

論文の内容の要旨

論文題目 Study on Flexible Spintronic Devices Based on Magnetoelastic Coupling
(磁気弾性結合を利用したフレキシブルスピントロニクスデバイスに関する研究)

氏名 太田 進也

背景

巨大磁気抵抗効果の発見を端緒としてスピントロニクス分野が発展し、ハードディスクに続き磁気ランダムアクセスメモリなど情報記録素子の研究・開発が精力的に行われている。一方で曲がるディスプレイなどをはじめとするフレキシブルエレクトロニクスの研究も近年盛んに行われている。本論文ではこれらを融合させたフレキシブルスピントロニクスデバイスに関する研究を行った。ここでは歪みが加わっても性質が変わらないフレキシブルデバイスではなく、逆磁歪効果を用いて力学的機能を付与することを主眼に置いている。逆磁歪効果は強磁性体に歪みを印加するとその磁気異方性が変化する現象であり、古くから知られているが、従来のスピントロニクスにおいては積極的に利用されてこなかった。通常金属では0.1%程度を超える歪みを印加すると不可逆変化が生じるが、フレキシブル基板上に製膜された磁性金属薄膜においてはフレキシブル基板に1%以上の歪みを印加しても可逆的な変化を示す。このとき逆磁歪効果によって生じる磁気異方性の変化は、印加される歪みが大きいことに起因して非常に大きく、もともと磁性体に生じていた磁気異方性を上回りその磁化容易方向を変更する、すなわち磁化の方向を制御することが可能となる。この歪みによる磁化制御と磁気抵抗効果やスピントロニクス現象を組み合わせることで新奇歪みセンサや能動的熱流制御の原理実証などを行った。

巨大磁気抵抗効果を用いた歪みセンサ

巨大磁気抵抗効果は非磁性金属層で分離された複数の強磁性層の磁化間の相対角度に依存して電気抵抗が大きく変化する現象である。本論文ではまず2層の強磁性層を用いる擬スピバルブ構造を用いた。フレキシブル基板上に作製した擬スピバルブにおいて歪みを印加した状態で磁気抵抗曲線を測定したところ、歪みに応じて磁気抵抗曲線の形状が大きく変化する様子が見られた。このときの磁気抵抗曲線は逆磁歪効果により誘起された一軸磁気異方性を仮定したシミュレーションによりよく説明できた。強磁性層の片方として歪みに鈍感(逆磁歪効果の小さ)な層を、もう片方として歪みに敏感(逆磁歪効果の大き)な層を用いることで、素子一つの抵抗値から印加された歪みの方向を検出可能な歪み方向センサを作製した。さらに歪み鈍感層に反強磁性体層を積層させたスピバルブ構造を用いることで、歪み検出感度の増加と外部磁場不要動作が実現し、実際に生体における歪み方向計測に使用できることを示した。

フレキシブル基板上磁気トンネル接合素子

上記歪みセンサの感度上昇を主目的とし、より高い磁気抵抗比を示す磁気トンネル接合のフレキシブル基板上への作製を行った。結晶化したMgO層を利用したトンネル磁気抵抗効果は特に高い磁気抵抗比が得られることで知られているが、300°C以上の高温でのアニール処理を要することからフレキシブル基板への作製は、硬い基板上での作製後にフレキシブル基板へ転写した場合を除くと例がない。本研究では耐熱性のあるフレキシブル基板を用いることで、従来の磁気トンネル接合素子作製と同様のプロセスで作製できることを示した。最大で200%近い磁気抵抗比が得られたが、強磁性層が二層とも歪み敏感であるために歪み方向センサとしての動作には課題がある。ただし、条件によっては1000程度の非常に高いゲージ率(単位歪み当たりの抵抗変化率)を得ることができた。さらに多数の繰り返し引張でも特性が劣化しないことなども確かめられ、歪みセンサとしてのみならず、フレキシブル基板上の情報記録素子の基盤となりうる技術であることも示した。

スピнкаロリトロニクス現象の制御

スピンペルチェ効果や異常エッチングスハウゼン効果は、磁性体に電流を流した際、電流と磁化の方向に依存して熱流が生じる現象である。これらの効果は近年ロックインサーモグラフィ法を用いて測定することができるようになった。本論文では歪み印加により磁化方向を制御することで、これらのスピнкаロリトロニクス現象で生じる熱流を能動的に制御できることを示した。サファイア基板上的Ni薄膜では基板を曲げることで保磁力が変化するため、保磁力付近の磁場の下で熱流の向きが180°反転した。歪み印加により磁化容易方向が膜面垂直から面内に変化するTbFeCoでは熱流の方向が90°回転する様子や、新たに異方性磁気ペルチェ効果に由来する熱流が生じる様子が確認された。