

機関番号：11301

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048008

研究課題名（和文） スピン流と光物性調整班

研究課題名（英文） Spin Current and Optical Properties

研究代表者

大野 裕三 (OHNO YUZO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：00282012

研究成果の概要（和文）：

スピン流と光物性に関し、半導体量子構造における電子・核スピン物性の光制御とその光検出、強磁性半導体の光励起による新物性の発現、強磁性金属多層膜の光物性、さらにスピンと光の結合理論について研究を行い、実験研究および理論研究のグループ間の連携を進めながら多くの知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

On the spin current and optical properties, we investigated optical control and detection of electron and nuclear spin dynamics in semiconductor quantum structures, novel properties of ferromagnetic semiconductors with light irradiation, optical properties of the ferromagnetic metal multilayers, and theories of spin and light coupled phenomena. We obtained number of results on the spin current and optical properties, with collaboration between experimental and theoretical research groups.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	0	1,900,000
2008年度	3,900,000	0	3,900,000
2009年度	3,900,000	0	3,900,000
2010年度	2,900,000	0	2,900,000
総計	12,600,000	0	12,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学、構造・機能材料

キーワード：スピン流、スピン・軌道相互作用、強磁性半導体、強磁性共鳴、スピンホール効果

1. 研究開始当初の背景

光と物質の磁気（磁性）との相関に関する研究は長い歴史を有しており、これに基づくさまざまな機能が開発され、今日の情報通信デバイスの多くに利用されている。一方、1990年代に巨大磁気抵抗効果などスピン依存伝導や強磁性半導体の創成・物性の研究が大きく進展し、次世代の高機能デバイス基盤技術としてスピントロニクスと呼ばれる研

究分野が創出された。その発展過程において「スピン流」という概念とその重要性が強く認識されるようになり、光と磁気との相関に関する研究も新たな進展が見られた。例えば、半導体における光誘起強磁性やスピン注入の光学的検出など、「スピン流」と光の相関によるこれまでにない新しい物理現象が出現し、デバイス応用可能な機能の発現が実証された。また、超短パルスレーザーを用いた

超高速計測技術が進化したことにより、高速磁化応答など光とスピン流の変換を利用した極限物性の観測が可能となった。さらに、近年の理論研究の進展により、光とスピンの相互作用に新たな側面が見出されつつある。

2. 研究の目的

本研究グループ「スピン流と光物性」では、光と磁気（スピン）との相関によって生じるさまざまな物理現象を探求し、「スピン流」を基軸として整理・統合して理解するとともに、光によるスピン流制御を推し進めてデバイス応用可能な機能発現を目指す。具体的には、以下の4つの課題を設定して研究を実施する。

- (1) 半導体量子構造における核スピンの光制御・検出
- (2) 強磁性半導体における光磁化の解明と制御
- (3) 金属多層膜系におけるスピン流と磁気緩和の光学的検出
- (4) 光・電子スピン結合の理論

本調整班では、関連研究に関する動向調査を行い、研究方針策定や計画の立案を行う。上記の4つの研究課題が有機的に連携することにより、さまざまな物質や環境における光とスピン流の相関について理論構築と、スピン流の定量的計測や光⇄スピン流変換に関する実験とを一貫して共同研究を実施できるように連絡調整を行う。また、計画研究と公募研究との連絡調整も行う。

3. 研究の方法

本調整班では、さまざまな物質における光スピン流との相関を実験的に明らかにし、それを統一的に理解する光・スピン流結合理論を構築することを目標とし、代表者・分担者はそれぞれ担当する研究の動向調査を行い、相互の情報交換、共同研究を促進させる。具体的な研究計画は以下の通りである。

- (1) 半導体量子構造における光と核スピン間の相関を中心に、半導体量子構造における光・スピン物性研究の動向調査を行い、光とスピン流との相関に関する新物性・新機能の発現とその理論解明に向けた研究計画を策定する。同時に、各計画研究代表者間の連絡調整や、公募研究と計画研究との間の調整も行う。
- (2) 強磁性半導体における光磁化の解明と制御について、関連する研究動向調査を行い、理論と実験研究との間の情報交換を促進させる。(宗片)
- (3) 金属系多層膜におけるスピン流と磁気緩和の光学的検出について、関連する研究動向調査を行い、理論研究と実験研究との間の情報交換を促進させる。(安藤)
- (4) 実験グループとの連携により、新物性の定量的解析を行うと同時に、光・電子スピン

結合の理論に関して研究動向調査を行い、情報交換や共同研究の促進を行い実験条件等の指針を提示する。(永長)

4. 研究成果

研究期間内に得られた主たる成果は以下の通りである。

(1) 半導体量子構造における光と核スピン間の相関

・スピン3/2を有するGaAs中の核スピンAs、Gaを量子ビットとする固体量子演算の実証に向けて、位相制御された高周波パルス磁場印加によるスピン制御の光学検出を実証した。

・GaAs/AlGaAs量子井戸構造中の核スピンコヒーレンスの光検出を実証した。スピン3/2の⁷⁵Asを対象に量子ゲート操作に用いられる多重NMRパルス列を印加し、NMRスペクトルの光検出を行って多準位核スピン系の位相制御を検証した。

・n型(110)GaAs/AlGaAs単一量子井戸を用いた電界効果トランジスタ構造において、核スピンのエネルギーおよび位相緩和時間の電子密度依存性を光検出NMR測定より調べ、前者は10倍以上、後者も2倍近く制御可能であることを実証した。

・局所的な核スピン操作に有望な核電気共鳴を実証した。電界によって核磁気共鳴スペクトルの共鳴周波数を線幅以上に変化させられることを実証し、さらに振動電界によるコヒーレントな核スピン操作を試み、パルス電界によるラビ振動が観測され、初めて電界による核スピンのコヒーレント操作を実証した。

(2) 強磁性半導体における光磁化の解明と制御

・強磁性半導体(Ga, Mn)Asにおいて光パルスで励起した後の複雑な磁化の歳差運動について解析を行い、磁気異方性の変化による有効磁界の変化を考慮したモデルで再現できることを示した。

・面直および面内磁化薄膜を電極とするスピンLEDを作製し、面直、端面発光型の両素子で、残留磁化を利用した円偏光エレクトロルミネッセンスを得た。強磁性半導体(Ga, Mn)Asの磁化が光励起の非熱的過程で歳差運動を行うことを発見した。異方性磁場の大きさや磁化ダンピング定数を決定した。さらに、複数パルス光で磁化運動のコヒーレント制御を実現した。

・金属層と(Ga, Mn)As層の界面を介した近接効果で光励起才差運動を実験的に調べた結果、金属層厚の増加とともに有効磁場は減少し、磁化ダンピングは増加し、金属/(Ga, Mn)As間にAlAsスペーサー層を導入した試料で顕著しく抑制されることがわかった。これらは、金属/(Ga, Mn)As界面を介してスピン流が存在することを示している。

・Fe/(Ga, Mn)As構造における巨大磁化ダンピングに絞って研究を進めた。当初想定していた新現象の発見を含む非常に多くの知見を得ることができた。具体的には、両層の磁化の相対配置に依存して磁化の才差運動、すなわち、光生成角運動量の流れ(スピン流)の減衰が大きく変化する現象を世界に先駆け

て見出した。

(3) 金属系多層膜におけるスピン流と磁気緩和の光学的検出

・強磁性共鳴を用いて磁化の方向に対する横成分が主であるスピン流を生成し、非磁性体内を伝搬した後にもう一方の強磁性内で緩和する過程を調べた。共鳴線幅の解析から強磁性体内の横スピン侵入長を見積もることに成功し、CoFeB, Co, CoFe, FeNiに対してそれぞれ12nm, 1.7nm, 2.5nm, 3.7nmであることがわかった。

・ポンププローブ法を用いて、ピコセカンド領域のスピンダイナミクスを検出するための光学系を構築した。パーマロイおよびホイスラー合金を用いて装置の動作の検証を行った結果、ピコセカンド領域においてレーザー照射後の磁化の減少に伴うカー効果信号の急激な減少、及び磁化の回復に伴うスピンの才差運動の検出に成功した。

・ポンププローブ法でCo₂FexMn_{1-x}Siホイスラー合金薄膜の緩和過程を詳細に調べた。ダンピング定数は $x=0.2\sim 0.4$ 付近で0.006程度の低い値を得た。この結果は強磁性共鳴による結果と一致した。一方、psオーダーにおける減磁時間はいずれの試料においても0.2 ps程度であった。

・強磁性金属に対しパルスレーザー光を照射した際にサブピコ秒領域で発生する減磁現象について、ホイスラー合金を中心に調べた。

Mn-Ga合金並びにCo系垂直磁化膜の超高速減磁時間 τ は励起レーザー強度 P に対し増大する傾向を示し、微視的な理論と傾向が一致した。他方、AgやCr下地上に積層したCo₂MnSiホイスラー合金の τ は P に対し減少する傾向を示した。

(4) 光・電子スピン結合の理論

・第一原理に基づくバンド計算より P t におけるスピンホール効果を調べ、2重に縮退した d バンドからの共鳴的な寄与により、真性要因からなるスピンホール伝導率が極めて増大することを明らかにした。

・スピンと伝導電子が結合した2重交換模型において、光励起後のスピンの古典ダイナミックスと電子の量子ダイナミックスを数値的に調べた。その結果、スピンの運動の時空構造と電子の量子状態が自己組織化を起し、それとともに非断熱量子遷移が起きることが明らかになった。

・トポロジカル絶縁体におけるスピントロニクス機能の理論的開拓を行った。特に3次元トポロジカル絶縁体上に現れるディラック電子に着目し、磁性体、超伝導体などを接合したときに生じる巨大磁気抵抗、新奇な磁化ダイナミックス、マヨラナフェルミオントンネル現象などの理論を進展させた。

・Auで見出されている巨大スピンホール効果の起源について、前川グループと共同で研究を行った。第一原理計算と量子モンテカルロ法を組み合わせることで、FeとPtが不純物として入った時にどのような軌道依存近藤効果を示すかを調べ、両者がどのような条件下で巨大なスピンホール角を与えるかを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 45 件)

- ① M. Mochizuki, N. Furukawa, N. Nagaosa, Theory of Electromagnons in the Multiferroic Mn Perovskites: The Vital Role of Higher Harmonic Components of the Spiral Spin Order, Phys. Rev. Lett. 104, 177206(2010). (査読有)
- ② Long-Lived Ultrafast Spin Precession in Manganese Alloys Films with a Large Perpendicular Magnetic Anisotropy S. Mizukami, F. Wu, A. Sakuma, J. Walowski, D. Watanabe, T. Kubota, X. Zhang, H. Naganuma, M. Oogane, Y. Ando, and T. Miyazaki, Phys. Rev. Lett., 106, 117201 (2011). (査読有)
- ③ Y. Hashimoto, S. Kobayashi, and H. Munekata, "Photoinduced Precession of Magnetization in Ferromagnetic (Ga,Mn)As," Phys. Rev. Lett. 100, 067202 (2008). (査読有)

[学会発表] (計 33 件)

- ① Naoto Nagaosa, "Unconventional Superconductivity on a Topological Insulator," (Invited) 55thMMM Conference, Atlanta, USA, 2010.11.14-18
- ② Y. Ohno, Y. Kondo, M. Ono, S. Matsuzaka, K. Morita, H. Sanada, H. Ohno, "Phase Control of Coherent Nuclear Spin Dynamics Coupled with Optically-Injected Electron Spins in GaAs Quantum Wells," (INVITED) International Workshop on Spin Currents, IMR, Tohoku Univ. February 19, 2008.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~ono/tokutei/public_html/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大野 裕三 (OHNO YUZO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：00282012

(2) 研究分担者

宗片 比呂夫 (MUNEKATA HIROO)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60270922

安藤 康夫 (ANDO YASUO)
東北大学・工学研究科・教授
研究者番号：60250726

永長 直人 (NAGAOSA NAOTO)
東京大学・工学系研究科・教授
研究者番号：60164406