

ナノ強磁性半導体におけるスピン注入磁化反転の研究

大岩 顕

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻

1. 研究のねらい

強磁性体はスピン偏極状態と不揮発性や相反性といった性質のためスピントロニクスでは欠くことのできない材料である。また III-V 族強磁性半導体は、III-V 族化合物半導体に遷移金属などの磁性元素を添加した強磁性材料で、キャリアを介して強磁性が発現するキャリア誘起磁性という興味深い特徴を備える。この物質系は、光や電界による強磁性秩序の制御が実現されており、従来の半導体素子との整合性も良いことから、やはりスピントロニクスにおいて重要である。ところで強磁性体の磁化方向を利用した不揮発メモリーやトランジスタなどは磁化の制御に外部磁場を要するが、磁場を使わない磁化反転の実現は物理的にも、消費電力化や集積化の観点からも重要な課題である。本研究課題では、強磁性半導体の磁化方向を光学・電気的手法により、キャリア誘起強磁性の性質を利用して制御することを目指した。

2. 研究成果

2.1 (Ga,Mn)As における円偏光誘起磁化とダイナミクス

試料は分子線エピタキシーにより 250°C で作製した (Ga,Mn)As 薄膜であった。強磁性転移温度は 30K で面内磁気異方性を示す。パルスチタンサファイアレーザを用いた時間分解磁気カー効果により、強磁性半導体中で起こるスピンダイナミクスを測定したものが、図 1 である。(Ga,Mn)As では円偏光励起によって 2 つのカー回転成分が生じ (図 1(a)(b))、緩和時間 50ps 程度の遅い緩和成分は、強磁性転移温度以下で現れることから (図 1 挿入図)、光生成正孔スピンとそのスピン軸方向に誘起された Mn の磁化である。実験結果は、正孔スピンの生成とともに極めて高速に、Mn-正孔スピン複合体を形成して垂直磁化が生じ、そして緩和することを示している。これは Mn スピンの歳差運動とは異なる。このとき正孔スピンと Mn スピンの比は 1:100 程度であり、正孔が受ける強いスピントリフリップ散乱と $p-d$ 交換相互作用が複合体の形成にかかわっていると考えている。

一方では GaAs/AlGaAs 量子井戸構造の井戸中に Mn を 0.1ML 添加した Mn デルタドープ試料を 400°C で作製し、円偏光誘起 Mn スピン歳差運動の観測に成功した。歳差運動の位相が励起光の偏光に依存するので、光生成キャリアとの $s,p-d$ 交換相互作用による交換磁場がトルクを与えるというモデルが妥当であると考えられる。これは III-V 族をベースとした磁性体構造としては初めての結果である。今後、円偏光の角運動量を使った強磁性体の光学的な磁化反転の実現に向けて、強磁性 Mn デルタドープ量子井戸

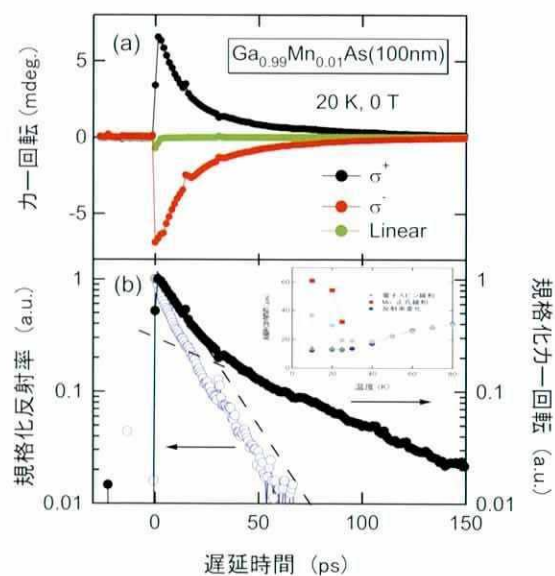


図 1: (a)(Ga,Mn)As の時間分解カー回転。光エネルギーと励起強度はそれぞれ 1.59eV と 0.5 μ J/cm² であった。(b)カー回転と反射率変化の片対数表示。挿入図は緩和時間の温度依存性。

構造が有望であるという足がかりを得ることができた。

2. 2 光誘起強磁性スピン歳差運動

III-V 族強磁性半導体において磁化に光励起で有効磁場を与えて、そのトルクで回転させることはできないであろうか？そこで強磁性半導体の磁気異方性は正孔濃度に依存する性質を利用して、光パルスにより過渡的な有効磁場を Mn スピンに与え、歳差運動を引き起こすことに成功した。図 2 は (Ga,Mn)As の横磁場下での時間分解カー回転信号である。800ps 程度に渡って振動する。この振動の符号は励起光の偏光には依存しない。別途測定した強磁性共鳴は、この振動が強磁性 Mn スピンの歳差運動であることを強く示唆する。磁気異方性の詳細な解析と観測された歳差運動の初期位相と磁場の方位の関係から、歳差運動の起源が光励起による熱上昇ではなく、正孔誘起効果であるという結論を得ている。

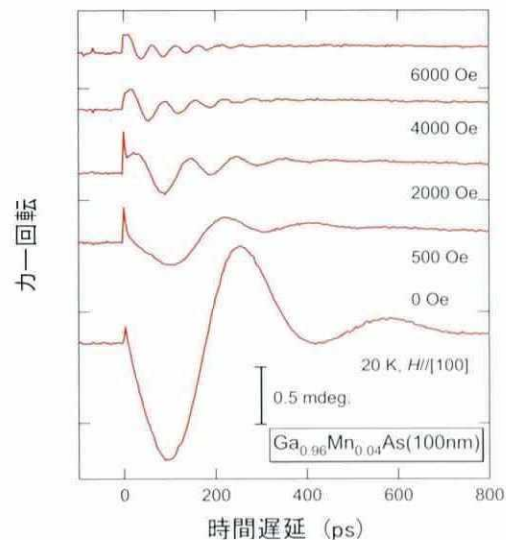


図 2: (Ga,Mn)As の横磁場下での時間分解カー回転。励起光は直線偏光で、光エネルギーと強度はそれぞれ 1.59eV と $3.7\mu\text{J}/\text{cm}^2$ であった。

2. 3 (Ga,Mn)As トンネル磁気抵抗素子における電流誘起磁化反転

微細加工を施した直径 $1\mu\text{m}$ の円形強磁性半導体トンネル磁気抵抗効果素子において、電流注入による磁気抵抗の変化を観測することに成功した。注入に要した電流密度は、成果を発表した 2004 年 4 月に強磁性金属磁気抵抗効果素子で報告されていた値よりも $1\sim 2$ 桁小さい $1\times 10^5\text{ A}/\text{cm}^2$ であった。また観測された磁気抵抗変化は一部の磁区の反転にとどまっていることを示唆しており、今後、試料の構造と微細加工により高バイアス下でのスピン注入効率を改善して、より効率的な電流注入磁化反転の実現を目指す。

3. 主要な発表

論文

- 1) Photoinduced magnetization rotation and precessional motion of magnetization in ferromagnetic (Ga,Mn)As, A. Oiwa, H. Takechi, and H. Munekata, J. Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism 18, 9 (2005).
- 2) Current-Induced Magnetization Reversal in a (Ga,Mn)As-Based Magnetic Tunnel Junction, R. Moriya, K. Hamaya, A. Oiwa, and H. Munekata, Jpn. J. Appl. Phys., 43, L825 (2004).
- 3) Dynamics of photoinduced magnetization rotation in ferromagnetic semiconductor p-(Ga,Mn)As, Y. Mitsumori, A. Oiwa, T. Slupinski, H. Maruki, Y. Kashimura, F. Minami, and H. Munekata, Phys. Rev. B 69, 033203 (2004).

招待講演

- 1) Optical charge and spin injection in (Ga,Mn)As, A. Oiwa, CIMTEC 2006 (Sicily, Italy) June 4-9, 2006.
- 2) III-V族強磁性半導体における光誘起スピンダイナミクス, 大岩顕, 三森康義, 宗片比呂夫, 2004年日本物理学会秋季大会 領域3・4・5合同シンポジウム, (青森大学, 青森)平成16年9月12日-15日, 2004年.

特許

- 1) 量子サイズ効果を用いたスピン注入磁化反転磁気抵抗素子, 大岩顕, 宗片比呂夫, 守谷頼, 櫻村之哉, 特開 2005-011907
- 2) キャリア誘起強磁性体を用いた強磁性共鳴周波数の制御方法及びそれを用いた周波数フィルタ素子, 大岩顕, 宗片比呂夫, 黒澤良太, 特開 2005-286867