

光および弾性波励起による磁化の超高速制御とその応用 Ultrafast manipulation of magnetization with optical or lattice-wave excitation and its applications

宗片 比呂夫 (MUNEKATA HIRO)

東京工業大学・像情報工学研究所・教授



研究の概要

光の振動数は10の15乗ヘルツです。一方で、磁石中の電子スピン間を結合するエネルギーも振動数で表すと10の15乗ヘルツです。ということは、磁石の磁化を最速で操作するには光を使えば良い、ということになります。しかし、光で磁石を10の15乗分の1秒に迫る速さで操作するための知見はまだ確立していません。それが本当に可能か？に迫る研究を私は行います。

研究分野：総合理工

科研費の分科・細目：応用物理学・結晶工学

キーワード：スピントロニクス、超高速現象

1. 研究開始当初の背景

電子スピンの操作速度(周波数 f)は磁場に比例して速くなります。すなわち f (GHz) = $176 B$ (Tesla)。ところが、電子スピンの集合体である磁化の場合、磁場を大きくすると、スピンのわずかな乱れがスピン回転中に増幅されて全体の位相がばらけてしまい、磁化の操作速度はある値で頭打ちになるかもしれないことが示されたのです[I. Tudosa, *et al.*, *Nature* **428**, 831 (2004)]。この実験結果は、情報処理社会を支える様々な電子機器に内蔵されている磁気記録装置の情報処理スピードに原理的な限界があることを意味しており、やがては他の電子機器のスピードに追いついていけなくなるかもしれないということを暗示しています。海の向こうで行われたこの仕事に接した時、私は自分が進めてきた「光に敏感な磁石=光磁石の研究」に新しい意味を見出したのでした。

2. 研究の目的

物質は電子の集団から出来上がっています。そして、電子の動きは、軌道成分とスピン成分から成り立っています。軌道成分は電磁波や光(非常に周波数の高い電磁波)に対する応答性が良いので、まず、光によって軌道成分にすばやくエネルギーを与え、そのエネルギーが熱となって散逸する前に、軌道成分からスピン成分にエネルギーを与えるようにすれば、個々の電子スピンを同時に、かつ、均一に操作できるのではないかと、スピン相互

の乱れを回避して磁化を超高速で制御できるのではないかと、それを実験で確かめようではないかと、という提案をしましたところ、やってみなはれ、ということになり本課題が生まれました。この研究の目的は、まず、熱に変わってしまう前の光エネルギーを活用して磁化の操作ができるということを実験によって明確に示すこと、そして、それが可能であるならば、磁石によって光信号を記憶する仕組みをこしらえようというものです。

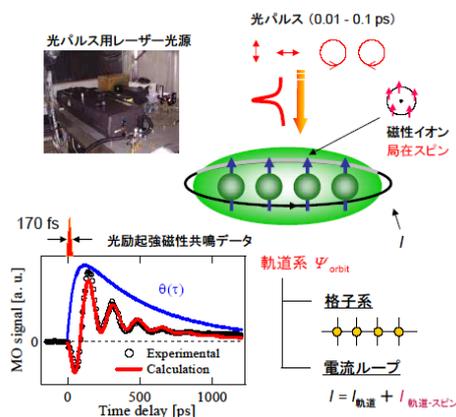


図1 (左上から反時計回りに) 実際の試料励起光源、本課題提案の基礎となった光励起強磁性共鳴の実験データ: 強磁性半導体を使用した、電子の軌道成分を直感的に「電流ループ」と「格子」に分解して示した図、電子の動きを直感的に「軌道」と「スピン」に分解して示した図、励起に用いる様々な偏光状態を示した図。

3. 研究の方法

研究のポイント2つ。第一が軌道とスピン系がほぼ同時に励起されてスピン軸が変化する軌道・スピン複合励起です。第二が軌道励起で発生する格子変形にスピンが結合して、スピンの方向が格子とともに変化する弾性波スピン励起です。

研究は2つのグループで進めます。軌道・スピン複合励起グループの基盤は超高速光ポンプ・プローブ分光です。このグループは磁化の非熱的かつ超高速制御を追究しています。弾性波スピン励起グループの基盤は磁気光学顕微鏡です。試料に圧電素子を組み込んで弾性波を発生させて、格子による磁化の操作と伝播の様子を調べています。試料は9割が自作しますが、応用展開には協力企業から試料を提供いただいています。

4. これまでの成果

ここでは軌道・スピン複合励起グループで得られた2つの成果を紹介したいと思います。

(1) 驚きの弱励起強磁性共鳴

磁性金属を強励起($1\text{mJ}/\text{cm}^2$ 以上)すると、スピンの急速過熱・冷却を経由して磁化振動(強磁性共鳴)が起こることが知られています。私達は電子の軌道成分とスピン成分との間の相互作用が著しいと考えられているCo/Pd多層膜に着目して、強磁性共鳴がどのくらい弱い光で起こるかを試料作製から光励起実験まで一貫して調べてみたところ、大変驚くべきことに弱励起領域($1\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 以下)において光励起強磁性共鳴が起こることを世界に先駆けて見出したのです[文献 1]。磁性金属ナノ構造で非熱的過程が存在することを強く示唆する結果であって、超高速現象研究の新たな1ページを開く成果と思われる。

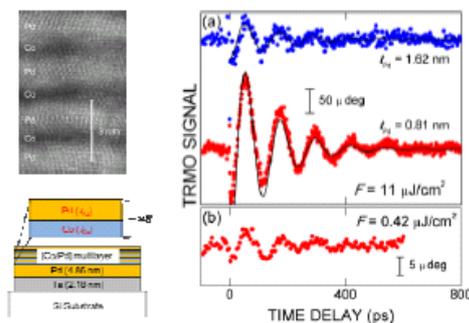


図2 層厚 $t_{\text{Co}} = 0.78 \text{ nm}$ のコバルト薄膜で生じる光励起強磁性共鳴データ。パラジウム薄膜の層厚が $t_{\text{Pd}} = 1.62 \text{ nm}$ の場合、共鳴振動振幅はさほど大きくないが、 $t_{\text{Pd}} = 0.81 \text{ nm}$ と半分になると、振幅が大幅に増大する。

(2) スピン光バッファーマモリ

電子回路には電気信号を一時的に蓄えておくメモリー素子があるのに、光信号処理系にはそのどうしてそのような素子がないのでしょうか？実は、決め手となる素子がまだ登

場していないのです。我々は、光励起強磁性共鳴が継続している状態がメモリーに使えないか、という独創的で野心的な研究も本課題によって開始することができました。その一例が、第2光パルスで磁化振動を強制的に停止する示した実験です。メモリーの初期化に相当します[文献 2,5]。

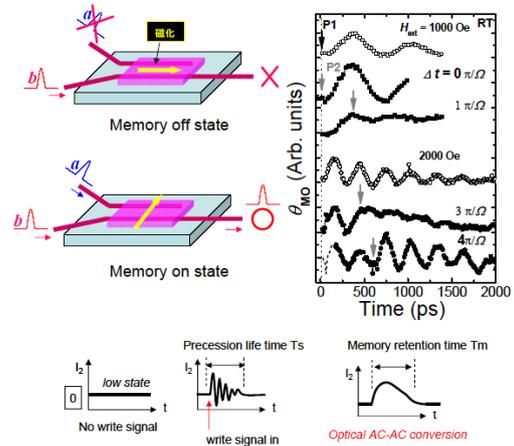


図3 導波路型スピン光バッファーの概略図(左、下)と磁化のコヒーレント光制御実験データ(右)。

5. 今後の計画

前段落で紹介した成果をいっそう追究するのはもちろんですが、今後はテラヘルツ領域での磁化制御と弾性波スピン励起に切り込んでまいります。ご声援のほどどうかよろしくお願いいたします。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- [1] K. Yamamoto, *et al.*, Low-power photo-induced precession of magnetization in ultra-thin Co/Pd multilayers films, IEEE Trns. Mag. **49**(7), 2013 in press.
- [2] K. Nishibayashi, *et al.*, Laser-induced precession of magnetization in ferrimagnetic GdFe thin films with low power excitation; AIP Advances **3**, 032107 (2013).
- [3] N. Nishizawa and H. Munekata, J. Crystal Growth, online publication Dec.19, 2012; doi 10.1016/j.jcrysgro. 2012.11.040
- [4] B. Al-Qadi, *et al.*, Thickness dependence of magneto-optical effects in (Ga,Mn)As epitaxial layers, Appl. Phys. Lett. **100**, 222410 (2012).
- [5] K. Nishibayashi, *et al.*, Experimental investigation of controlling light polarization in optical waveguides with magneto-optical materials GdFe, J. Magn. Soc. Jpn. **36**, 74 (2012).
- [6] 宗片比呂夫、応用物理学会フェロー表彰、2102年9月11日。ホームページ等 <http://www.isl.titech.ac.jp/~munelab/>