

「磁気と光の研究」の進展と将来

太田憲雄
(筑波大学)

Advance and Future of Magnetics & Optics Research

Norio Ota
(University of Tsukuba)

「磁気と光がクロスする分野」は学会創設以来の主要分野のひとつです。さらに1991年 MORIS 国際会議を設立し30年余進展してきました。今回の講演では、今後につながるトピックスをいくつか紹介したいと思います。新たなデバイスの創成につながれば幸いです。

1. 磁区拡大による再生

磁気デバイスでは、磁区が微小になるにつれ再生信号が微弱になるが、特別の磁気再生層を付加して増幅する工夫もありうる。光磁気記録では記録磁区を再生層に熱転写し、磁区を拡大して大幅に信号を増幅できた。磁区拡大再生 (MAMMOS、図1) である¹⁾。今後 MRAM などとはもとより磁気ロジックや磁気センサーにも応用できそうである。

2. 超高速磁化反転

磁化が反転する時間は極めて速い。垂直磁化膜の反転をフェムト秒レーザーで観察するとピコ秒よりも高速だった (図2)²⁾。今後、半導体デバイスと同等以上の高速素子を実現出来る可能性がある。磁気なので (演算+記録) の利点も期待できる。

3. 分子磁性と赤外スペクトル

現在の磁気デバイスはいずれ体積密度限界に達する。将来、磁性をもつ分子が突破口になるかもしれない。筆者はここ10年、炭素分子の磁性を探ってきた。炭素5員環を含むグラフェン分子は磁性をもち、分子振動に伴う特有の赤外スペクトルを有することを量子化学計算で求めた。さらに意外にも星間の天文スペクトルと一致することを初めて確かめた³⁾ (図3)。天文分野でも驚きとなった。将来はスピン状態を用いた量子演算素子も可能かもしれない。

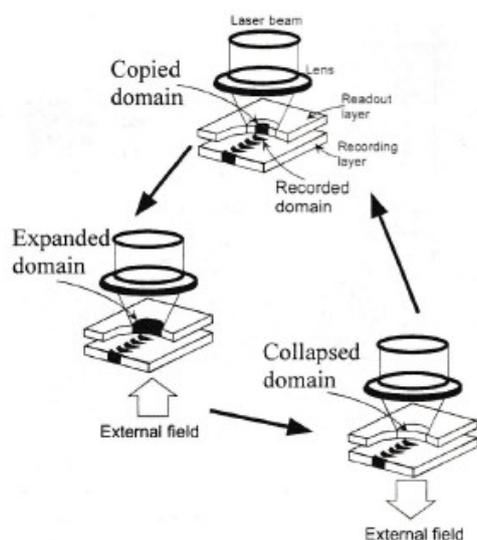


図1 光磁気記録での磁区拡大再生 (MAMMOS)。

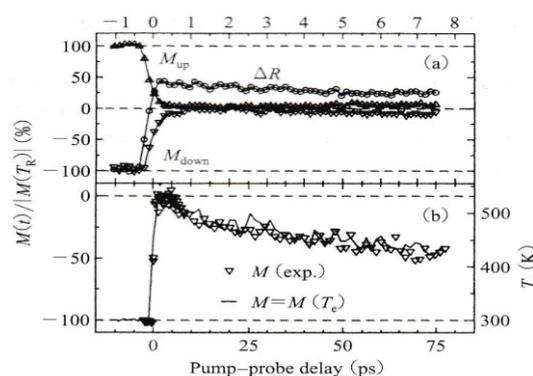


図2 フェムト秒レーザーによる超高速磁化反転の観測。

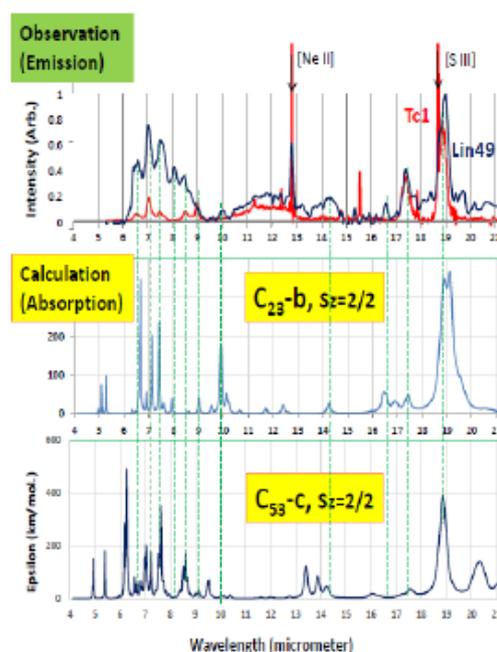


図3 炭素磁性分子の分子振動と天文スペクトル。

参考文献

- 1) H. Awano et al.: *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 4257 (1996).
- 2) J. Hohlfeld et al.: *Phys. Rev. B*, **65**, 012413 (2001).
- 3) N. Ota et al.: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **45**, 41 (2021)

磁性多層膜, 規則合金膜の垂直磁気異方性と記録媒体への応用

岩田 聡

(名古屋産業科学研究所)

Perpendicular Magnetic Anisotropy of Multilayers and Ordered Alloy Films and Their Application to Recording Media

Satoshi Iwata

(Nagoya Industrial Science Research Institute)

はじめに

学習院大学で開催された第1回の応用磁気学会に修士1年の学生として参加して以来, 44年が過ぎようとしているが, 筆者はバブルメモリ材料, 光磁気記録材料, 磁気記録材料, スピントロニクス材料と, 用途・目的を変えながら, 一貫して垂直磁化膜の研究に関わってきた。本講演では, CoPt など, 貴金属-3d 遷移金属系の多層膜, 規則合金膜から近年の L_{10} 型 MnAl, MnGa 膜まで, それらの垂直磁気異方性と Kr^+ イオン注入によって, 規則相を壊すことによるビットパターンの作製について概説する。

磁性多層膜, 規則合金膜の垂直磁気異方性

磁性多層膜, 人工格子の研究は, 1980年代に入ると盛んに行われるようになっていたが, 1985年に Co/Pt 多層膜が大きな垂直磁気異方性を示すことが発表されると, 貴金属と3d 遷移金属の多層膜の研究が大きな盛り上がりを見せた。筆者も真空蒸着装置を改造して, 多層膜の作製に取りかかったが, 1990年前後からは, 3元スパッタ装置と MBE 装置による様々な多層膜, 超薄膜, 合金膜の作製に取り組んだ。本講演では, それらの中から, いくつかのトピックを紹介する。MgO 基板上に結晶配向の異なる Co-Pt 膜を MBE 装置で成膜したところ, MgO(111) 基板上的 $Co_{50}Pt_{50}$ 膜が大きな垂直異方性を示すことが見出された²⁾。この膜は, Co と Pt の最密面が1原子層ずつ面直方向に積層した L_{11} 構造であることが X 線による逆格子マップ測定から確かめられた。Cu-Pt 二元合金の相図に存在する L_{11} 相が, 非平衡な Co-Pt 合金膜として得られたのは, たいへん興味深い。新しい光磁気記録材料を探索する過程で, $MnPt_3$ と $CrPt_3$ が大きな磁気光学効果を示すことを見出したが, 石英ガラス上の $CrPt_3$ 膜は, 立方晶の L_{12} 相であるにも関わらず垂直磁化を示した。 $CrPt_3$ 膜を規則化するために熱処理する過程で, 膜に引張応力が働き, 磁歪の逆効果により垂直異方性が誘導されていることが分かった³⁾。

イオン照射によるビットパターン形成

$CrPt_3$ 膜は, L_{12} 相ではフェリ磁性の垂直磁化膜であるが, これに Kr^+ などのイオンを打ち込むと, 規則配列が壊れて磁性を失う。 $CrPt_3(20nm)$ 膜に 30 keV の Kr^+ イオンを 2×10^{14} ions/cm² 注入すると, 磁性を失うことが確認され, これを利用したビットパターンの作製を行なった。 $CrPt_3$ 膜上にレジストを塗布し, EB 露光でドットパターンを形成後, イオン注入装置で Kr^+ イオンを照射することで, 100nm 径前後の磁気パターンを作製することができた⁴⁾。次いで, 規則相において垂直磁化, 不規則相で非磁性となる材料として, L_{10} 相の MnAl 膜と MnGa 膜を取り上げ, イオン照射によるビットパターンの作製を行なった。また, Si 基板上に(001)配向の L_{10} 相の MnGa 膜を成長させるための下地層について様々な検討を行ない, 角形比の良好な垂直磁化膜を得るための条件を明らかにした。

おわりに

過去40年間ほどの間は, 貴金属-3d 遷移金属の人工格子や超薄膜の垂直異方性の研究から始まって, 様々な新しい磁性薄膜材料が次々と開発される大変, ホットな時代であった。このような環境に身を置けたことは, 筆者にとって大変幸運なことであった。今後も磁性材料, スピントロニクスの分野が日本磁気学会とともにますます発展することを願っています。

参考文献

- 1) P.F. Carcia, A. D. Meinhardt and A. Suna: Appl.Phys.Lett. 47, 178 (1985).
- 2) S. Iwata, S. Yamashita, and S. Tsunashima : IEEE Trans. Magn., 33, 3670 (1997)
- 3) T. Kato, H. Ito, K. Sugihara, S. Tsunashima, and S. Iwata: J. Magn. Magn. Mat., 272-276, 778 (2004).
- 4) T. Kato, S. Iwata, Y. Yamauchi, S. Tsunashima : J. Appl. Phys., 106, 053908-1 (2009).

研究の三色旗：自由、寛大、洞察

A Tricolor Flag of Research: Freedom, Forgiveness, and Insight

宗片 比呂夫

Hiro Munekata

(東工大・未来研 FIRST, Tokyo Institute of Technology)

「III-V 族磁性半導体の創製とスピントロニクスの研究」が日本磁気学会の令和2年度業績賞・フェローに選ばれた。思いがけないことで、とても驚きました。誠にありがとうございます。その少し前、2020年4月号「まぐね」には、スピンの世界に飛び込んだ若き頃の僕（のちに私）が出会ったさまざまな人や事象について書いた文を掲載いただいた。そこで、この文のオンライン講演版をここで行なおうと思う。「まぐね」論説記事の出だしは以下で始まる。

あれは良く晴れた早春週末の午前中だったと思う。間借りしていたウェストチェスター郡の森の中の一軒家の二階でシャワーを使いながら、速報論文“Carrier-concentration-induced ferromagnetism in PbSnMnTe “[1]”を頭の中で復習していた。「半導体っぽい材料を強磁性に出来るならば、強磁性を電界で制御できる素材やデバイスが作れるかも、僕発のオリジナル発想として、強豪ひしめく高品質結晶成長研究分野から抜け出せる弾になるかも。」という考えが頭にひらめいた。(以下、省略)

論説では、これに続いて、III-V 族化合物磁性半導体の創造 [2-4] へと駒を進めた時のこと、さらには、日本の大学に移って考えた研究課題や仲間とともにやってきた研究を振り返って、研究者としての自分を受け入れてくれた土壌には、常に、自由、寛大、洞察、というものがあつたことに気がついた、と結んでいる。

本講演では、前段落に述べた事柄を縦糸として、具体的な実験データ、すなわち、磁性半導体の光励起現象 [5-7] とスピントロニクス[8,9] の実験研究、を横糸にしなから、研究構想の根底をなした、固体物理学と応用物理学的な視点について触れる。最後に、コロナ禍中での実験 - 円偏光発光素子 - について報告する。

以下は英訳です。ご掲載いただければありがたく。

“Creation of III-V-based magnetic semiconductors and the studies of spin-photonics” has been awarded as the MSJ Achievement Award of FY2020 with the privilege of MSJ Fellow. HM is very grateful and deeply honored for this award: it is a big surprise for me. Before it happened, my essay was published in the April issue of *Magnetics Jpn.* 2020, in which people and events that HM encountered at the stage of scientific embryo were described. Taking opportunity of Symposium by MSL fellows in the 45th Annual Conference on Magnetics in Japan, HM wishes to present an on-line version of the essay. It begins like this:

I suppose that was in the mild, weekend morning in early spring. On the second floor of a colonial-style house in the woods of Westchester county, I was taking a shower and reviewing in my head a technical report “Carrier-concentration-induced ferromagnetism in PbSnMnTe [1]“. It occurred to me suddenly if I had been able to make semiconductors ferromagnetic, it would have been possible to create materials and devices whose ferromagnetism could have been controlled by an electric field. This would have been the way to pull myself out from the land of high-quality crystal growth where brilliant animals were jostling. (Omitted below.)

This is followed by a story of creating magnetic III-V-based compound semiconductors [2-4], and furthermore, some thoughts concerning research targets after HM joining academia in Japan and resultant experimental works with colleagues. Through these recollections, HM has supposed that freedom, forgiveness, and insight are the soils receptive of researchers, including myself.

Within the context of recollection, my own research concepts in view of both solid-state physics and applied physics are discussed, referring some experimental results, namely, photo-excitation of magnetic semiconductors [5-7] and spin-photonics [8,9]. Very recent works in the period of COVID-19 on circular polarized light-emitting diodes will briefly be reported before ending.

Reference

- 1) T. Story, R.R. Galazka, R.B. Frankel, and P.A. Wolff, Phys. Rev. Lett. **56**, 777 (1986).
- 2) H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnár, A. Segmüller, L.L. Chang, and L. Esaki, Phys. Rev. Lett. **63**, 1849 (1989).
- 3) H. Munekata, H. Ohno, R.R. Ruf, R.J. Gambino, and L.L. Chang, J. Cryst. Growth **111**, 1011 (1991).
- 4) H. Ohno, H. Munekata, T. Penney, S. von Molnar, and L.L. Chang, Phys. Rev. Lett. **68**, 2664 (1992).
- 5) S. Koshihara, A. Oiwa, M. Hirasawa, S. Katsumoto, Y. Iye, C. Urano, H. Takagi, and H. Munekata, Phys. Rev. Lett. **78**, 4617 (1997).
- 6) Y. Hashimoto, S. Kobayashi, and H. Munekata, Phys. Rev. Lett. **100**, 067202 (2008).
- 7) Y. Hashimoto and H. Munekata, Appl. Phys. Lett. **93**, 202506 (2008).
- 8) H. Munekata, S. Ogawa, K. Michihiro, K. Nishibayashi, and N. Nishizawa, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, S5EA05 (2020).
- 9) N. Nishizawa, K. Nishibayashi, and H. Munekata, Proc. Nat. Academy Sci. USA **114**, 1783 (2017).