

論文の内容の要旨

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

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、“超高速情報蓄積”が求められている。デジタル情報の磁気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。すなわち、さらなる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。そこで新たな超高速磁化制御原理として期待され、超短パルス光により誘起される全光型磁化反転 (All-Optical magnetization Switching : AOS)現象を対象とし、研究を遂行した。

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、室温においても、外部からの磁場印加を必要としない完全磁化反転を誘起可能な特異な現象である。2007年の発見以降 AOS の反転機構や原理的要因につき検討が進められてきたが、合金比・膜厚・積層構造で大きく変わる超短時間の金属薄膜内における光吸収エネルギー散逸過程との相関については、系統的な検討が困難であり、課題となっていた。

本論文は超短時間の試料内の時間発展するエネルギー授受が要となる AOS 現象に関して、系統的な“試料群”を用いて同一光学条件下で相対的に比較を行うことにより、積層薄膜内における ps オーダーの超短時間非平衡・非断熱エネルギー散逸過程との相関につき研究を行い、新規理学的知見と、それにもとづく AOS 現象の高効率化、すなわち、より低い光照射エネルギーでの AOS 現象誘起を図り、上記散逸過程に留意した試料作製の指針の提示を試みた。本論文は全 6 章で構成されており、各章ごとの概要を以下に示す。

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に応える新しい超高速磁化制御原理として期待され、本研究の対象としての超短時間磁気物性、そしてその特徴的な現象の一つである AOS 現象について、その理学的・工学的課題を述べている。また研究の目的として、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と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を述べている。

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述べている。AOS は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ため、光学的平坦性を有した磁性薄膜を作製する必要がある。また、本研究では薄膜の元素組成比・膜厚・積層構造を系統的に変えた“試料群”を、第 3 章~第 5 章でそれぞれ用いて、積層フェリ磁性薄膜の超短時間における各特徴に注目し、同光学条件下での AOS の検討を行っている。そのため nm オーダーで安定して系統的に試料群を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を原理と共に述べている。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り正味の磁化に依存しない特異な現象であることを検証するために、室温磁化補償組成近傍の試料群を作製し、AOS について実験検討を行っている。対象材料であるフェリ磁性体 GdFeCo 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およびその差である正味の磁化 M がそれぞれ変化し、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。この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る磁場駆動型磁化反転は困難となる。実際、磁化補償点近傍では、磁化反転に要する外部磁場を示す保磁力も急峻に変化することを確認している。

この様な磁場駆動の磁化反転に対し、AOS は、既存の検討において各副格子磁化間の角運動量遷移がその反転の要因と示唆されている。すなわち、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と予想される。従って、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と考えた。

実際に、室温にて磁化補償状態を示す組成比近傍の試料群を作製し、本試料群における 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た。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確認し、AOS 現象が従来型の磁場駆動型磁化反転現象と大きく異なり、正味の磁化に依存しない磁化反転原理にもとづくことを示した。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いて、電子系・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を行っている。

まず、エネルギー散逸機構において電子系が律則する連続した金属層膜厚、格子系が律則する全多層膜厚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、時分解磁気・光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実験的に示している。そして、AOS が、光エネルギー吸収特性のみならず、その後の電子系の格子系との平衡化にもとづく ps 程度でのエネルギー散逸に依存することを示唆している。これは AOS が熱磁気記録などで従来用いられてきた平衡系熱力学で扱えず、電子系に着目した新たな非平衡エネルギー散逸の観点で取り扱う必要があることを示している。

次に、超短時間の電子系によるエネルギー散逸を系統的に変えるために磁性合金膜厚が光の侵入長前後の 10, 15, 20, 25, 30 nm と段階的に厚い試料群を作製し、同様の検討を行った。膜厚に対し AOS による形成磁区サイズは単調に小さくなり、この結果により照射により形成された強度勾配にもとづいて電子系のエネルギー散逸が膜厚方向に行われ、AOS がこの散逸に強く依存することを示している。

以上の検討を踏まえ、積層構造を変えることで AOS の発動効率を変えることができ、特に侵入長程度の膜厚においては、磁性合金層をより薄膜化するほど高効率に AOS を誘起できることを示している。

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 章で示唆した照射後 ps 程度におけるエネルギー散逸に対し、電子温度および電子比熱に着目し、AOS 現象との相関について検討を行っている。光吸収エネルギー分布と比熱により確立すると予想される過渡的電子系平衡状態としての電子温度と、電子温度の勾配にもとづくエネルギー散逸過程が電子比熱にもとづいて行われると予想した。この予想とともに、本検討に際して、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 磁区を観察した。これにより、AOS が過渡的断熱状態の指標としての電子温度・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、この超短時間におけるエネルギー散逸に関して電子比熱にもとづく高効率化を提唱し、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

以上のように、新たな超高速磁化制御原理として AOS 現象を対象とし、これまで未解明であった超短時間積層薄膜内エネルギー散逸過程に着目した研究を、理学・工学的観点から行い、第 6 章でそれらの結論と成果をまとめた。

理学的結論として、AOS が正味の磁化に依存しない高速な磁化反転現象であり、超短パルス光吸収後の ps 程度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

る積層膜内でのエネルギー分配にもとづいて誘起されることを明らかにした。

さらに工学的結論として、磁化補償点近傍において高い情報保持能力を有しつつ、より膜厚の薄い磁性薄膜において、電子比熱の小さな金属層を隣接することで AOS を高効率に誘起可能であることを実証した。この工学的知見は超短パルス光後のエネルギー散逸が従来熱磁気記録で用いられてきた平衡系熱力学では扱えず、電子温度に立脚した非平衡系エネルギー散逸過程にもとづく。そして、これにより ps 程度の非平衡な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初めての磁気記録媒体作製指針を実証と共に提示した。