

スマートスタック技術を用いた 多接合太陽電池の研究と今後の展望

国立研究開発法人 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

牧田 紀久夫、水野 英範、太野垣 健、大島 隆治、
庄司 靖、相原 健人、斎 均、高遠 秀尚、菅谷 武芳

共同研究者の方々

- 産総研 太陽光発電研究センター
金井 学
- 産総研 再生可能エネルギー研究センター
望月 敏光, 立花 福久
- 長岡技術科学大学
馬場 将亮, 中西 明日可, 山田 昇
- 東京都市大学
中元 崇
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE
*Ralph Müller, Paul Beutel, David Lackner, Jan Benick, Martin Hermle,
Frank Dimroth*

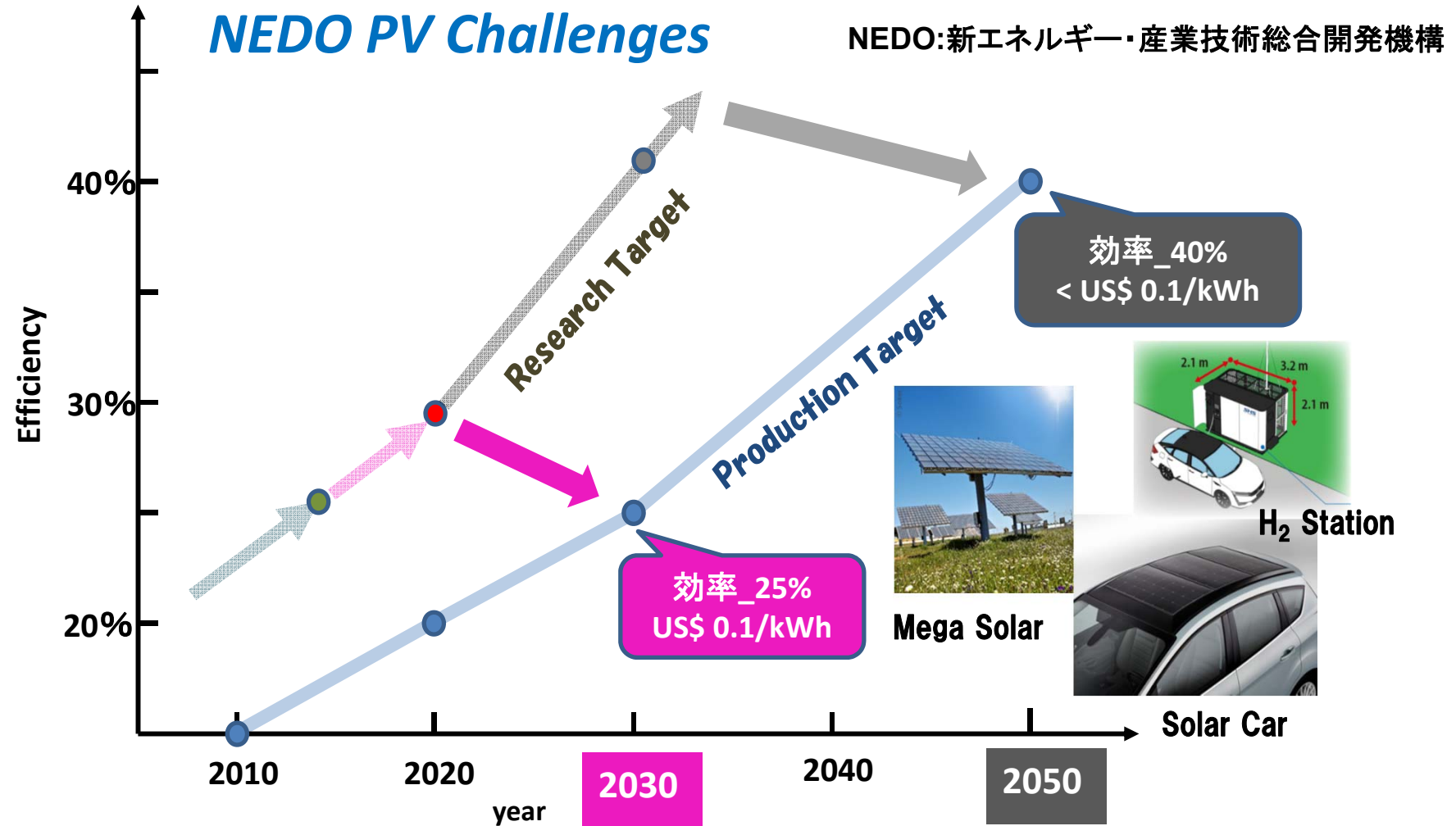
supported by  New Energy and Industrial Technology
Development Organization

Contents

1. 背景
2. スマートスタック技術
3. GaAs//Si 3J スマートスタック素子の試作
4. スマートスタック技術の今後の展望
5. 結論

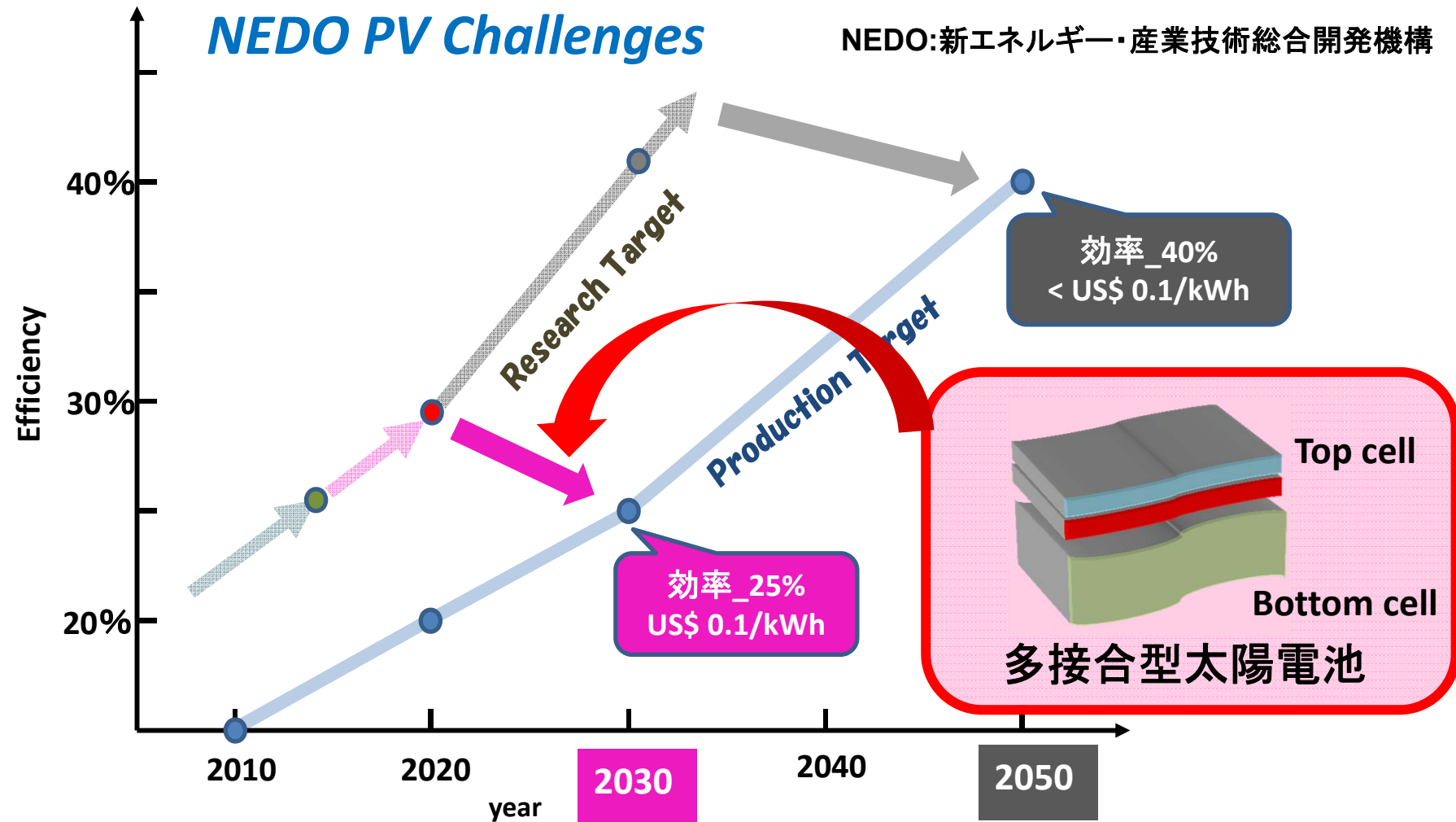
背景

革新的太陽電池のロードマップ



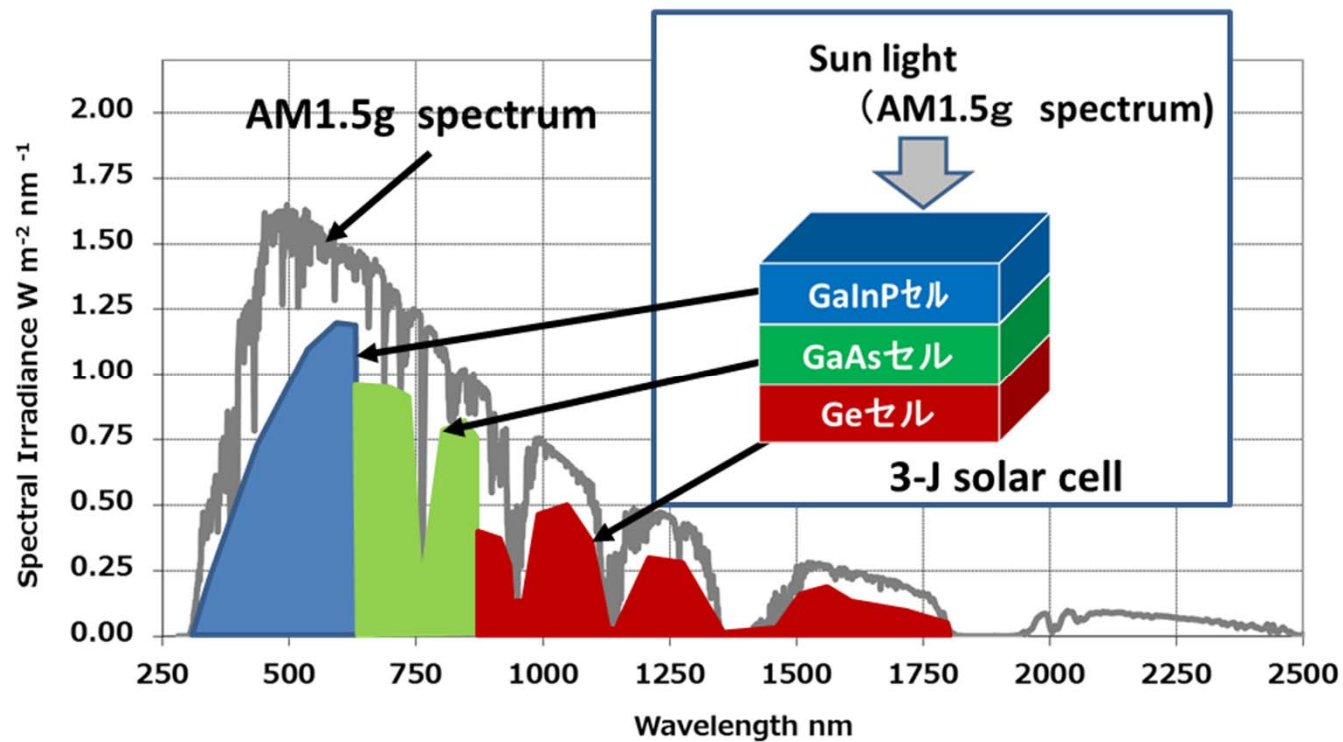
背景

革新的太陽電池のロードマップ



背景

多接合太陽電池の原理



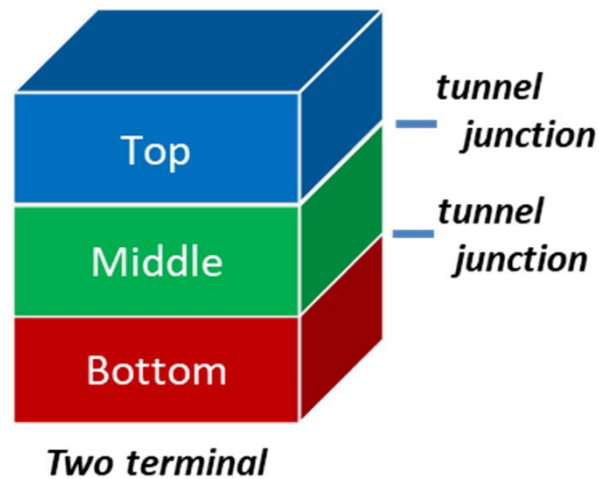
多接合太陽電池は、太陽光スペクトルを最大に活用した高効率な特性が特徴

背景

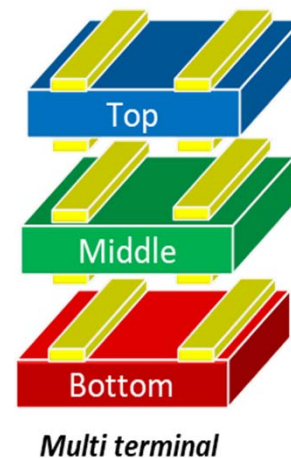
多接合太陽電池の製造方法

モノリシック スタック法

Epitaxial growth



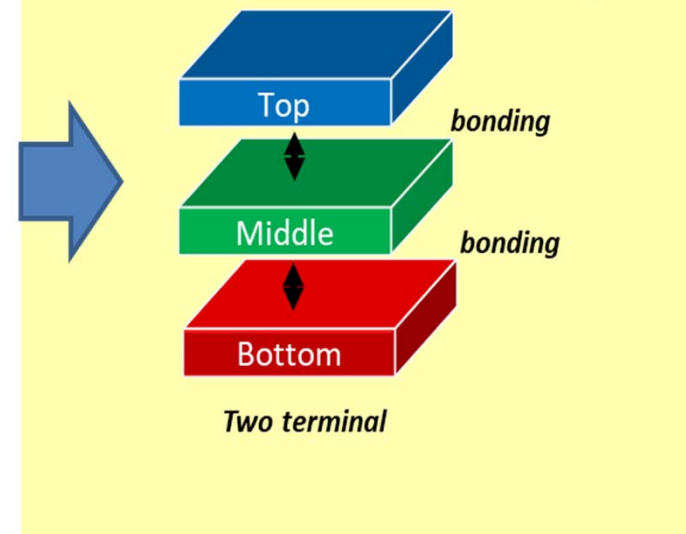
Classical



メカニカル スタック法

Advanced

(Semiconductor bonding)



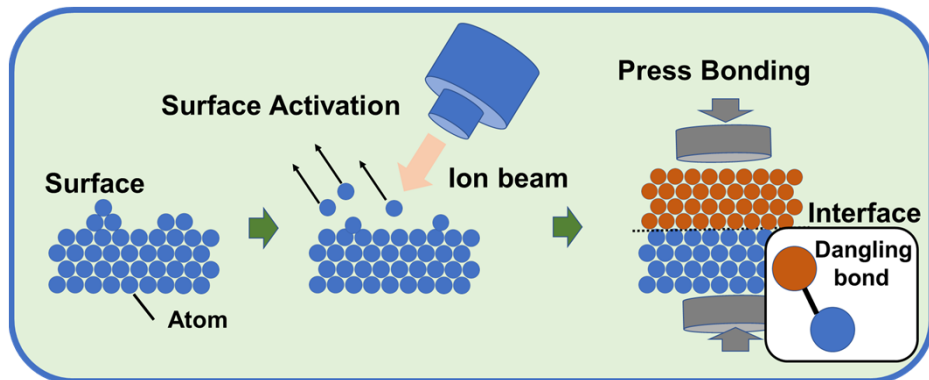
- ・メカニカルスタック法は、セル材料の自在組み合わせにより高効率、低コストに優位
- ・中でも半導体接合法は、低光損失およびシンプルなアSEMBリーに適している

背景

半導体接合法の原理

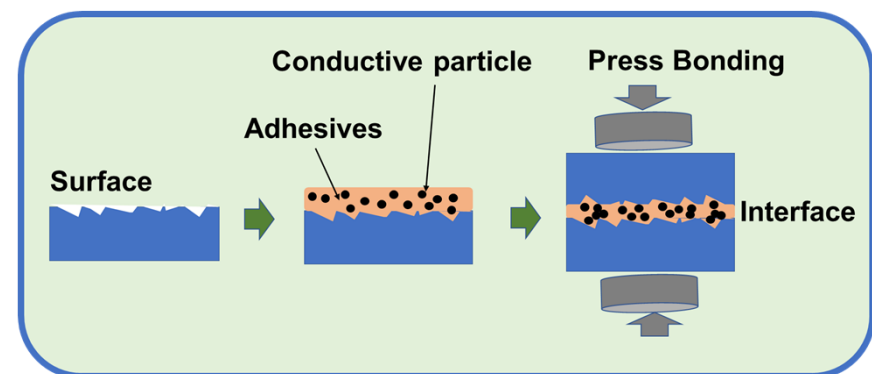
直接接合法

表面活性化法 (SAB: Surface Activated Bonding)



- ・接合界面を電子ビーム等により活性化、原子レベルで接合
- ・接合界面での電気 / 光接合性能は良好
- ・厳しい接合界面の平滑性 (<1 nm)

間接接合法



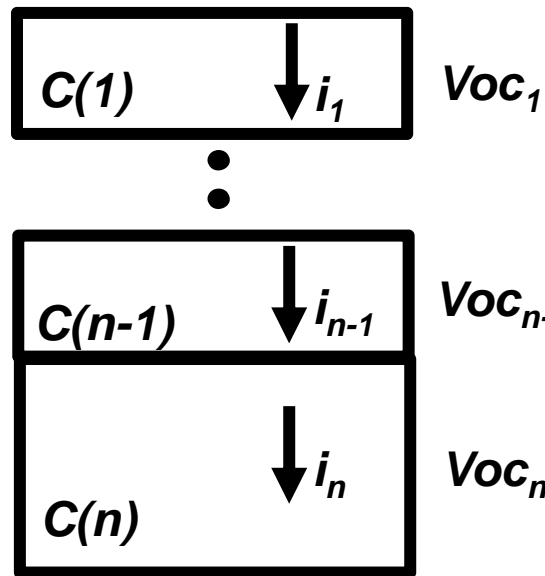
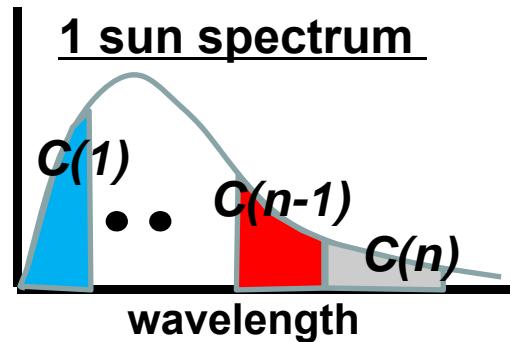
- ・接着剤、金属等を介在した接合
- ・接合界面の平滑性は大幅に緩和
- ・接合界面での電気 / 光特性はトレードオフ

産総研では、パラジウム (Pd) ナノ粒子を接合面に適用した独自の半導体接合法を開発 (2011年～)

➡ スマートスタック技術 (Smart Stack Technology)

背景

多接合太陽電池の設計法



n接合太陽電池の原理図

n接合太陽電池の効率

・電流

$$i_1 = i_2 = \dots = i_{n-1} = i_n$$

→ 電流整合

・電圧

$$V = Voc_1 + Voc_2 + \dots + Voc_{n-1} + Voc_n$$

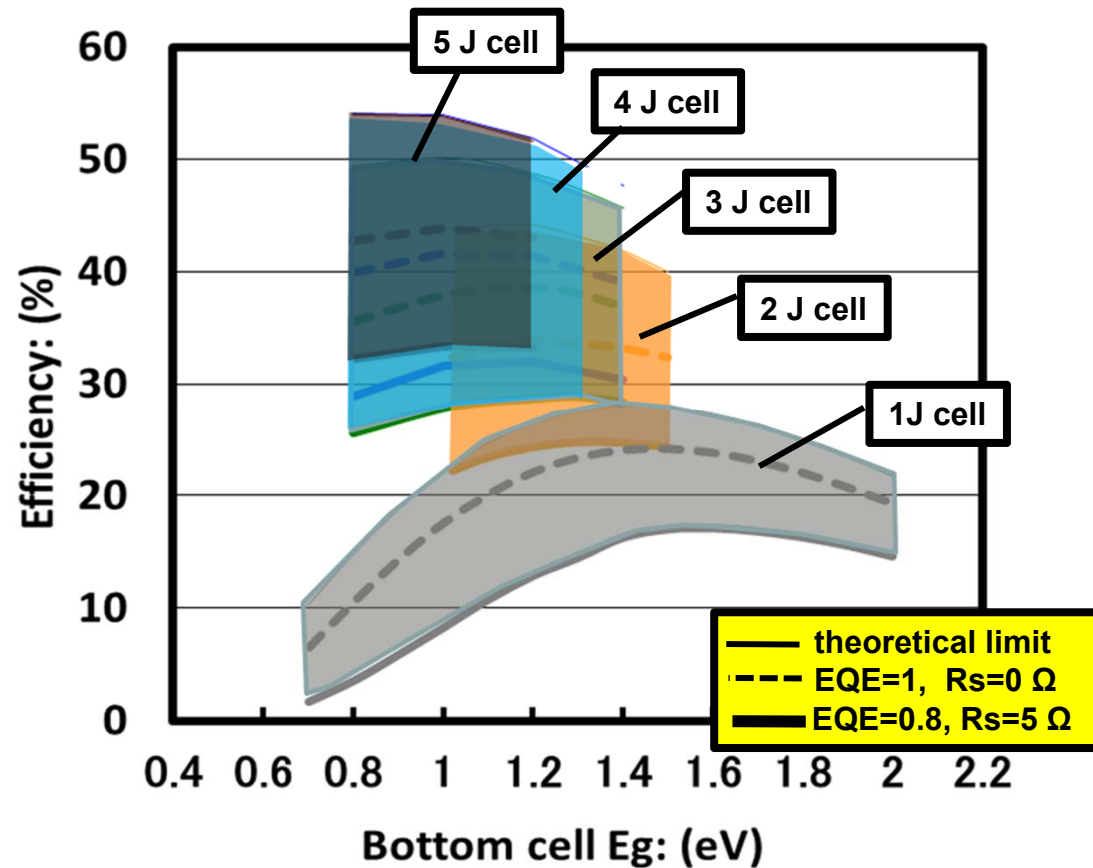
・発電効率 = 電流 × 電圧

材料、層厚等の最適化

- 高効率 ⇒ 接合数増加
III/V族半導体材セル ⇒ GaAs/InP系
- 低コスト ⇒ 低コスト材料、製法検討
III/V on Si(CIGS)系
ペロブスカイト on Si(CIGS)系

背景

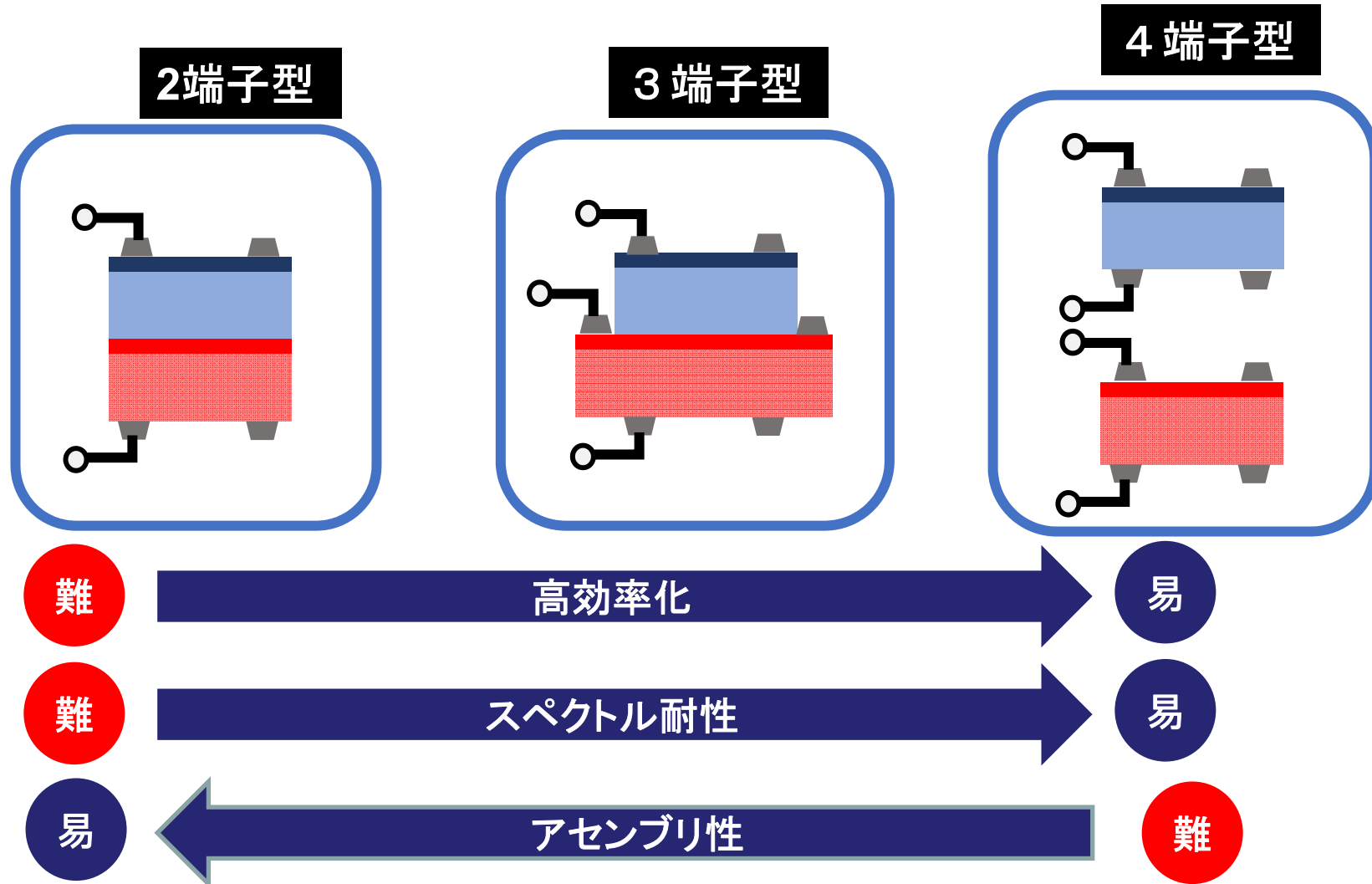
多接合太陽電池の原理と効率予測



理論発電効率は、2接合以上で30%以上が予測

背景

多接合太陽電池の端子構成



機能に応じた端子数の使い分けが可能

背景

多接合太陽電池の最高効率

III-V族系多接合

best-research-cell-efficiencies.20190923

Institution & year	Structure	Efficiency	Technique
NREL 2019	6J_ AlInGaP/AlGaAs/Ga As/InGaAs(1)/InGaAs (2)/InGaAs(3)	39.2%	2 端子 モノリシック構造
NREL 2019	6J_構造は上記に同じ	47.1% 143倍集光	2端子 モノリシック構造

III-V//Si系多接合

Institution & year	Structure	Efficiency	Technique
EPFL, CSEM PV- center, NREL 2017	InGaP/GaAs //SHJ Si_3J	35.9%	4 端子 間接接合法 (媒体接着法)
Fraunhofer ISE, et al. 2019	InGaP/GaAs //TOPCon Si_3J	34.1%	2端子 直接接合法 (表面活性化法)

Contents

1. 背景
2. スマートスタック技術
3. GaAs//Si 3J スマートスタック素子の試作
4. スマートスタック技術の今後の展望
5. 結論

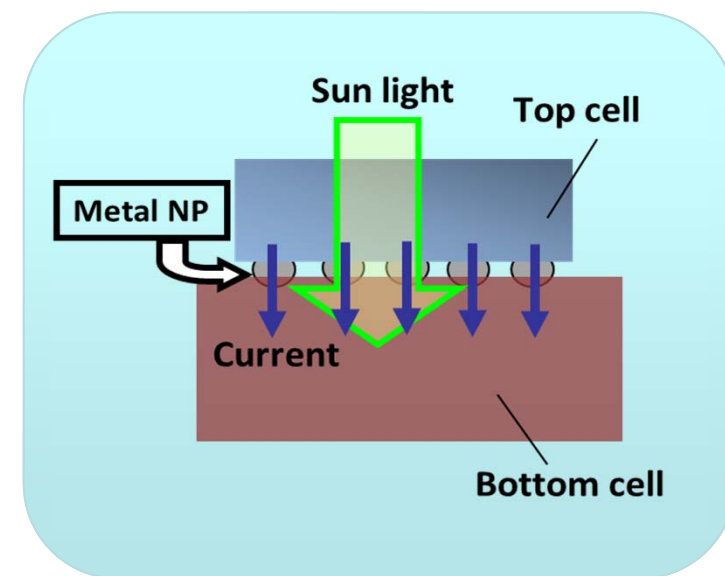
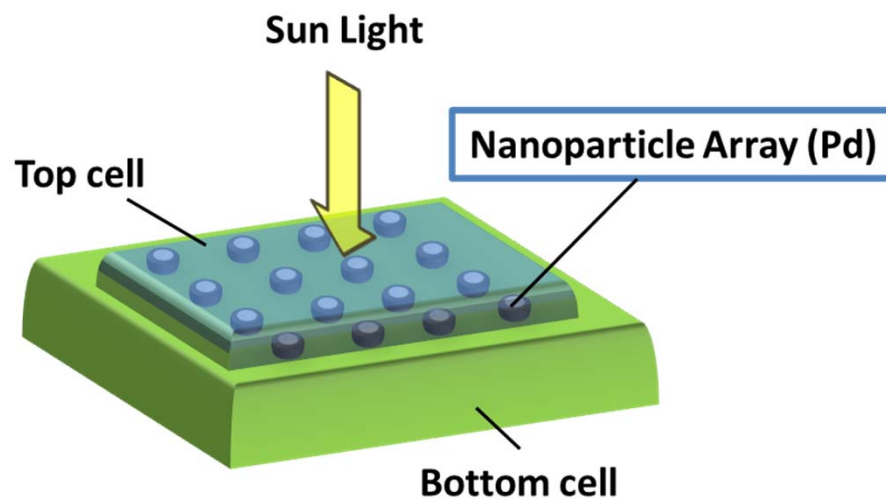
スマートスタック

スマートスタック技術のコンセプト

パラジウム(Pd) ナノ粒子アレーを接合面に形成、介在した接合法

電気特性：ナノ粒子(Pd)と半導体のオーミック性を介し低接合抵抗

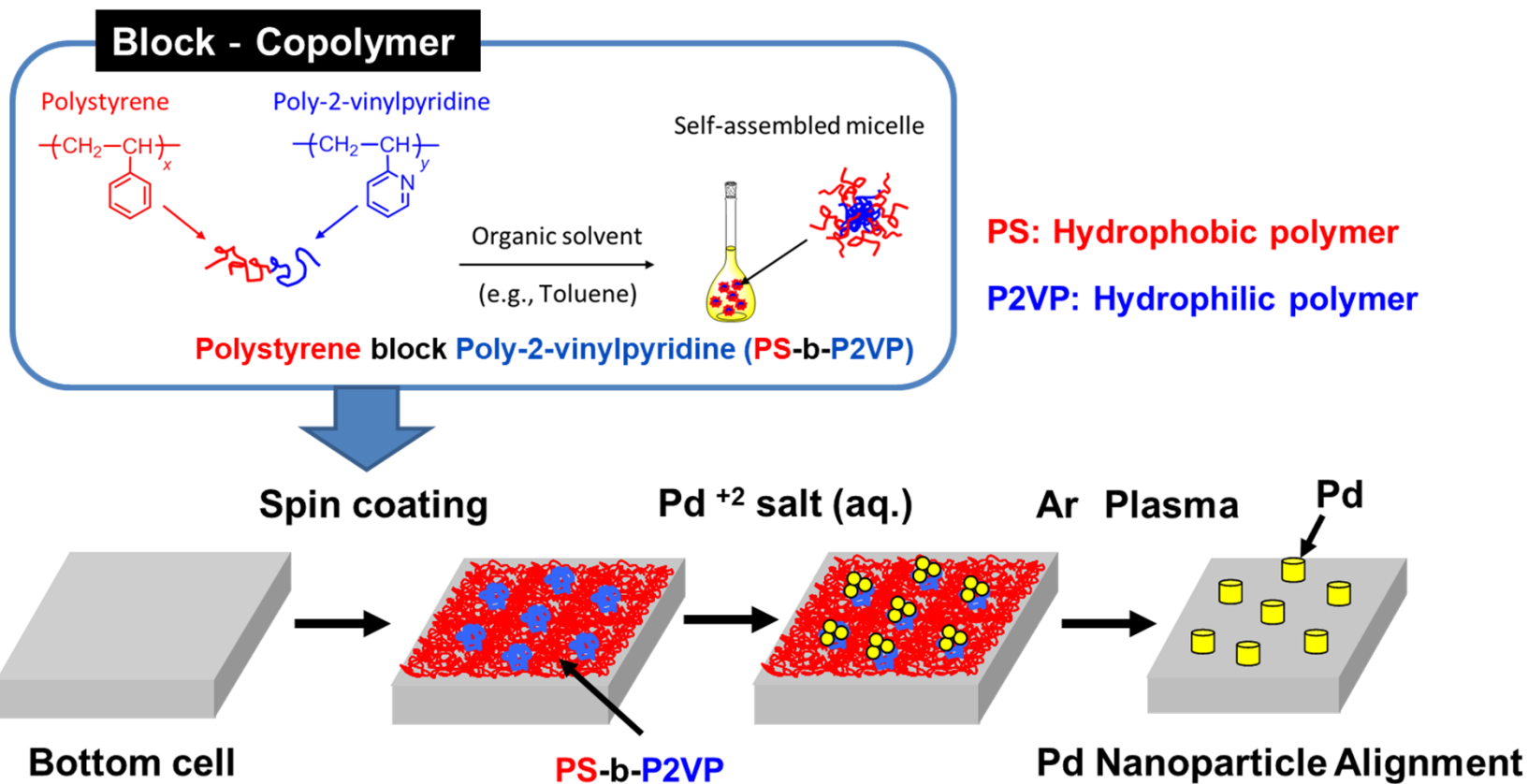
光特性：ナノ粒子(Pd)ドメインの極小化により接合界面は低光損失



スマートスタック

スマートスタック技術の製法 1

ステップ1: Pdナノ粒子アレーの形成

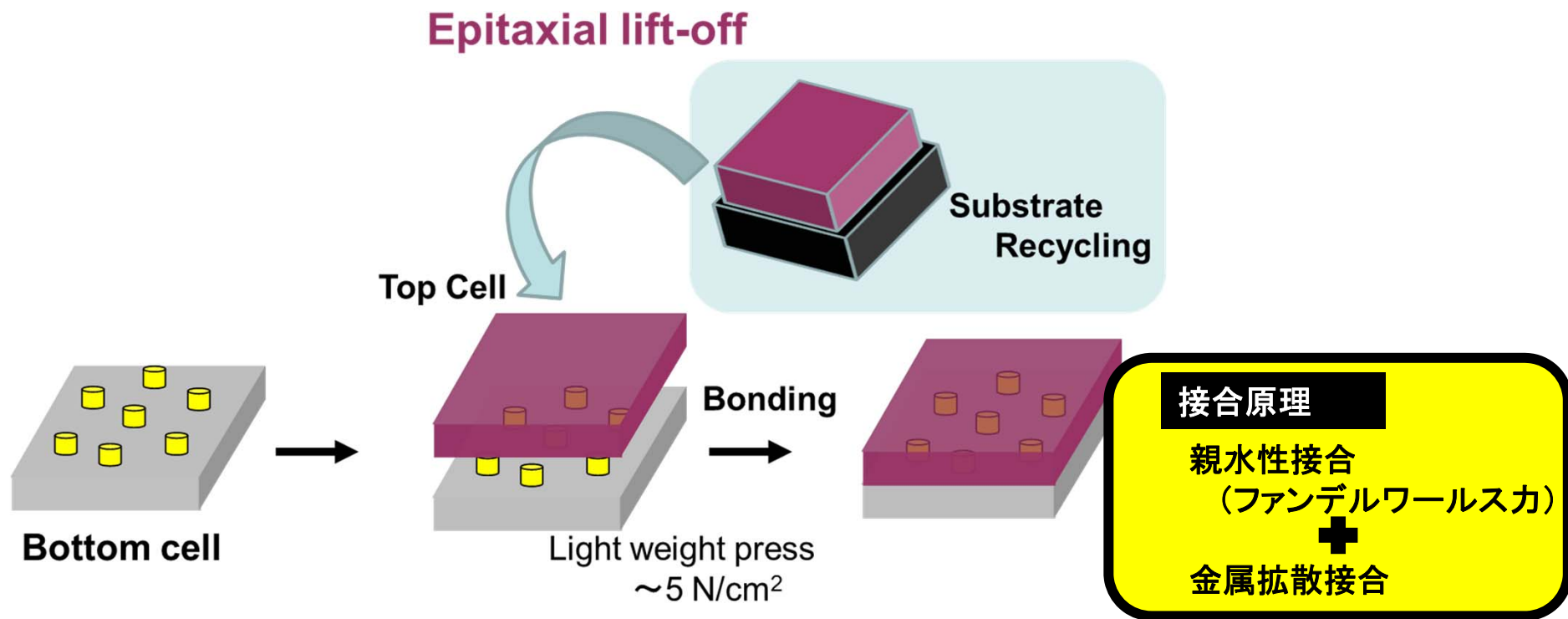


Pd ナノ粒子アレーは、**ブロック共重合体の相分離現象**を利用して**自己形成**

スマートスタック

スマートスタック技術の製法 2

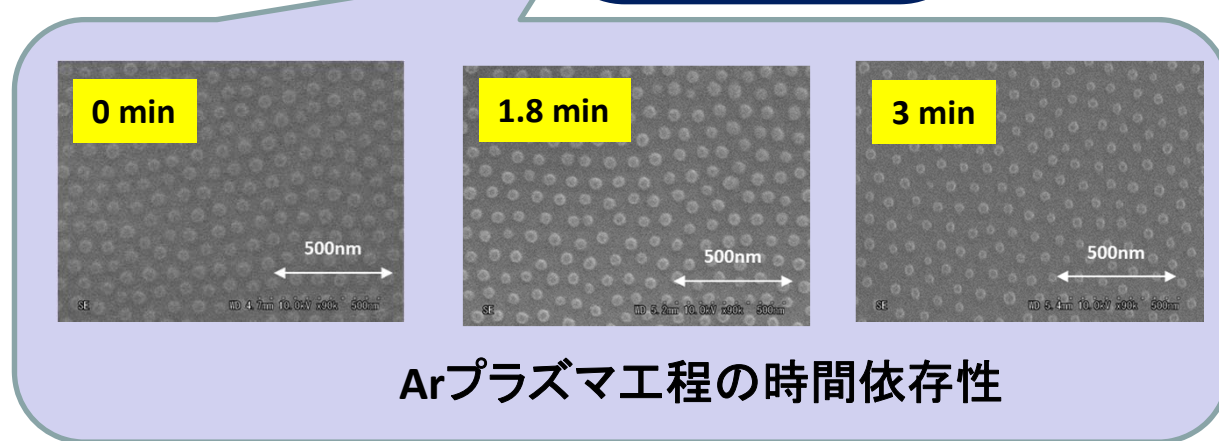
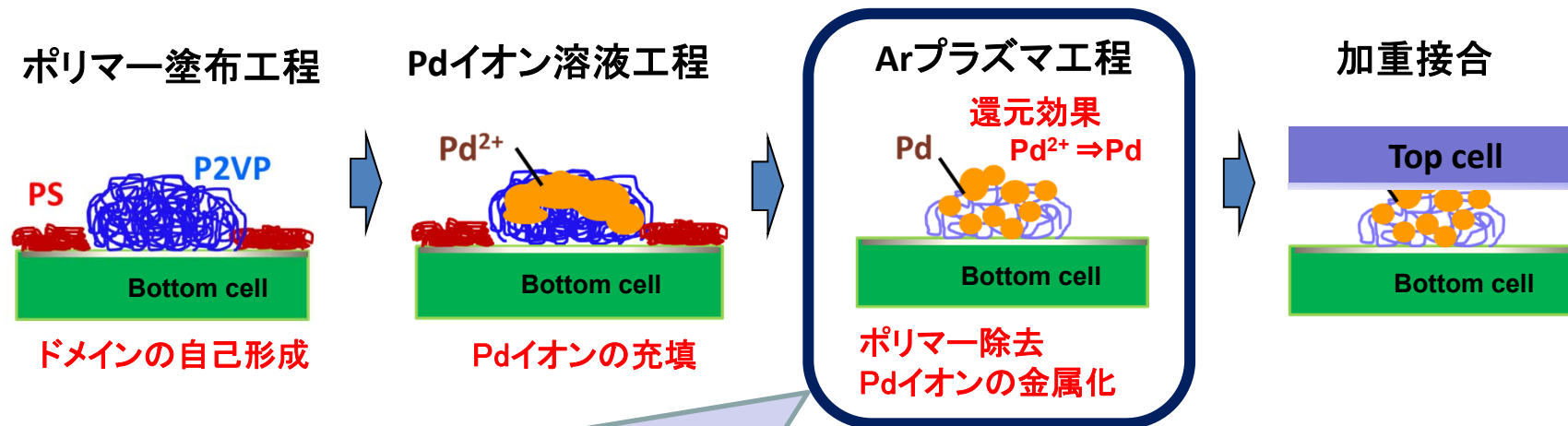
ステップ2: 加重接合



- ・トップセルは、エピタキシャルリフトオフにより基板から剥離
- ・軽加重圧力下 (5 N/cm²) で 接合 (室温、大気圧雰囲気)

スマートスタック

スマートスタック技術の製法原理詳細



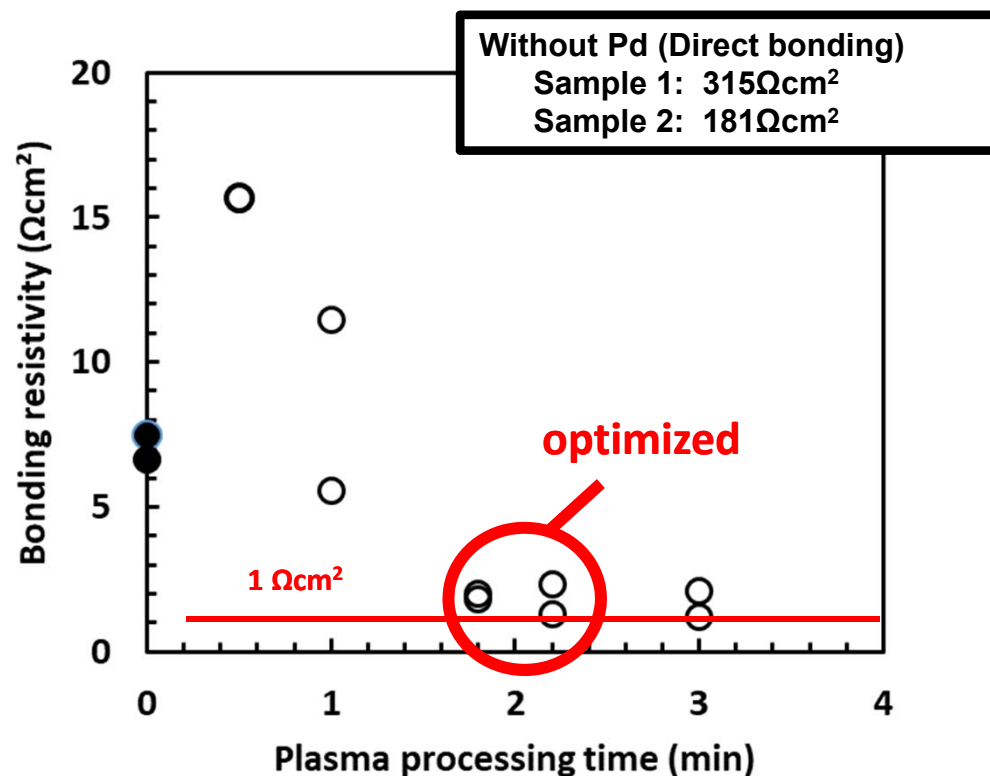
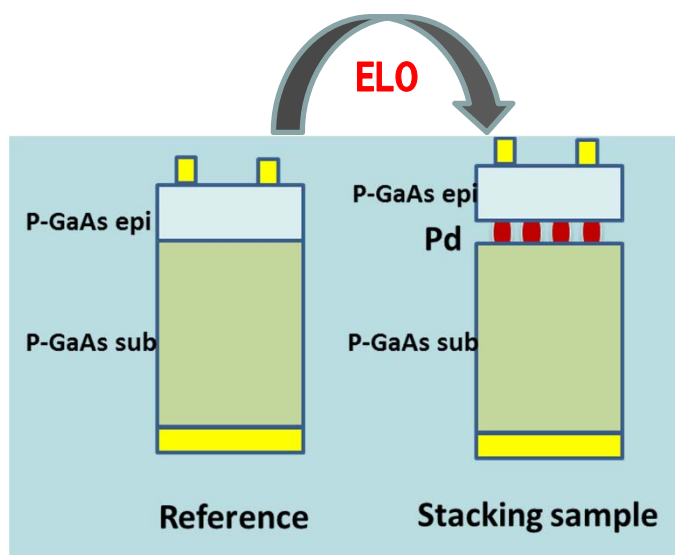
Arプラズマ工程の時間依存性

Arプラズマ照射時間がドメインサイズ、抵抗に関与

スマートスタック

スマートスタック技術の電気特性

接合抵抗のプラズマ時間依存性

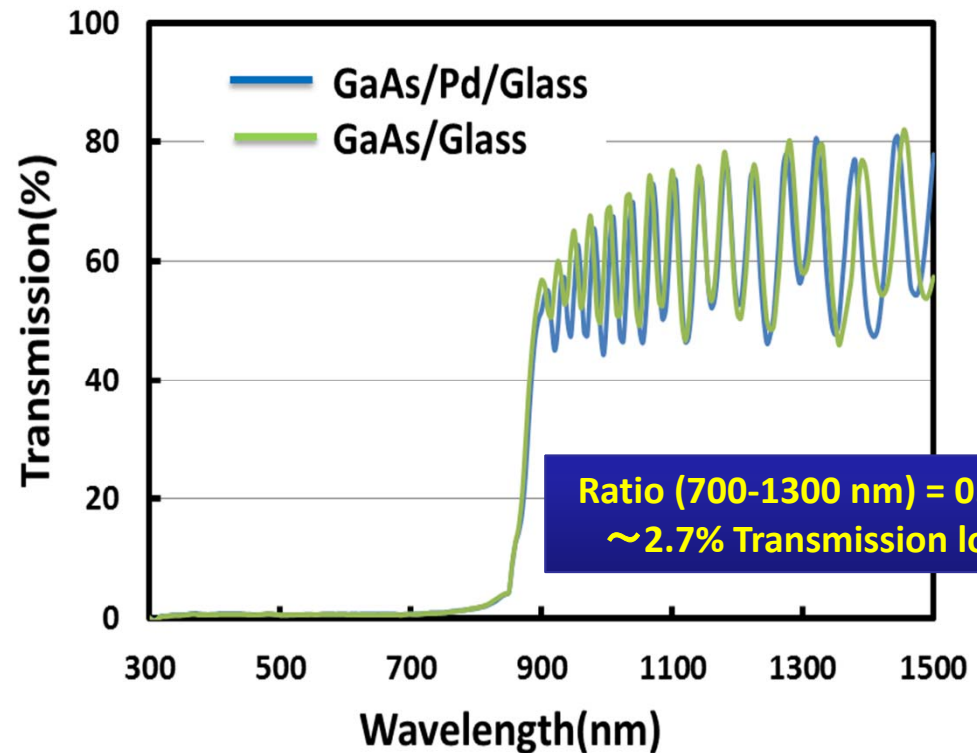
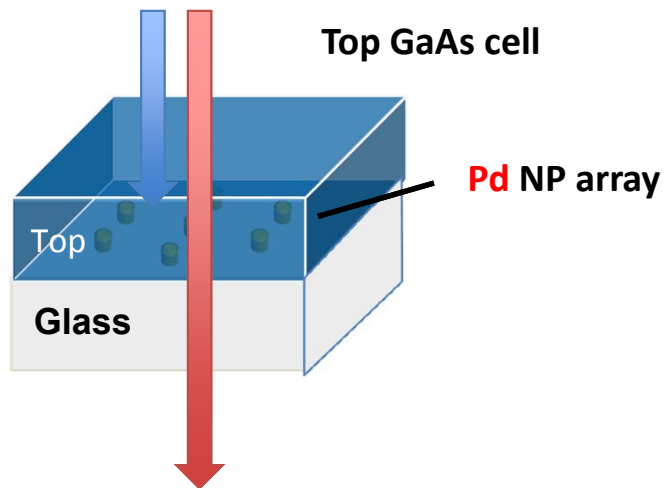


Arプラズマの照射時間最適化により、接合抵抗 $\sim 1 \Omega\text{cm}^2$ 以下が可能

スマートスタック

スマートスタック技術の光学特性

接合界面の光損失評価

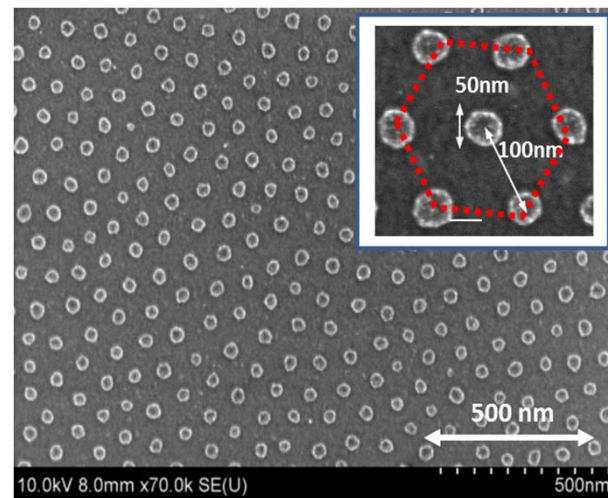
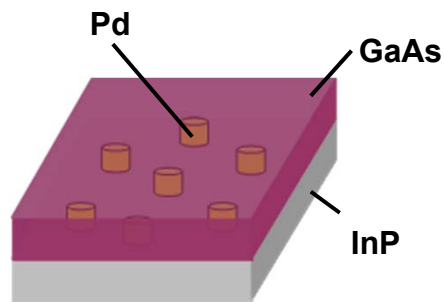


実験/理論的に、接合界面での光損失~3%以下が検証

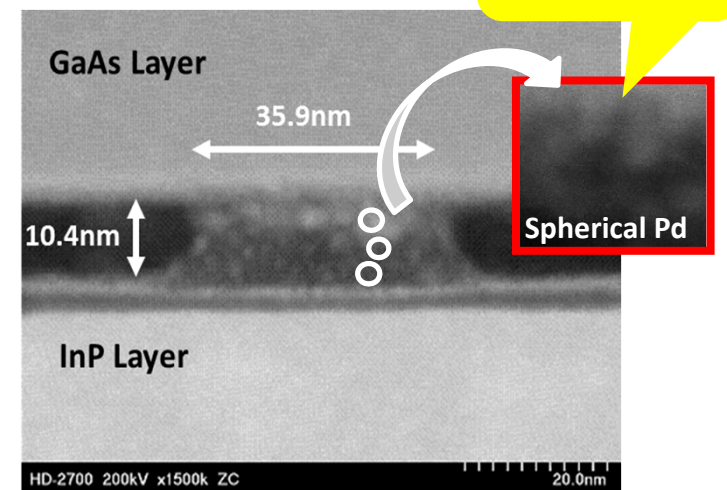
スマートスタック

スマートスタック技術の接合界面分析

接合界面の分析



Pdナノ粒子アレーのSEM画像



接合界面のSTEM画像

- ・ブロック共重合体を用いたPdナノ粒子の自己配列により均一な分布
- ・ドメインサイズは、直径-50 nm, 間隔-100 nm, 形成密度- 10^{10} cm^{-2} , 高さ-10 nm

スマートスタック

スマートスタック技術の特長

接合技術の比較

	接合原理	接合条件	電気特性	光透過特性	接合界面の許容平滑性	製造装置
表面活性化法 (SAB法)	ダングリングボンド	RT~300°C 高真空	< 0.1 Ωcm^2	良好	< 1 nm	高真空装置 ⇒高価
スマートスタック	ナノ粒子	RT 大気圧	< 1 Ωcm^2	< 3%	< 50 nm	低真空プラズマ装置 ⇒安価

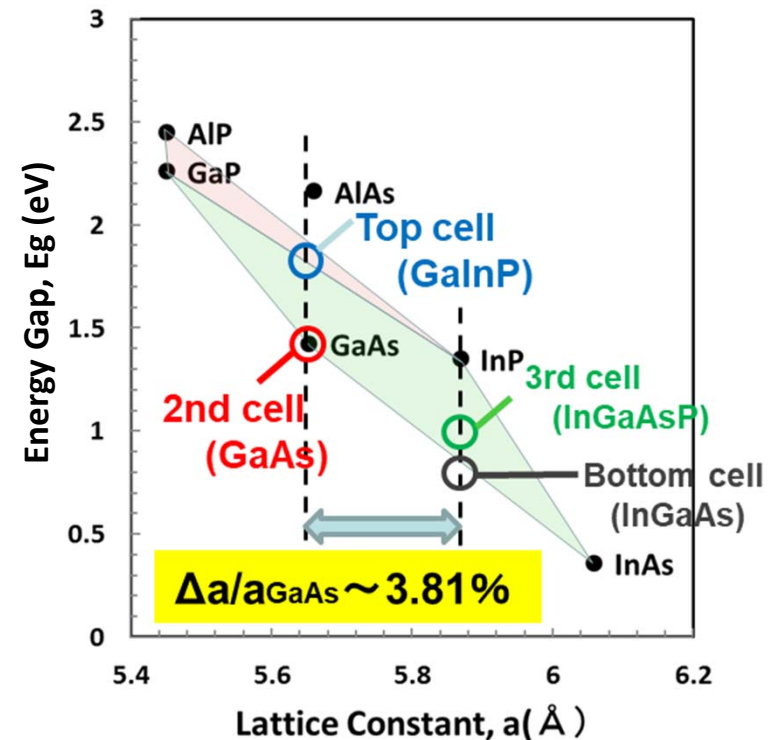
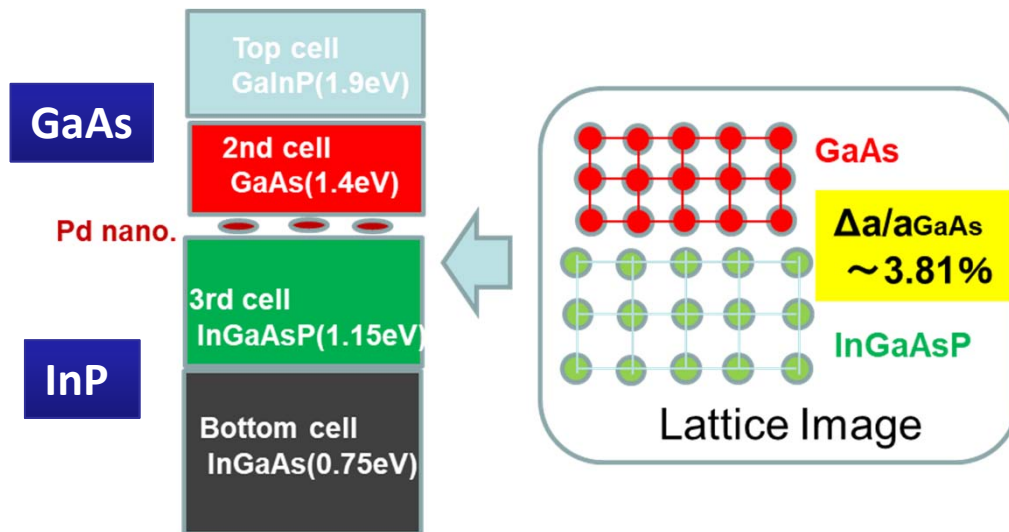
・スマートスタックの特長は

- ・室温、大気圧下での簡便なプロセス
- ・接合に要求される界面平滑性~50 nm ⇒ Pdナノ粒子ドメインがバッファーとして機能
- ・安価な低真空プラズマ装置での製造

スマートスタック

スマートスタックGaAs//InP系多接合太陽電池

格子不整合系GaAs//InP多接合太陽電池

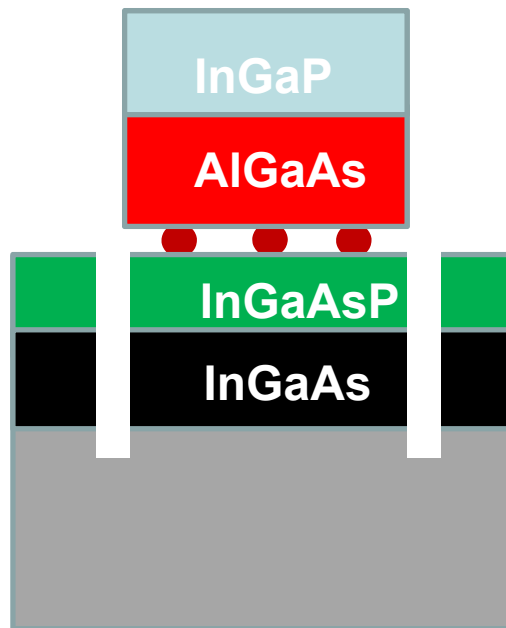


- ・GaAs // InP 間に~3.81%の格子不整合が存在
- ・メカニカルスタック技術の適用が不可欠

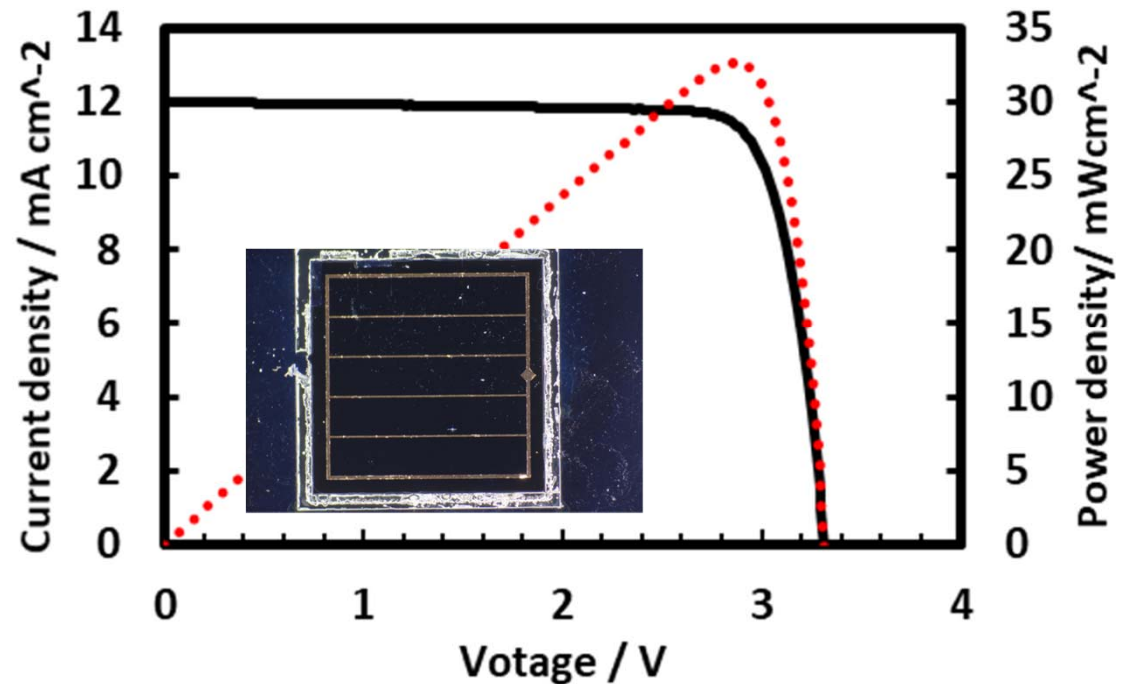
スマートスタック

スマートスタック型GaAs//InP系多接合太陽電池

GaAs//InP 4接合太陽電池



	Total area	Active area
S cm ²	0.151	0.141
efficiency %	32.73	34.92

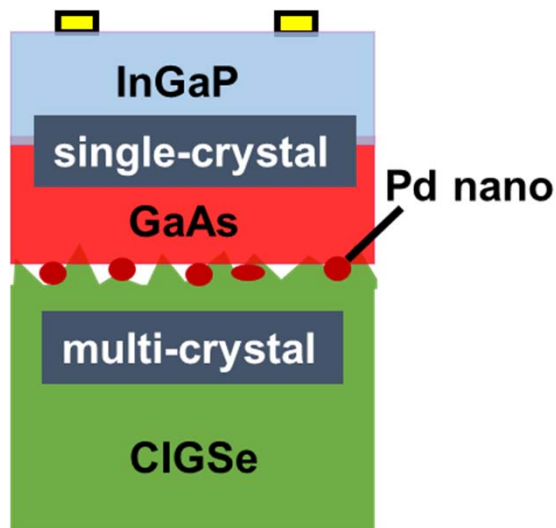


メサ構造適用によりリーク電流低減、発電効率~32.73%(Total area)を実現

スマートスタック

スマートスタック型GaAs//CIGS系多接合太陽電池

GaAs//CIGSe 3接合太陽電池



CMP 研磨

After CMP: $R_q < 50 \text{ nm}$

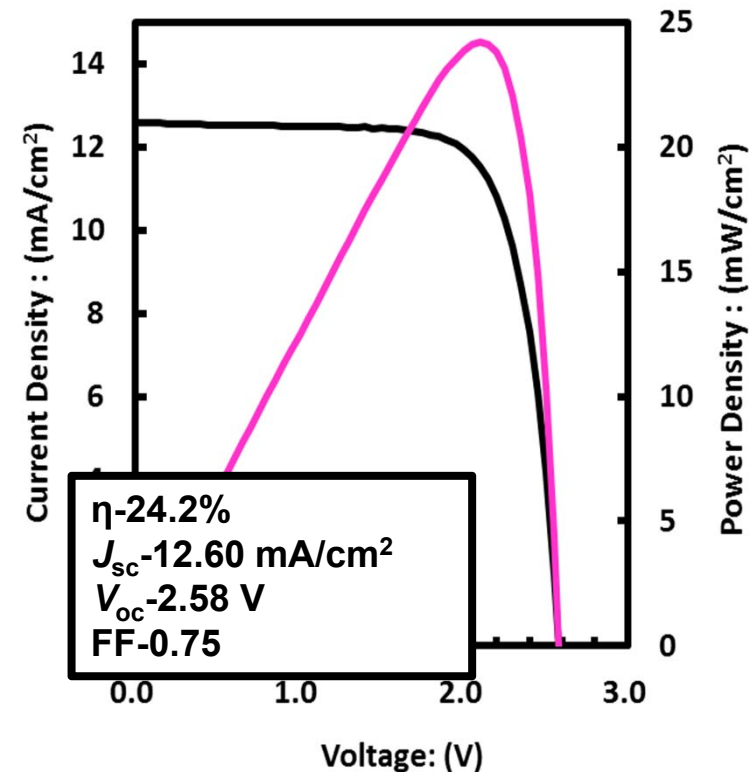
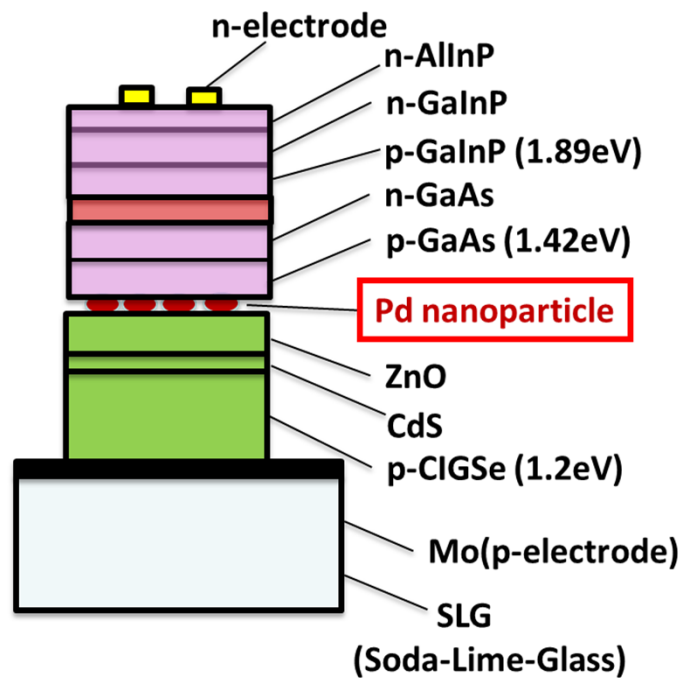
Pd ナノ粒子形成

- ・単結晶(GaAs) // 多結晶(CIGS)からなる異種材料接合構造
- ・CMP研磨とスマートスタックの併用により多接合構造化

スマートスタック

スマートスタック型GaAs//CIGS系多接合太陽電池

GaAs//CIGSe 3接合太陽電池



InGaP/GaAs//CIGSe 3接合構造で、発電効率~24.2%(Active area)を実現

K. Makita *et al.*, 29th EUPVSEC, 3AO.4.1, p. 1427 (2014).

Contents

1. 背景
2. スマートスタック技術
- 3. GaAs//Si 3J スマートスタック素子の試作**
4. スマートスタック技術の今後の展望
5. 結論

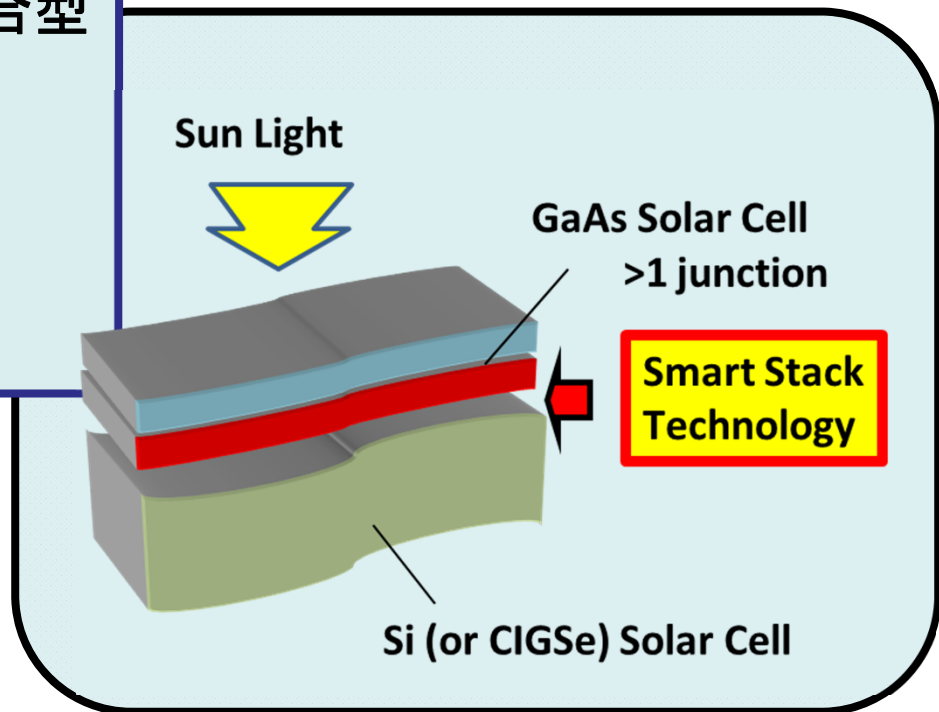
GaAs//Si太陽電池

NEDOプロジェクトの目標

目標: モジュール発電効率~30%、発電コスト~US 0.1\$/kWh

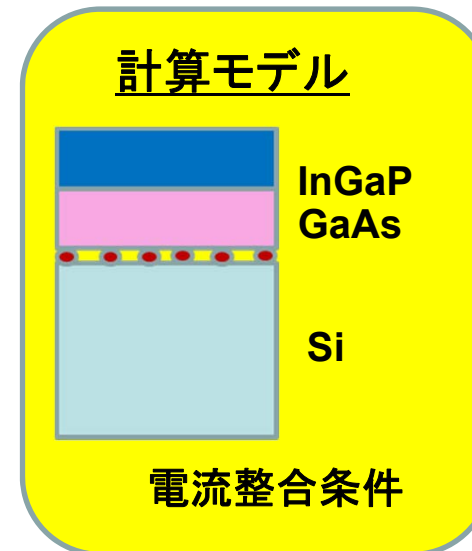
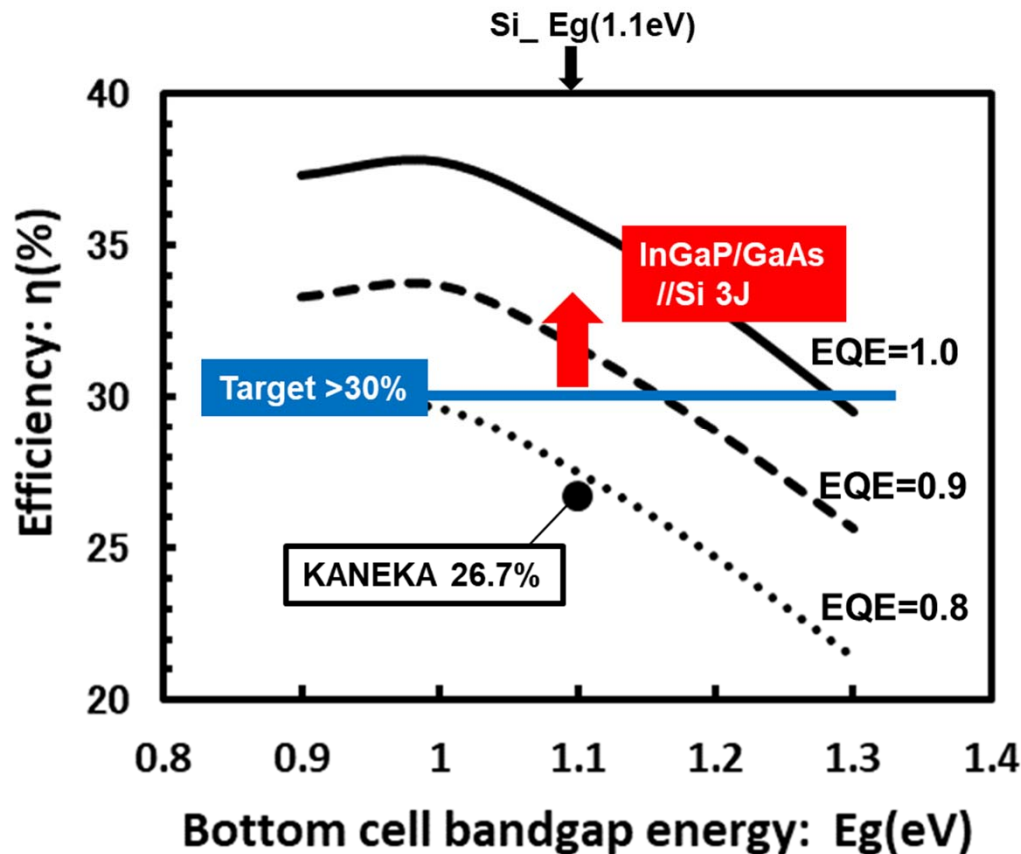
戦略

- 異種材料によるスマートスタック多接合型
- GaAs//Si、GaAs//CIGS
- GaAsのコスト低減
 - 低倍集光技術の導入 (<10倍)
 - ハイドライド気相成長技術の開発
Hydride VPE (H-VPE)



GaAs//Si太陽電池

GaAs//Si多接合太陽電池の理論効率



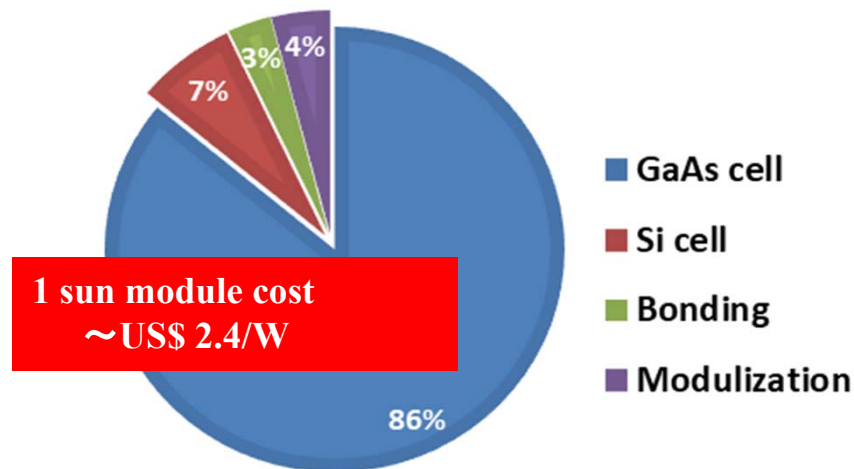
- ・InGaP/GaAs//Si 3接合構造で発電効率~30%以上が予測
- ・Siセルの高効率化が鍵 (PERC, HIT, TOPCon...)

GaAs//Si太陽電池

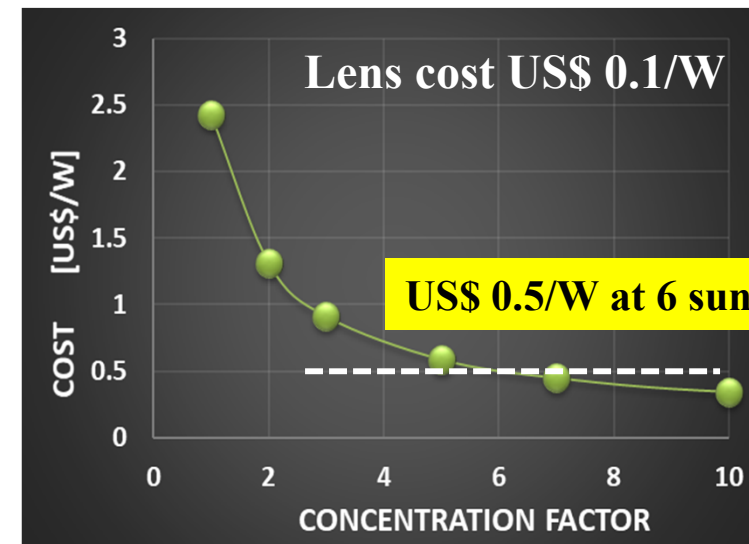
GaAs//Siスマートスタックモジュールのコスト試算

コスト計算のモデル(材料コスト)

モジュール効率_ **30%**,
 GaAs基板の再利用回数_ **10 times**
 GaAsセルの成長法_ **H-VPE**



1sun モジュールのコスト内訳



低倍集光モジュールのコスト

- ・1 sunでの基本モジュールのコストは、**~US\$ 2.4/W**
- ・低倍集光においてモジュールコストは大幅削減、**~US\$ 0.5/W以下**が予測

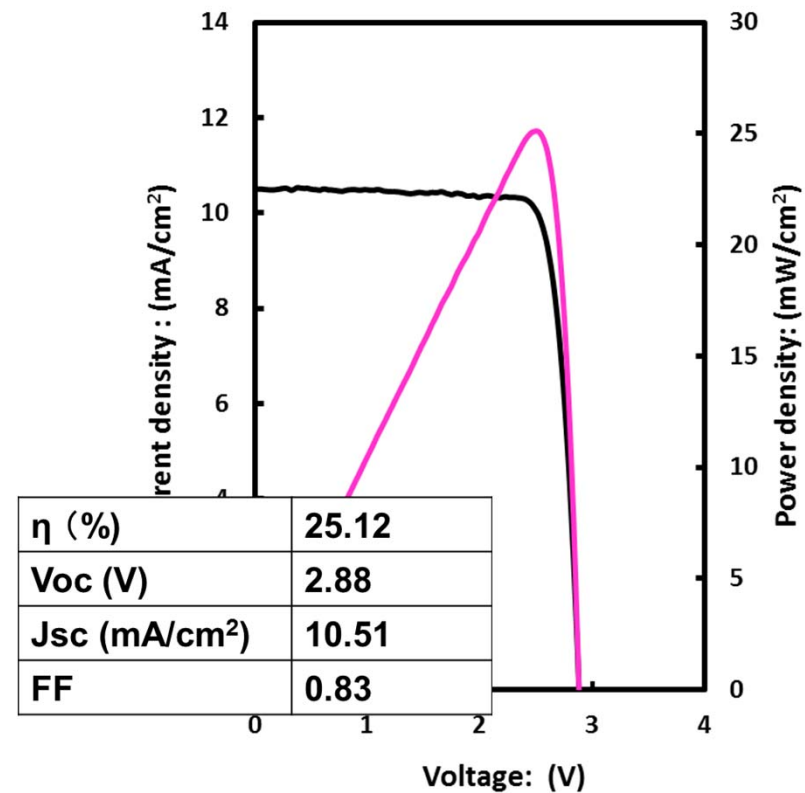
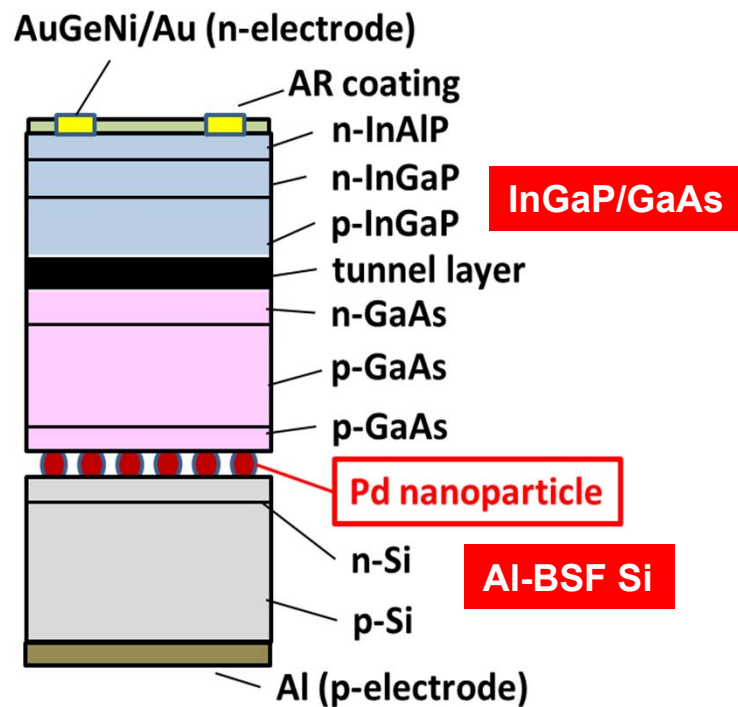
GaAs//Si太陽電池

GaAs//Si多接合太陽電池の最高効率

Institution & year	Structure	Efficiency	Technique
EPFL, CSEM PV-center, NREL 2017	InGaP/GaAs //SHJ Si_3J	35.9%	4 端子 間接接合法
Fraunhofer ISE, et al. 2019	InGaP/GaAs //TOPCon Si_3J	34.1%	2端子 表面活性化法

GaAs//Si太陽電池

GaAs//Si多接合太陽電池の従来性能(産総研)



H. Mizuno *et al.*, Appl. Phys. Express, 10, 072301 (2017).

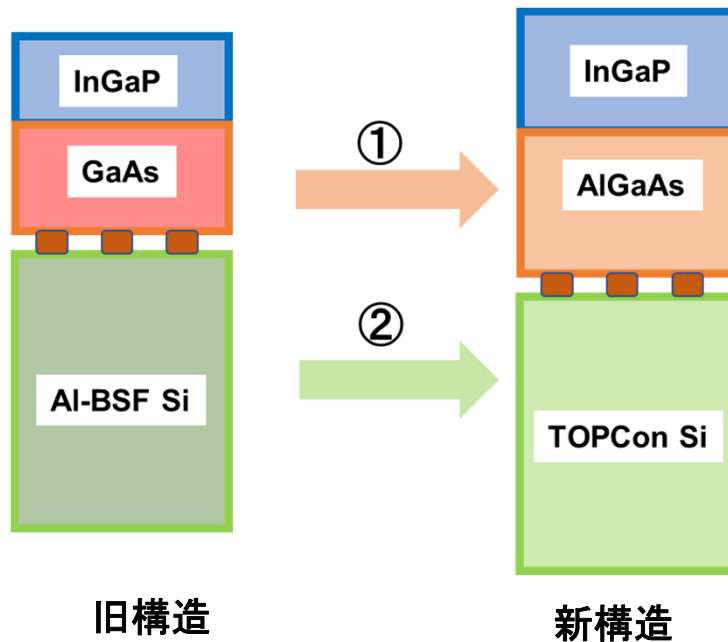
- ・InGaP/GaAs/Al-BSF Si 3接合構造で発電効率~25.12%
- ・当時のAl-BSF Si cellの低いEQE効率で律速

GaAs//Si太陽電池

詳細について
本成果報告会、ポスター発表

新設計によるGaAs//Si多接合太陽電池

セル構造の改善ポイント



① Middle cell
GaAs E_g 1.42 eV \Rightarrow AlGaAs E_g 1.50 eV

② Bottom cell
Al-BSF Si \Rightarrow TOPCon Si

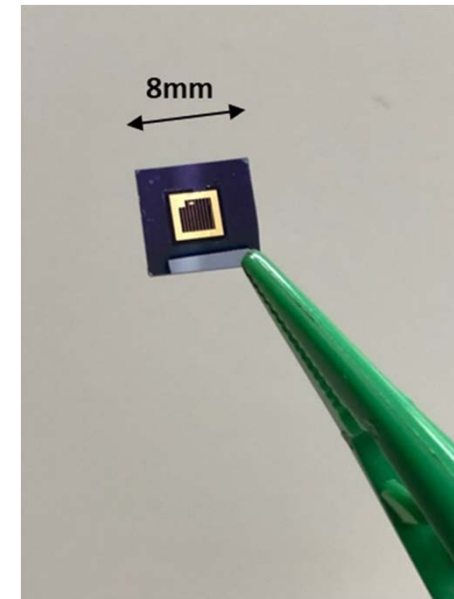
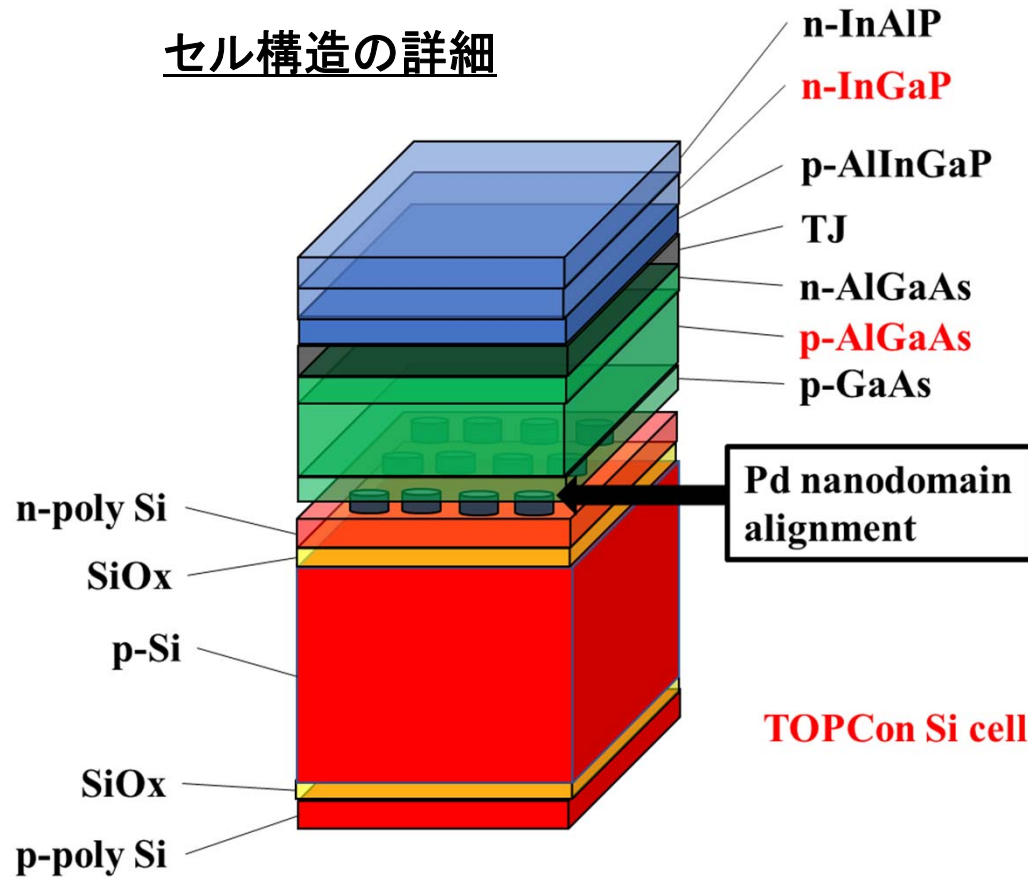
TOPCon: Tunnel Oxide Passivated Contact

- ・ **Fraunhofer ISEとの連携**によりセル構造の検討
- ・ 新設計構造では、**ボトムSiセルでの光電流増加**に注視
- ・ **TOPCon Si**の**パッシベーションコンタクト構造**により**電流/電圧性能の改善**

GaAs//Si太陽電池

新型GaAs//Si多接合太陽電池

セル構造の詳細

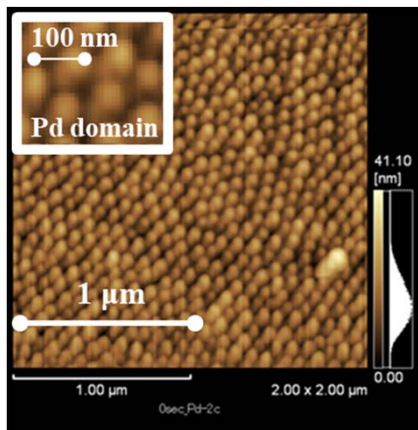


InGaP/AlGaAs// TOPCon Si 3接合太陽電池

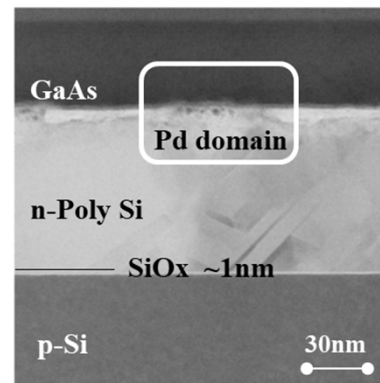
GaAs//Si太陽電池

新型GaAs//Si多接合太陽電池

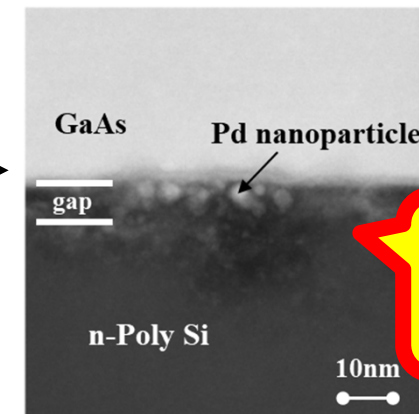
接合界面の分析



TOPCon Si上でのPdナノ粒子アレーのAFM画像



接合断面のSTEM 画像



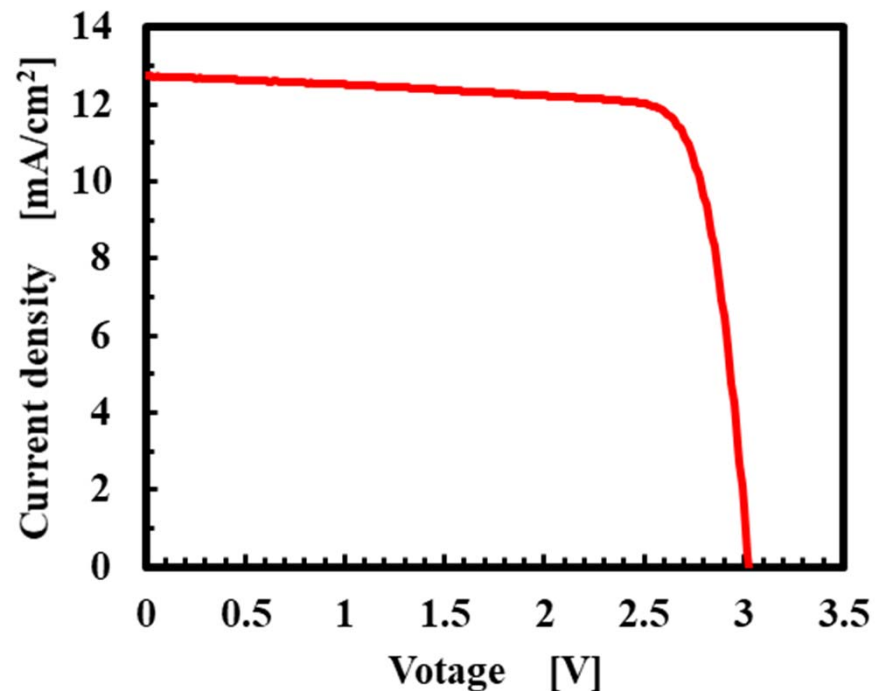
酸化膜除去

- ・Pdナノ粒子はTOPCon Siセル上に均一にアレー形成
- ・TOPCon Si表面の酸化領域除去により良好な接合性能を実現

GaAs//Si太陽電池

新型GaAs//Si多接合太陽電池

発電性能 (1sun at AM1.5G)



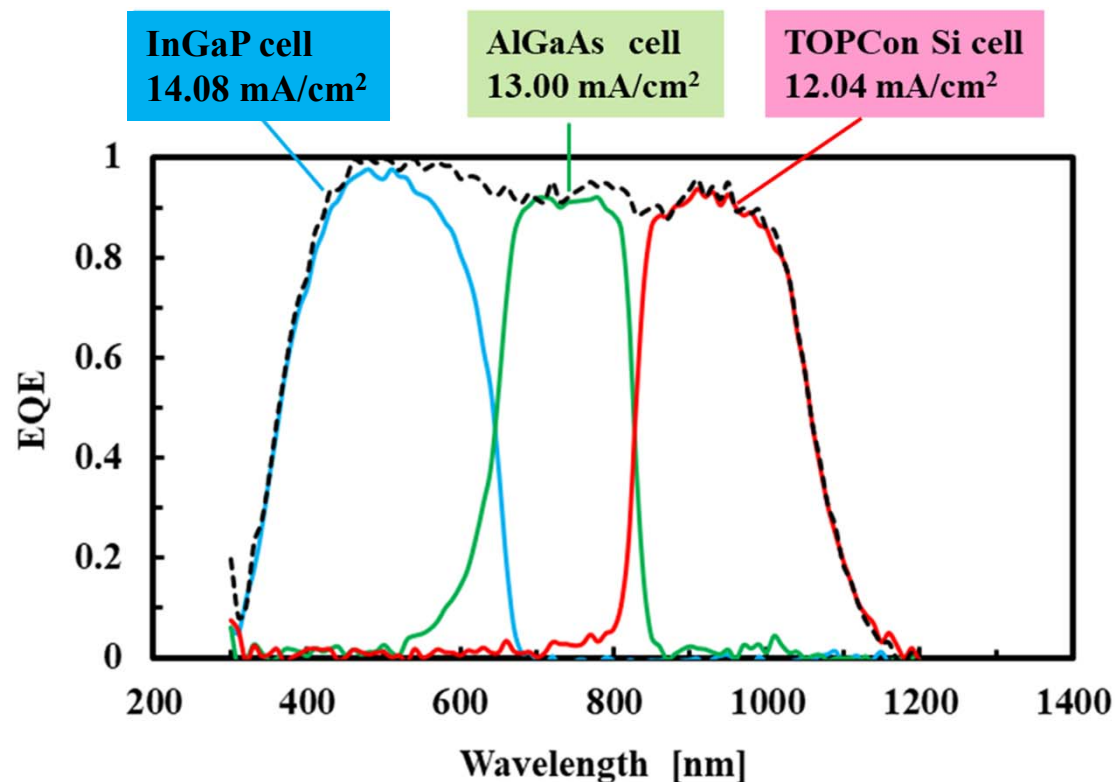
New design cell	
Area (cm ²)	0.09538
J_{sc} (mA/cm ²)	12.72
V_{oc} (V)	3.03
FF	0.80
η (%)	30.8

InGaP/GaAs//TOPCon Si 3接合構造において、発電効率～30.8% 達成

GaAs//Si太陽電池

新型GaAs//Si多接合太陽電池

EQE 効率の測定

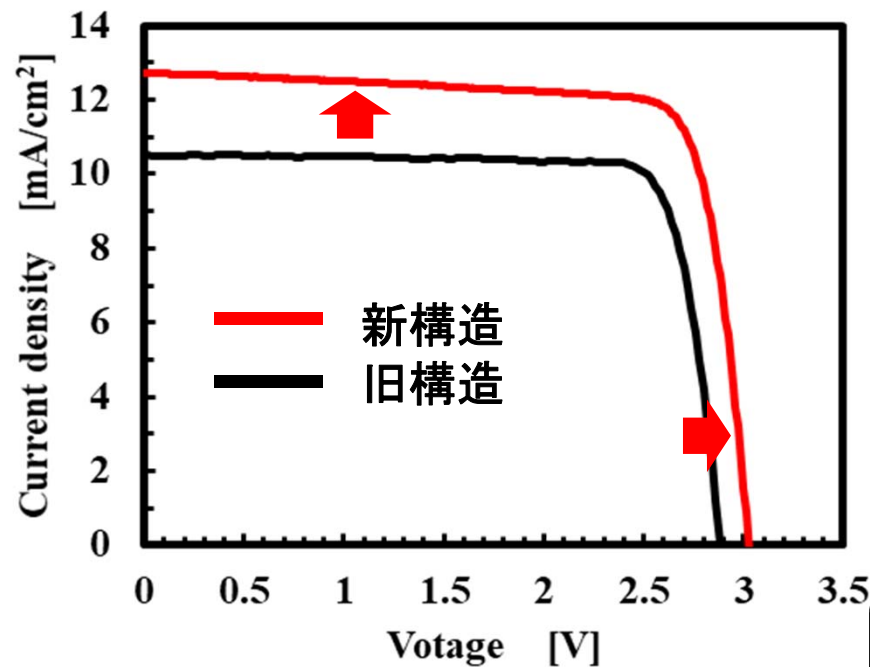


- ・トータルEQE効率~90%以上を広い波長領域で実現(430-970 nm)
- ・セル間の電流整合も比較的良好

GaAs//Si太陽電池

新型GaAs//Si多接合太陽電池

従来型との発電性能比較



	Old cell	New cell
Area (cm ²)	0.09538	0.09538
J_{sc} (mA/cm ²)	10.51	12.72
V_{oc} (V)	2.88	3.03
FF	0.83	0.80
η (%)	25.1	30.8

性能改善のポイント

ワイドギャップAlGaAs ミドルセルの適用
低い再結合損失のTOPCon Si セルの適用

- ・発電効率は、**25.1 %** から **30.8 %** に改善
- ・効率改善は、**開放電圧**および**短絡電流の改善**による

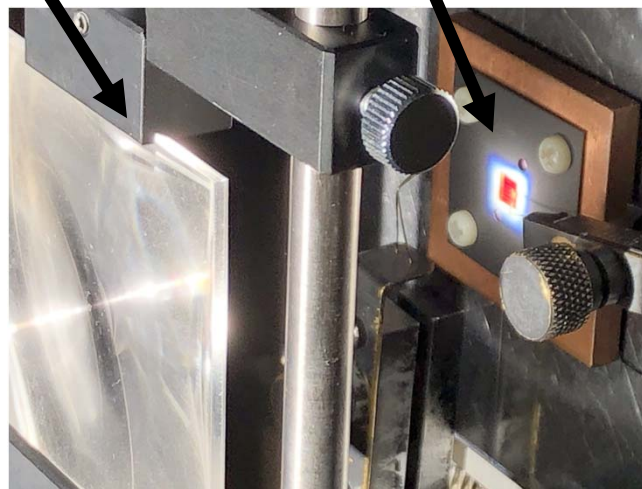
GaAs//Si太陽電池

新型GaAs//Si多接合太陽電池

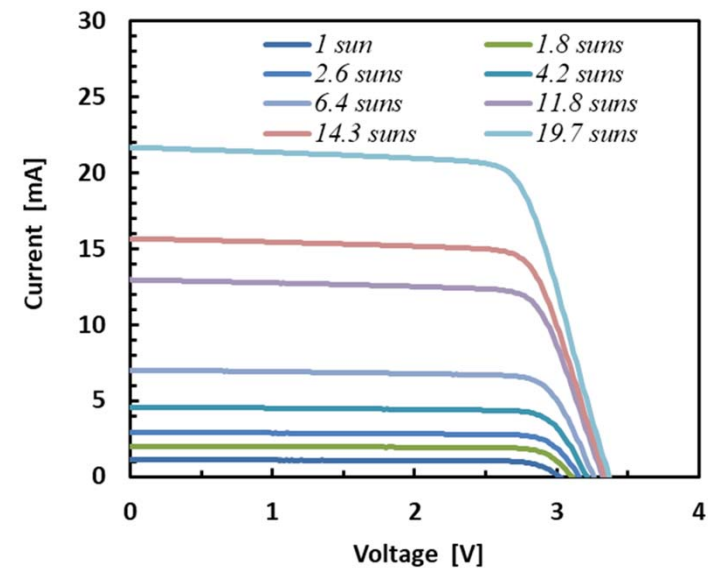
低倍集光実験

Fresnel lens
(bifocal type)

Solar cell



AM 1.5G



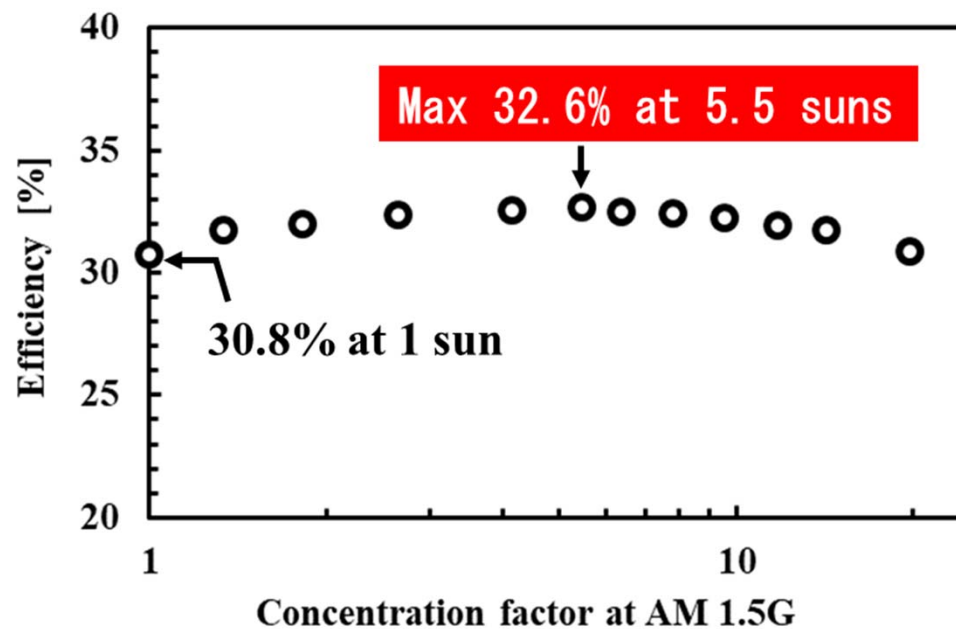
I-V 特性の集光率依存性

- ・集光はフレネルレンズ(二焦点)を適用
- ・集光率は、1 sunでの光電流をベースラインとして決定

GaAs//Si太陽電池

新型GaAs//Si多接合太陽電池

低倍集光性能



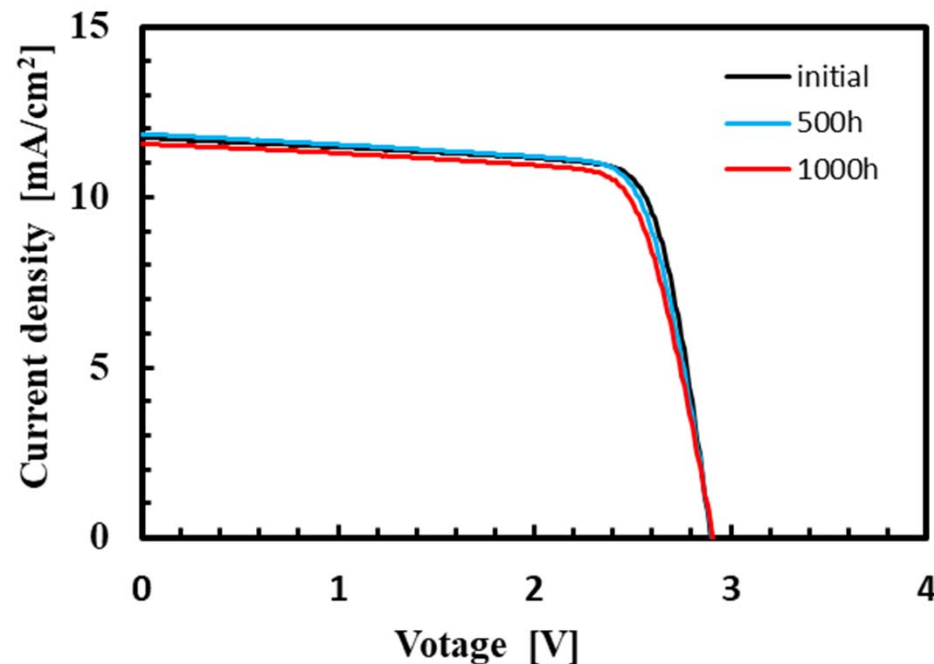
	1 sun	5.5 suns
J_{sc} (mA/cm ²)	12.72	-
V_{oc} (V)	3.03	3.24
FF	0.80	0.80
η (%)	30.8	32.6

- ・集光時の最大発電効率～32.6% at 5.5 suns
- ・低倍集光領域(<10 suns)において30%以上を保持、実用性能確認

GaAs//Si太陽電池

新型GaAs//Si多接合太陽電池

信頼性試験 (ダンプヒートテスト)



•Stress Condition

Temperature / Humidity: **85 °C/85%**
Time: **1000 h**

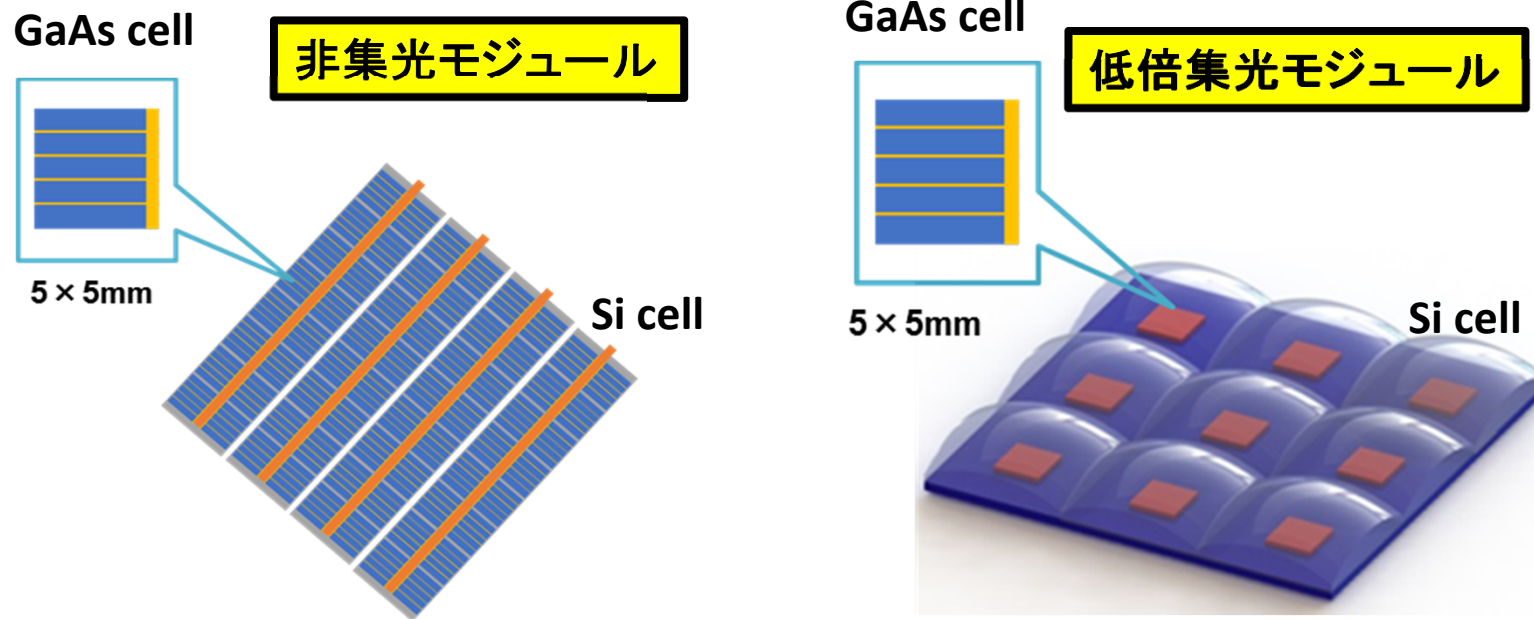
Time [hours]	Efficiency [%]
initial	26.4
500	26.1
1000	25.3

- ・発電効率の劣化および剥離等の物理的ダメージは観測されず
- ・スマートスタックGaAs//TOPCon Si の接合界面は安定

GaAs//Si太陽電池

GaAs//Si多接合太陽電池モジュール

スマートスタックモジュールのイメージ



- ・モジュール効率~30%がターゲット(車載搭載等への目標効率~ 1 kW/3.3m²)
- ・非集光モジュールは、既存のSiモジュール技術をベース
- ・低倍集光モジュールは、トラッキングフリーを可能とするレンズを搭載

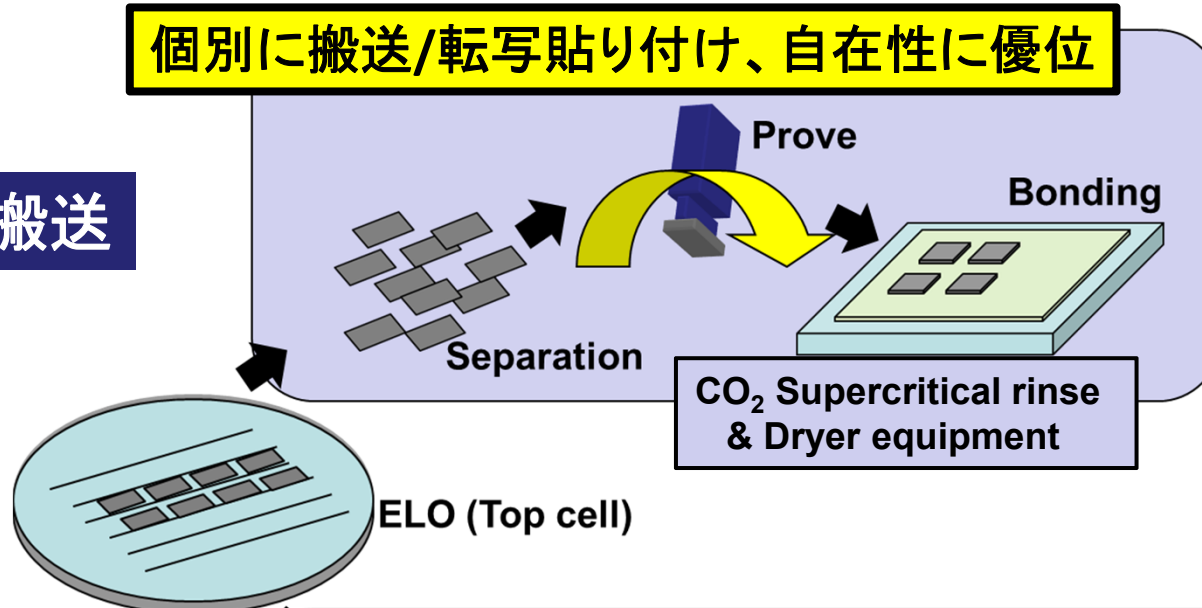
GaAs//Si太陽電池

GaAs//Si多接合太陽電池モジュール

スマートスタックモジュールの実装イメージ

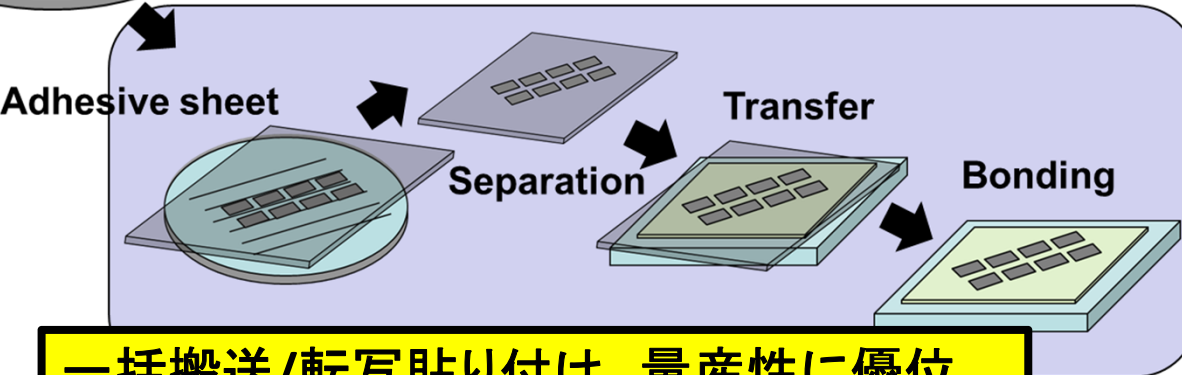
個別搬送

個別に搬送/転写貼り付け、自在性に優位



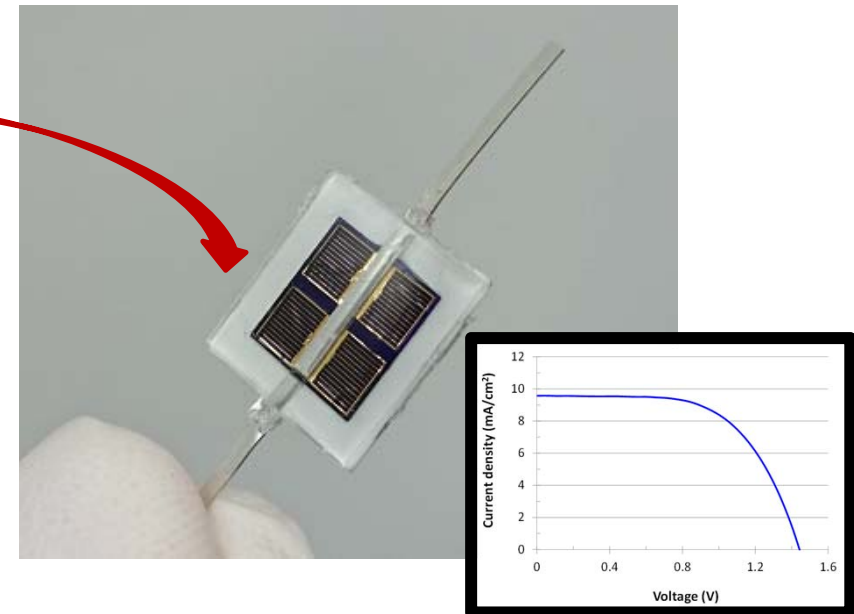
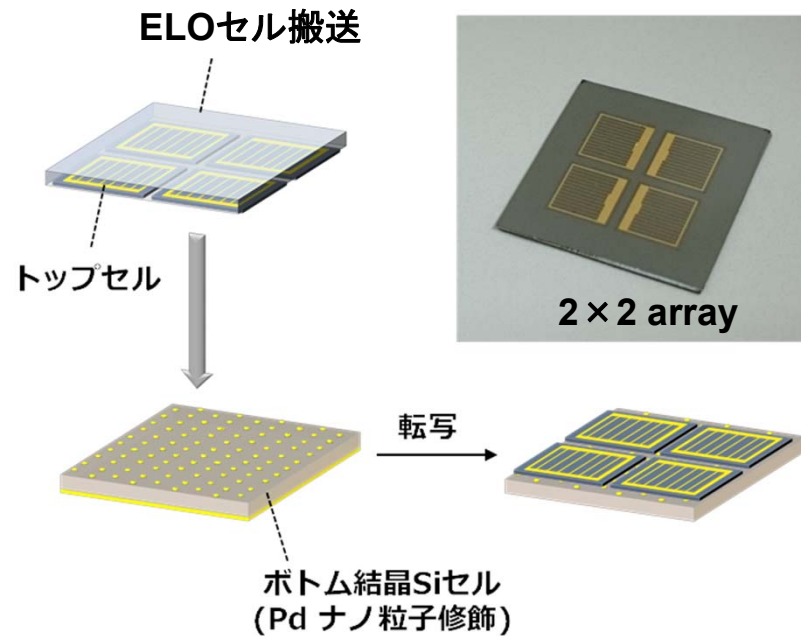
一括転写

一括搬送/転写貼り付け、量産性に優位



GaAs//Si太陽電池

GaAs//Si スマートスタックモジュール



スマートスタック一括転写

スマートスタックモジュール

- ・一括転写を用いたアレー素子化
- ・Siモジュール技術を踏襲したスマートスタックモジュールを試作

Contents

1. 背景
2. スマートスタック技術
3. GaAs//Si 3J スマートスタック素子の試作
4. スマートスタック技術の今後の展望
5. 結論

今後の展望

多接合太陽電池のトレンド

超高効率(効率>40%)

III-V族系多接合構造

・GaAs on InP

高効率/低コスト特性(30% & US\$ 0.1/W)

異種材料多接合太陽電池

・III-V on Si (CIGS)

・ペロブスカイト on Si (CIGS)

異種材料多接合太陽電池の実用化

高効率Si適用が鍵(PERC、TOPCon、**HIT**)

低コスト化追求

Pd ⇒ **Cu**等の低コスト金属

スマートスタック技術の展開

汎用性の拡大

スマートスタック技術改良

機能性の開発

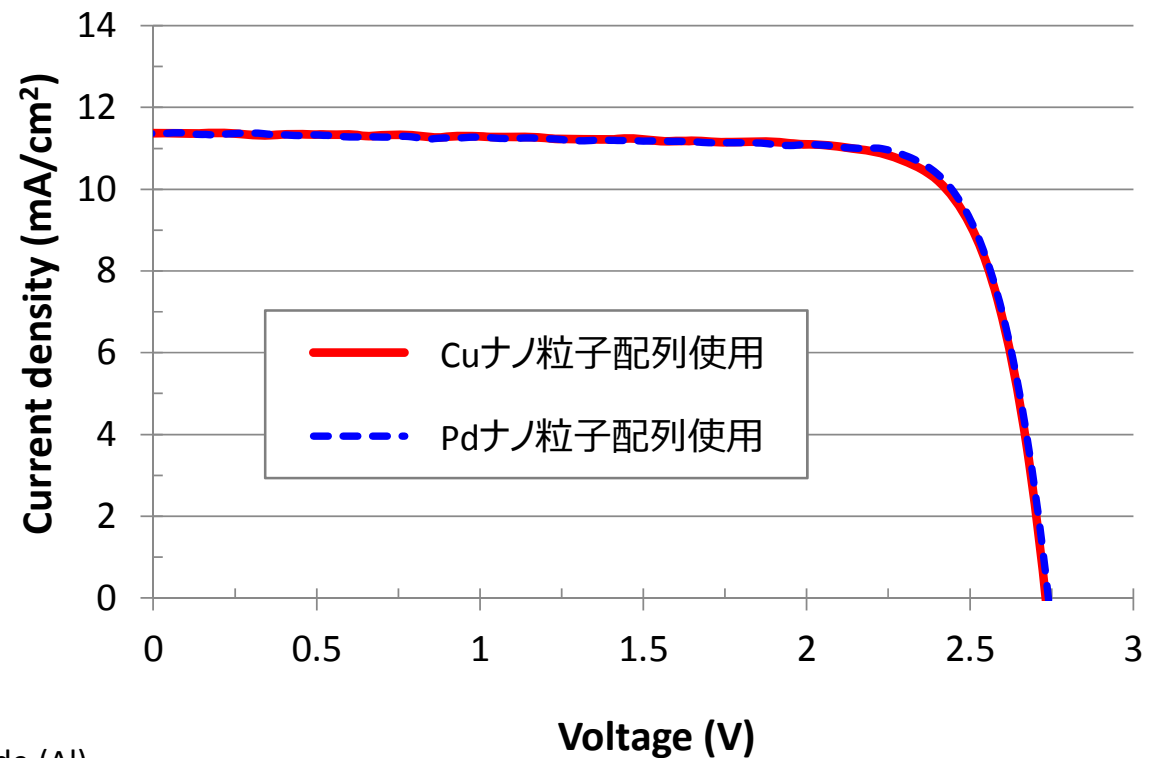
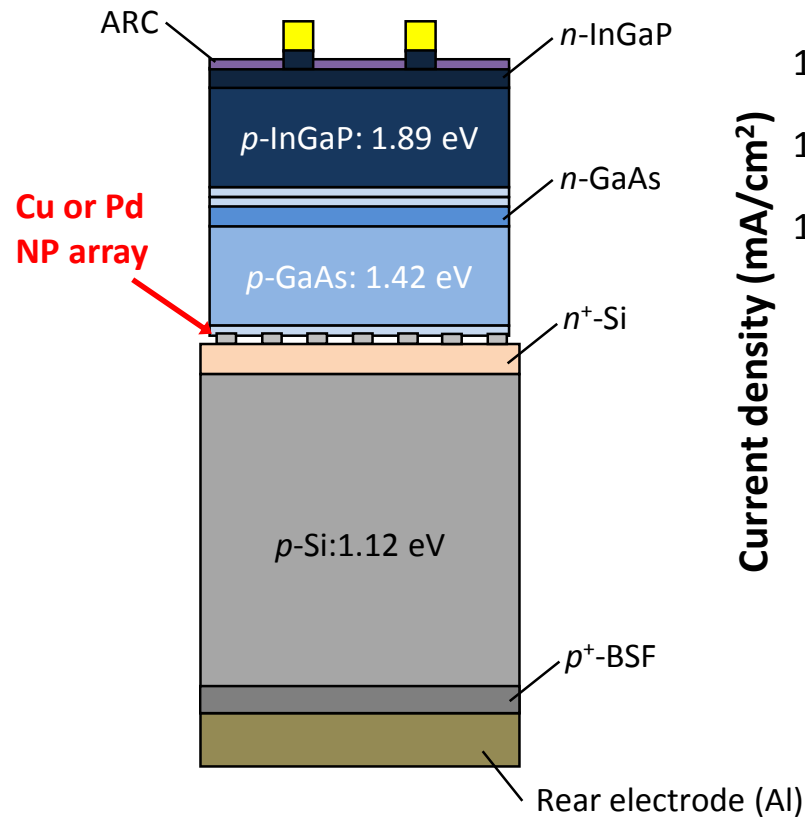
車載搭載等に適した機能の開発

今後の展望

関連発表
ポスター発表_水野(AIST)

低コスト化：金属ナノ粒子材料の再検討 PdからCuへ

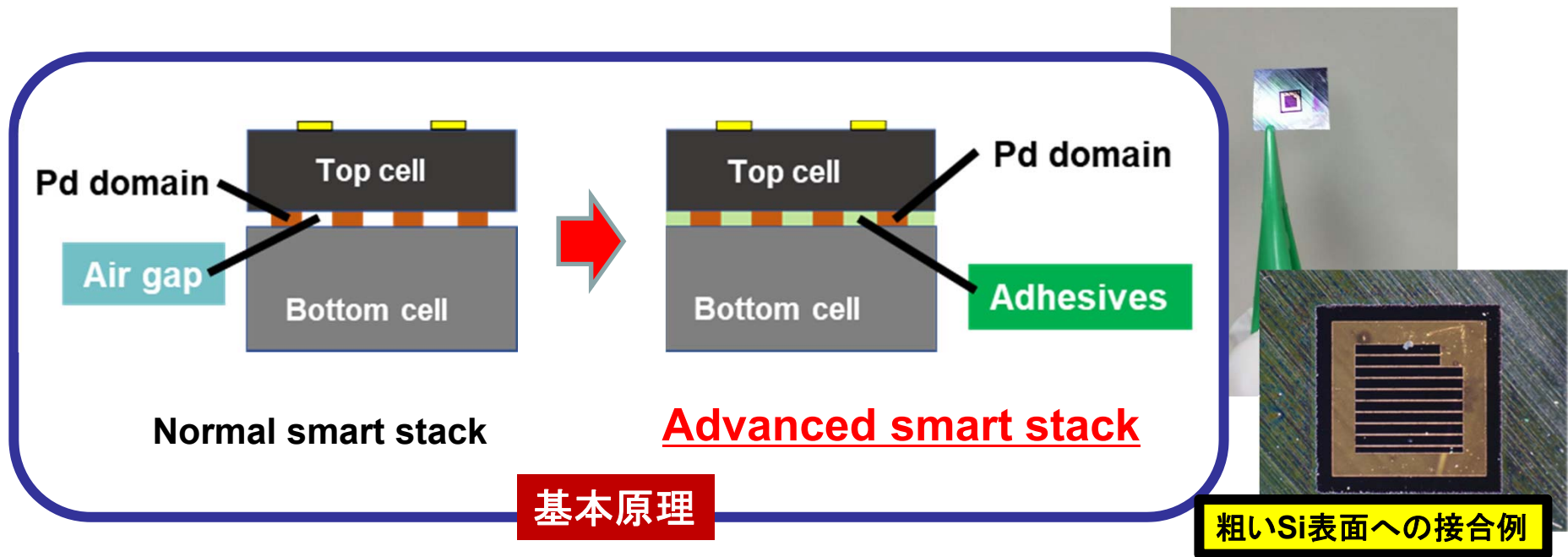
安価な銅を用いても、同等の特性が得られることを確認



今後の展望

信越化学工業(株)様御協力

汎用性： スマートスタック技術改良



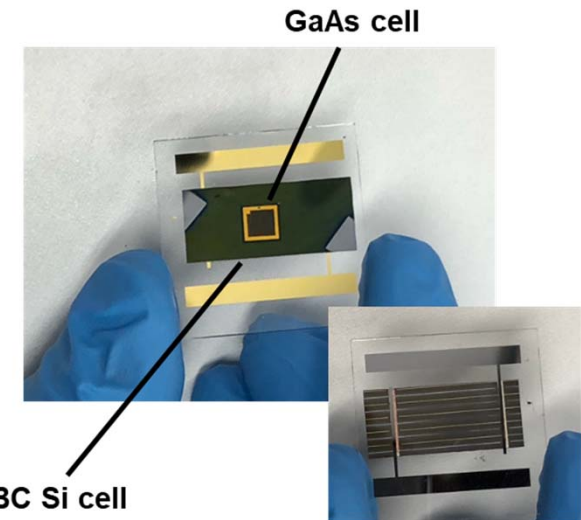
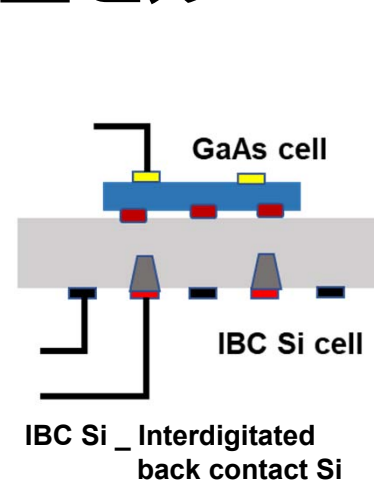
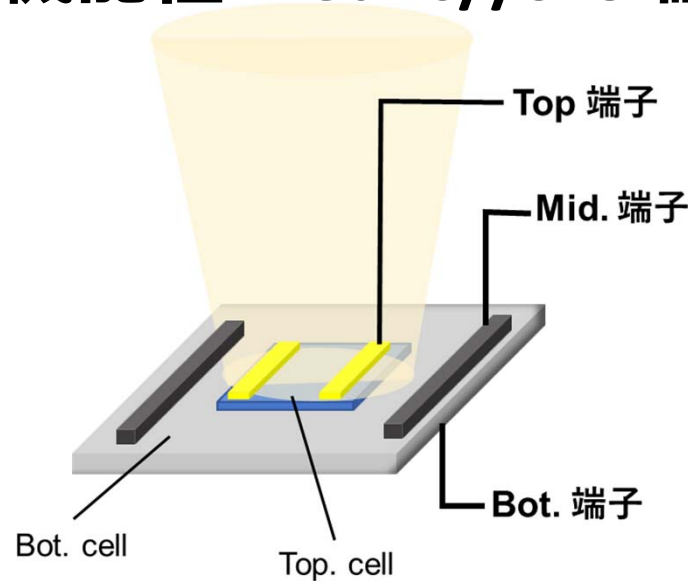
- ・粘着剤のアシストによるスマートスタック技術
⇒ 接合界面は、ナノ粒子と粘着剤からなる
- ・接合強度の増強、接合面に要求される平滑性の緩和が特長
- ・将来的には、CMP工程簡便化あるいはCMPフリーに寄与
- ・様々な材料等への適用、汎用性拡大

今後の展望

関連発表(3端子型セル)
ポスター発表_①太野垣(AIST)、②渡辺(長岡技科大)

関連発表(IBC Si)
トピックス講演_立花(AIST)

機能性 : GaAs//Si 3端子型セル



GaAs//Si 3端子型スマートスタック素子

3端子型太陽電池
(部分集光も付加される形態あり)

- ・3端子構成からなるスマートスタック素子(部分集光も可能)
太陽光スペクトルの最大活用かつスペクトル変動に強い
部分集光は高価なトップGaAsセルの面積削減に貢献
- ・IBC Siの適用により配線簡易化
- ・車載搭載等への応用を視野に入れて開発

結論

- 多接合太陽電池の製法としてPdナノ粒子を介在したスマートスタック技術を開発。
- スマートスタック技術による接合界面では、抵抗 $1\ \Omega\text{cm}^2$ 以下、光損失3%を確認。
- スマートスタックGaAs//InP 4接合太陽電池において発電効率 $\sim 32.73\%$ （トータルエリア）達成。
- スマートスタックGaAs//CIGS 3接合太陽電池において発電効率 $\sim 24.2\%$ 実現。
- NEDOプロジェクトとしてGaAs//Si 多接合太陽電池の開発を遂行。
- Fraunhofer ISEとの連携により、InGaP/AlGaAs//TOPCon Si 3接合太陽電池において、発電効率 $\sim 30.8\%$ （1 sun）達成。また、低倍集光では最大発電効率 $\sim 32.6\%$ （5.5倍集光）を達成。
- 低コスト化技術としてCuナノ粒子を用いたスマートスタック接合を開発中。
- 汎用性拡大の観点より、粘着剤アシストによるスマートスタック技術を開発中。
- 高効率/低コストとしてスマートスタック技術を用いた3端子型太陽電池を提案、開発中。
- 今後はスマートスタック技術の実用化に向け活動を行う。

付録： 関連文献

関連特許

特許名称	番号	備考
半導体素子の接合方法および接合構造	特許5875124	スマートスタック基本特許 CN, EP登録、US係争中
太陽電池およびその製造法	特願2019-056782	CIGSタンデム化特許
多接合光電変換素子および多接合太陽電池	PCT/JP2019/025409	3端子型太陽電池
半導体素子の接合法および接合構造	出願手続き中	粘着剤スマートスタック

関連発表論文

- 1) H. Mizuno *et al.*, Appl. Phys. Lett., 101, 191111 (2012).
- 2) K. Makita *et al.*, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3AO.4.1, p. 1427 (2014).
- 3) H. Mizuno *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 55, 025001 (2016).
- 4) H. Mizuno *et al.*, Appl. Phys. Express, 10, 072301 (2017).
- 5) M. Baba *et al.*, Progress in Photovoltaics, 25, 255 (2017).
- 6) K. Makita *et al.*, Progress in Photovoltaics, *to be published*.