

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 太田 進也

スピントロニクス分野では情報記録デバイスの高度化がこれまでの主要な旗印であった。本論文では、スピントロニクスとフレキシブルエレクトロニクスを融合させた先駆的研究について述べている。特に、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あまり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ナノ磁性金属薄膜においては基板に1%以上の歪みを印加しても可逆的な変化を示す。このとき生じる磁気異方性の変化は、磁化方向を軽々と変えうる大きさのものである。

「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)」と題された本博士論文は七章から構成されている。第一章では、スピントロニクス及びフレキシブルスピントロニクスの先行研究について、自らの学部・修士学生時代の成果も含めて紹介している。

第二章では、試料作製方法や歪み印加手法などの基本的な特性評価手法を説明している。

第三章では、単層の3d遷移金属強磁性薄膜を用い、主にEXAFSを用いた原子間隔変化について詳細な実験結果と議論を述べている。

第四章では、巨大磁気抵抗効果を用いた歪みセンサの動作実証について述べている。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。本章では、まずフレキシブル基板上に作製した強磁性層2層を有する擬スピンバルブ構造を用いて結果を報告している。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再現され、2層の強磁性層の磁気異方性の変化を求めた。強磁性層の片方として歪みに鈍感な(逆磁歪効果の小さな)層を、もう片方として歪みに敏感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隣接させたスピン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無しでの使用が実現し、生体における歪み方向計測に成功したことを報告している。

第五章では、上記歪みセンサの感度上昇を主目的とし、磁気トンネル接合のフレキシブル基板上への作製について報告している。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。また、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

られることを報告している。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。

第六章では、スピントロニクス現象の弾性的制御に関する実験について述べている。スピントロニクス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。本論文では歪み印加により磁化方向を制御することで、生じる熱流を能動的に制御できることを示した。サファイア基板上の 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ことを示した。

以上をまとめると、本論文はフレキシブルスピントロニクスの中でも、特に磁気弾性的機能を引き出すものである。これをもとに、生体モーションを計測するなどの先駆的成果を含む。また、ハードディスクや MRAM ですでに市販されている磁気トンネル接合を、これまでの硬い Si 基板ではなくフレキシブル基板上に初めて形成することに成功し、歪みゲージとしての感度の大幅な向上やウェアラブルデバイス周辺へのメモリの実装へも道を拓いた。得られた成果は物性科学・物理工学の発展への貢献が期待されるものであり、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。