

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 土師 将裕

本論文は、「走査トンネル顕微鏡によるカイラル磁性の微視的評価と準粒子干渉の高効率計測」と題し、W 基板上の Mn 薄膜において観察されるらせん磁気構造のカイラリティに関してスピンの偏極走査トンネル顕微鏡 (SP-STM) を用いて原子スケールにて微視的に調べた研究、SP-STM に用いられる種々の探針の性能に関する研究、および走査トンネル顕微鏡 (STM) による準粒子干渉計測における高速化・高精度化を目的としてデータ科学における圧縮センシングの考え方を適用した研究に関してまとめたものである。

本論文は全8章から構成されており、第1章は序論、第2章は Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用とカイラル磁性体、第3章は「走査トンネル顕微鏡とスピンの偏極走査トンネル顕微鏡」、第4章は「W(110)上の Mn 薄膜の実空間観察」、第5章は「スピンの偏極探針の評価」、第6章は「準粒子干渉計測と圧縮センシング」、第7章は「圧縮センシングを用いた準粒子干渉計測の高速高精度化」、第8章は「総括」について述べている。

第1章は序論であり、研究背景や本研究の特徴について言及している。

第2章には、カイラル磁性とそれを誘起する Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用 (DMI) に関する記述がある。DMI およびカイラル磁性の一般的説明や、それらに由来する薄膜系での現象に関する記載ののち、本論文での研究対象である W(110)基板上でのカイラル磁性薄膜に関して、既に報告されている研究内容を総括するとともに、それを踏まえて解明すべき点とその物理的意義について言及している。さらにはカイラル磁性を探索する種々の実験手法について概説し、本論文で研究対象とした原子スケールでのらせん磁気構造のメカニズム解明に対しては、SP-STM が唯一の手法であることを明示し、DMI およびカイラル磁性に関する従来の研究の中での本研究の意味合いを明確にしている。

第3章では、本研究における主要実験手法である STM およびそのスピン版である SP-STM について原理説明をしたのち、実際に使用した装置に関する具体的な説明を行っている。

第4章では、W(110)基板上の Mn 薄膜において観察されるらせん磁気構造の SP-STM による実験結果について述べている。試料作製方法について述べたのち、1層の Mn 薄膜と2層の Mn 薄膜におけるらせん磁気構造の SP-STM による原子分解能での磁化分布像やスピンの偏極トンネル分光の測定結果を示し、装置動作や作製した試料に関して問題が無いことを検証している。さらに、外部磁場により探針の磁化方法を制御した状態での SP-STM 像を取得することによりらせん磁気構造の回転方向が決定できることを示し、これを Mn 薄膜のらせん磁気構造に適用することで、いずれの層においてもカイラリティを有することを実証している。このことは、らせん磁気構造の起源が DMI に依るものであることを示唆するが、

本研究では、それを特徴付ける DMI ベクトルの符号が両層で一致していることも明らかにしている。さらに、これまで報告されている同基板上での磁性薄膜における磁壁の結果等とも照らし合わせることで、DMI ベクトルの符号が薄膜元素よりもむしろ基板の性質により決定されるとの結論を考察している。

第5章では、SP-STM 測定において重要な役割を担うスピン偏極探針に関して、主に外部磁場による磁化方向の制御性の観点から Mn/W(110)試料を用いて評価を行っている。SP-STM での測定目的に即した探針選択の重要性など、今後の研究において有益となる指針を得ている。

第6章では、STM による準粒子干渉計測の圧縮センシングによる高速・高精度化について述べている。まずは、準粒子干渉計測について説明し、その物性研究における有用性を示した上で、測定時間がかかり過ぎるといった測定上の課題を提示している。そして、準粒子干渉計測により得られる波数空間での電子状態分布のスパース性から、課題解決の一つの方法として、データ駆動科学の分野で用いられる圧縮センシングの一手法である LASSO(Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)が適用可能であることを導いている。

第7章では、前章で説明した LASSO を Ag(111)表面上で測定された準粒子干渉計測データに実際に適用し、その評価を行っている。その結果、データの測定点数を減らした場合、通常のフーリエ変換による解析では全体的にノイズが増え、かつピーク幅が広がるものの、LASSO による解析では、全点で測定された場合と同程度のデータが再現できることを見出している。準粒子干渉計測において LASSO を適用することにより、測定結果の質を保ちつつ測定点数を減らすことが可能であることを示しており、準粒子干渉計測の高速・高精度化への期待を拓げるものと言える。

第8章は総括であり、これまで述べてきた研究結果についてまとめている。

以上をまとめると、本論文では、STM の物性科学への応用として今後進展が期待できる2つの手法—スピン偏極 STM と準粒子干渉計測—にそれぞれに関して、他手法では得られない新奇の結果を導き出すとともに、手法確立に向けた実証測定を行っている。SP-STM 測定では、W(110)基板上の Mn 薄膜で観測されるらせん磁性構造の回転方向およびカイラリティの有無を決定し、DMI の起源や基板の重要性に関する考察結果を得ている。また準粒子干渉計測に関しては、LASSO による測定の高速・高精度化の可能性を実証している。いずれも STM の物性科学への新たな展開を推進する成果として、物理工学への寄与は非常に大きい。よって、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。