2025 年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	**高性能 p 型酸化テルル熱電半導体デバイスの開発**
キーワード	①薄膜、②熱電半導体、③スパッタリング

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏　名	キム　ミンソク 金　旼奭
配付時の所属先・職位等 （令和 7 年 4 月 1 日現在）	青山学院大学　理工学部　助教
現在の所属先・職位等	青山学院大学　理工学部　助教
プロフィール	2020 年 3 月、山梨大学大学院グリーンエネルギー変換工学において博士の学位を取得して、2023 年まで韓国でディスプレイやトランジスターについて研究しました。2024 年 4 月から青山学院大学に着任し、機能性酸化物系、カルコゲン系の半導体の開発をしています。

1. 研究の概要

酸化物半導体は主に n 型半導体として知られており、高い電子移動度を有することから、さまざまなデバイスへの安定的な応用が期待されている。しかし、第 4 次産業革命の進展に伴い、p 型半導体の需要も高まっている一方で、酸化物半導体における p 型材料は依然として限られている。

一方、カルコゲナイド材料の一種であるテルルは、主に p 型伝導性を示し、高い正孔移動度を有することから、太陽電池や熱電材料などに広く利用されてきた。しかし、テルルは酸化されやすいという欠点を有している。そこで本研究では、テルルをドープした酸化物半導体を作製し、その構造的、光学的、電気的および熱的特性を評価することにより、新たな n 型または p 型酸化物半導体の開発を目的とした。

テルルドープ酸化物半導体を作製するためには、適切な材料設計が重要である。本研究では、酸化物半導体として広く用いられている In_2O_3、ZnO、Ga_2O_3 などを対象として材料設計を行った。半導体薄膜はマルチカソードスパッタリング法により成膜し、テルル濃度は成膜時のスパッタリングパワーを制御することで調整した。その後、各半導体薄膜における Te 濃度、結晶構造、光学的特性、電気的特性および熱的特性を評価した。

その結果、テルル濃度の増加に伴い、薄膜は非晶質構造を示す傾向が確認された。また、テルル濃度が増加するにつれて移動度は向上する一方で、キャリア濃度は減少することが明らかとなった。この要因として、Te^{4+}よりも Te^{2-}の状態が優先的に形成されることが示唆された。

2. 研究の動機、目的

近年、第 4 次産業革命の進展に伴い、高性能ディスプレイ、メモリ、フレキシブルデバイス、熱電半導体、AI 技術など、さまざまな分野において半導体技術の重要性がますます高まっている。これにより、高性能化、高集積化、低消費電力化に対応できる新規半導体材料の開発が強く求められている。特に、次世代電子デバイスや透明・フレキシブルデバイスへの応用を考える上で、優れた電気的特性と高い安定性を両立する材料の探索は重要な課題である。

このような技術的要求に応える材料として、酸化物半導体は高い化学的安定性、透明性、成膜プロセスの多様性などの利点を有しており、幅広い応用が期待されている。しかしながら、多くの酸化物半導体は主に n 型伝導性を示すため、p 型酸化物半導体の材料選択肢は依然として限られている。そのため、p-n 接合や相補型回路などの高機能デバイスを実現するためには、安定かつ高性能な p 型酸化物半導体の開発が不可欠である。一方、カルコゲン元素の一つであるテルルは、主に p 型半導体特性を示し、高いキャリア移動度を有する材料として知られている。このため、テルルの特性を酸化物半導体に導入することで、p 型伝導性の向上が期待できる。しかし、テルルは酸化されやすく、単体材料としては環境安定性に課題を有している。そこで、テルルを酸化物半導体にドープすることにより、酸化物半導体の安定性とテルルの高移動度 p 型伝導特性を同時に活用できる可能性がある。

以上の背景から、本研究では Te ドープ酸化物半導体を作製し、その構造的および電気的特性を評価することで、高い安定性と高移動度を兼ね備えた p 型酸化物半導体の開発を目的とする。

3. 研究の結果

次世代エネルギー材料のためのテルルドーピングを施した In_2O_3 を作製した。テルリウムは Te^{4+} と Te^{2-} を同時に持っているため、カチオンが支配したり、あるいはアニオンが支配する可能性が高い。

In_2O_3 の場合、In^{3+} と O^{2-} を持っているので Te をドーピングすると、Te^{4+} によってカチオンがあるため高い電子移動度を示すだろう。我々は T e の濃度を 16 at.%から 41 at.%まで増やして堆積し、約 18 at.% 以下では In_2O_3 結晶質、18 at.% 以降はアモルファスを示した。

これは、Te と In_2O_3 の結晶構造が異なるために現れる現象と見なすことができる。光学バンドギャップは、約 2.1 eV から 1.2 eV にテルル濃度が増加するほど減少する傾向が見られた。これは、InTe 薄膜の光学バンドギャップが約 1.42 eV を示すためと考えられる。

InTe の場合、Te^{2-} が存在しなければならないため、XPS を介して Te の Te^{4+} と Te^{2-} の成分分析を進行し、テルル濃度が増加するほど Te^{2-} が増加することを示した。

これは、低濃度の Te は Te^{4+} が優先的に表され、Te の濃度が増加するほど Te^{2-} が優先的に示すことを示した。電気的特性の場合、Te の濃度が増加するにつれてキャリア濃度は減少し、移動度は約 25 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ まで増加し、キャリア濃度は 10^{20} から 10^{17} cm^{-3} 減少した。これは、低濃度の Te の場合、イオン化散乱により移動度が低く現れる。

ゼーベック係数の測定結果は約-50～100 μV/K で、他の金属に比べて悪くない結果を示した。 特に、テルルの濃度が上

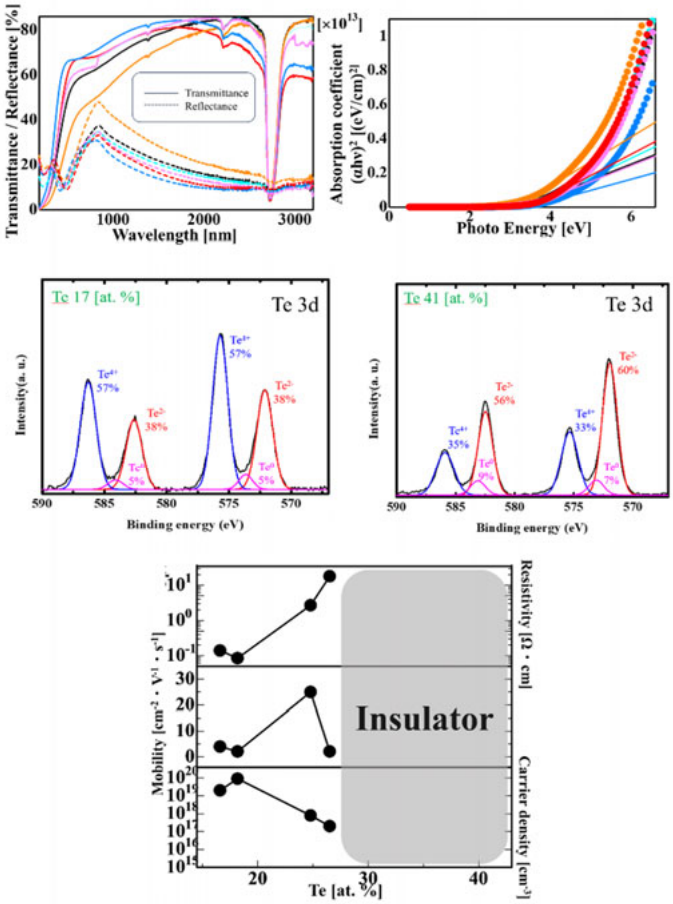


図 1 光学特性とバンドギャップ、XPS の Te3d 起動と電気特性

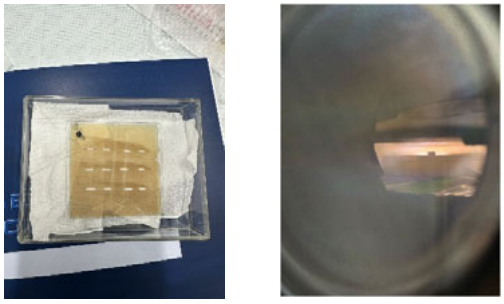


図 2 薄膜写真と薄膜蒸着の写真

がるほど高いゼーベック係数が得られた。テルル濃度が増加するほど Te^{2-}が増加するため、散乱メカニズムが変化すると考えられる。また、キャリア濃度が高くないため、Te ドープ酸化物 TFT や熱電半導体にも適用可能であると予測される。この材料を用いてコンピュータシミュレーションを実施し、最適な Te 濃度を見つけながら、理論値と実験値についてバンド構造などの研究を継続している。

[達成目標]

- テルル酸化物基盤材料の開発 1 件以上および 3 件以上の基礎評価の実施。
  （薄膜特性、光学的特性、電気的特性、電子的特性）　**（完了）**
- バンドギャップ ： >1.0eV **（達成）**
- ホール移動度 ： $>5cm^2 \cdot V^{-1}s^{-1}$ **（達成）**
- 論文 2 件以上（50% 1 件―投稿後調査中）
- デバイス評価 - 1 件以上（熱電特性、TFT 特性）**（50% 熱電特性完了）**

[表１．研究推進日程]

	研究内容(月)(●：施行)	25/4	5	6	7	8	9	10	11	12	26/1	2	3
1	**材料設計**	●	●										
2	**スパッタリングプロセス**			●	●	●	●	●	●				
3	**薄膜基礎評価**						●	●	●	●	●	●	
4	**デバイスの製作と評価**											●	●

4. 研究者としてのこれからの展望

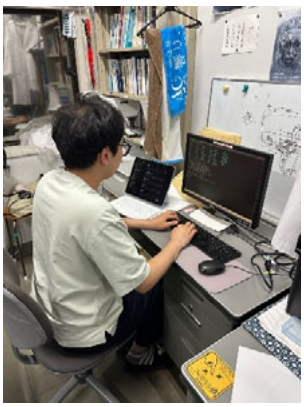
私学事業団より若手研究者奨励金のご支援を賜ったことにより、自身が取り組みたい研究および学術的価値の高い研究を遂行する貴重な機会を得ることができた。

本奨励金の支援を通じて、カルコゲナイド関連材料を用いた研究をさらに発展させるための基盤を構築することができた。また、本研究は今後の多様な応用展開につながる重要な基礎的研究資産となった。

今後は、本研究で得られた成果および知見をもとに、さまざまなデバイスの作製へと展開していきたいと考えている。特に、太陽電池、熱電材料、ガスセンサーなどの分野への応用研究を進めることが可能となり、今後の研究活動の発展に大きく寄与するものと期待される。

5. 支援者（寄付企業等や社会一般）等へのメッセージ





私学事業団より若手研究者奨励金のご支援を賜り、新規カルコゲン酸化物半導体の作製に取り組むことができました。本研究を通じて、学術的に価値のある成果を得るとともに、今後の研究活動につながる多くの知見を得ることができました。

また、本奨励金の支援は、カルコゲナイド関連材料を用いたさらなる研究を展開するための大きな足掛かりとなりました。今後は、本研究で得られた成果を基盤として、社会の発展に貢献できる先進的な材料研究へと発展させていきたいです。

研究は、小さな成果を一つひとつ積み重ねることで大きく発展していくものであると考えています。このような研究の意義を評価し、若手研究者奨励金の支援対象として採択してくださった私学事業団ならびに寄付企業の皆様に、心より感謝申し上げます。