

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 久保田 将司

本論文では、微細磁気構造のメモリ応用に向けた研究とその後の展望について議論されている。トポロジーの観点からは同一とみなせる磁気バブルとスキルミオンを研究対象とし、エピタキシャル応力による磁気異方性の制御とバブル生成、局所応力による書き込み、積層型微小ホール素子による読み込みの実証に加え、細線転送路の作製と速度評価へ向けた軟 X 線散乱の四つの要素技術が確立された。

以下に各章ごとに内容をまとめる。

第 1 章では、研究の背景として、磁気情報転送型メモリの変遷として、磁気バブルを利用した磁気バブルメモリ、磁壁を利用したレーストラックメモリ、そしてスキルミオンを利用したスキルミオンメモリについて概観している。

第 2 章では、本論文で用いた薄膜作製技術、試料加工・デバイス作製技術、評価技術についてまとめられている。

第 3 章では、書き込み技術に関連する研究として、磁性体薄膜における磁気異方性の制御について取り上げている。制御に利用する外場として応力に着目し、磁性ガーネット薄膜におけるエピタキシャル歪みと磁気異方性の関連を明らかにしている。さらに、応力誘導磁気異方性に着目した材料設計を行い、 $\text{Sm}_{3-x}\text{Tm}_x\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 系では微小な歪みにより応力誘導異方性磁場が大きく制御できる可能性を指摘し、実証している。その結果、形状磁気異方性により面内容易磁化の傾向が強い薄膜においても垂直磁化を達成し、ナノスケールの磁気構造を実空間観察している。

第 4 章では、前章で得られた知見を基に、書き込み技術に関連する研究として、局所応力による微細磁気構造の制御について取り上げている。試料を針で押すという機械的動作により、磁性体中の磁壁を動かす、ストライプ磁区を切断する、磁気バブルを生成する、などの制御が可能であることを発見している。さらに、これらの操作の可逆性を外部磁場で制御できることを見出している。さらに、可逆性は、系の磁気双極子相互作用、磁壁エネルギー、ゼーマンエネルギーの均衡によって支配されていることを理論モデリングと実験の双方によって明らかにしている。

第 5 章では、読み込み技術に関連する研究として、磁気センサーの作製と性能評価について取り上げている。スキルミオンの動作を電氣的に検出することを念頭に、微小 Bi ホール素子を作製し、ガーネット薄膜における磁壁動作を実証している。電子線リソグラフィとリフトオフ法により線幅 50nm の Bi 微小ホール素子の作製に成功している。作製したホール素子は、従来の様々な材料を用いた微小ホール素子と比較して、高積感度かつ低入力抵抗であることを確認している。外部磁場を掃引してガーネット薄膜の磁壁移動を磁気光学顕微鏡で実時間観察し、磁壁が微小ホール素子の直下を移動した際にホール電圧の極性が反転することを確認している。出力ホール電圧は、ホール素子の特性とモデル計算

した浮遊磁場から予想される値とほぼ一致することを確認している。

第 6 章では、読み込み技術に関連する研究として、前章で作製した微小 Bi ホール素子によるスキルミオンの電氣的検出について取り上げている。FeGe に生成するスキルミオンを微小 Bi ホール素子により検出する可能性を見積もっている。FeGe 上へ 30 nm の絶縁膜を介してホール素子を積層したと想定し、スキルミオンの中心と淵とで 3.5 mT の磁場変動を見積もり、ホール素子の特性から 20 以上の S/N 比が期待できると見積もっている。スキルミオンの電氣的検出のための試料構造を考案し、集束イオンビーム加工した FeGe 薄膜片に、線幅 50nm の微小 Bi ホール素子の集積化に成功して居る。

第 7 章では、転送技術に関連する研究として、スキルミオンを生成する薄膜を用いた細線転送路の作製について取り上げている。スキルミオンの細線転送路での安定性・挙動についての知見を得るため、スキルミオンの直径が 70 nm 程度である FeGe を (111)面 Si 基板上にエピタキシャル成長し、電子ビームリソグラフィとイオンエッチングによる微細加工を施し、スキルミオン直径よりも小さな線幅 30 nm から十分大きい線幅 10 μm のホール素子を作製している。線幅 100 nm から 10 μm のいずれの試料においてもスキルミオンの存在を示唆するトポロジカルホール効果が観測されることを確認している。この結果より、単一のスキルミオンに相当する線幅の転送路に閉じ込めた場合にも、スキルミオンは安定に存在し得ることを確認している。また、線幅 100 nm の試料では、ホール抵抗が磁場掃引に対して不連続的に変化する現象を見出しており、個々のスキルミオン生成を個別に検出した可能性を指摘している。

第 8 章では、転送時の速度評価に関連する研究として、スキルミオンの軟 X 線散乱による検出について取り上げている。将来目標として、軟 X 線ホログラフィーを用いたスキルミオンの実時間・実空間観察を設定し、そのための技術開発と位置づけている。集束イオンビーム加工した FeGe 薄膜片を用いて試料構造の提案と作製を行い、スキルミオン格子を軟 X 線散乱で検出するとともに、温度と磁場を関数とした磁気相図の作成に成功している。

第 9 章では、総括として、結論と今後の展望を述べている。

以上のように、本研究は、スキルミオンというナノスケールの微細磁気構造をメモリに応用する可能性を見据え、マイルストーン的な実験の成功や多くの重要な知見を得ており、理工学の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。