

低コストH-VPE法により作製した 高効率III-V族化合物太陽電池

大島 隆治、牧田 紀久夫、生方 映徳*、菅谷 武芳

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

*大陽日酸株式会社

内容

1. 背景

- 低コスト・高効率III-V族化合物太陽電池

2. 装置概要

- H-VPE装置
- 結晶成長メカニズム

3. 実験結果

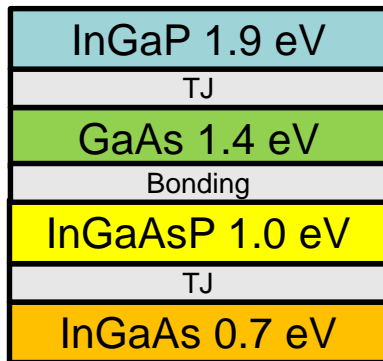
- 結晶性分析
成長速度、ドーピング、膜厚分布
- セル特性
GaAs, InGaP太陽電池

4. まとめ

低コストIII-V族化合物太陽電池

2030年 7円/kWhに向けた低コスト・高効率太陽電池開発
(NEDO PV Challenges)

従来: III-V多接合セル

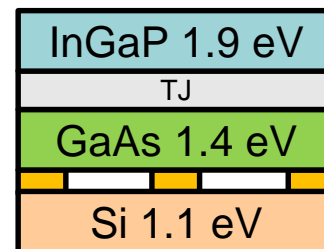


- $\eta > 40\%$
- MOVPE
- モジュール > 1000円/W
- 宇宙用、高倍集光用途に限定



ターゲット: III-V/Si 3接合セル

NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」



ハイドライド気相成長法
(H-VPE)

スマートスタック技術

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

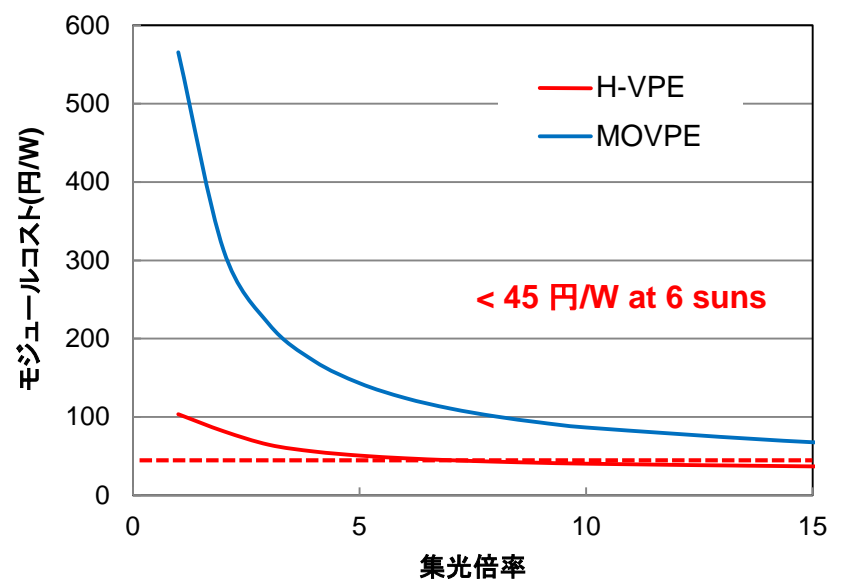
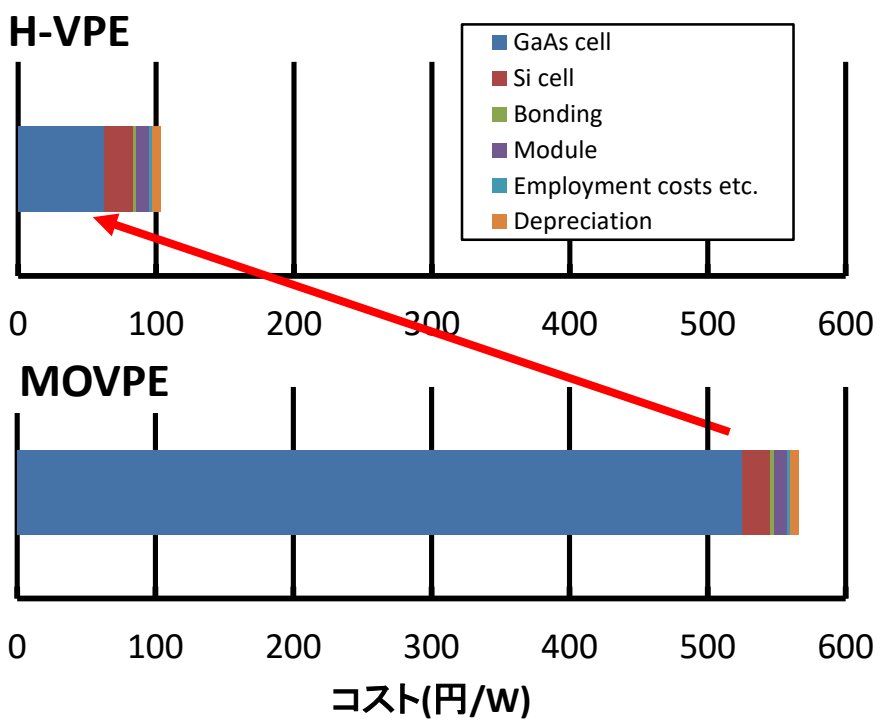
- $\eta > 30\%$
- **H-VPE**
- モジュール < 45円/W
- 地上、非集光

モジュールコスト試算

条件

- InGaP/GaAs//Si メカニカル3接合モジュール
- Pdナノ粒子による接合
- 変換効率 30%、6インチウェハー
- 寿命30年
- GaAs基板コスト1/10 (ELO技術)

III-V/Si モジュール (H-VPE)
+ 低倍集光 : < 45 円/W



K. Makita et al., 26th PVSEC, 1.2.3b, Singapore (2016).

H-VPE装置

大陽日酸 H260 system



- 高速結晶成長(高スループット)
- 金属原料、低V/III比(低コスト)
- 商用機がない
- 太陽電池応用は世界2例目
(1例目はNREL)

J. Simon *et al.*, IEEE J. Photovolt. 6, 191 (2016)

➔ 新規に設計・導入

2016年8月稼働開始

	H-VPE	MOVPE	MBE
III族原料	金属(塩化物)	有機金属	金属
V族原料	水素化物	水素化物	金属
成長速度	◎ (~100 μm/h)	○ (~5 μm/h)	× (~1 μm/h)
生産能力	○	○	△
V/III比	○ ~2	△ 10~100	△ 10~100
ランニングコスト	○	△	△
導入実績	GaN基板 GaP LED 等	GaN, GaAs系 電子・光デバイス	電子・光デバイス (量子ドットなど)

H-VPE リアクター

大陽日酸 H260 system

特徴

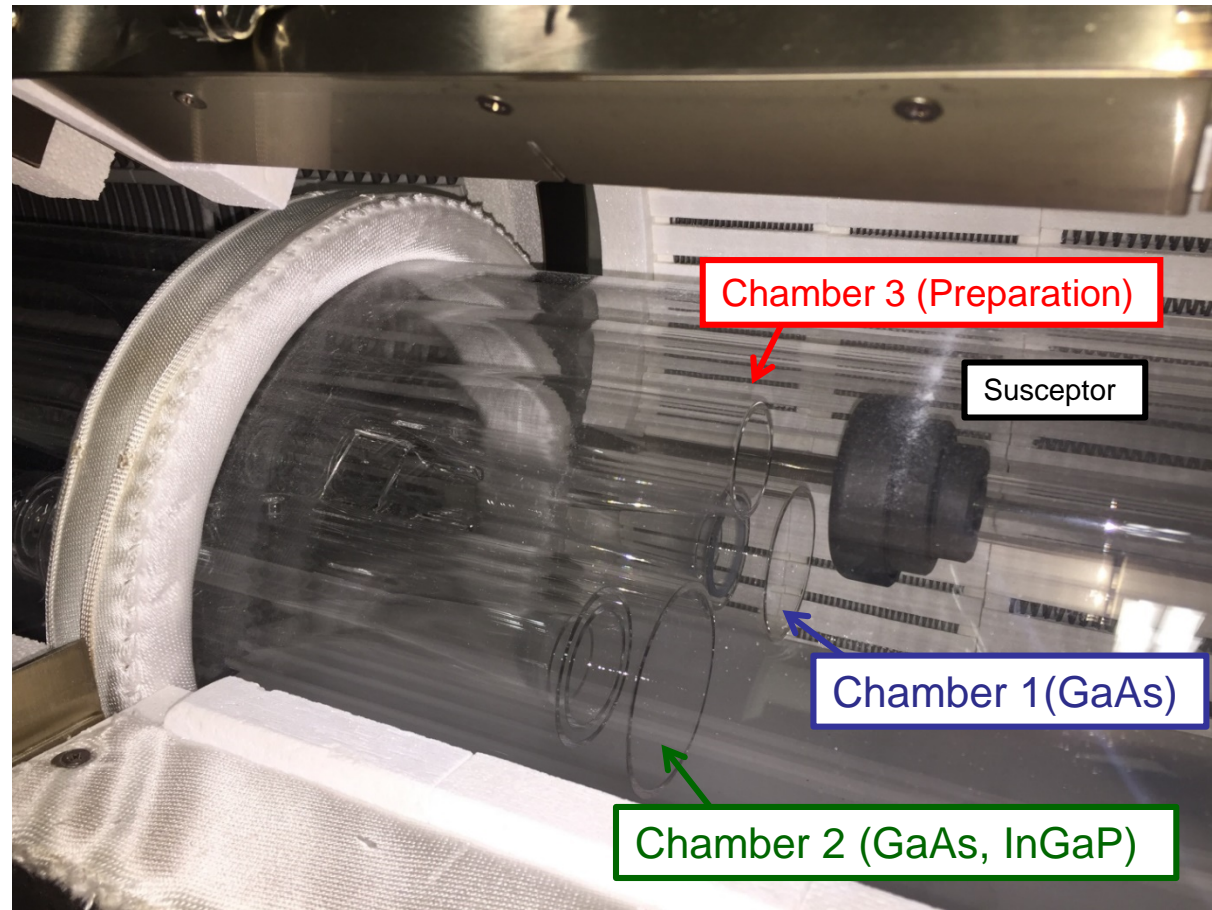
- 常圧(非真空)
- 水素キャリアガスによる原料輸送

→ 瞬時のガス切り替えが困難

3室構造

- 1 : GaAs
- 2 : GaAs, InGaP
- 3 : 待機室
(AsH₃, PH₃ ガス)

⇒ p-n, ヘテロ界面の急峻性

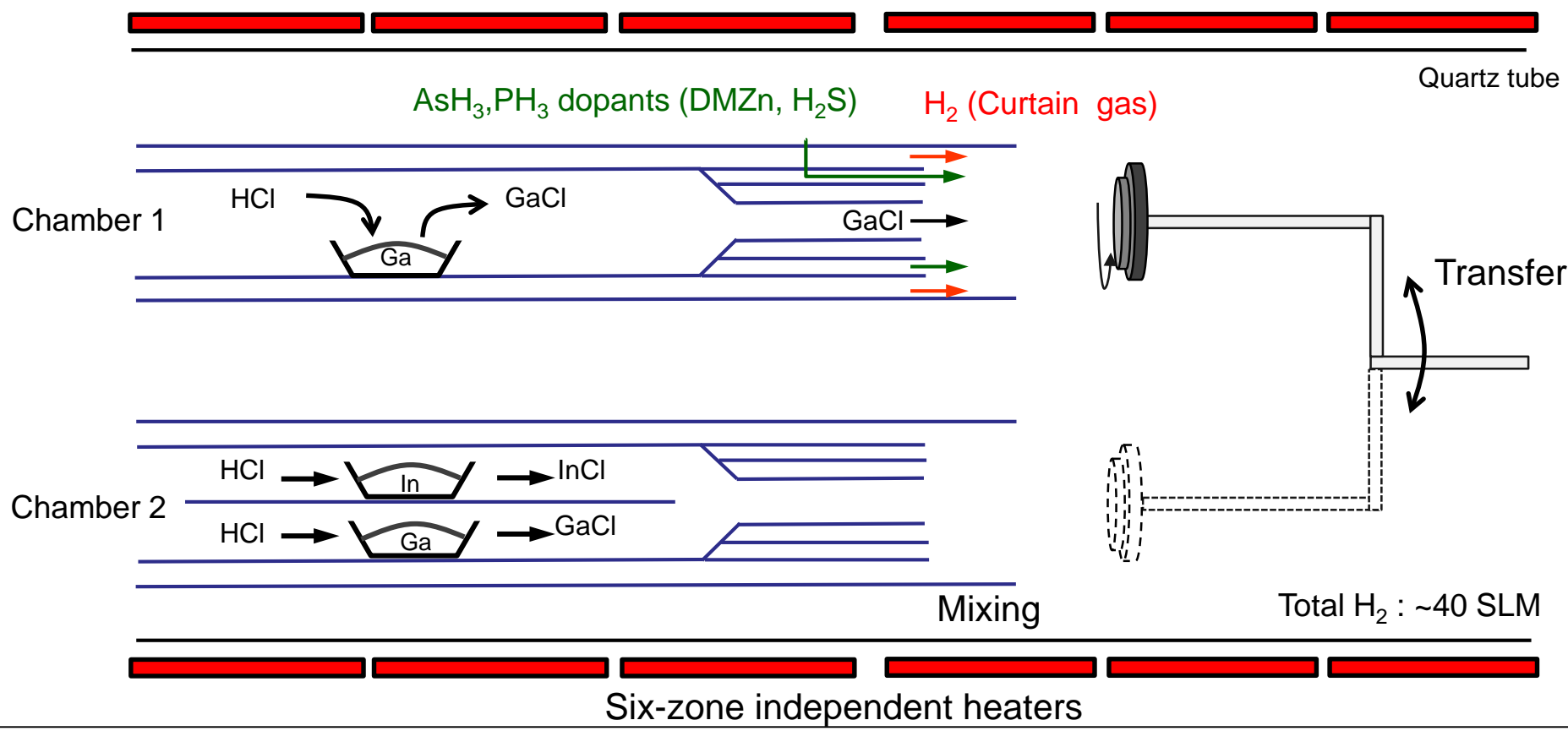
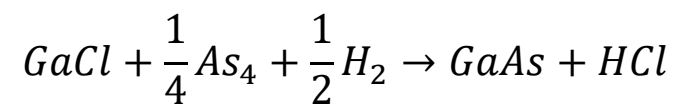
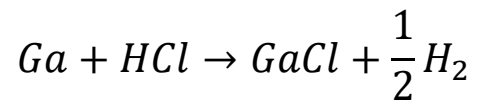


成長メカニズム

原料部 (860 °C)

基板部 (680~710 °C)

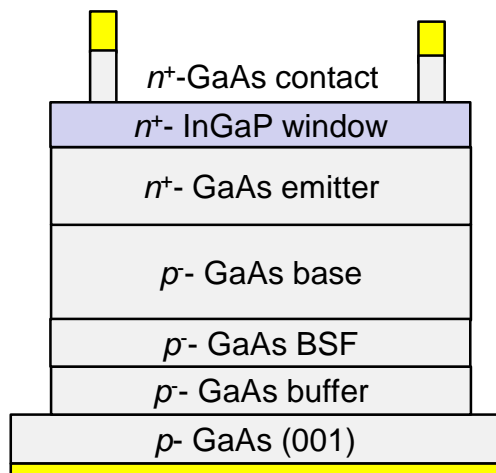
(For GaAs)



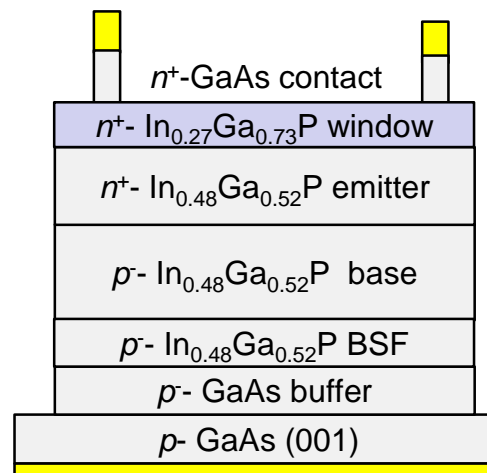
本研究の目的

- H-VPE法を用いた高速GaAs, InGaP結晶成長
- InGaP/GaAs 2接合太陽電池の開発に向けたGaAs, InGaPサブセルの試作と評価

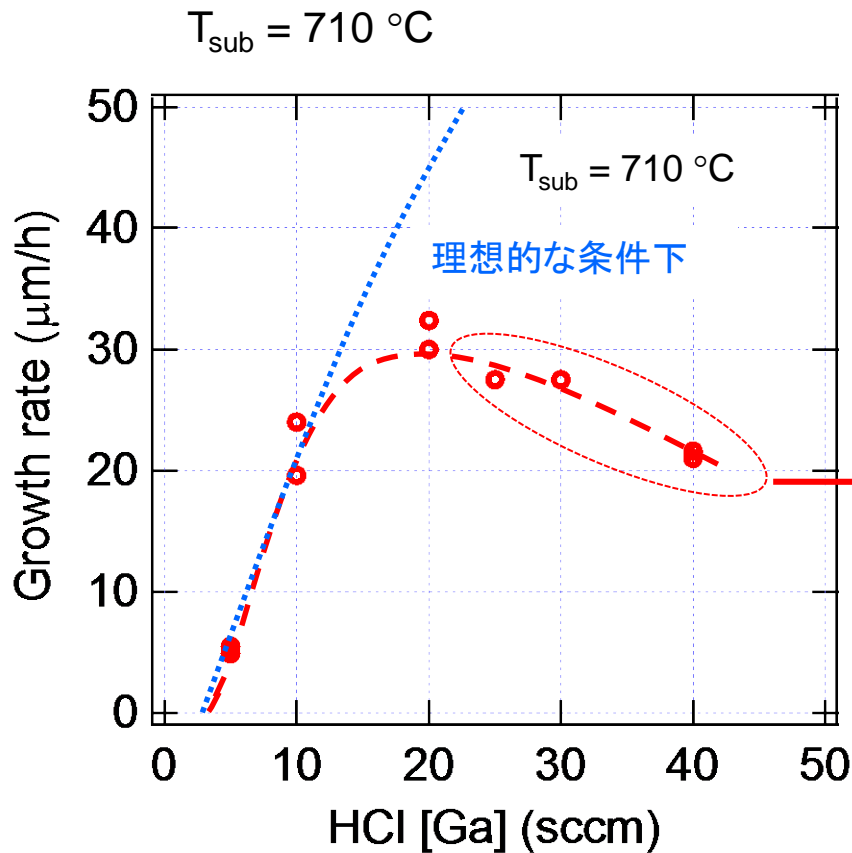
GaAs cell



InGaP cell

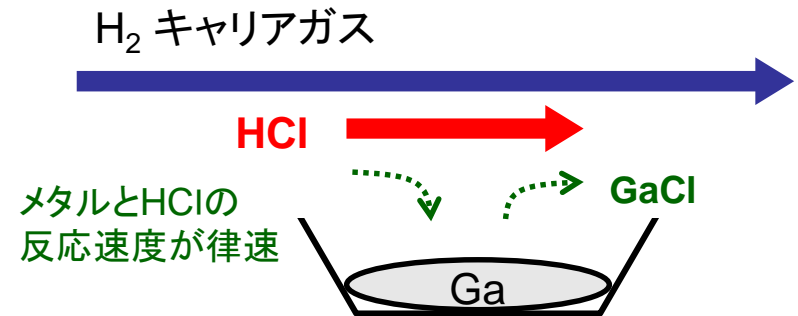


GaAs成長速度



- 30 $\mu\text{m/h}$ までの高速成長を実現
- HClガス 20 sccm以上で未反応のHClガスが発生し、エッチングに寄与

➡ ボートデザインの改善の必要性



ドーピングプロファイル

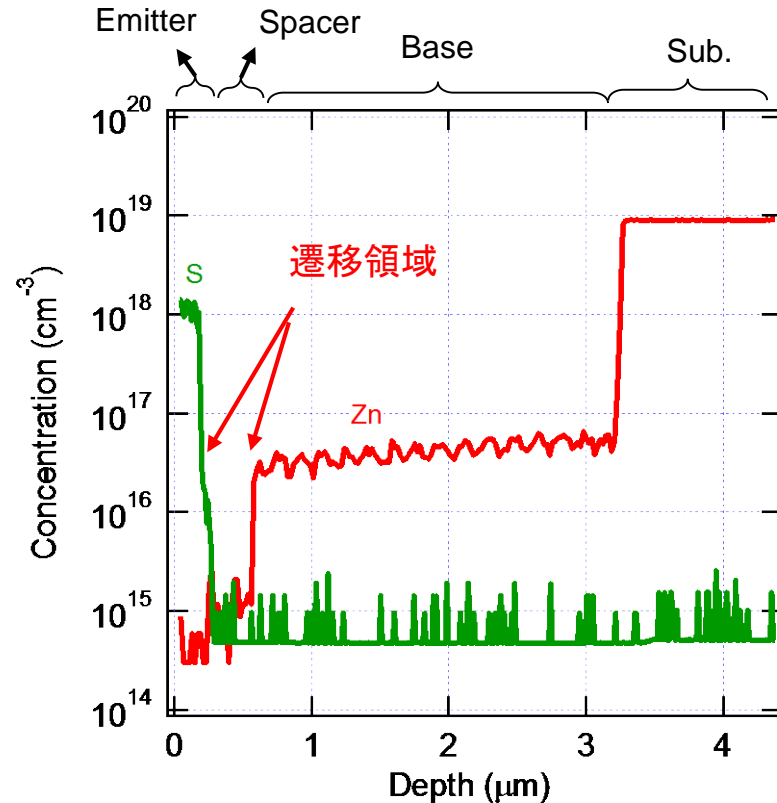
GaAs *p-i-n* 接合

p-type: DMZn

n-type: H₂S

<i>n</i> ⁺ -GaAs emitter (200 nm)
<i>i</i> -GaAs spacer (300 nm)
<i>p</i> -GaAs base (~ 2 μm)
<i>p</i> -GaAs (001)

SIMS



- ドーパントの遷移領域 : **40 nm**
- バックグラウンドキャリア密度 : n-type, $1.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (from ECV)

➡ 急峻な*p-i-n*構造の作製が可能

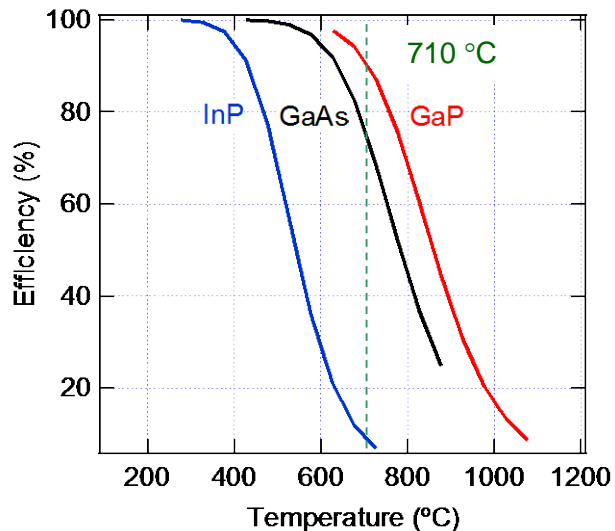
InGaP結晶成長

高速InGaP結晶成長の組成制御には

- 成膜温度
- Inとメタルの接触面積
の設計が重要

成長温度が成長効率に与える影響
(シミュレーション)

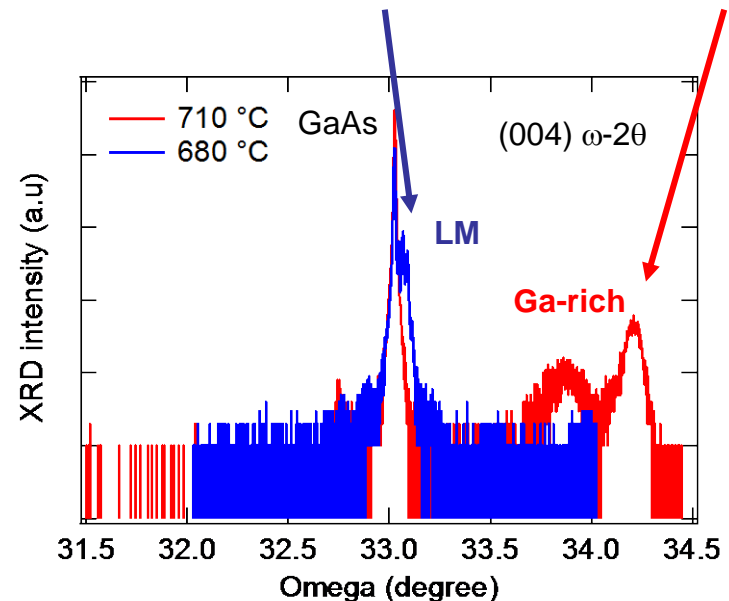
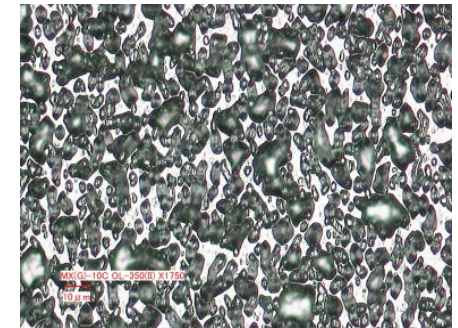
InGaP成長: 710 °C → 680 °C



$T_{\text{sub}} = 680 \text{ } ^\circ\text{C}$
Inメタル ~90%充填
HCl (Ga/In) = 1.5/20 sccm
~12 $\mu\text{m/h}$

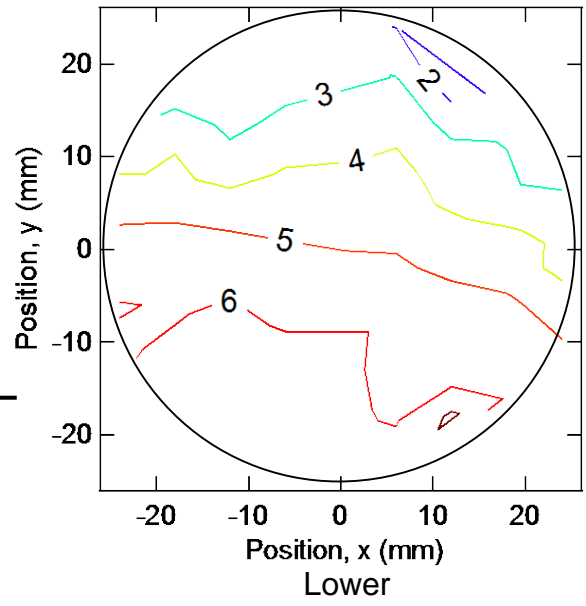


$T_{\text{sub}} = 710 \text{ } ^\circ\text{C}$
Inメタル ~40%充填
HCl (Ga/In) = 2/8 sccm



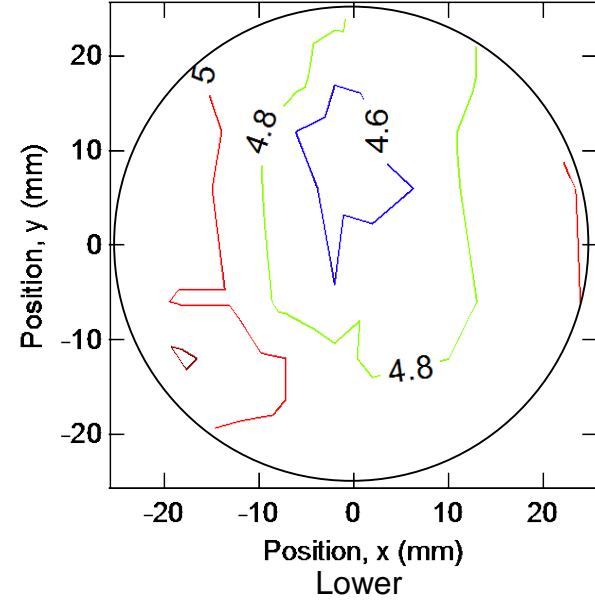
膜厚分布 5 μm厚GaAs on 2 inch-GaAs (001)

開発当初
Upper



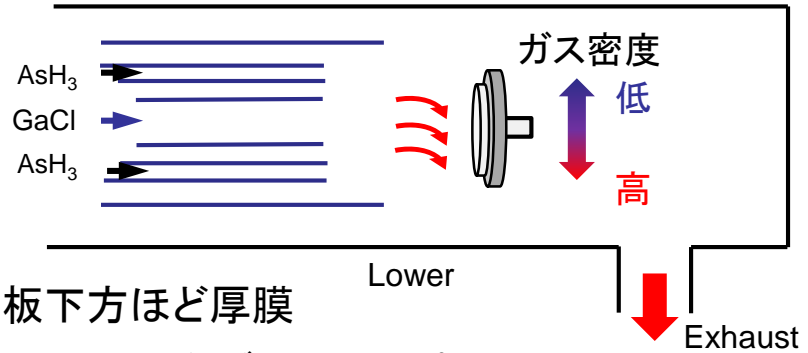
面内不均一
30.1%

ノズル改良後
Upper



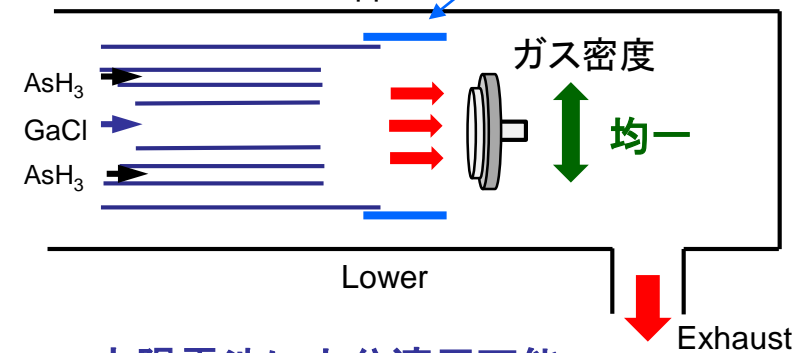
面内不均一
3.2%

Upper



基板下方ほど厚膜
⇒ 不均一なガスフローパターン

Upper



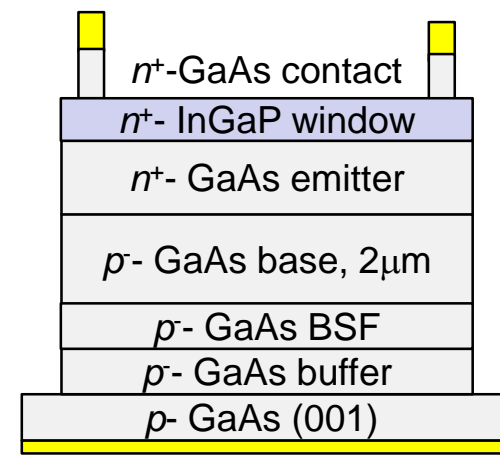
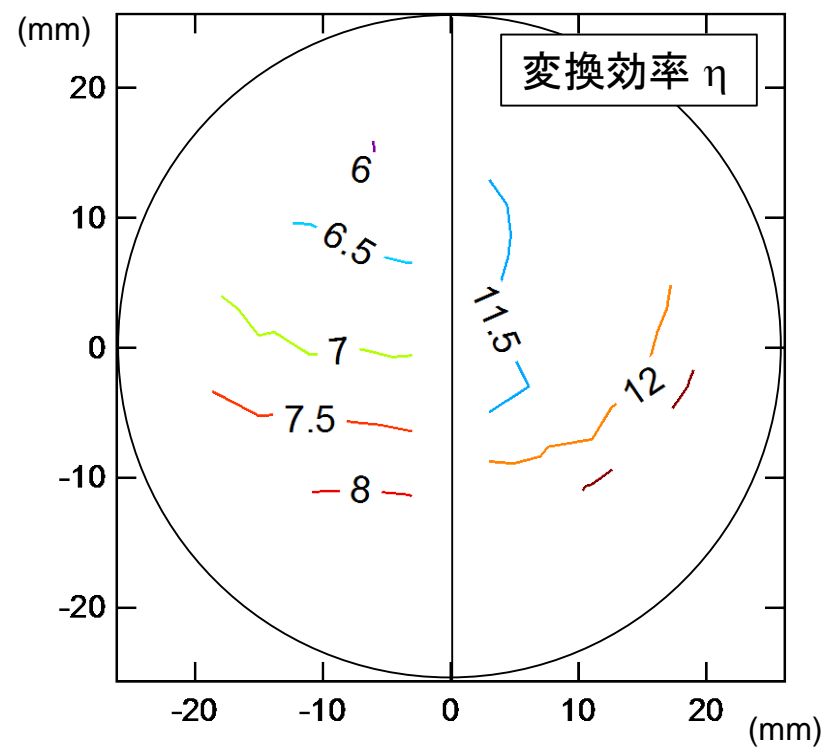
延長ノズルによる
Mixing部改善

⇒ 太陽電池に十分適用可能

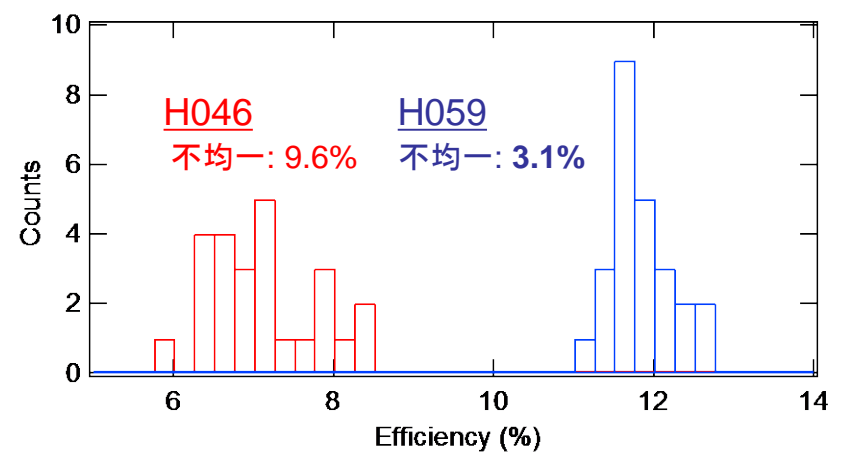
GaAsセル特性の面内均一性

ノズル改良前 (H046)

ノズル改良後 (H059)



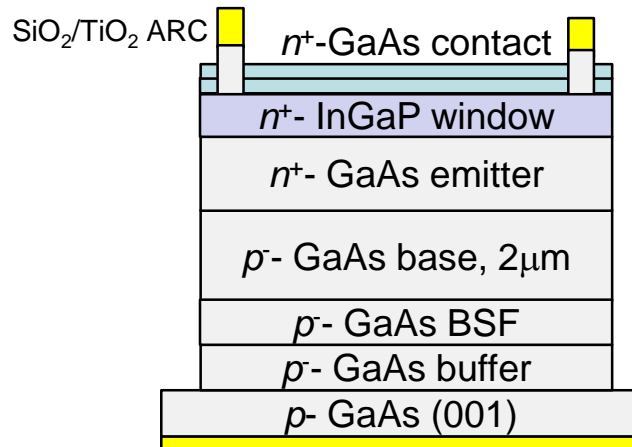
開発当初 (H046) : 窓層無
ノズル改良後 (H059) : 窓層有



ノズル改良前:

J_{SC} のみでなく、 V_{OC} , FF も基板上部で低下
→ 厚さのみでなく結晶性も面内分布している可能性

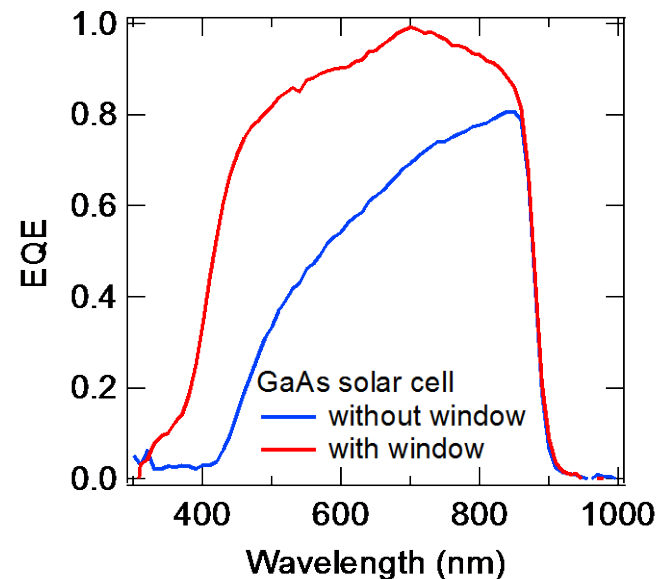
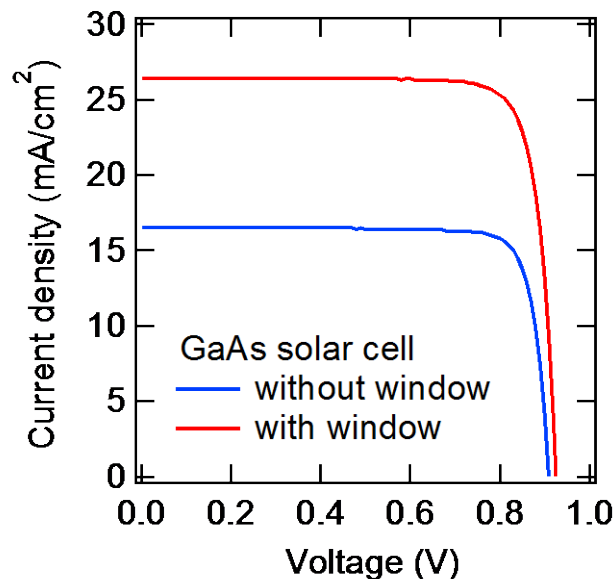
GaAsセル



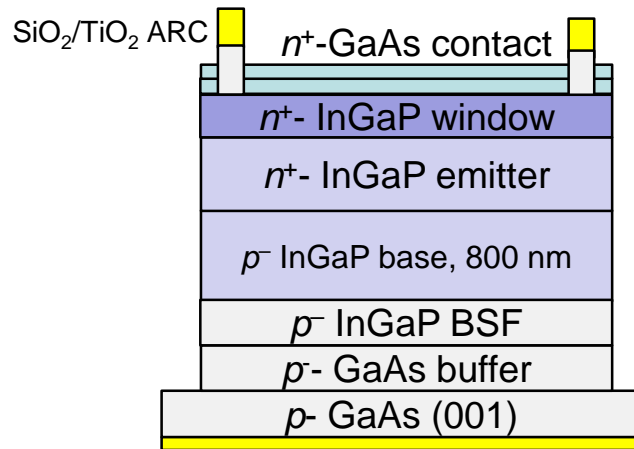
	H046-4-13	H048-2-12	NREL
	Without window	With window	With window
J_{SC} (mA/cm ²)	16.54	26.41	25.90
V_{OC} (V)	0.909	0.925	0.944
FF (%)	83.87	83.06	84.28
η (%)	12.61	20.29	20.60

作製したGaAsセルは、先行研究(NREL)と同等の性能

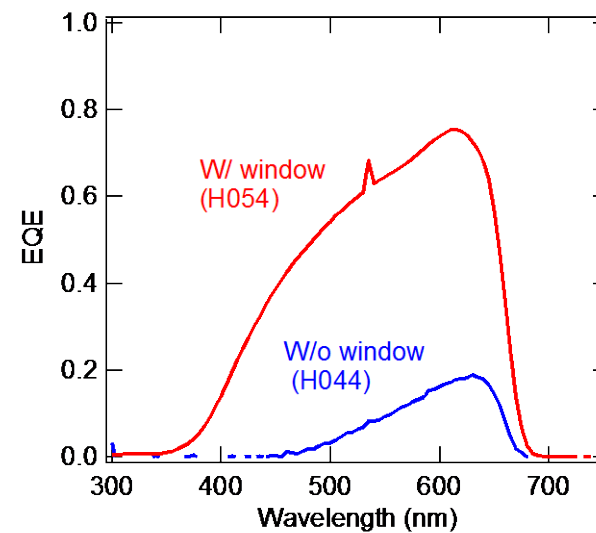
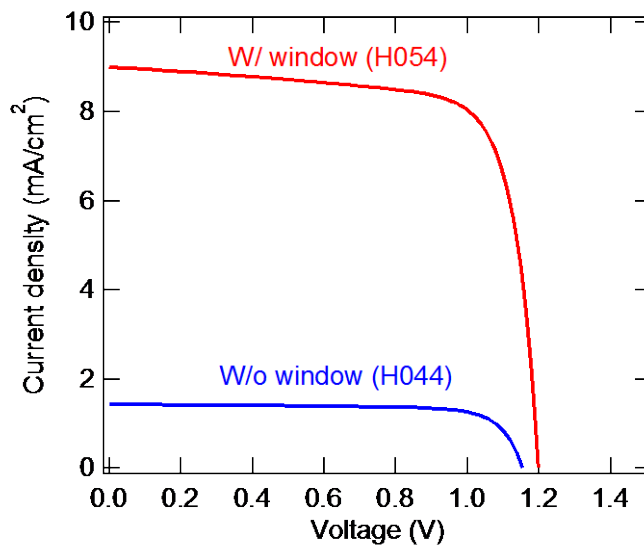
J. Simon *et al.*, IEEE J. Photovolt. 7, 157 (2017).



InGaPセル



	H044	H054
Window	W/o	W/
J _{SC} (mA/cm ²)	1.43	9.00
V _{OC} (V)	1.15	1.20
FF (%)	0.76	0.75
η (%)	1.25	8.06



まとめ

低コスト・高効率III-V族太陽電池の実現に向けて H-VPE装置の新規設計、導入

装置設計

- GaAs結晶成長: 30 $\mu\text{m}/\text{h}$
- InGaP結晶成長: 12 $\mu\text{m}/\text{h}$
- 面内均一性: 3.2%
- ドーピングの急峻性: $< 40\text{nm}$

太陽電池応用に十分な結晶性が得られることを確認し、今後の装置改造の指針を抽出

セル特性

- GaAsセル: $\eta = 20.29\%$
先行研究(NREL)と遜色ない性能
- InGaPセルは、 $\eta = 8.06\%$
セル構造、As/Pヘテロ界面の制御による特性向上を図る。
⇒ InGaP/GaAs 2接合セル試作

謝辞

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。