

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2011

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・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60270922

研究代表者の専門分野：スピントロニクス

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：スピンドYNAMIX、キャリア誘起強磁性、強磁性半導体、スピン依存光学遷移

1. 研究計画の概要

本課題は、光で励起された電子系とスピン秩序との相互作用という未踏領域を開拓するものであり、固体物理学における電子・格子・スピン間のエネルギー・運動量交換の新しい学理を切り開くものと位置づけられる。磁化回転や磁化発生が起こる実験条件の明確化を通して、電子系とスピン系間のエネルギー変換およびスピン流の関与の有無を明らかにする作業を通じて本領域の推進に貢献する。強磁性半導体を主な試料として、以下の4事項を明らかにすることを計画に掲げた。

(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り替え可能な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）からも激励されてきた研究である。

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ことで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。また、円偏光切り替え可能な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の融合領域を切り開くものと期待される。

2. 研究の進捗状況

(1) 磁化に対する光励起効果の明確化

磁化の運動に基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ことで実験を進めた結果、2005年に世界に先駆けて見出した強磁性半導体（GaMnAs）の磁化の光誘起才差運動に関して、新規な知見が豊富に得られた。

第一に、この現象が光励起の非熱的過程を起源とするものであることを明らかにした。専門的見地からは以下のように補足される。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・緩和する過程に磁気異方性磁場が変化すると、磁化 M にトルクが働き、 M は才差運動を行う。非局在電子系において光の非熱的過程で才差運動が誘起された最初の実験例である。

第二に、才差運動を支配する2つの因子、すなわち、有効異方性磁場 H と振動ダンピング因子 α が結晶試料の Mn 濃度と明らかな相関があることを明らかにした。専門的見地からは以下のように補足される。異方性磁場 H ならびに振動ダンピング因子 α はそれぞれ、組成 x 、正孔濃度 p の増加とともに減少することを見出した。

第三に、複数のフェムト秒パルスレーザーの照射タイミングを制御すると、磁化の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ことが挙げられる。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。

(2) スピン流の関与の有無、ならびに、(3) 他の物質系への展開

スピン流の観点で、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を調べた結果、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周波数と振幅に著しい変化が現れることを世界に先駆けて明らかにした。専門的見地から補足すると、有効磁場 $\mu_0 H_0$ (以下 B_0)とギルバートダンピング定数 α の金属層厚依存性を調べ、金属層厚の増加とともに B_0 は減少し、 α は増加することを実験的に見出した。さらに重要なことは、これらの傾向が金属 / (Ga,Mn)As間にAlAsスペーサー層を導入した試料で顕著に抑制されることを見出した点である。以上の実験結果は、磁化の才差運動で生じた(Ga,Mn)As層中のスピン流が、面を介して金属層に流れ込んでいることを強く暗示している。

(4) 円偏光切り替え可能なスピン発光ダイオードの試作

強磁性MnSb層をスピン注入電極とするスピン発光ダイオードを試作し、円偏光度数%で発光する素子(低温、40 K以下)を面直発光型ならびに端面発光型の両者で得ることに成功した。分子線エピタキシー(MBE)装置1号機でGaAs-based light emitting diode(LED)構造を基板温度 $T_s = 510^\circ\text{C}$ で作製し、引き続き、MBE1号機からMBE2号機に真空搬入し、 $T_s = 250^\circ\text{C}$ でスピン注入電極層の強磁性MnSbエピタキシャル薄膜を作製した。

発光帯ピークで計測した円偏光度の磁場依存性はMnSb層の磁化ヒステリシス曲線とほぼ一致した。すなわち、MnSb層からのスピン偏極電子がGaAs発光層に注入されていることが証明された。さらに重要なことは、外部磁場ゼロでも、面内の残留磁化を反映して、円偏光が残留する状態を得ることができたこと、磁化(すなわちキャリアスピン)が反平行になるように調整した2つのspin-LEDを電気的に選択して円偏光切替ができることを示すところまで到達することができた。すなわち、素子駆動中に外部磁場を印加する必要がない素子が作製可能であるということを示すことに成功した。

3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

項目(1)と(4)で得られた多様な知見は、当初計画から狙っていたものであり、研究がおおむね順調に推移してきたことを示している。項目(2)と(3)のスピン流の関与の有無については、金属層・強磁性半導体層の複合構造を研究したことで思いがけなくも得られたものであり、当初の計画以上に進展したと感じ

ている。

4. 今後の研究の推進方策

2011年度は、伸び代が大きそうな課題を集中して推進する。具体的には、金属層・強磁性半導体層の複合構造の光励起効果を掘り下げて、才差運動の高周波数化、振幅増大化、才差運動持続時間の制御、などを追究する。円偏光切り替え可能なスピン発光ダイオードの円偏光度の向上に取り組む。これらを総括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。

5. 代表的な研究成果

[雑誌論文(査読有のみ掲載)](計13件)

[1] 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).

[2] T.Amemiya, Y.Ogawa, H.Shimizu, H.Munekata, and Y.Nakano, "Semiconductor Waveguide Optical Isolator Incorporating Ferromagnetic Epitaxial MnSb for Temperature Operation", Appl. Phys. Express. **1**, 022002 (2008).

[3] Y.Hashimoto, S.Kobayashi, and H.Munekata, "Photoinduced Precession of Magnetization in Ferromagnetic (Ga,Mn)As", Phys. Rev. Lett. **100**, 067202 1-4 (2008).

[4] J.Wang, L.Cywinski, C.Sun, J.Kono, H.Munekata, and L.J.Sham, "Femtosecond demagnetization and hot-hole relaxation in ferromagnetic $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ", Physical Review B **77**, 235308 1-6 (2008).

[5] 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).

[学会発表](計77件)

[1] 照井亘瑠、半那拓、宗片比呂夫: MnSb-GaAs Spin-LEDの作製と評価; 第56回応用物理学関係連合講演会(筑波大、2009年3月30日-4月2日)講演予稿集 No.2, p.802.

[2] 宗片比呂夫: 光とスピン-スピントロニクスと光メモリの可能性; 光エレクトロニクス第130委員会第268回研究会「最先端光メモリ技術」(東京理科大学 森戸記念館、東京都新宿区、2009年9月3日)、講演予稿集 p.14.

[図書](計1件)

宗片比呂夫、スピントロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線(シーエムシー出版、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)、(2009年)