

機関番号：12608

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007 ～ 2010

課題番号：19048020

研究課題名（和文）強磁性半導体における光磁化の解明と制御

研究課題名（英文）Elucidation and control of photo-magnetism in ferromagnetic semiconductors

研究代表者

宗片 比呂夫・(MUNEKATA Hiro)

東京工業大学・像情報工学研究所・教授

研究者番号：60270922

研究成果の概要（和文）：

電子系の光励起を経由した磁化の高速変調、および、スピンによる光の偏光制御、は将来性豊かな未踏研究領域である。本課題は、磁化に対する光励起効果の明確化、スピン流の関与の有無、他物質系への展開、新規スピン光デバイスの試作、を目標に掲げて行った研究である。報告書では、強磁性半導体における磁化の光誘起才差運動の非熱的な発現機構、複数の光パルスによる磁化のコヒーレント制御、才差運動の周波数制御、光によるスピン流発現、および、端面型スピン発光ダイオードの作製と評価に関する全体的な進展と突出した具体的成果を記す。

研究成果の概要（英文）：

We report experimental accomplishments obtained through the study of light-induced precession of magnetization in ferromagnetic (Ga,Mn)As. In particular, non-thermal influence of optical excitation, coherent control of magnetization with two optical pulses, control of precession frequency, and optical generation of spin-current are described. Progress in the preparation and characterization of lateral-type spin LED is also described.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	5,700,000	0	5,700,000
20年度	17,200,000	0	17,200,000
21年度	10,500,000	0	10,500,000
22年度	9,600,000	0	9,600,000
年度			
総計	43,000,000	0	43,000,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：スピン依存光物性、強磁性半導体、光誘起磁化、スピン光デバイス、超高速現象

1. 研究開始当初の背景

電子材料・デバイス研究が中心の国内外のスピン트로ニクスあるいはスピンエレクトロニクス研究に対し、本課題の代表者は、スピン依存光物性と光とを組み合わせる初めて達成される光機能の創造（シーズ）をめざす傍ら、電子工学、化学、生物、情報分野の研究者と交流を重ねてスピン光機能のニーズ探索を調査してきた。結果、「電子系の

光励起を経由した磁化の超高速変調」および「スピンによる光の偏光制御」が将来性豊かな未踏研究領域であり、新しい学術的知見や新応用の芽が含まれる意義深いテーマが多数内在しているとの認識に達し学術研究を推進してきた。そのような流れの中で、2007年に特定領域「スピン流の創出と制御（2007～2011年度）」が立ち上がり、光励起によるスピン流の創出と制御という観点で、本課題

の代表者が推進する課題が計画研究として採択された。

研究開始当初における研究テーマと状況は以下の通りであった。

(a) 強磁性半導体 (Ga, Mn)As 結晶薄膜で磁化の光誘起才差運動が発見され[1]、その発現機構を解明中であった。

(b) 円偏光が電氣的に切替え可能なスピンの発光ダイオードを目指して[2]、強磁性 MnSb 層と AlGaAs/GaAs ヘテロ構造を積層したハイブリッド構造の作製を研究中であった。

2. 研究の目的

項目 1 で述べた背景と研究の状況を踏まえ、以下を研究目的に設定した。

- (1) 磁化に対する光励起効果の明確化
- (2) スピン流の関与の有無
- (3) 他の物質系への展開。具体的には、金属磁性体と強磁性半導体から成る複合構造における光誘起効果の探索
- (4) 円偏光切り替え可能なスピン発光ダイオードの試作。

項目(4)は、当初計画には入っていなかったが、当研究室で研究してきたスピン発光ダイオードの品質が向上して種々の実験が行える水準に達したので、当研究室の独創である円偏光切替可能スピン発光ダイオードの試作を盛り込むことにした。総括研究代表者(東北大・高梨教授)からも激励された。

光誘起による磁化才差運動の機構解明と才差運動のコヒーレント制御は、光とスピンを組み合わせる初めて創出可能な光デバイス、たとえば、光バッファメモリーにつながるかもしれない重要課題である。円偏光切替可能スピン発光ダイオードは、新しい機能を備えた固体小型光源として、光技術とスピントロニクスとの融合領域を切り開くものと期待される。

3. 研究の方法

項目 2 で述べた研究目的を遂行すべく、A、B 2つの研究グループを設ける体制とした。各グループの研究タスクを以下に記す。

A. 物性グループ

● ターゲット設定

既存研究を分析して真に新規性の高い光スピン関連現象を想定する研究。

● 試料作製

既設の分子線エピタキシー装置 RIBER-2 で実験用の高品質試料の作製法を研究。

● 超高速分光実験

既設の超高速分光法を駆使して強磁性半導体中の磁化ならびにスピンのダイナミクスに関する信頼性の高い実験データ取得法を研究し得られたデータの新規性を追究。

● 参加人員 (延べ人数)

博士号職員 3 名、大学院学生 3 名

B. デバイスグループ

● デバイス設計

スピン発光ダイオードに関するスピン偏極キャリアの輸送特性を既存理論に基づきモデル化する研究。

● 試料作製

既設の分子線エピタキシー装置 RIBER-1 で実験用の高品質試料の作製法を研究。

● デバイス加工

実験用デバイスへの微細加工の方法を研究。

● 特性評価

既設の偏光分光光学台で受光および発光特性評価のための実験を実施しデータを研究。

● 参加人員 (延べ人数)

博士号職員 2 名、大学院学生 3 名

4. 研究成果

(1) 磁化の光誘起才差運動

磁化の運動に基づく磁気光学信号に含まれるノイズを効果的に抑制した超高速分光システムから得られた実験データとジャイロ磁気理論に基づくシミュレーションとを組み合わせる実験を進めた結果、光の非熱的過程で才差運動が誘起された非局在電子系における最初の実験であることを確立した。

図 1 に、この現象を示す典型的なデータと解析結果を示す[成果⑧]。実験は Ti:Sapphire レーザーを光源とする全光ポンプ・プローブ法で行い、磁化方向の変化を磁気光学信号変化、すなわち、反射光偏光面の回転角として検出した。励起光パルスの光子エネルギー、強度、パルス幅は、それぞれ、1.569 eV、3.4 $\mu\text{J}/\text{cm}^2/\text{pulse}$ 、170 fs で、検出パルス光の強度は励起パルスの 10 分の 1 に設定した。測定温度は 10 K で、実験を開始前に磁化容易軸方向に外部磁場 2000 Oe を印加して試料を着磁し、実験中は外部磁場を印加しなかった。(Ga, Mn)As 試料の Mn 組成、ホール濃度、キュリー温度はそれぞれ $x \sim 0.02$ 、

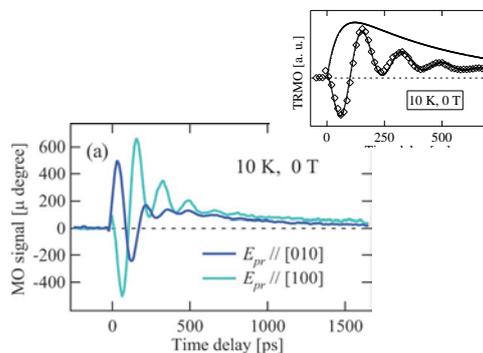


図 1: 2つの異なる偏光面で計測した 10 K における時間分解磁気光学プロフィール。計測パルスの偏光面は、 $E_{pr} // [010]$ では磁化とほぼ平行、 $E_{pr} // [100]$ では磁化とほぼ垂直。外部磁場は印加していない。右上挿入図は、実験データと有効磁場の傾き関数理論曲線。

$p \sim 1.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、 $T_c \sim 45 \text{ K}$ であり、当研究室の分子線エピタキシー法でGaAs基板上に作製した。

励起後 200 ps までの振動の振幅は大きく、その後比較的小さな振幅が約 1 ns まで継続する。また、指数関数的に単調減少する(数 100ps の時定数)成分も背景に認められる。特徴的なこととして、磁気光学シグナルの位相がプローブ光偏光面に依存して変化することが挙げられる。これは、磁気光学シグナルが面直磁化成分による極カー効果だけでなく、面内磁化の方向に鋭敏な磁気線二色性の寄与が極めて大きいためである。

才差運動の励起波長依存性と時間スライス磁気ヒステリシス曲線を系統的に調べた結果、観測された光励起才差運動は (Ga,Mn)As 薄膜や GaAs 基板に吸収された光で発生した熱に起因した現象でないことが明らかとなった。トルクの源となる有効磁場の変化の様子を、磁気ジャイロ理論に基づくモデルによって解析した結果、**図 1** 右上に示すように、有効磁場が励起直後から数 10ps までの時間領域で平衡位置から徐々に逸脱し、その後、数 100ps かけて平衡へと戻っていくことが明らかとなった。すなわち、バンド間励起で価電子帯の電子エネルギーが過渡的に増加・緩和する過程において磁気異方性磁場が変化する結果、磁化 M にトルクが働き、 M は才差運動を行うことが明らかとなった。これをさらに一歩進めて、2 つフェムト秒励起パルスの照射タイミングをずらして照射する実験を行い、才差運動の振幅を抑制あるいは増大できることを明らかにした (**図 2**)。これは、磁化ベクトルのコヒーレント制御につながる成果であって、これまでのスピントロニクスになかった応用イメージを創出できる可能性と捉えている[成果⑦]。

磁化の才差運動を支配する因子は 2 つ、有効磁場 H と振動ダンピング因子 α である。前者は才差運動の周波数を、後者は才差運動の持続時間を決める因子である。この制御を目指して 2 通りの実験を行った。

p - d Zener 理論[2]によると、(Ga,Mn)As の有効磁場の向きと大きさは、正孔系の有す

図 2 : 磁化の才差運動制御の実験データ。上から位相間隔 $0, \pi, 2\pi$, で第 2 パルスを照射した。振幅が抑制あるいは増大している様子がわかる。

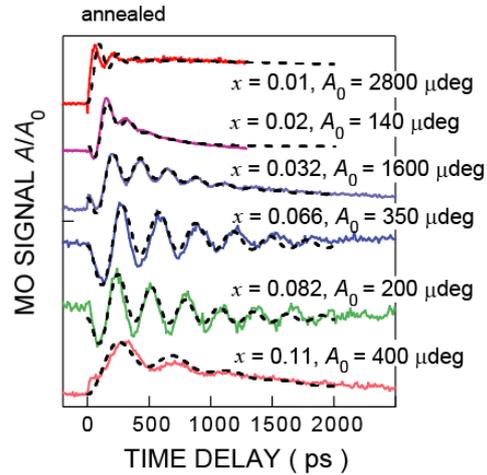
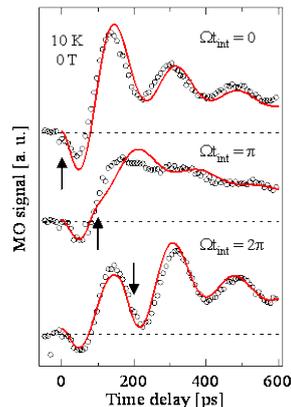


図 3 : Mn 組成の異なる 6 つの試料の磁化における光誘起才差運動の様子

るフェルミエネルギーで決定される。すなわち結晶試料の Mn 濃度と顕著な相関があることが予測される。そこで、当研究室の分子線エピタキシー装置を用いて Mn 組成と正孔濃度が異なる様々な (Ga,Mn)As 試料を作製し、 H ならびに α を系統的に調べた。結果をまとめて **図 3** に示す。才差運動の振幅は、Mn 組成 x が増大して試料が金属的になるほど明瞭になる傾向がある。一方で、周波数は減少していく。すなわち、理論的予測と逆に、有効磁場が減少していくことが明らかとなった[成果⑥]。この原因については現時点でも明らかでない。才差運動のダンピングに関しては、 x に伴って減少し、 $x \approx 0.06 - 0.08$ で最小値をとり、その後また増大していく。このように、 H と α の複雑な振舞いは予想を越えたもので、理論を含めた見直しの必要性を感じる。

2 つ目の実験は微細試料を用いて行われた。試料寸法がミクロン程度になると、反磁場の影響が出てくるため、試料形状を小さくするにつれて有効磁場 H が大きくなり、才差運動の周波数が高くなると考えたからである。結果は、**図 4** に示すように、再び、予測と逆となった。具体的には、磁化の光誘起

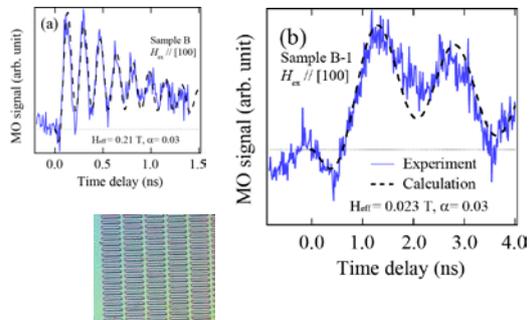


図 4 : 磁化の光誘起才差運動の周波数が、加工前の母体薄膜試料 (a) に比べて、マイクロバー加工試料 (b) では 10 分の 1 に低下したことがわかる。左下は、 $1 \times 10 \mu\text{m}$ マイクロバー試料の光学顕微鏡写真。

才差運動の周波数が、加工前の母体薄膜試料に比べて、マイクロバー加工試料では 10 分の 1 に低下した。マイクロバーの方位や寸法を様々に変化させて作製した試料について、光励起実験を繰り返し行い、また、磁化特性を系統的に調べた結果、母体エピタキシャル薄膜に蓄積されている歪が、微細加工によって生じる自由端面において開放されるため、磁化の異方性を支配している有効磁場が著しく減少するためであると結論した。(Ga, Mn)As 薄膜のスピンドYNAMIXS を支配する因子に対して結晶成長段階で導入される歪が大きく影響することが、思いがけなくも明らかになった。(Ga, Mn)As 薄膜の微細加工を行う際に、このことを念頭に置く必要があるということも意味している[成果⑤]。

微細加工によって母体薄膜中の歪が開放されるという効果は、研究当初予想されていなかったことは前段落で述べたが、この「リソグラフ誘起の磁気異方性変調」[3]を逆手に取って、母体薄膜中の磁気異方性の相対的關係を制御し、その結果、光照射のみで(Ga, Mn)As マイクロバーの磁化を90度スイッチさせることに成功した。その概要を図5と6により説明する。重要なポイントは、母体薄膜中の面内歪は立方晶の基本結晶軸[100]と[010]で等しいが、マイクロバーでは、主に短軸方向に歪が緩和されるため[100]（短軸、図5A点）のほうが[010]（長軸、図5C点）に比べてわずかにエネルギーが高い点で

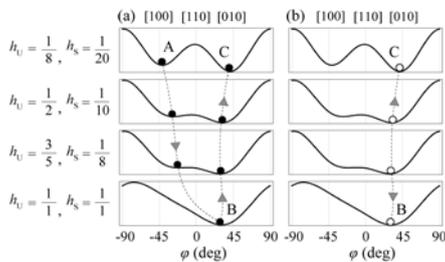


図5：光照射90度スイッチの原理図。長軸方向の歪は緩和していないが、短軸方向の歪は緩和しているので、本来縮退している[100]と[010]の磁気異方性がわずかに分離する点が重要。

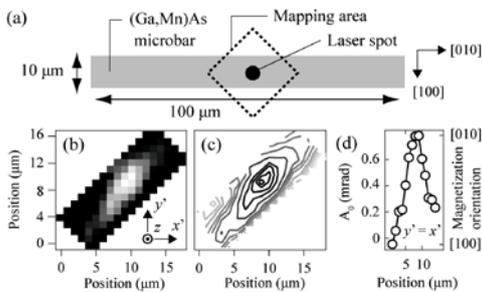


図6：(a) 実験に用いた(Ga, Mn)As マイクロバー概念図。初期磁化方向は[100]。(b) 光照射で90度スイッチした磁化の磁気光学像。(c) 磁気光学信号の等高線分布。(d) 長軸方向の磁気光学信号プロフィール。

ある。A点とC点の間を隔てるエネルギー障壁が光照射の熱的効果で消失した場合、A点の磁化は温度の高いB点にスイッチする。ここで光照射を中断しても、B点の磁化は最安定点のまま冷却後は磁化C点に移行するのである。実際に、 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 寸法のマイクロバー試料を用いて実験を行った結果、光照射スポットの温度が10から30 Kに上昇すると、磁化の90度スイッチ（面内回転）が起こることが実証された（図6）。このように、材料のみに工夫を凝らし、かつ、比較的低パワーの光のみで磁化ベクトルを操作した例は、本実験が世界初と思われる[成果④]。円偏光を用いない点も従来の実験[4]と異なる。

光励起で磁化が才差運動を起こすという状態は、固体を光励起して角運動量が発生した状態とも表現できる。角運動量を外部に取り出せることを示せば、光励起でスピンドル（もしくはスピンドル起電力）が発生できることの証明でもある（図7）。本特定領域の発足

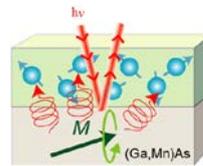


図7：直線偏光の光励起で下部(Ga, Mn)As層に磁化の才差運動が誘起され、それが上部金属層に輸送されるイメージ図

当初から、キャリア輸送とスピンドルとの関係が電子デバイス開発の観点を加味して進められてきていたが、光科学の観点からのアプローチは本研究を他に例がない。特に、光のスピンドル状態である円偏光でなく直線偏光からの角運動量創出はこの現象の多面的な展開を可能にする。以上のような観点で、金属層と(Ga, Mn)As層との界面を介した近接効果で光励起才差運動の制御が可能か調べた。その結果、Pt/(Ga, Mn)As および Fe/(Ga, Mn)As において、光励起で生じる磁化の才差運動の持続時間が著しく短くなることを世界に先駆けて明らかにした([成果③]、図8)。特に、スピンドル軌道相互作用の大きなPt層を隣接させた(Ga, Mn)As層中の磁化の才差運動時間が短くなる現象は、スピンドルポンピング効果できれいに説明できる[5, 6]。一方、強磁性Feを隣接させた場合、才差運動の寿命がいつそう短くなるが、外部磁場を印加して両層の磁化を完全平行にすると、才差運動寿命はあたかもFe層がない時の状態に回復する。この新現象は目下、投稿準備中である。実験的に重要なことは、図8の傾向が、金属/(Ga, Mn)As間にAlAsスペーサー層を導入した試料で消滅する点である。

強磁性半導体(Ga, Mn)As層の光励起実験で得られた多様で新規な学術的知見を他の磁性材料に展開することを意図し、現在、磁気光学材料として産業上重要なフェリ磁性

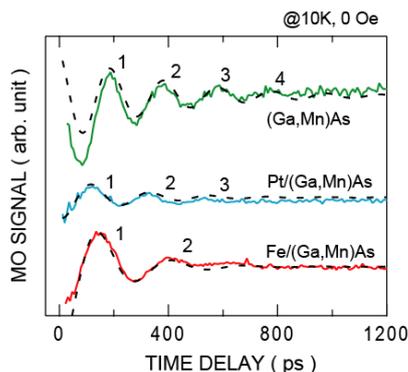


図 8 : 金属層を隣接した(Ga,Mn)As 層における磁化の光誘起才差運動の実験データ。励起条件は図 1 データと同じ。

体 GdFe 垂直磁化膜における室温での光誘起才差運動に関する研究を、NHK 放送技術研究所（橋本ら）ならびに光拠点形成事業（文科省）に参加中の研究者（西林ら）と進めている。

(2) 円偏光切替型スピンの発光ダイオード

半導体に注入されたキャリアのスピンの偏極度を円偏光に変換して検出する検出器との位置づけで研究されてきたスピンの発光ダイオード (spin-LED) [7] の多くは、面内に磁化容易軸を持つ強磁金属薄膜と面直スピンの軸が基底状態となる量子井戸発光層とを組み合わせた構造で研究が進められてきた。このため、外部から磁場を印加して、強磁金属薄膜の磁化 (スピンの軸) を強制的に面直に揃えて注入する必要があった。

Spin-LED を発展させて光技術と結びつけるには、① 外部磁場を印加することなく円偏光エレクトロルミネッセンス (EL) が得られること、② 外部磁場を使わずに円偏光 EL の向きが切り替えられること、の 2 点が重要と考え研究を進めた。

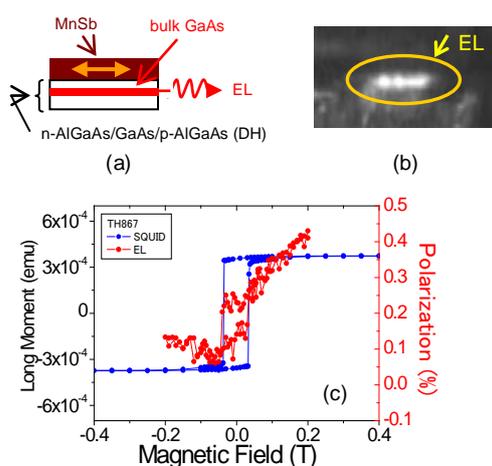


図 9 : (a) 端面発光 spin-LED の概念図。(b) p-n 接合に対して順方向バイアスで発光中の素子の画像。試料温度約 4K。(c) 円偏光度の外部磁場依存性 (赤線) と MnSb 磁化曲線 (青色)。磁場印加方向は MnSb 磁化容易軸に平行 (面内)。

項目①に関する従来型 spin-LED の問題点は、スピン注入電極の残留磁化方向 M と発光層の固有スピン軸 s とが直交していることにある。そこでスピン注入層である強磁性 MnSb エピタキシャル膜の面内磁気異方性はそのままして、GaAs 発光層厚を 150 nm と厚くして面直と面内のスピン軸がともに基底状態をとるバルクの状態を発光層中に盛り込むこととした。この場合、 M は常に面内容易軸方向にあるので、円偏光はストライプレーザーと同様、端面から取り出されることになる (図 9a)。1 台目の分子線エピタキシー装置 (MBE) で AlGaAs/GaAs ダブルヘテロ構造を、2 台目の MBE で MnSb 層を形成して spin-LED ウェーハを作製した。これを壁開して端面発光型 spin-LED を得た。LED に順バイアスを印加して得られた端面 EL の画像を図 9b に示す。EL スペクトルは、バンド端発光 (~ 1.51 eV, 半値全幅 20 meV) が支配的で、作製した試料が実験用として十分に良質であることを示していた。EL ピーク波長 (821nm) における円偏光度の外部磁場依存性を面内磁化曲線とともに図 9c に示す。円偏光度のスイッチング磁場が磁化反転磁場と一致し、かつ、外部磁場ゼロでも円偏光が有限の値であることがわかる。すなわち、項目①「残留磁化状態でのスピン注入による円偏光発光」が本課題によって達成できた [成果①②]。この現象は、他研究機関においても達成されていることを付記する [8]。

本申請が世界に先駆けて提唱している極めて独創性の高い研究項目②は、2 つの端面型 spin-LED を組み合わせて最初の原理実験を行った。実験のポイントは磁化反転磁場

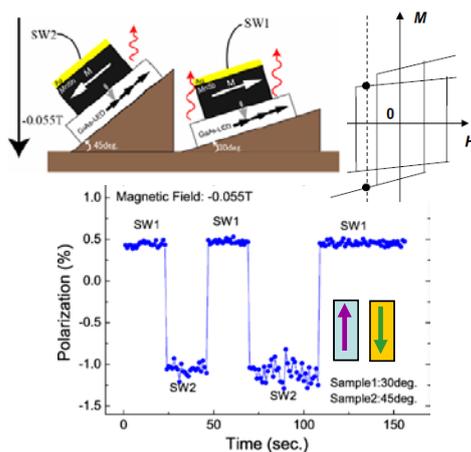


図 10 : (左上) 異なる傾斜台に隣接実装した 2 つの MnSb-GaAs spin-LED の概略図。(右上) 保持力の異なる 2 つの強磁性体電極の磁化ヒステリシス曲線。破線の値の外部磁場を印加すると反平行磁化配置が実現できる。(下) 反平行磁化配置の状態にある 2 つの spin-LED を電氣的に切替えて得られる円偏光スイッチデータ。波長 820nm ($h\nu = 1.512$ eV)。外部磁場 550 Oe。測定温度 4 K。

が異なる 2 つの spin-LED を用意することである。それぞれのデバイスは、 右上に示すように、異なる磁場で磁化反転するので、着磁過程を注意深く制御してやることで、それぞれのデバイスのスピン注入電極の磁化を反平行配置にできる。その状態を保ったまま素子に印加する順方向バイアスを電氣的に切替えることで、円偏光度の符号を電氣的に切替えることが期待される。実際の実験は、特性が同一の 2 つのデバイスを傾斜角の異なる試料台 (30°と 45°) に隣接実装する方法で行った。この場合、2 つの素子に印加した外部磁場が同じ大きさであっても、試料の面内方向の磁場成分は傾斜角に依存して異なるので、磁化反転に必要な外部磁場は両者間で異なる。実際に実験を行った結果得られた円偏光電氣的切替の実験データを  下に示す[成果①]。この実験では、素子の電氣的切り替えは手動スイッチで行っているため、実験の時間スケールが特筆して短いというわけではないが、手動スイッチを交流回路に置き換えれば、円偏光切替の速度を回路時定数程度まで速くできると思われる。現在、単一の spin-LED に磁化が反平行となる 1 対の電極構造のプロセス技術を進めている。

参考文献：

- [1] A. Oiwa, *et al.*, J. Supercond. Nov. Magn. **18**, 9 (2005).
- [2] T. Dietl, *et al.*, Phys. Rev. B **63**, 195205 (2001).
- [3] S. Humpfner, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **90**, 102102 (2007).
- [4] C.D. Stanciu, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99**, 047601 (2007).
- [5] S. Mizukami, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 580 (2001).
- [6] Y. Tserkovnyak and A. Brataas, Phys. Rev. Lett. **88**, 117601 (2002).
- [7] B.T. Jonker, Proceedings of the IEEE **91**, 727 (2003).
- [8] O.M.J. van't Erve, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 072505 (2006); A. Sinsarp, *et al.*, J. Supercond. Nov. Mag. **20**, 405 (2007).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文(全て査読有)](計 17 件)

- ① W. Terui, H. Munekata, T. Hanna, and D. Yoshida: MnSb-based spin LED with side-wall emission; phys. stat. sol. c **8**, 396-398 (2011)
- ② T. Hanna, D. Yoshida, and H. Munekata: Preparation and characterization of MnSb-GaAs spin LED; J. Cryst. Growth (2010), published on-line (doi: 10.1016/j.jcrysgro.2010.11.146); J. Cryst. Growth **323** 383-386 (2011).
- ③ S. Kobayashi, K. Suda, J. Aoyama, D. Nakahara, and H. Munekata: Photo-Induced Precession of Magnetization in Metal/(Ga, Mn)As Systems; IEEE Trans. Mag. **46**, 2470-2473 (2010).
- ④ J. Aoyama, S. Kobayashi, and H. Munekata: All-optical 90-degree switching of magnetization

in a ferromagnetic Ga_{0.98}Mn_{0.02}As microbar; J. Appl. Phys. **107**, 09C301 1-3 (2010).

- ⑤ K. Suda, S. Kobayashi, J. Aoyama, and H. Munekata: Photo-Induced Precession of Magnetization in (Ga,Mn)As Microbars; IEEE Trans. Mag. **46**, 2421-2423 (2010).
- ⑥ S. Kobayashi, Y. Hashimoto, and H. Munekata: Investigation of an effective anisotropy field involved in photo-induced precession of magnetization in (Ga,Mn)As; J. Appl. Phys. **105**, 07C519 1-3 (2009)
- ⑦ Y. Hashimoto and H. Munekata, "Coherent manipulation of magnetization precession in ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As with successive optical pumping", Appl. Phys. Lett. **93**, 202506 1-3 (2008).
- ⑧ Y. Hashimoto, S. Kobayashi, and H. Munekata, "Photoinduced Precession of Magnetization in Ferromagnetic (Ga,Mn)As", Phys. Rev. Lett. **100**, 067202 1-4 (2008).

[学会発表] (計 102 件)

- ① S. Kobayashi, and H. Munekata, "Photo-induced precession of magnetization in metal/(Ga,Mn)As systems (Invited)", 11th Joint MMM-Intermag Conf., Jan. 20, 2010, Washington DC.
- ② T. Hanna, D. Yoshida, and H. Munekata, "Preparation and characterization of MnSb-GaAs-based spin LEDs" 16th Intern'l. Conf. Molecular Beam Epitaxy, Aug.26, 2010, Berlin.
- ③ H. Munekata, "III-V DMS as spin-photonics materials (Invited)", The fifth Intern'l School and Conf. on Spintronics and Quantum Information Technology, July 9, 2009, Krakow.
- ④ S. Kobayashi, Y. Hashimoto, and H. Munekata, "All optical FMR of ferromagnetic (Ga,Mn)As with various Mn contents" American Physical Society March Meeting, March 12, 2008, New Orleans. など

[図書] (計 1 件)

- ① 宗片比呂夫、スピントロニクス基礎と材料・応用技術の最前線(シーエムシー出版、2009年、監修:高梨弘毅、総ページ数421ページ)、第10章:磁性半導体における光誘起効果(11ページ)。

[その他]

発表論文全データはホームページ参照

<http://www.isl.titech.ac.jp/~munelab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宗片 比呂夫(MUNEKATA HIRO)

東京工業大学・像情報工学研究所・教授
研究者番号: 60270922

(3) 連携研究者

北本 仁孝(KITAMOTO YOSHITAKA)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授
研究者番号: 10272676