

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24656010

研究課題名(和文) 強磁性金属ナノ粒子における光局在効果と低エネルギー磁化反転方式の研究

研究課題名(英文) Research on light localization in ferromagnetic metal nanoparticles and low energy magnetization reversal

研究代表者

清水 大雅 (Shimizu, Hiromasa)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50345170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性金属ナノ粒子における局在型表面プラズモン(LSPR)の磁気光学効果について議論した。Mie散乱理論に基づき、強磁性金属(FM)ナノ粒子における電界増強度を見積もり、Auナノ粒子と比較した。FMナノ粒子の電界増強度は15-17であり、Auナノ粒子と比較すると半分であった。FMナノ粒子を形成した。光透過率やファラデー回転角を測定した。磁気光学効果の大きな増大は観測されなかったものの、FMナノ粒子に特有のスペクトルを観測した。サイズ効果を考慮し、実験結果を再現した。FMナノ粒子の局在型表面プラズモンは電界増強を起こすものの、磁気光学効果を増大させるほど大きくはないことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We investigated the magneto-optical (MO) effect with localized surface plasmon resonance (LSPR) on ferromagnetic metal (FM) nanoparticles. We estimated the electric-field enhancement of the FM nanoparticles caused by LSPR based on Mie scattering theory and compared it with that of Au nanoparticles. The electric-field enhancement of the FM nanoparticles was 15-17, which is half of that of the Au nanoparticles. In order to explain the calculated results, we prepared FM nanoparticles by a self-assembly process. We measured the optical transmission spectra and Faraday effect of the FM nanoparticles. Although remarkable MO enhancement was not observed, we found characteristic MO spectra and a peak shift at wavelengths longer than 800nm in samples. We investigated the size effect and reproduced the experimental results. We concluded that localized plasmons of FM nanoparticles can produce electric-field enhancement, which is not enough to increase the MO effect.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：強磁性体 磁気光学効果 異種基板への製膜 磁気異方性

1. 研究開始当初の背景

「情報」の伝送・処理の担い手には電子の電荷、磁性スピン、光等が挙げられ、それぞれの特長を活かして現在の情報化社会が形成されている。しかしながら、これらの担い手の間の信号変換効率は 100%には程遠く、信号変換を経るだけで電力消費が発生する。情報化社会における電力消費は電車や家電製品のように目には見えないものである。したがって情報化社会における電力消費の削減は急務である。

磁性スピンの集合である磁化(磁石)は、電源を切ってもその情報(磁化)を保持する特長から、低消費電力の不揮発メモリ等への応用が展開されている。磁性スピンに関する研究分野～スピントロニクス～の近年の課題の一つはコイルなどの外部磁場によらない磁化反転である。例えば、電流注入、電圧印加、光励起による磁化反転方式が報告されている(E. B. Myers 他 Science 1999)。これらの磁化反転方式の問題点の一つは磁化反転に必要な電流密度、電圧、光強度が大きい点である。したがってこれらの電流密度、電圧、光強度を低減することが強く求められている。

2. 研究の目的

強磁性体の磁化をコイルなどの外部磁場を用いず、電流・電圧・光を用いて反転する方式が注目されている。しかしながらそれらの電流・電圧・光強度が大きいことが課題であり、これらを低減する必要がある。本研究では、強磁性金属ナノ粒子における光局在効果(局在表面プラズモン)を用いて、強磁性金属中の実効的な光強度を増強させ、光誘起磁化反転とその低エネルギー化へ応用し、上記の課題を克服する。「強磁性金属ナノ粒子における光局在効果と低エネルギー磁化反転方式の研究」を研究課題とし、以下の研究を推進する。

✓強磁性金属ナノ粒子の作製と基礎的な磁気光学特性を評価し、その光局在効果を明らかにする。

✓強磁性金属ナノ粒子の磁化を光誘起磁化反転し、光局在効果によって励起エネルギーを低減する。

3. 研究の方法

(1)強磁性金属ナノ粒子の作製と磁気光学特性の評価

電子ビーム真空蒸着法、及び、マグネトロンスパッタ法を用いて、誘電体中に埋め込まれた強磁性金属ナノ粒子の作製プロセスを確立する。誘電体には石英ガラス(SiO₂)、強磁性金属には鉄(Fe)、コバルト(Co)、ニッケル(Ni)を用いる。SiO₂等の絶縁性の基板の上に Fe 等の金属を真空蒸着法によって製膜すると、製膜の初期過程において自己組織的に金属が島状に凝集することが明らかになっている(水口他 J. Phys. D 2011)。誘電体基

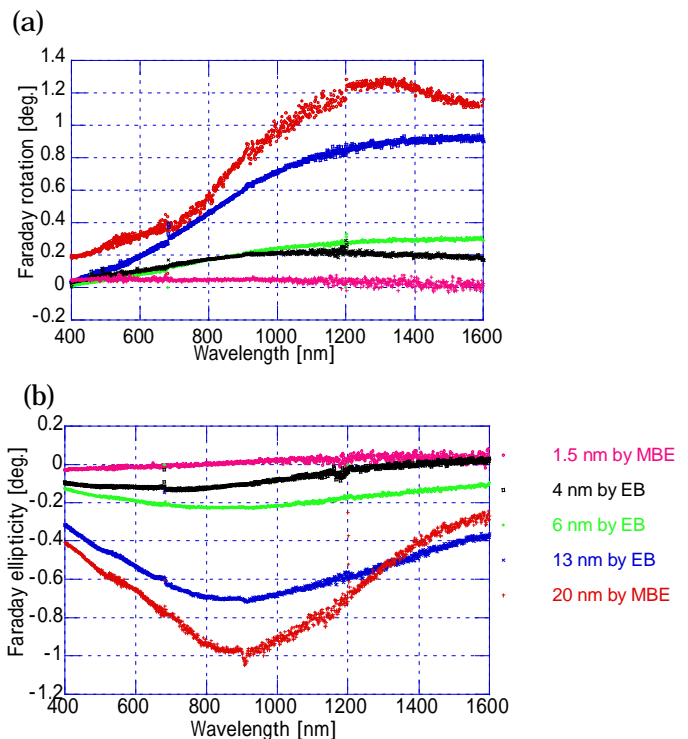


図1 強磁性金属 Co ナノ粒子の(a)ファラデー回転角、(b)ファラデー楕円率スペクトルの粒子径・膜厚依存性

板上への強磁性金属の島状成長を利用して強磁性金属ナノ粒子の製膜を行う。光局在効果の比較評価のために 1. 非磁性金属であり、一般的に局在プラズモン効果が解明されている金(Au)のナノ粒子、及び、2. 強磁性金属の薄膜を用意する。基板には石英ガラス(SiO₂)を用い、ナノ粒子の粒径は 3-10 nm とする。

製膜された強磁性金属ナノ粒子の磁気光学スペクトルを可視光から近赤外光(波長 400-1600nm)にわたって評価する。また、磁気光学効果の印加磁場依存性の評価によって、強磁性金属ナノ粒子の平均粒径を明らかにする。

(2)有機金属堆積法によるガラス・シリコン基板上への磁性ガーネット薄膜の作製と評価

(1)で述べた強磁性金属ナノ粒子の磁気光学特性に関する研究の他に、絶縁体のフェリ磁性体である Bi 置換イットリウム鉄ガーネット薄膜や Bi 置換ガドリニウム鉄ガーネット薄膜の製膜と磁気光学効果、磁気異方性の評価を行った。磁性ガーネット薄膜を有機金属堆積法(Metal Organic Decomposition Method; MOD 法)によって単結晶のガドリニウムガリウムガーネット(GGG)基板、および、ガラス、シリコン基板上に製膜した。

X 線回折測定によって製膜された磁性ガーネット薄膜の結晶の配向性を評価し、磁気光学効果を評価するとともに、結晶の配向性と磁気光学効果の大きさの関連性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 強磁性金属ナノ粒子の作製と磁気光学効果の評価

強磁性金属ナノ粒子における局在型表面プラズモン(LSPR)の磁気光学効果について議論した。Mie 散乱理論に基づき、強磁性金属ナノ粒子における電界増強度を見積もり、Au ナノ粒子と比較した。強磁性金属ナノ粒子の電界増強度は 15-17 であり、Au ナノ粒子と比較すると半分であった。強磁性金属ナノ粒子を形成した。光透過率やファラデー回転角を測定した。測定結果を図 1 に示す。磁気光学効果の大きな増大は観測されなかったものの、強磁性金属ナノ粒子に特有のスペクトルを観測した。サイズ効果を考慮し、実験結果を再現した。強磁性金属ナノ粒子の局在型表面プラズモンは電界増強を起こすものの、磁気光学効果を増大させるほど大きくはないことが明らかになった。以上の研究成果は雑誌論文の中にまとめた。

(2) 有機金属堆積法によるガラス・シリコン基板上への磁性ガーネット薄膜の作製

MOD 法によって磁性ガーネット薄膜を単結晶のガドリニウムガリウムガーネット(GGG)

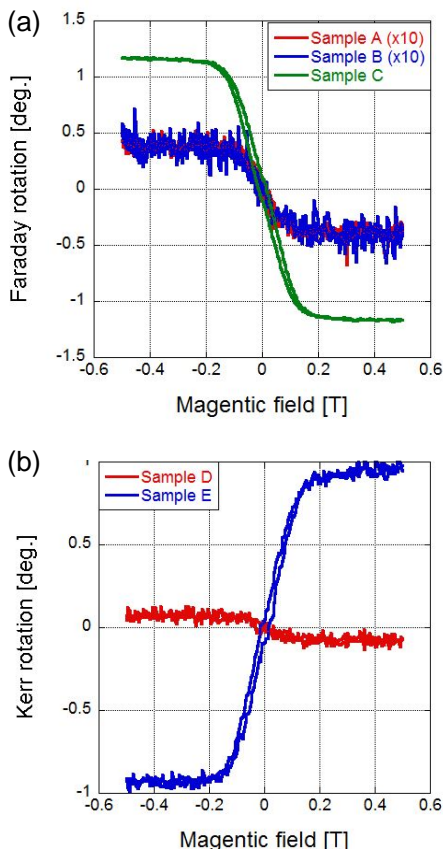


図 2 ファラデー効果の印加磁場依存性(a)ガラス基板上、(b)シリコン基板上。Sample A, D はバッファ層なし、Sample B はバッファ層を最適温度から 100 低い温度で成膜した試料。Sample C, E はバッファ層を最適化した場合の磁性ガーネット薄膜の測定結果。

基板、および、ガラス、シリコン基板上に製膜したことに成功した。製膜条件や Bi 組成の最適化、Bi を含まないバッファ層の導入によってガラスやシリコン基板上に単結晶の磁性ガーネットに匹敵する磁気光学効果を示す試料を作製することができた。図 2(a) にガラス基板上、および、(b)シリコン基板上に製膜した Bi 置換イットリウム鉄ガーネット薄膜の波長 600nm におけるファラデー回転角の磁場依存性を示す。Sample C, E と称した試料においては Bi を添加しない磁性ガーネット層をバッファ層として製膜し、バッファ層上に Bi 置換イットリウム鉄ガーネットを製膜した。バッファ層を適切にはさむことで単結晶の磁性ガーネット薄膜に匹敵する多結晶の Bi 置換磁性ガーネット薄膜の作製に成功した。試料作製時の製膜条件によって酸素欠損量や価数の異なる不純物の添加量を変化させることができ、保磁力の変化と磁気異方性の制御を通じて新しい磁化反転手法の開発につなげることができると考えている。磁性ガーネットは可視光から近赤外光に対してほぼ透明であり、磁気光学効果を利用した空間光変調器や導波路型光アイソレータへの応用につながる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7 件)

D. A. Wahid, T. Hattori, J. Sato, and H. Shimizu, "Preparation and Characterization of Bi substituted gadolinium iron garnet Films by Metal Organic Decomposition and their Dependence on Annealing Gases", Journal of the Magnetics Society of Japan. 39(3):100-106 (2015). 査読付

Terunori Kaihara, Takeaki Ando, Hiromasa Shimizu, Vadym Zayets, Hidekazu Saito, Koji Ando, and Shinji Yuasa, "Enhancement of magneto-optical Kerr effect by surface plasmons in trilayer structure consisting of double-layer dielectrics and ferromagnetic metal", Optics Express, 23(9):11537-11555 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.011537 査読付

梅津 沙緒里、貝原 輝則、安藤 健朗、矢後 佳貴、清水 大雅「Otto 配置による強磁性金属/誘電体界面へのプラズモンの励起」電子情報通信学会技術研究報告 114(281):189-194 (2014). 査読なし

Hiromasa Shimizu, Shohei Sakanishi, Takahiro Bando, and Yuhi Yagi, "TE-mode nonreciprocal propagation in passive Fe50Co50-InGaAsP / InP semiconductor

optical isolators”, Japanese Journal of Applied Physics, 53(7):072701-1 - 072701-5, (2014).
DOI:10.7567/JJAP.53.072701 査読付

阪西 祥平、坂東 敬広、清水 大雅、「一方
向発振半導体リングレーザの実現に向けた
TEモード半導体光アイソレータの性能評価」
電子情報通信学会技術研究報告
113(262):81-84 (2013).査読なし

Terunori Kaihara, Masaki Mizuguchi,
Koki Takanashi, Hiromasa Shimizu,
“Magneto-Optical Properties and Size
Effect of Ferromagnetic Metal
Nanoparticles”, Japanese Journal of
Applied Physics, 52(7):073003-1 -
073003-6 (2013).
DOI: 10.7567/JJAP.52.073003 査読付

Hiromasa Shimizu, Saori Umetsu, and
Terunori Kaihara, “Characterization of
Transverse Magneto-optic Kerr Effect in
Ferromagnetic Metals for Semiconductor
Optical Isolators”, Japanese Journal of
Applied Physics, 52(2):028006 (2013).
DOI: 10.7567/JJAP.52.028006 査読付

〔学会発表〕(計 38 件)(代表的学会発表
11 件を以下に記す。)

- (1) Danish Abdu I Wahid, Sato Jo, Hosoda Masashi, Shimizu Hiromasa
“Preparation and Characterization of
Bi substituted gadolinium iron garnet
($BixGd_{3-x}Fe_{5012}$ films with $x=1$ to 2.5
by Enhanced Metal Organic
Decomposition method”, 2016年春第
63 回 応用物理学関係連合講演会、
2016/03/21 東京工業大学(東京都目黒
区)
- (2) 細田 昌志、佐藤 謙、ダニシュ アブドゥ
ルワヒド、清水 大雅、「有機金属堆積法
によるガラスおよびシリコン基板上への
 $Bi_2Y_1Fe_5O_{12}$ 薄膜の作製と評価」、2016 年春
第 63 回 応用物理学関係連合講演会、
2016/03/20 東京工業大学(東京都目黒
区)
- (3) 佐藤謙、Danish Abdul Wahid、細田昌志、
清水大雅、「MOD 原液の混合によるガドリ
ニウム鉄ガーネット薄膜の作製と評価」、
2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大
会、2015/09/11 東北大学(宮城県仙台
市)
- (4) Hiromasa Shimizu, Terunori Kaihara,
Saori Umetsu, and Masashi Hosoda,
“Integrated optical isolators using
magnetic surface plasmon”, Invited
presentation, SPIE 2015
Optics+Photonics. サンディエゴ国際
会議場(サンディエゴ、米国)

- (5) Jo Sato, Abdul Wahid Danish, Takaya
Hattori, and Hiromasa Shimizu
“Fabrication of Ga doped Gadolinium
Iron Garnet Thin Films by Metal Organic
Decomposition and their
Magneto-optics Characterizations”,
2015 年春季 第 62 回 応用物理学関係連
合講演会、2015/03/11 東海大学(神奈川
県平塚市)
- (6) 服部貴也、清水大雅、「スパッタ製膜時の
酸素流量比によるセリウム置換イットリ
ウム鉄ガーネットの磁気光学効果の変
化」、2014 年秋季 第 75 回応用物理学会
学術講演会、2014/9/18
- (7) D. A. Wahid, T. Hattori, J. Sato, and
H. Shimizu, “Preparation of
 $YBi_2Fe_5O_{12}$ and $Gd_2BiFe_5O_{12}$ magnetic
garnet thin films by Metal Organic
Decomposition method on GGG and glass
substrate”, 日本磁気学会第 38 回学術
講演会、2014/9/4 慶応大学(神奈川県
横浜市)
- (8) 佐藤謙、Danish Abdul Wahid、服部貴也、
清水大雅、「 SiO_2 を微量添加した Bi 置換
鉄ガーネット薄膜の作製と磁気光学効果
の評価」、2014 年春季 第 61 回 応用物理
学関係連合講演会、2014/03/17 北海道
大学(北海道札幌市)
- (9) V. Zayets, H. Saito, K. Ando, S. Yuasa,
T. Kaihara, H. Shimizu, A. Baryshev,
T. Matsui, “NEW DESIGN OF OPTICAL
ISOLATOR UTILIZING SURFACE PLASMONS”,
MORIS (Magnetics and Optics Research
International Symposium for New
Storage Technology) 2013, 2013/12/05.
大宮ソニックシティ(埼玉県大宮市)
- (10) D. A. Wahid, T. Hattori, J. Sato,
and H. Shimizu, “MAGNETO-OPTIC EFFECT
AND MAGNETIC ANISOTROPY OF $Bi:YIG$ THIN
FILMS PREPARED BY METAL ORGANIC
DECOMPOSITION”, MORIS (Magnetics and
Optics Research International
Symposium for New Storage Technology)
2013, 2013/12/04. 大宮ソニックシ
ティ(埼玉県大宮市)
- (11) T. Hattori, and H. Shimizu,
“CE-SUBSTITUTED YTTRIUM IRON GARNETS
PREPARED BY RF SPUTTERING AND THEIR
STRUCTURAL AND MAGNETO-OPTICAL
PROPERTIES”, MORIS (Magnetics and
Optics Research International
Symposium for New Storage Technology)
2013, 2013/12/03. 大宮ソニックシ
ティ(埼玉県大宮市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 1 件)

名称：光アイソレータ
発明者：清水大雅
権利者：国立大学法人東京農工大学
種類：特許
番号：特願 2013-267840
出願年月日：2013 年 12 月 25 日
国内外の別： 国内

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/14/0001357/profile.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

清水 大雅 (SHIMIZU, Hiromasa)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号： 50345170