

平成22年8月9日 第6回 太陽光発電研究センター成果報告会

化合物薄膜チームの概要 —CIGS太陽電池の研究開発—

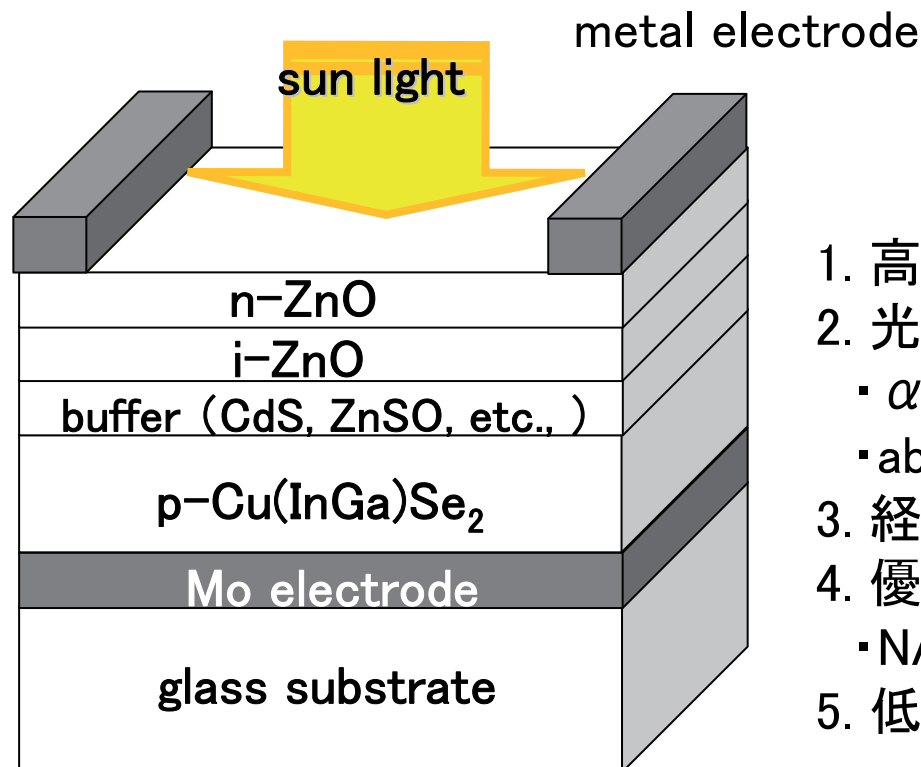
Research Activities of Thin Film Compound
Semiconductor Team
— R&D of CIGS Solar Cells and Modules —

発表者：仁木栄
Shigeru Niki

Content

1. 背景 (background)
2. 小面積セルの高効率化 (small-area cells)
3. 大面積化技術の開発 (integrated sub-modules)
4. フレキシブル太陽電池 (on flexible substrates)
5. 省資源化・低コスト化技術 (low-cost)
6. 超高効率太陽電池技術 (innovative solar cells)
7. まとめと今後の方向性 (summary)

CIGS太陽電池の構造と特徴 (structure and advantage)



CIGS solar cells

1. 高効率: high efficiency ($\eta = 20.1\%$)
2. 光吸収係数大: Large absorption coefficients
 - $\alpha \sim 10^5 \text{cm}^{-1}$: 100 times larger than Si
 - absorber $\sim 2 \mu\text{m}$
3. 経年劣化がない: no degradation
4. 優れた耐放射線性: radiation resistive
 - NASDA人工衛星(つばさ:MDS-1)で実証済
5. 低コスト基板使用可能: low-cost substrate

量産化への移行

2007商業生産開始

昭和シェル石油 (20MW)

→ 80MW(2009) → 980MW (2011)

ホンダソルテック (27.5MW)

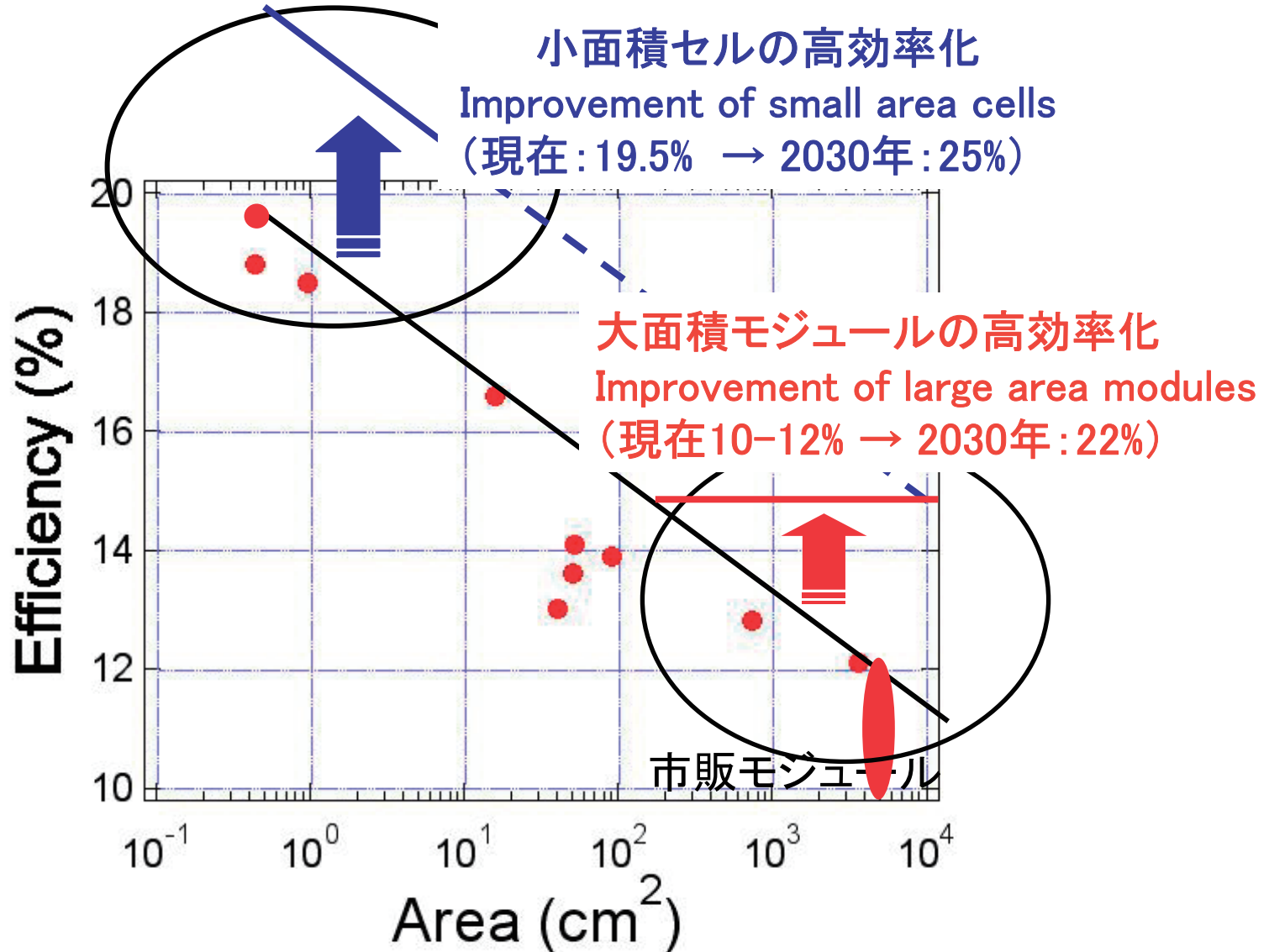
Wuerth Solar (Germany: 15MW → 30MW(2009))

2008開始

Solibro (Germany:30MW) → 135MW(2009)

ベンチャーも含めたCIGS太陽電池量産化を計画する会社
計20社以上

CIGSモジュールの効率と面積 (efficiency vs area)



研究の目標 (Objective)

2030年セル効率25%、モジュール効率22%というCIGS太陽電池の効率目標の実現に向けた技術開発を行う。

「高性能なCIGSモジュールを世に出す。」

- 1. 小面積セルの高効率化:** 高効率化のための技術的な指針を明確化する。さらに、CIGS光吸収層の高品質化、新バッファ層の探索、透明導電膜の高性能化を図ることで20%を超える革新的な高効率化技術の開発を目指す。
- 2. モジュールの高効率化:** 変換効率15%以上のモジュールを実現するための技術開発を行う。また、InやMo等の希少金属や高価な材料の使用量を低減する技術を開発する。
- 3. フレキシブル太陽電池の高性能化:** Naの導入法や集積化技術を開発することでガラス基板上の太陽電池と同等の性能のフレキシブル太陽電池を開発する。
- 4. 新分野の開拓:** 太陽電池研究から派生する新しいデバイスや応用分野の開拓を行う。

2. 小面積セルの高効率化 (small-area cells)

主担当: 石塚 (鹿児島大学、筑波大学との共同研究)

現在最高効率: 20.1%
current record efficiency

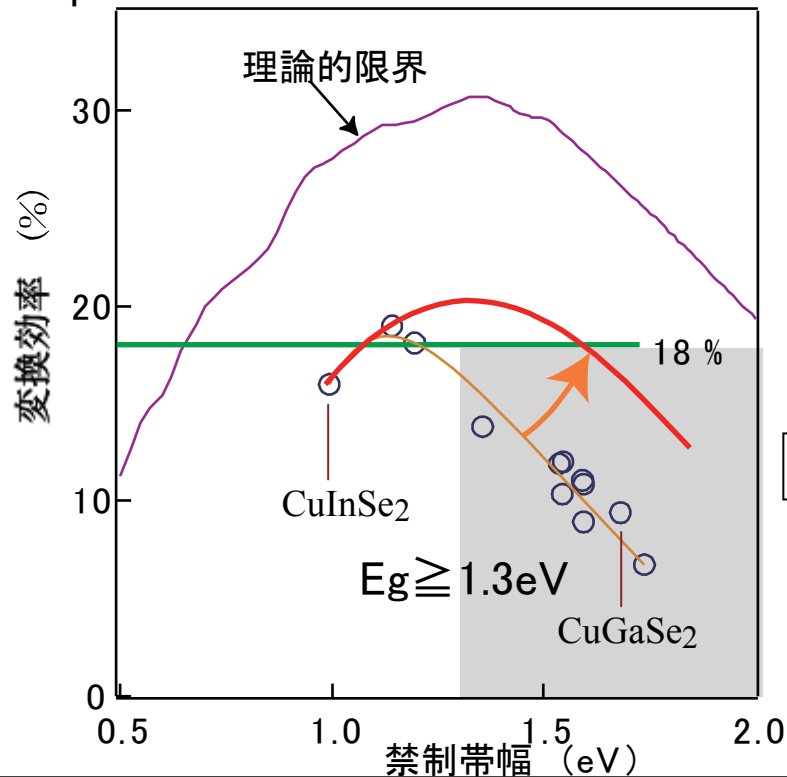


2020年目標効率: 25%
target efficiency at 2020

技術の壁
technical barrier

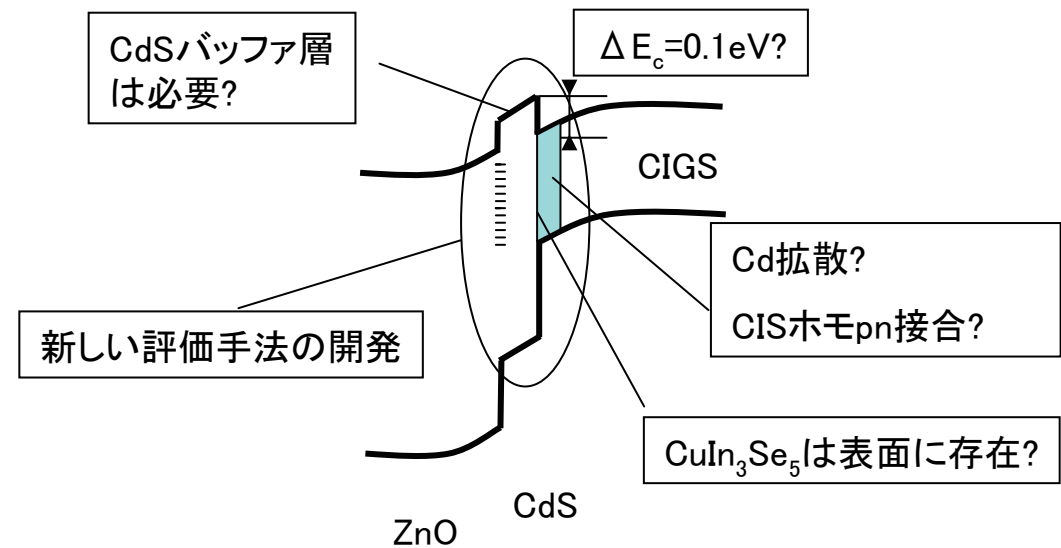
WG-CIGSの高効率化

improvement of WG-CIGS solar cells



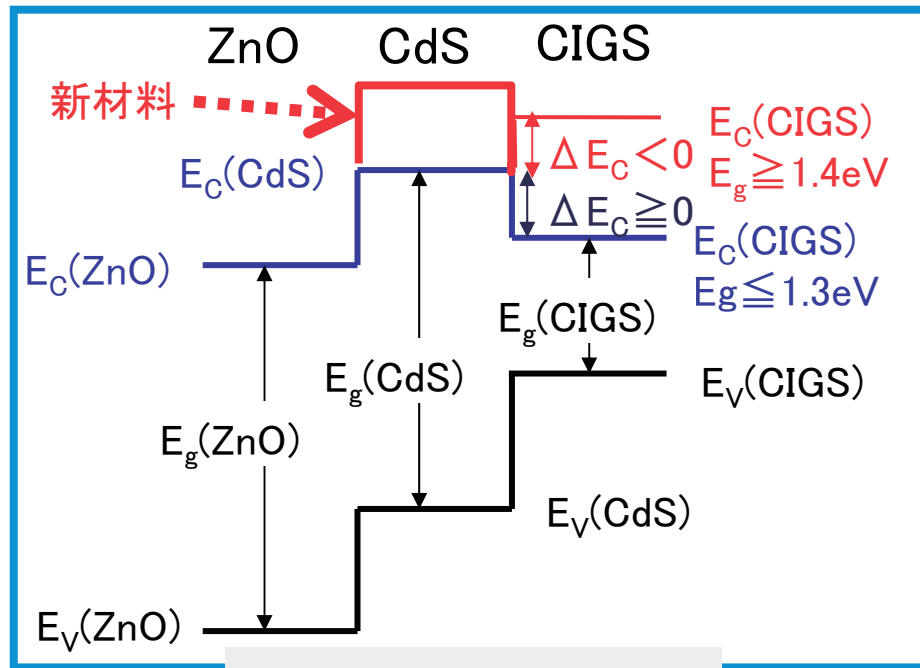
界面・表面・粒界の評価と制御技術の開発

interface and surface control

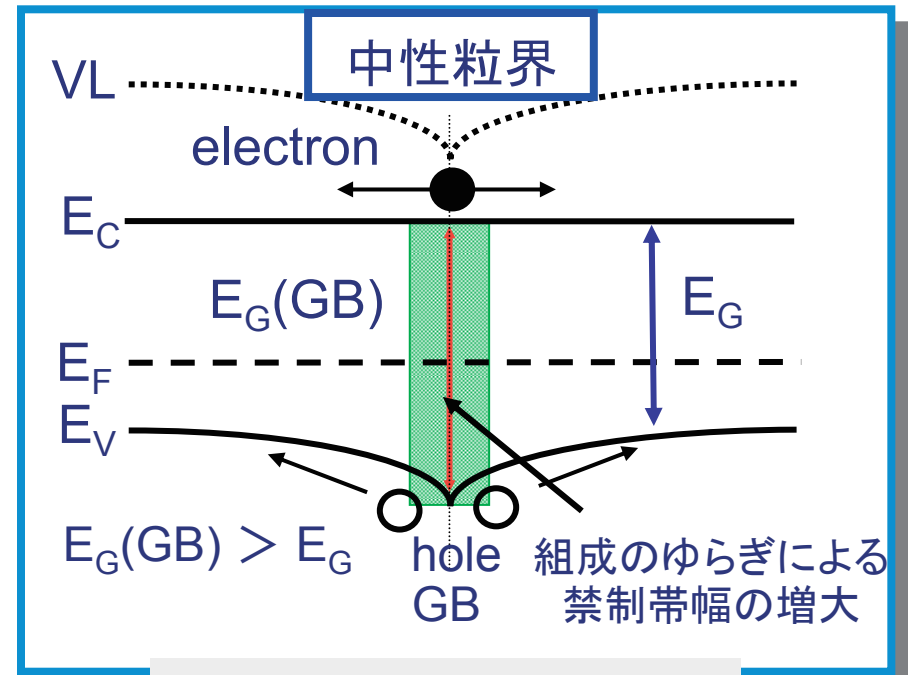


界面・表面・粒界評価技術の開発

鹿児島大学との共同研究



正・逆光電子分光法



ケルビンプローブ顕微鏡

伝導帯のオフセット

- 低Ga組成 ($E_g \leq 1.3\text{eV}$)ではspike型 ($\Delta E_c \geq 0$)
- × 高Ga組成 ($E_g \geq 1.4\text{eV}$)ではcliff型 ($\Delta E_c < 0$)

CdSはWG-CIGS太陽電池には不適合
新しいバッファ層材料が必要

粒界の電気的特性

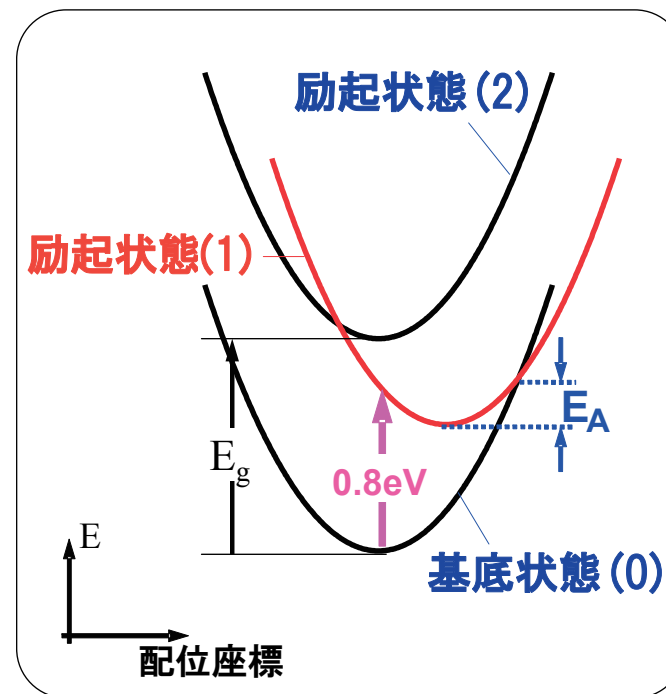
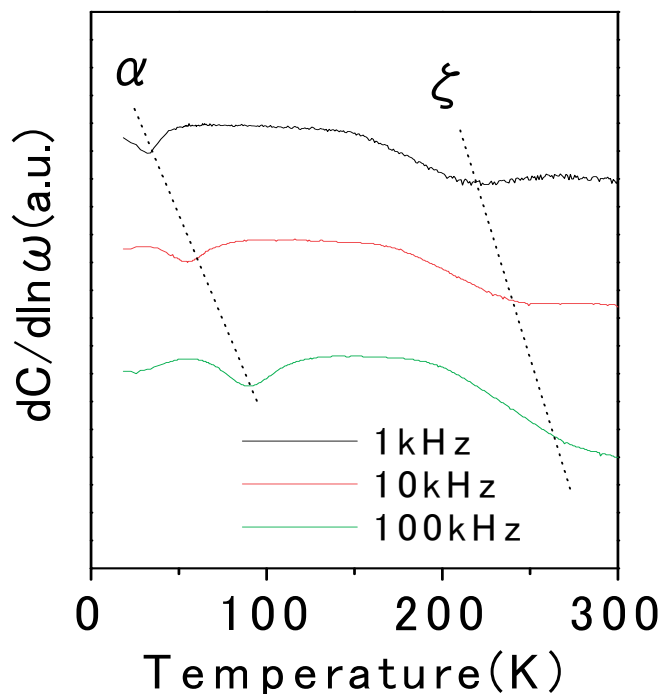
- ・ CIGSの粒界は電気的に不活性
(素子に悪影響を与えない)

WG-CIGS太陽電池の粒界の特性
精密な評価が必要

新バッファ層を用いたWG-CIGS太陽電池の高効率化

電気的評価技術の開発

筑波大学との共同研究



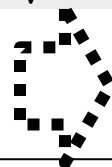
アドミタンス法によりCIGS薄膜に起因する2つの準位を検出

- Peak α → アクセプタ準位 $E_A=10\text{meV}$
- Peak ζ → 欠陥準位 $E_A=250\text{meV}$

光容量法により0.8eVの欠陥レベル検出
 ・欠陥準位の配位座標モデル提案(世界初)

$E_V+250\text{meV}$ 欠陥はSe空孔複合体、 $E_V+800\text{meV}$ 欠陥は非発光センターの可能性

欠陥制御技術の開発



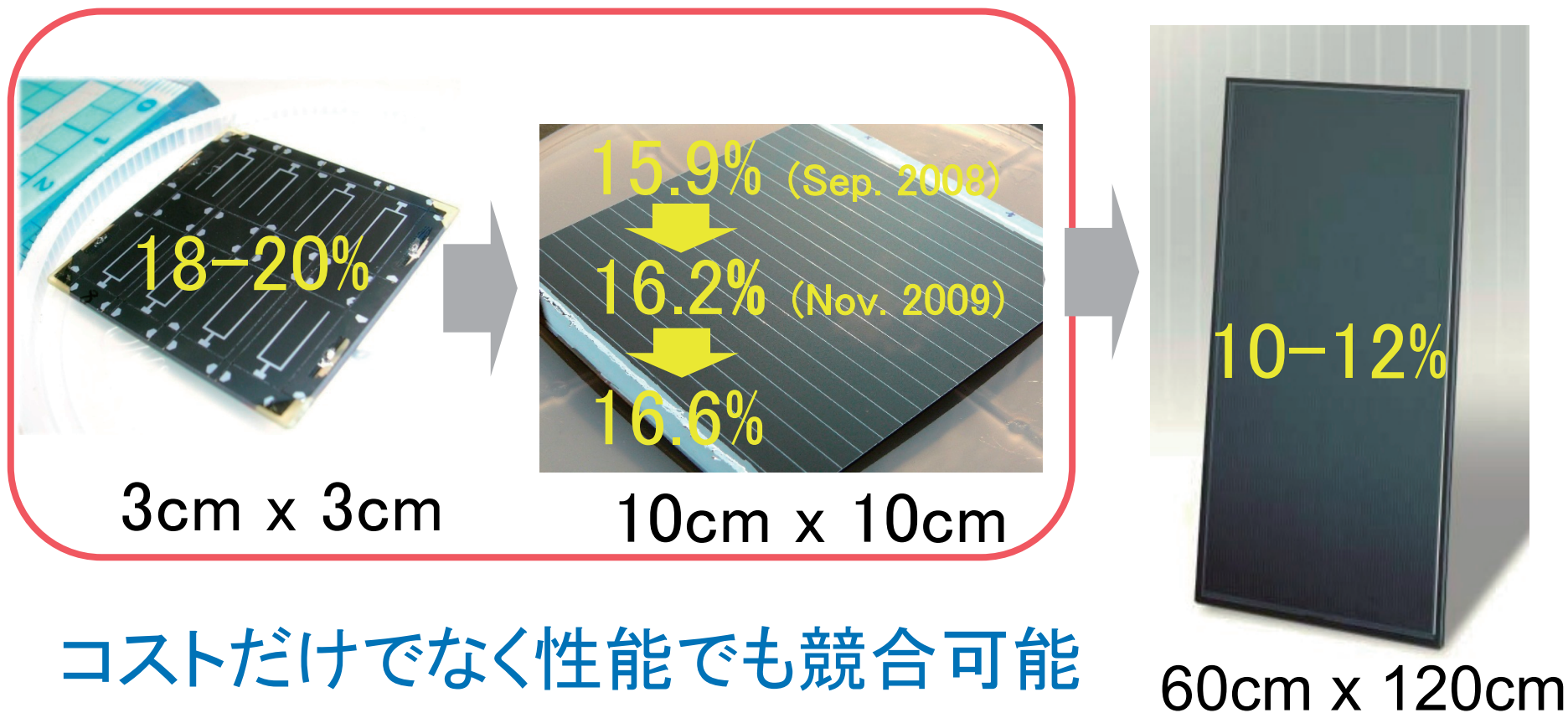
さらなる高効率化へ

3. 大面積化技術の開発

インライン蒸着法と集積化技術の開発
in-line evaporation and integration

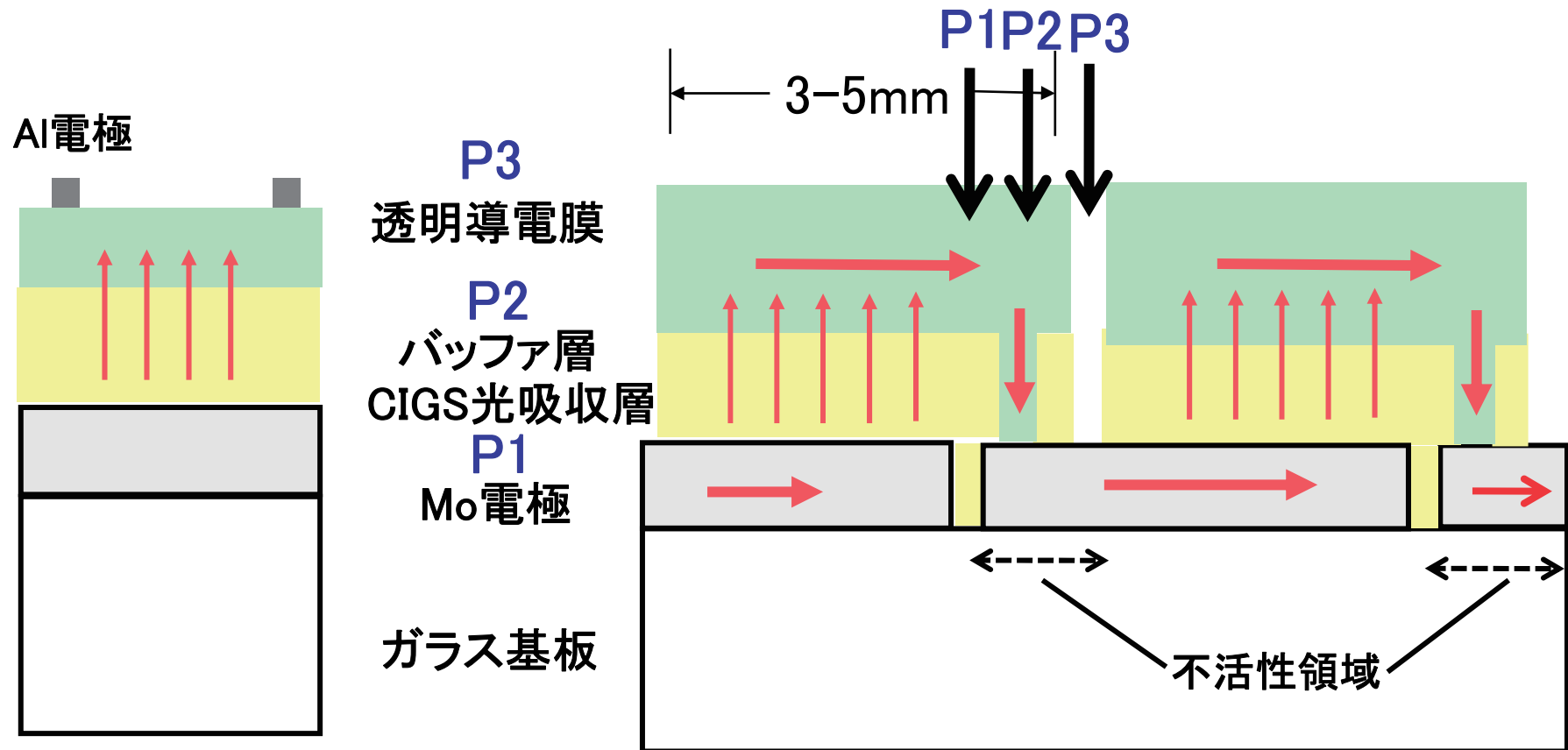
主担当: 小牧

小面積セル 集積型サブモジュール 商品化されたモジュール



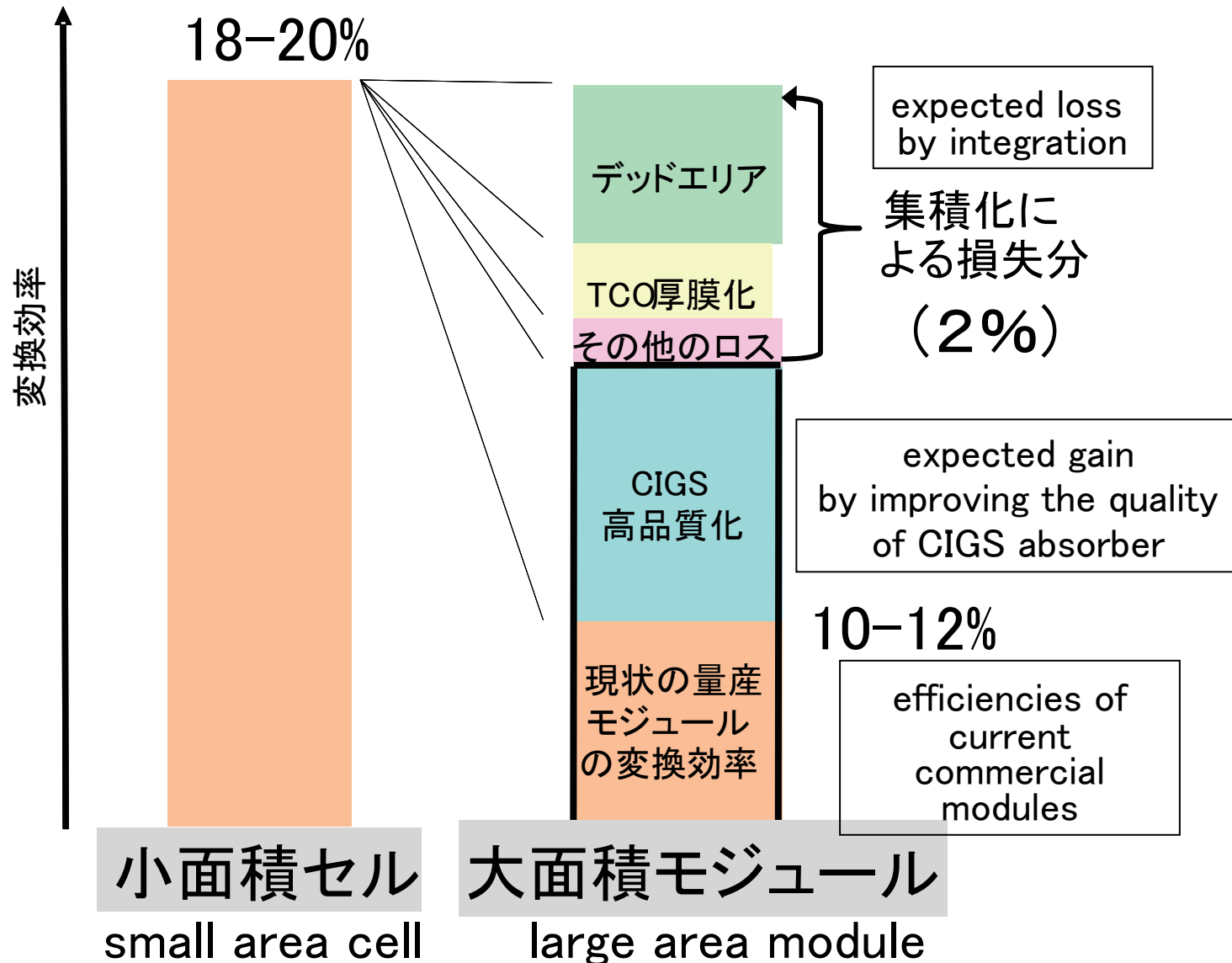
コストだけでなく性能でも競合可能

小面積セルと集積型モジュール



P1:レーザスクライブ、P2、P3:メカニカルスクライブ

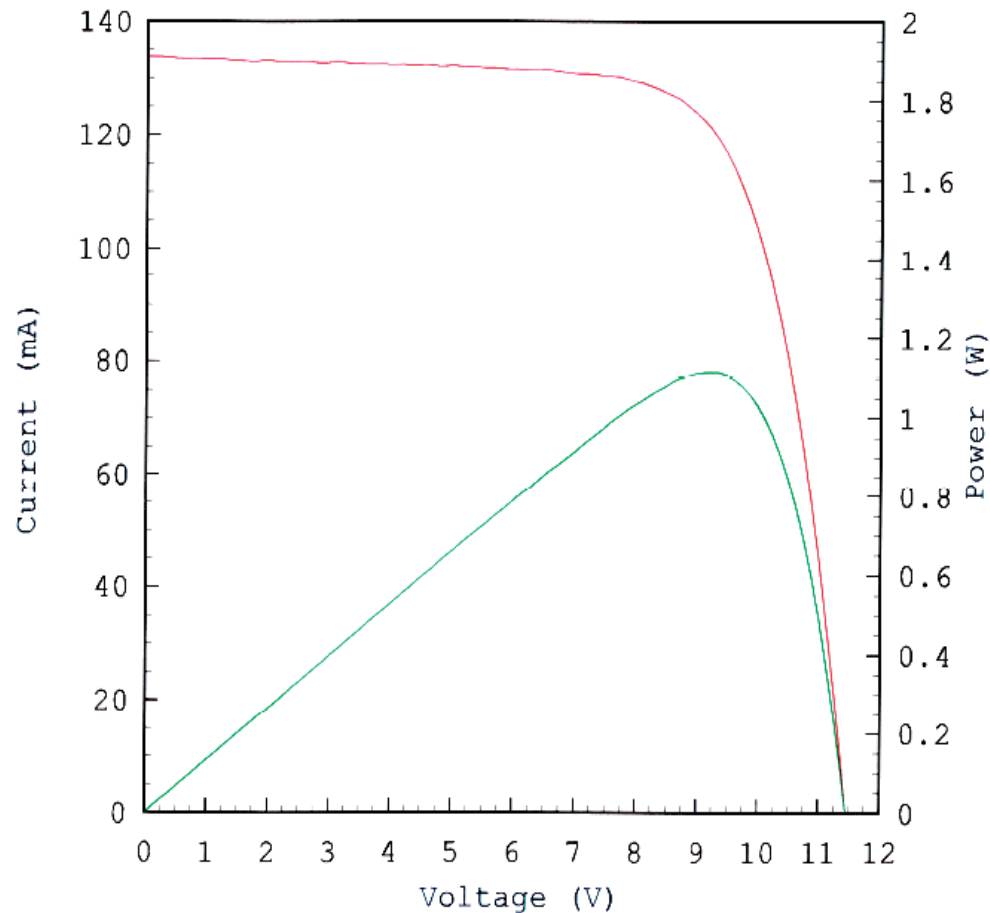
集積化による損失 (loss by integration)



$\eta = 16.6\%$ at aperture area of 67.2cm^2

I-V CURVE

IEC60904-3Ed.2 67.2cm² (aperture area) WXS-220S-20



Date : 13 Jan 2010

Data No :

SQ1390-01

Sample No :

SQ1390

Repeat Times : 3

I_{sc} 133.8 mA

V_{oc} 11.45 V

P_{max} 1.117 W

I_{pmax} 121.1 mA

V_{pmax} 9.22 V

F.F. 72.9 %

Eff(ap) 16.6 %

DTemp. 25.0 °C

MTemp. 25.0 °C

DIrr. 100.0 mW/cm²

MIrr. 99.8 mW/cm²

Ref. Device No

CSI02

Cal. Val. of Ref.

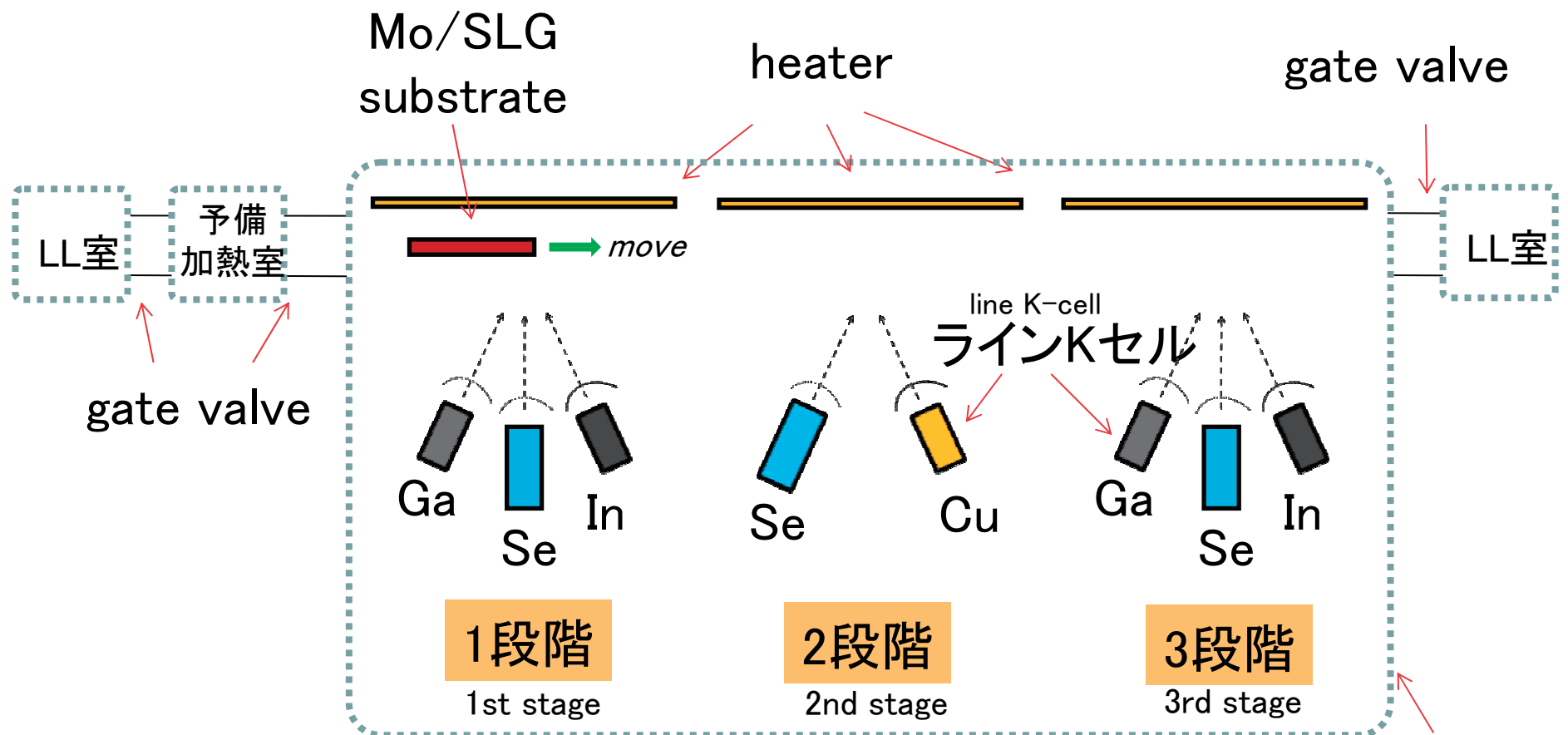
129.46 [mA at 100mW/cm²]

Scan Mode

I_{sc} to V_{oc}

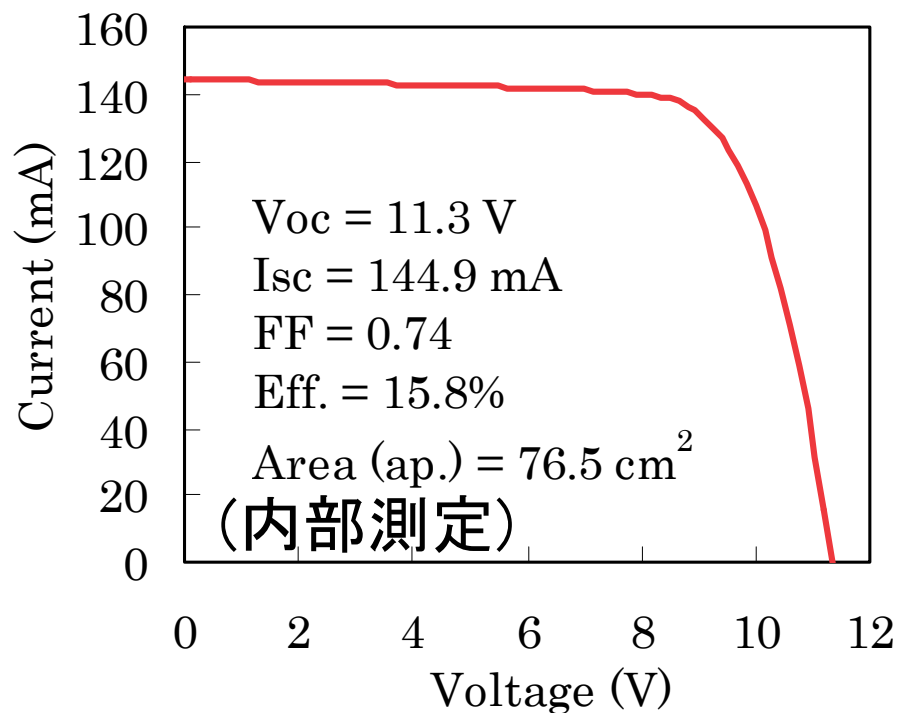
多元蒸着法のインラインプロセス化

development of *in-line* evaporation process



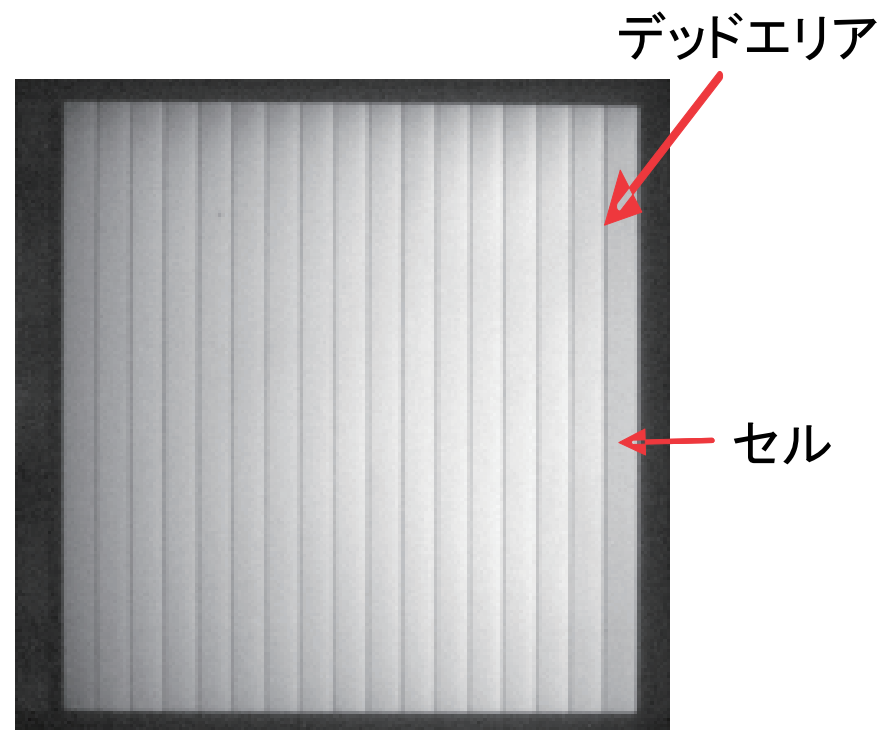
インラインによるCIGS製膜の流れ 製膜室(真空)

インライン製膜によるCIGSサブモジュールの性能



変換効率: 15.8 %

アパーチャエリア: 76.5 cm²



ELイメージ: 均一で明るい

高品質なサブモジュールを実現

インライン蒸着法は量産化技術として有望
量産化に資する製膜装置の開発が鍵

4. フレキシブルCIGS太陽電池の高効率化

– development of high-efficiency flexible CIGS solar cells –

主担当：石塚

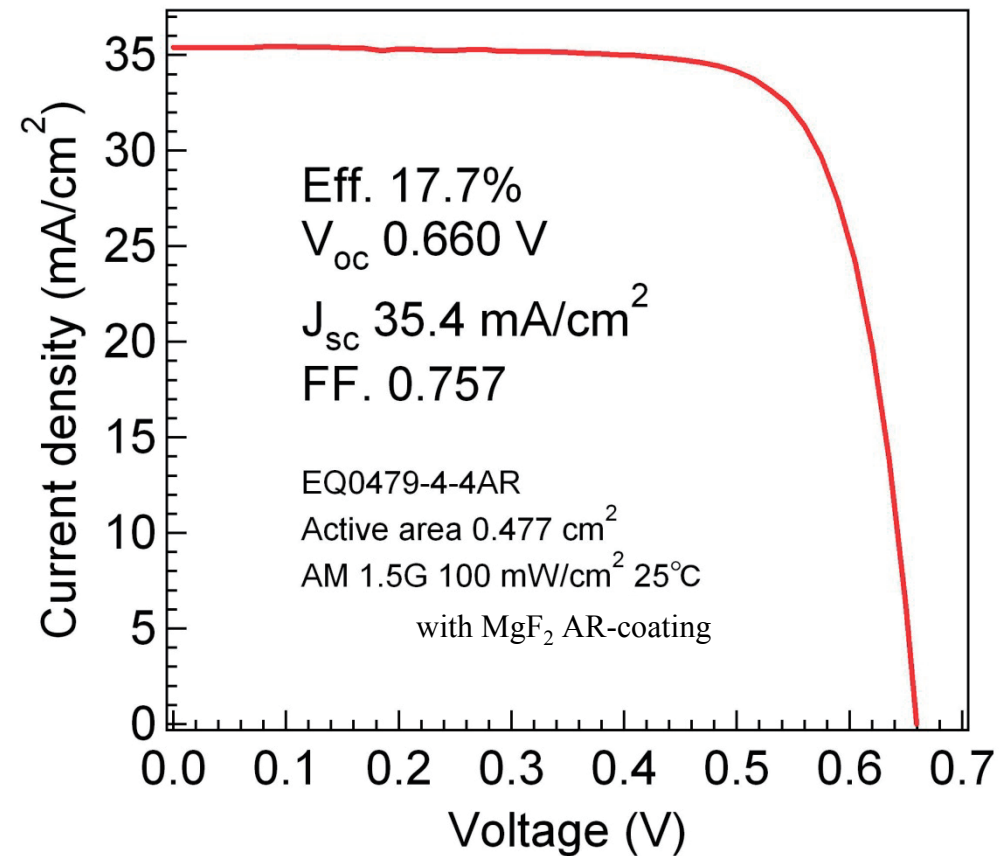
- ・CIGS光吸収層への新しいNa添加制御技術（ASTL法）の開発により、フレキシブル基板上の太陽電池の飛躍的な高効率化に成功。
- ・フレキシブルCIGS太陽電池で最高効率**17.7%**を達成。
- ・フレキシブルサブモジュールで**15.9%**を達成

フレキシブルCIGS太陽電池の技術課題

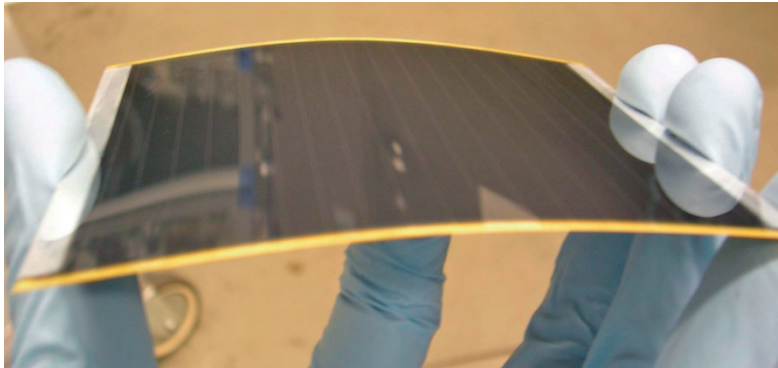
- ①基板材料の選択
- ②CIGS光吸収層へのアルカリ添加
- ③集積化
- ④基板のハンドリング

Photovoltaic performance (ceramics)

$\eta = 17.7\%$ flexible
CIGS solar cell on a
zirconia sheet
(Thickness: $50\ \mu\text{m}$,
RMS: $6\ \text{nm}$)



フレキシブルCIGSサブモジュールの高効率化

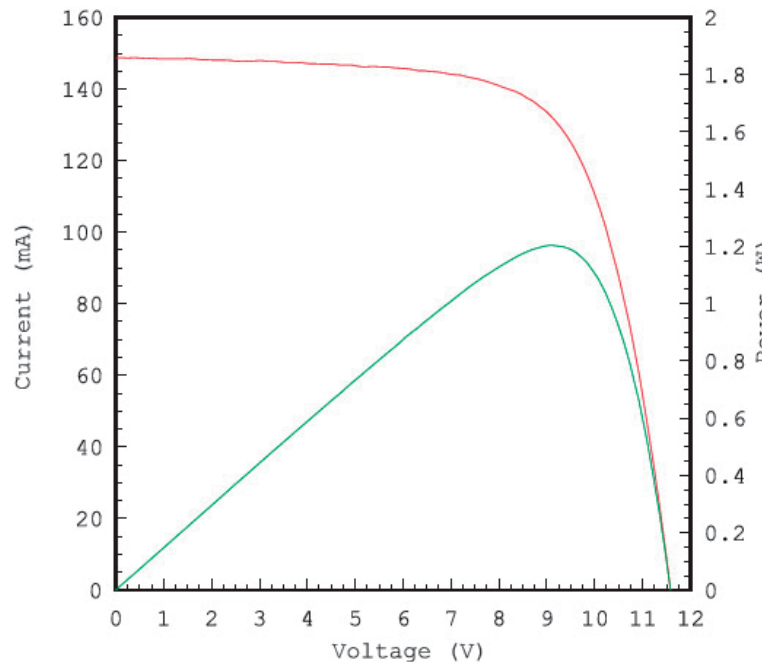


- ・集積化技術
- ・フレキシブル太陽電池高効率化技術

サブモジュール性能

$\eta = 15.9\%$ (アパーチャエリア 75.7cm²)

==== I-V CURVE ====
IEC60904-3Ed.2 75.7cm²(aperture area) WXS-220S-20



Date : 14 Jan 2010
Data No :
EQ0571-01
Sample No :
EQ0571
Repeat Times : 3

Isc 148.8 mA
Voc 11.59 V
Pmax 1.206 W
Ipmax 132.5 mA
Vpmax 9.10 V
F.F. 69.9 %
Eff(ap) 15.9 %
DTemp. 25.0 °C
MTemp. 25.0 °C
DIrr. 100.0 mW/cm²
MIrr. 100.7 mW/cm²

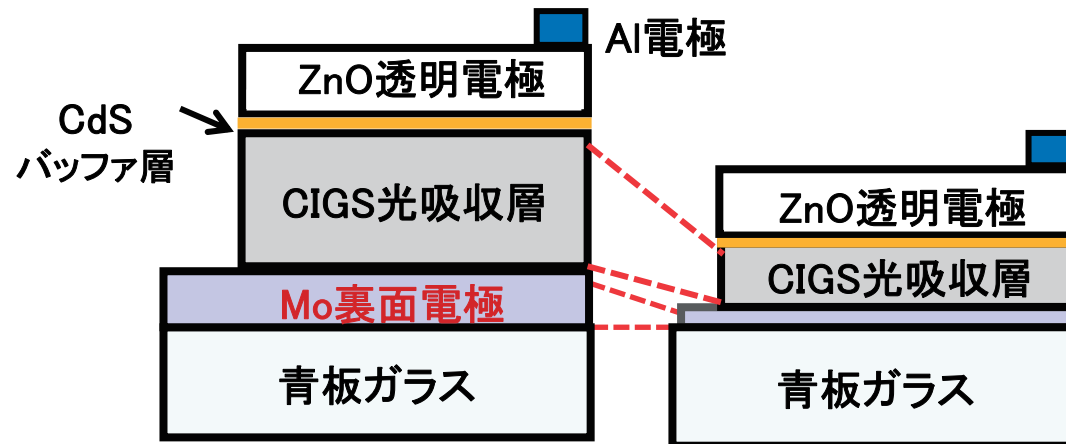
Ref. Device No
CSI02
Cal. Val. of Ref.
129.46[mA at100mW/cm²]
Scan Mode
Isc to Voc

5. 省資源化技術

希少金属、高価な金属材料の使用量低減

主担当: 古江

➡ 低コスト、少ない資源でより多くのエネルギーを生成



実用化に向けた成果の位置付け

- ・1GW生産時: 製造コストに占める材料費の割合 約40%
- ・Mo(1/3)とIn(1/4)の使用量の低減 (CIGSの薄膜化: Ga, Cu, Seも同時に削減)
→ 全体で10%程度のコスト削減(ガラス: 50%、Mo, Cu, In, Ga, Se: 30%を仮定)

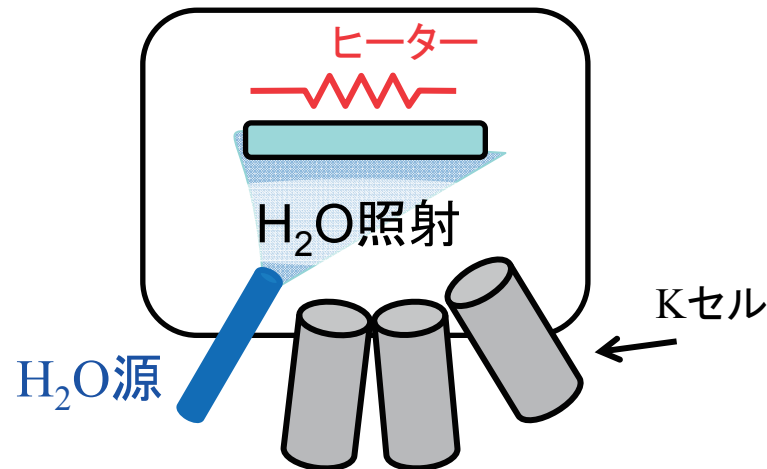
波及効果(材料コストの低減にとどまらない)

- ・装置コストの大幅な削減(高価な真空装置の数を削減: 例えばCIGSの使用量低減できれば製膜装置を4台から1台に)
- ・高スループット化(製膜に要するエネルギーも削減、人件費の削減効果)

Mo使用量低減技術

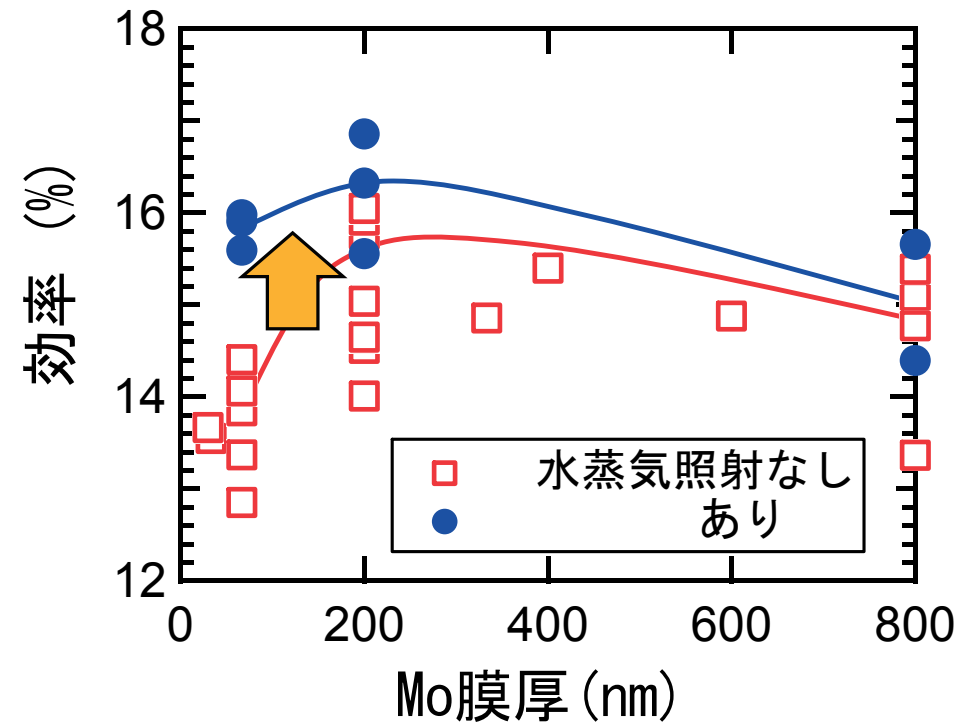
水蒸気照射効果 (Na拡散と欠陥の制御) を用いた性能向上

- Moの膜厚が200nm (標準膜厚800nmの1/4) でも変換効率16.9%、
70nm (標準膜厚の1/10以下) でも変換効率16.0%を実現。



水蒸気照射効果

- ・産総研が開発したオリジナル技術
- ・ V_{OC} 、FFが向上
- ・Na、酸素濃度の増大
- ・欠陥濃度の低減と伝導率の向上

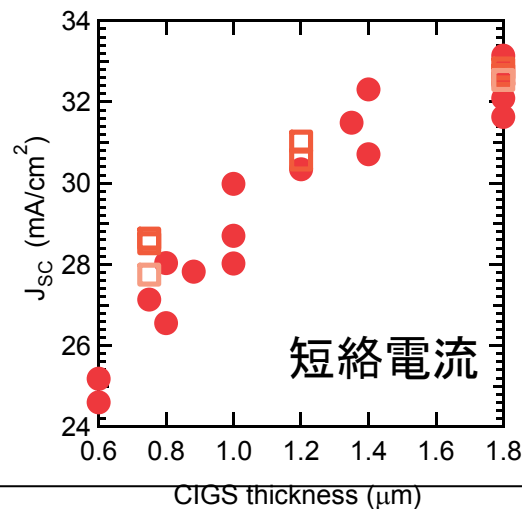
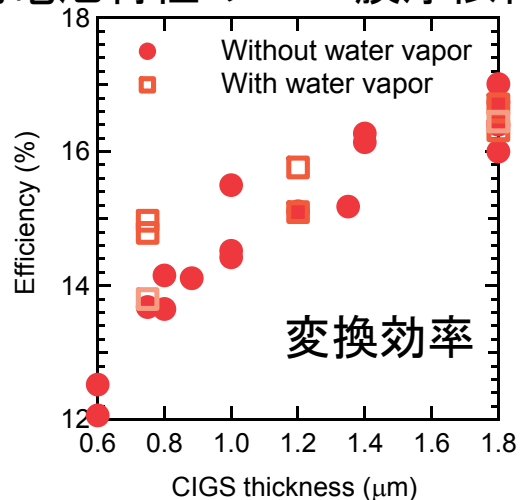


In使用量低減技術 (I)

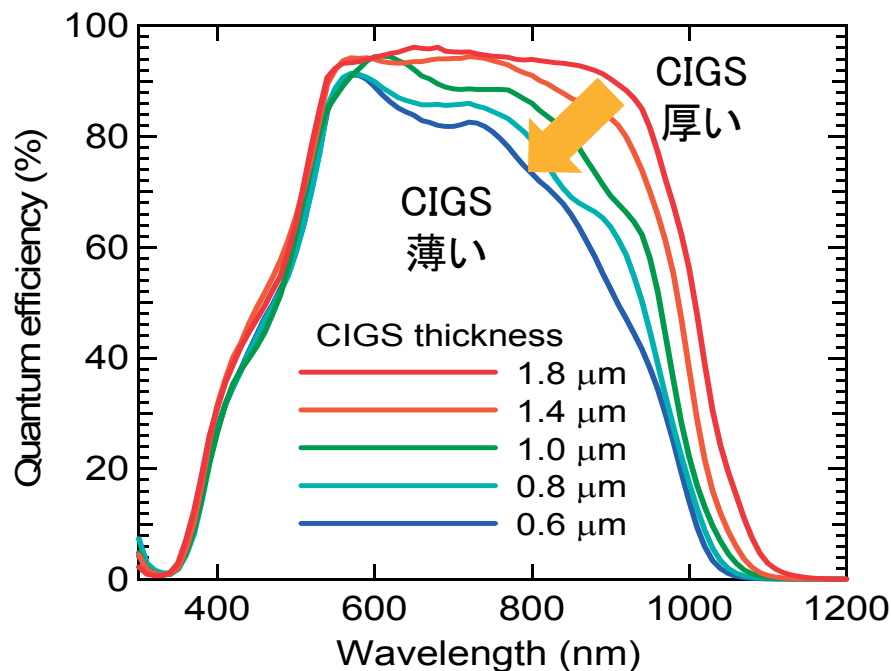
CIGS光吸収層の薄膜化、高Ga/III比

(CIGS光吸収層の膜厚をどこまで薄くできるか?)

太陽電池特性のCIGS膜厚依存性



量子効率のCIGS膜厚依存性

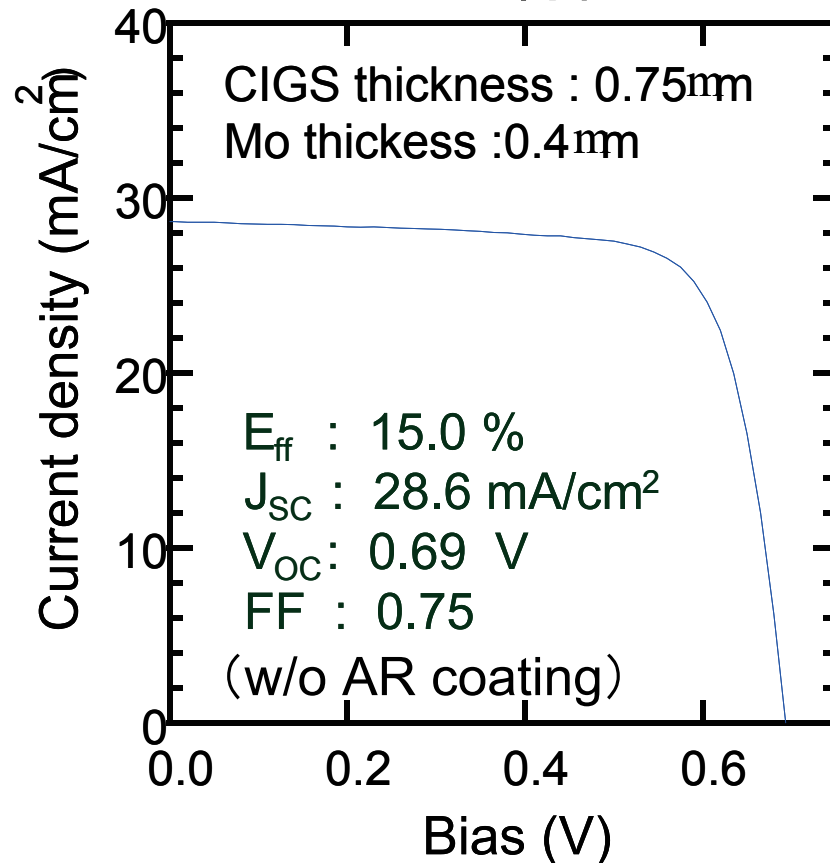


- ・CIGS光吸収層の薄膜化により短絡電流、効率が低下
- ・薄膜化による量子効率の低下が原因
 - 太陽光を十分に吸収できない
- ・CIGS光吸収層の薄型化には**新しい太陽電池構造が必要**

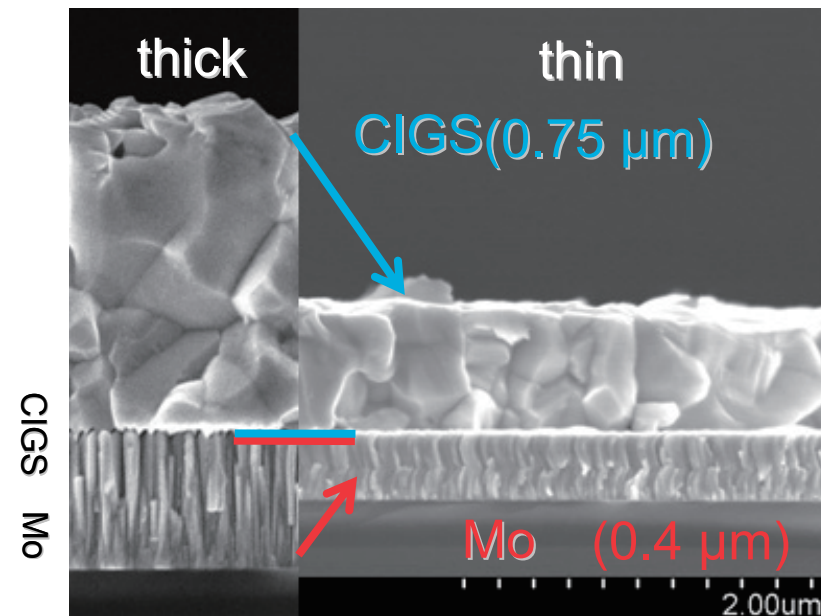
In使用量低減技術(II)

Mo:400nm, 膜厚: 0.75 μ m

I-V 特性



- ・ 粒径や構造に大きな変化無し



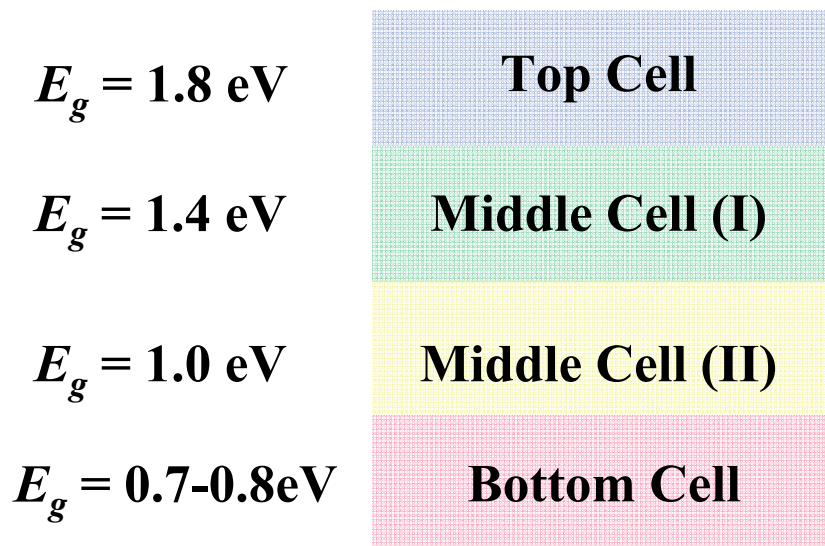
変換効率15.0% (反射防止膜無).を實現
さらなる薄膜化には新構造が必要

6. 超高効率太陽電池技術 (innovative solar cells)

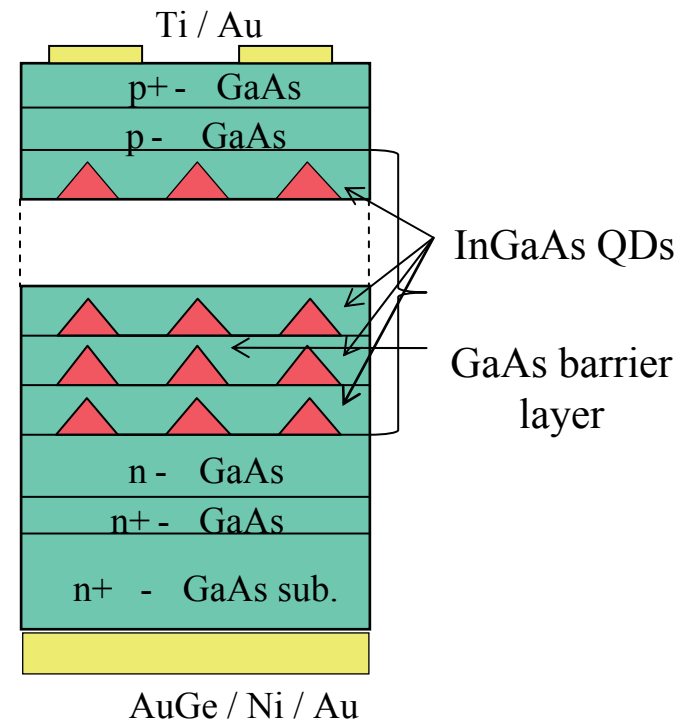
主担当: 菅谷、牧田
崔、柴田

2030年変換効率40%以上の超高効率太陽電池の実現

化合物系多接合太陽電池

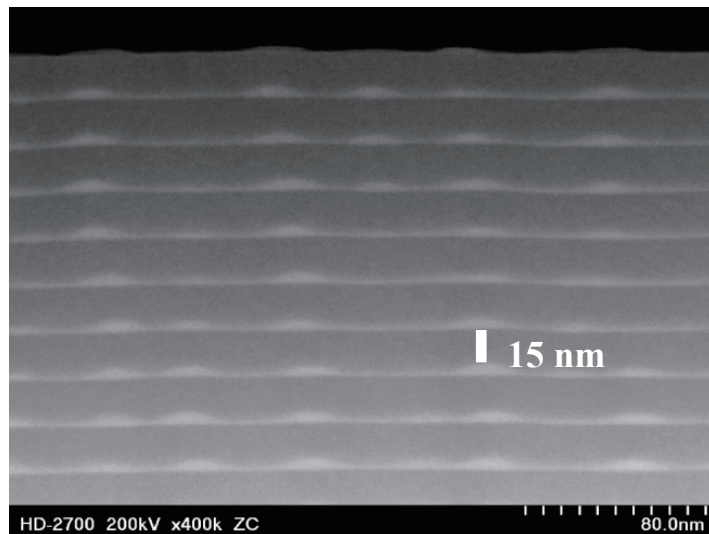


量子ドット型太陽電池

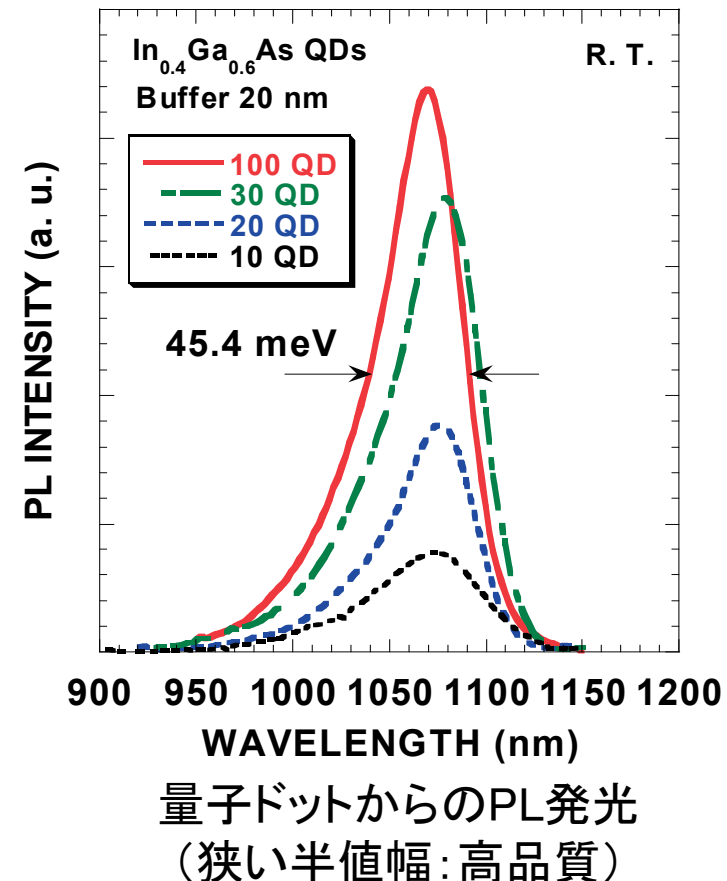


量子ドット太陽電池

- (1) 成長方向に整列した100層以上のInGaAs量子ドット形成。
- (2) InGaAs量子ドット太陽電池で、12.6%の変換効率を達成。
- (3) ミニバンド(中間バンド)の形成を確認。



100層の $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット
(成長方向に配列)



量子ドットからのPL発光
(狭い半値幅:高品質)

7. まとめ (summary)

1. 小面積セルの高効率化 (small-area cells)
 - ・CIGS多結晶粒界の評価に成功
 - ・アドミッタンス法によりCIGS薄膜に起因する2つの準位を検出
2. 大面積化技術の開発 (integrated sub-modules)
 - ・市販モジュールと同構造のサブモジュールで効率16.6%を実現
 - ・CIGSインライン製膜によるサブモジュールで効率15.8%を実現
3. フレキシブル太陽電池 (flexible substrates)
 - ・高再現性と高効率 (セラミクス基板: 17.7%、ポリマー基板: 14.7%)
 - ・サブモジュールで効率15.9%を実現
5. 省資源化・低コスト化技術 (low-cost)
 - ・CIGS膜厚 $0.75 \mu\text{m}$ で変換効率15.0% (反射防止膜無) を実現
6. 超高効率太陽電池技術 (innovative solar cells)
 - ・100層以上のInGaAs量子ドット形成。
 - ・ミニバンド (中間バンド) の形成を確認。

今後の課題と方向性

- (1) 小面積セル (small-area cells)
 - ・開放電圧の向上、新バッファ層の探索
- (2) 大面積モジュール (integrated submodules)
 - ・高品質高速製膜、集積精度の向上
 - ・透明導電膜の高品質化
 - ・信頼性の評価と向上
 - ・**技術移転 → 事業化**
- (3) 省資源・低コスト化技術 (low cost)
 - ・代替材料の開発、希少金属使用量の低減
- (4) 革新的太陽電池技術の開発 (innovations)
 - ・新材料、新構造