

論文審査の結果の要旨

氏名：吉川大貴

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：超短時間積層薄膜内エネルギー散逸過程に着目した全光型磁化反転現象に関する研究

審査委員：（主査） 教授 塚本 新

（副査） 教授 中川 活二 特任教授 山本 寛

九州大学准教授 佐藤 琢哉

大規模なデータベース (Big Data) や計算・演算・解析システム、そして Internet of Everything (IoE), Internet of Things (IoT) の急速な発展に伴う要請によりデジタル情報の生成量が爆発的に増加すると予想される大規模な情報処理社会において、“超高速の情報蓄積”が求められている。本論文の提出者は、新たな超高速磁化制御原理として全光型磁化反転現象を対象とし、従来まで未解明であった積層薄膜内における超短時間エネルギー散逸過程に着目した研究を行った。結果として新規理学的知見とともに今後の超高速磁気デバイス研究発展に寄与する成果を得た。以下、章毎に説明し、論文審査の結果の要旨を示す。

第1章 超高速デバイスと超短時間物性

第1章では、本研究の背景として大規模情報処理社会における更なる超高速情報蓄積の要請、そして研究の対象として超短時間磁気物性そしてその特徴的な現象の一つとして飛躍的高速化原理としても期待される全光型磁化反転 (All-Optical magnetization Switching : AOS) 現象につき、その理学・工学的課題を説明するとともに、本研究の目的について述べられている。

一般に、情報は二つの物理状態に対応する bit により表現・記録され、磁気記録においては磁化の向きにより記録を行う。この記録に用いられる磁場駆動型の磁化反転では動作周波数が GHz (動作時間 ns: 10^{-9} sec) オーダーで強磁性共鳴限界と呼ばれる原理的高速化の限界を迎えるため、磁気記録の飛躍的高速化を実現するには従来と異なる新しい超高速磁化制御原理が求められる。AOS 現象は 40 fs (fs: 10^{-15} sec) ~ sub-ps (ps: 10^{-12} sec) の超短パルス光照射のみにより誘起され、反転に外部からの磁場印加を必要としない完全磁化反転が室温下において可能な特異な現象である。本研究の目的として、依然として具体的・定量的起源解明を要する AOS 現象と積層薄膜内の超短時間エネルギー散逸過程の相関について明らかにするとともに金属内のエネルギー散逸特性に留意した超短時間光-磁性作用 AOS 高効率化に向けた特有の試料作製指針を提示することが示されている。

第2章 フェリ磁性薄膜試料の作製と計測方法

第2章では、本研究で用いた GdFeCo 薄膜の作製方法と磁気計測・磁気光学効果を用いた計測について詳細に述べられている。本研究遂行上必要とされる磁性薄膜試料作製方針として、AOS が金属磁性薄膜への超短パルス光吸収作用により誘起されることによる光学的平坦性の必要性、また、積層フェリ磁性薄膜の超短時間における各特徴に着目し全光型磁化反転現象の検討を行うことから、薄膜の元素組成比・膜厚・積層構造を系統的に変えた試料群を作成する旨が述べられている。そのため nm 精度で再現性良く系統的に試料が作製可能なマグネトロンスパッタ方式の自動制御薄膜作製装置につき原理とともに述べられている。

また、作製した試料群の磁気・物性評価を行うために用いた量子干渉素子による正味の磁化量と磁化特性の評価、磁気光学効果による副格子磁化特性評価、All-Optical Pump Probe 法による時分解磁気・光学応答計測、そして磁気光学観察撮像と磁区パターン形状特徴の評価法について述べられている。

第3章 フェリ磁性体の磁化補償点近傍における全光型磁化反転

第3章では、AOS 現象が従来型の磁場駆動型磁化反転現象と原理的に異なる現象であることを示すために、室温磁化補償温度近傍の試料群を作製し、AOS 現象について検討が行われている。まず、磁化補償状態では正味の磁化 M が 0 となり“自己減磁界”“漏洩磁界”“外部磁場”を含む実効磁場により駆動される磁場駆動型磁化反転は困難となることに注目し、フェリ磁性体 GdFeCo では元素組成比・温度により希土類 (RE), 遷移金属 (TM) に由来する各副格子磁化がそれぞれ変化し、磁化補償状態近傍では 0 を含み M が大きく

変化し、磁化反転に要する外部磁場を表す保磁力も急峻に変化することを示している。一方、既報告による知見として AOS の反転原理では各副格子磁化間の角運動量遷移がその反転の要因であるものと示唆されていることから、磁化補償状態およびその近傍でも元素組成比は概ね変わらないためほぼ一様に反転が誘起される事が期待され、磁化補償状態近傍で AOS を誘起・観察することで磁場駆動型の磁化反転と異なる原理に根差すことを明瞭に示すことができるものと議論を進めている。実験的に検証するため、室温において磁化補償状態試料群における AOS による形成磁区を比較し、また同一試料において磁化補償温度を含む AOS の温度依存性を観察比較している。結果として、磁化補償点近傍においてほぼ一様に AOS が誘起されることを見出し、AOS が従来型の磁場駆動型磁化反転と大きく異なり、副格子磁化に根差した正味の磁化に依存しない磁化反転原理に基づくことを明らかにしている。またこれにより補償点近傍の組成比試料により高安定に磁化情報を保存可能な磁気記録の実現の可能性を示している。

第 4 章 非断熱的エネルギー散逸過程に着目した全光型磁化反転

第 4 章では、副格子磁化間で角運動量遷移が強く行われると考えられる ps オーダーの非断熱的エネルギー散逸過程における、フェリ磁性薄膜内電子・格子系によるエネルギー授受・散逸の AOS への寄与について、各時間依存性を含み検討されている。

まず、エネルギー散逸機構において、電子系が律則する磁性層を含む連続した金属層膜厚、格子系が律則する全金属層膜厚の組み合わせが系統的に異なるような積層構造をもつ GdFeCo/SiN/AlTi 試料群を作製し、AOS を観察・評価した。AOS は超短パルス光により誘起される熱磁氣的核磁気形成とも異なる応答を示し、All-Optical Pump Probe 法による時分解磁気・光学応答計測から示唆される超短パルス光のエネルギー吸収特性、それにもとづく磁気システムの ps 程度の応答のみでは説明できないことを明らかにしている。そして、光エネルギー吸収特性のみならずその後の ps 程度の電子系の格子系との平衡化にもとづくエネルギー散逸に依存することを示唆している。これらにより AOS が従来熱磁気記録で用いられてきた平衡系熱力学で扱えず、電子系の超短時間エネルギー散逸に強く依存することが示されている。

次に、超短時間の電子系によるエネルギー散逸特性を系統的に変えるために膜厚が 10, 15, 20, 25, 30 nm と段階的に厚くなる試料群を作製し、同様の検討を行っている。膜厚に対し AOS による形成磁区は線形に小さくなる事を明らかにし、これにより光照射により形成された膜厚方向への温度勾配にもとづいて電子系のエネルギー散逸の寄与を受け、AOS が誘起されることを示唆している。

以上の検討により積層構造を変えることで、照射光強度に対する AOS の発動効率を変えることができ、特に磁性合金層を薄くするほど高効率に AOS を誘起できることが示されている。

第 5 章 電子比熱に着目した超短時間エネルギー散逸と全光型磁化反転

第 5 章では、第 4 章で示唆した光照射後 ps 程度における電子温度とその散逸過程に対し、電子比熱に着目し AOS 現象との相関について検討している。本検討に際し、電子比熱と比熱(電子比熱と格子比熱を考慮)の大小関係が異なる金属を隣接した GdFeCo/Metal 試料群を作製し、AOS による形成磁区を観察している。これにより、AOS が電子温度・電子比熱にもとづくエネルギー分配に強く依存することを示している。また、この超短時間領域における磁性層へのエネルギー分配につき、各層の電子比熱に着目した高効率化について検討を深め、具体的に、電子比熱の小さな金属を隣接することでより高効率に AOS を誘起可能であることを示している。

第 6 章 結論

第 6 章では、本論文の結論と展望が示されている。

本研究では、新たな超高速磁化制御原理として全光型磁化反転 (AOS) 現象を対象とし、従来まで未解明であった積層薄膜内における超短時間エネルギー散逸過程に着目した理学、工学的観点にて研究を進めた。結論として、①AOS は超短パルス光吸収後の ps オーダーでの非断熱的非平衡エネルギー散逸過程において過渡的な電子系の温度平衡状態に律則するエネルギー分配にもとづき誘起されることが明らかにされている。これは、AOS 現象が従来の磁場駆動型の磁化反転機構とは異なること、またこれまで用いられてきた熱的準平衡状態にもとづくエネルギー散逸過程とは異なる散逸過程に根ざした磁化反転現象であることを明らかにした。またこれら知見にもとづき、②電子比熱により局所的な電子系の平衡熱力学に超短時間の金属積層膜内の非平衡・非断熱的エネルギー散逸を前提として、AOS の高効率化への指針を実証とともに示している。これは、光照射後 ps 程度の時間領域で顕在化する非平衡かつ非断熱的エネルギー散逸過程に特有

の超短時間磁気物性に着目した超高速磁気記録多層膜の作製指針を実証とともに提示したことを意味する。

これらの成果は、超高速磁気デバイスの発展と、超短時間磁気物性における新規知見のみならず、非断熱的エネルギー散逸が顕在化する超短時間領域での物理と応用の観点で有益であり、学位論文申請者の基礎から応用への貢献を示すものである。

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30年2月15日