

スマートスタック太陽電池 の進展

太陽光発電研究センター
先進多接合デバイスチーム
菅谷武芳

謝辞

- 太陽光発電研究センター：
牧田紀久夫、大島隆治、太野垣健、西永慈郎、松原浩司
- 再生可能エネルギー研究センター：
水野 英範、望月敏光、高遠秀尚、仁木栄
- 宇宙航空研究開発機構：今泉充氏、川北史郎氏
- 東京理科大：古川昭雄先生、野中翔一郎氏
- 長岡科学技術大：山田昇先生、馬場将亮氏
- 東京都市大学：岡野好伸先生、望月透氏、長門優喜氏

本研究は、国立研究開発法人NEDO超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発の委託の下で行われた。

発表内容

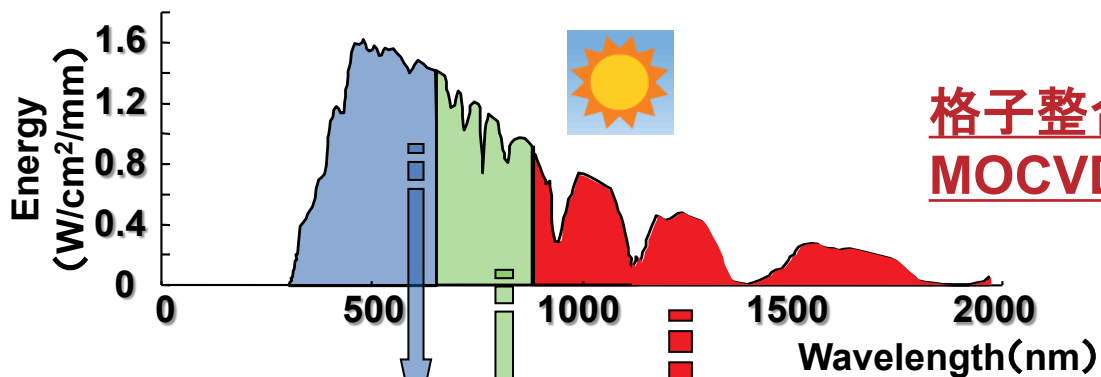
1. イントロダクション
2. スマートスタック技術について
3. 異種多接合太陽電池

InGaP/GaAs on InGaAsP/InGaAs
CIGSe
Si

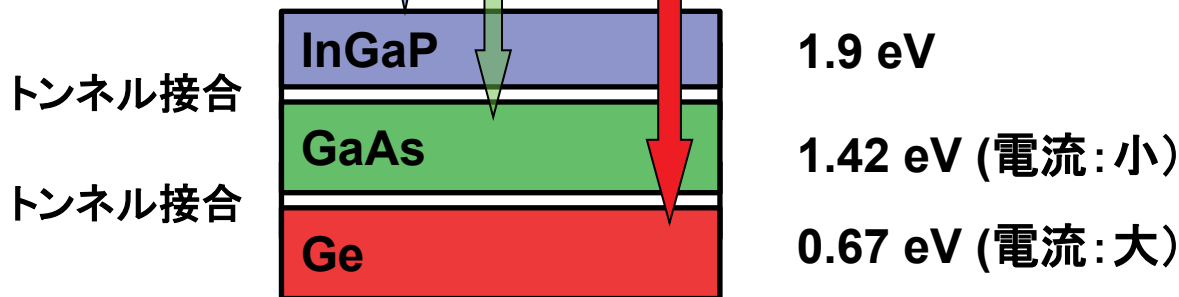
4. 信頼性について
5. メカニズム
6. まとめ

多接合太陽電池

種類の異なる(吸収波長の異なる)太陽電池セルを直列につなぎ合わせ、太陽光の波長全体を吸収することにより変換効率を高める太陽電池

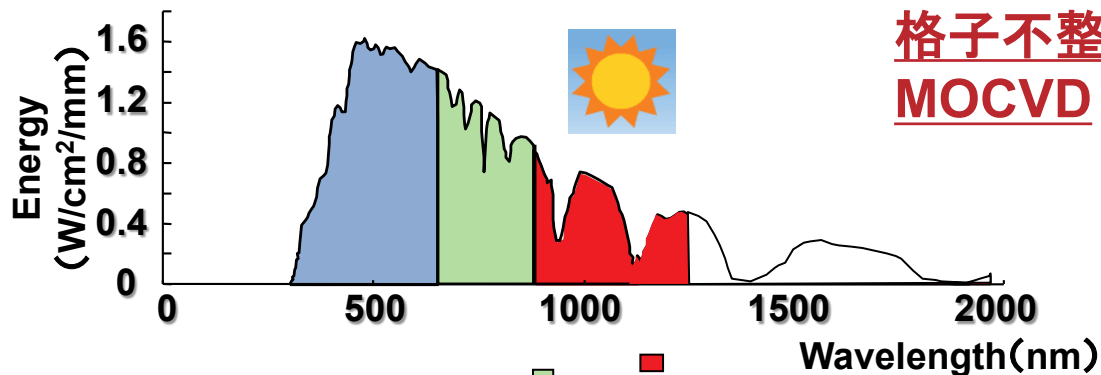


格子整合系、モノシリック成長技術
MOCVD

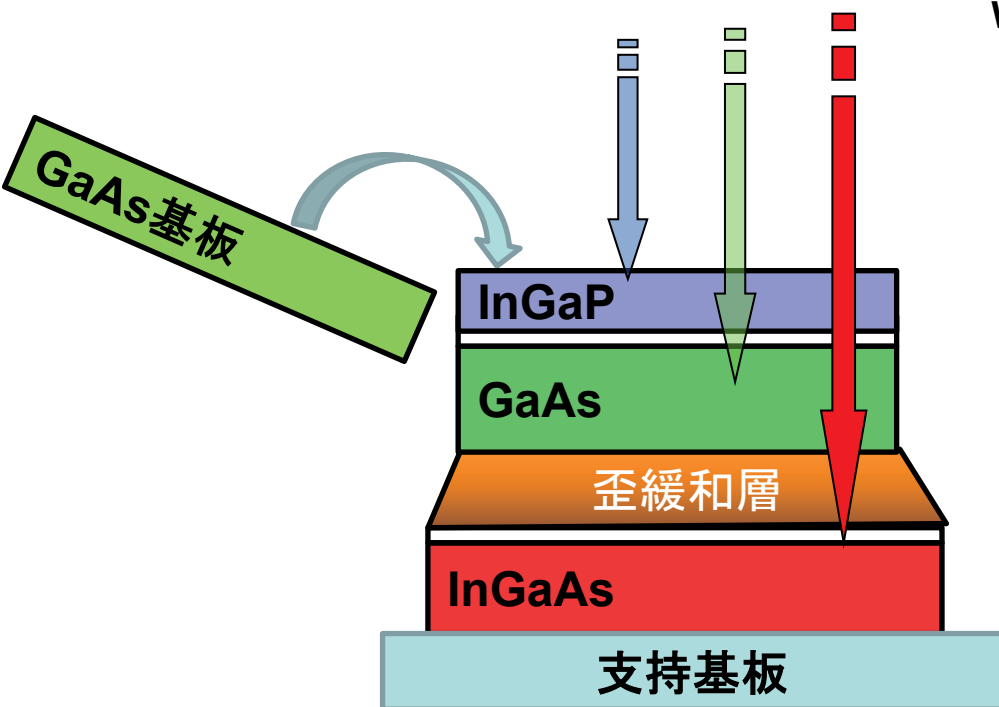


電流ミスマッチがあり、超高效率化には限界。

超高効率多接合太陽電池



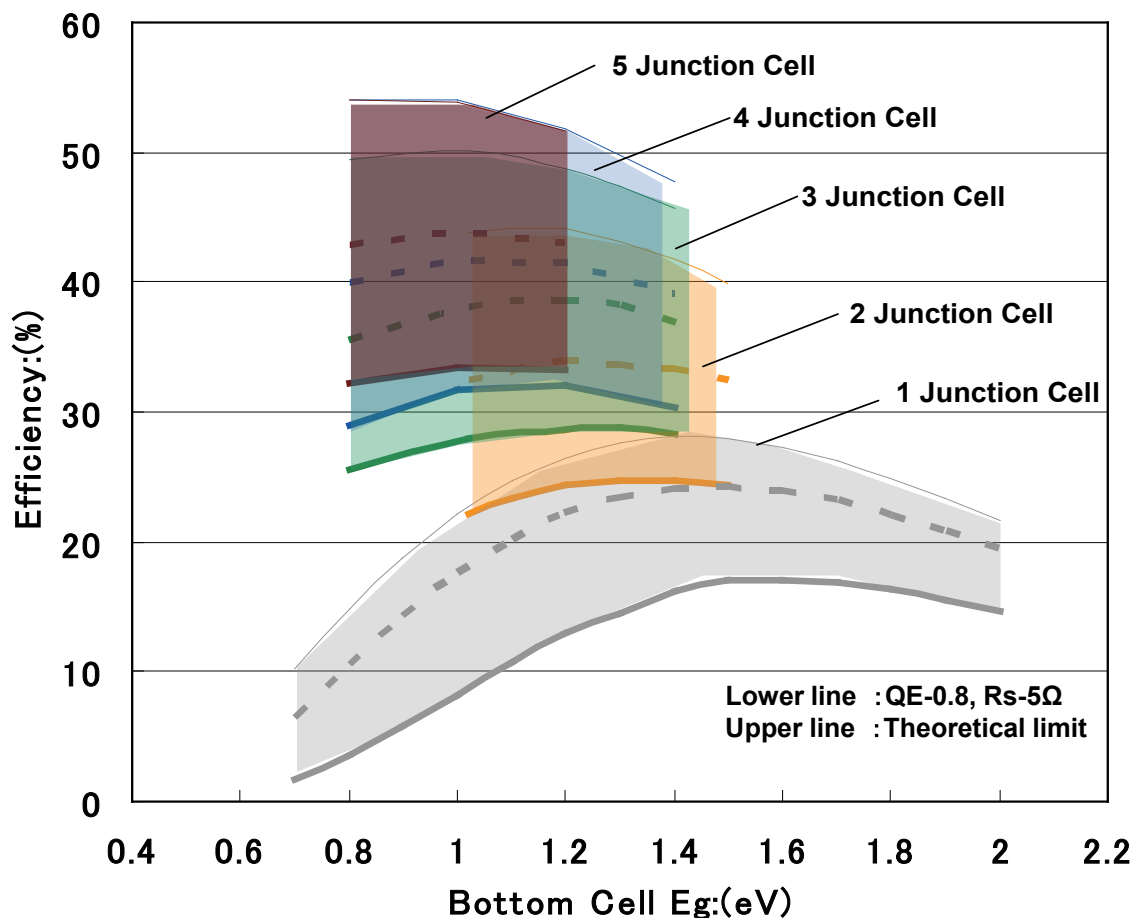
格子不整合系、モノシック成長
MOCVD



Sharp
逆積み歪緩和成長技術
44.4% : 集光
37.9% : 1 sun

※成長技術は非常に高度

接合数による変換効率の理論値



・3接合までは従来技術(モノリシック成長法)で37.9%(1 sun)が達成されている。

※それ以上の接合数ではメカニカルスタック技術が必須。

(2015年:NREL, モノリシック4接合, 集光45.6%)

超高効率多接合太陽電池

★半導体接合技術

GaAs、InP上成長層の直接接合

真空中で半導体表面をプラズマ、イオンビームなどで活性化

超高効率4、5接合 太陽電池

46.0% : 集光,

4 接合, A. Bett, et al., Fraunhofer, Soitec

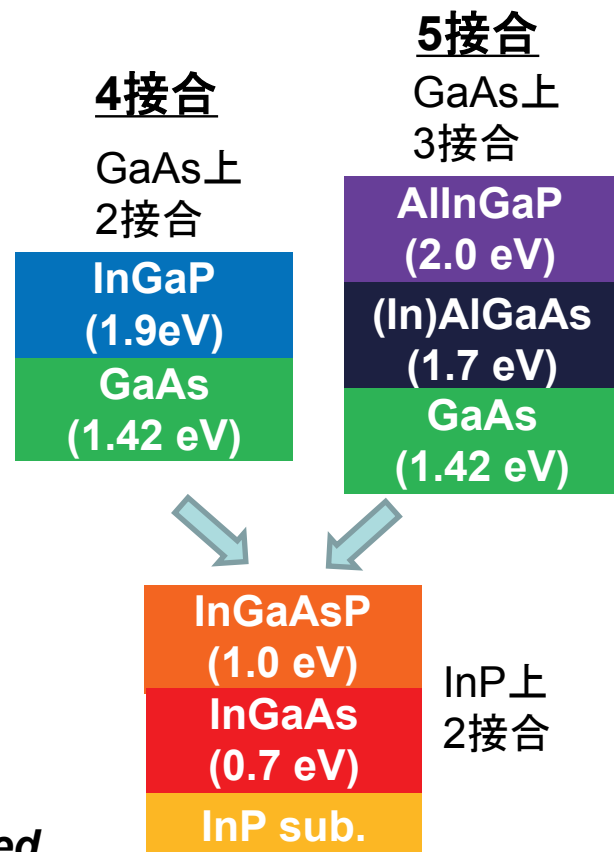
38.8% : 1 sun

5 接合, R. King, et al., Spectrolab.

・トップセル: GaAsベース 2、3接合
AllInGaP/(In)AlGaAs/GaAs

・ボトムセル: InPベース2接合
InGaAsP /InGaAs

Connected

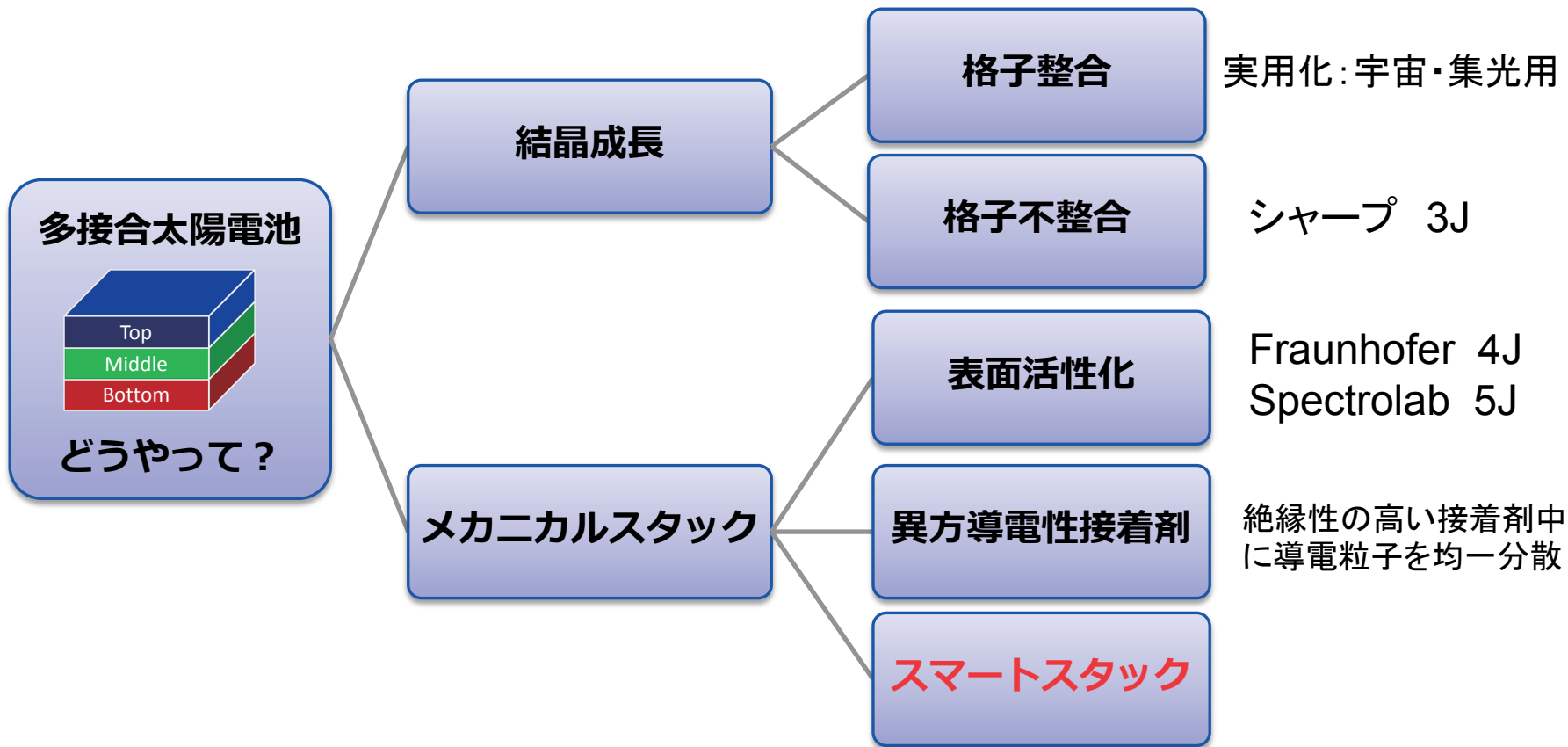


現状接合技術の課題

1. 表面平坦性(～1 nm以下)
III-V族同士なら問題ないが、**CIGSe系との接合は困難。**
2. プラズマ照射装置やイオンビーム装置、超高真空装置等の大型装置が必要。
(プラズマによる表面活性化の場合、高温プロセス)
3. 接合時の加圧 : ～>100 N/cm²
★現状III-V族に特化しており、基板、成長層、接合装置も高価

スマートスタックとは

産総研で開発した多接合太陽電池の**簡便、安価**な作製方法。

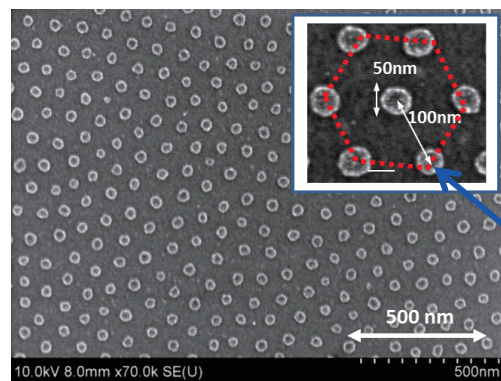
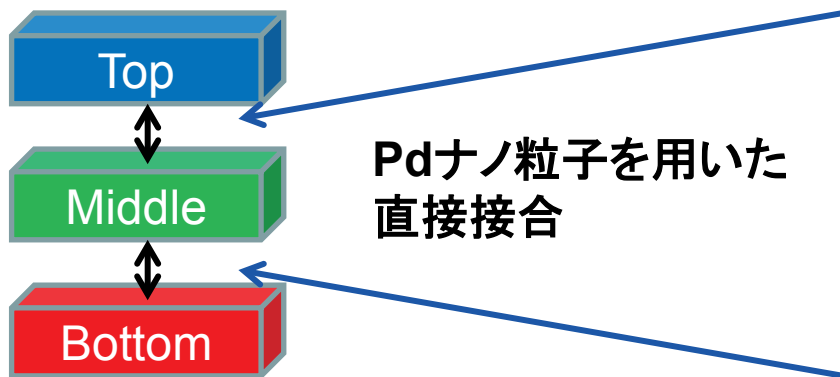


スマートスタック技術

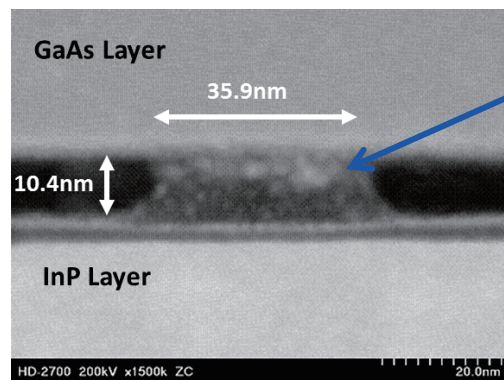
- 安価なサブセルをそれぞれ直接接合して、超高効率太陽電池を作りたい。

特徴は金属ナノ粒子配列を接合媒体としていること

スマートスタック技術



Pdナノ粒子

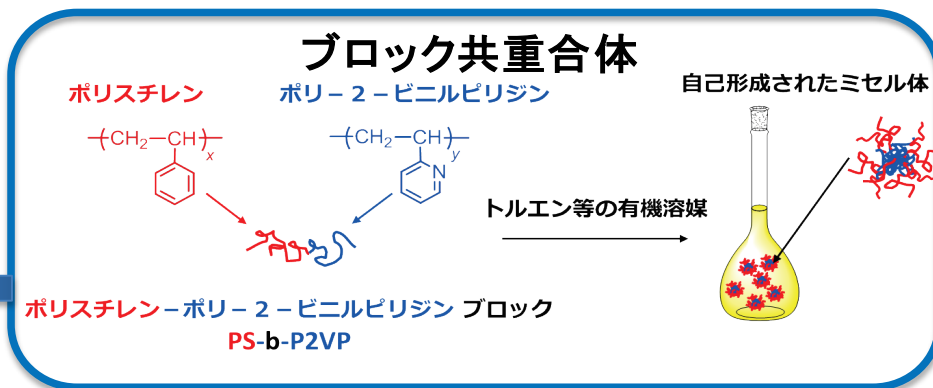


様々な種類の太陽電池を 自在に直接接合

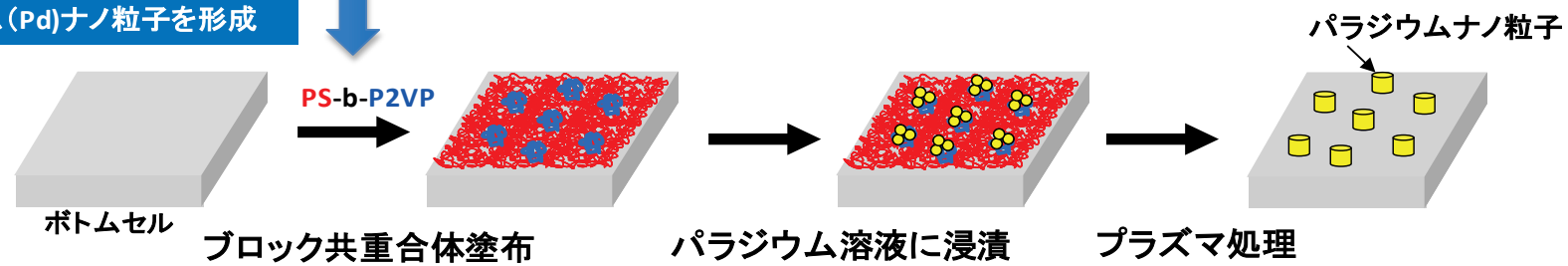
- ・接合抵抗: $< 1 \Omega\text{cm}^2$
- ・光吸収損失: $< \sim 2\%$

Pdナノ粒子作製工程

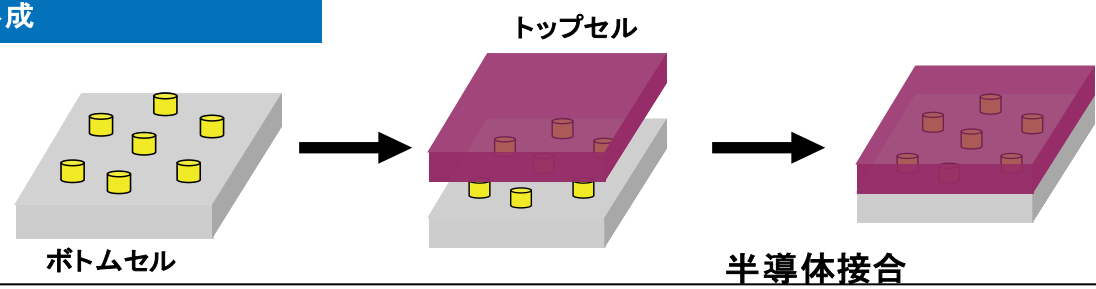
H. Mizuno *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 191111 (2012).



第1工程:
ブロック共重合体を用いてパラジウム (Pd) ナノ粒子を形成



第2工程:
半導体接合によりタンデム構造を形成



本製法は、III-V族、Si、CIGSe、Ge等、主要な太陽電池材料に適用可能

スマートスタック多接合太陽電池

トップセル ボトムセル

InGaP/GaAs// InGaAsP/InGaAs 4接合

CIGSe 3接合

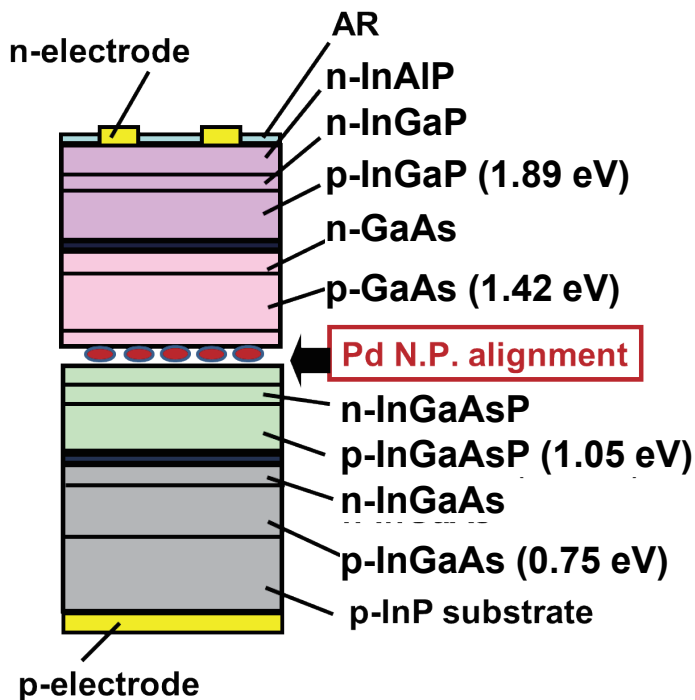
Si 3接合

III-V族 4接合太陽電池

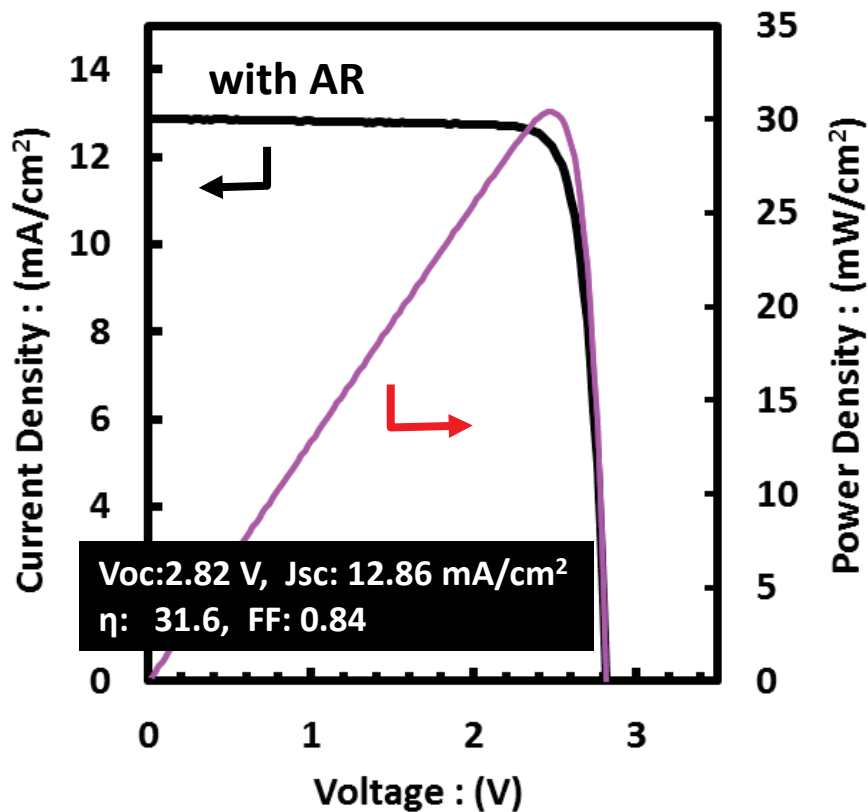
InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs 4接合太陽電池

H. Mizuno *et al.*, JJP **55**, 025001 (2016).

PVSEC-25, GAS-O-13 (2015).



個体ソースMBEによる
P系、AsP系の成長



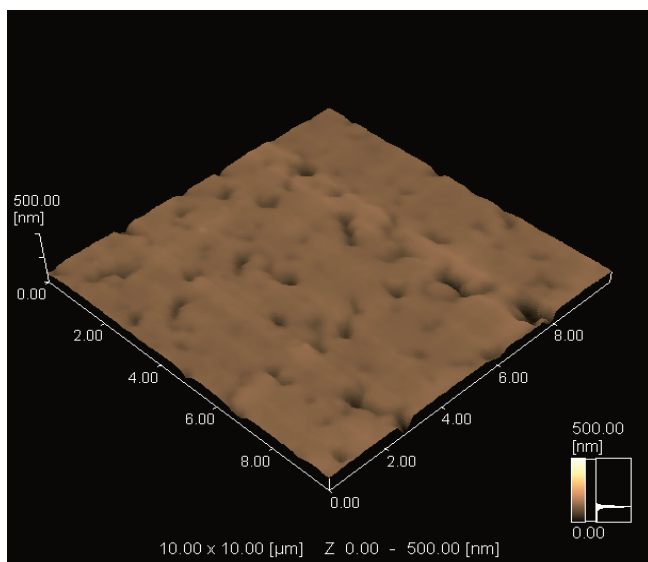
変換効率: 31.6%

CI(G)Se上スタック技術

通常の技術では接合困難

- ・InGaP(1.89 eV)/GaAs(1.42 eV)//CISe(1.0 eV)で理想的な3接合セルが作製可能。
- ・CI(G)Seが放射線耐性に優れるため、宇宙応用に有利。

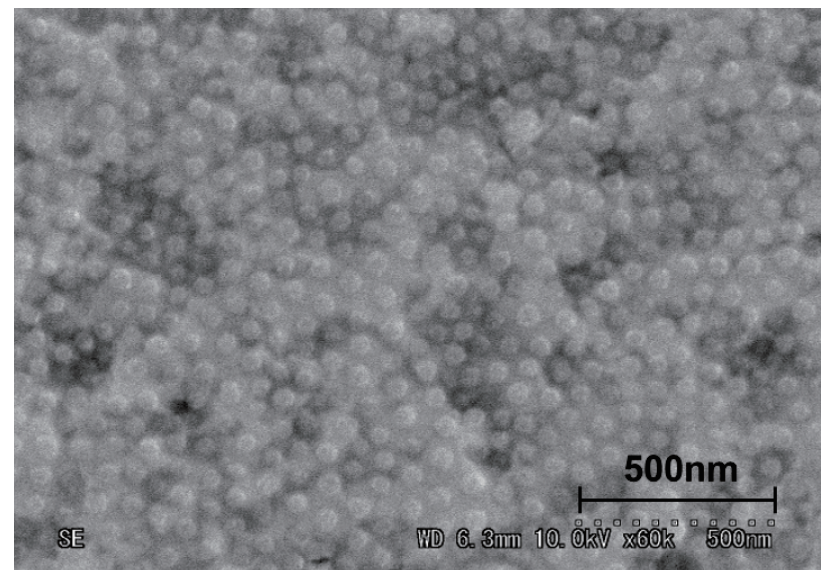
CMP 研磨プロセス



Surface AFM-image of CIGSe cell

After CMP: $R_q < 10 \text{ nm}$

Pd ナノ粒子配列プロセス



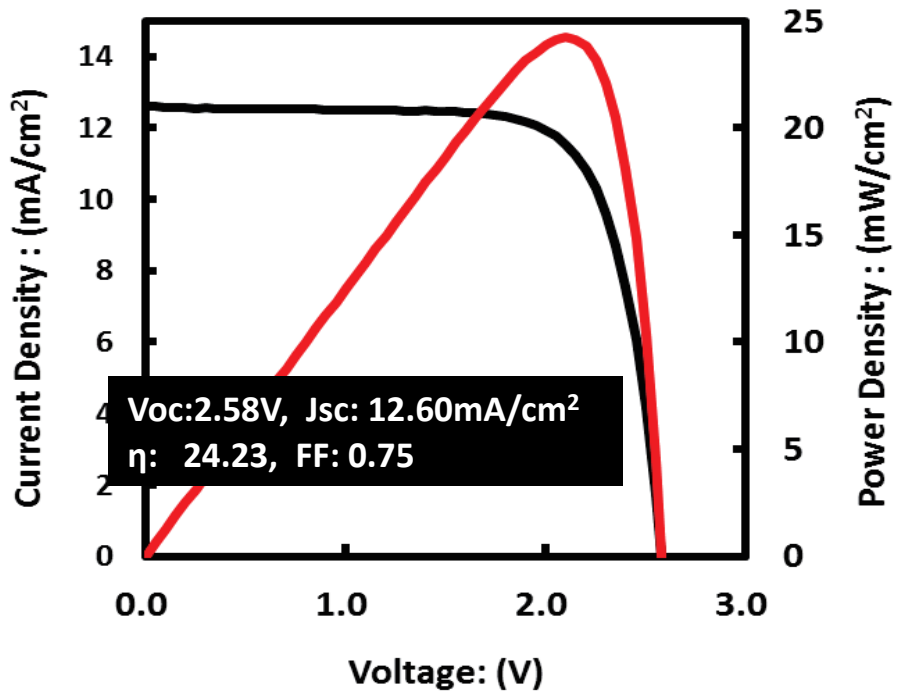
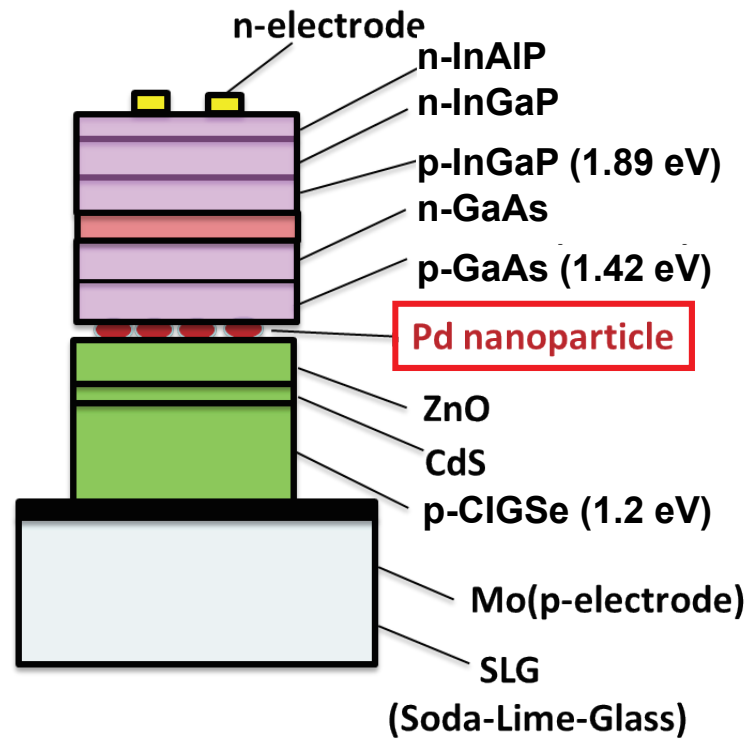
Pd nanoparticle alignment on CIGSe cell

Size $\sim 50 \text{ nm}$, Spacing $\sim 100 \text{ nm}$

InGaP/GaAs//CIGSe 3接合

InGaP/GaAs/CuInGaSe 3接合太陽電池特性

Makita et al., Proc. EUPVSEC 2014, 1427 (2014).



・2端子GaAs/CIGS系はスマートスタックのみ

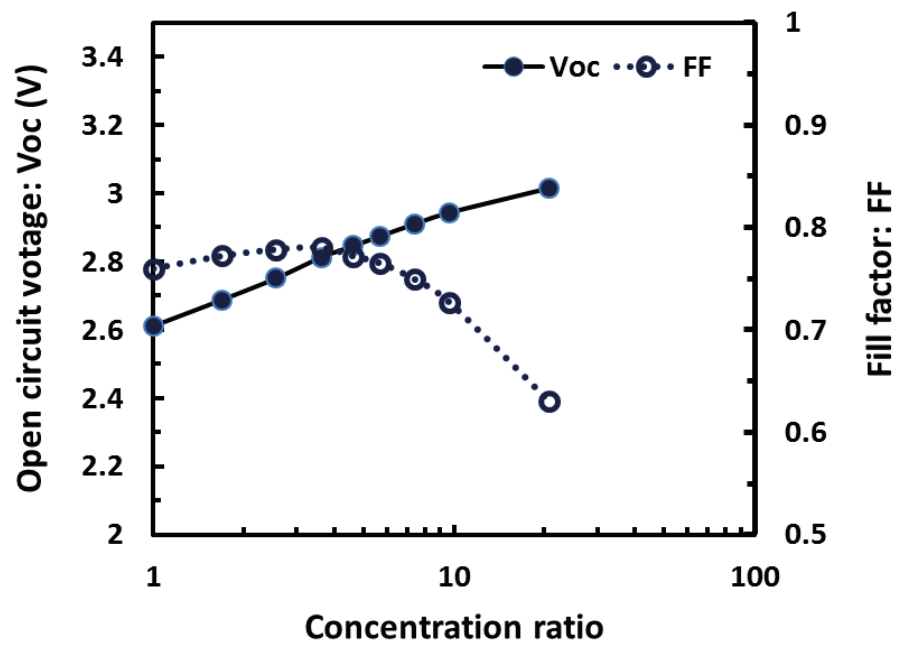
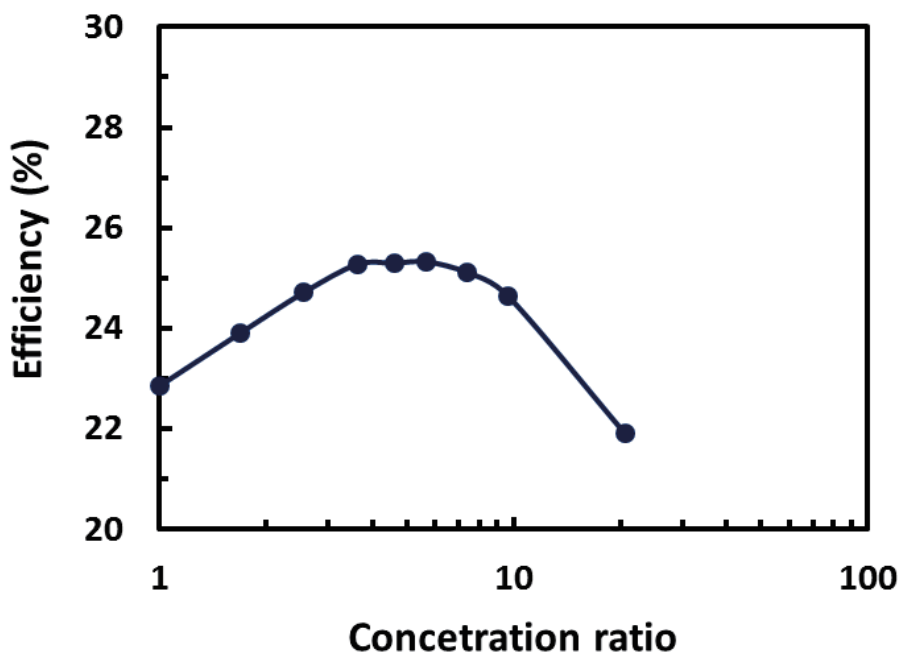
変換効率: 24.2%

InGaP/GaAs//CIGSe 3接合

牧田他、ポスター「スマートスタック技術による低コスト多接合太陽電池の開発」

InGaP/GaAs/CIGSe 低倍集光実験

22.8% @sun=1 → 25.3% @sun=5.7



・2端子GaAs/CIGSe系で初めての集光実験
 ・25.3%は最高性能

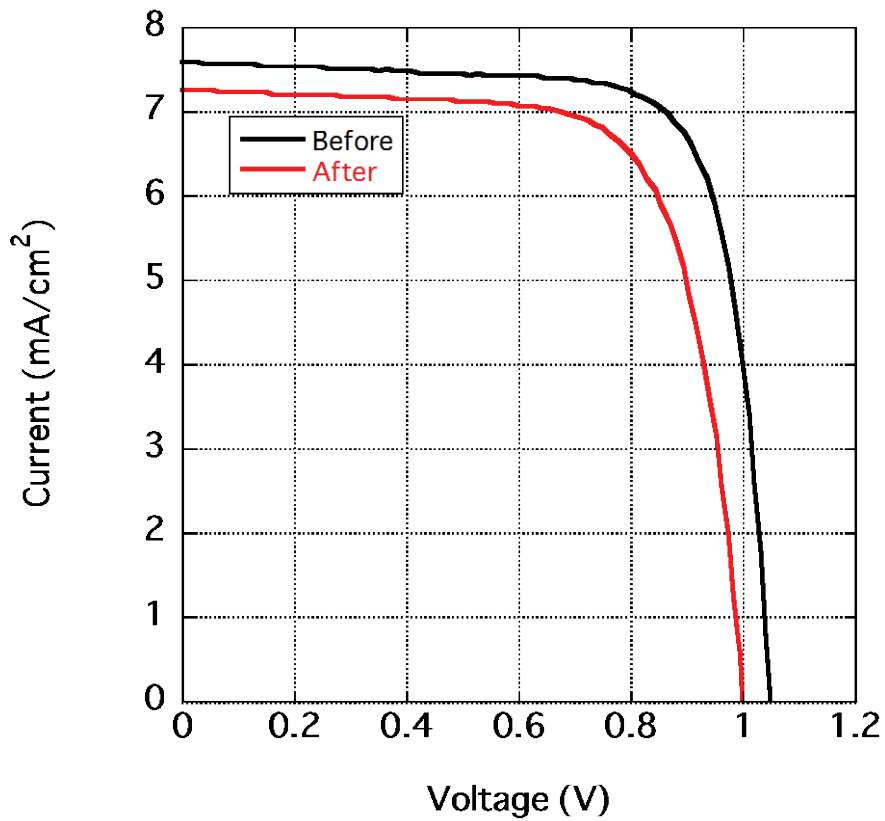
放射線耐性(GaAs//CIGSeスマートスタックcell)

EUPVSEC 2015, 川北(JAXA)ら

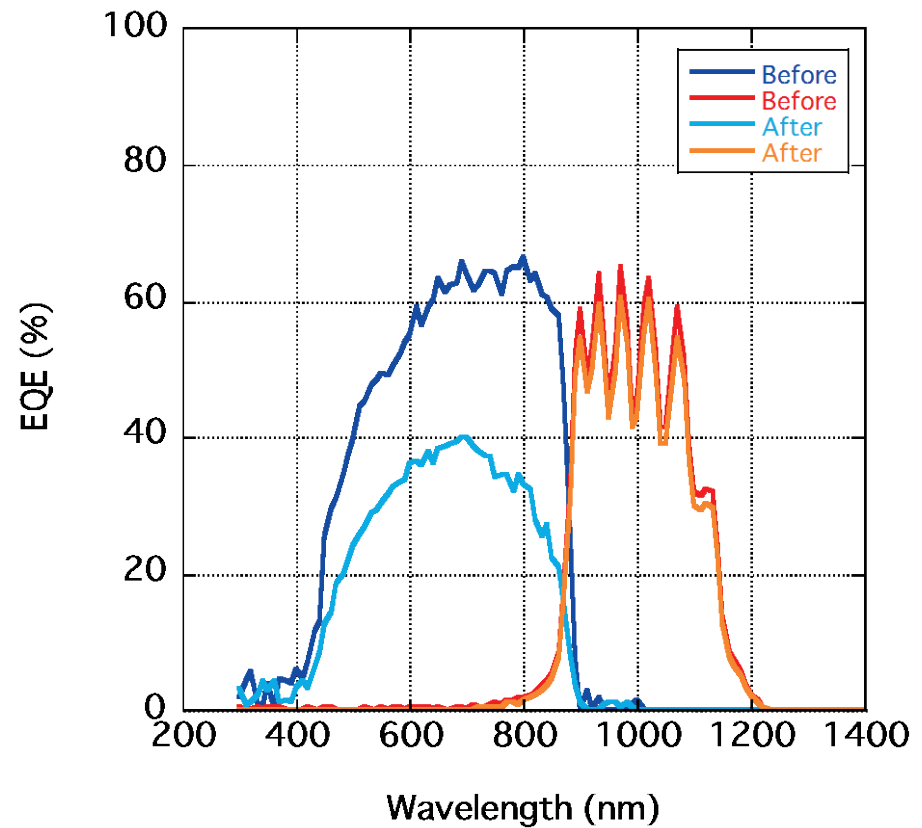
ポスター発表「高効率・高放射線耐性 InGaP/GaAs/CIGS
スマートスタック太陽電池の研究」

電子線照射特性

・エネルギー 1MeV, 照射量 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, 窒素雰囲気



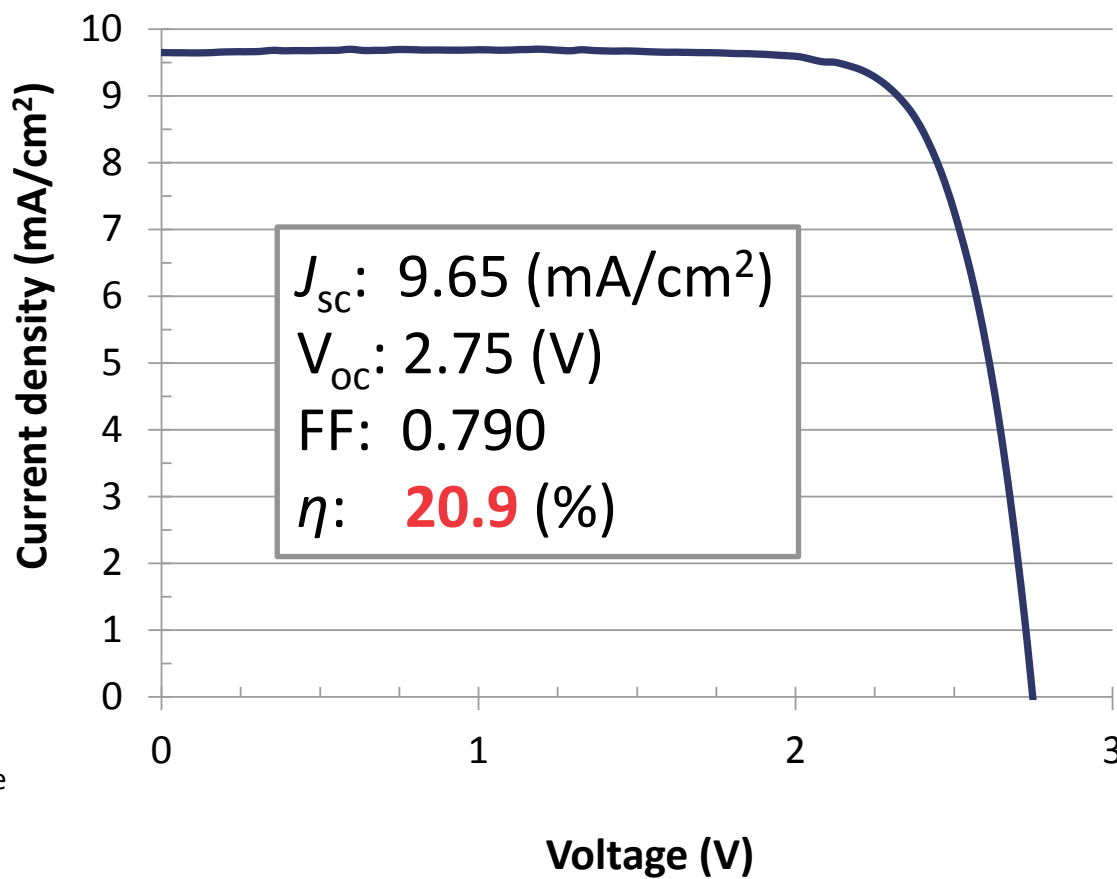
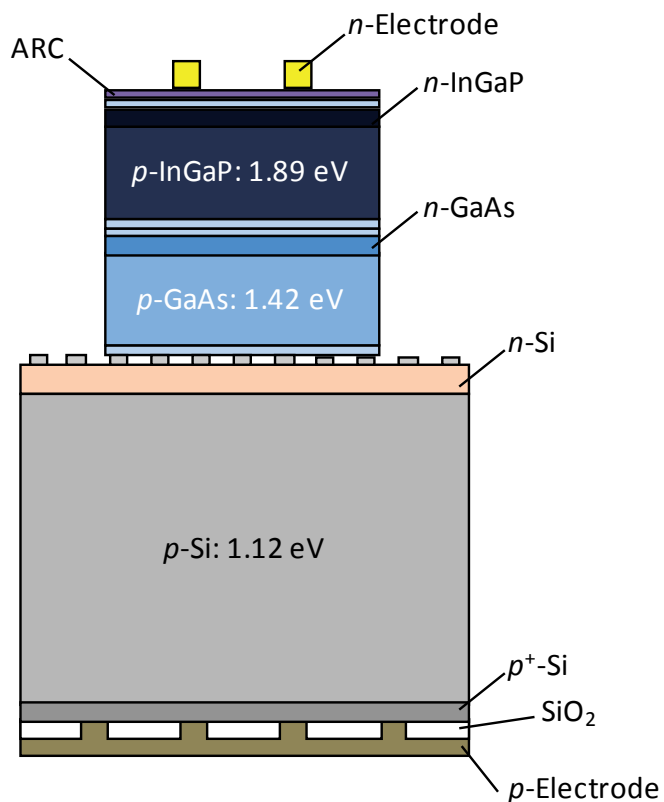
光電流電圧特性



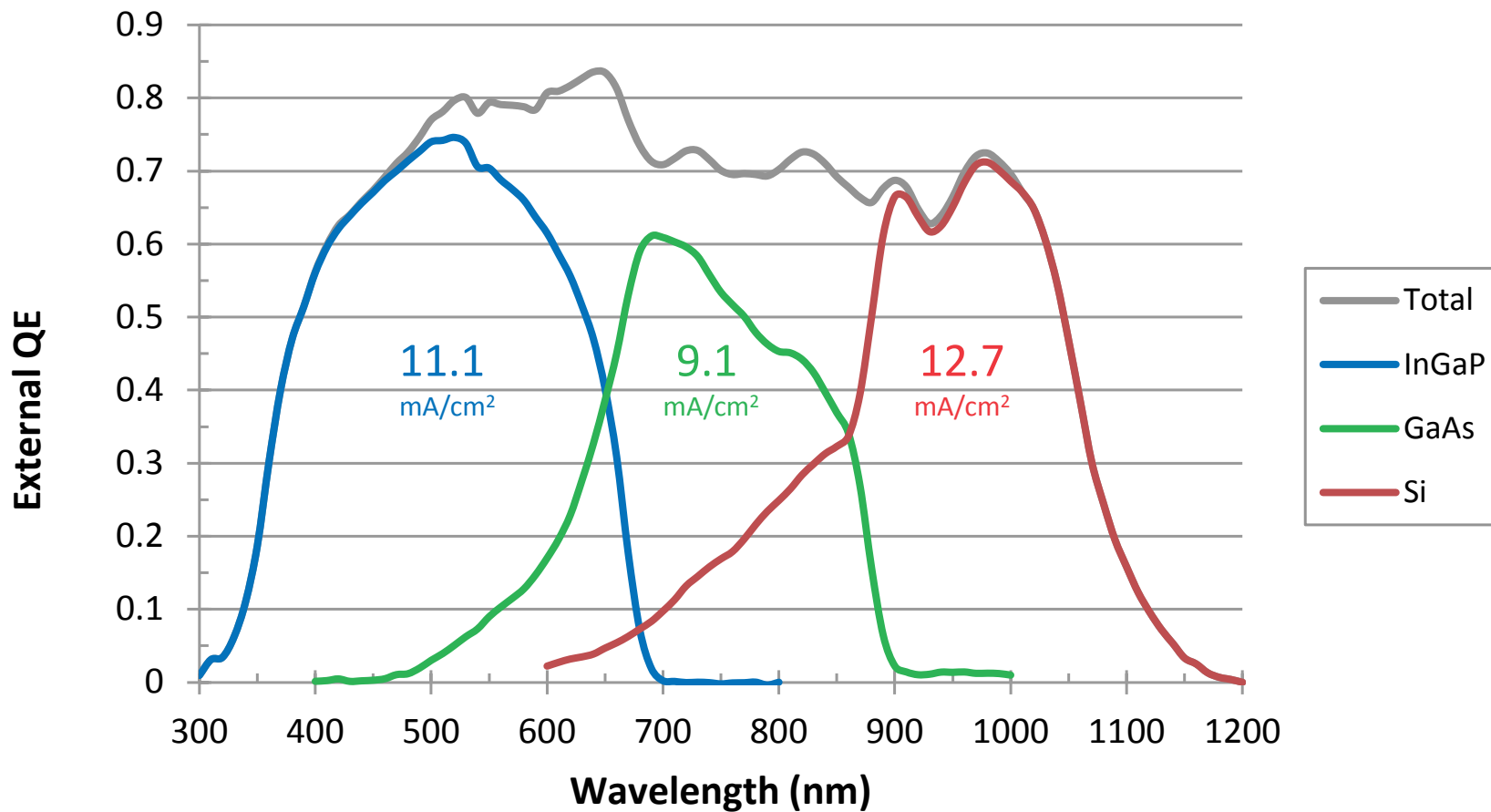
分光感度特性

InGaP/GaAs//Si 3接合

水野他、ポスター発表「結晶Siスマートスタックセル」



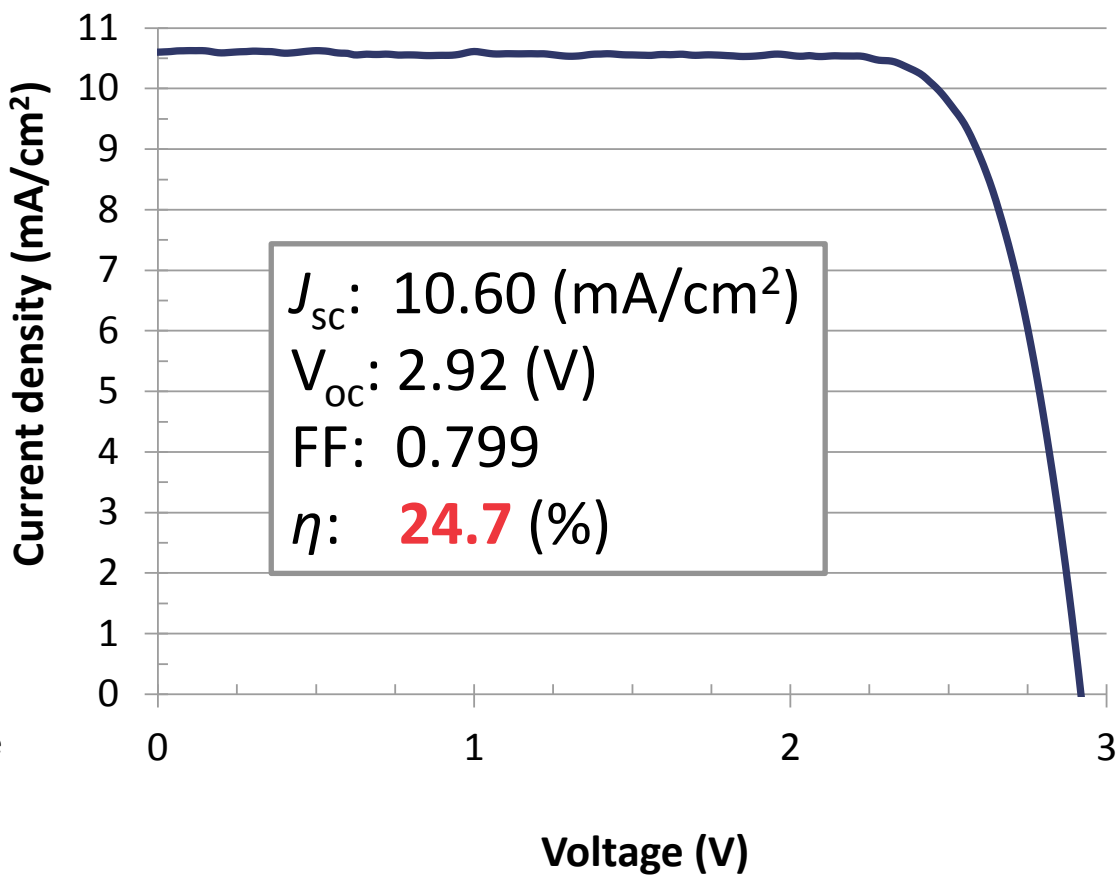
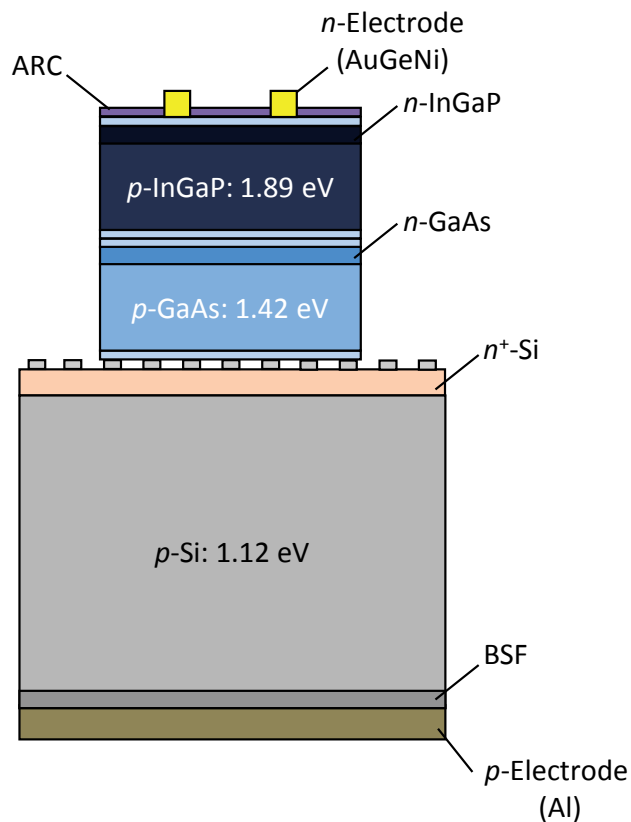
InGaP/GaAs//Si スマートスタック EQEスペクトル



電流はミドルGaAsで律速、スマートスタック界面での大きな光学損失なし。

InGaP/GaAs//Si スマートスタック

I-V特性 (トップセル改善後)



信頼性テスト

① 加速劣化試験

・ストレス条件

温度条件: 125 °C、138 °C、150 °C

電流負荷条件: 20 mA/cm²

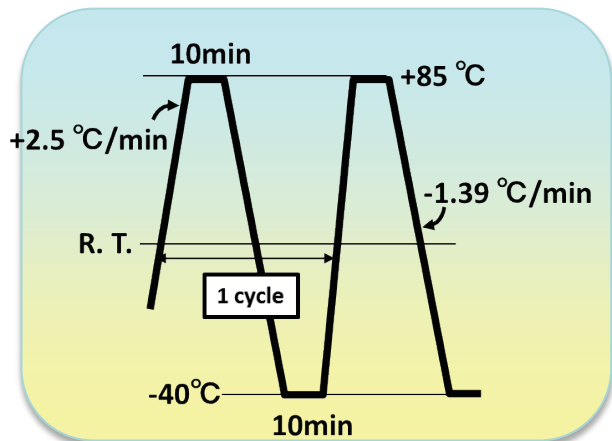
時間: 0 - 100 h ~ 1000 h

② 温度サイクル試験

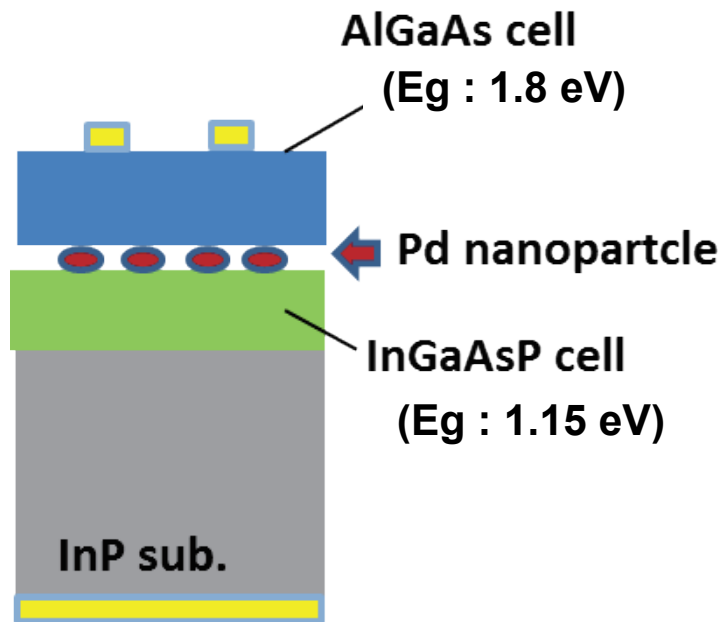
・ストレス条件

温度条件: -40 °C ⇄ 85 °C

サイクル回数: 200 cycles



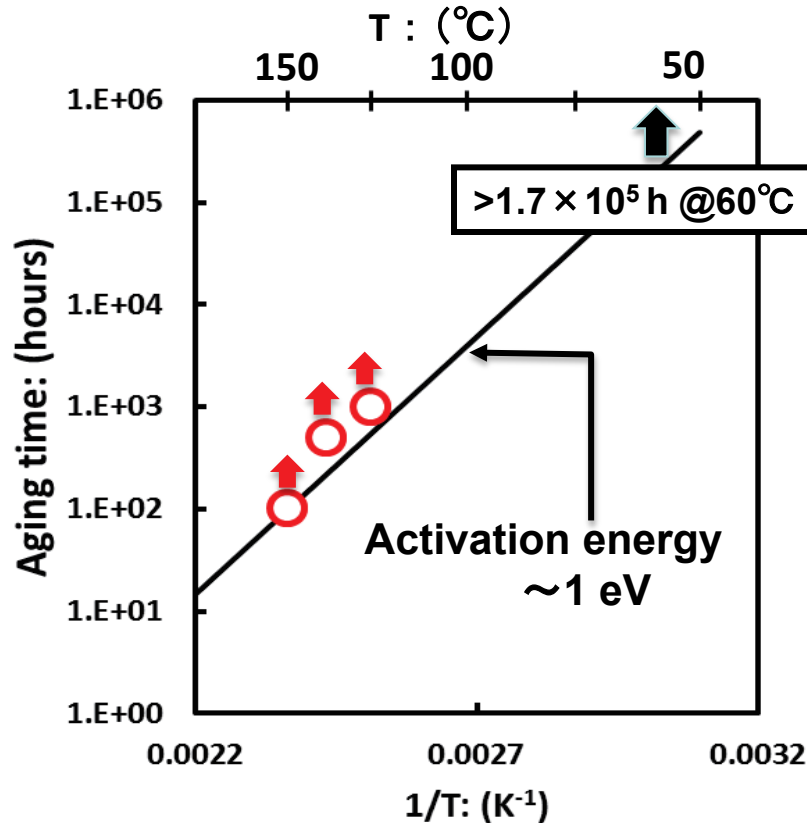
Test samples



AlGaAs/InGaAsP 2-junction solar cells

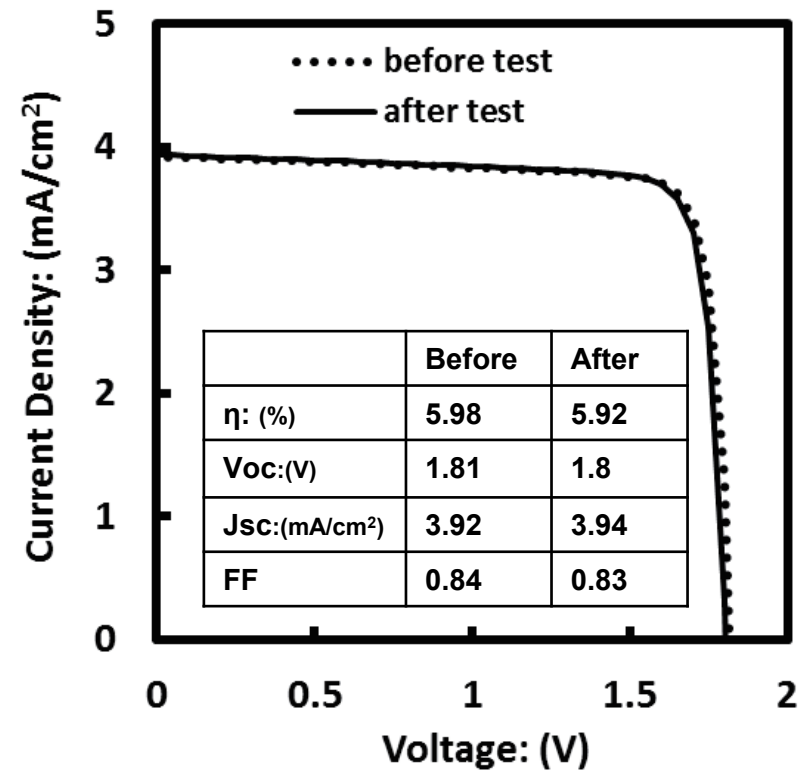
信頼性テスト

① 加速劣化試験



② 温度サイクル試験

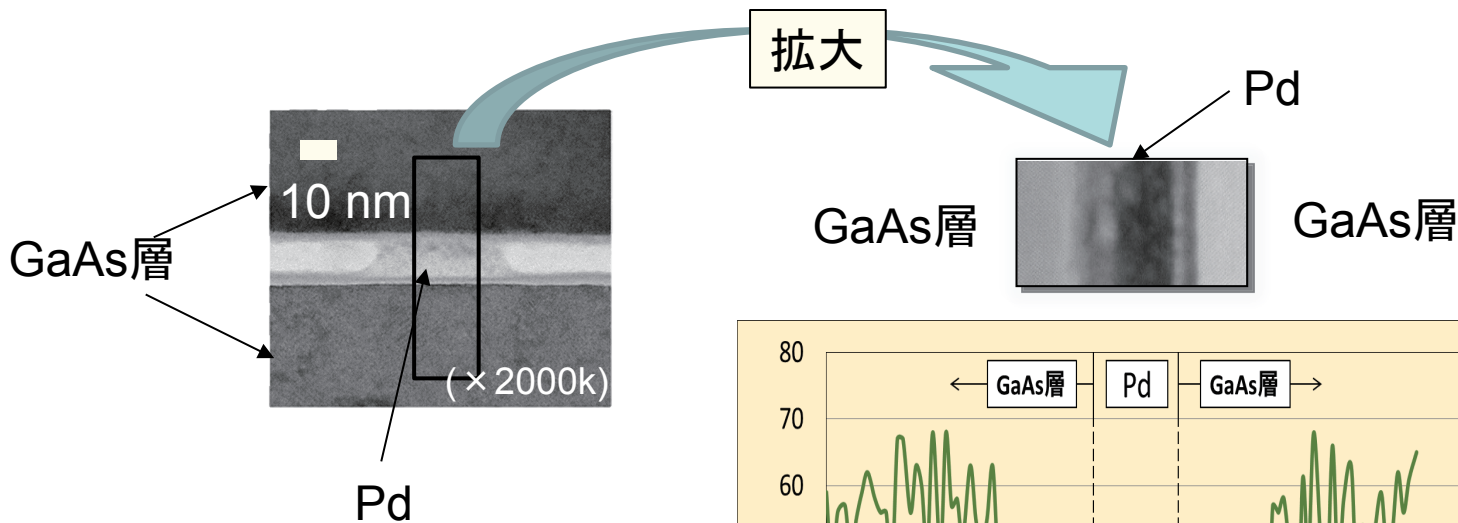
$-40 \sim +85^{\circ}\text{C}$ 、200 cycles



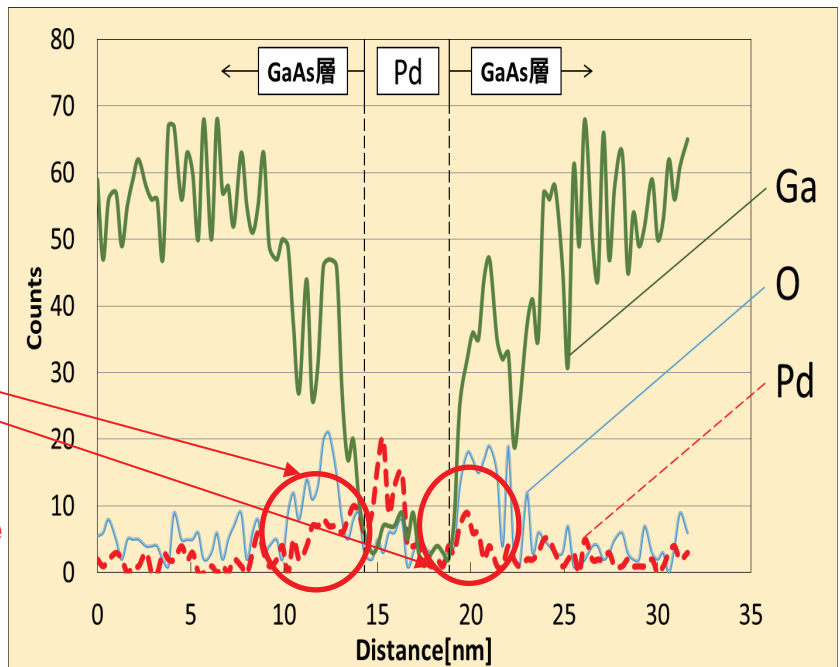
・推定素子寿命 ~ 17 万時間以上 $@60^{\circ}\text{C}$ (20年以上)
 活性化エネルギー 1 eV仮定

接合メカニズム

TEM-EDX評価



Pd diffusion to GaAs layer



Pd diffusion is enhanced by **the solid-state topotaxial reaction** forming Pd_xGaAs .

*Appl. Phys. Lett., 59(24), 3159(1991)

*AES分析によってPd拡散が推測されている。

接合メカニズム

Appl. Phys. Lett. 59, 3159 (1991).

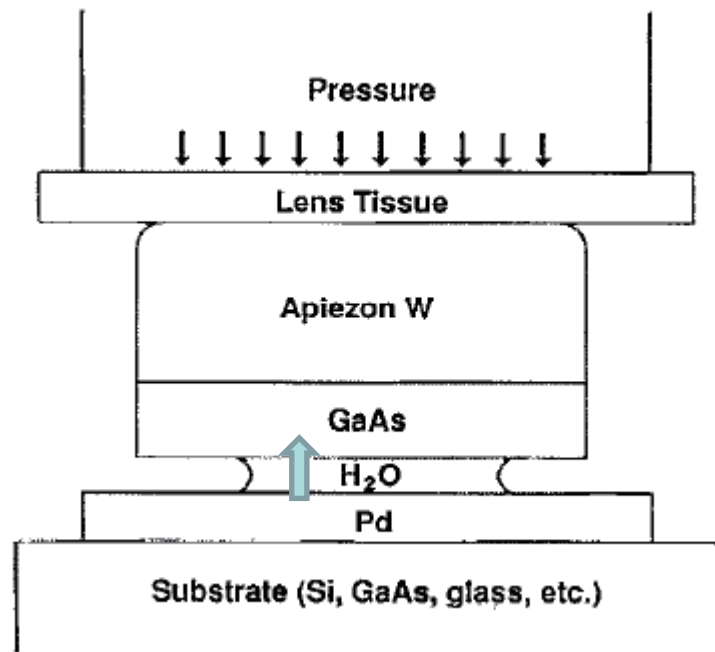
Van der Waals bonding of GaAs on Pd leaded topotaxial, metallurgical bond

E. Yablonovitch, T. Sands, D. M. Hwang, I. Schnitzer, et al.
Bell Communications Research, Navesink Research Center, Red Bank, NJ

S. K. Shastri, D. S. Hill, and J. C. C. Fan
Kopin Corp., 695 Myles Standish Blvd., Taunton, Massachusetts

(Received 15 July 1991; accepted for publication 3 October 1991)

Various forms of wafer bonding have now emerged as a means for optoelectronic integration of dissimilar semiconductor materials. Among the types of wafer bonding, perhaps the most flexible is that which employs free-standing III-V films as created by epitaxial liftoff. For some purposes, weak Van der Waals forces provide an adequate bond between the native oxides of the III-V film and its new substrate. If the substrate is coated by palladium however, a low temperature solid-phase-topotaxial reaction occurs, producing oriented Pd₄GaAs under the GaAs film. In effect, the topotaxy comes about through mechanical contact alone. The resulting metallurgical bond is an ohmic contact, a thermal contact and a robust, permanent, adherent contact.



PdはGaAs上で薄い酸化領域を通り拡散

→Pdを用いない場合と比べ導電性、強度が大幅に改善

今後の展望

- 高効率化： MBE成長技術の改良
Si, Cl(G)Sボトムセルの改良
- 低コスト化：
 - 基板再利用技術
 - Pdに代わる低コスト金属の探索
 - **III-Vトップセルの低コスト化**
MBE, MOCVDに代わる新たな低コスト成長技術の開発(H-VPE)

本講演に関するポスター発表

牧田

「スマートスタック技術による低コスト多接合太陽電池の開発」

野中

「スマートスタック技術による多接合太陽電池の接合界面評価」

馬場

「スマートスタック/面積電流整合/低倍率集光を組み合わせた多接合太陽電池 (SMACモジュール)に関する研究」

川北

「高効率・高放射線耐性 InGaP/GaAs/CIGSスマートスタック太陽電池の研究」

長門

「スマートスタック用InGaPトップセルのMBEにおけるGaAs基板傾斜方向依存性」

大島

「スマートスタック太陽電池に向けたInP系ボトムセルの高効率化」

水野

「結晶Siスマートスタックセル」

太野垣

「中間バンド型量子ドット太陽電池の開発」