

中間バンド型量子ドット太陽電池 の開発

太陽光発電研究センター
先進多接合デバイスチーム
太野垣健、菅谷武芳

背景:なぜ中間バンド型太陽電池?

Si太陽電池,化合物太陽電池

- ・単接合効率の理論限界(~25-30%)

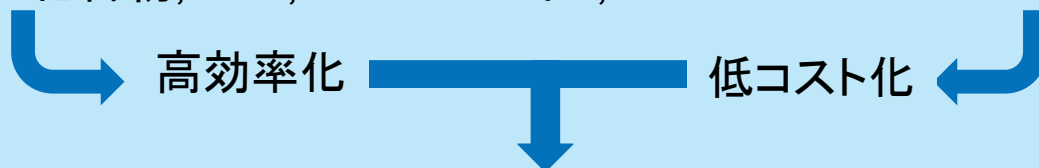
- 高効率化:(2端子)多接合

トップセル?:化合物, a-Si, ペロブスカイト, etc...

多接合InGaP/GaAs/Geなど

- ・宇宙用: AM0向け

- ・集光用: 太陽光追尾

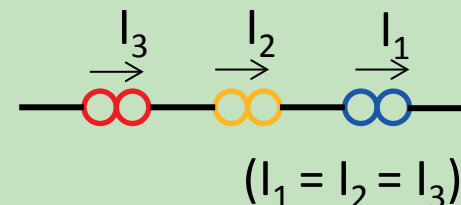


低コスト多接合(←スマートスタック)・マルチバンド

地上用多接合太陽電池の問題点:

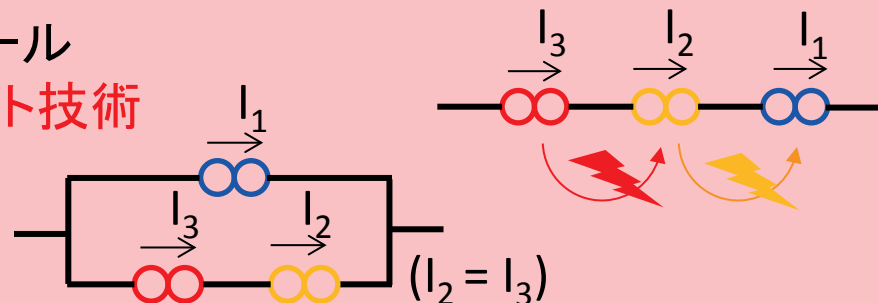
スペクトル変動・2端子電流マッチ条件

→ 平均出力低下



課題:電流マッチ条件による出力低下を抑制する高効率化技術開発

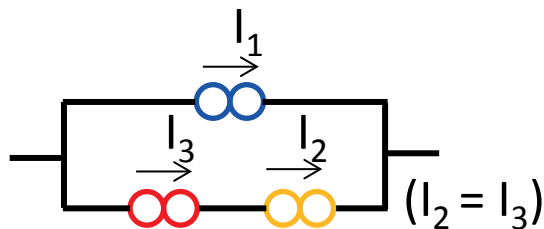
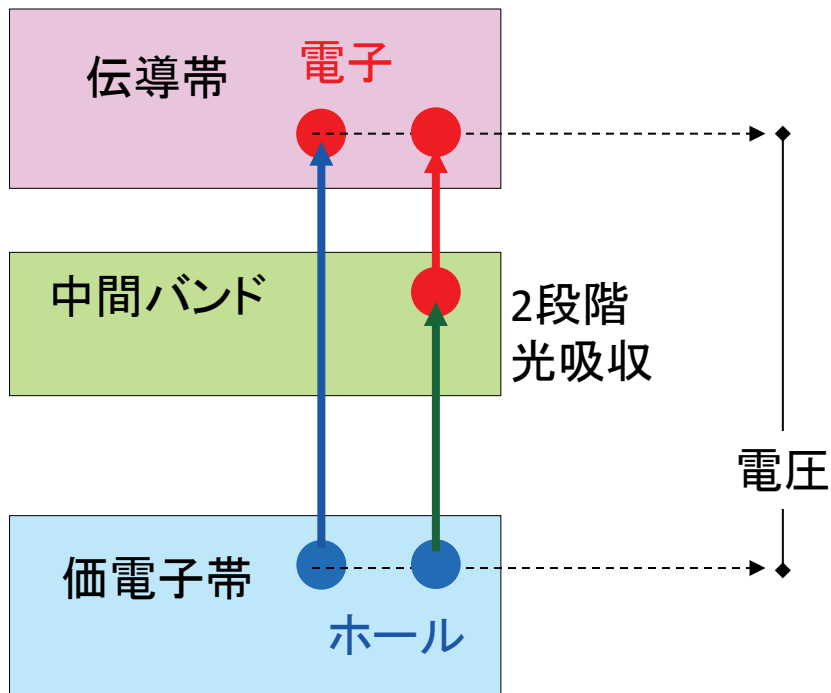
- ・ 4端子(光スプリッティング)モジュール
- ・ ルミネッセント結合: **光マネジメント技術**
- ・ **中間バンド型**



中間バンド型太陽電池とは？

並列回路型マルチバンド太陽電池

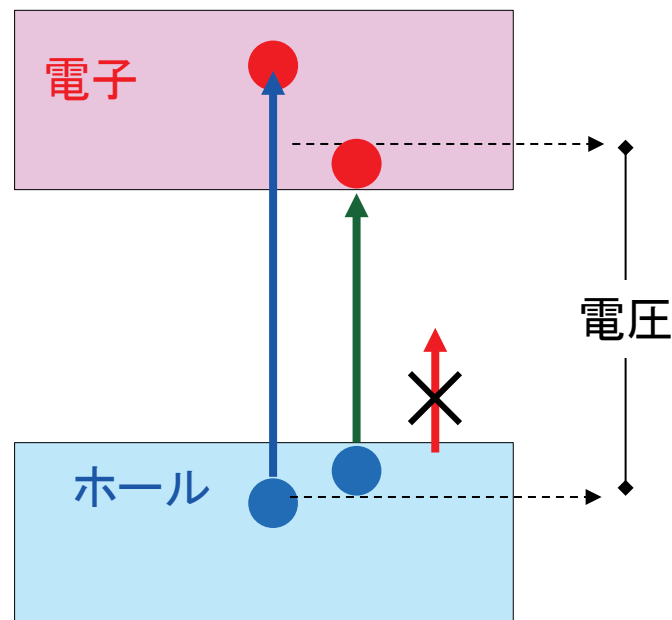
● 中間バンド太陽電池



- ✓ 並列回路
- ✓ 2段階光吸収による光電流増大
- ✓ 高い出力電圧

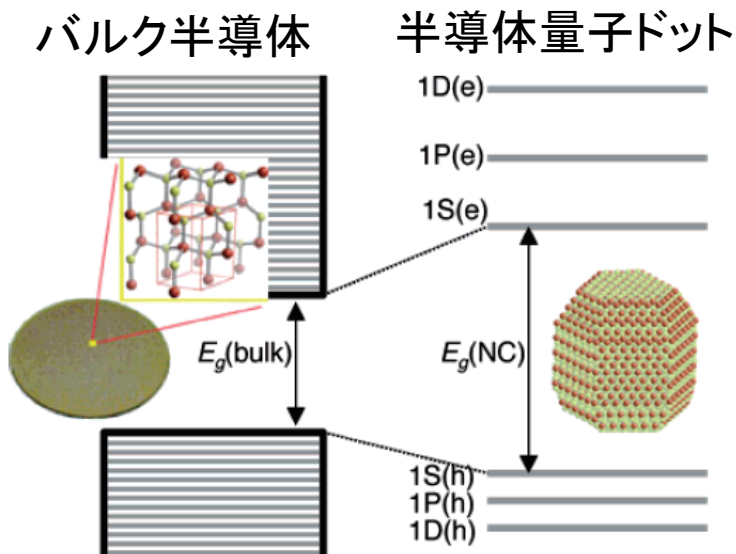
A. Luque *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78**, 5014 (1997).

● 単バンド太陽電池



量子ドット太陽電池

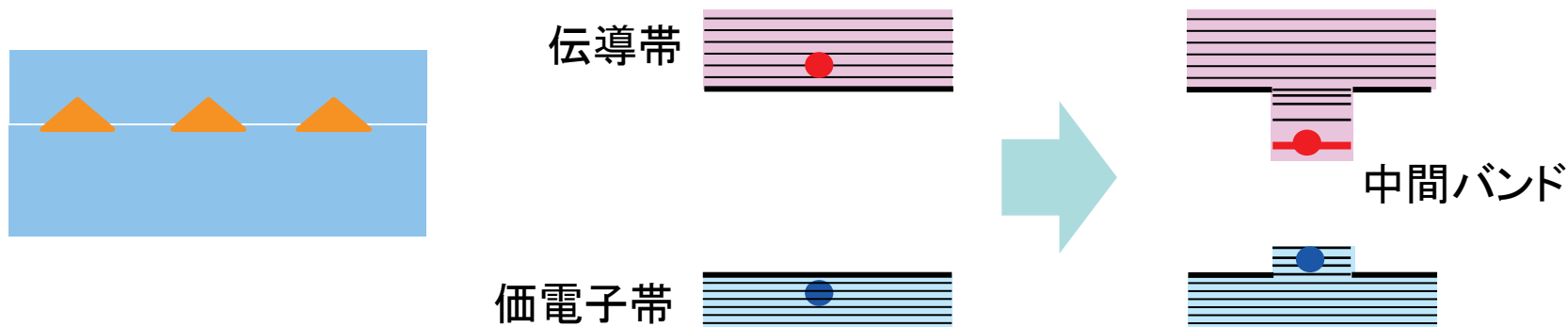
半導体量子ドットとは？



- ナノメートル～数100 nmの半導体
- 分子・原子とバルク半導体の両特性をもった人工物質（人工原子）
 - バンドギャップエネルギー制御**: 量子効果によりサイズ依存性が発現
 - 離散的エネルギー準位**: 人工不純物
 - 不純物で実現しない電子状態も発現例: **電荷分離型** (電子・正孔分離)

V. I. Klimov, J. Phys. Chem. B 110, 16827 (2006).

母体半導体中に半導体量子ドットを形成:



量子ドットによる新しいエネルギー順位を中間バンドとして利用

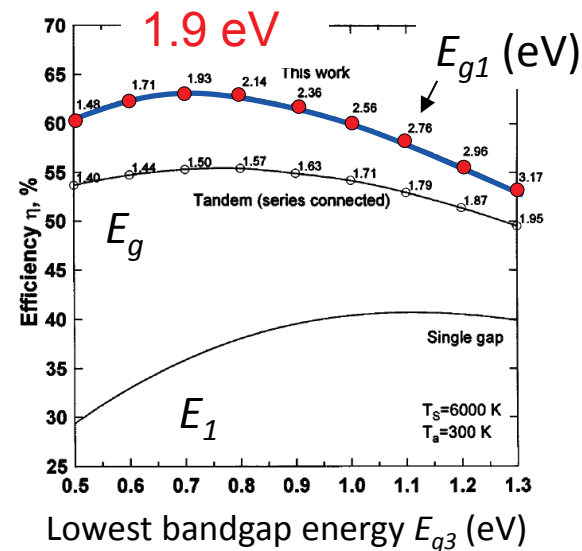
量子ドット型中間バンド太陽電池の技術課題は？

1. スペクトルマッチ

→ ワイドギャップ半導体ホストを用いた
バンド構造の最適化

InGaP系ワイドギャップ量子ドット太陽電池

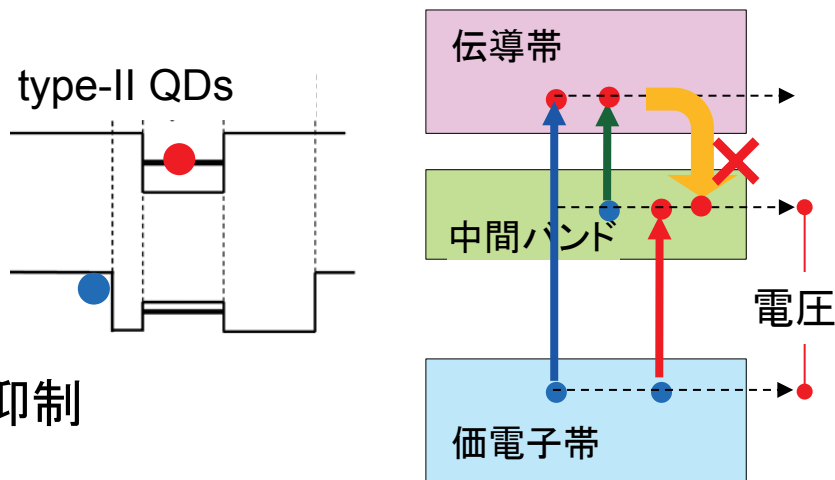
T. Sugaya *et al.* Appl. Phys. Lett. 101, 133110 (2012)



2. 2段階光吸収による電流生成高効率化

→ キャリアの長寿命化

電荷分離型type-II量子ドット太陽電池



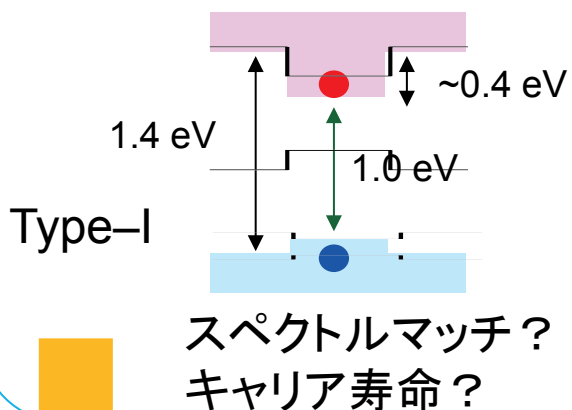
3. 電圧降下

→ 量子ドット準位へのエネルギー緩和抑制

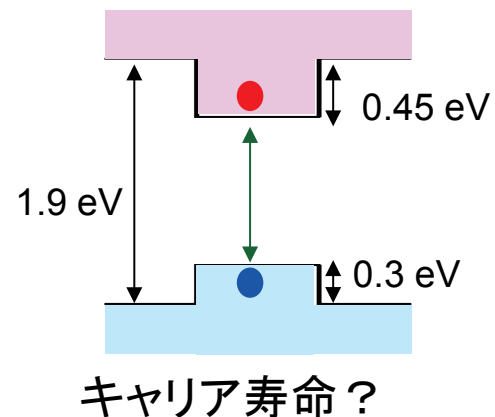
Type-II量子ドット

我々のアプローチ: ワイドギャップホスト & Type-II 量子ドット

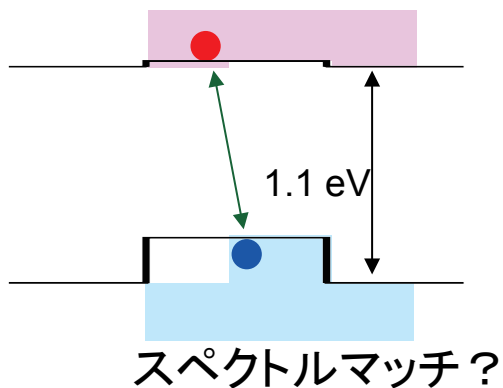
従来型: InAs/GaAs QD



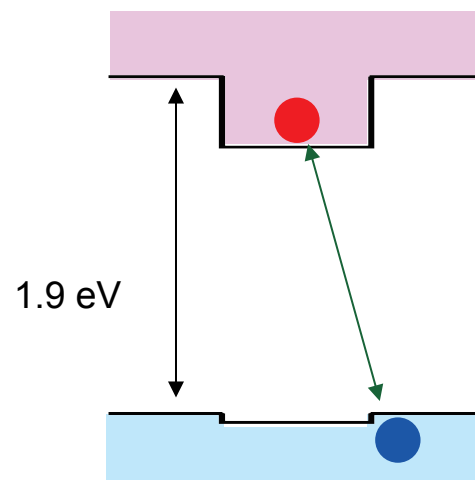
ワイドギャップホスト: InGaAs/InGaP QD



Type-II量子ドット:
GaSb/GaAs QD, Ge/Si QD



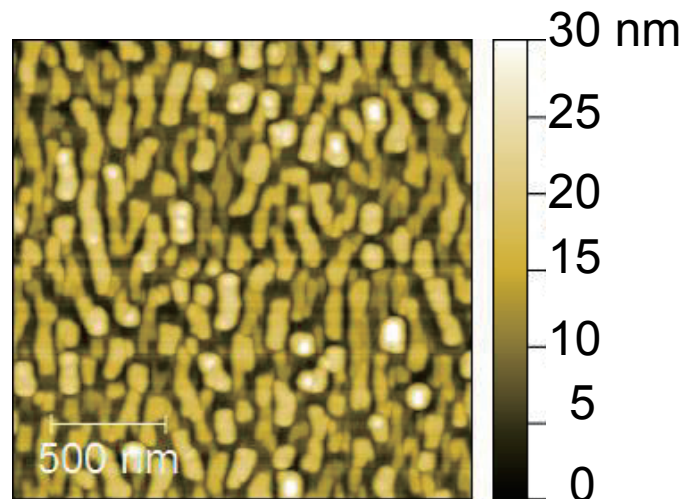
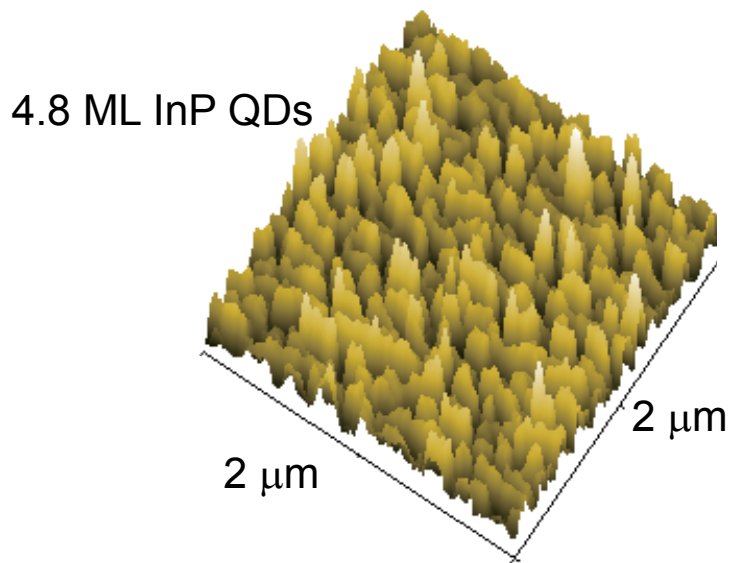
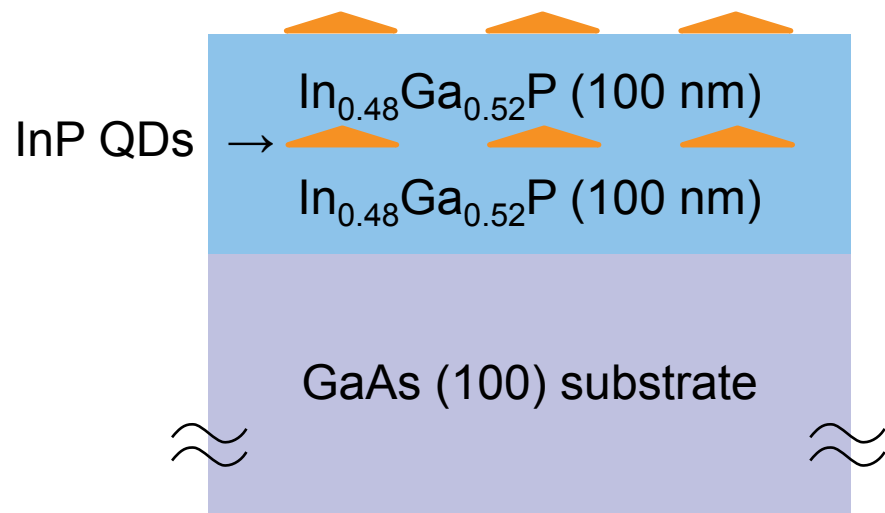
本研究: Type-II InP/InGaP QD



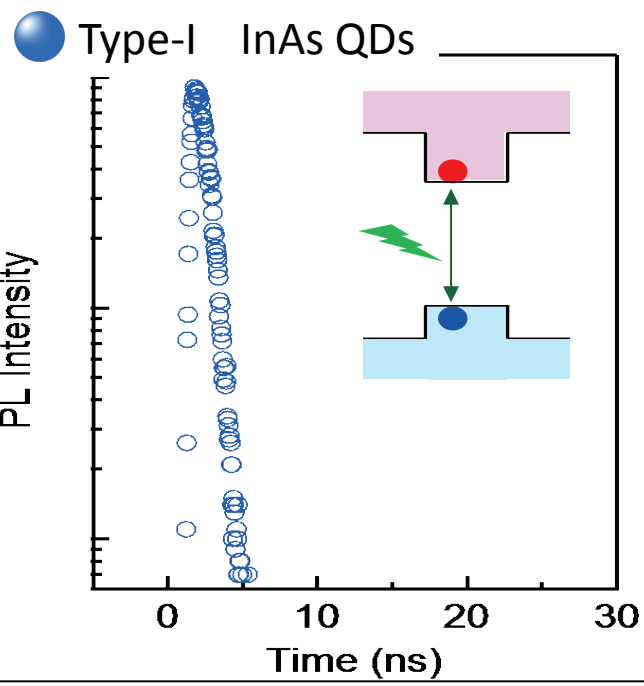
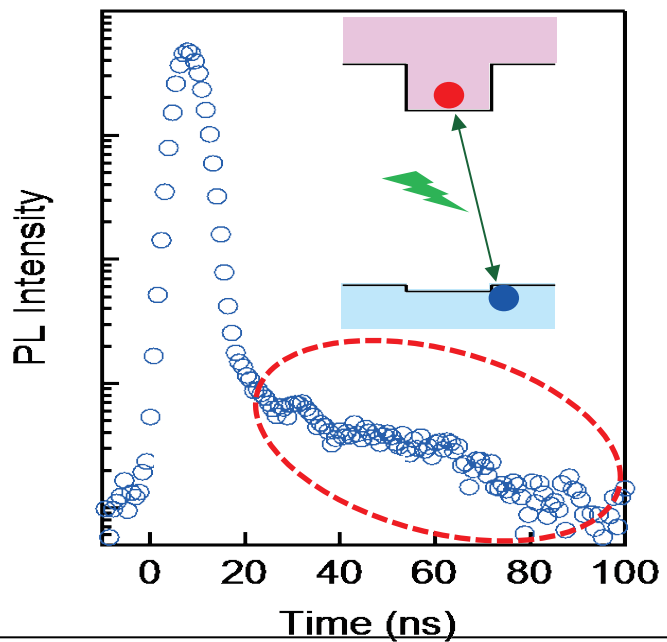
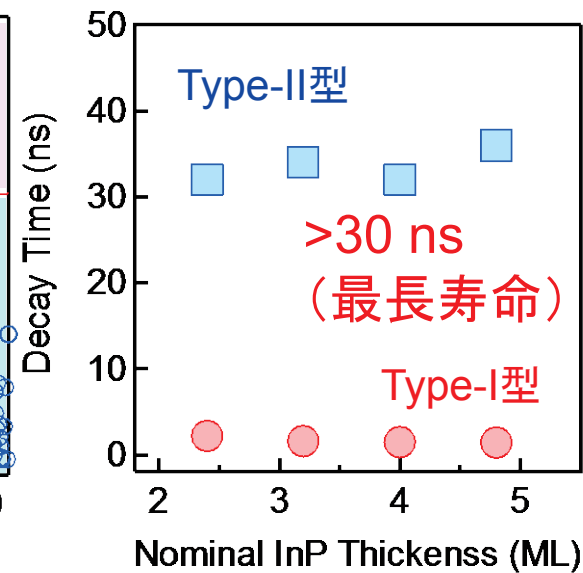
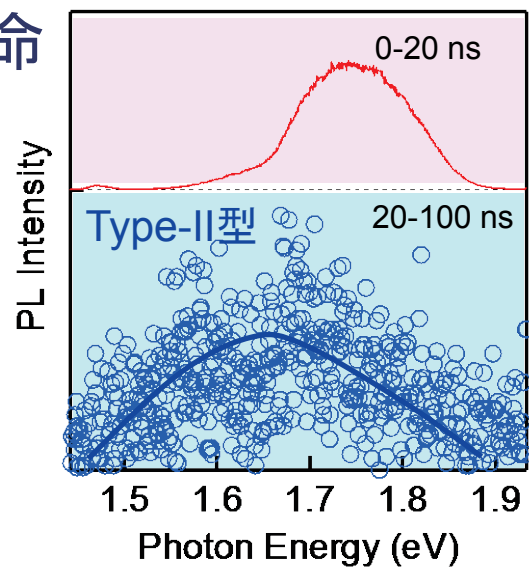
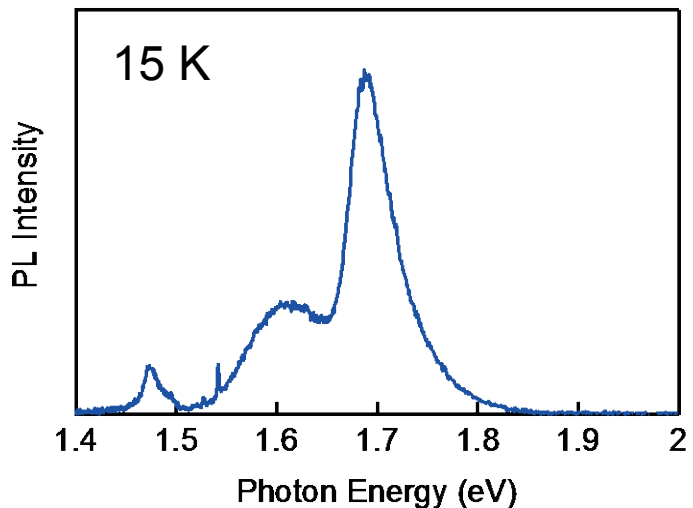
量子ドットの作製: InP/InGaP 量子ドット (QDs)

超低速成長MBEを用いた結晶成長

- MOCVD
- ガスソース MBE
- 固体ソース MBE
 - ◎ 高品質結晶成長
 - △ InGaP 成長は難易度が高い

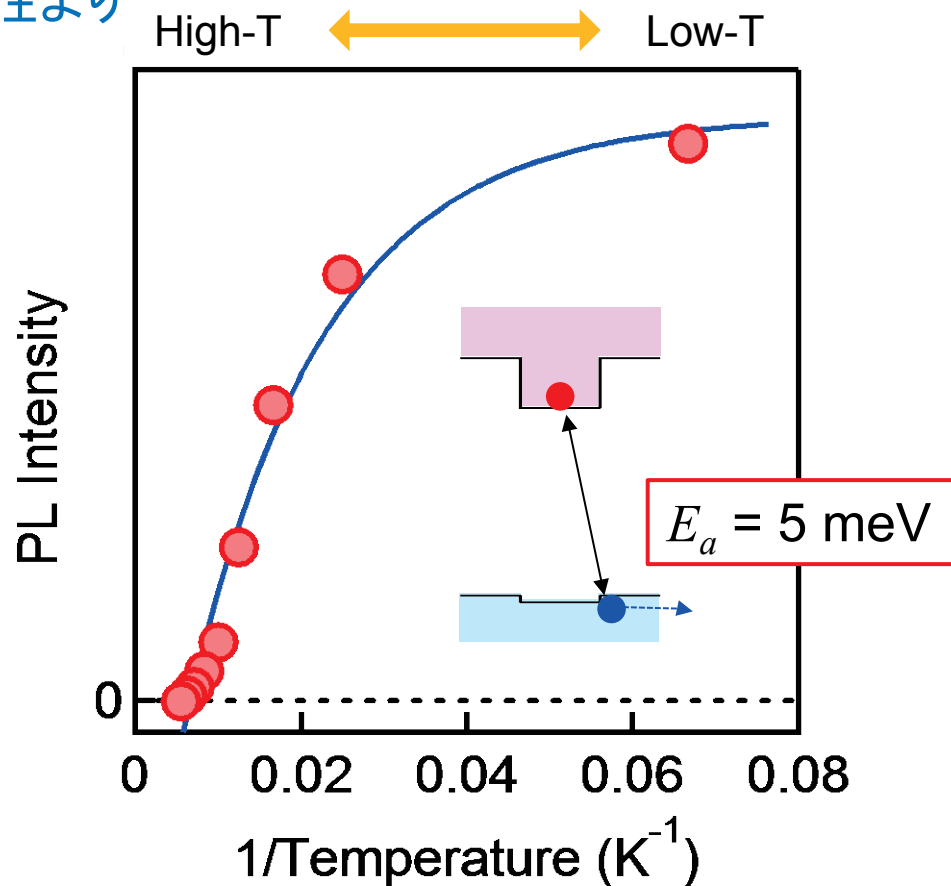
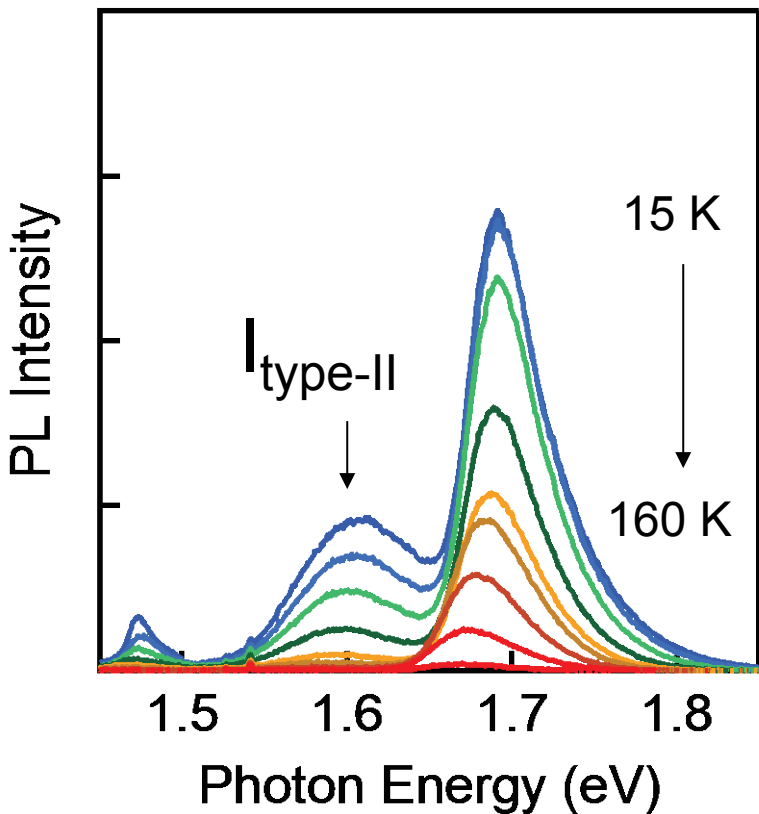


Type II型検証: キャリア寿命



Type-II型検証: 価電子帯バンドオフセット

キャリア分布(発光形状)の温度依存性より

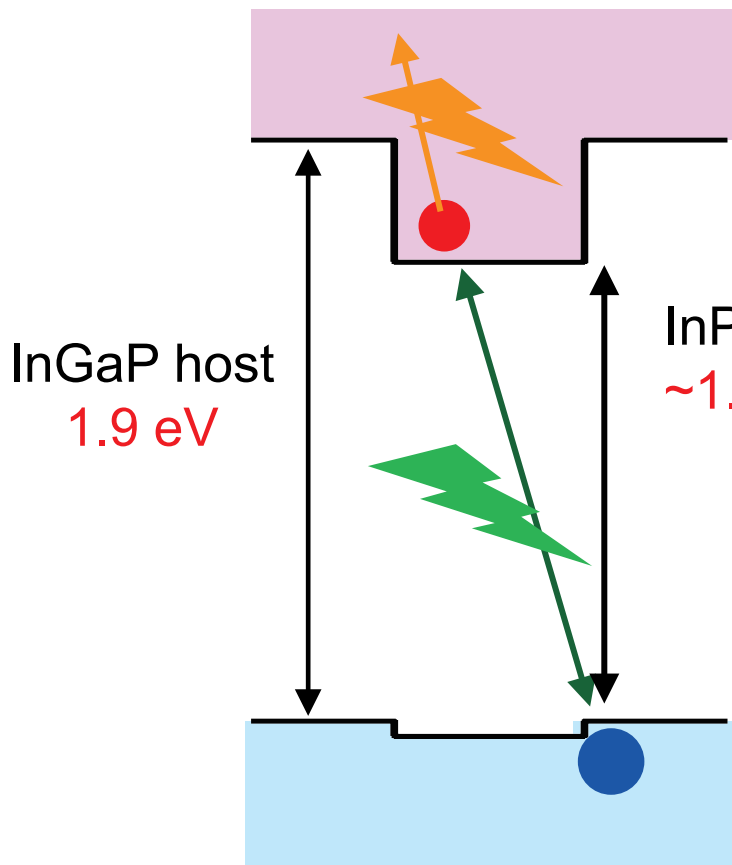


$$\frac{dp}{dt} = I_{exc} - \gamma_{rad} np - \gamma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad \Rightarrow \quad I_{PL} \propto \gamma_{rad} np = I_{exc} - \gamma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right)$$

熱活性エネルギー (5 meV) → 価電子帯バンドオフセットは小さい

実験結果のまとめ:

Type-II InP/InGaP QDs の特性



電子閉じ込めエネルギー:
 $\Delta E \sim 0.35 \text{ eV} \gg k_B T (300 \text{ K})$

InP QDs: キャリア寿命: **>30 ns**
 $\sim 1.55 \text{ eV}$ cf. InAs (<1 ns)

2段階光吸収:
 $\rightarrow \sim \times 30$

価電子帯バンドオフセット:
 $\Delta E \sim 0 \text{ eV}$

中間バンド量子ドット太陽電池の検証に適した材料である

T. Tayagaki & T. Sugaya, Appl. Phys. Lett. **108**, 153901 (2016).

まとめ

1. ワイドギャップ半導体InGaP中に電荷分離型InP量子ドットを導入したInP/InGaP量子ドット太陽電池を提案した。
2. InP量子ドット中のキャリア寿命が30ナノ秒以上であり、従来のInAs量子ドットに比較して長いキャリア寿命を示す電荷分離型量子ドットであることを検証した。
3. InP/InGaP量子ドットについてバンドオフセットを調べ、価電子帯のバンドオフセットが小さいため、中間バンド型太陽電池に適したエネルギー構造を持つ量子ドットであることを検証した。

T. Tayagaki and T. Sugaya,

“Type-II InP quantum dots in wide-bandgap InGaP host for intermediate-band solar cells”,
Appl. Phys. Lett. **108**, 153901 (2016).

謝辞

本研究は、(独)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