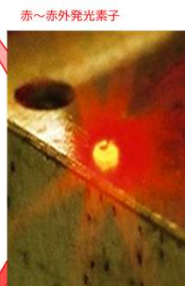
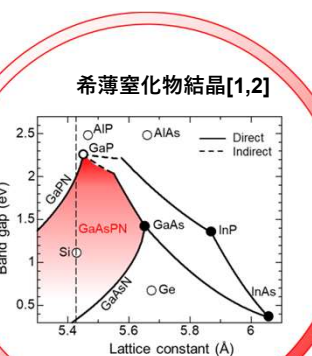
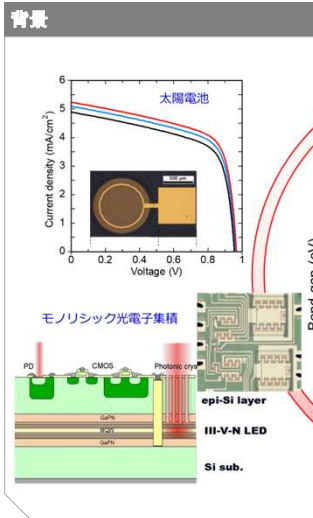


# III-V希薄窒化物混晶の成長過程におけるアンチモンサーファクタント効果



電気・電子情報工学系 山根啓輔



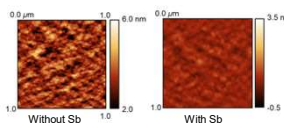
GaNAs[3,4], GaPN[5]のSb添加効果

III	IV	V
5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As
49 In	50 Sn	51 Sb

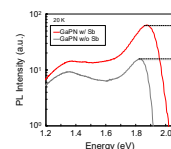
	GaNAs	GaPN (本研究)
母材	ヒ素系	リン系
Sb組成	10%以上も実 施例あり	0.4% ( $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ が固溶限?)
Sbの偏析	小	偏析傾向あり?

目的  
Sb添加III-V混晶の結晶性向上メカニズムの解明に向け、リン系Sb, Nの取り込み様式を考察する

☑ 平坦性の向上



☑ PL強度改善

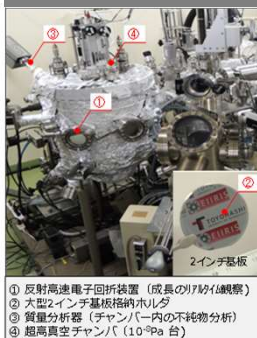


☑ N取り込み効率の向上

[3] N. Miyashita et al., Solar Energy Materials & Solar Cells 111 (2013) 127.

[4] N. Ahshan, et al., Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour 25, 157 (2022). [5]彦坂他, 第83回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-A307-7, 2022

## 実験的アプローチ



### Sources

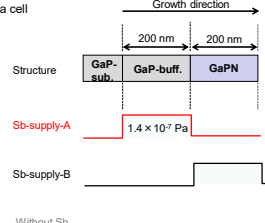
Ga: Metallic gallium (7N), Dual filament K-cell  
Sb: Metallic Antimony (6N), K-cell, Sb<sub>2</sub>  
P: red phosphorus (6N), Valved cracker,  
P<sub>2</sub>  
N: N<sub>2</sub> gas (G1), rf-plasma cell

### Condition

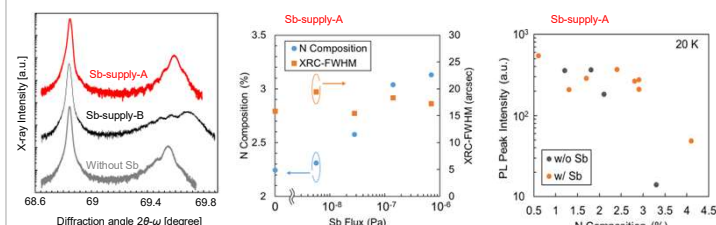
temperature :550°C  
V/III ratio : 5  
Rate : 300 nm/h

### Sequence

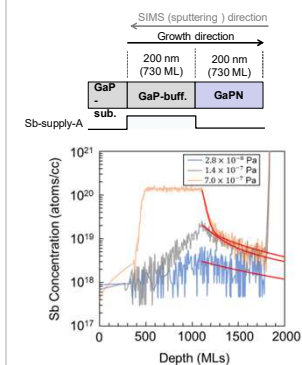
Sb supply layer  
Sb flux



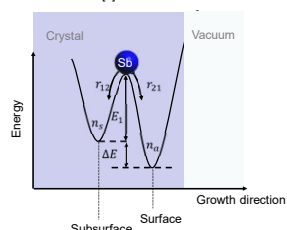
## 結晶性評価およびSb濃度解析



## Sb濃度



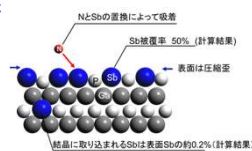
### サーファクタントの偏析モデル[1]



$$\begin{cases} \frac{dn_a}{dt} = \frac{F}{N_0} - r_{21}n_a(1-n_s) + r_{12}n_s(1-n_a) - \frac{n_a}{\tau_d} \\ \frac{dn_s}{dt} = -r_{12}n_s(1-n_a) + r_{21}n_a(1-n_s) \\ r_{12} = v \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right), r_{21} = v \exp\left(-\frac{E_1 + \Delta E}{kT}\right) \end{cases}$$

[1] J. Li, C. Huang, and J. C. Sturm, Appl. Phys. Lett. 101, 142112 (2012).

## 成長様式



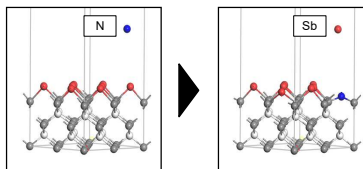
Sb= $1.4 \times 10^{-7}$  Pa時,  
0→200nmのGaPN成長中のSbの被覆率:  
 $n_s=50\% \rightarrow 20\%$

偏析率 =  $\frac{n_a - n_s}{n_a} \times 100 \approx 99.8\%$   
(結晶中には表面のSbの0.2%が取り込まれる)

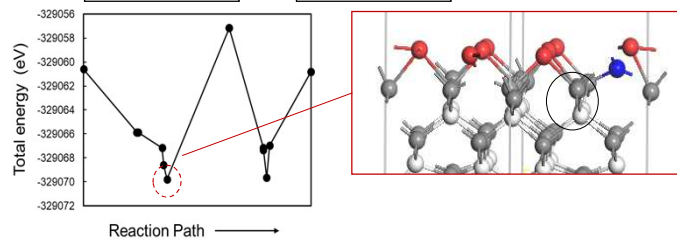
## 理論的アプローチ

### Sb表面への原子吸着の遷移状態解析

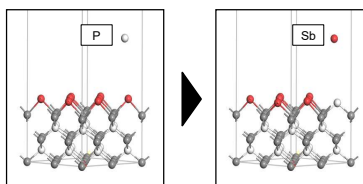
Case - I  
N atom



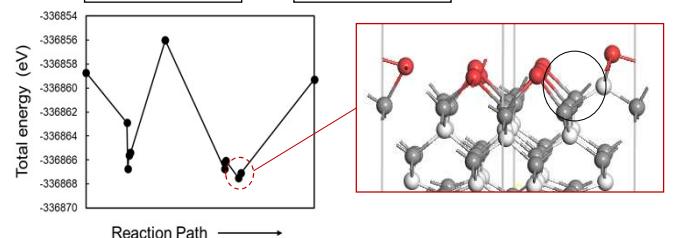
供給されたNはSbと入れ替わるより下図のように取り込まれた方がエネルギー的に安定



Case - II  
P atom



Pも同様にSbと入れ替わるより下図のように取り込まれた方がエネルギー的に安定



## まとめ

アンチモン添加希薄窒化物結晶の高品質化メカニズムを実験と理論解析を通して明らかにした

☑ Sb供給層と結晶性の関係 ⇒ Sb供給層/GaPN層分離でN均一化

☑ SbフラックスとN組成の関係 ⇒ Sbフラックス増加でN組成増加

☑ Sb濃度のSIMS分布解析 ⇒ 偏析率 (99.8%), 表面Sb被覆率(50%)

### 【謝辞】

本研究は豊橋技術科学大学IRES, VBL施設を利用して実施された。本研究の一部は科研費挑戦的研究(萌芽23K17746), 服部報公会およびマツダ財団の助成のもとに行われた。