

太陽光発電工学研究センター成果報告会

平成24年5月24日

革新デバイスチームの概要

Research Activities of
Next Generation Device Team

発表者：松原 浩司

Koji Matsubara

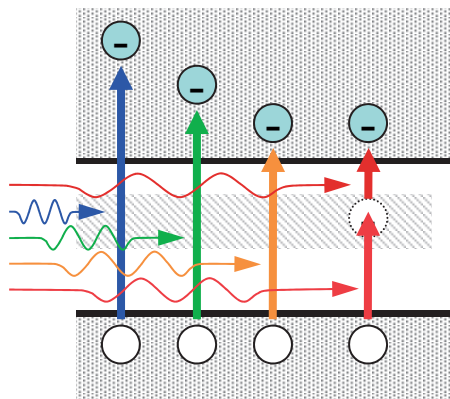
革新的太陽電池技術

単接合太陽電池の理論効率を超える高効率が期待される新概念・新技術

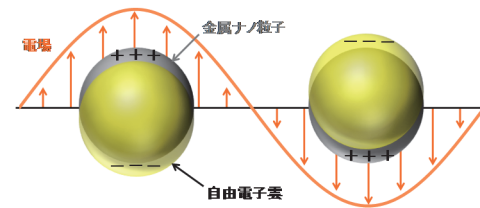


全太陽光の有効利用

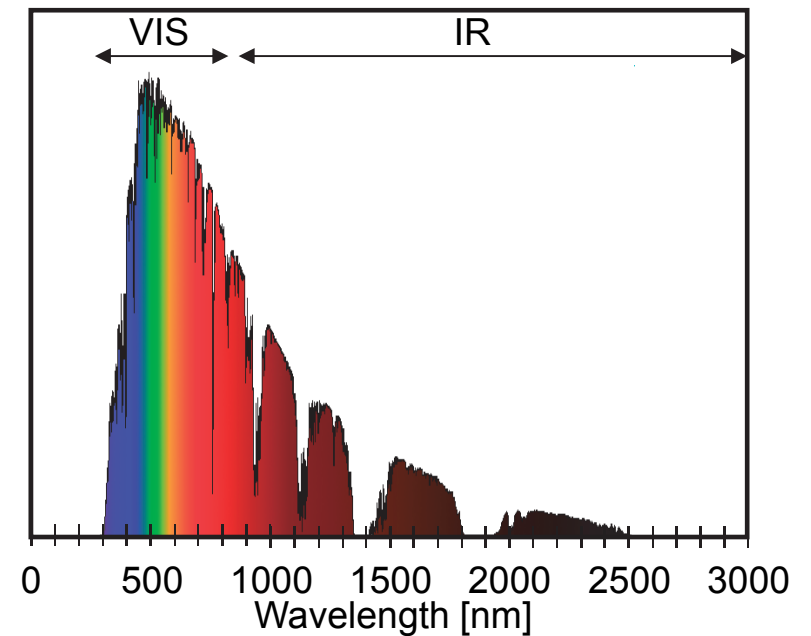
・新概念



中間バンド
(量子ドット)



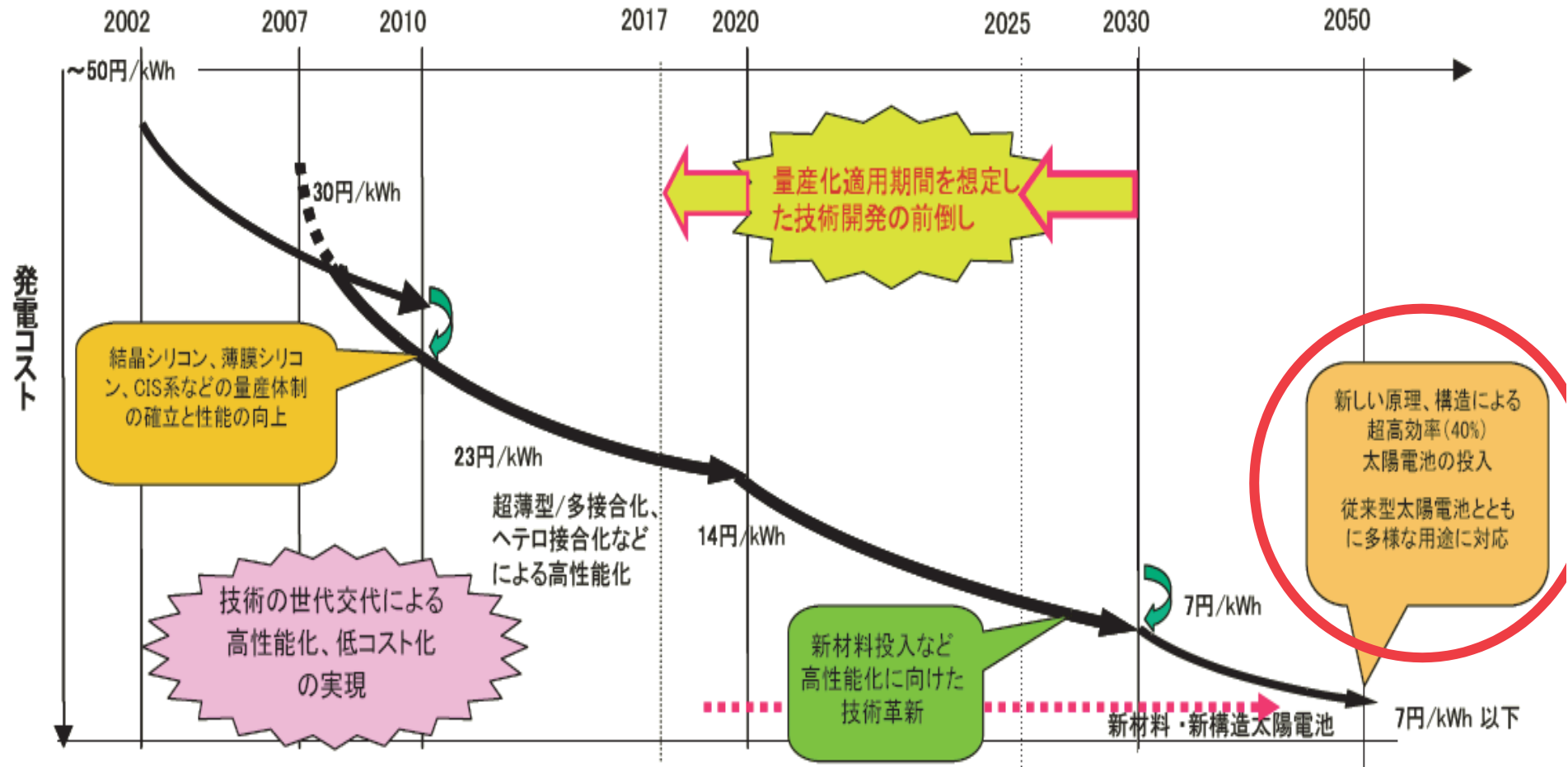
プラズモン共鳴



・新材料

短波長利用ナローギャップ
長波長利用ワイドギャップ

PV2030+ 低コスト化シナリオ



- 2050年までに太陽光発電はCO2削減の一翼を担う主要技術として、我が国ばかりでなくグローバルな社会に貢献する
- 2050年に国内の一次エネルギー需要の5~10%程度を太陽光発電で賄うことを目標

革新的太陽電池に関する 国家プロジェクト等

- NEDO革新的太陽光発電技術研究開発
(FY2008～2014)
- JSTさきがけ「太陽光と光電変換機能」
(FY2009～2016)
- JST CREST「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー
生成技術の創出」(FY2009～2013)
- JSPS最先端研究開発支援プログラム(FIRST)
「低炭素社会に資する有機系太陽電池の開発」
(FY2009～2012)

- 米国 SunShot Initiative
- 欧州 FP7

革新デバイスチームの 目的とアプローチ

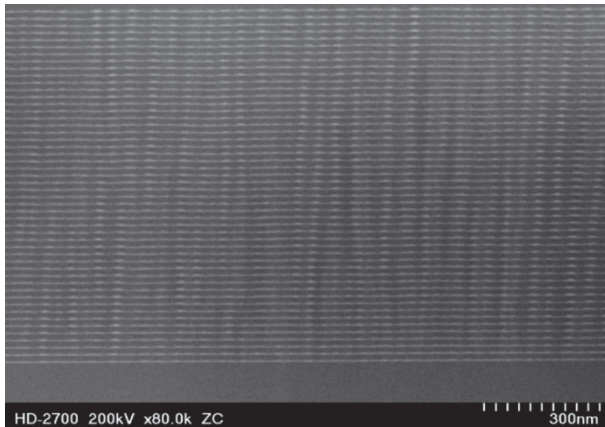
- 将来の太陽電池の変換効率の大幅な向上(40%超)や発電コストの大幅な低減(7円/kWh以下)の達成に資する**新しい概念や原理に基づく太陽電池技術を開発**する。
- 既存の材料や技術にとらわれない新しい概念や原理を用いることで、太陽電池の飛躍的な効率向上、低コスト化を目指す。
このために新原理の検証のような基礎的な研究から、材料開発、新しい作製方法の開発など広い範囲にわたって取り組む。

研究内容

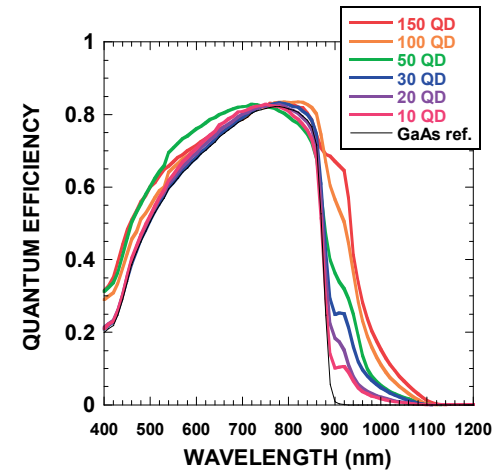
- ・ 量子ドット太陽電池
- ・ シリコンナノ結晶材料
- ・ ナノ構造制御
- ・ 単結晶有機薄膜太陽電池
- ・ 次世代化合物系太陽電池(CZTSe系)
- ・ スマートスタック技術
- ・ プラズモニック光閉じ込め技術
etc (新規アイデアなど)

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).

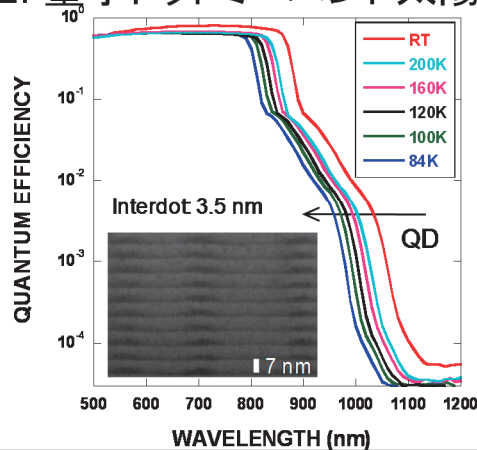


400層の量子ドット超多積層化に成功

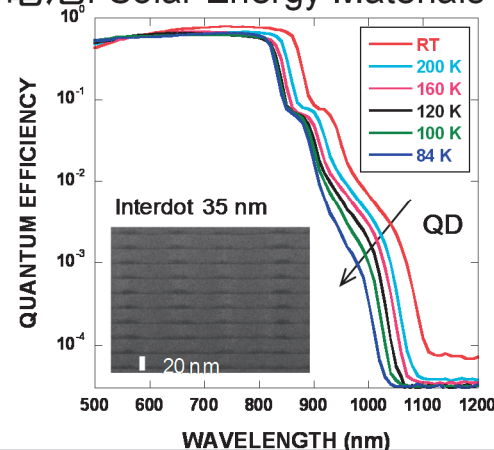


150層量子ドット太陽電池の外部量子効率
-150層においても良好なセル特性-

2. 量子ドットミニバンド太陽電池: Solar Energy Materials & Solar Cells, **95**, 2920 (2011).



(a)



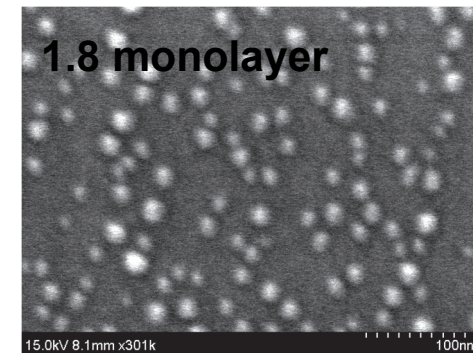
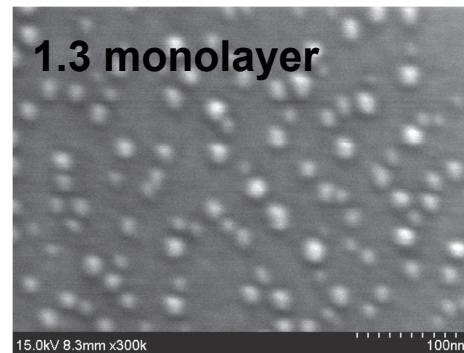
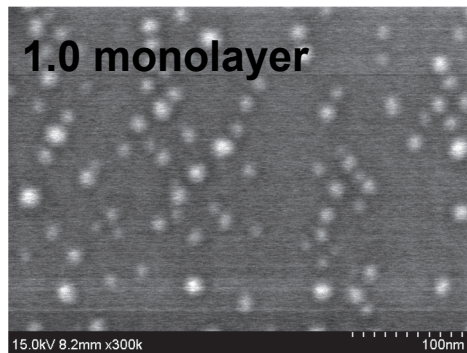
(b)

量子ドット太陽電池の分光感度の温度依存性

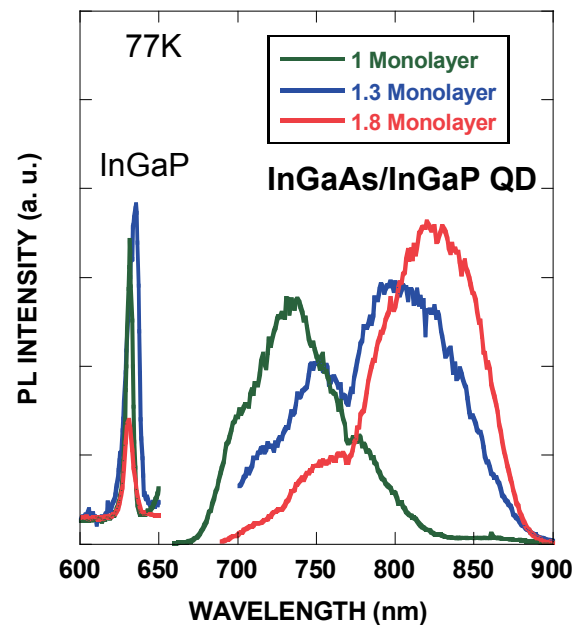
(a) ミニバンド中のトンネル電流により光電流は温度が低下しても減少しない。

(b) ドット間が大きい場合はトンネルしないため光電流は低下。

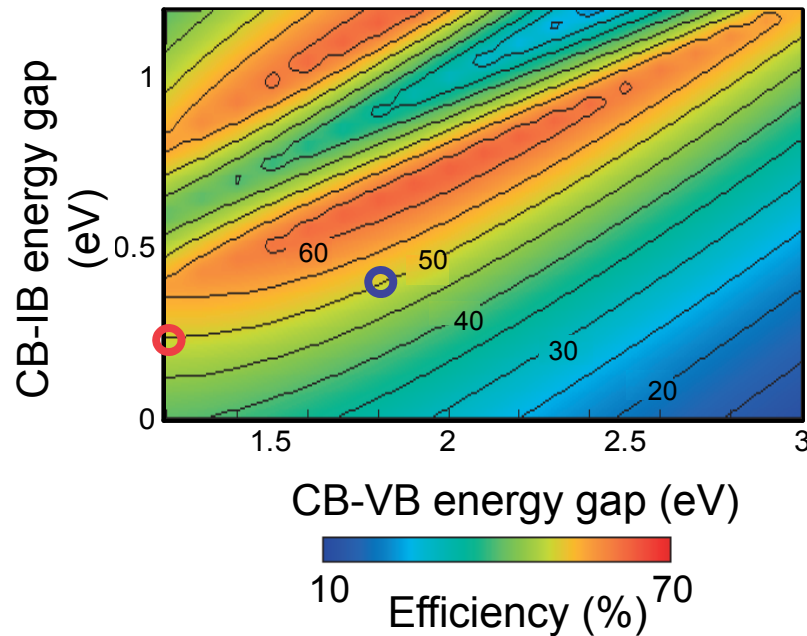
InGaP上InGaAs量子ドットの作製



GaAs上では6.5ML程度でドットになったが、InGaP上では1.0MLでドット形成

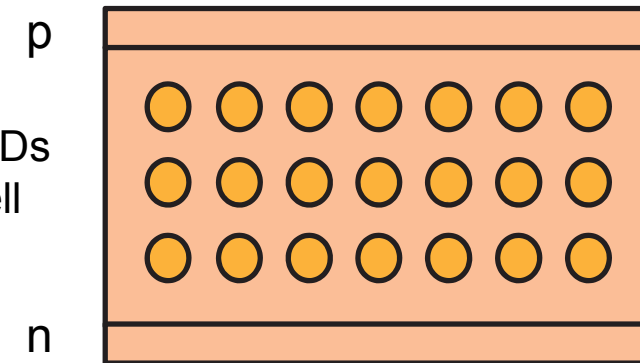


Ge量子ドット太陽電池



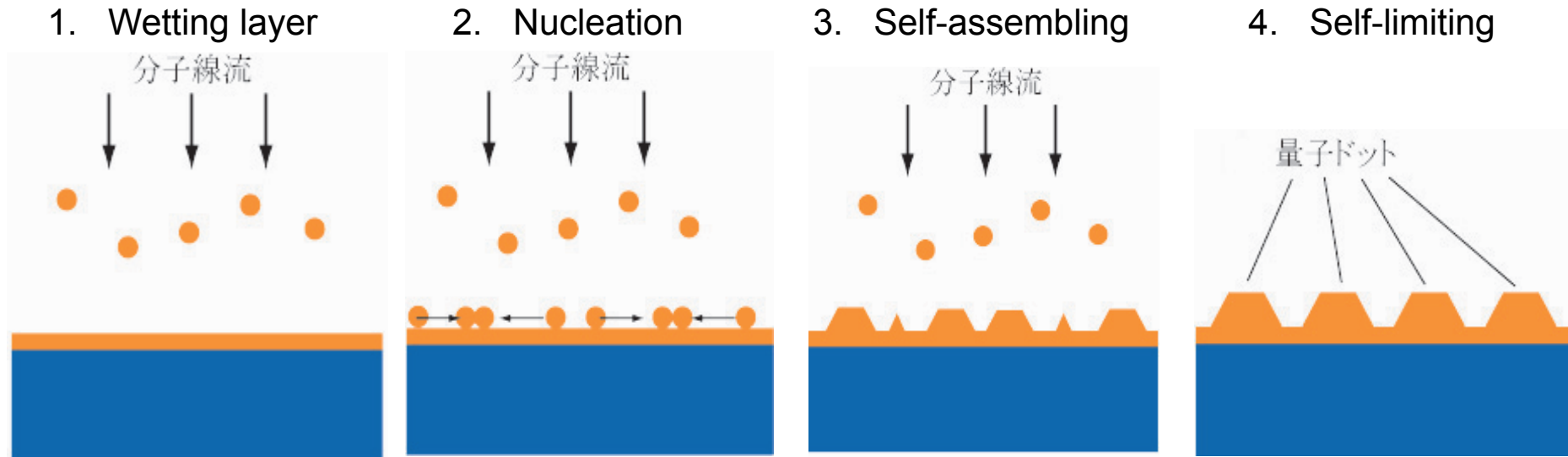
- In(Ga)As QDs in InGaP cell
- Ge QDs in Si cell

0.8 eV Ge QDs
/ 1.1eV Si cell



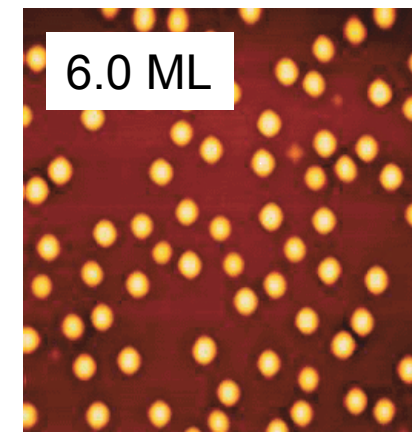
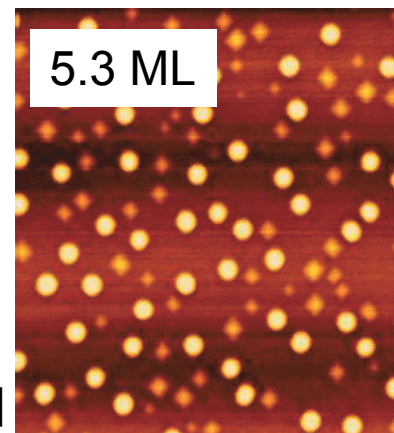
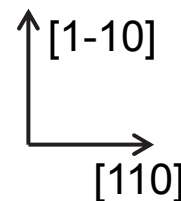
- 安価なIV族元素のみで構成
- 量子ドット太陽電池としての理論効率は50%超。
- タイプII型の超格子構造に起因した再結合損失の抑制を期待

MBE法によるSi(001)基板上Ge自己形成量子ドットの作製



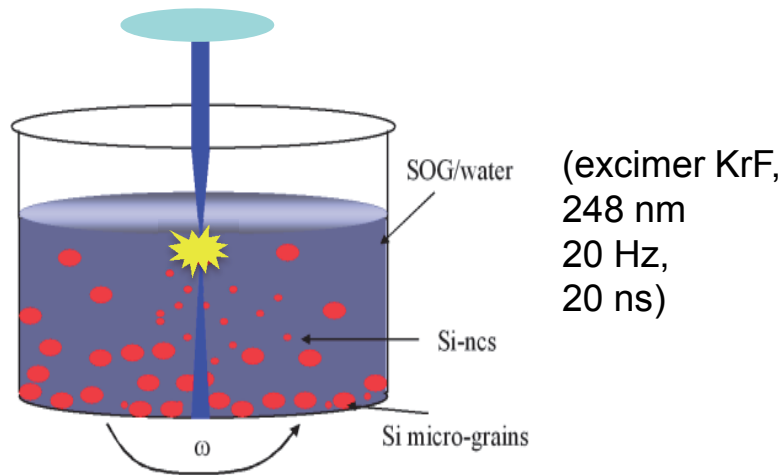
AFM像(1 μ m \times 1 μ m)

- 成長温度560°C, 堆積速度0.1 μ m/h
- Si(001)基板上Ge量子ドットはS-K成長モードにより形成。
- 成長初期はピラミッド形状、次第にドーム型の量子ドットに遷移し、飽和。
- 高さ9.9nm, 直径60.4nm, 密度7.9 $\times 10^9$ cm $^{-2}$, 直径揺らぎ6.7%の高均一量子ドット。



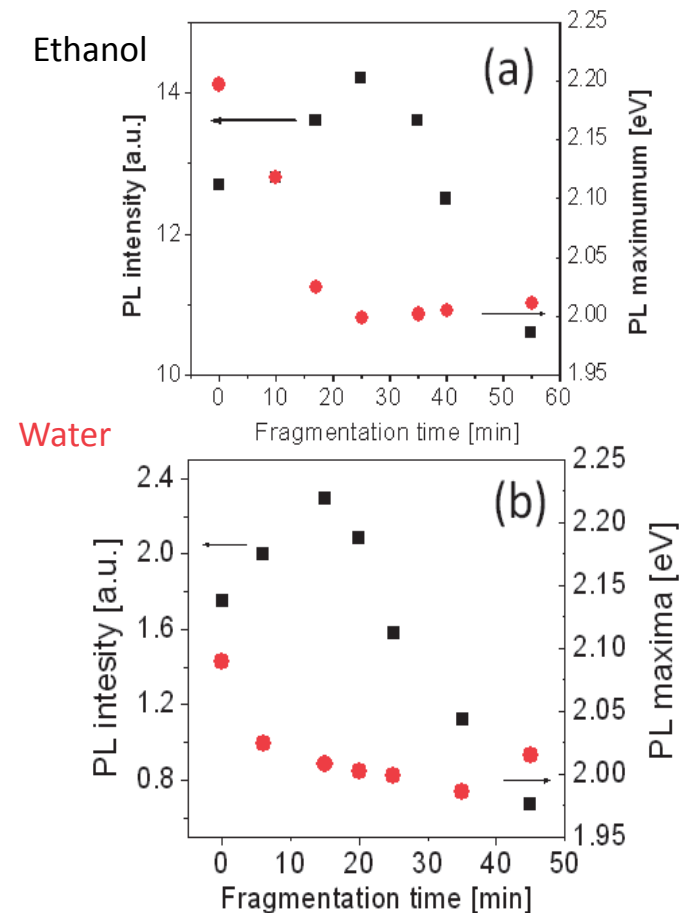
ナノシリコン結晶 3D surface engineering I

- ◆ Surface characteristics influence the integration (problem to approach Si-ncs)
- ◆ ns laser engineering in liquid



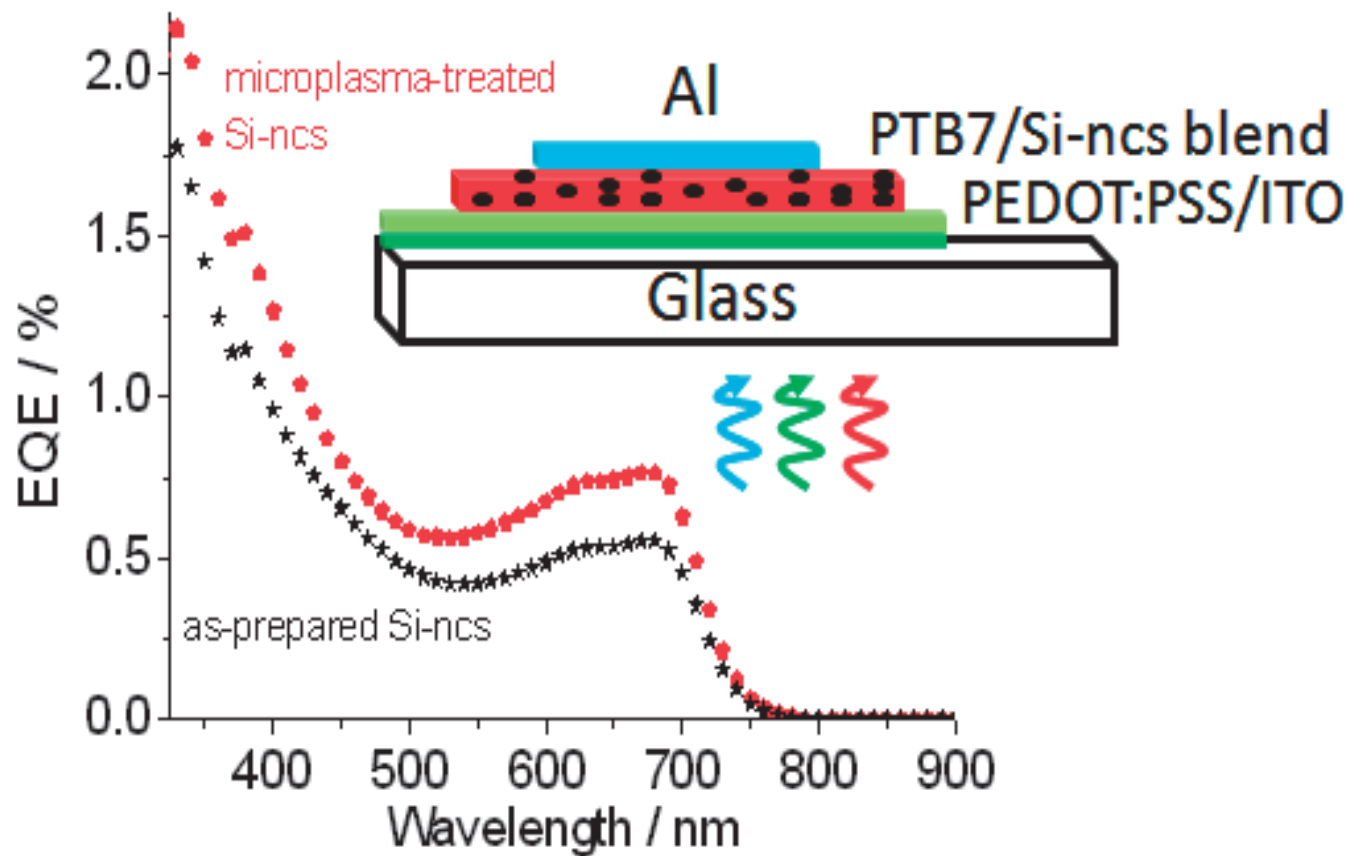
- ◆ PL properties can be changed

Svrcek Pure and Appl. Chem. 80, 2513 (2008)



ハイブリッド太陽電池

EQE after surface engineering II



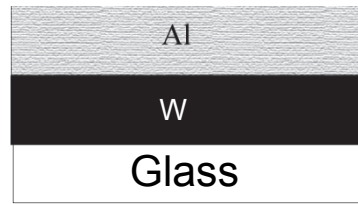
V. Svrcek et al. JJAP (2012)

ナノ構造の利用

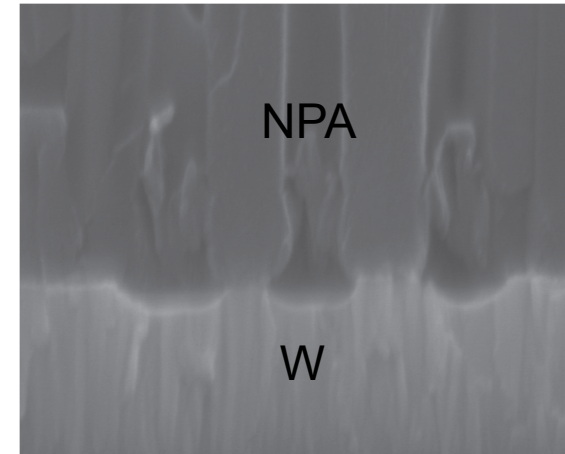
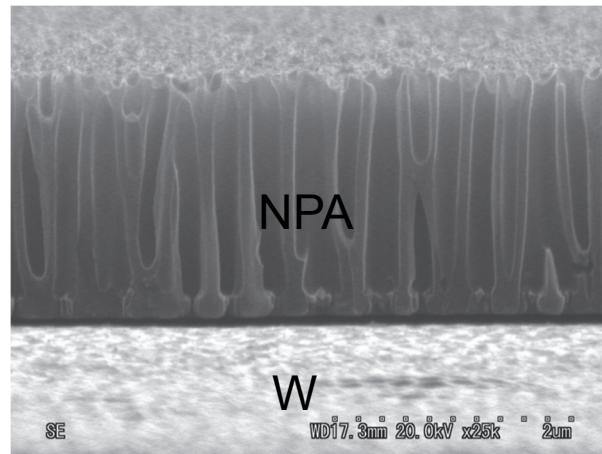
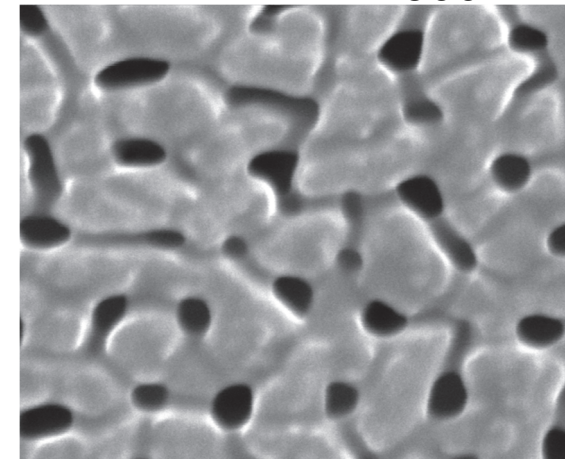
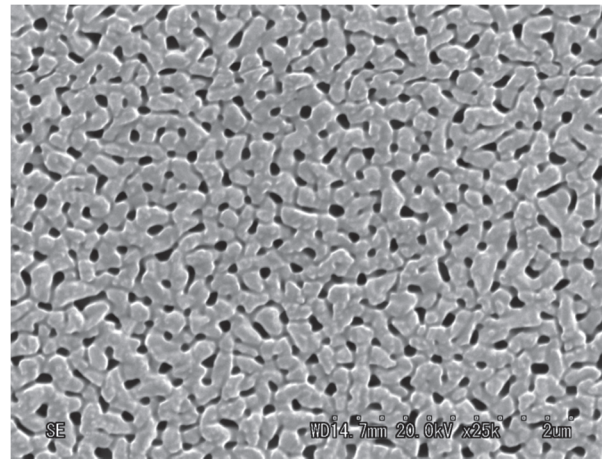
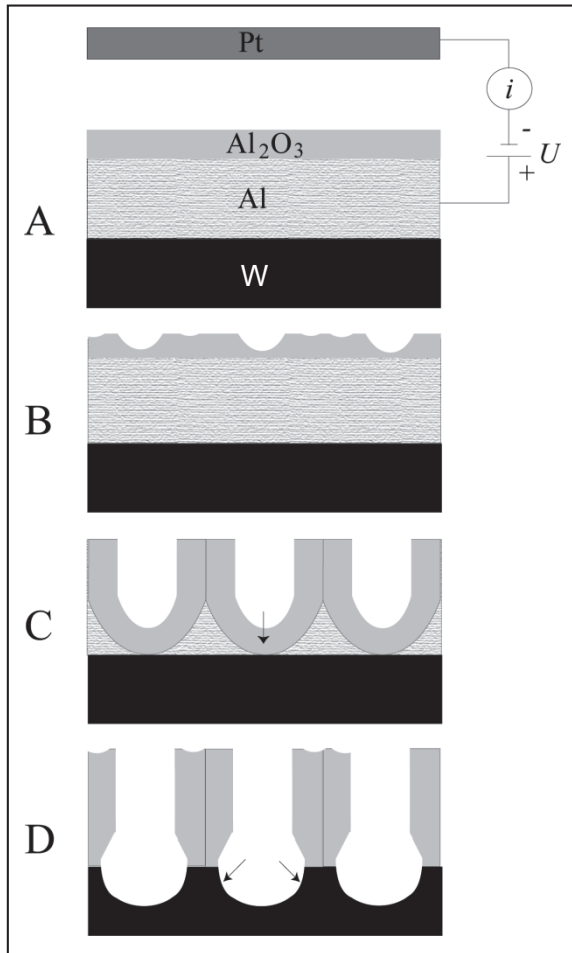
Nano-membrane spacer

Nanoporous anodic alumina (NPA)

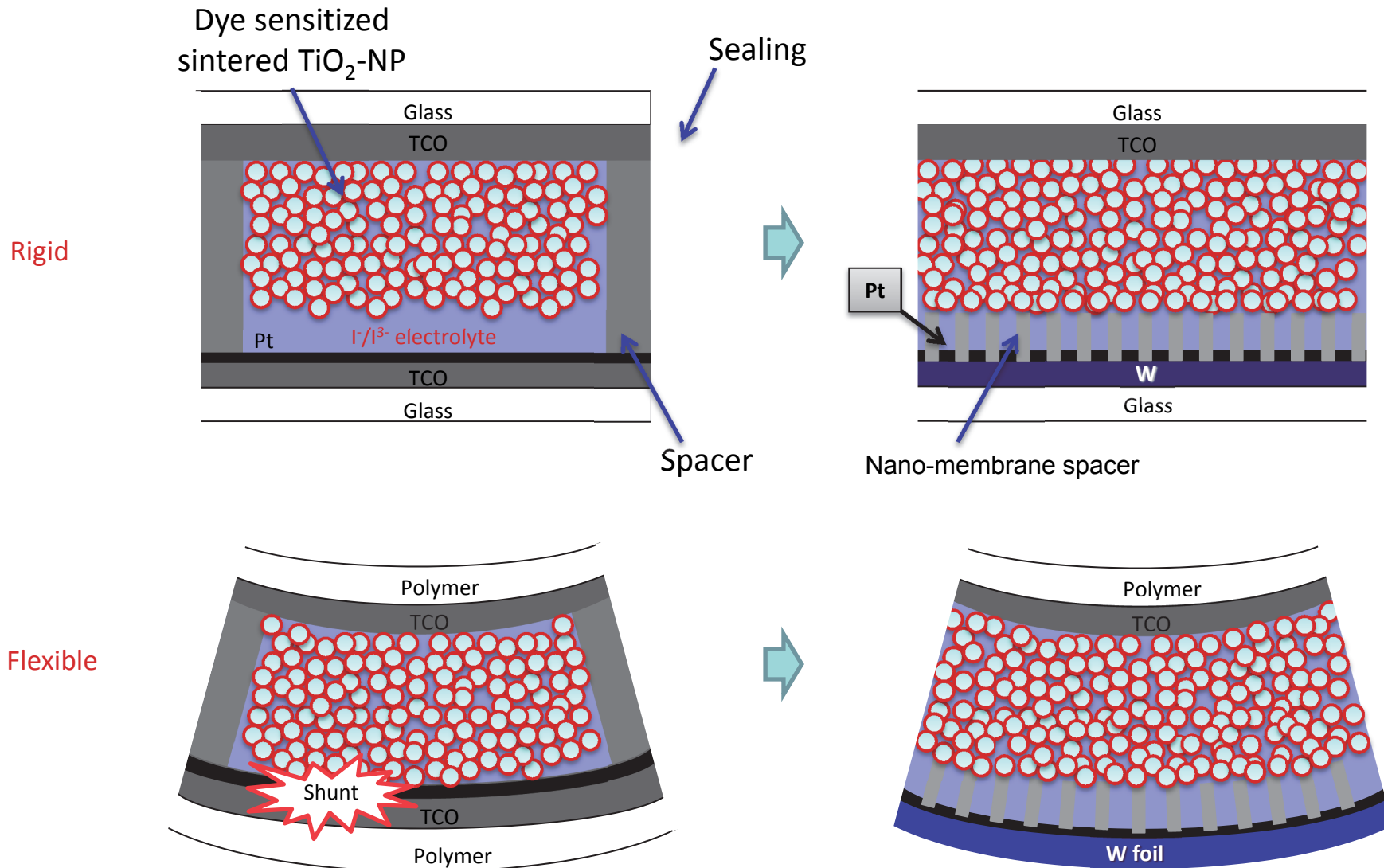
∅100 nm
P 300 nm



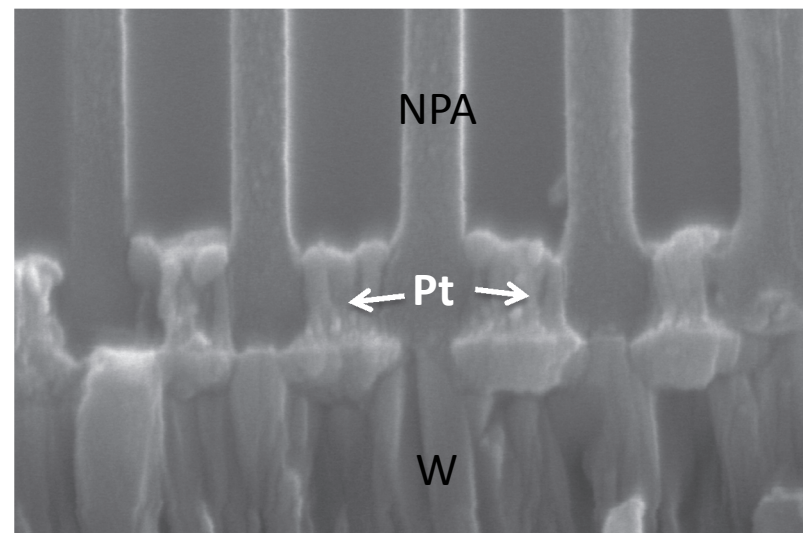
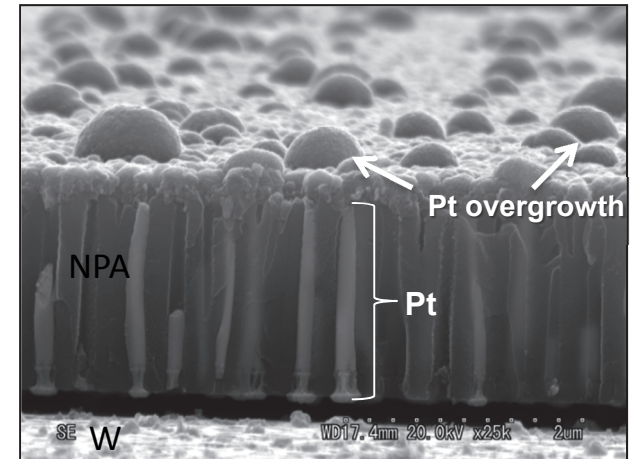
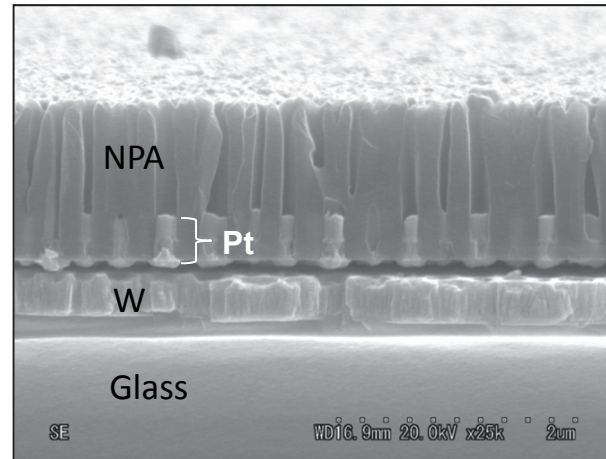
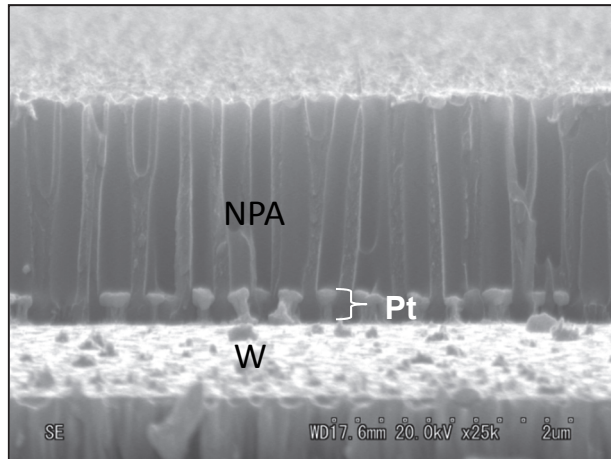
Electrochemical anodization



DSSC with nano-membrane spacer



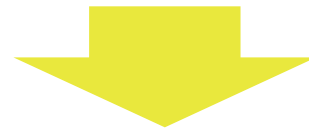
Electrochemical bath deposition of Pt into NPA



有機単結晶太陽電池

ターゲット

単結晶薄膜によって、大きな励起子拡散長



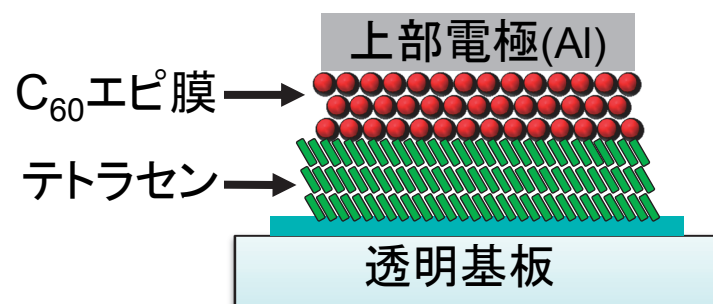
従来の有機薄膜太陽電池の常識を覆す高い変換効率

必要な技術

- 単結晶作製技術
- ヘテロ接合作製技術
- ドーピング技術 etc.

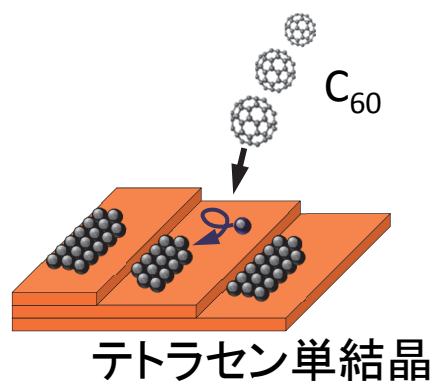
有機ヘテロエピタキシー

目的とする素子構造



有機単結晶p/n構造による太陽電池

テトラセン単結晶上でのC₆₀エピタキシャル成長



有機ヘテロエピタキシーの研究例

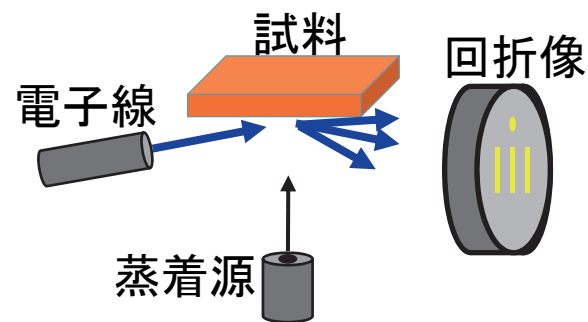
C₆₀/ペンタセン: K. Itaka他., Adv. Mat. 18, 1713 (2006).

ZnPc/チオフェン: B. Yu他, Adv. Mat. 22, 1017 (2010).

エピタキシーによる有機p/n界面の構築は未開拓

結晶成長過程のin-situ観察

反射高速電子線回折 (RHEED)

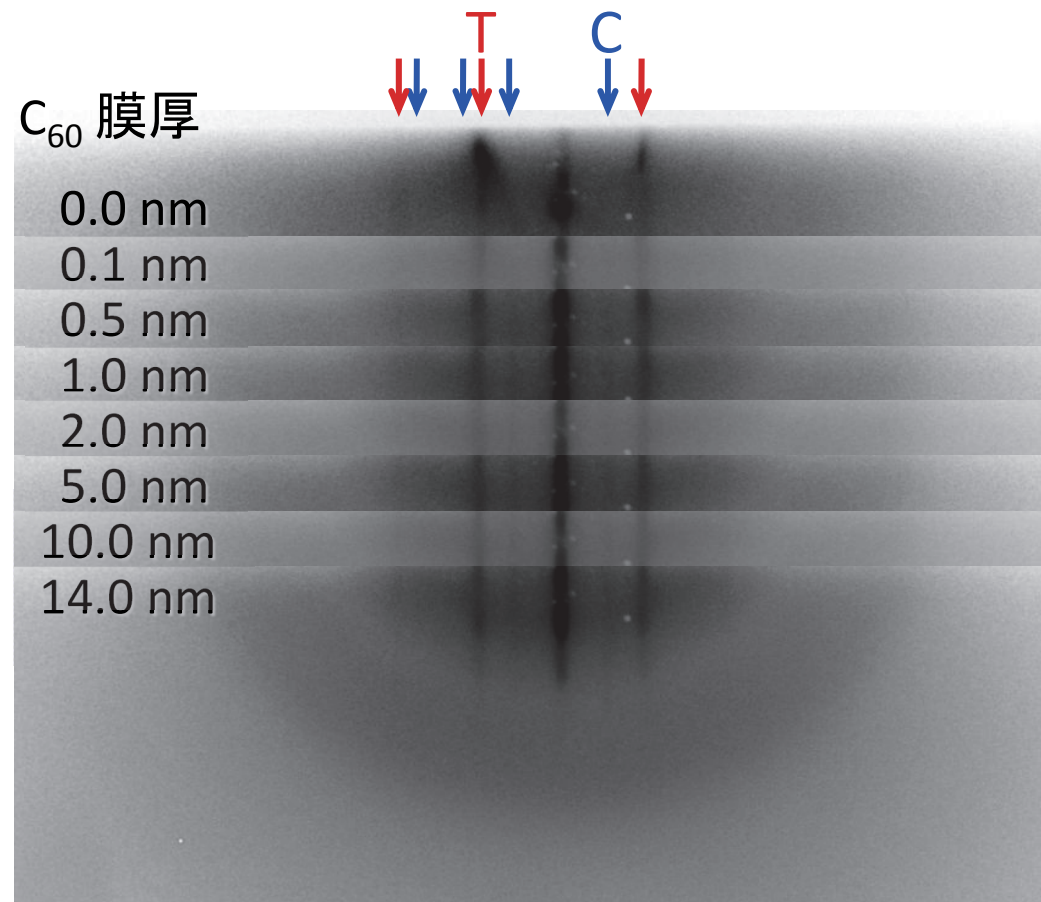


1 nm以下の極薄膜領域から
ストリークパターンを観測

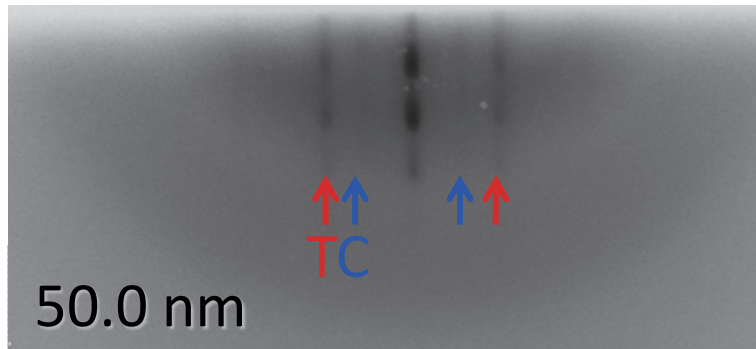


方位をそろえたエピタキシャル成長

テトラセン単結晶上のC₆₀成長

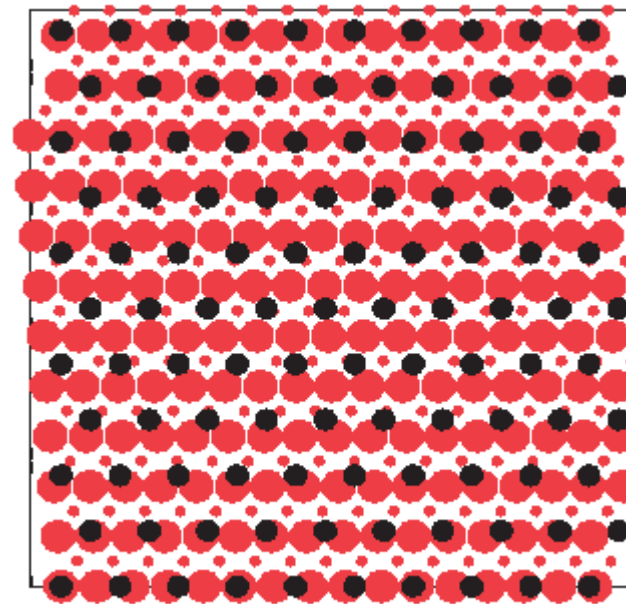
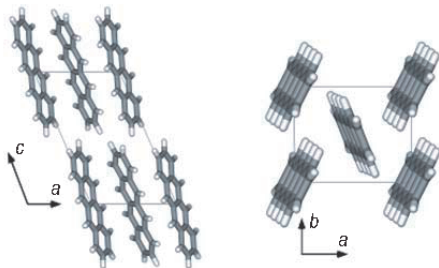


C₆₀結晶構造



ストリーク間隔の比 C : T ~ 3 : 5

Tetracene結晶構造



● Tetracene

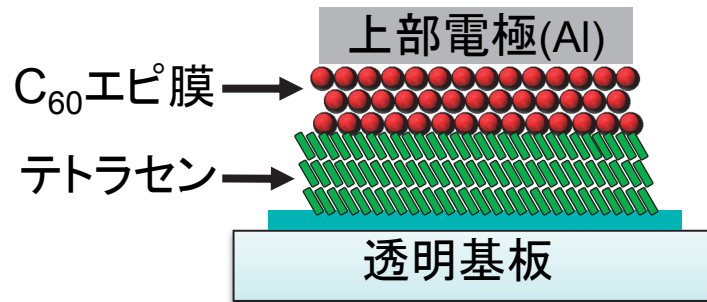
● C₆₀

$$\left(\frac{c_1}{a_1} \times \frac{c_2}{a_2} \right) = \left(\frac{5}{3} \times \frac{10}{9} \right) \text{ 構造}$$

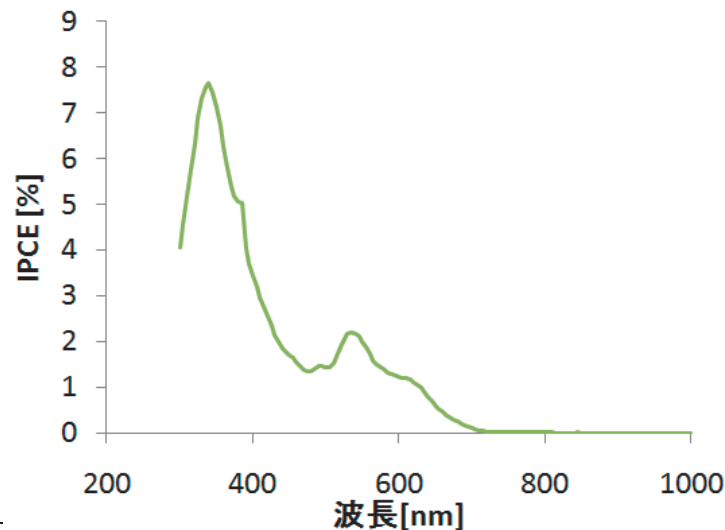
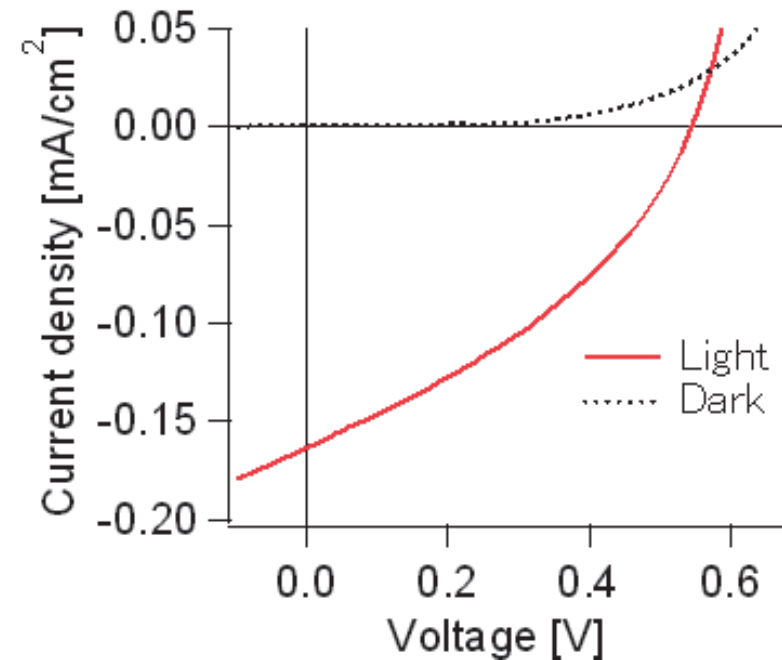
Tetracene : C₆₀ = 10 : 9
Mismatch 0.11 %

Tetracene[100] : C₆₀ [01-1] = 3 : 5
Mismatch 1.0 %

単結晶pnデバイスの太陽電池特性



Jsc	0.16 mA/cm ²
Voc	0.55 V
PCE	0.032 %
FF	0.36



太陽電池動作を確認
プロセスの改善が今後の課題

次世代化合物薄膜太陽電池の開発 — CZTS系太陽電池 —

本テーマでは、資源量の豊富な元素を用いることにより持続的に量産可能な次世代化合物薄膜太陽電池の実現に貢献する。

CZTS系とは？

$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ の総称。CIGS系で希少材料であるIn(Ⅲ属)をSn-Zn(Ⅱ-Ⅳ族)で置換した材料。

・結晶構造

ケステライト構造

・バンドギャップ

CZTSe ~ 1.0eV

CZTS ~ 1.4eV

・吸収係数

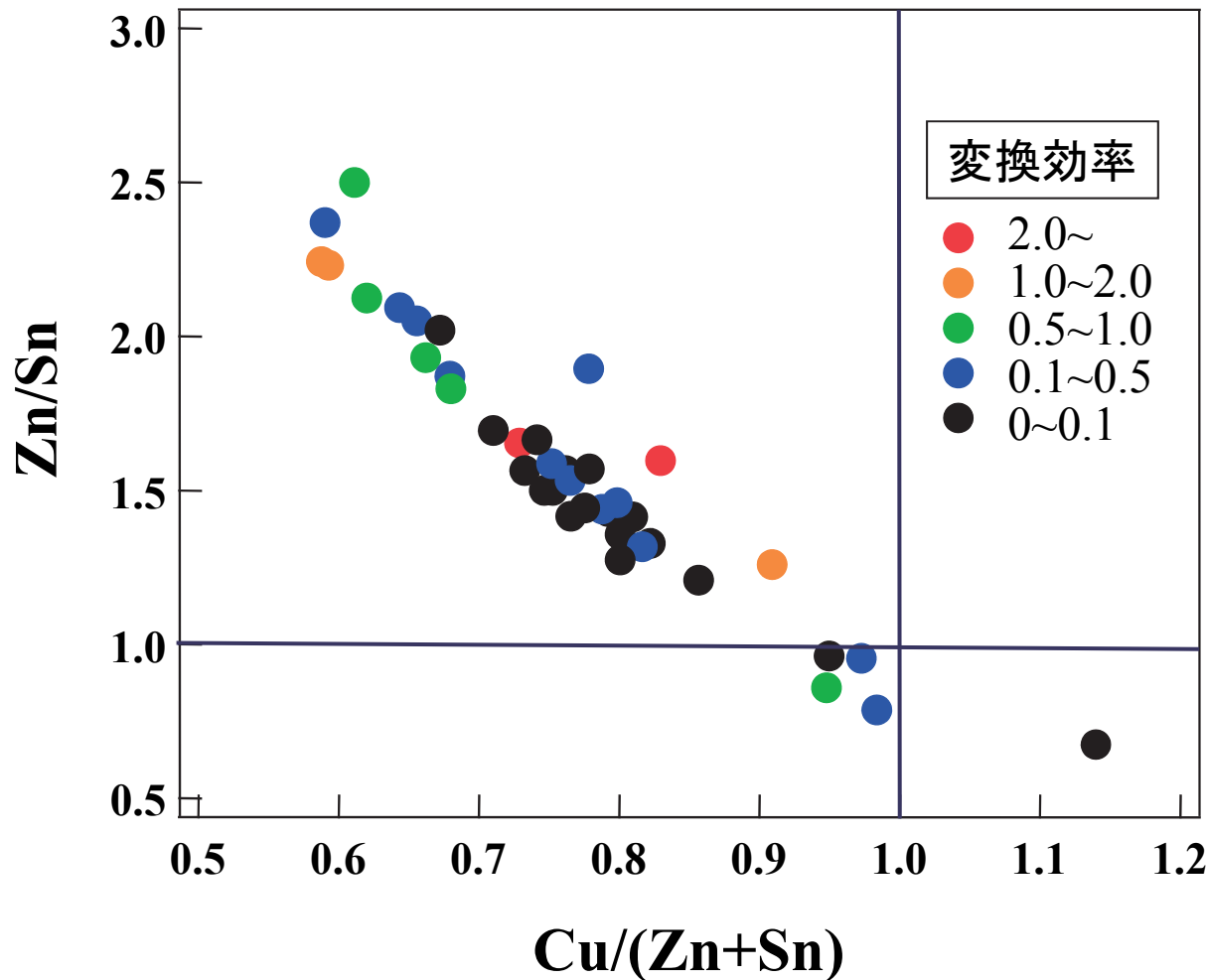
$\alpha > 10^4/\text{cm}$

当センターで研究実績のあるCIGS系太陽電池技術を、本研究に効果的に波及させることが可能。

1B	2B	3B	4B	5B	6B
	B	C	N	O	
	Al	Si	P	S	
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po

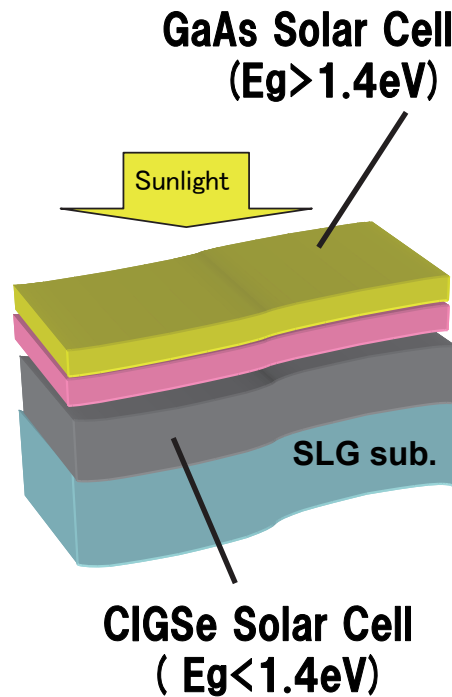
元素周期律表

CZTSeの組成と効率の関係



- ・ストイキオメトリーからずれた組成領域で高い効率
Cu/(Zn+Sn)~0.8
Zn/Sn~1.5
- ・高い効率領域に低効率サンプルが存在
- ・規則性のある組成比

スマートスタック技術 化合物系セル接合

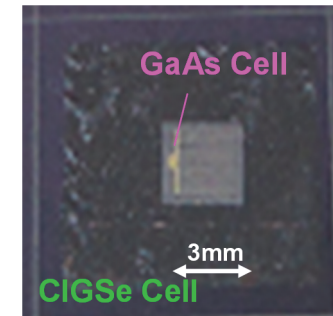


習熟した材料技術により
高効率化が容易。GaAs基板
のELOプロセス適用により、
GaAs基板材料の循環利用が
可能。

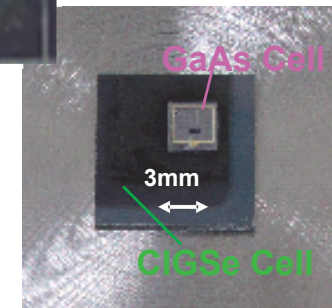
Bonding

量産化実績構造。広波長
感度およびガラス/フレキシ
ブル基板適用により、高効
率、低コスト/機能化に優位

GaAs/CIGSe系メカニカル多接合太陽電池



間接接着



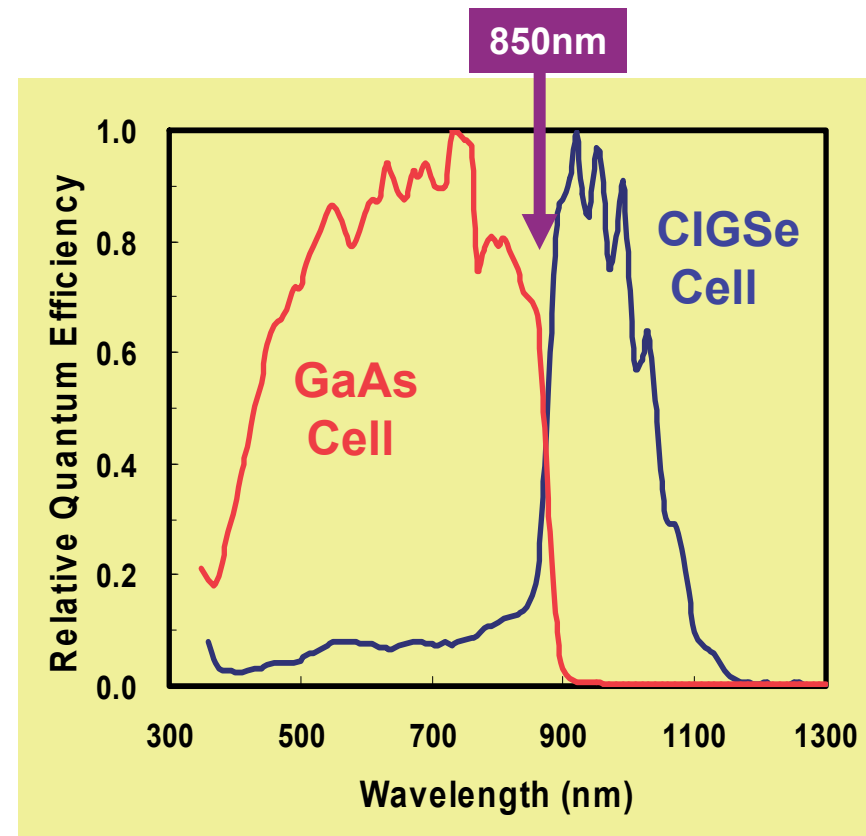
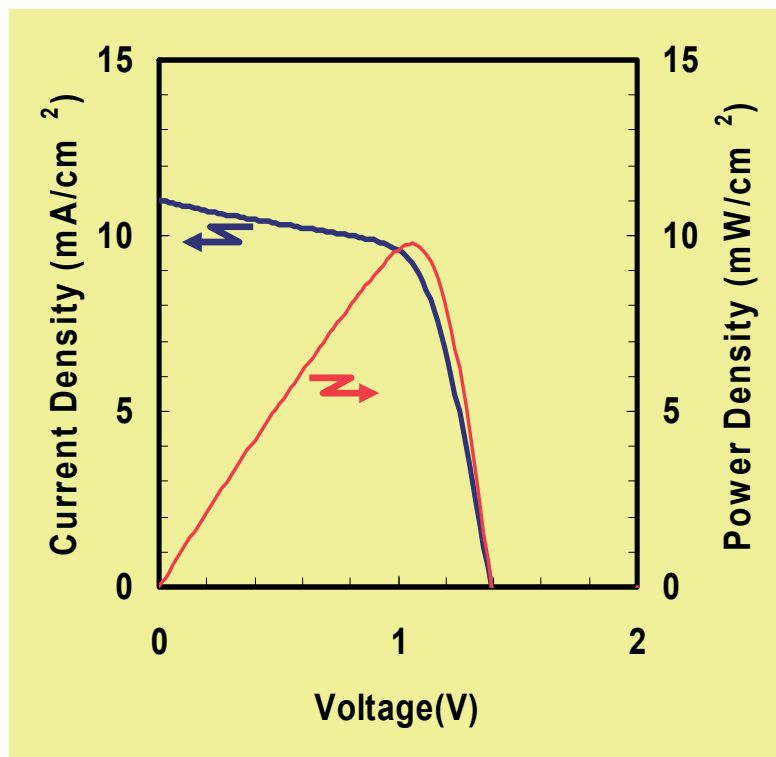
直接接着

化合物系太陽電池に求められる接合技術

接合品質	接合抵抗 <math>< 10\Omega\text{cm}^2</math> 光透過率 > 80%
プロセス	低温度 <math>< 200^\circ\text{C}</math>、低圧着方、 接合界面の清浄性 ELOプロセスに対応

GaAs/CIGSe多接合太陽電池の試作

- 発電効率 ~ 9.8%
($V_{oc}=1.4V$, $J_{sc}=11.0 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0.64$)
- 接合抵抗 ~ $10 \Omega\text{cm}^2$.
- 光損失 50~70%



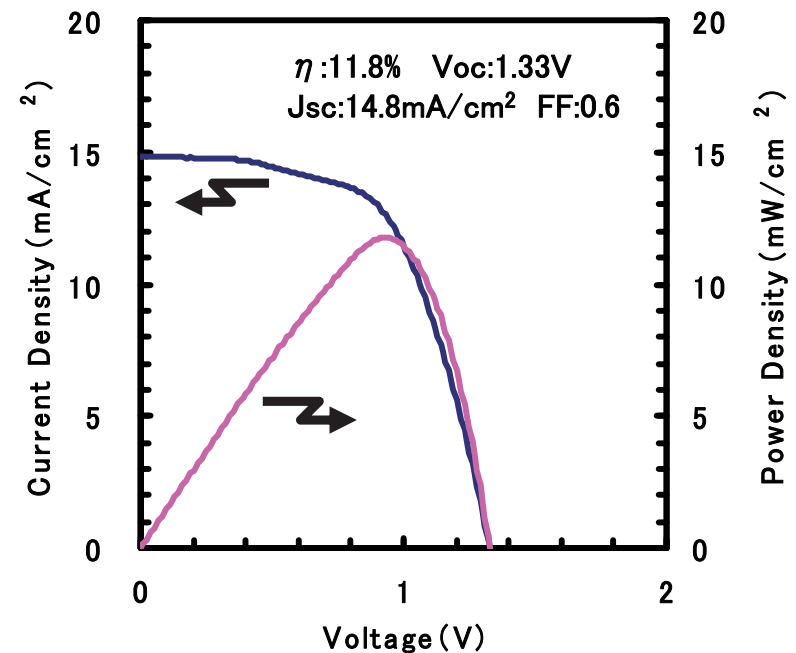
新接合法による素子実証：GaAs/InGaAsP 2 接合素子試作

- ・発電効率 **11.8%**、予測性能と同等
- ・接合抵抗 **~3.1Ωcm²**
- ・光損失 **< 5%**



新接合法のポテンシャル確認！

Efficiency	11.8 %
Voc	1.33 V
Jsc	14.8 mA/cm²
FF	0.60
Rbs (接合抵抗抽出)	*3.1Ωcm²



*100mA/cm²での各セルの微分抵抗分析より
 Total:4.9Ωcm² Topo:1.1Ωcm² Bott.:0.7Ωcm²

まとめ

- ・ 量子ドット太陽電池
 - InGaAs in InGaP 量子ドット形成に成功
 - Ge in Si 量子ドット形成に成功
- ・ シリコンナノ結晶材料
 - 3D表面処理の効果を確認
- ・ ナノ構造の利用
 - Nano-membrane spacerの提案
- ・ 単結晶有機薄膜太陽電池
 - ヘテロエピタキシャル成長による有機p/n界面を構築
- ・ 次世代化合物系太陽電池(CZTSe)
 - CZTSe組成と効率の関係を調査
- ・ スマートスタック技術
 - 高性能(低抵抗、高透過率)接合技術を開発
- ・ プラズモニック光閉じ込め技術
 - 新規作製技術を探索