

論文審査の結果の要旨

氏名：佐藤 哲也

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：フェリ磁性 GdFeCo 多層薄膜の超短パルス照射による極短時間加熱ならびにエネルギー散逸過程に関する研究

審査委員：（主査） 教授 中川 活二
（副査） 教授 山本 寛 准教授 塚本 新

電子工学の発展には電子デバイスの発展が大きく寄与し、その一つに磁性研究の貢献が大きい。本論文の提出者は、磁気メモリデバイス・磁気光学デバイスとして使われる材料に着目し、従来まで未解明の超短光パルス照射時の物理応答について詳細な調査研究を行い、今後の磁気デバイス研究発展に寄与する成果を得た。以下、章ごとに説明し、論文審査の結果の要旨を示す。

第1章 序論

第1章では、磁気デバイス応答速度と磁化ダイナミクスとの関わり背景を述べ、磁性材料と磁化動特性の未解明領域に踏み込んだ研究を進める事の重要性が説明されている。特に、ハードディスクメモリは全世界の情報ストレージの中核となるものであり、またスピントロニクス分野ではMRAMと呼ばれる注目されているメモリだけでなく、新たなスピントロニクスデバイスにつながる磁性研究が進められており、本研究がこの分野での根幹に係わる事が示されている。

第2章 希土類遷移金属アモルファス合金フェリ磁性 GdFeCo 薄膜の作製

第2章では、本研究での超短パルス照射による物理応答解析に用いた GdFeCo 薄膜の、フェリ磁性、磁化補償現象について述べ、可視域での磁気光学効果が主に遷移金属元素に由来することを述べている。また、作製した GdFeCo 薄膜の作製手法と典型的な磁気特性を示している。

第3章 超短パルス光を用いた磁化ダイナミクス計測法

第3章では、磁化歳差運動が現象論的表式である LLG 方程式と呼ばれる微分方程式に従い、歳差運動の緩和時間が最短となるクリティカルダンピングについて説明している。また、磁化歳差運動を励起・計測するために本論文による研究で構築した光ポンプ・光プローブによる計測方法の原理について詳細に説明している。また、構築した本計測手法により、実際に磁化歳差運動を計測し、計測試料の歳差運動周波数、歳差運動緩和時間および実効 Gilbert ダンピング定数を求めている。

第4章 フェリ磁性 GdFeCo 薄膜における磁化動特性の温度・組成依存性

第4章では、希土類元素と遷移金属元素が支配する副格子磁化がお互いに完全に反平行結合して単磁区一斉回転モデルで LLG 方程式に従うとして磁化歳差運動角周波数と歳差運動緩和時間を議論している。各副格子磁化の g 係数に依存し、磁化補償組成と角運動量補償組成が可変出来ることが議論されて示されている。また、実際に試作した試料で磁化ダイナミクスの温度特性を 80~500K の範囲で計測し、GdFeCo の磁化歳差運動の実測の温度特性が定性的議論の傾向と一致することを示している。同様に、試作試料の磁化歳差運動の組成依存性も前述の定性的議論と傾向が一致することを示している。

第5章 超短パルス照射による GdFeCo 薄膜の極短時間加熱過程

第5章では、従来研究されてきたナノ秒程度の光パルスによる熱アシスト磁気記録に対してフェムト秒オーダの超短パルス光利用による高性能化の提案と、超短パルス光を利用した場合の物理的描像を議論し、実験的解析を行っている。

数 100fs 以下の超短パルス照射による加熱過程は、格子系は直接加熱されず、金属中では試料表面で電子が励起された非平衡状態が発生し、高エネルギー電子が伝導電子として拡散し、さらに電子系から格子系にエネルギーの移動が起こって格子温度が上昇すると考えられる。

この議論を深めるため、GdFeCo 薄膜に、Sample I: SiN 5nm を介して熱拡散金属層を配置した試料、Sample II: 直接熱拡散金属層を配置した試料、Sample III: 熱拡散金属層を配置しない試料について、超短パルス光照射に対する磁化ダイナミクス計測を行っている。いずれの試料も、0.5ps 程度で磁性層の電子温度が最大となり、その後 1.1ps 程度で概ね電子温度と格子温度が平衡状態に達し、また減磁過程時定数もこの時間オーダでは 3 種類の層構成には依存しないことを見出している。また、この励起電子エネルギーの拡散は、3 種類の層構成で異なると予想され、減磁量から伝導電子による励起電子拡散の寄与が示されている。

第 6 章 フェリ磁性 GdFeCo 薄膜における超短パルス光誘起高速歳差スイッチング

第 6 章では、室温より高い補償温度を有する GdFeCo 薄膜に、室温での保磁力以上の外部磁場を印加した状況下で、超短パルス光を繰り返し照射して磁化歳差スイッチング励起を繰り返して起こし、その磁化反転プロセスを連続して観測できること、そして実験的にそれを実証したことについて説明している。この実験では、角運動量補償温度が室温近傍の GdFeCo 薄膜を用いる事で、従来の磁気記録に比較して高速に磁化歳差スイッチングの励起が可能であることを示している。

第 7 章 誘電体中間層を有する GdFeCo 二層膜のエネルギー散逸過程と磁化ダイナミクス

第 7 章では、多層薄膜間のエネルギー散逸過程を知るために、磁気交換結合していない非磁性誘電体中間層を有する GdFeCo 二層膜の磁化ダイナミクスを各層独立に解析する手法を提案し、その解析を行っている。すなわち、磁化ダイナミクスの異なる二層の GdFeCo 薄膜の応答を独立に解析できれば、それぞれの層へのエネルギー散逸過程を解析することができる。

まず、試作した薄膜の異なる磁化状態に対して電子温度と格子温度の応答が従来の議論と同一であり、各状態で光吸収が概ね等しいことを確認し、二層の磁性層間の格子温度平均化に数 100ps を要することを実験的に示している。

次に、二層の磁性層の異なる磁化状態の組み合わせから磁気光学効果の寄与分を見積もり、二層それぞれの磁化の歳差運動を分離解析し、それぞれの層の異なる磁化歳差運動周波数と Gilbert ダンピング定数を求め、磁気交換結合が分断された磁性多層膜の磁化ダイナミクスが磁性層毎に独立して扱えることを示している。

この解析手法を用いて、二つの磁性層間の SiN 層膜厚を変化したときの二つの磁性層間の電気伝導抑制による電子系の熱拡散抑制の効果が解析できることを示している。すなわち、誘電体中間層を選択的に配置することで、電子温度の高い電子の伝導を制御でき、電子系と格子系の温度上昇寄与を制御できることを示している。

第 8 章 GdFeCo 多層薄膜における磁化ダイナミクスへの磁気交換結合の作用

第 8 章では、第 7 章で磁気交換結合していない二層磁性薄膜の磁化ダイナミクスを検討した事に対して、磁気交換結合している二層磁性薄膜の磁化ダイナミクスを調べた。交換結合による効果で、磁化歳差運動周波数および Gilbert ダンピング定数が影響を受けることを示している。

また、Gd と FeCo の超格子薄膜の磁化ダイナミクス測定を行い、Gd 磁性層と FeCo 磁性層からなる超格子薄膜においても各層の磁化が強く結合して一斉回転し、磁化歳差運動を観察できることを示している。これらの磁気交換結合した多層膜は、単層の GdFeCo フェリ磁性膜と同様の磁化歳差運動の挙動が見られるが、磁化補償組成と角運動量補償組成との現れ方の違いがあることを示している。

第 9 章 総括

第 9 章では、本論文の結論と展望が示されている。

本研究では、磁性デバイスの今後の研究に重要だが依然理解が不十分であった超短時間の磁化ダイナミクスに着目し、フェリ磁性 GdFeCo 薄膜を対象に詳細な磁化ダイナミクス解析と超短パルス光照射による極短時間加熱ならびにエネルギー散逸過程に関する研究を進め、その解析に重要な超短パルス光を光源としたポンプ・プローブ法による磁化ダイナミクス測定法を構築した。詳細な解析により、GdFeCo 薄膜の磁化歳差運動特性、その層構成によるエネルギー散逸過程の解析、エネルギー散逸モデル、超短パルス光による磁化歳差スイッチングの励起、磁性二層膜の磁化歳差運動特性を明らかにし、超短パルス光を照射した後の電子系のエネルギーが、1) 金属層内で電子系のエネルギー平衡化、2)

電子系から格子系へのエネルギー散逸による平衡化、3) その後の空間的エネルギー散逸による平衡化を磁化ダイナミクスとの実験的対応で明らかにしている。

これらの成果は、今後の磁性デバイスの発展と、高速化、高機能化だけでなく、その磁性物理の本質的な解明に重要な視点を与え、エネルギー散逸の物理と応用の観点で有益である。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成27年2月19日