

ウルトラワイドバンドギャップ半導体の実装に向けた溶液成長の学理構築とプロセス開発

	研究代表者	東北大学・多元物質科学研究所・教授
	福山 博之（ふくやま ひろゆき）	研究者番号：40252259
研究課題情報	課題番号：25H00412	研究期間：2025年度～2029年度
	キーワード：結晶成長、窒化アルミニウム、熱力学、融体物性	

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

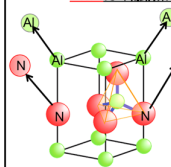
本研究は、次世代の光デバイス、パワーデバイスならびに高周波デバイス用材料として注目されるウルトラワイドギャップ半導体である窒化アルミニウム（AlN）単結晶の新たな溶液成長法の開発を目指すものである。本研究では、研究代表者が20年以上積み上げてきたAlN結晶成長研究の最終段階として（１）鉄鋼製錬における溶鋼中の非金属介在物の物理化学からヒントを得て、AlN溶解度積の大きな溶液成長用フラックスを設計し、（２）高温アニール効果による結晶中の格子欠陥（転位）の低減機構を導入したハイブリッド溶液成長プロセスを提案する。この目的達成に必要な熱力学的プロセス設計および超高温その場観察等の研究開発要素をまとめ、最終的には、学理に裏付けられたAlN結晶成長プロセスの構築を目指す。本研究成果によって、AlN結晶基板が普及し、SiCやGaNなど先行する他のワイドギャップ半導体を凌駕する物性を有するAlN系デバイス研究への展開が期待できる。

AlNは結晶成長が極めて困難である

- 理由：
- AlNの熱力学的安定性は、 Al_2O_3 の約半分である。
 - 約2000℃で解離圧が1barに達する。
 - シリコンのような融液成長ができない。

学術的『問い』：
融点を持たない化合物半導体結晶の溶液成長法の指導原理はどうあるべきか

AlNは、融点に達する前に解離する



現状の結晶成長法
昇華再結晶法：
AlNが昇華する性質を利用した結晶成長法
問題点：
・高温（2000℃以上）
・結晶の着色

『問い』へのアプローチ

鉄鋼製錬をヒントにした
新たな溶液成長法の提案

AlNの溶解平衡： $AlN = Al + N$

成長速度は飛躍的に増大した

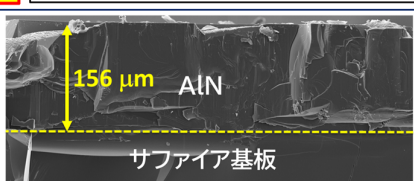


図1 AlN結晶成長上の技術障壁とその解決へのアプローチ

●AlN結晶の応用分野

AlNは、SiCやGaNよりもバンドギャップが大きい、絶縁破壊電界が大きく、熱伝導率も高い優れた物質であり、深紫外LEDの発光効率の向上だけでなく、高耐圧・低損失な電力制御用パワーデバイス用の材料や無線通信等の高周波デバイスとしてもSiCやGaNを凌駕する優れたポテンシャルを有している。



図2 優れたポテンシャルを有するAlN結晶の応用分野

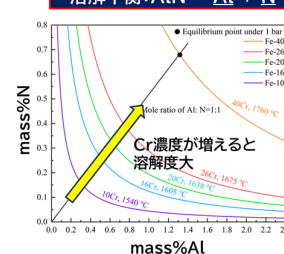
この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●AlN結晶成長の熱力学的検討と結晶成長のその場観察

熱力学的考察に基づいてAlNの溶解度積の大きな溶液成長用フラックスを推定し、このフラックスを用いてAlN結晶の溶液成長実験を行う。また、電磁浮遊法を用いて、浮遊したフラックス液滴と窒素ガスとを反応させることによってフラックス表面におけるAlN結晶成長のその場観察を行い、結晶成長の最適条件を探索する。

熱力学的検討：AlNの溶解度積

溶解平衡： $AlN = Al + N$



電磁浮遊法によるAlN結晶成長その場観察

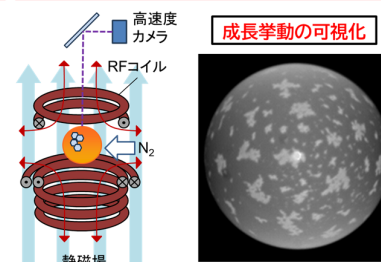


図3 結晶成長の熱力学的検討およびその場観察

●結晶成長シミュレーションに必要な熱物性計測

結晶成長プロセスを最適化するため、リアクター内の温度分布、溶液対流分布等をシミュレーションにより再現する。福山研究室では、20年以上にわたり浮遊法による高温融体の物性計測技術を開発してきた実績がある。本研究では、シミュレーションに必要な熱物性値（密度、比熱容量、熱伝導率、放射率、表面張力、粘度）を、浮遊法（電磁浮遊法、ガスジェット浮遊法）により測定する。

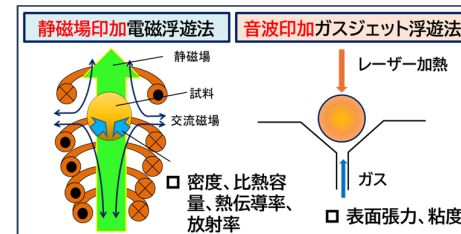


図4 浮遊法による熱物性計測

●結晶評価

結晶歪みおよび不純物化学状態：AlN結晶について歪みの状況を把握するための手段として放射光X線回折法による高精度の歪み評価を適用するほか、不純物の混在や欠陥による電子状態変化を主に軟X線吸収分光（NanoTerasu）および硬X線光電子分光（Spring-8等）を駆使して解析する。
光学的性質評価：バンド端近傍発光の強度や減衰寿命を分光評価系や時間分解分光系（大阪大学）を用いて測定することにより、キャリア寿命を指標に結晶品質の定量化、良し悪しの序列を客観的に決定できるようにする。

新たな溶液成長の構築

熱力学的原理

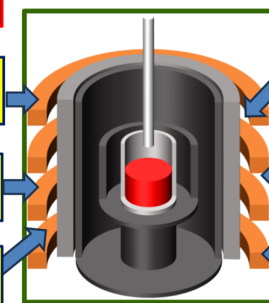
鉄鋼製錬の介在物をヒントにした
新たな溶液成長法の提案

転位低減効果

アニール効果を取り入れた
ハイブリッド高温溶液成長

結晶成長挙動の可視化

浮遊法による
結晶成長その場観察



熱と流動の可視化

超高温物性計測による
結晶成長シミュレーション

結晶評価

放射光X線を利用した
結晶歪み、不純物の化学状態分析

光学的性質評価

バンド端近傍発光強度や減衰寿命
を評価

図5 本研究の全体像と研究要素