

関西学院大学
セミナー2016.8.24

光と磁気から光とスピンへ

佐藤勝昭

はじめに

- ▶ 拙著「光と磁気」の初版が1988年、改訂版が13年後の2001年である。これらの書では、磁性体という物質中において、磁気が光現象に及ぼす効果を基礎的に論じ、さらには、その応用にまで言及した。
- ▶ このコンセプトの延長におけるその後の発展は、いくつかの解説に述べた。また、近接場磁気光学および非線形磁気光学については「新しい磁気と光の科学」に述べた。
- ▶ 最近になって、「光と磁気」は「光とスピン」と名前を変えて、新たな飛躍の時期を迎えようとしている。この飛躍には、スピントロニクス、スピンドYNAMICS、超短パルス光制御技術など基礎研究の発展がベースになっている。
- ▶ この小論では、はじめに、これまでの「光と磁気」について復習したあと、最近の「光とスピン」の展開について述べたい。

これまでの光と磁気



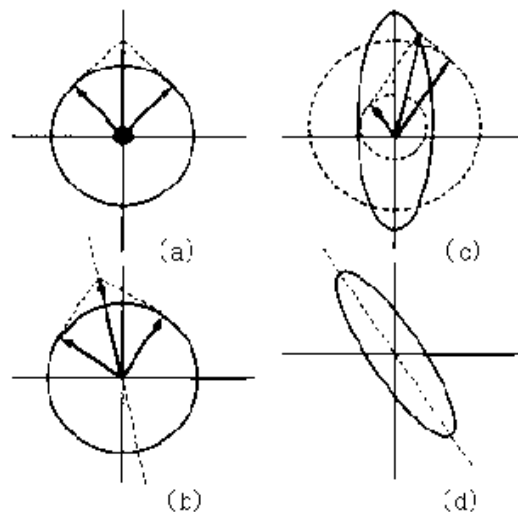
これまでの「光と磁気」

- ▶ 「光と磁気」の関係としては、磁気が物質の光学応答に影響を与える「磁気光学効果」と光が物質の磁氣的性質に影響を与える「光磁気効果」の2方向がある。
- ▶ 磁気光学効果は、ファラデーの発見以来、電磁気学による現象論的な取り扱いで説明され、その後、ミクロの電子論によって説明された。
- ▶ 光磁気効果には、フォトンモードと熱モードがあるが、実用になったのは熱モードの熱磁気記録のみである。M

磁気→光

磁気光学の現象論

- ▶ 磁気光学効果の代表格がファラデー効果、磁気カー効果であるが、これらの効果は、磁化をもつ物質における光学遷移の円偏光選択則から生じる非相反の現象である。
- ▶ 現象論的には、磁化をもつ物質の左右円偏光に対する屈折率の違いによって直線偏光の回転をもたらす磁気旋光が生じ、左右円偏光に対する消光係数の違いによって楕円性をもたらす磁気円二色性が生じる。屈折率の円偏光による違いは、誘電率テンソルの非対角項の存在によって説明される。



磁気光学の電子論

- ▶ 電子論的には、図に示すように磁化された物質の電子軌道間の光学遷移の選択則がもとになって、光の角運動量（円偏光性のヘリシティ）が電子系の角運動量に伝達され、励起状態のヘリシティがバーチャルに基底状態に取り込まれ、誘電率の非対角成分が現れるとして説明することができる。この場合、磁化、したがって、スピンはスピン軌道相互作用を経由して電子の軌道角運動量に寄与すると考えるのである。

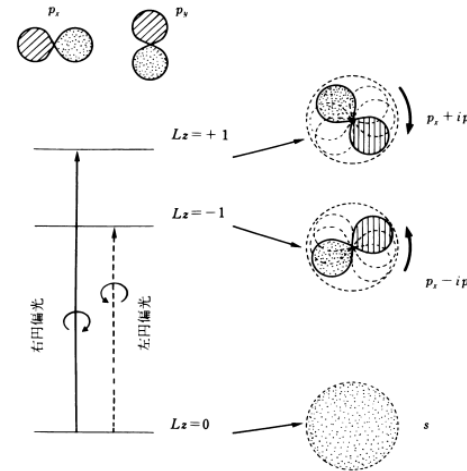
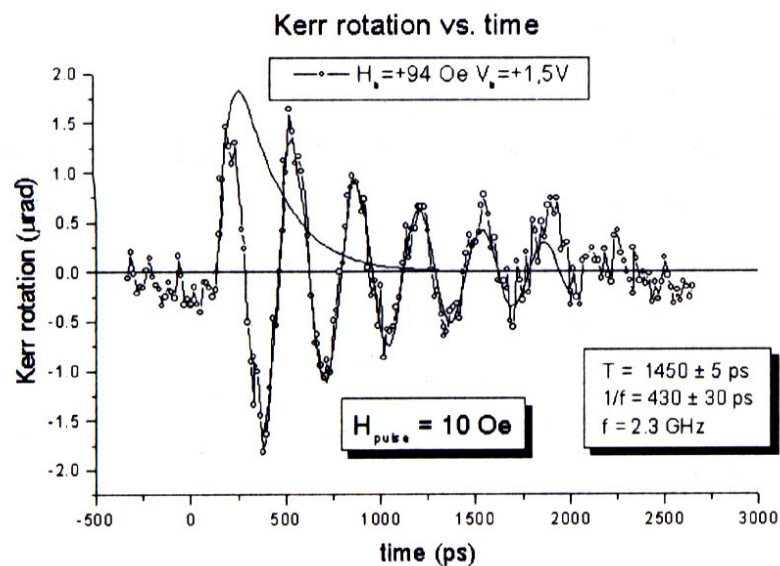


図1 電子の軌道運動と円偏光の選択則

磁気光学効果の応用

計測・観測手段：高速時間応答

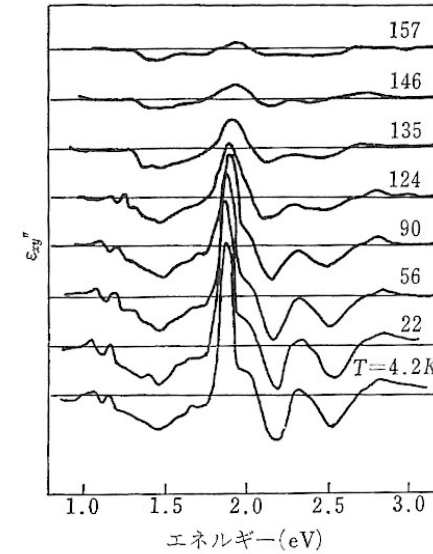
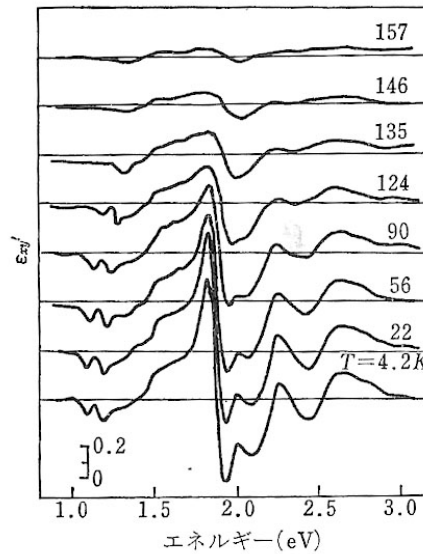
- ▶ 磁気光学効果の時間応答は 10^{-15} [s]以下と非常に早い。それは、磁気光学効果が電子状態間のバーチャルな光学遷移にもとづいているからである。その高速性を使って、超短パルス光照射による磁化の消失や、超短パルス光による高速磁化反転の観測手段として使われている。



磁気光学効果の応用

計測・観測手段:スペクトル

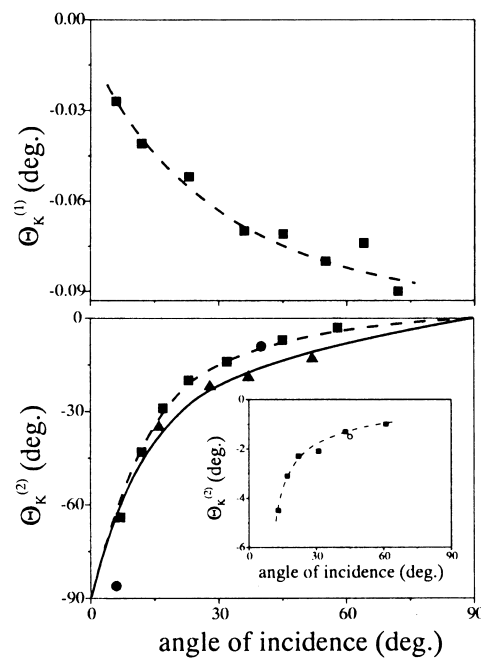
- ▶ 磁気光学効果は電子状態間の光学遷移の円偏光選択則からもたらされていることから、電子状態のすぐれたプローブとなっている。
- ▶ 磁性半導体の電子構造をさぐる手段として、赤外・可視・紫外領域の磁気光学スペクトルが有効であることは、第1世代の磁性半導体である CdCr_2Se_4 、第2世代の磁性半導体である $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 、第3世代の磁性半導体 GaAs:Mn 、 $\text{TiO}_2:\text{Co}$ 、 ZnTe:Cr などで実証されている。
- ▶ 安藤氏は、最近多くの室温磁性半導体の報告があるが、真に磁性半導体であるかどうかの判断基準として磁気円二色性MCDを用いることを提唱している



磁気光学効果の応用

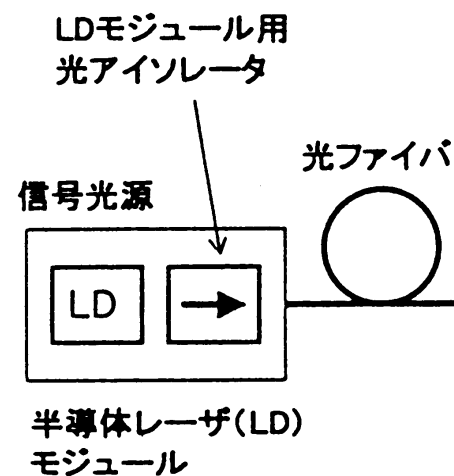
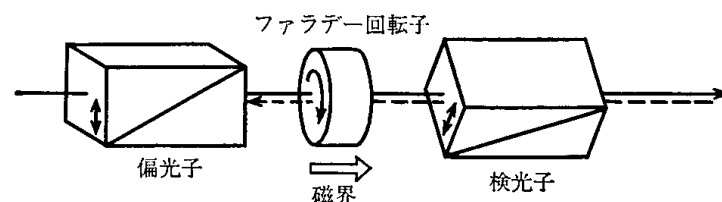
計測・観測手段:非線形磁気光学効果

- ▶ 非線形磁気光学効果は、強い超短パルスレーザー励起によって生成された高次の電気分極による高次光発生が、磁化の影響を受ける効果である。主として、2次高調波発生(SHG)が使われ、入射偏光に対し出射SHG光の偏光が磁化に応じて変化する非線形磁気カー効果(NOMOKE)が観測されている。
- ▶ 例えばFeは、縦カー配置の線形磁気光学カー回転角はせいぜい 0.1° と小さいが、非線形磁気カー回転は 90° 近い大きな値が報告されている。



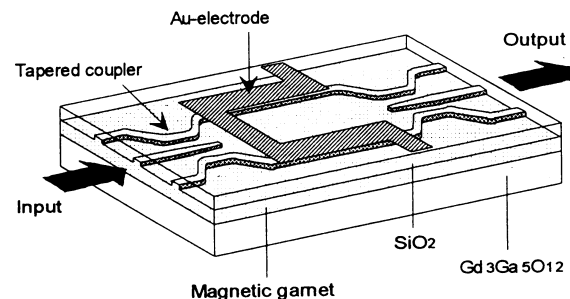
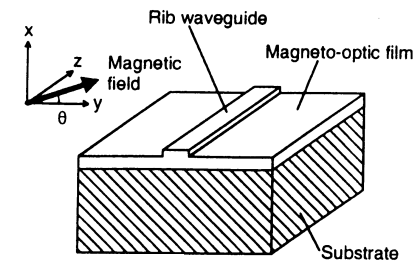
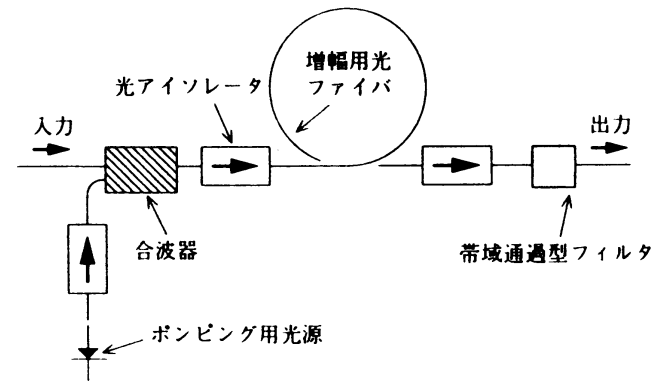
磁気光学効果の応用 光磁気アイソレータ

- ▶ 磁気光学効果が最も実用されているのが、その非相反性を用いて光を一方通行にするのが磁気光学アイソレータである。
- ▶ 偏光軸を45度傾けた2枚の偏光子で磁性ガーネット結晶を挟み、円筒永久磁石の磁界中においたシンプルな構造ながら、光ファイバ通信において戻りビームの半導体レーザへの入射を抑えるために不可欠な光コンポーネントとなっている。



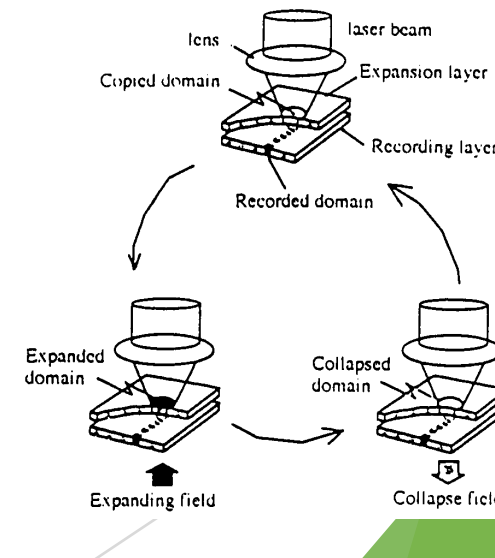
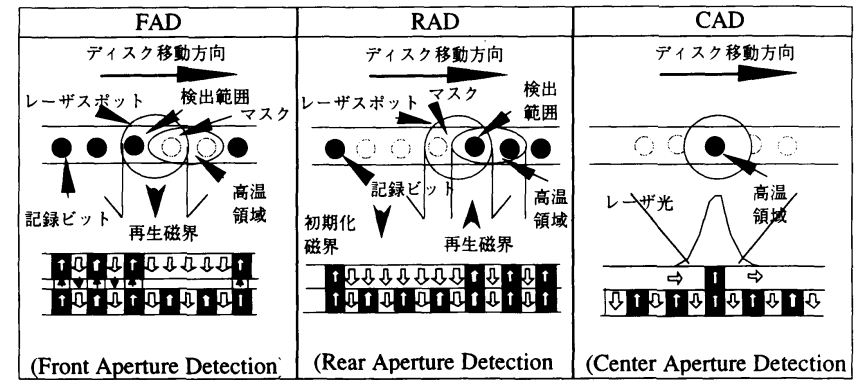
磁気光学効果の応用 光磁気アイソレータ

- ▶ 光多重通信における光ファイバーアンプEDFAにも線路挿入型の光磁気アイソレータが使われている。
- ▶ このほか、光サーキュレータ、可変光アッテネータ、光スイッチなどの光通信にコンポーネントに活躍している。
- ▶ 光磁気アイソレータの課題は、光集積回路への実装である。光多重通信用コンポーネントへの実装を念頭に入れた超小型導波路型アイソレータの研究が行われている。



磁気光学効果の応用 光磁気記録

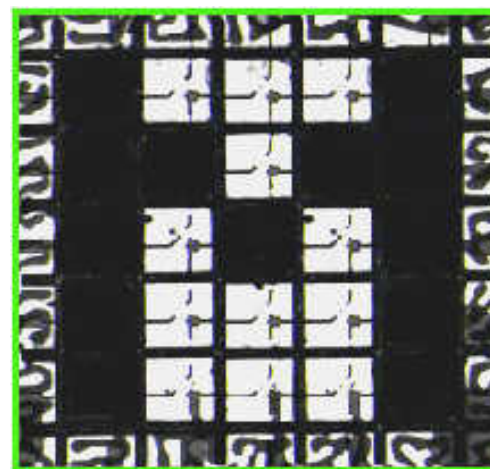
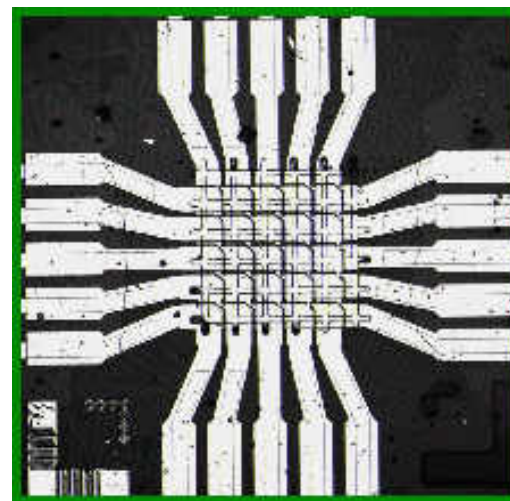
- ▶ 1990年代に開発されマーケットに投入された光磁気ディスク、ミニディスクは、磁性物理の粋を集めた先端技術のかたまりともいえるものであった。熱磁気記録された磁気情報の再生には磁気光学効果が用いられた。
- ▶ 記録密度を上げるために直径数十nmにまで小さくした記録マークを（回折限界を超えて）読み出すために、**磁気超解像**の技術が開発されGIGAMOという名称で市場に投入された。
- ▶ さらに磁区拡大や磁壁移動を利用した再生技術も開発されたが、コスト高となり、その地位をハードディスク、携帯音楽プレーヤなどに明け渡し、製造が中止されてしまった。



磁気光学効果の応用

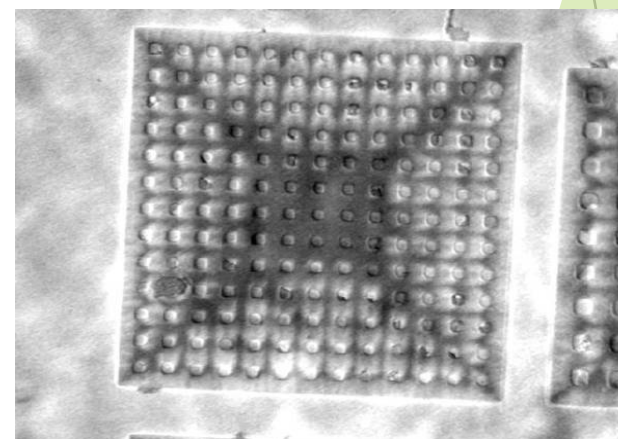
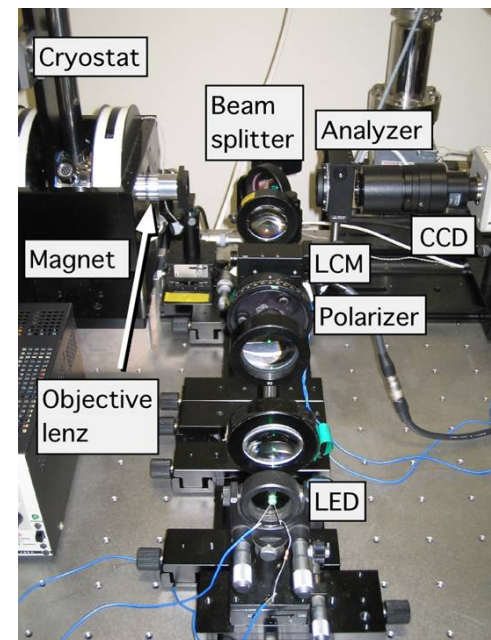
空間光変調器

- ▶ 磁気光学空間光変調器MOSLMは高速動作が可能なことから、ホログラフィックメモリーや立体画像ディスプレイなどの分野で期待が大きい。
- ▶ 磁界変調に電流磁界を用いたものはすでに実用化されているが、電力消費の問題があった。井上らは、磁性フォトニック結晶を用いて大きな磁気回転角を得ることによって、低い電流で変調できること、さらに piezo素子と組み合わせることによって電圧で制御できることを発表した。
- ▶ 最近、強誘電体との界面効果によって、可視域で透明な常磁性物質を用いることが可能になり、新しい展望が開けつつある。



磁気光学効果の応用 イメージング

- ▶ 磁気光学効果は古くから磁区のイメージング手段として用いられてきた。さらに紙幣の磁性インク・磁気カードなど磁気光学効果の小さな磁性体の磁気状態の観測には磁性ガーネット薄膜などを介して磁気光学イメージングすることが行われている。同じ手法を超伝導体への磁束浸入の観測に用いることができ、超伝導電流の大きさを見積もりイメージングすることも可能になっている。
- ▶ 面内磁化イメージングの空間分解能はほぼ光の回折限界で決まるが、近接場光を用いた磁気光学イメージングでは、回折限界以下の微細構造を観測することができる。放射光によるX線磁気円二色性XMCDを利用した元素選択的な磁気光学イメージングも行われている



光→磁気：光磁気効果

光照射による磁性の変化を一般に光磁気効果という

狭義の光磁気効果

- ▶ 光誘起磁気効果
- ▶ 光誘起磁化
- ▶ 光誘起スピン再配列

熱磁気効果

- ▶ キュリー温度や補償温度での磁化や保磁力の変化によるもの
- ▶ 温度誘起スピン再配列

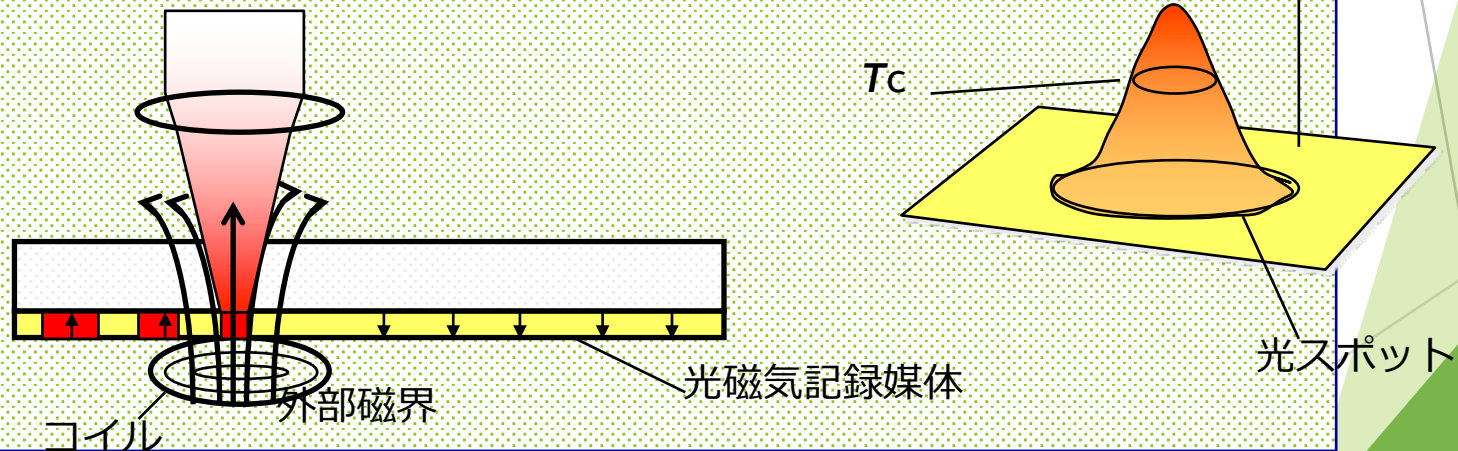
光磁気効果の応用

光磁気記録

- ▶ 光磁気ディスクやミニディスクにおける記録には、キュリー温度 T_c における磁化の消滅と、補償温度付近での保磁力の変化が利用される。
- ▶ キュリー温度記録の場合、レーザー光照射により T_c 以上に加熱された領域は磁化を失うが、冷却の際、周囲からの反磁界を受けて、周囲とは逆向きに磁化される。
- ▶ より安定に記録するため、バイアス磁界が印加される。補償温度記録の場合、補償温度 θ_{comp} 付近で、保磁力 H_c が増大することを利用する。 θ_{comp} が室温付近にあると、レーザー照射によって H_c が減少し、バイアス磁界または周囲ビットからの反磁界で反転が起きる。温度が下がると H_c が大きくなって安定に存在する。
- ▶ 実際の光磁気ディスクでは、キュリー温度記録と、補償温度記録の要素をともに利用している。

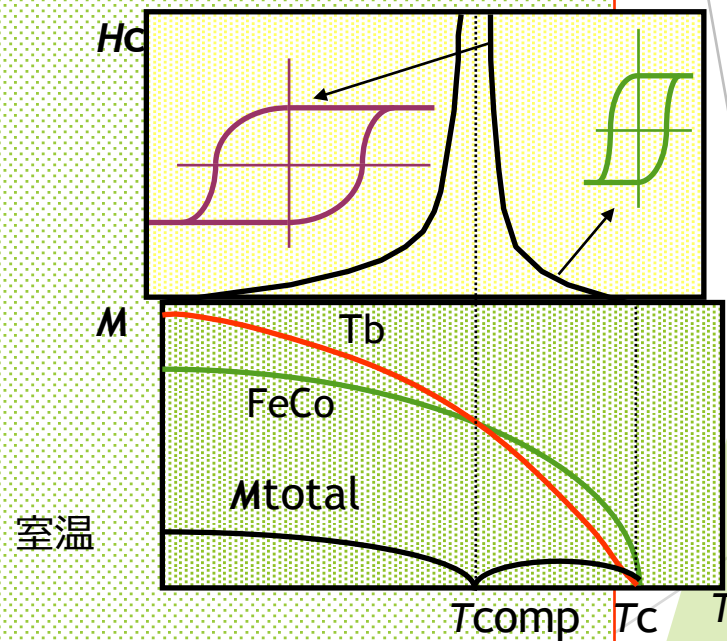
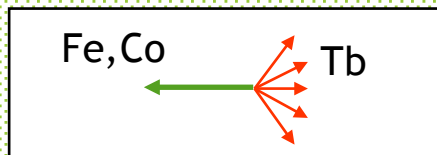
光磁気記録 情報の記録(1)

- ▶ レーザ光をレンズで集め磁性体を加熱
- ▶ キュリー温度以上になると磁化を消失
- ▶ 冷却時にコイルからの磁界を受けて記録



光磁気記録 情報の記録(2)

- ▶ 補償温度 (T_{comp}) の利用
- ▶ アモルファス TbFeCo は一種のフェリ磁性体なので補償温度 T_{comp} が存在
- ▶ T_{comp} で H_c 最大:
 - ▶ 記録磁区安定



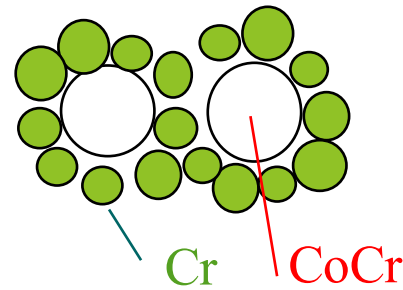
光磁気効果の応用

熱アシスト磁気記録

- ▶ ハードディスク媒体は、磁性微粒子の集合体である。記録密度の増大に伴い微粒子のサイズが小さくなっていくと、時間とともに各粒の磁化がバラバラな方向に向いていき、情報が保てないという超常磁性限界が起きる。これを解決するためには、保磁力 H_c の大きな媒体を用いればよいが、ヘッド磁界で記録できなくなる。
- ▶ 室温付近では大きな H_c を示すが温度上昇によって H_c が減少する媒体を用いて、温度を上げて磁気記録するのが熱アシスト磁気記録HAMRの考えである。HAMRに用いる光ヘッドは、光磁気ディスクのヘッドと異なって、媒体との距離がサブナノメートルとなり、ビットサイズも微小なので、近接場光を使う必要があり、近接場発生素子NFTが使われる。

超常磁性限界

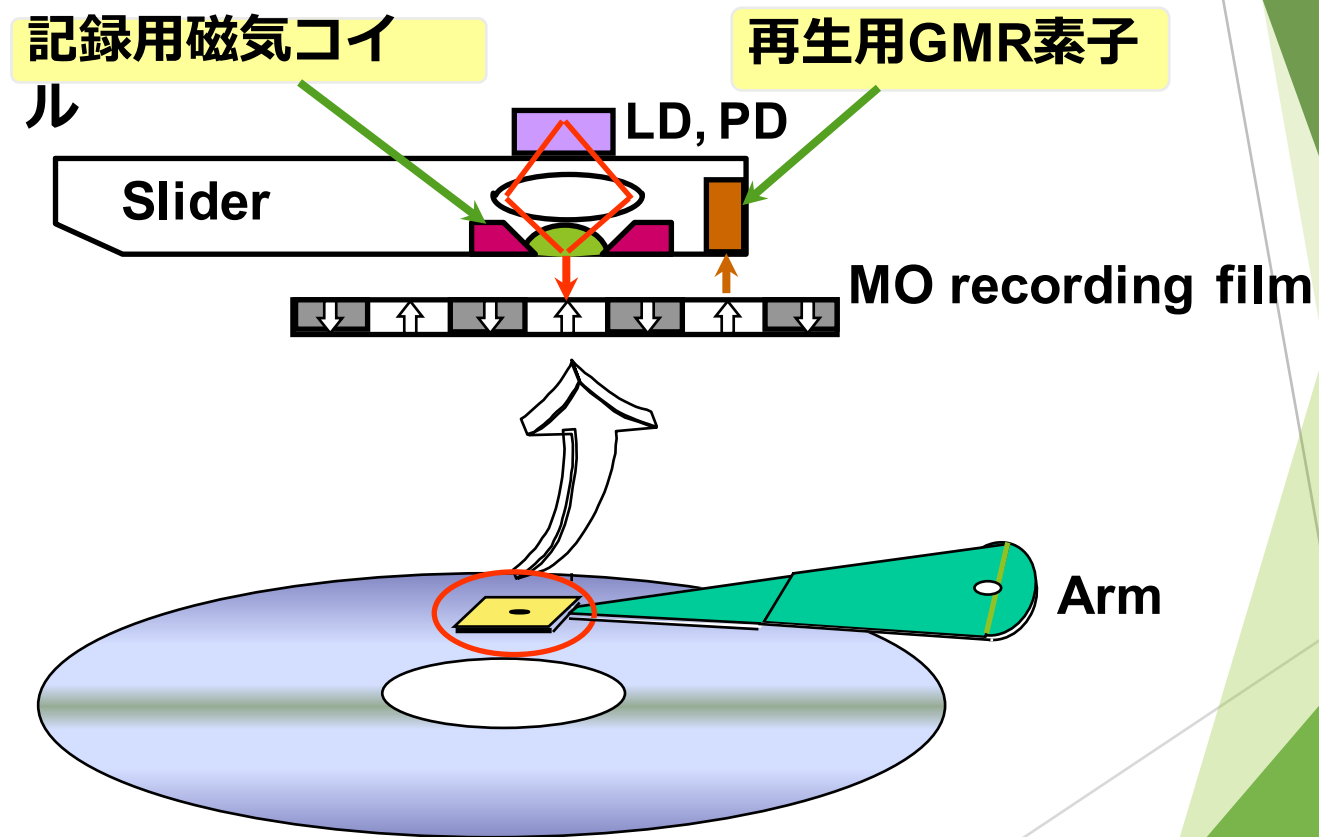
- ▶ 現在使われているハードディスク媒体はCoCrPtBなどCoCr系の多結晶媒体である。強磁性のCoCr合金の結晶粒が偏析したCr粒に囲まれ、互いに分離した膜構造になっている。
- ▶ 磁気ヘッドによって記録された直後は、磁化が記録磁界の方向に向いているが、微粒子のサイズが小さくその異方性磁気エネルギー KUV (KU は単位体積あたりの磁気異方性エネルギー、 V は粒子の体積)が小さくなると、磁化が熱揺らぎ kT によってランダムに配向しようとして減磁するという現象が起きる。これを**超常磁性限界**と呼んでいる。



光磁気ハイブリッド記録 (熱アシスト磁気記録)

- ▶ 磁気記録密度が1Tb/in²を超えるには、マークサイズは25nm×25nm (アスペクト比を1:2として、18nm×35nm) にまで縮小しなければならない。
- ▶ 熱的安定性を保証するには大きな保磁力をもたせなければならないが、それでは、ヘッドによる記録が困難になる。これを解決する方法としていくつかの提案がされている。
- ▶ 保磁力の大きな媒体にどのようにして記録するのかという課題への1つの回答がパターンドメディア技術であるが、もう1つの回答が熱アシスト磁気記録である。

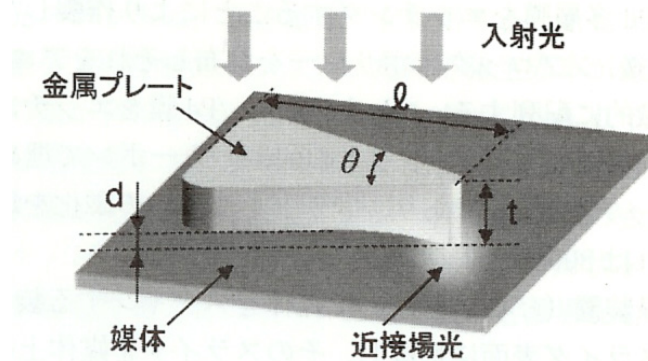
熱磁気記録/磁束検出法



助田による

プラズモンヘッドと近接場

- ▶ ハードディスクの超常磁性限界突破のキーを握る光アシスト磁気記録において、プラズモン増強を利用した近接場ヘッドが研究されている。



「光とスピン」の最近の展開



背景

- ▶ これまでは、主として磁気光学効果が積極的に使われており、光磁気効果は、熱を介したもののしか使われてこなかった。もう一度前節のはじめに立ち戻ってみると、磁気光学効果は、「光の角運動量（円偏光性のヘリシティ）が電子系の角運動量に伝達される」と考えるのであるから、当然、光のスピンの電子のスピンに変換されるフォトンモードの「光磁気効果」が期待されるのである。
- ▶ 前節に述べた光誘起磁化は、その1つの現れであるが、磁化反転や磁気相転移を伴うような大きな効果としての観測はなかったが、スピントロニクス、スピンダイナミクス、超短パルス光制御技術など基礎研究の発展がベースになって、新しい展開を見せつつある。
- ▶ 最近のスピントロニクスの進展は、ナノ領域における光とスピンの関係に新たな展開をもたらしてきた。スピン偏極した電子スピンの注入によって、電子を受け取った磁性体の磁化が反転するSTT(スピントランスファートルク)の現象が実験的に検証され、さらにスピンRAMとして実用化されるという急進展があった。このような背景のもとに、最近「光によるスピン制御」の研究が注目されているのである。

逆ファラデー効果と光によるスピン波の励起

- ▶ 磁気光学効果の逆効果として逆ファラデー効果がある。この効果は、円偏光が物質に照射されるとき、光の進行方向に沿って、仮想的な磁界が誘起される現象で、光誘起磁化として紹介した。その磁界の方向は、円偏光のヘリシティによって反転する。
- ▶ キヤント型の弱強磁性を示す希土類オースフェライトに円偏光フェムト秒レーザー照射をすることによって、数百GHzのスピン歳差運動が誘起されることが報告され、逆ファラデー効果によって説明された。
- ▶ 最近、反強磁性体NiOにおいて、円偏光フェムト秒レーザーにより非熱的にTHz帯のスピン歳差運動が誘起されることが報告された。さらに、光スポットの位置からスピン波が2次元的に伝搬していく様子が時間分解観測され、新しい概念のTHzデバイスを拓くものと期待されている。

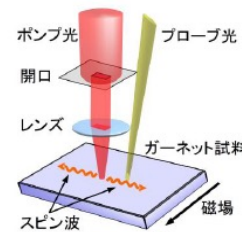


図2 スピン波の発生とその伝播方向の制御方法

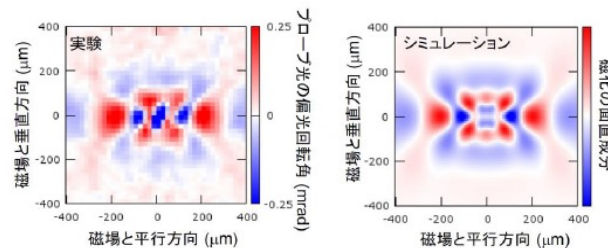
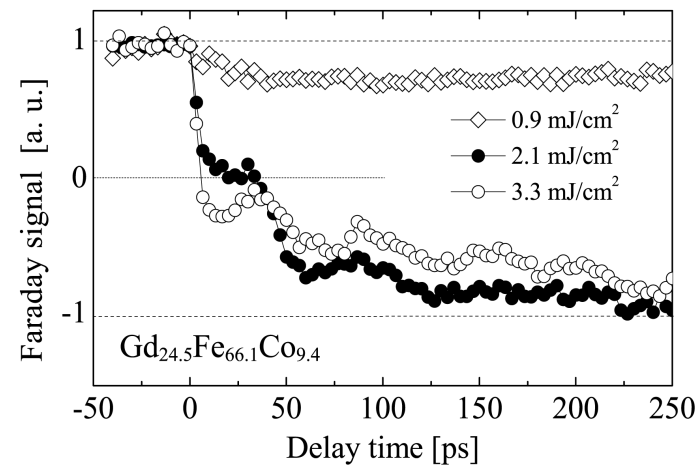


図3 1.5 ns後のスピン波の波形

光誘起高速磁化反転 光誘起プリセッションナルスイッチング

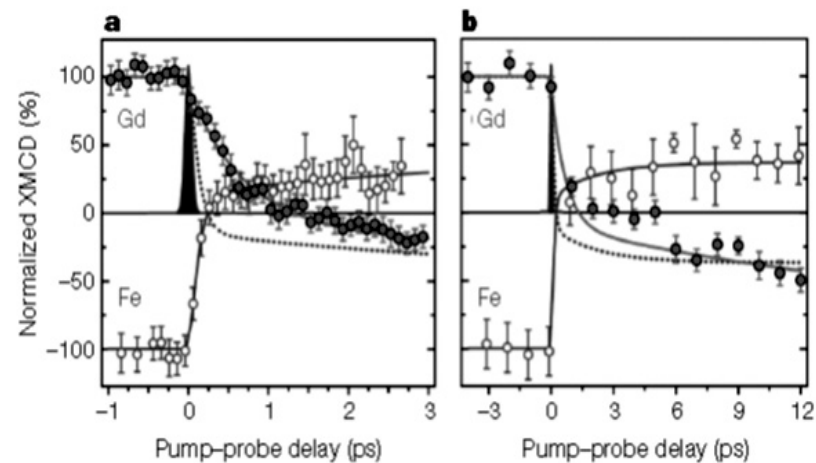
- ▶ 最近、光磁気記録材料であるGdFeCoの角運動量補償点付近において、サブピコ秒の光パルスによって磁化反転が生じ、左右円偏光に応じた記録ビットが形成される現象が発見された。現象論的には、逆ファラデー効果によって光のスピンの応じた有効磁界が発生し、それによって磁化反転が起きるといった新しいタイプの光磁気効果であると考えられた。
- ▶ また、GdFeCoにおいて、図に示すような光誘起プリセッションナルスイッチングが観測された。このスイッチングは、直流外部磁場印加中において、磁化補償温度を跨ぎ、角運動量補償温度付近へ高速加熱することにより実現する。磁化補償点を跨ぐことにより、正味の磁化と外部印加磁場の関係が、平行から反平行へと反転し、加熱後の冷却時定数に比べ十分短い時間で、磁化反転トルクが誘起される。



・ 超短パルス光照射による超高速プリセッションナルスイッチング過程計測

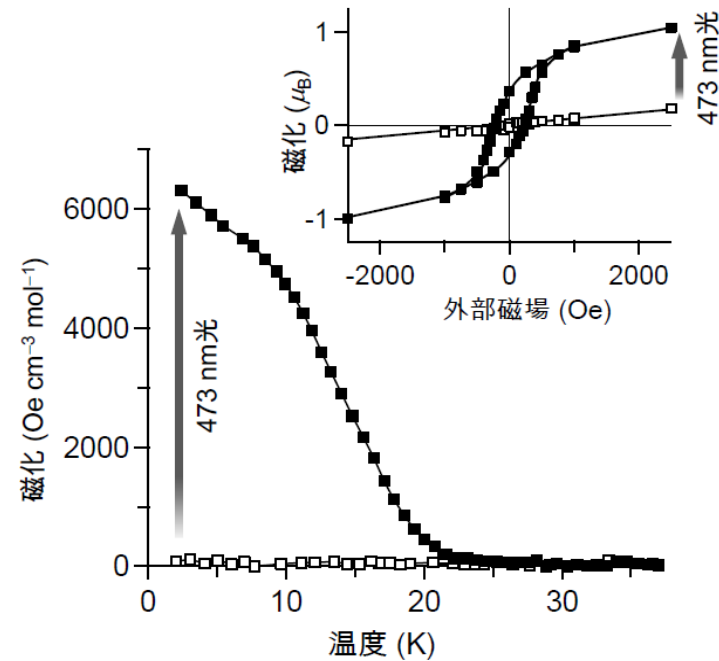
光誘起高速磁化反転 元素選択的観察

- ▶ X線自由レーザーのフェムト秒X線パルスとパルスレーザー光とを組み合わせたポンププローブ時間分解実験で、フェリ磁性体GdFeにおいて反強磁性結合しているGdの副格子磁化とFeCoの副格子磁化を元素選択的に観測し、両者の時間ダイナミクスが異なり、サブピコ領域で一時的に強磁性結合していることが見いだされた。



光クロスオーバー効果による強磁性の発現

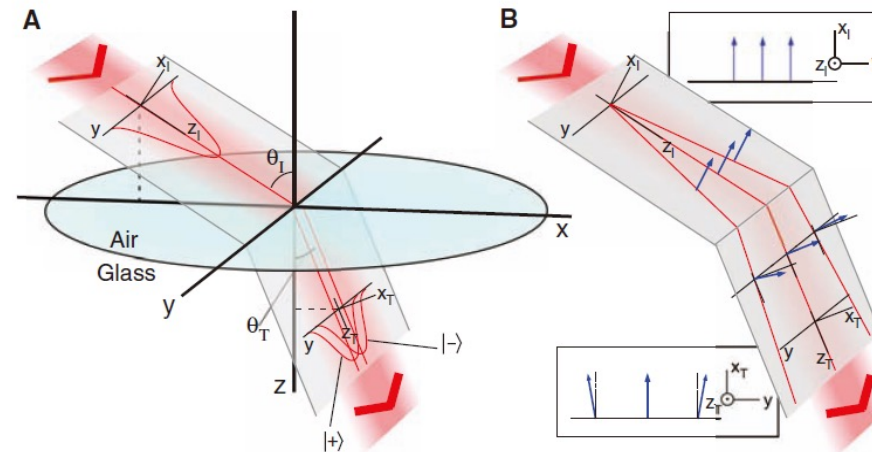
- ▶ 遷移金属イオンを含む錯化合物においては、光によって低スピン状態と高スピン状態の転移を示すものが知られている。通常、局在電子系の遷移金属イオンのスピンは、なるべく大きな全スピン角運動量を持つように配置する。これはHundの規則と呼ばれ、高スピン状態が実現し、磁気モーメントが存在する。
- ▶ しかし、電子相関よりも配位子場が強い場合、低スピン状態となり磁気モーメントが小さくなる。光照射によって、低スピン状態から、高スピン状態へと変換する現象は、光スピנקロスオーバーと呼ばれている。もし光スピנקロスオーバー部位が無数に連結した3次元ネットワークをもつ結晶固体の場合高スピン状態のサイト間で磁気秩序を形成し、強磁性状態への転移が期待される。



スピン流と光スピンホール効果

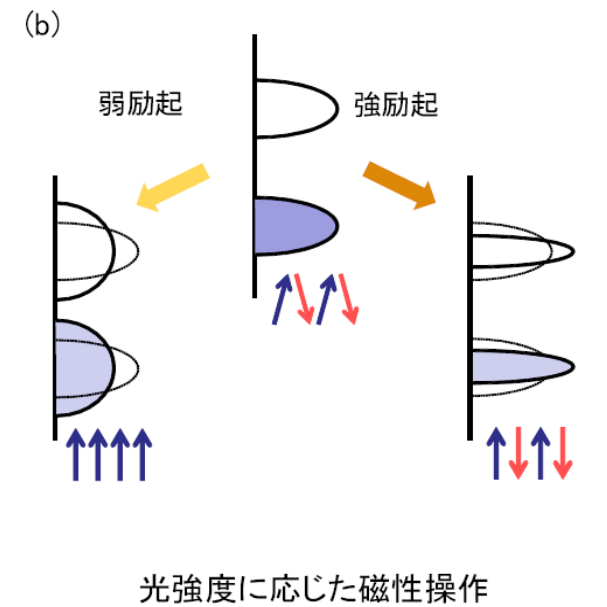
- ▶ スピントロニクスの新展開として散逸のないスピン依存電流であるスピン流がある。スピン軌道相互作用の大きな金属や半導体に電界を印加すると、スピン流が電界に垂直方向に生成されることが示唆され、半導体において磁気光学効果、および電氣的に観測された。この効果はスピンホール効果SHEと呼ばれる。また、スピン流に対して、それに垂直な方向に通常の電流に変換される逆スピンホール効果が見いだされ、現在ではスピン流の検出法として確立している。

- ▶ 最近、SHEの光子版である「光スピンホール効果SHEL」が提唱されたが、それによると、スピン1の光子は、スピン1/2の電荷と同じ働きをし、屈折率の勾配が、電気ポテンシャルの働きをされるとされる。SHELの結果、円偏光が全反射するとき反射光が横方向にシフトする現象などとして現れることが実験的に検証されている。



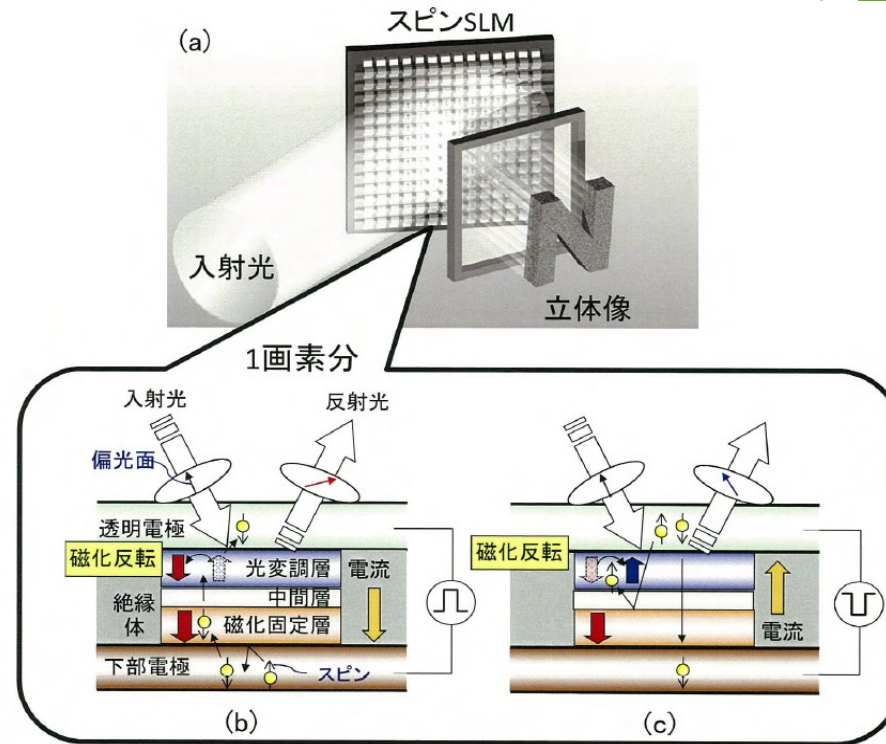
強相関電子系の光誘起反強磁性・強磁性転移

- ▶ 従来の磁気光学が電子のバーチャルな励起によって生じているのに対し、光が電子の運動をリアルに引き起こし、この電子の運動を通じてスピンの系に影響を与える新しい磁気光学が提案された。
- ▶ 実際、ペロブスカイト型Mn酸化物において、超短パルス光励起によって、反強磁性絶縁体相から強磁性金属相への転移をポンププローブ法で観測している。
- ▶ さらに、ペロブスカイト型Co酸化物において、光誘起によって、非磁性の低スピン状態から、中間スピン状態、さらには強磁性の高スピン状態への光クロスオーバー転移が見出されている。



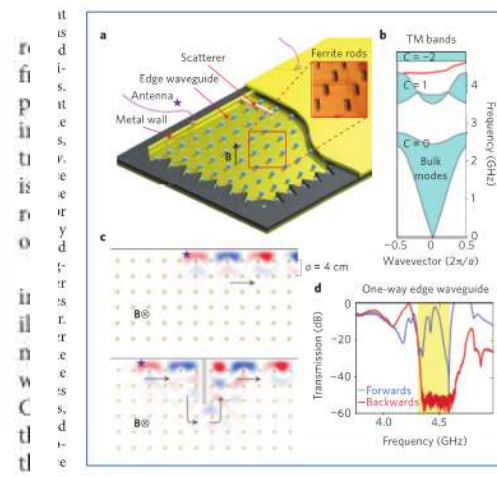
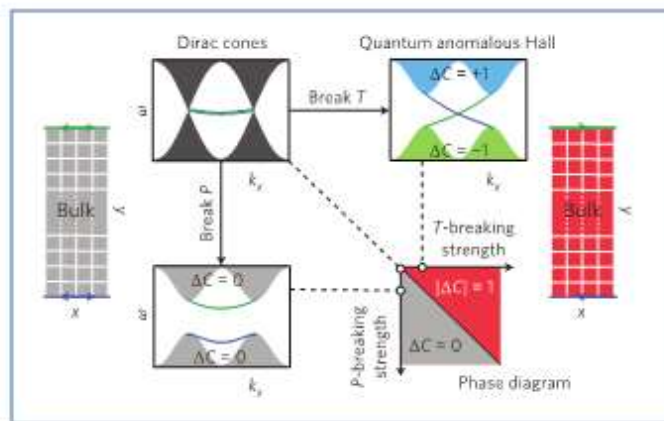
スピン注入と磁気光学

- ▶ 非磁性半導体へのスピン注入・蓄積現象が磁気光学イメージングを用いて行われ32、また、半導体LEDからの発光の円偏光度を用いてスピン注入効率を見積もるなどの研究も行われた。
- ▶ また最近、スピン注入磁化反転による磁気カー回転を用いた空間光変調器(SLM)が3Dホログラフィック・ディスプレイのための高速高精細SLMとして注目されている。



トポロジカルフォトンクス

- ▶ トポロジカル絶縁体においては、界面を流れる電流は、不純物の存在下でも、散逸を受けないとされる。同様に、注意深く設計された波数空間トポロジーによって、興味深い性質をもつ新しい光の状態が界面に創成される。
- ▶ 特に、不完全性のあっても、後方散乱なしに一方通行に進む光導波路ができる。フォトリック結晶、結合共振器、メタマテリアル、準結晶などで実現可能である。



Ling Lu*, John D. Joannopoulos and Marin Soljačić: Nature Photonics ONLINE: 26 OCTOBER 2014

おわりに

- ▶ ここまで述べてきたように、「光とスピン」の現象の基礎研究については、光ホール効果、スピン注入蓄積の磁気光学的観測、光によるスピン波の励起と伝播、ねじれ偏光パルスによるスピンの制御、超短パルス光による超高速磁化反転、自由電子レーザーによる反強磁性結合した磁気モーメントのダイナミクスの観測、逆ファラデー効果などがある。
- ▶ 「光とスピン」の材料としては、磁気をもたらす対称性の変化から生じる非相反な方向二色性現象、スピנקロスオーバー光強磁性体、反強磁性体の非線形磁気光学効果、光が作るスピンの塊などがある。
- ▶ 「光とスピン」で先端技術に結びつくものとしては、スピン注入空間光変調素子、光アイソレータの光集積回路への導入、磁気光学空間光変調器・磁性フォトニック結晶、熱アシストHDD、超高速光磁気記録などがある。
- ▶ 新しいフェーズを迎えた「光とスピン」、今後の展開が楽しみである。