

分子線エピタキシー法による Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶成長の熱力学解析Thermodynamic Analysis on Molecular Beam Epitaxy of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>東京農工大院工<sup>1</sup>, 東京農工大工<sup>2</sup>, 東京農工大 GIR<sup>3</sup>○佐和田 陽平<sup>1</sup>, 上田 菜月<sup>2</sup>, 小西 敬太<sup>1</sup>, 熊谷 義直<sup>1,3</sup>Dept. of Appl. Chem., TUAT<sup>1</sup>, Fac. of Tech., TUAT<sup>2</sup>, TUAT GIR<sup>3</sup>○Yohei Sawada<sup>1</sup>, Natsuki Ueda<sup>2</sup>, Keita Konishi<sup>1</sup>, and Yoshinao Kumagai<sup>1,3</sup>

E-mail: s172470x@st.go.tuat.ac.jp

β酸化ガリウム(β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)は約 4.5 eV の広いバンドギャップを有する酸化物半導体結晶であり、近年、分子線エピタキシー(MBE)法により成長した β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いた MESFET や MOSFET の試作も報告されていることから[1,2]、次世代パワーデバイス用材料として注目を集めている。一方我々は、ハライド気相成長(HVPE)法による高純度 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 厚膜の高温・高速成長を反応系の熱力学(平衡)解析をベースにして達成している[3,4]。低い原料供給分圧かつ比較的高い成長温度で実施される MBE 成長は、HVPE 法同様に熱平衡に達し易い成長系と目される。実際、III 族窒化物の MBE 成長では成長挙動が熱力学(平衡)解析で説明できることが報告されている[5]。そこで今回、MBE 法による Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 成長の熱力学解析を試みたので報告する。

金属 Ga と酸素プラズマ(O)を用いるプラズマ支援 MBE (PA-MBE)法による Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のホモエピタキシャル成長の熱力学解析を実施した。チャンパー内に存在するガス種はスクリーニングにより Ga, GaO, Ga<sub>2</sub>O, O の 4 種とした。これらのガス種は 2Ga(g)+3O(g)=Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(s), Ga(g)+O(g)=GaO(g), 2Ga(g)+O(g)=Ga<sub>2</sub>O(g) の 3 本の平衡反応で結ばれ、様々な Ga, O 供給分圧(P<sup>o</sup><sub>Ga</sub>, P<sup>o</sup><sub>O</sub>)および成長温度(T<sub>g</sub>)における各ガス種の平衡分圧 P を算出することで、成長の駆動力[ΔP<sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub> = 0.5×(P<sup>o</sup><sub>Ga</sub>-P<sub>Ga</sub>-P<sub>GaO</sub>-2P<sub>Ga<sub>2</sub>O</sub>)]を評価した。

図 1 は T<sub>g</sub> = 650°C, O 供給分圧 P<sup>o</sup><sub>O</sub> = 1.5×10<sup>-5</sup> Torr において、Ga 供給分圧 P<sup>o</sup><sub>Ga</sub> を変化させた時の基板直上の各ガス種の平衡分圧(上段)および成長の駆動力(下段)である。ΔP<sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub> は原料供給比(P<sup>o</sup><sub>O</sub>/P<sup>o</sup><sub>Ga</sub>)に敏感で、P<sup>o</sup><sub>Ga</sub> が小さい酸素過剰(O-rich)領域では、ΔP<sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub> は P<sup>o</sup><sub>Ga</sub> の増加に伴って線形に増加し、P<sup>o</sup><sub>Ga</sub>:P<sup>o</sup><sub>O</sub> = 2:3(ストイキオメトリ)となる点で ΔP<sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub> が最大となった。一方、Ga 過剰(Ga-rich)領域では、P<sup>o</sup><sub>Ga</sub> の増加に伴って ΔP<sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub> が減少し、最終的には Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板のエッチング(ΔP<sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub><0)になる。Ga-rich 領域では Ga<sub>2</sub>O の平衡分圧(P<sub>Ga<sub>2</sub>O</sub>)が P<sup>o</sup><sub>Ga</sub> の増加に伴い上昇しており、これが Ga-rich 領域における成長の駆動力低下の原因となっていることが分かった。また、Ga の平衡分圧(P<sub>Ga</sub>)はいずれの P<sup>o</sup><sub>Ga</sub> においても図中破線で示す 650°C における Ga の蒸気圧(P<sup>v</sup><sub>Ga</sub>)を下回っており、Ga ドロップレットが形成されないことが示唆される。これらの解析結果は、Vogt らが報告している Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の PA-MBE 成長の結果[6] を良く説明でき、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の MBE 成長が熱力学に従うことを示している。

本研究の一部は科研費新学術領域研究 No.16H06417 の援助を受けた。

- [1] M. Higashiwaki *et al.*, Appl. Phys. Lett., **100**, 013504 (2012).  
 [2] M. Higashiwaki *et al.*, Appl. Phys. Lett., **103**, 123511 (2013).  
 [3] K. Nomura *et al.*, J. Cryst. Growth, **405**, 19 (2014).  
 [4] H. Murakami *et al.*, Appl. Phys. Express, **8**, 015503 (2015).  
 [5] A. Koukitu *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **36**, L750 (1997).  
 [6] P. Vogt *et al.*, Appl. Phys. Lett., **108**, 072101 (2016).

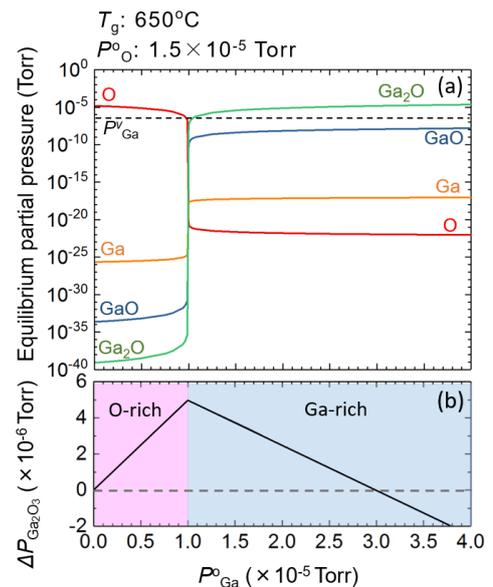


Fig. 1 Dependence of equilibrium partial pressures of gaseous species (a) and resultant driving force of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> deposition, ΔP<sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub> (b) on input partial pressure of Ga, P<sup>o</sup><sub>Ga</sub>.