

最先端・次世代研究開発支援プログラム  
事後評価書

研究課題名	透明半導体スピントロニクス基礎と応用
研究機関・部局・職名	東京大学・大学院理学系研究科・准教授
氏名	福村 知昭

## 【研究目的】

半導体スピントロニクスは、半導体エレクトロニクスが活用する電荷に加えて、電子の持つもう一つの自由度であるスピンを活用し、超低消費電力デバイスに資する Beyond CMOS 技術の有力候補の一つである。金属スピントロニクスでは困難である電荷量の制御が容易であるため、さらに高機能なデバイスを実現できる可能性がある。半導体スピントロニクス材料の最有力候補として強磁性半導体－半導体に希薄量の磁性不純物をドーピングした物質－が挙げられるが、これまでもっともさかんに研究されている Mn ドープ GaAs のキュリー温度（強磁性転移温度）は 200 K 未満と室温に届かないため、室温強磁性半導体の出現が望まれていた。

研究代表者は、ワイドギャップ半導体の透明酸化物をベースとした強磁性半導体における室温強磁性発現の可能性に着目し、酸化物ベース磁性半導体の概念を初めて提唱した。そして、Co ドープ  $\text{TiO}_2$  が室温強磁性を示すことを発見し、これまでの強磁性半導体のキュリー温度を 600 K まで一気に更新した。しかし、強磁性の起源が強磁性半導体の本質であるキャリア媒介相互作用であるか確証がなく、半導体スピントロニクス材料として活用できるか不明であった。本研究課題の目的は：

【研究テーマ I】 Co ドープ  $\text{TiO}_2$  が室温強磁性半導体であることを検証し、その室温強磁性の発現メカニズムを解明することで、基礎学理を構築する。

【研究テーマ II】 室温強磁性半導体の電界効果デバイス等のプロトタイプデバイスの実証やその周辺技術の開発により応用方面にも研究を展開することで、室温動作デバイスも実現可能な透明半導体スピントロニクスの分野を確立する。

## 【総合評価】

	特に優れた成果が得られている
○	優れた成果が得られている
	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

<b>【所見】</b>
<b>① 総合所見</b>
<p>本研究課題は、次世代半導体スピントロニクスデバイスの創出の可能性を探求するため、申請者が見出した室温強磁性を示す Co ドープ TiO<sub>2</sub> をベースとしてトランジスタ構造を用いたキャリア濃度の制御により、強磁性の発現機構を明らかにするとともに、全固体電界効果トランジスタの開発を行い磁区構造の観察と制御を実現し、デバイス化を図ることにより室温動作する透明半導体スピントロニクスの確率を目指すものである。</p> <p>まず、第一の目標は、液体電解質を用いる電気二重層トランジスタ構造を利用してキャリア濃度を大幅に制御することにより室温において、強磁性と常磁性状態のスイッチングに成功し、これにより室温半導体スピントロニクスの可能性を拓くと共に、強磁性の発現機構を解明する上での決定的な証拠を提示したことは、高く評価できる成果である。一方、実用デバイスの開発において鍵となる全固体電界効果トランジスタの開発に向けては、固体電解質 LiLaTiO<sub>3</sub> のエピタキシャル薄膜の高品質化に成功はしたものの、実現には至らなかった点、さらに具体的なデバイスコンセプトの形成に結び付かなかった点には、不満が残る。</p>

<b>② 目的の達成状況</b>
<p>・所期の目的が (<input type="checkbox"/>全て達成された ・ <input checked="" type="checkbox"/>一部達成された ・ <input type="checkbox"/>達成されなかった)</p> <p>本研究課題の目的は、研究代表者等が見出した透明酸化物をベースとする Co ドープ TiO<sub>2</sub> の室温強磁性を室温動作半導体スピントロニクス材料として活用し、新デバイスを確立することにある。第一の目標である室温における強磁性と常磁性状態間のスイッチングの実現は、当初の目標どおりに達成し、強磁性の発現機構の解明に重要な知見を与えた。一方、実用デバイスの開発に向けて鍵となる、全固体電気二重層トランジスタの実現に関しては、固体電解質 LiLaTiO<sub>3</sub> のエピタキシャル薄膜の高品質化に成功はしたもののデバイスの試作には至っていない。</p> <p>一方、透明強磁性半導体の磁性のスイッチングに成功しているが、この機能をどのように活かして半導体スピントロニクスとして結実化させるかというデバイスコンセプトに関してももう一步踏み込んでほしかった。</p>

<b>③ 研究の成果</b>
<p>・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が (<input checked="" type="checkbox"/>ある ・ <input type="checkbox"/>ない)</p> <p>・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が (<input type="checkbox"/>創出された ・ <input checked="" type="checkbox"/>創出されなかった)</p> <p>・当初の目的の他に得られた成果が (<input type="checkbox"/>ある ・ <input checked="" type="checkbox"/>ない)</p> <p>これまで一般的に懐疑的であった、室温強磁性半導体の実現とその磁性の制御を電界で行うという結果を実証した極めて先進的な成果であり、技術的にも優位性は</p>

高い。特に、室温で強磁性と常磁性間の転移を実証させた意義は大きい。さらに、本材料系は研究代表者等が長年行ってきた酸化物半導体をベースとした磁性半導体の物質設計・薄膜品質改善・物性解明等の総合的な研究の結果生まれたものであり、新規電子デバイスを構成する電子材料として有望であり、順調に成果を挙げてはいるが、当初目的から外れた特記すべき成果は見当たらない。

#### ④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が  
(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が  
(見込まれる ・ 見込まれない)

半導体スピントロニクス分野では、室温での強磁性半導体の実現が強く望まれていたが、本研究の結果、電界誘起室温強磁性が確認され、室温強磁性半導体の存在を実証でき、室温半導体スピントロニクスの実現と進展に多大な貢献をするものと期待できる。本材料の実現により、電子の電荷自由度に加えてスピン自由度も加えた超低消費電力、超高速スイッチングデバイスの実用化につながり、エネルギー、情報、センシングなどのあらゆる半導体応用分野への波及効果が期待できる。また、本材料が透明電子材料より構成されるため、ディスプレイ、光デバイス、太陽電池等の光機能をも複合化した省エネルギー情報通信技術デバイスとしての展望も開け、ポストシリコン集積回路等も期待させる。

#### ⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

材料創成、材料解析評価での研究マネジメントは評価できるが、一部研究目標に未達成の部分が残ったことは、研究期間中に所属機関の異動というハンデがあったことが大きいと思われるものの、研究分担、連携、推進などのマネジメントが十分でなかったと言う判断もできるかもしれない。

なお、研究成果の発信は、国際的に著名な科学誌などに積極的に投稿し、また多数の招待論文が掲載されるなど高く評価できる。しかしながら、今後は知的財産権として結実させることへの積極的な姿勢もほしいと感じる。