

# 京都大学教育研究振興財団助成事業 成 果 報 告 書

2019年 9月 4日

公益財団法人京都大学教育研究振興財団

会 長 藤 洋 作 様

所属部局・研究科 工学研究科

職 名・学 年 博士後期課程 3年

氏 名 神野 莉衣奈

助 成 の 種 類	<b>2019年度 ・ 在外研究助成</b>	
研 究 課 題 名	α-(Al,Ga,In) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 混晶系を用いた超ワイドバンドギャップ半導体の作製	
受 入 機 関	コーネル大学(米国)	
渡 航 期 間	2019年 7月 24日 ~ 2019年 8月 20日	
成 果 の 概 要	<b>タイトルは「成果の概要／報告者名」として、A4版2000字程度・和文で作成し、添付して下さい。「成果の概要」以外に添付する資料</b> <input checked="" type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有( )	
会 計 報 告	交付を受けた助成金額	357,000 円
	使用した助成金額	357,000 円
	返納すべき助成金額	0 円
	助 成 金 の 使 途 内 訳	交通費：233,500円
		宿泊料：418,600円
		日当：142,600円
		旅行雑費(ESTA申請、燃油サーチャージ等)：14,115円
	(超過分は他研究費から補填)	
当財団の助成について	<p>(今回の助成に対する感想、今後の助成に望むこと等お書き下さい。助成事業の参考にさせていただきます。)            御財団の助成は、他の財団と比べ非常に融通が利き、直前の日程変更にも柔軟に対応していただくことができ円滑に渡航の準備を進めることができました。また、これまでの海外への渡航歴や御財団からの過去の支援に関わらず申請が可能な貴重な助成であり、今後もこの採択方針を続けていただければと存じます。            最後に、御財団からの支援に心から御礼申し上げます。</p>	

## 成果の概要/神野 莉衣奈

### (1) 研究目的

$\alpha$ -(Al,Ga,In) $_2$ O $_3$  を用いた最も大きいバンドギャップを有する半導体の創成を目的として研究を行った。近年、安定したエネルギー供給の確保と地球温暖化防止のためにますます省エネルギー社会が求められている。バンドギャップ  $E_g$  が大きいほど大電力を低損失で駆動でき省エネ効果が期待できるため、パワーデバイス(大電力用素子)の次世代材料として、超ワイドバンドギャップ(Ultra Wide-Bandgap, UWBG)半導体( $E_g > 3.4$ )が注目を集めている。私が研究対象としている  $\alpha$ -(Al,Ga,In) $_2$ O $_3$  混晶系では他の材料では実現できない  $E_g \sim 9$  eV まで変調可能であり、究極の省エネ電子デバイスの実現の可能性を秘めている。

6.0 eV を超えるバンドギャップを持つ材料で半導体として伝導性を得るためには、電気特性に悪影響を与える結晶欠陥を極限まで低減することが必須であり、主に線欠陥の転位と点欠陥の不純物の二種類の欠陥の低減が求められる。私は本学にて、ミスT CVD 法によりバッファ層(緩衝層)や選択成長といった技術を用いて  $\alpha$ -(Al,Ga,In) $_2$ O $_3$  混晶系のベースとなる  $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  薄膜中の転位密度の低減に関する研究を行ってきたが、不純物の混入が課題として残っていた。一方で、不純物密度の低減という観点では、超高真空下で高純度の原料を蒸発させ成長を行う MBE 法が適していると考え、2018 年度に MBE を所有している米国コーネル大学に滞在し研究を行った。しかし、MBE 法により成長した薄膜中には転位に加え異なる構造の結晶の混入により目的達成には至らなかった。そこで、本学で作製した低転位密度の結晶の上に MBE 法を用いて低不純物濃度の薄膜を成長することで伝導性を示す  $\alpha$ -(Al,Ga) $_2$ O $_3$  薄膜の実現を目指した。

### (2) 研究成果

まず、ミスT CVD 法により n 型伝導を実現している  $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  へのドーピングを行った。上述したように、ミスT CVD 法によりサファイア基板上へ成長した絶縁性  $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  薄膜をテンプレートとして用い、MBE 法により n 型  $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  層を成長した。ドーパントとして Ga と最もイオン半径が近い 4 価を取りうる Ge を用いた。Ge セルの温度(Ge の供給量)を変化させ、 $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  へのドーピングを行ったが、いずれのサンプルも単相の  $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  であるにも関わらず、電気伝導性を示さなかった。このことから、MBE 法により成長した  $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  が電気特性を示さない理由は、転位密度や他相の混入以外の可能性であると考えられる。理由として現状では以下の 3 つが挙げられる。(i) Ge が  $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  薄膜中へ入っていない、(ii) Ge が薄膜中に存在するが Ga と置換していないため伝導性が得られない、(iii) Ge が薄膜中に存在し Ga と置換しているが活性化率が低いまたは濃度が低いため電気特性評価が行えないほど抵抗値が高い。今後、二次イオン質量分析法、電子スピン共鳴を行うことでこれらの原因を特定し、MBE 法に依る n 型  $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$ 、および  $\alpha$ -(Al,Ga) $_2$ O $_3$  の実現に繋げていく予定である。

一方で本渡航中に、コーネル大学の Prof. Muller's group の Ms. Chang と MBE 法により成長した  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の TEM 観察結果に関する詳細な考察も行った。議論の末、これまで  $\alpha$  相とは異なる構造と考えていたドメインは積層欠陥による結晶のずれに起因するもので、単結晶薄膜の成長が実現されていたことが分かった。さらに、 $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜中の転位の挙動についても考察を行った。これらの結果は学術誌へ投稿準備中である。

また、本渡航期間中にコロンバス(米国)で開かれた IWGO2019 に参加し、本滞在中に行った結果を含めた発表を行った。IWGO2019 は私が研究対象としている酸化ガリウムの唯一の国際会議である。MBE 法による単結晶  $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の成長は一般的に難しいとされており、現状では伝導性は示していないものの本研究内容は学術的な貢献度が高いと評価され”Best student award”を受賞するに至った。さらに、本発表から University of Nebraska-Lincoln との共同研究に発展し、エリプソメトリーにより  $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のバンドギャップおよび誘電関数を詳細に評価する予定である。これら物性はデバイス設計において重要であるが、 $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の  $E_g \sim 9$  eV まで測定可能な装置を有する機関は非常に少なく、University of Nebraska-Lincoln との共同研究は  $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の基本物性を示す初めての報告となり、そのインパクトは大きいと期待される。

### (3) 所感

今回のコーネル大学(米国)への渡航は私にとって二回目であったが、前回の結果をまとめた上で必要な実験を集中して行うことができ、非常に有意義な滞在となった。また、実験面だけでなく本滞在を通して、私が研究対象としている  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および  $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> がアメリカで注目を集め始めていることを体感できた。酸化ガリウムの研究というと、特にアメリカでは  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に関する研究が主流であり、私が対象としている  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> はマイナーな研究であった。しかし、受入研究者の Prof. Jena と議論をする中で、以前より  $\alpha$  相に興味を抱いているように感じた。さらに、酸化ガリウムを対象とした研究者のみが集まる国際会議において”Best Student Award”を受賞出来たということは、世界的にも  $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が注目されていることを意味している。学部生のころから従事している研究が、京都大学の学生最後の年に受け入れられたように実感でき、非常に貴重な経験となった。

また、MBE 法という半導体成長装置として確立された手法を用いて  $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の成長を実現したため他の研究者が容易に参入することができ、今後  $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に関する研究を行う研究者が増えますます発展することが期待できる。