

# 光磁気記録に関する基礎および応用研究

中川活二  
(日本大)

Fundamental Research for Magneto-Optical Recording and  
Combined Application System of Magnetics and Optics

K. Nakagawa  
(Nihon Univ.)

## 磁性ガーネットを用いた光磁気記録

磁気バブル材料として用いられていた磁性ガーネットの高保磁力化と可視光レーザを使った光熱磁気書込みを実施し<sup>1)</sup>、可視域で半透明な材料でファラデー効果を利用する観点からその後の多層膜波長多重再生の発想につながった。ガーネット膜は、図1に示すような磁気光学効果（ファラデー回転角 $\theta_F$ ）と光吸収率を持ち、吸収率 $\alpha$ が高い短波長域で光熱磁気記録の記録感度が高い。一方、波長500 nmから長波長に渡って磁気光学効果が高く、再生信号増大が期待される。長波長側での光吸収率が低いので膜厚を厚くすればそれだけ大きなファラデー回転角が得られ、その特性は性能指数 $2\theta_F/\alpha$ で決まる。総合的には、膜厚500～600nm近傍で、膜厚を光の侵入の深さ程度にすることで、記録感度と再生信号強度のバランスの良い特性となった。

しかしながら、単結晶基板は高価であり、一方ガラス基板では多結晶材料である事に起因するノイズ低減が難しい。ガラス基板上での熱分解法を用いた多結晶ガーネット薄膜を作製し、その添加材料による薄膜の表面形態、下地層を用いたノイズ改善検討、結晶化モデル検討や結晶粒子の観察を行い、結晶粒子微小化を試みた<sup>2-4)</sup>。

## 多層膜波長多重再生

磁性ガーネットが可視域で半透明であるが、当時製品化されていたMOディスクに使われているTbFeCoも、膜厚を選択することによってガーネット同様に半透明膜として利用できる。この観点で、1990年代に多層膜の多値情報を波長多重により同時再生する検討を行った<sup>5-10)</sup>。現在、多層の磁気記録情報を複数の周波数のマイクロ波を用いた磁気共鳴で多層再生する研究が進んでいるが、これと同様の発想で、光やマイクロ波を記録膜に照射してその応答を見る場合は、どちらも異なる周波数を使える点がメリットと言える。また、光磁気記録では、磁気超解像<sup>11)</sup>と呼ばれる手法が活用されており、これも記録情報とは異なる層を光で検出することを活用した優れた方法である。この発展形では、MAMMOSと呼ばれる微小記録磁区を拡大して再生する手法<sup>12)</sup>も研究が進んだ。更にMAMMOSの手法を使って2層の記録層を再生する研究も行われた<sup>13,14)</sup>。

## 熱アシスト磁気記録

光をレンズで集光する方法では、波長のオーダーである数百nmまでしか光スポットを絞ることができないが、局在プラズモンを利用するとnmのオーダーまでエネルギーを局在化できる。一方、局在されたプラズモンを近接場生成電極で絞っても、金属磁性記録膜が連続膜の場合は局在プラズモンの電界が金属膜内に広がってしまい、微小記録に適さない。これに対して、記録膜を粒子状にすると、粒子そのもので局在プラズモンが増強されるため、効果的に記録領域にエネルギーを集中でき、熱的アイソレーションもできる<sup>15-17)</sup>。また、円偏光による高速の光記録の研究<sup>18)</sup>が行われ、局所プラズモンを利用した円偏光生成の研究も行われた。

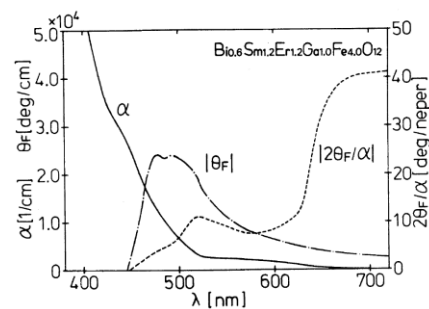


Fig. 1 Faraday rotation  $\theta_F$  and absorption  $\alpha$  spectrum at room temperature<sup>1)</sup>.

## 参考文献

- 1) 井上文雄、中川活二、伊藤彰義、川西健二：「磁性ガーネット薄膜の光熱磁気書込み特性」日本応用磁気学会誌, Vol. 5, No.2, 133-136 (1981).
- 2) K. Nakagawa, K. Odagawa, and A. Itoh, "Crystal growth process of Rb-doped iron garnet films for M-O recording prepared by pyrolysis," Jap. J. Appl. Phys., Vol. 29, No. 9, 1690-1395 (1990).
- 3) K. Nakagawa, K. Odagawa, and A. Itoh, "Rb doping effects on microstructure and crystallization kinetics of garnet films for M-O recording prepared by pyrolysis," J. Magn. Magn. Mat., Vol. 104-107, 1007-1008 (1992).
- 4) K. Nakagawa, S. Kurahashi, and A. Itoh, "Uniaxial anisotropy of double-layered garnet films and magneto-optical recording characteristics," J. Appl. Phys., Vol. 75, No. 10, 7096-7098 (1994).
- 5) K. Nakagawa, and A. Itoh, "Multi-wavelengths read-out for multi-valued MO recording," J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 20, Suppl. S1, 73-78 (1996).
- 6) K. Nakagawa, and A. Itoh, "Multi-valued MO recording and multi-wavelength readout," IEEE Trans. Magn., Vol. 33, No. 5, 3235-3237 (1997).
- 7) K. Nakagawa, A. Itoh, K. Shimazaki, M. Yoshihiro, and N. Ohta, "Multi-wavelength read-out for double layered MO disk," J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 22, Suppl. S2, 39-42 (1998).
- 8) K. Nakagawa, A. Itoh, K. Shimazaki, M. Yoshihiro, and N. Ohta, "Double-wavelength readout and optical head for double-layered MO disk," J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 23, Suppl. S1, 217-220 (1999).
- 9) K. Nakagawa, A. Itoh, K. Shimazaki, M. Yoshihiro, and N. Ohta, "High SNR readout method of double layered MO disk with single wavelength laser beam," J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 23, Suppl. S1, 221-224 (1999).
- 10) K. Nakagawa, A. Itoh, R-J. Zhang, Y. X. Zheng, L-Y. Chen, "Wavelength dependence of optical characteristics for TbFeCo and MO disk structure for double-wavelength readout MO disk," IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 5, 3124-3126 (1999).
- 11) 金子正彦、中沖有克, 「磁気超解像による光磁気ディスクの高密度化」, 応用物理、Vol. 64, No. 5, 445-450 (1995).
- 12) 高木直之、三谷健一郎、野口仁志、山口淳、石田弘毅、久米実、栗野博之、関根正樹、谷学、太田憲雄, 「MAMMOS による高密度光記録」, 映像情報メディア学会技術報告、24.22 巻 (2000).
- 13) A. Itoh, N. Ohta, T. Uchiyama, H. Awano, S. Imai, O. Ishizaki, M. Tani, N. Iketani, T. Mieda, A. Takahashi, K. Uchihara, M. Nakata, K. Tezuka, K. Nakagawa, and A. Tsukamoto, "Double MAMMOS: 3-dimensional MO recording," Trans. Magn. Soc. Japan, Vol. 4, 135-140 (2004).
- 14) K. Nakagawa, and A. Itoh, "Quadri-value MO recording layers for double-MOAMMOS readout method," Trans. Magn. Soc. Japan, Vol. 4, 146-151 (2004).
- 15) K. Nakagawa, J. Kim, and A. Itoh, "Finit difference time domain simulation on near-field optics for granular recording media in hybrid recording," J. Appl. Phys., Vol. 101, 09H504 (2007).
- 16) K. Kudo, Y. Moriyama, J. Kim, K. Nakagawa, and A. Itoh, "Effects of flying height and compositions of antenna and media on near-field optics for thermally assisted magnetic recording," J. Magn. Soc. Jpn. Vol. 32, No. 2-2, 106-109 (2008).
- 17) Y. Moriyama, Y. Ashizawa, K. Nakagawa, T. Sako, A. Tsukamoto, and A. Itoh, "Heat conduction analysis of magnetic recording media for thermally assisted magnetic recording," J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 35, 517-520 (2009).
- 18) C. D. Stanciu, F. Hansteen, A. V. Kimel, A. Kirilyuk, A. Tsukamoto, A. Itoh, and Th. Rasing, "All-optical magnetic recording with circularly polarized light," Phys. Rev. Lett., Vol. 99, 047601 (2007).
- 19) K. Nakagawa, Y. Ashizawa, S. Ohnuki, A. Itoh, and A. Tsukamoto, "Confined circularly polarized light generated by nano-size aperture for high density all-optical magnetic recording," J. Appl. Phys., Vol. 109, 07B735 (2011).
- 20) T. Ota, Y. Ashizawa, K. Nakagawa, S. Ohnuki, H. Iwamatsu, A. Tsukamoto, and A. Itoh, "Dependence of circularly polarized light excited by plasmon aperture on relative position to magnetic particles for all-optical magnetic recording," J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 36, 66-69 (2012).

## 磁性ナノ構造におけるスピン物性の研究

小野輝男  
(京大化研)

Study on spin-related properties in magnetic nanostructures

Teruo Ono

(Institute for Chemical Research, Kyoto University)

磁気学会学術講演会にて貴重な機会をいただきありがとうございます。折角の機会ですので、自分の研究の変遷を振り返りながら現在の研究を紹介できたらと思います。

私は、人工格子の巨大磁気抵抗 (GMR) 効果が発見された直後に、京都大学の新庄輝也先生の研究室に修士課程で配属されました。様々な物質を組み合わせる人工格子を作製し新規物性を開拓するという機運に満ちた時代でした。修士課程では、当時数グループのみが研究していたトンネル磁気抵抗効果を研究課題として与えられましたが、全くトンネル磁気抵抗効果は得られませんでした。同期の東北大宮崎研の矢迫君が学部4年生の時に既に室温で数%の変化を得ていた時期でした。私の修士論文は非線形性のない I-V 特性をたくさん並べたものとなってしまいました。

博士課程となって暫くした頃、新庄先生から Si 基板に溝を作ることが出来るらしいということを知り、その場で微細加工 Si 基板上に人工格子を作製して3次元化することを提案しました。紆余曲折はありましたが、なんとか微細加工基板上の人工格子の特異な GMR 効果で学位を取得することが出来ました[1]。学位が目途がついた頃かと思いますが、新庄先生から、数百万円あったら何がしたいかと尋ねられ、ナノワイヤやナノドットを作りたいと答えました。たくさんのパターンを作図して業者さんにパターン付きのウェハを作製いただき、リフトオフで試料作製を行いました。その中の一つを利用して GMR 効果で磁壁の生成と移動の検出をすることができました[2]。

慶応義塾大学の宮島英紀先生の研究室の助教として採用いただいた時に、新庄先生の重点領域「微小領域の磁性と伝導」が始まり、電子線描画装置を使った本格的な磁性体の微細加工に取り組むことになりました。宮島先生の計らいで横浜と京都を往復する充実した生活を送ることができました。電子線描画装置を使った磁性体の微細加工にはネガティブな意見の方もいらっしゃったとのことですが、何とか試料作製や測定法を確立して、単一磁壁移動のその場観察や磁気円盤中の磁気コアを見つけたりすることができました[3,4]。その後、大阪大学的那須三郎先生の研究室でお世話になり、磁壁や磁気コアなどの非一様なスピン構造と伝導電子の相互作用の研究を行いました[5,6]。

京都大学で研究室を担当するようになってからもたくさんの方の助けを借りて何とかやっています。最近では、人工強磁性体を使った3次元メモリの研究も始めました[7]。学位論文の主題であった人工格子の3次元化を実現し、磁気に応用に関与したいと考えています。今後ともよろしく願いいたします。

### 参考文献

- 1) T. Ono and T. Shinjo, J. Phys. Soc. Jpn, 64 (1995) 363.
- 2) T. Ono, H. Miyajima, K. Shigeto and T. Shinjo, Appl. Phys. Lett. 72 (1998) 1116.
- 3) T. Ono, H. Miyajima, K. Shigeto, K. Mibu, N. Hosoito and T. Shinjo, Science 284 (1999) 468.
- 4) T. Shinjo, T. Okuno, R. Hassdorf, K. Shigeto, T. Ono, Science 289 (2000) 930.
- 5) A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu, T. Shinjo, Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 077205.
- 6) K. Yamada, S. Kasai, Y. Nakatani, K. Kobayashi, H. Kohno, A. Thiaville, T. Ono, Nature Materials 6, (2007) 269.
- 7) Y. M. Hung, T. Li, R. Hisatomi, Y. Shiota, T. Moriyama, T. Ono, J. Magn. Soc. Jpn. 45 (2021) 6.

# 高機能磁性薄膜のナノ組織制御に関する研究

高橋有紀子

(物質・材料研究機構)

Microstructure control for magnetic thin films with high functionality

Y.K. Takahashi

(National Institute for Materials Science)

## はじめに

多くの磁性体はその物性値だけでなく微細組織に強く依存する保磁力などの微細組織敏感量が実用デバイスとして重要なパラメータとして利用されている。そのようなデバイスの高性能化には、微細組織を適切に制御する必要がある。ここでは、私が取り組んできたハードディスクドライブ(HDD)の熱アシスト磁気記録用の FePt 媒体および新規永久磁石の開発について紹介したい。

## 熱アシスト FePt 磁気記録媒体の組織制御と磁化ダイナミクス

2008年に我々が世界に先駆けて開発した FePt グラニューラ媒体[1]は、その後メーカーの精力的な実用化研究が実り、2020年12月に Seagate が製品化を実現した。実用化には導電性下地層の開発[2]、柱状組織の実現[3]、面内ヒステリシスの低減[4]、分散の低減などの多くの課題を抱えており、それぞれの課題に対して我々は材料科学的な観点から貢献をしてきた。4 Tbit/in<sup>2</sup>を実現するためには、4 nm の粒子サイズ・5 nm の粒子間距離(粒界相の幅は 1 nm)の FePt 粒子をサイズ分散 15%以下に制御した微細組織と高い磁気特性が必要とされている。このレベルの組織制御は、我々の知識と経験に基づいたプロセス開発では太刀打ちできず、データ科学を利用した媒体開発を進めている[5]。

磁化挙動を理解するために重要なパラメータとしてダンピングが挙げられる。STT-MRAM では、磁化反転電流がダンピングに依存するため、その評価が精力的に進められている。FePt 磁気記録媒体においても、熱アシスト磁気記録の際の磁化挙動が理解できれば、必要最低限のエネルギーアシストで高効率に磁化反転させるための材料設計が可能になる。この材料設計の際に必要なのがダンピングである。FePt のように高い異方性を持つ材料はその強磁性共鳴周波数がサブ THz になるため、ダンピング評価のための磁化ダイナミクス測定は時間分解磁気光学カー効果(TRMOKE)を用いる。TRMOKE は繰り返し測定のため数ミリ秒毎にサンプルの磁化状態を初期化する必要がある。FePt のように異方性が高いサンプルの場合、初期化に必要な磁場が非常に高い。我々は TRMOKE の光路に超電導マグネットを導入して強磁場中での測定を可能にした[6]。

新規エネルギーアシスト磁気記録方式として、円偏向誘起磁化反転が挙げられる。GdFeCo などのフェリ磁性体ではシングルパルスでの極性に依存した磁化反転が確認されているが、FePt のような強磁性体では磁化反転に複数のパルスが必要であることがわかっている。円偏向誘起磁化反転を HDD 技術として応用するにはシングルパルスでの磁化反転が必須である。そこで、我々は交換結合を用いた磁化反転確率の改善に取り組んでいる。GdFeCo/Ru/CoPt の 3 層膜において、GdFeCo と CoPt が反強磁性的な結合をするときに、CoPt のシングルパルスによる磁化反転確率が 12%から 61%へ増加することが明らかになった[7]。

講演では、データ科学を利用した FePt 磁気記録媒体の開発、FePt の磁化ダイナミクス測定、交換結合を利用した CoPt の円偏向誘起磁化反転について紹介したい。

## 新規永久磁石材料の開発

カーボンニュートラルの政府方針のもと自動車をはじめ、様々な輸送機器の電動化により、高性能磁石の応用範囲は急速に拡大している。資源的な観点で大量消費可能な高性能磁石として Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 系磁石は今後も主役であり続けるが、磁石応用製品の小型軽量化を可能とする高特性磁石の開発が求められている。我々は Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 系磁石を超える磁石材料として SmFe<sub>12</sub> 系材料に着目し研究を行ってきた。その結果 Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> は室温での磁化 1.78 T、室温での異方性磁界 8.2 T、キュリー点 859 K と永久磁石材料として重要な物性値がいずれも Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B よりも高く、次世代磁石材料としてのポテンシャルがあることを見出した[8,9]。永久磁石として応用するには 1 T を超える高い保磁力が必要である。CuGa を粒界拡散[10]、B をコスパッタ[11]することにより、それぞれ 0.8 T、1.2T の高い保磁力を得た。講演では、Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> 薄膜の微細組織制御についても紹介したい。

## 参考文献

- (1) A. Perumal *et al.*, *APEX* **1**, 101301 (2008). (2) B. S. D. Ch. S. Varaprasad, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **113**, 203907 (2013). (3) B. S. D. Ch. S. Varaprasad, *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **51**, 3200904 (2015). (4) J. Wang, *et al.*, *Acta Mater.* **166**, 413-423 (2019). (5) A. Bolyachkin, *et al.* *Acta Mater.* **227**, 117744 (2022). (6) Y. Sasaki *et al.*, to be submitted (2022). (7) J. Wang, *et al.*, *J. Phys.D:Applied Phys.***53**, 475002 (2020). (8) Y. Hirayama, *et al.*, *Scr. Mater.* **138**, 62 (2017). (9) D. Ogawa, *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.* **497**, 165965 (2020). (10) D. Ogawa, *et al.*, *Scr. Mater.* **164**, 140 (2019). (11) H. Sepeshri-Amin, *et al.*, *Acta Mater.* **194**, 337 (2020).