

スピン軌道トルクにおける軌道対称性効果の解明と高効率大容量スピンデバイスの創製

研究代表者	東北大学・国際集積エレクトロニクス研究開発センター・教授
	齊藤 好昭 (さいとう よしあき) 研究者番号：80393859
研究課題情報	課題番号：24H00030 研究期間：2024年度～2028年度 キーワード：スピンホール効果、軌道ラシュバ効果、電圧効果、シグネティック反強磁性、ジャロシンスキー守谷相互作用

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

我が国では、2050年カーボンニュートラルの実現のため、革新的な技術の開発と、その早期社会実装が求められている。一方、近年、ビッグデータを瞬時に取り扱う人工知能(AI)の高性能化に伴い、取り扱う情報量が年率10倍の速度で爆発的に増大し、使用エネルギーの増大が懸念されている。このような背景のもと、AI技術などの享受を受けつつ、カーボンニュートラルな社会を実現するため、低消費電力・高速・大容量を有する不揮発メモリデバイスを実現し、LSIの消費電力を大巾に削減する技術の促進が希求されている。

本研究では、科研費基盤研究A、ImPACT事業で開発したスピン軌道トルク(SOT)電極構造、スピン制御技術などの基盤技術を発展させ、極微細世代の理想的な低消費電力・高速・大容量スピンメモリデバイスの創製に挑戦する。低消費電力化のためには、スピンホール効果および軌道Rashba効果双方のスピン軌道トルクを増大することが重要である。ここでは、スピンホール電極構造、軌道Rashba電極構造、電極材料の結晶構造、結晶配向性、比抵抗、スピン拡散長、軌道拡散長などの因子と、スピンホール効果および軌道Rashba効果の大きさとの相関を調べてスピン伝導メカニズムの解明を行い、低抵抗で高効率なスピン反転技術を構築する。更に、大容量化を図るために、垂直磁化方式スピントネル接合の無磁場反転技術および軌道Rashba効果の電圧制御技術を構築する。ここでは、材料のナノ構造エンジニアリングや酸化物・窒化物の結晶場の変調による軌道電流制御が鍵となる。これらを統合することで、不揮発・低消費電力・高速・大容量SOTメモリデバイスを創製する。本研究を通じ、半導体デバイス、知的システムの低消費電力化・高速化・大容量化を図り、カーボンニュートラル社会に貢献する。

●研究のアプローチ

研究代表者は、研究計画の立案・SOTメモリデバイスのナノ構造エンジニアリングを行い、SOTメモリデバイスの高性能化を目指す。図2～図4に示す積層膜は、原子レベルの界面制御技術を駆使し、髪の毛の100万分の1レベルで制御された膜構造を作製する。素子作製は、代表者と研究分担者が協力して行う。また、メカニズム解明のため、精密な輸送特性評価や、電子構造・電子輸送に関する理論計算を行う。界面の拡散等も考慮した現実的な積層構造における理論計算結果を、研究推進の羅針盤とする。

本チームの総合力により、スピンホール効果(図2左上図)、軌道Rashba効果(図2左下図)、ジャロシンスキー守谷(DM)相互作用(図2右上図)および軌道Rashba効果の電圧効果(図2右下図)の学理を追求し、図1に示す理想的な低消費電力・高速・大容量SOTデバイスの創製を目指す。

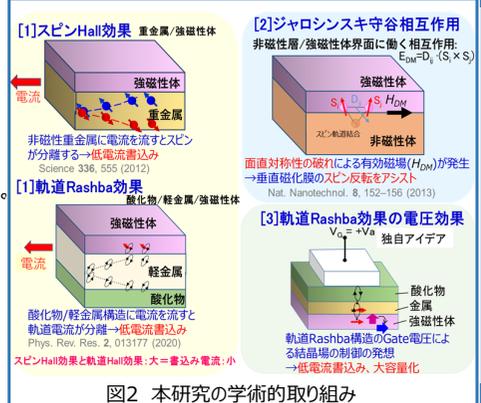


図2 本研究の学術的取り組み

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

本研究では、最近発見された新しい動作原理に基づくSOT-MRAMに新しいアイデアを導入し、半導体デバイスやAI技術の低消費電力化・高速化・大容量化を実現する信頼性の高い技術を構築する。具体的には、上記の学術的な研究を通して、以下の4つの技術構築を目指す。

●スピンホール効果と軌道Rashba効果を用いたスピン反転高効率化技術の構築

本研究では、図3に示す2つの独自構造を用いて、理想的なメモリを実現するための技術の構築を行う。我々は、図3の左図に示す本研究の1つの核であるSynthetic反強磁性構造を用いると、5年後の書き込みエネルギー要求に近い小さな比抵抗 ρ_{xx} で大きなスピンホール角 θ_{SH} (小さな書き込み電流)が得られ、有望な構造であることを見出している。ここでは、スピンホール効果と軌道Rashba効果が大きな θ_{SH} が得られるメカニズムを解明し、更なる特性の向上($\theta_{SH} > 50\%$ かつ $\rho_{xx} < 50 \mu\Omega\text{cm}$)を目指す。

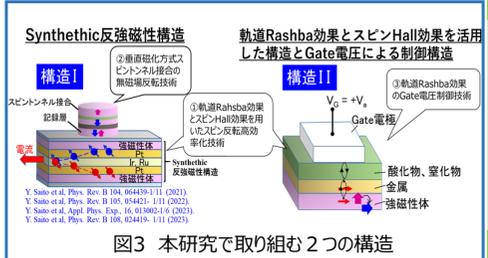


図3 本研究で取り組む2つの構造

●垂直磁化方式スピントネル接合の無磁場反転技術

我々は、Synthetic反強磁性構造の界面にDM相互作用を利用し面直方向の対称性を破ると、垂直磁化を有する強磁性層が無磁場でスピン反転可能なことを原理検証している。ここでは、界面に働くDM相互作用の大きさを詳細に調べ、Landau-Lifshitz-Gilbertシミュレーションも用いて界面のナノ構造を最適化し、「スピン反転の高効率化と無磁場でスピン反転の両立」を目指す。

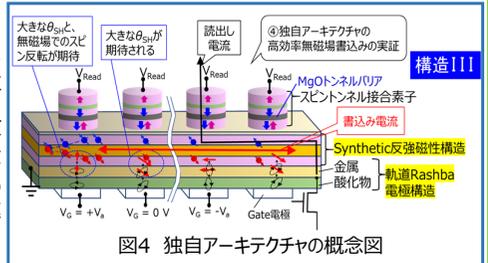


図4 独自アーキテクチャの概念図

●軌道Rashba効果のGate電圧制御技術

軌道Rashba効果は、金属を酸化・窒化することによりエネルギー分裂した結晶場のエネルギー準位を持った界面で、軌道電流が生成されることに起因すると考えられている。このことを考慮すると、図3右図に示すように酸化物・窒化物に電圧を印可し、Gate電圧でフェルミ面の電位を調整し結晶場の準位を制御できることが期待される。ここでは、実験と第一原理計算を用いた材料探索を進め、本アイデアを実証する。

●独自アーキテクチャの高効率無磁場書き込みの実証

Synthetic反強磁性構造と軌道Rashba電極構造を結合した独自アーキテクチャの概念図を図4に示す。本スピンデバイスは、1つの配線上に多数のスピントネル接合素子を配することで、高密度化を実現している。また、軌道Rashba効果のGate電圧制御技術を用いると、大きな θ_{SH} と無磁場でスピン反転の効果が期待でき、反転したいセルに電圧を印加して金属配線に書き込み電流パルスを流すと、一括書き込みを行うことで消費電力を大巾に削減できることが期待できるため、それを原理実証する。

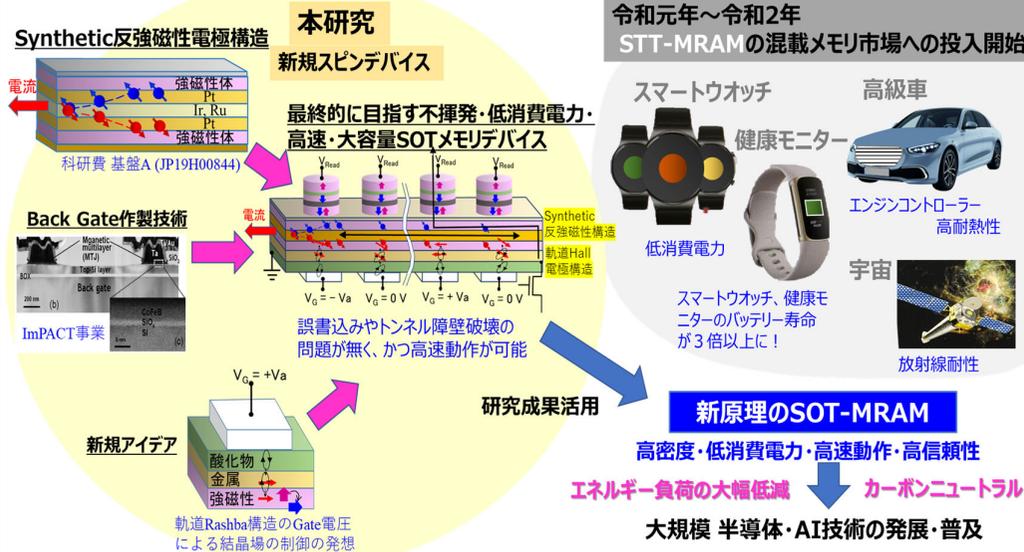


図1 研究全体のイメージ図