【基盤研究（S）】

超高品質酸化物ヘテロ構造における新展開とデバイスフロンティア

研究代表者	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授 大矢　忍（おおや　しのぶ）　研究者番号:20401143
研究課題情報	課題番号：22H04948　研究期間：2022年度～2026年度 キーワード：酸化物／半導体スピントロニクス、高品質単結晶、ヘテロエピタキシー、スピン流制御

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

近年の急激な情報処理技術の進歩と普及により、情報処理に要するエネルギーは増大の一途を辿っている。今後も、これからさらなる発展が見込まれる人工知能やIoTデバイスなどの普及により、この問題は益々大きくなることが予想される。カーボンフリーの低消費エネルギー社会の実現に向けて、エレクトロニクスデバイスに対して、さらなる変革が求められている。本研究では、我々が長年にわたり培ってきた独自の超高品質酸化物および半導体多層膜の結晶作製技術［図１ 分子線エピタキシー法(MBE)を参照］を生かして、従来にない新しいデバイスを実現することにより、このような社会の問題の解決に資することを目指す。

現在のエレクトロニクスでは、特に、情報機器の心臓部ともいえる演算回路に用いられている半導体デバイスにおいては、電子の「電荷」が用いられている。電荷の移動速度は速く、半導体デバイスは高速動作が可能であるが、電源を切ると電子が散逸してデータが消えてしまうことが大きな問題である。一方、電子の磁石としての性質「スピン」を使うことができれば、電力を消費せずにデータを維持することが可能となる。長年にわたり、このような電子のスピンを用いたデバイスを半導体で実現しようとする研究が行われてきた。しかし、一般に、スピンの注入源として用いられる強磁性体(つまり磁石)と半導体は、結晶の整合性が良くないことが多く、強磁性体と半導体の界面でスピンが散乱されてしまったりするなど様々な問題があり、このようなデバイスの実現は容易ではない。

我々は、今まで、酸化物や半導体からなる単結晶多層膜の作製技術の開拓を推し進めてきた。様々な強磁性体と半導体や酸化物からなる原子レベルで平坦な界面（図１）の作製に成功している。このような技術を生かすことにより、電子のスピンの高精度の制御が可能となり、新しいデバイスを実現できるようになると期待される。またそれだけでなく、様々な酸化物物質に存在する電子と電子の強い相互作用(強相関性)を用いることにより、次世代の低消費電力デバイスの実現につながる様々な新しい技術を実現することができると期待される。本研究では、一般的な半導体材料では実現の難しかったスピントランジスタを始めとした様々な新しいデバイスの実現に向けて研究を進める。さらに、最近は、酸化物の多層膜で、データを書き込む際のスピンの反転に必要な、スピン流と電流の変換が、非常に高効率に起こることが分かっている。このような現象をさらに開拓し、持続可能な社会の実現に貢献可能な、新たなデバイスを実現することを目指す。

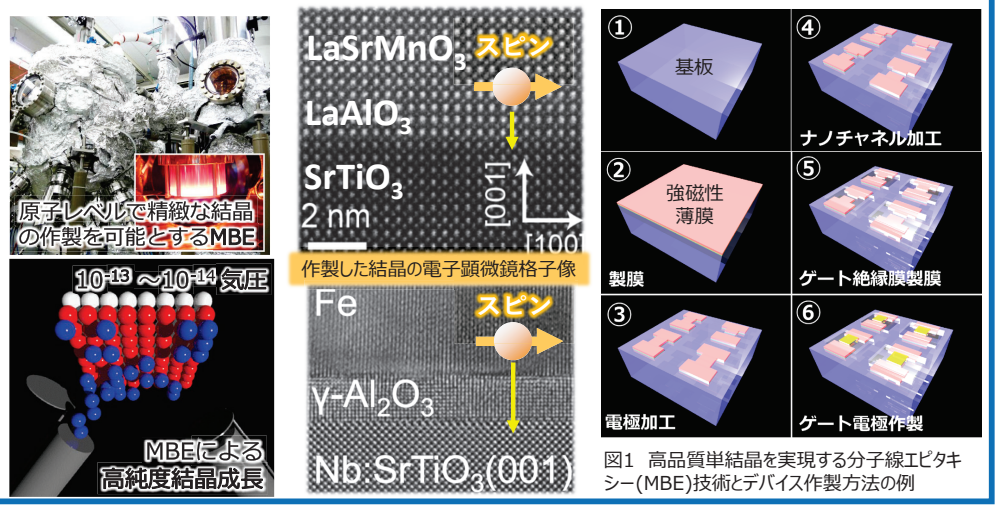

図1　高品質単結晶を実現する分子線エピタキシー(MBE)技術とデバイス作製方法の例

●スピントランジスタなどの次世代のデバイスの創製に向けて

本研究で基礎動作の実証を目指すデバイスのひとつが「スピントランジスタ」である（図２）。これは、現在一般的に使われている電界効果型トランジスタの２つの電極を、強磁性体で置換したデバイスである。磁石のNSの向き（磁化）で、注入するスピンの向きを制御できる。電源がなくてもデータを保持でき、消費電力を極限的に低減できると期待されている。今までの研究では、主に、強磁性体と一般的な半導体物質がスピントランジスタの研究に用いられてきた。しかし、これらの材料系同士は結晶の整合性が良くないことが多く、高効率のスピン注入やスピン輸送を実現することは難しかった。一方、酸化物には、結晶の整合性の良い強磁性材料や半導体材料が多数存在する。本研究では、これらの材料系を用いた高品質の単結晶界面を利用することにより、高効率のスピン輸送やトランジスタ機能を実現することを目指す。

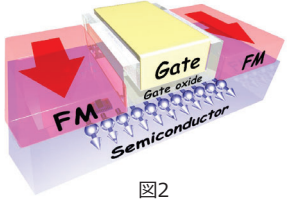

図2
スピントランジスタの模式図

FM: 強磁性体(＝磁石)
Semiconductor:半導体（酸化物）
Gate: ゲート電極（ここに電圧を印加して電子を制御する）

●酸化物多層膜中の２次元電子ガスを用いた高効率スピン流電流変換

様々な機能性をもつ酸化物として広く使われている$SrTiO_3$基板の上に、他の物質の薄膜を製膜すると、それらの界面近傍には、高速に動く電子が蓄積されることが知られている。この電子は「２次元電子ガス」と呼ばれている。一般に、物質の界面では、物質の対称性が破れるため、それに起因した電界が生じている。その結果、この界面では、「スピン軌道相互作用」と呼ばれる相対論効果が増大する。この効果は、スピンの向きが電子のもつ運動量により１通りに決まる効果で、この原理を使うことにより、スピンの流れ(スピン流)と電流を相互に変換することができる。このような現象を用いると、電流によって高効率に強磁性体の磁化の向きを制御できると考えられる。本現象は、スピンを用いたデバイスにおける、高効率のデータ書き込み手法の開拓に結び付くものと期待される。本研究では、このメカニズムをさらに探求し、磁化反転への応用を目指す。

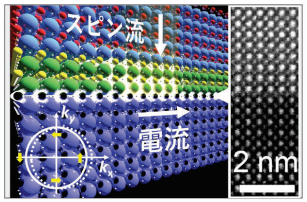

図３
我々が作製した高品質単結晶酸化物界面（$LaSrMnO_3/LaAlO_3/SrTiO_3$）における２次元電子ガスを用いたスピン流電流変換の模式図。右図は電子顕微鏡による格子像。

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

●様々な酸化物デバイスの実現に向けた指針の確立

酸化物はワイドギャップ半導体としての応用が期待されている。酸化物界面に存在する高移動度２次元キャリアガスを利用したトランジスタなど、新たな酸化物デバイスの実現を目指す。

●酸化物/半導体ベーススピントランジスタ実現への材料設計の指針の確立、デバイス基礎動作の実証

スピントランジスタの実現に向けた研究においては、従来、強磁性体と半導体の多層膜を用いた研究が主に行われてきたが、それらの結晶の非整合性などに起因して、現時点では、応用上様々な問題が存在している。酸化物材料系においては、格子整合性の高い種々の材料が存在しており、これらの多層膜では、スピンを精緻に制御できる可能性がある。本研究ではこれらの材料を用いてスピントランジスタの動作実証を目指す。

●２次元電子ガス領域におけるスピン流電流変換機構の解明と、最適な電子構造設計の探索

酸化物における２次元電子ガスは、スピン軌道相互作用が大きく、高効率にスピン流電流変換が行える極めて理想的な舞台のひとつである。さらに、酸化物ならではの電子間の強い相互作用も取り入れることにより、理論および実験の両面で、この系における電子のスピンが本来持つ性質を理解し、それらを最大限引き出すことにより、高効率のスピン流電流変換、およびその人工的な制御法の確立を目指す。

●高効率磁化反転技術の実現

酸化物の高品質界面は、スピン流電流変換とともに、その逆変換である電流スピン流変換においても大変有望な系だと期待される。特に、スピンを用いたデバイスにおいては、磁化反転に必要な電流の低減が大きな課題となっているが、スピンと電流の変換を高効率に行うことができれば、磁化反転のエネルギーを低減することが可能である。本研究では、高品質酸化物多層構造を用いて、高効率磁化反転の実現を目指す。

●フレキシブルスピントロニクスデバイス実現に向けた要素技術の確立

最近の技術により、製膜した厚さ数ナノメートル程度（原子数十個分程度の厚さ）の極薄の酸化物薄膜を、基板から引きはがすことが可能となっている。この技術を利用すると、酸化物ならではの様々な特性を折り曲げ可能なフレキシブルデバイスに用いることができる。本研究ではこのようなデバイスの基礎動作実現を目指す。

ホームページ等	http://www.cryst.t.u-tokyo.ac.jp/ohya/ http://www.csrn.t.u-tokyo.ac.jp/