

近年の磁気記録技術の進展はめざましく、従来の磁気テープからハードディスクドライブ、さらに磁気ランダムアクセスメモリー (MRAM) へと進化を遂げています。その背景には、巨大磁気抵抗効果 (GMR) やトンネル磁気抵抗効果 (TMR) 等の発見がありました。また、“光” も重要な役割を果たしてきました。

1. 光を用いたスピン操作

光を用いた磁気記録で最もなじみ深いものは、光磁気 (MO) ディスクやミニディスク (MD) などでしょう。この記録方式では光は熱源として、記録媒体の温度を一時的に上昇させることに用いられています。しかし、熱冷却速度や熱拡散のため、記録速度や密度に限界があります。また磁化を反転させるのはコイルによる磁場であり、光は熱源としての役割にとどまっています。

一方、光はスピン1の角運動量をもっています。光を物体に照射してその角運動量を移行できれば、非熱的に物体の磁性を超高速度制御することが可能になります。目下の目標はフェムト秒光パルスを用いて物体のスピンを非熱的かつ超高速度に反転することです。原理的にどこまで高速にスピン反転できるのかという基礎的な興味もあります。

2. 光ポンピングによるスピン偏極

さて、電気双極子による光学遷移では円偏光電場によって物質の磁気量子数ごとに分裂した準位間で選択的に遷移を起こすことができます。この場合、円偏光電場のヘリシティ (± 1) に応じて物質の軌道角運動量が増減しますが、スピン角運動量は変化しません。スピン角運動量はスピン-軌道相互作用の存在によってはじめて変化します。これを利用して基底状態や励起状態のスピン準位間に分布差を作り出すことができます。これは光ポンピングとよばれ、カスレらによってすでに1950年ごろに提案さ

れました。彼らは円偏光した光を照射することで気体原子がスピン偏極することを示しました。また、固体でもルビーや常磁性金属錯体等がスピン偏極することが示されています¹⁾。

3. ポンプ-プローブ時間分解測定

最近では、モード同期フェムト秒チタンサファイアレーザーの発明をきっかけに、フェムト秒の光パルスが容易に得られるようになりました。超高速度スピンダイナミクスはフェムト秒パルスを用いたポンプ-プローブ法によって実時間軸で観測できます。比較的高強度のポンプパルスと十分に強度の弱いプローブパルスを準備して、片方のパスに光学遅延装置を組み込みます。図1のようにポンプ光で試料を励起した後、時間遅延をつけて十分強度の弱いプローブ光を試料の同じスポットに照射します。このプローブ光のファラデー回転やカー回転を少しずつ時間遅延をずらしながら測定することで、試料の励起状態における磁気光学応答の時間発展が測定できます。この方法での時間分解能は、2つの光パルスのパルス幅に依存するので、フェムト秒程度の時間分解能が容易に得られます。

このポンプ-プローブ測定法により、より高速な

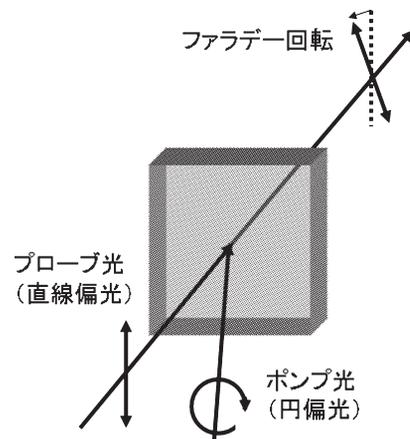


図1 ポンプ-プローブ測定系の概念図。

スピンドYNAMIKSの観測が可能になりました。一例として、円偏光したフェムト秒光パルスを半導体量子井戸に照射して、スピン偏極した電子や正孔を生成し、そのピコ秒オーダーの緩和時間を測定したり²⁾、キャリアのスピン歳差運動を誘起した³⁾という報告があります。

4. 逆ファラデー効果

最近では、逆ファラデー効果に注目が集まっています。ファラデー効果に対して“逆”がつくのは、ファラデー効果と同じ自由エネルギーから導出されるためです。ファラデー効果は物質内の磁場が左右円偏光光線に異なった影響を与える磁気光学効果です。これに対して逆ファラデー効果とは、円偏光光線が透明媒質中を通過すると、光の進行方向と平行もしくは反平行に有効磁場が発生するというものです。その有効磁場の大きさは光の電場を E として $E \times E^*$ に比例するので、円偏光のときに値をもち、ヘリシティが反転すると磁場の方向も反転することになります。オルソフェライトにおいて逆ファラデー効果によるスピン歳差運動が報告されました(図2)⁴⁾。この物質は大きなファラデー回転を示すことで知られています。円偏光パルスによって磁場パルスが生成され、それをきっかけにしてスピが一斉に歳差運動を始めると解釈されています。歳差運動の方向は、円偏光のヘリシティに依存することも実験的に示されました。物質内に生じる有効磁場の大きさは1 Tにも達すると見積もられています。

5. 光誘起磁化反転

そしてついに、実用的な磁気記録媒体であるGdFeCoアモルファス合金で、パルス幅40 fsの円偏光パルスによる磁化の反転が報告されました⁵⁾。単一パルスでも反転することや外部磁場を印加する必要がないことが特徴です。これは歳差運動ではなく非可逆的なスピン反転で、1~10 ps以内に生じる

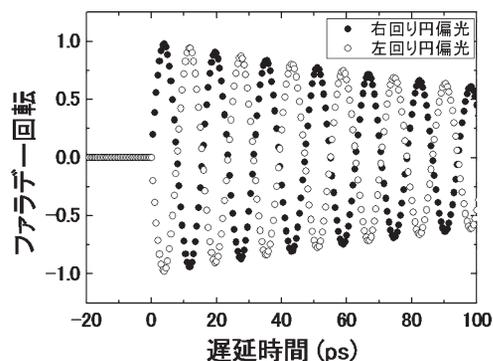


図2 逆ファラデー効果で誘起されたスピン歳差運動の概念図。

ことが示されています。このような興味深い現象でありながら、微視的なメカニズムはまだ明らかにされていません。光が物質に注入する角運動量は磁化を反転するには不十分であり、他の供給源が必要ではないかという指摘がなされています。現時点では誘導ラマン散乱の機構が有望視されています。

光でスピンを操る技術は、いま基礎の面からも応用の面からも注目を集めています。

(東京大学 佐藤琢哉)

文 献

- 1) 高木芳弘, 嶽山正二郎, 足立 智: “光による電子スピン配向と磁気変調効果”, 応用物理, **64** (1995) 241-245.
- 2) 竹内 淳, 和田 修: “半導体量子井戸におけるスピン緩和のダイナミクス”, 応用物理, **66** (1997) 960-964.
- 3) S. A. Crooker, J. J. Baumberg, F. Flack, N. Samarth and D. D. Awschalom: “Terahertz spin precession and coherent transfer of angular momenta in magnetic quantum wells,” Phys. Rev. Lett., **77** (1996) 2814-2817.
- 4) A. V. Kimel, A. Kirilyuk, P. A. Usachev, R. V. Pisarev, A. M. Balbashov and Th. Rasing: “Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses,” Nature, **435** (2005) 655-657.
- 5) 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., **99** (2007) 047601-1-047601-4.