

高効率低コスト太陽電池に向けた HVPE法によるAl含有化合物 半導体の結晶成長

¹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

²太陽日酸株式会社

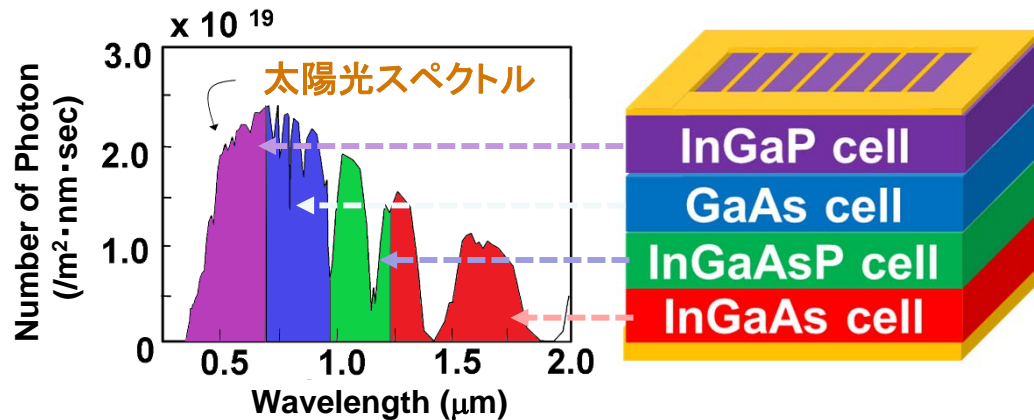
庄司 靖¹、大島 隆治¹、相原 健人¹、
牧田 紀久夫¹、生方 映徳²、菅谷 武芳¹

発表のアウトライン

- 研究背景
 - III-V太陽電池の現状と課題
 - Al含有化合物半導体の必要性
- HVPE法におけるAl含有化合物半導体成長の課題
- 実験結果
 - AlInGaPの結晶成長および物性評価
 - AlAsの結晶成長およびELO試験
- まとめ

研究背景: III-V族太陽電池の現状と課題

バンドギャップの異なる材料を組み合わせた
多接合構造の形成により高効率化



最高効率(集光時)

2接合: 35.5%

4接合: 46.0%

6接合: 47.1%

Martin A. Green *et al.*,
Prog. Photovolt. Res.
Appl. **27**, 565 (2019).

現在の主な応用先

- ・人工衛星
- ・集光型太陽光発電

今後期待される応用先

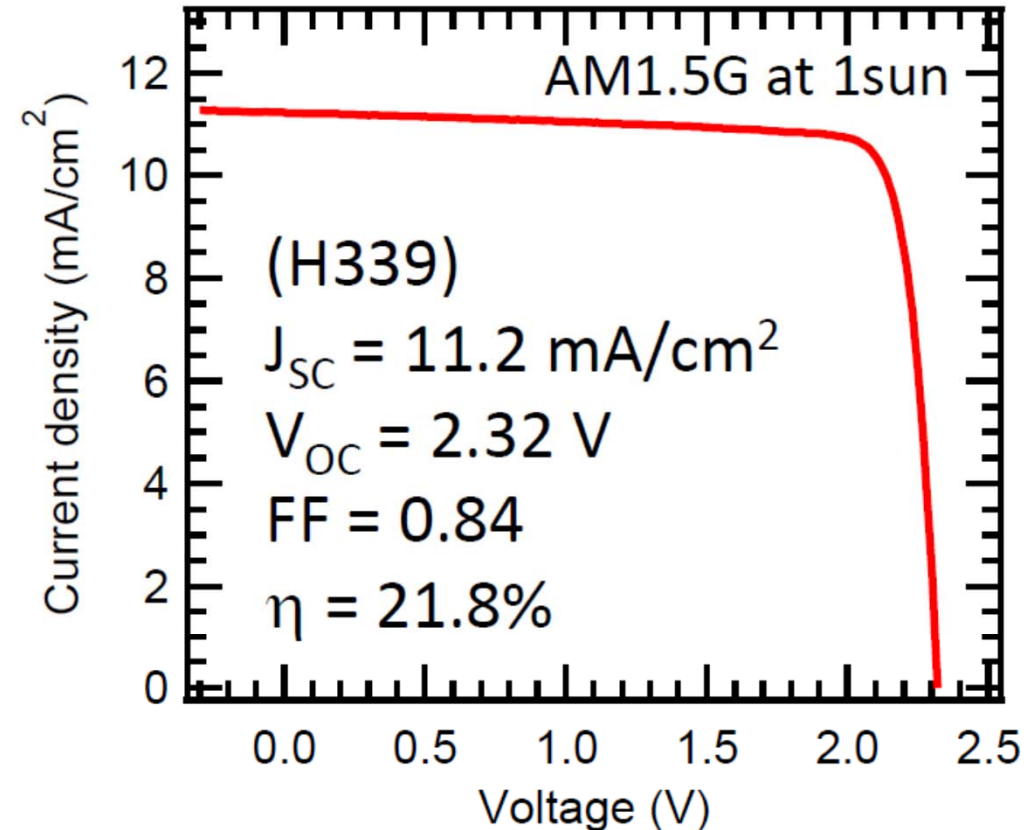
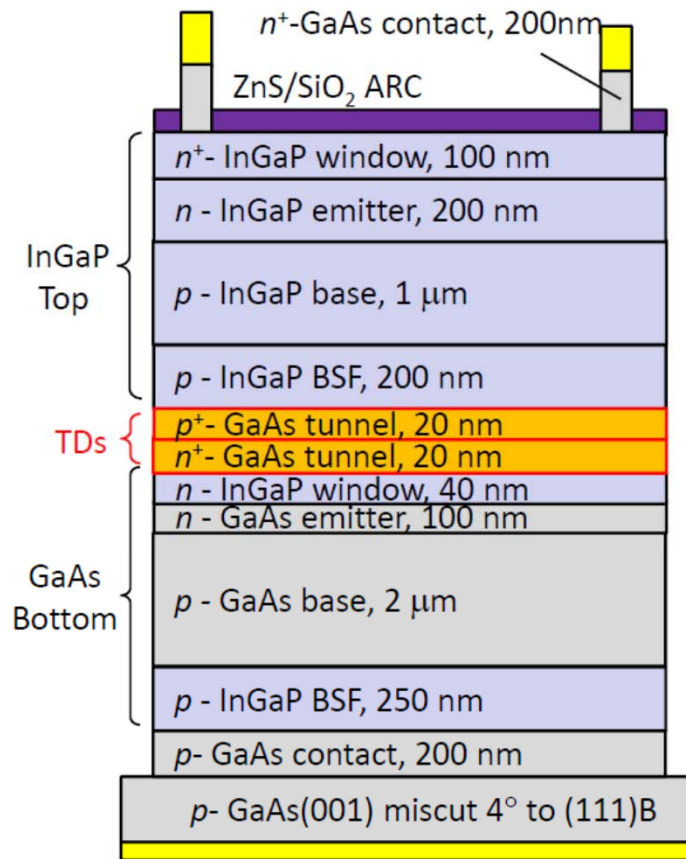
- ・無人航空機
- ・電気自動車

性能(変換効率)は高いが、
コストも高いため用途に限られる

高効率・低コストな太陽電池が必要
→ ハイドライド気相成長(HVPE)法

HVPEによる成果-InGaP/GaAs 2接合セル

G.R GaAs = 12 $\mu\text{m}/\text{h}$
 InGaP = 24 $\mu\text{m}/\text{h}$



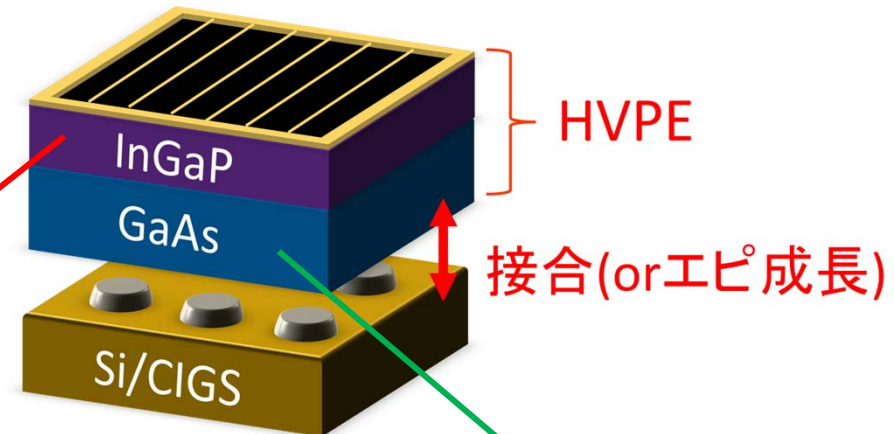
2接合セルにおいて、
 変換効率21.8%を達成

R. Oshima *et al.*, 46th IEEE PVSC, Chicago (2019).

ターゲット構造およびAl含有化合物の必要性

高効率かつ低コスト

- ・効率30%以上
- ・7円/kWh



Contact layer	高効率InGaPセルを作製するには…
n-AlIn(Ga)P window	
n-InGaP emitter	を形成するために、AlIn(Ga)Pが必要
p-Al(Ga)InP	
Contact layer	

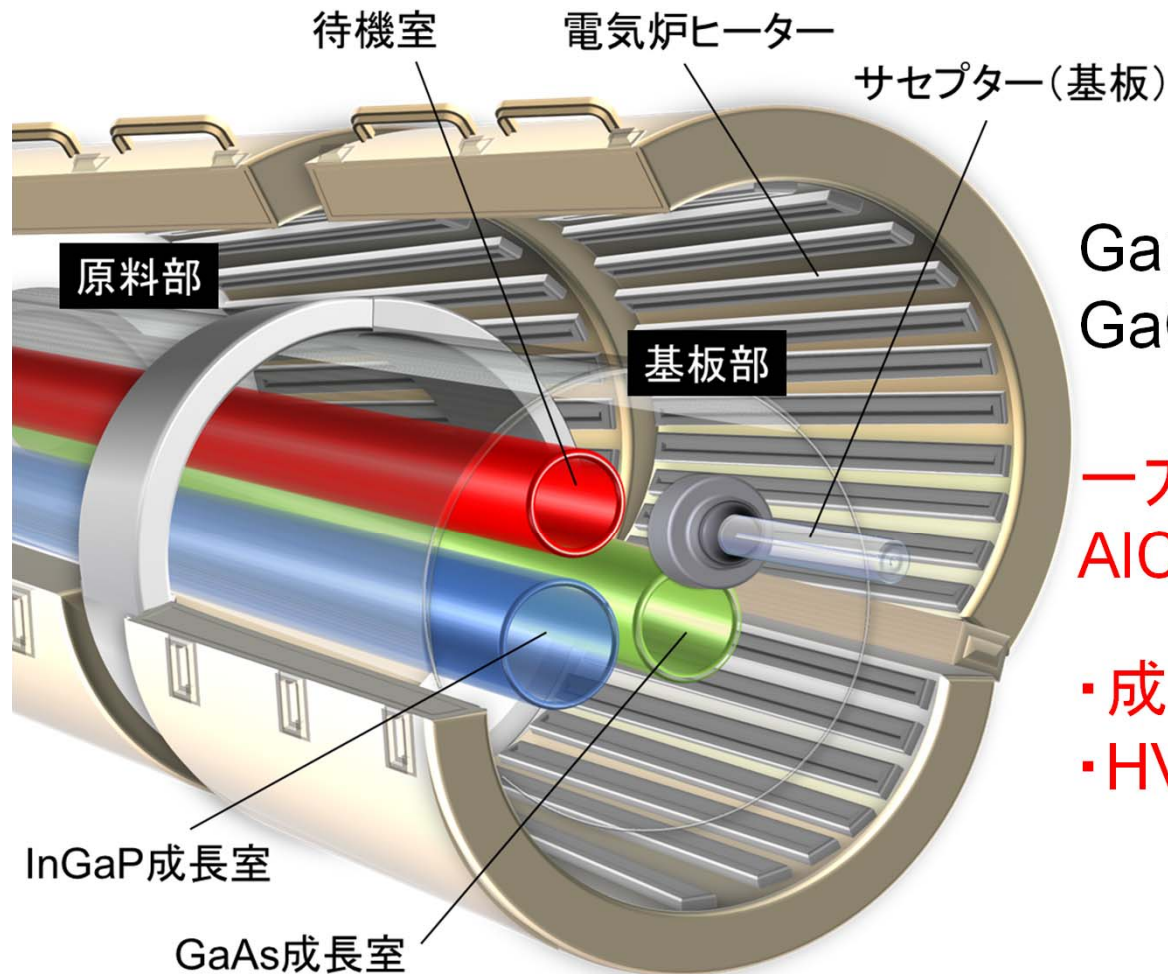
- ・Window層
- ・リアヘテロ構造

III-Vセルの低コスト化には…

エピタキシャルリフトオフ(ELO)による基板再利用を行うためにAlAs犠牲層が必要

AlInGaP, AlAsの高品質成膜が求められる

HVPE法におけるAl含有化合物成膜時の課題



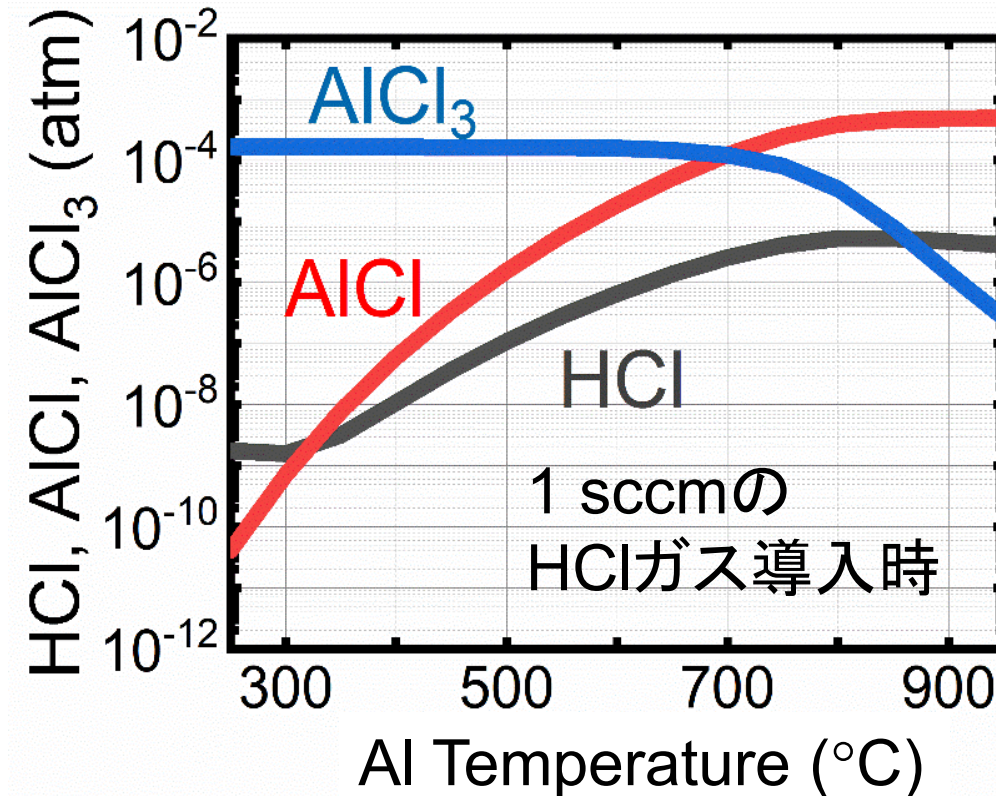
GaおよびInはHClと反応させて
GaCl, InClとして供給可能

一方で、Alは...
AlClが石英ガラスを激しく還元

- ・成長結晶内への不純物混入
- ・HVPE反応炉の損傷

HVPE法におけるAl含有化合物成膜方法の検討

Al原料の温度に対する平衡分圧の変化
 (STR社のHEpiGaNSにより計算)



対策

Al原料の温度を制御することでAlClの生成を抑制

→ AlCl₃として供給

AlInGaPの成膜実験

GaAs cap	}	HCl[Ga]	0 ~ 2 sccm
AlInGaP		HCl[In]	6 ~ 20 sccm
GaAs buffer		HCl[Al]	0 ~ 2 sccm
GaAs sub.		PH ₃	25 ~ 100 sccm
		H ₂ キャリア (GaCl, AlCl ₃ , InCl用)	0.5 ~ 2.8 slm
	基板温度	660°C	

検討したパラメータ

- HCl[Al]流量の影響
- V/III比の影響
- H₂キャリアガスの影響

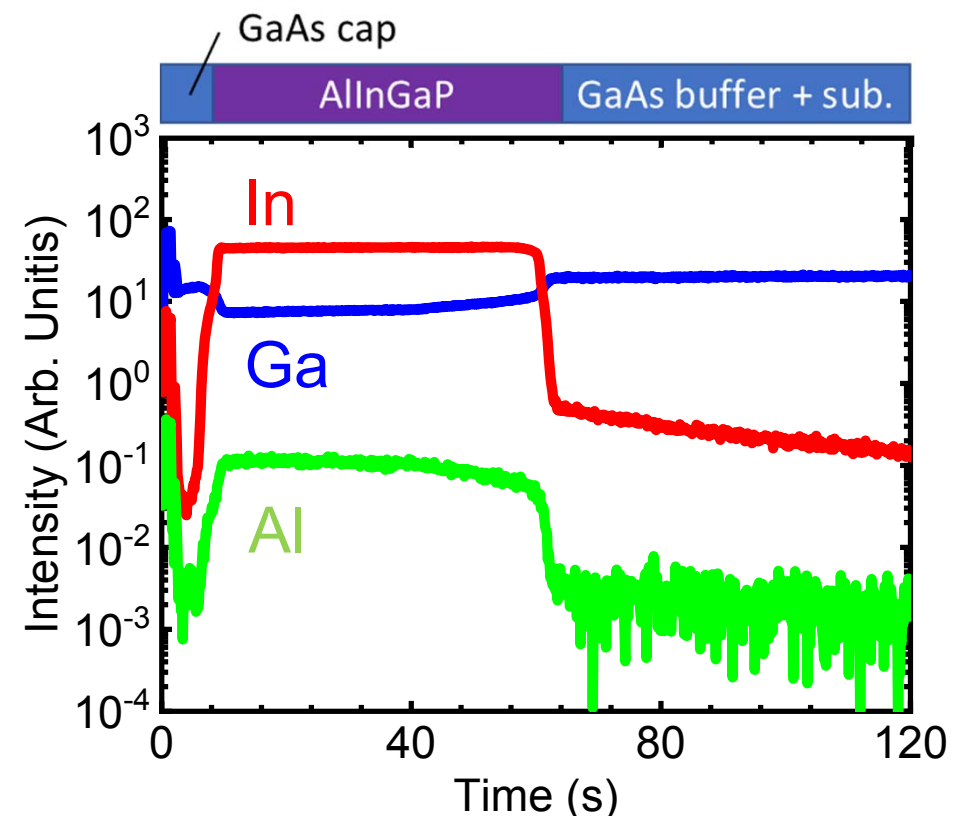
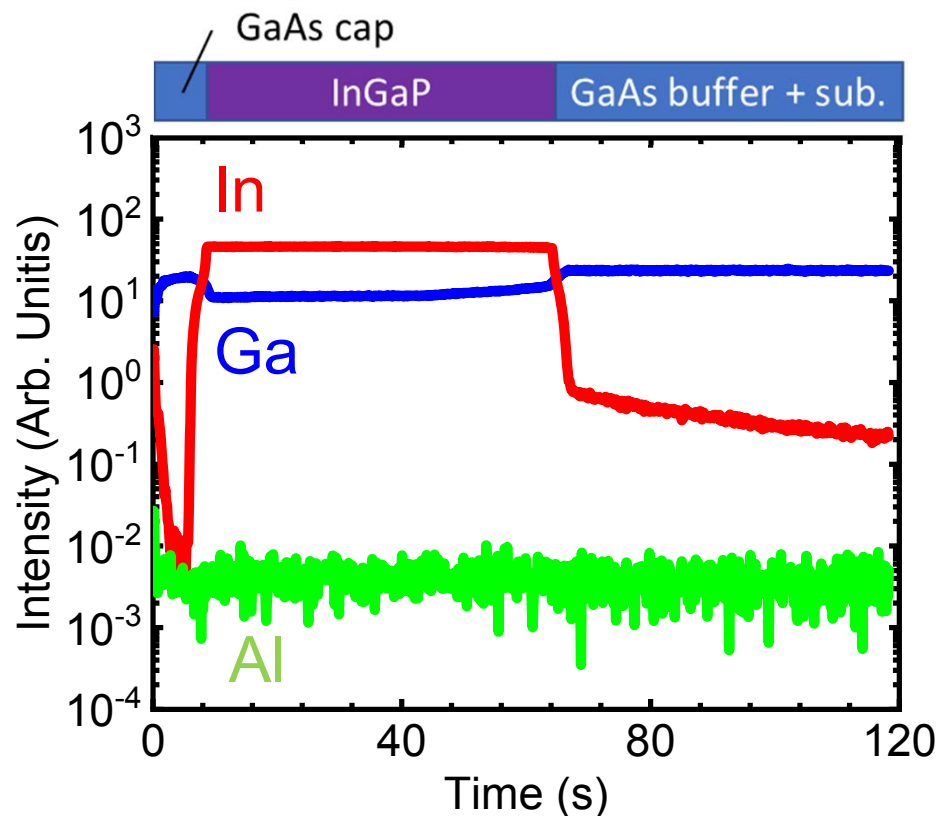
高周波グロー放電発光分光分析-深さプロファイル

HCl[Ga]	2.0 sccm
HCl[In]	7.7 sccm
HCl[Al]	0 sccm
PH ₃	100 sccm
H ₂ キャリア	0.5 slm

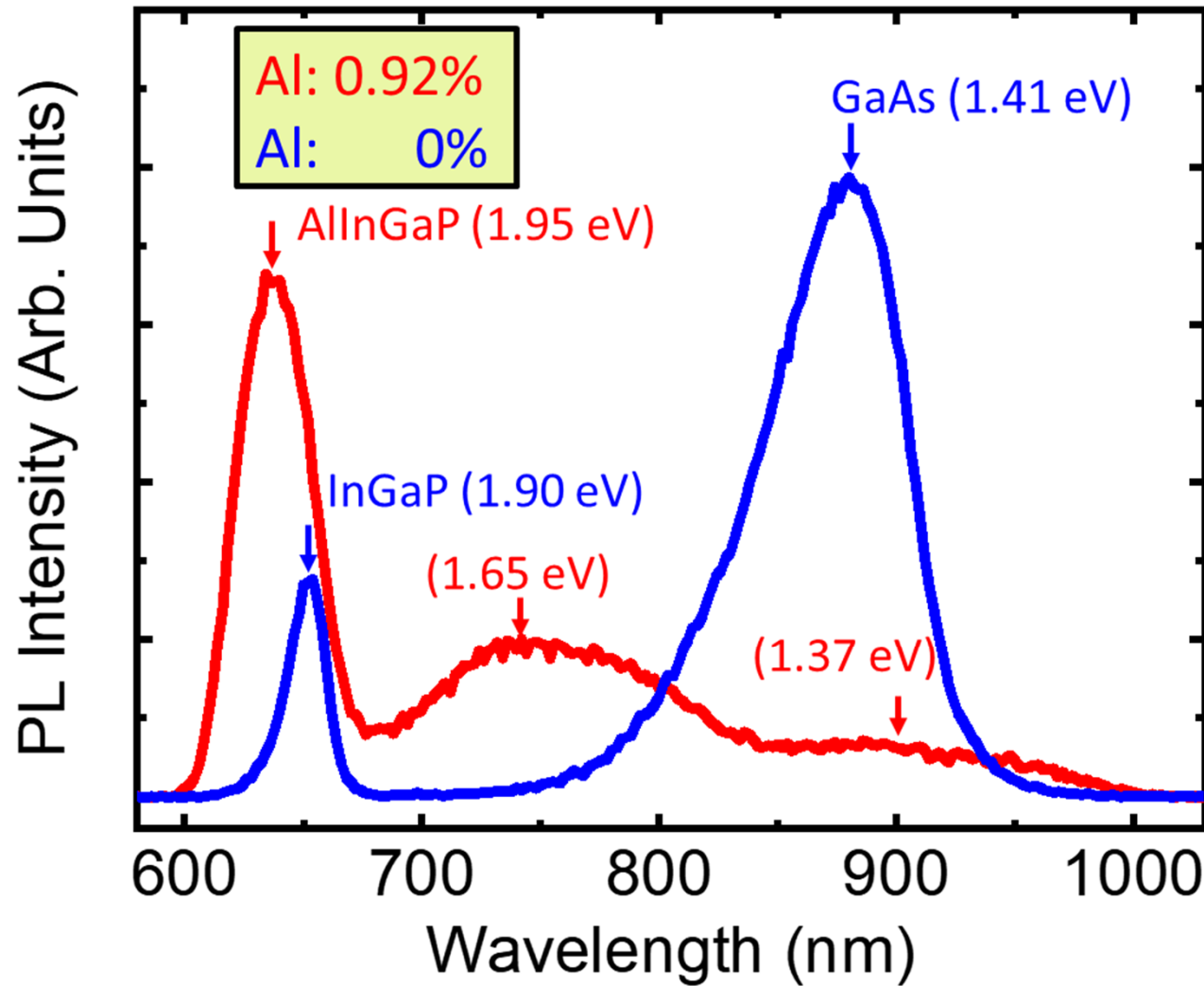
AlにHClを導入



HCl[Ga]	2.0 sccm
HCl[In]	7.7 sccm
HCl[Al]	0.1 sccm
PH ₃	100 sccm
H ₂ キャリア	0.5 slm



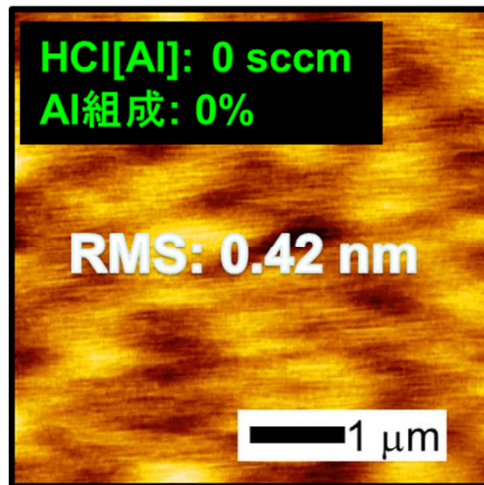
AllnGaPの室温PLスペクトル



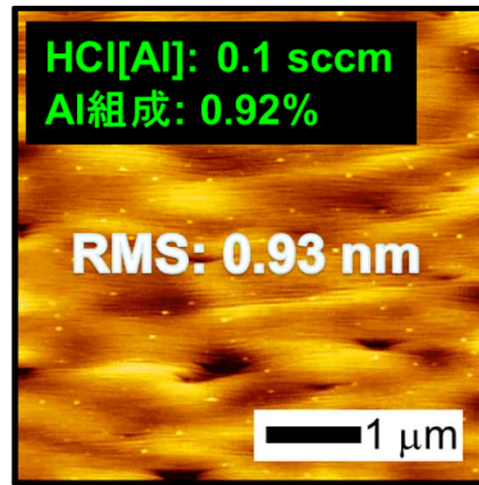
AllnGaP試料においてマルチピークを観測 → 成長条件の最適化が必要

成長条件による表面モフォロジーの変化

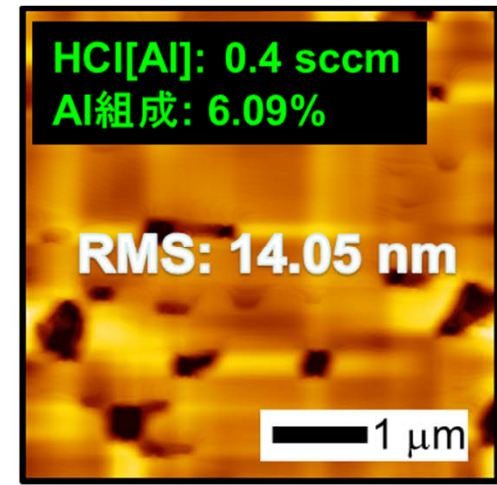
HCl[Al]流量の影響



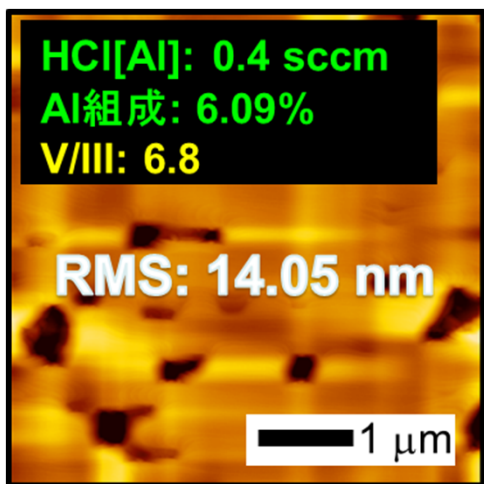
Al導入
→



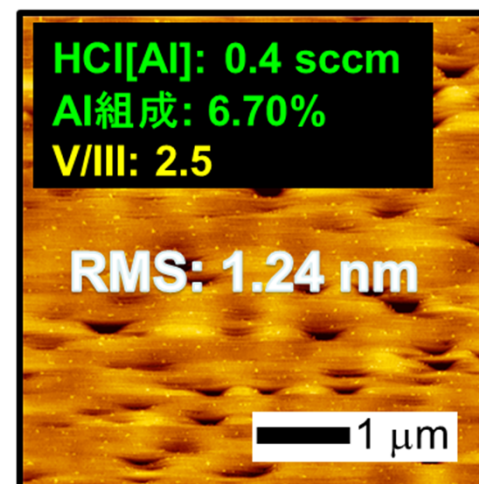
Al増加
→



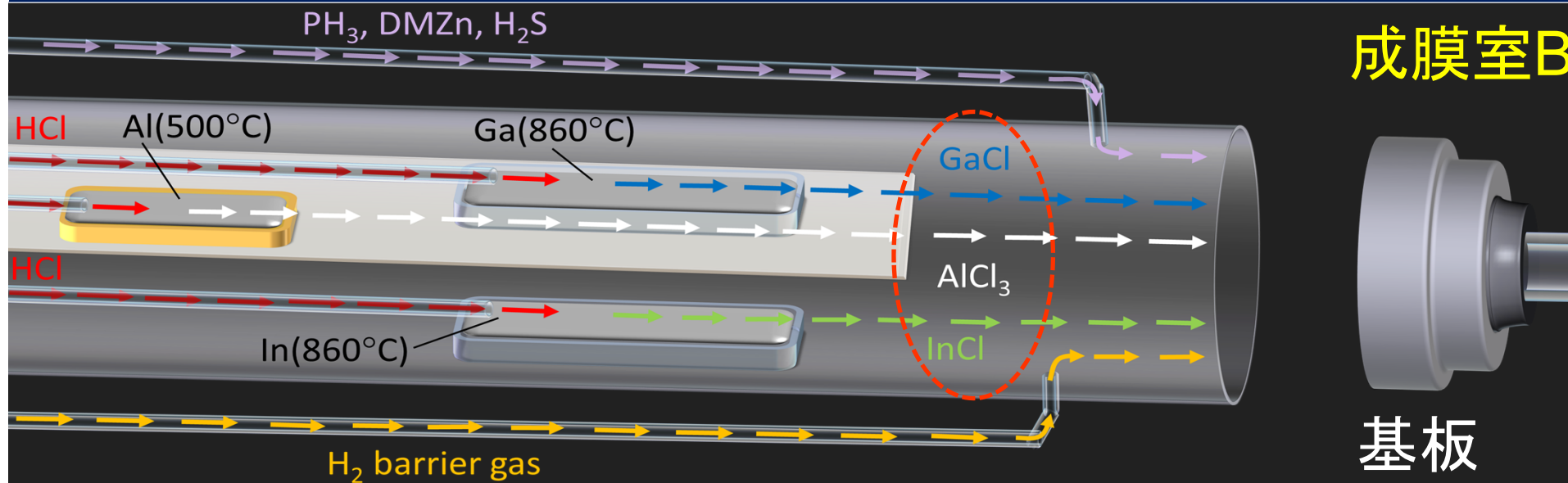
V/III比の影響



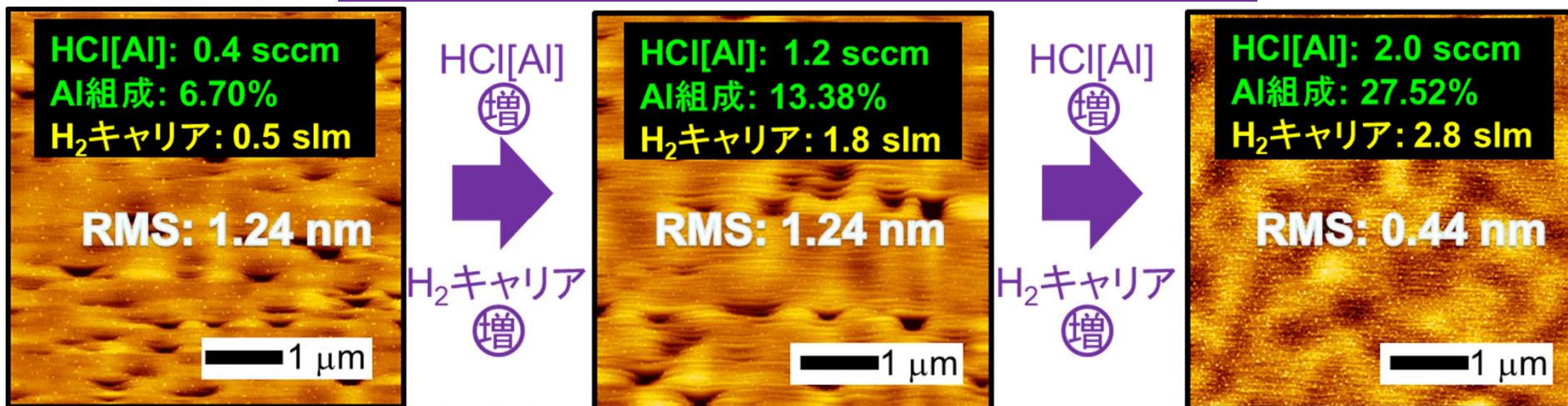
V/III比
⊖
→



- HCl[Al]流量を増加すると平坦性が低下
- V/III比を下げて成長することでRMSが改善
→マイグレーション向上効果



H₂キャリアガス(GaCl, AlCl₃, InCl用)の影響



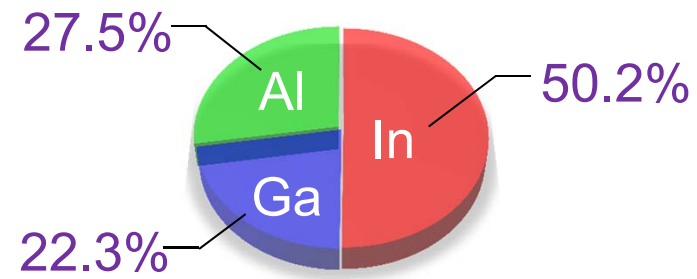
H₂キャリアガスを増加することで、
Al組成を上げてても良好な平坦性が得られる

- ・不純物の取り込み抑制
- ・境界層の影響

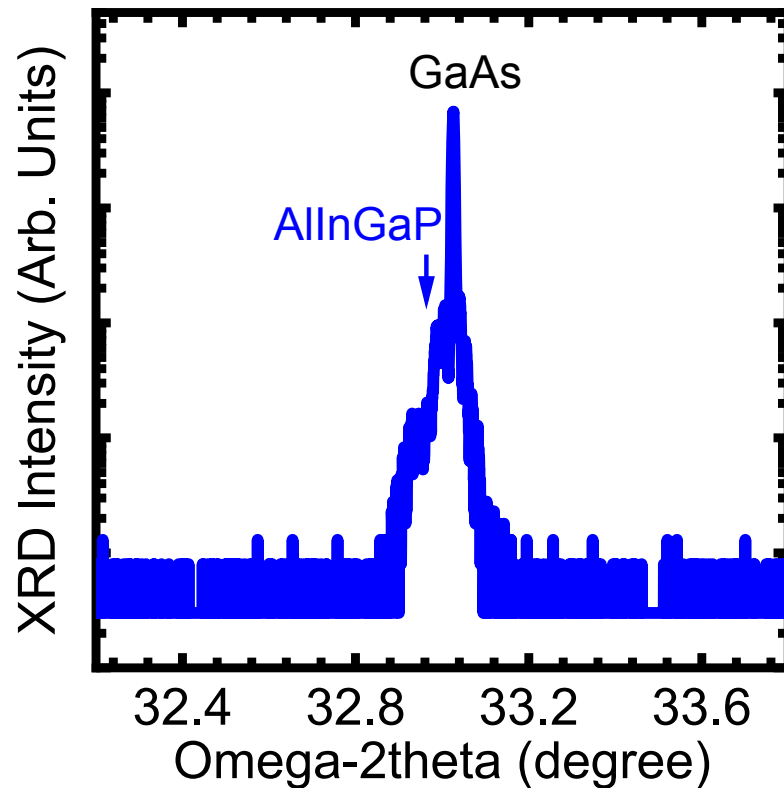
GaAs cap
AllnGaP
GaAs buffer
GaAs substrate

HCl[Al]: 2.0 sccm
 V/III比: 1.4
 H₂キャリア: 2.8 slm
 基板温度: 660°C
 成長速度: 9.9 μm/h

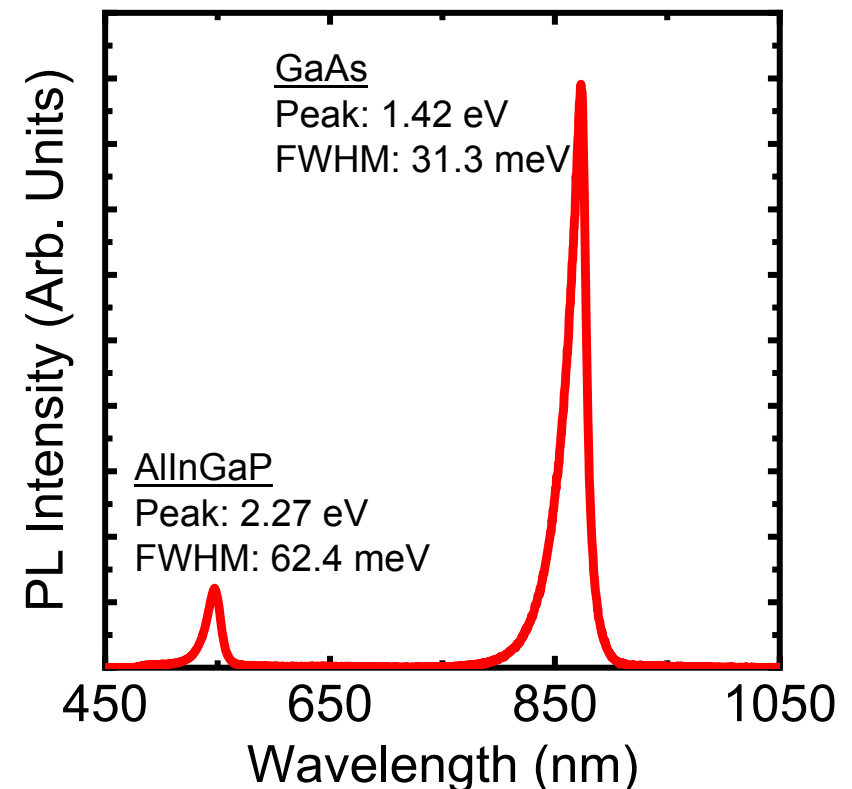
EPMAによるIII族元素の組成分析



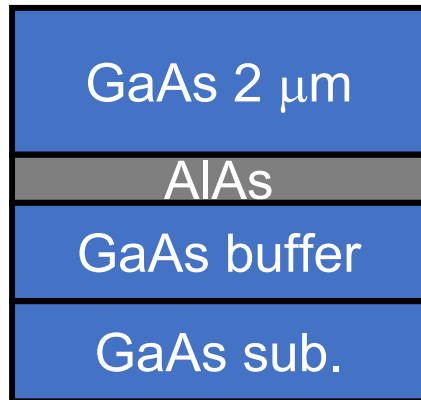
XRDスペクトル



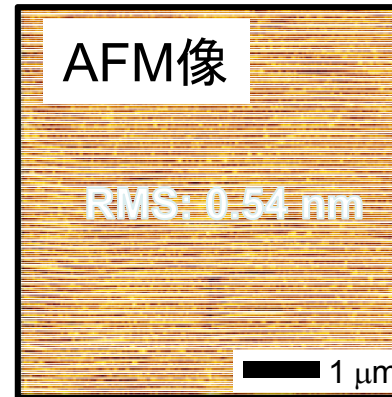
室温PLスペクトル



AiAsの成膜およびELO試験

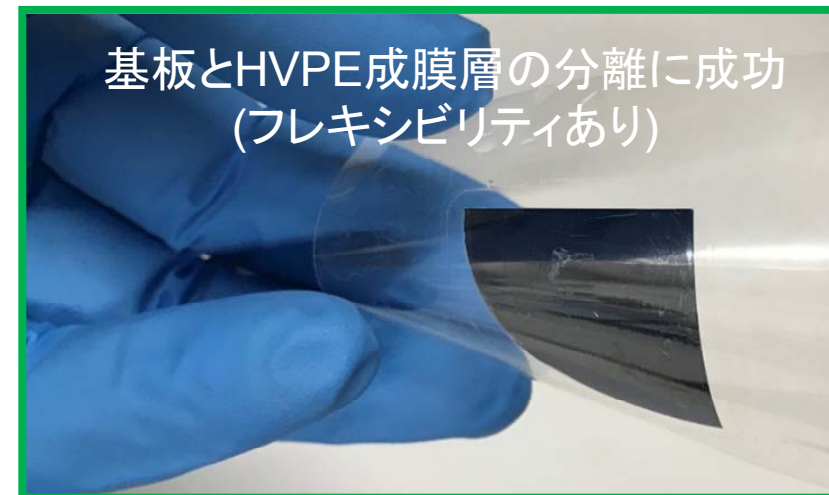
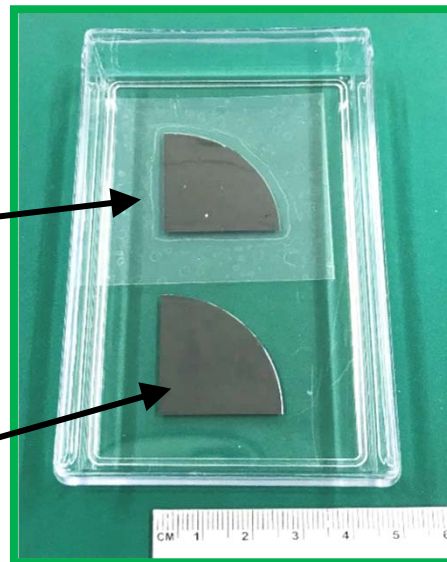
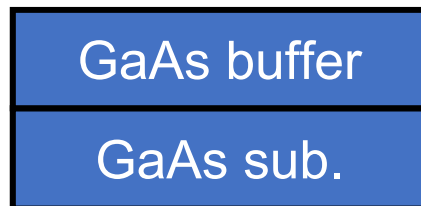
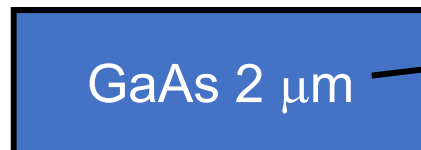


HCl[Al]	6 sccm
Ash ₃	10 sccm
H ₂ キャリア (III族供給用)	5 slm
基板温度	660°C
成長速度	1.2 $\mu\text{m}/\text{h}$



AIAs上でもGaAsが
ステップを形成しており、
平坦性も良好

ELOで
分離



まとめ

HVPE法を用いてAllnGaPとAIAsの成膜を実施

- Al温度を500°Cに制御してAlClの生成を抑制し、AlCl₃を供給
- V/III比を下げ、H₂キャリアガス流量を多くすることで、AllnGaPの成膜品質を改善
- 室温で2.27 eVのPL発光をAllnGaP試料から観測
- AIAsを成膜し、ELOを実証

HVPE法によるAllnGaPおよびAIAsの結晶成長に成功し、
高効率低コスト太陽電池の実現に向けて大きく前進