

【助成 40-03】

磁性扁長粒子の形状異方性を利用したナノ複相膜の磁気光学効果の高感度化

東北大学工学部 講師 青木 英恵

〔研究の概要〕

ナノスケールの極限的な磁気-光変換機能の基盤技術を確立することは、情報化社会において通信の高速化・低電力化やデバイスの小型化を可能にする。既存のYIG系光学結晶は、ファラデー回転角(θ_F)が小さく、十分な θ_F を得るために強力(巨大)な磁石が必要である点が、素子の小型化・薄型化に向けた課題であった。本研究提案では、結晶材料より大きなファラデー回転角を有する強磁性ナノ粒子が透明マトリクス中に分散するナノ複相膜に着目し、金属ナノ粒子を「球」から「扁長」形状へ変化させ配列させることで、形状異方性を利用し磁気光学効果の高感度化を実現することを目的とする。本研究提案の狙いである磁気光学効果の高感度化を達成できれば、わずかな磁界で大きな θ_F が期待でき、磁石の体積を減少または磁石自体を省けるため、光学素子の小型化・薄型化に貢献できる。

〔研究経過および成果〕

【背景】磁気光学効果は、近年の高度情報化社会を支える光エレクトロニクス分野で光の変換・制御を司る中心であるが、代表的な磁気光学材料はフェライトガーネット(YIG)が不動である。一方で、高品質な結晶性が求められるYIGにはナノサイズの微細化が望めず、光エレクトロニクスと高度集積化を基盤とするナノエレクトロニクスの融合においては、材料学的な発想の転換が求められる。申請者らは、透明セラミクス中に磁性金属ナノ粒子を分散させた「ナノ複相膜」において、YIG結晶の40倍の θ_F が得られることを見出した(N. Kobayashi, et al., Sci. Rep.8, 4978, 2017)。これはYIG結晶の原子に束縛されるスピン依存電子より、ナノ複相膜の強磁性ナノ粒子間のスピン依存トンネル伝導電子の方が、外部磁界への感受率が大きく、誘電率の非対角成分に大きく寄与するためと考えられる。本研究では、ナノ複相膜中の金属ナノ粒子を「球」から「扁長」形状へ変化させ配列させることで、形状異方性を利用し磁気光学効果の高感度化を実現すること

を目的とする。

【実験方法】磁性金属と透明セラミクスターゲットが対向して回転する基板に交互に積層可能なタンデムスパッタ法を用いてナノ複相膜を作製した。申請者は基板回転速度が速いと球形、中速度で扁長、低速で扁平粒子化することを報告している。

【実験結果】図1に示すように、様々な形状のCo粒子からなるCo-SiO₂膜(いずれも約30 at.%Co)を作製し

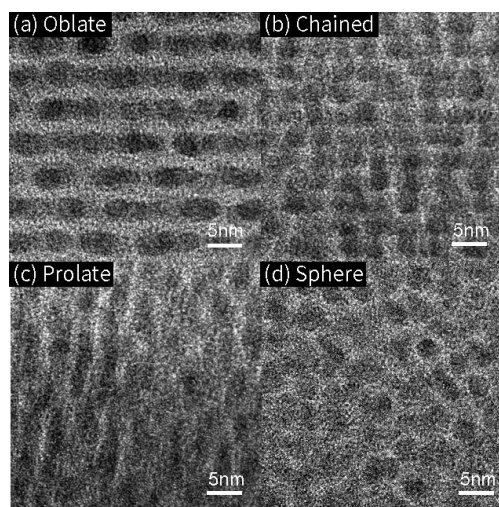


図1 (a) 扁平(oblate), (b)チェーン状(chained), (c)扁長(prolate)および(d)球形(Sphere)の磁性粒子からなるCo-SiO₂ナノ複相膜のTEM断面像。垂直方向が膜面垂直方向

た。基板回転速度を2, 3, 5 rpm 上げることで、粒

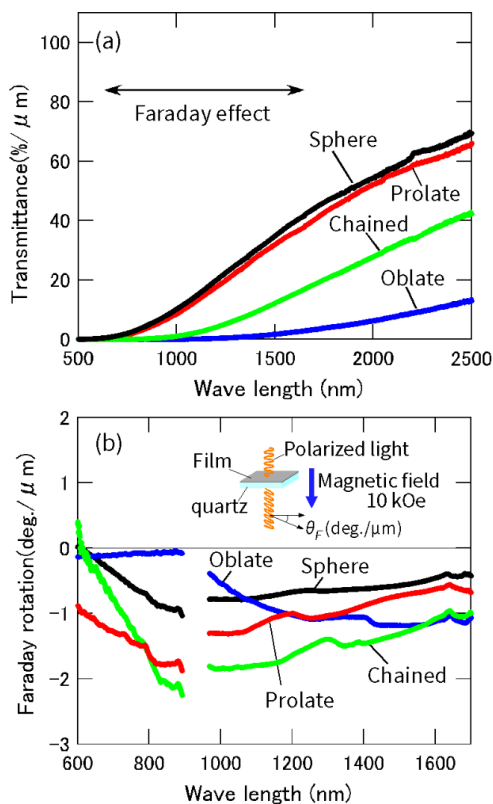


Fig.2 The wavelength spectra of (a)transmittance and

(b)Faraday rotation angle(θ_F) of Co-SiO₂ nanogranular

粒子形状はそれぞれ(a)扁平形、(b)鎖状、(c)扁長形に変化した。また、共スパッタ法で作製すると(d)球形粒子となった。このような基板回転速度に依存する金属ナノ粒子の変化は、非平衡状態における相分離が、粒子の核生成エネルギーまたは表面界面エネルギーが成長過程に影響することに起因する。このようなナノ複相構造が、基板の回転速度のみで制御可能であることは工業的に有用である。TEM 観察および小角散乱測定からの面内方向の平均粒径は、4.4 nm から2.5 nm に減少した。図2は、扁平形(青)、チェーン状(緑)、扁長形(赤)、球状(黒)のナノ粒子を有する Co-SiO₂ ナノ粒状膜の(a)T および(b) θ_F の波長 (λ) スペクトルである。可視光から光通信帯域(500 < λ < 1700)までの透過率は、球状、扁長形、チェー

ン状、長円形の順に減少した。粒子形状が扁長形と球形の場合、通信帯域である1550 nm 付近で最大透過率 35 %/ μ m が得られ、これは球形粒子の CoFe-SiN ナノ複相膜の報告値の2倍に相当する。これらの透明性の向上は、面内方向のナノ粒子径の減少に対応する。入射光と磁界が膜面垂直方向に測定したファラデー効果(図2(b))において、いずれの膜も負の θ_F 値を示した。最大 θ_F 値とそのときの λ は、扁平粒子では-1.2 deg./ μ m at 1500 nm、チェーン状粒子では-2.1 deg./ μ m at 860 nm、扁長形粒子では-1.8 deg./ μ m at 860 nm、球状粒子では-1.0 deg./ μ m at 860 nmであった。チェーン状および扁長形粒子膜は同等の光透過率であるが、球状粒子膜よりも2倍大きい θ_F 値を示した。今後は、粒子形状配列に起因する膜の異方性方向に合わせた、効果的な磁界印加方向や電圧などの複合的な光機能性の評価に取り組む。

[発表論文]

1. H. Kijima-Aoki, K. Ikeda, N. Kobayashi, M. Ohnuma, Y. Honda and H. Masumoto, "Faraday effects of magneto-dielectric nanogranular films with various particle shape," *2023 IEEE International Magnetic Conference - Short Papers (INTERMAG Short Papers)*, Sendai, Japan, 2023, pp. 1-2, 0305022.
2. N. Yokohama, H. Kijima-Aoki, and H. Masumoto, "Improving magnetic and dielectric performance of Co-BaMgF₄ nanocomposite films by thermal annealing treatment." *Short Papers (INTERMAG Short Papers)*, Sendai, Japan, 2023,
3. 青木英恵、池田賢司、小林伸聖、増本博、遠藤恭、「光周波数帯の誘電特性に及ぼす Co-BaF₂ ナノ複相膜の Co 添加量の効果」日本金属学会春期講演大会、2023年3月9日
4. H. Kijima-Aoki, K. Uchikoshi, T. Miyazaki, M. Ohnuma, Y. Honda, N. Kobayashi, S. Ohnuma, and H. Masumoto, "Structure and Tunneling Magnetodielectric Effects of Cobalt-(Barium Fluoride) Lateral Nanogranular Films" *Materials Transaction*, (2024) Accepted.