.3	12.8	14.4
FF	0.801	0.808	0.846
J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	13.7	13.9	13.35
V <sub>oc</sub> (V)	1.116	1.135	1.271

- QDs太陽電池試料で高いJ<sub>sc</sub>を維持  
 ⇒ 十分な割合のtype-II QDsを形成
- QDs試料では電圧降下が発生  
 ⇒ 熱脱出機構によって暗電流が増加
- with i-layer側でわずかながらV<sub>oc</sub>大  
 ⇒ 電界の減少によって熱脱出が軽減

### 結果

#### 2. 分光感度測定

EQEスペクトル (a) linear, (b) log スケール  
 (c) 発光スペクトル

- EQEは、可視域全体で同じ形状  
 ⇒ QDsが再結合センターとして機能せず、キャリアを取り出している。
- QDs試料では、λ: 700-750 nmでQDs起因の光電流を観測  
 ⇒ 強度は小さく、QDsの体積密度の増加が課題
- type-II QDs (発光スペクトルの長波長側)のEQE信号は低い  
 ⇒ ドットの光キャリア数の向上にはtype-Iとtype-IIの形成割合についても検討が必要

### 考察

#### 暗電流特性と熱脱出機構

● 各試料の開放電圧と暗電流特性

	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	V <sub>dark</sub> (V)	ΔV (V)
w/o i-layer	13.70	1.116	1.151	0.035
with i-layer	13.92	1.135	1.173	0.038
w/o QDs	13.33	1.271	1.303	0.031

- QDs試料では暗電流特性が向上  
 ⇒ 熱脱出機構により飽和電流J<sub>0</sub>が増加
- ΔVはほとんど同じ値  
 ⇒ QDs挿入による輸送特性の減少がなく、J<sub>sc</sub>がほとんど一致しているため。本研究では、V<sub>oc</sub>は暗電流特性で決定。
- front i-layerの挿入でわずかながらV<sub>oc</sub>大  
 ⇒ 電界の減少によって熱脱出が軽減

### 結論

1. type-Iとtype-II QDsが均一に分布しているInP/InGaP量子ドット太陽電池を設計、及び、作製
2. 電流電圧測定からQDs太陽電池で、InGaP太陽電池と同等のJ<sub>sc</sub>を取り出していることを確認、一方でV<sub>oc</sub>は約0.14 V低下  
 ⇒ 電圧降下の原因は熱脱出により暗電流が増加したため
3. front i-layerを挿入した試料でわずかなV<sub>oc</sub>の増加を確認  
 ⇒ front i-layerの挿入により電界が低下してJ<sub>0</sub>の増加を抑制

### 参考文献

1. A. Luque and A. Martí, Phys. Rev. Lett. **78**, 5014 (1997).
2. T. Tayagaki and T. Sugaya, Appl. Phys. Lett. **108**, 153901 (2016).
3. T. Aihara *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 08RF04 (2018).
4. T. Sugaya *et al.*, J. Cryst. Growth **378**, 430 (2013).

**謝辞**

本研究は(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援を受けて行われました