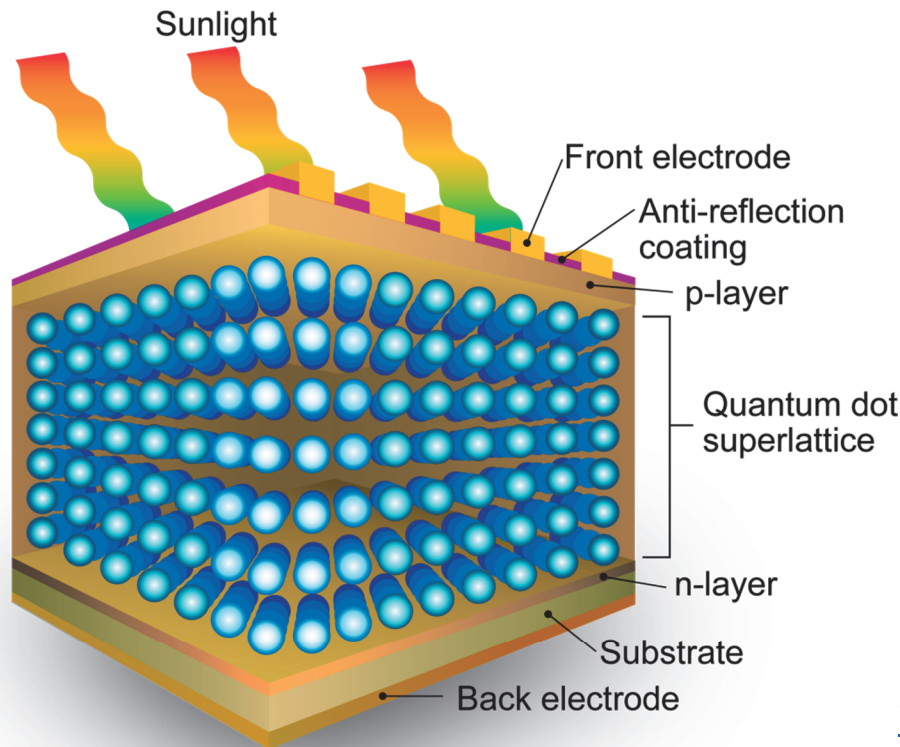


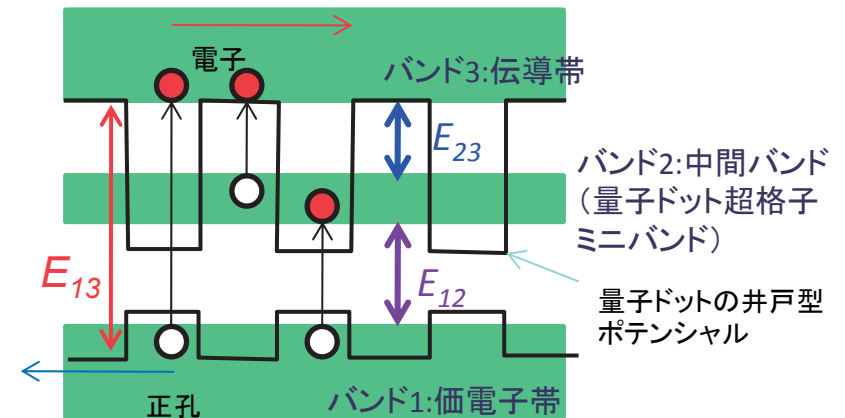
InGaAs/InGaP系量子ドット太陽電池の作製

革新デバイスチーム 菅谷武芳



量子ドット超格子太陽電池

理論上: 変換効率60%以上(集光)



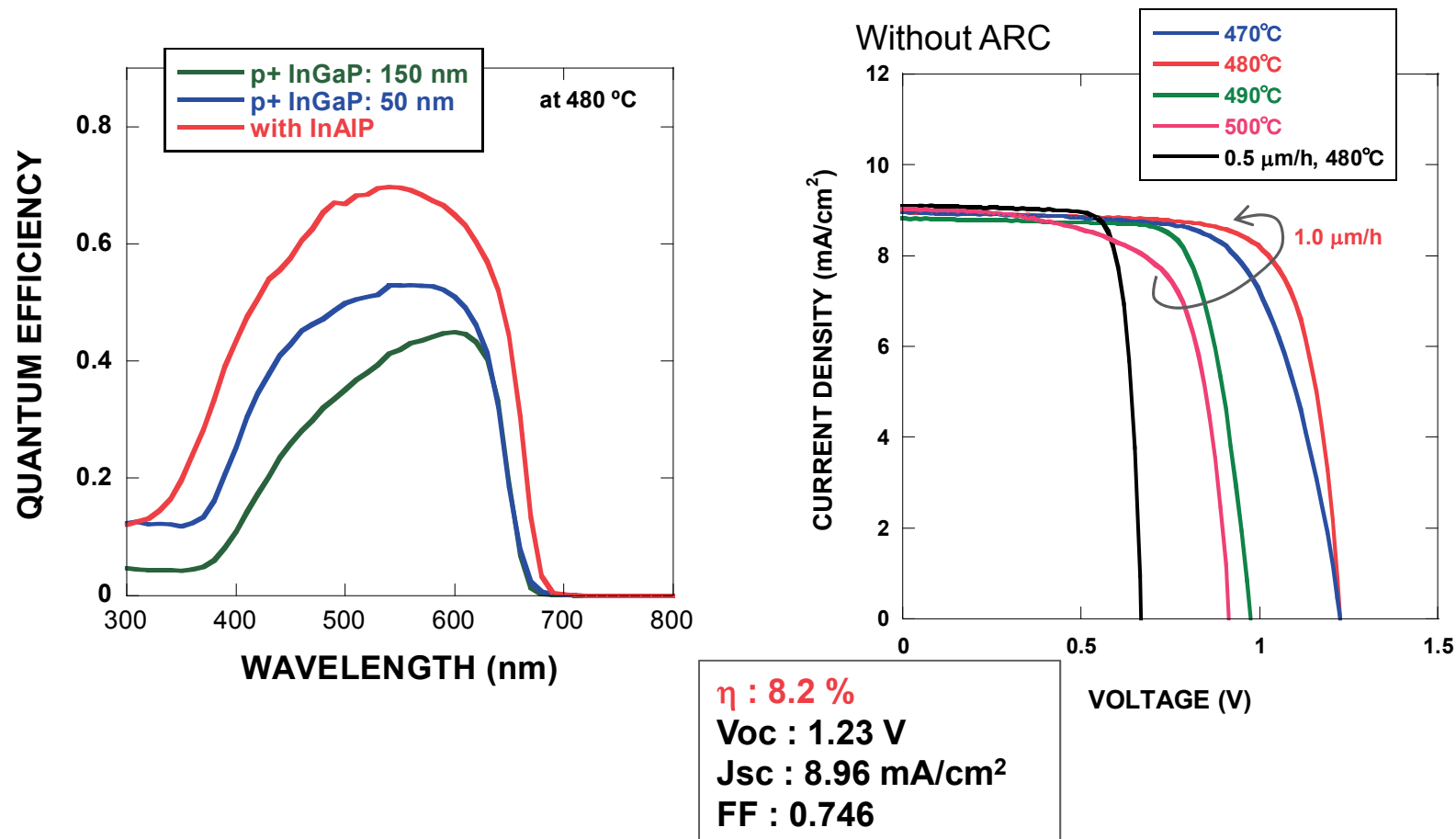
量子ドット太陽電池のバンド図

★60%を超える理想的な量子ドット太陽電池実現には、 E_{13} として1.9eVが必要。



InGaPを採用

MBEによるInGaP太陽電池

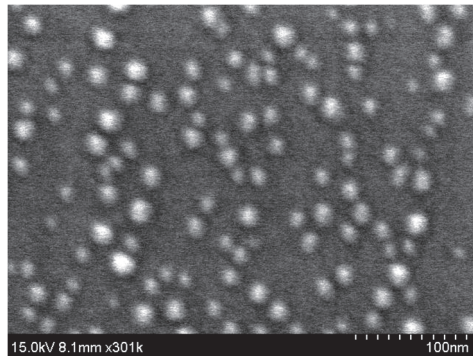


固体ソースMBEによるInGaP太陽電池 -初めての系統的な研究-

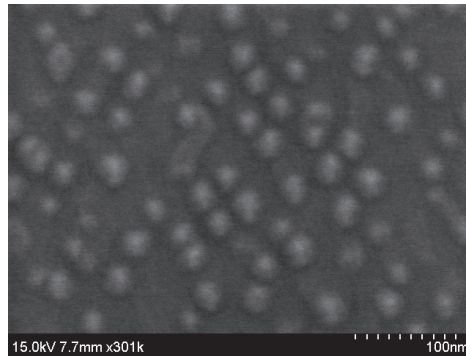
➡ 高品質量子ドット形成に有利

InGaP上のInGaAs量子ドット

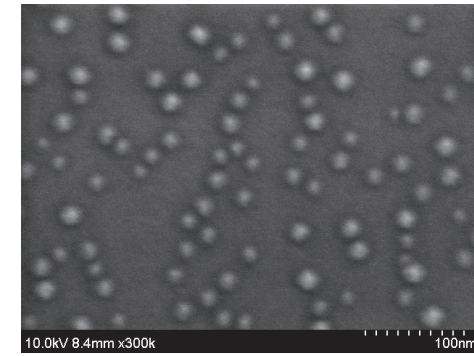
InGaP上
In_{0.4}Ga_{0.6}As QD 1.3 ML



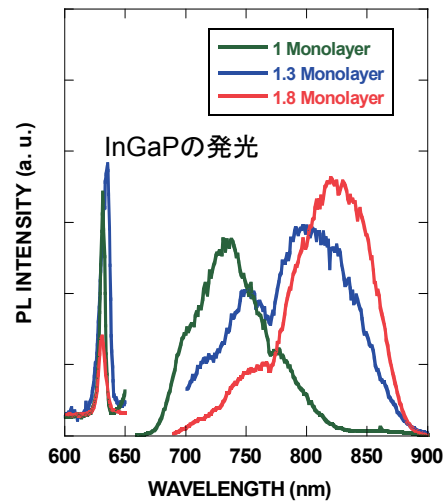
GaAsバッファ層 2 nm
In_{0.4}Ga_{0.6}As QD 7.0 ML



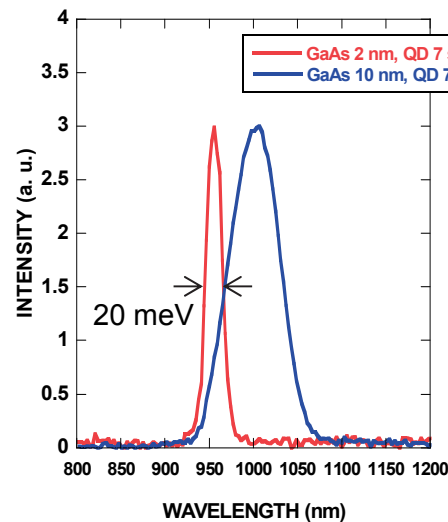
GaAsバッファ層 10 nm
InAs QD 2.4 ML



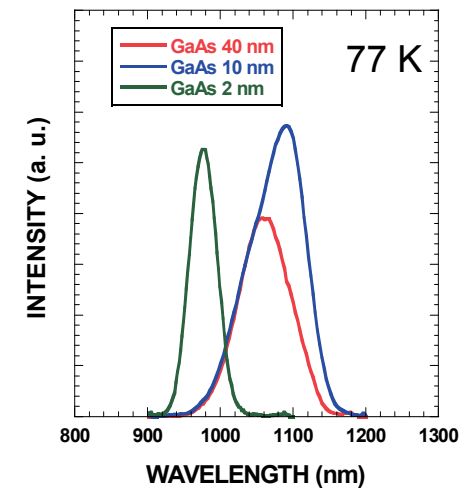
In_{0.4}Ga_{0.6}As/InGaP量子ドット



In_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs/InGaP量子ドット

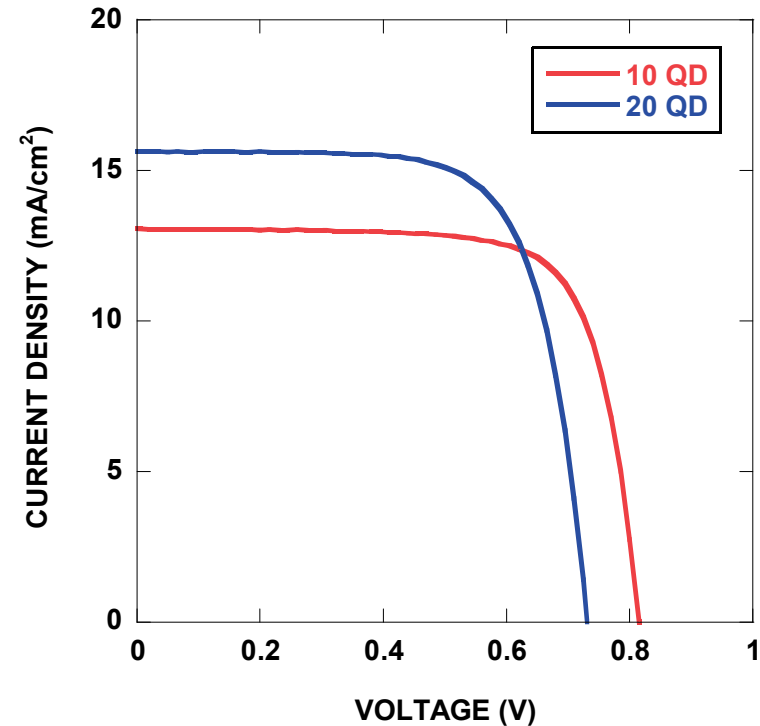
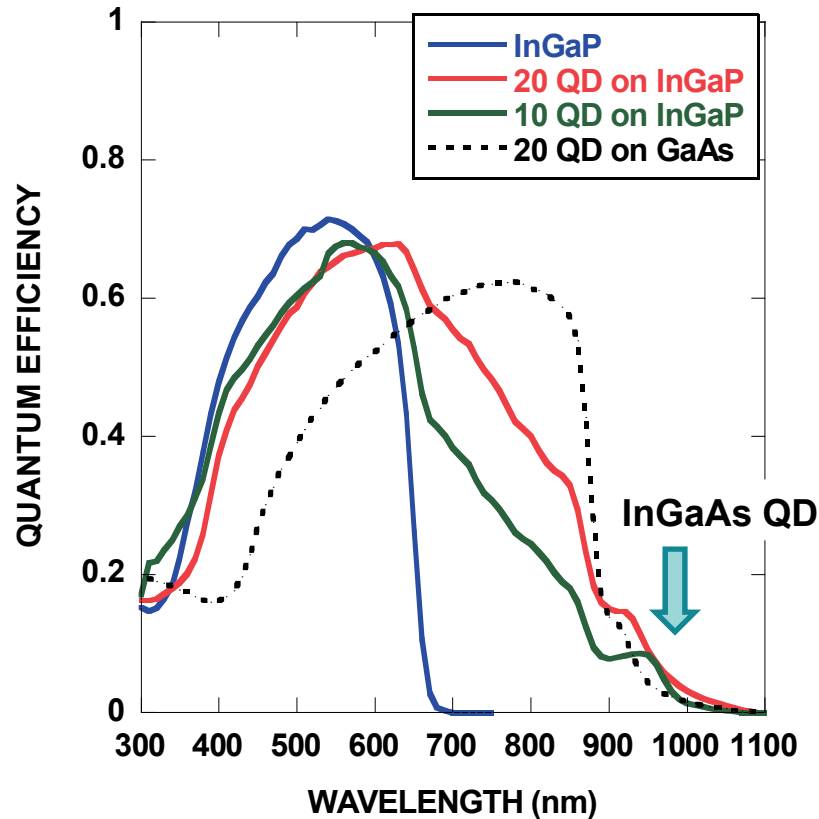


InAs/GaAs/InGaP量子ドット



GaAs層の挿入によりドットの量子準位制御可能

InGaP上のInGaAs量子ドット太陽電池



Without ARC

	10 QD	20QD
Efficiency (%)	7.9	8.1
Voc (V)	0.815	0.731
Jsc (mA/cm2)	13.1	15.6
FF	0.743	0.707

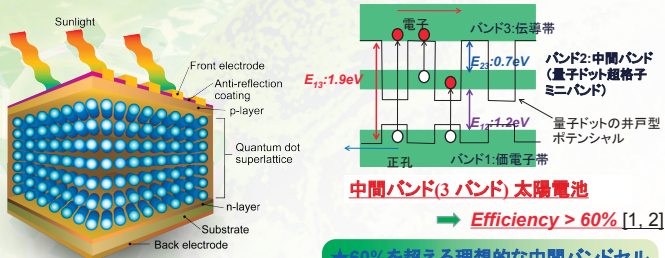
★InGaP上に形成した初めての量子ドット太陽電池

InGaAs/InGaP系量子ドット太陽電池の作製

菅谷 武芳

産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター 革新デバイスチーム

研究の目的 P系量子ドット(QD)太陽電池



量子ドット超格子太陽電池

★90%を超える理想的な中間バンドセル
作製のため、母体の半導体はワイド
ギャップ ($E_g = 1.9 \text{ eV}$) が必要。

⇒ InGaP系材料

P系成長の問題点

1. 固体MBEでP系の成長の実績はあまり無い。
2. Pは燃えやすい。 ★高品質量子ドット成長には、MBEが優れている。

これまでの成果 (InGaAs系QD)

1. 歪補償技術を用いず400層の $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット積層に成功 [3, 4]
2. 20層 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット超格子のミニバンド形成に成功 [5]
3. $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット太陽電池および $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ キャップ層の効果 [6, 7]
4. 量子ドットミニバンド太陽電池の作製に成功 [8]
5. 150層の超多積層量子ドット太陽電池 [9]

問題点

1. V_{oc} の低下: 量子ドットで生成したキャリアが効率良く取り出せない。
太陽光スペクトルによる2段階光吸収の明確な観察がカギ。
InGaAsドットの場合、左図 E_{23} が0.2~0.3 eVで太陽光スペクトルに存在しない。

This work - InGaP量子ドット太陽電池-

- ★固体ソースMBEを用いたInGaP太陽電池作製に関する初めての系統的な研究
- ★InGaP上のIn(Ga)As量子ドット形成に成功。(量子準位の制御)
- ★InGaP上InGaAs量子ドット太陽電池の作製に成功。

結果及び考察

MBEによるInGaP太陽電池

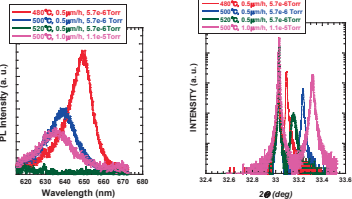
MBEによる $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ の成長

$T_{\text{sub}}: 480, 500, 520 \text{ }^\circ\text{C}$

Growth Rate: 0.5, 1.0 $\mu\text{m/h}$

P_2 pressure: 5.7×10^{-6} Torr (Beam Flux)

1.1×10^{-5} Torr

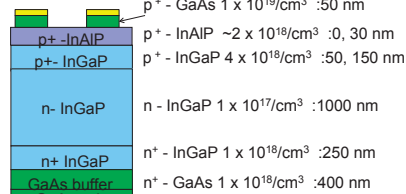


InGaPのPL発光

InGaPのXRD

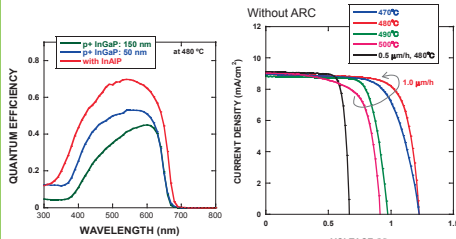
Ti / Au

50 / 500 nm



AuGe / Ni / Au
80 / 20 / 350 nm

Stack structure of InGaP solar cell



InGaP太陽電池のEQE

InGaP太陽電池のI-V特性

$\eta: 8.2\%$, $V_{oc}: 1.23 \text{ V}$
 $J_{sc}: 8.96 \text{ mA/cm}^2$, $FF: 0.746$

固体ソースMBEによるInGaP太陽電池
—初めての系統的な研究—

これまでの成果

量子ドット(QD)太陽電池

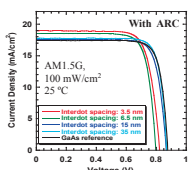
InGaAs量子ドット太陽電池

1. 超多積層InGaAs量子ドット太陽電池:
Energy & Environmental Science, 5, 6233 (2012) IF 9.446



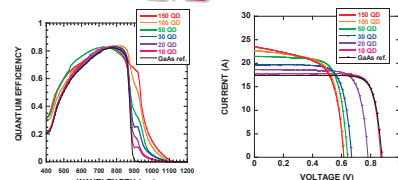
400層の量子ドット超多積層化に世界で初めて成功

2. 世界初の量子ドットミニバンド太陽電池: Solar Energy Materials & Solar Cells, 95, 2920 (2011) IF: 4.593

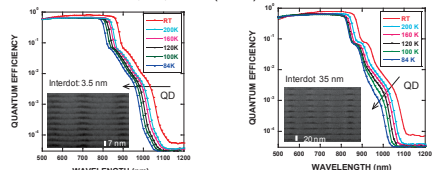


量子ドットミニバンド太陽電池のI-V特性

ドット間距離の減少に伴い J_{sc} が増加。



150層量子ドット太陽電池の外部量子効率、I-V特性
—150層においても良好なセル特性—



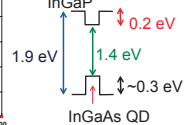
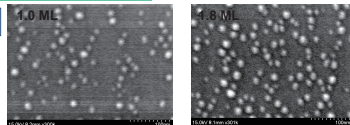
★QDによる光電流は温度が低下しても減少せず。★温度の低下とともに減少。
キャリアは超格子中のミニバンド中をトンネル。

EQEの温度依存性測定

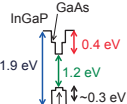
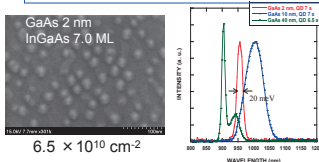
InGaP上のInGaAs量子ドット太陽電池

InGaP上In(Ga)As量子ドット構造

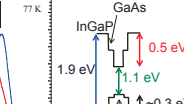
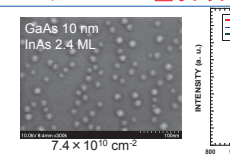
InGaPのInGaAs量子ドット



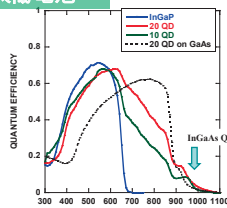
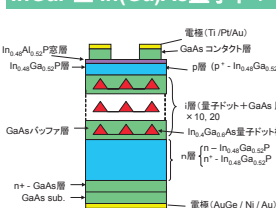
InGaPのInGaAs/GaAs量子ドット



InGaPのInAs/GaAs量子ドット



InGaP上In(Ga)As量子ドット太陽電池



GaAs層の挿入でドットの量子準位制御可能

Without ARC	
Efficiency (%)	7.9, 8.1
Voc (V)	0.815, 0.731
Jsc (mA/cm ²)	13.1, 15.6
FF	0.743, 0.707

結論

1. 固体ソースMBEを用いてInGaP太陽電池作製の系統的な研究を行った。
2. InGaP上のIn(Ga)As量子ドット形成に成功。(量子準位の制御)
3. InGaP上In(Ga)As量子ドット太陽電池の作製に初めて成功した。

謝辞

本研究の一部は、経済産業省のもと、NEDO技術開発機構から委託され、実施したものである。

参考文献

- [1] A. Luque et al., Phys. Rev. Lett., 78 (1997) 5014.
- [2] L. Marti et al., Appl. Phys. Lett., 90 (2007) 233510.
- [3] T. Sugaya et al., Jpn. J. Appl. Phys., 49, (2010) 030211.
- [4] T. Sugaya et al., J. Vac. Sci. Technol., B 28, (2010) C3C4.
- [5] T. Sugaya et al., Appl. Phys. Lett., 97, (2010) 043112.
- [6] T. Sugaya et al., Sol. Energ. Mat. Sol. Cells, 95, (2011) 163
- [7] T. Sugaya et al., Appl. Phys. Lett., 97, (2010) 183104.
- [8] T. Sugaya et al., Sol. Energ. Mat. Sol. Cells, 95, (2011) 2920.
- [9] T. Sugaya et al., Energy & Environmental Science, 5, (2012) 6233.

InGaP上に形成した初めての量子ドット太陽電池