

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654035

研究課題名（和文） ライトシフト効果を用いたスピンの超高速制御

研究課題名（英文） Ultrafast manipulation of spins using the light-shift effect

研究代表者

河本 敏郎 (KOHMOTO TOSHIRO)

神戸大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：70192573

研究成果の概要（和文）：フェムト秒光パルスを利用したマイクロ波等を使わない純光学的な超高速磁気共鳴装置を製作した。結晶中の希土類イオンにおいて、磁気光学効果を利用した光誘起スピン歳差や光誘起スピンエコーの観測を行い、スピン（原子のもつ微小な磁石）を光で自由に操るスピンの超高速コヒーレント光制御が可能であることを示した。また、ライトシフト効果を利用した仮想パルス磁場の発生による任意軸周りのスピン回転とその周波数・位相制御の実現可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：We developed an all-optical ultrafast magnetic-resonance method with using femtosecond optical pulses but without using microwave. We observed optically induced spin precession and spin echoes and demonstrated the optical manipulation of spin coherence in rare-earth ions in crystals. We also generated the fictitious magnetic field using the light-shift effect and demonstrated the phase control of spin precession and the pure spin rotation about an arbitrary axis.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 2,200,000 | 0 | 2,200,000 |
| 2011年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,800,000 | 180,000 | 2,980,000 |

研究分野：レーザー分光学，磁気共鳴

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：スピン制御，レーザー

1. 研究開始当初の背景

(1) 磁化の光学的生成と検出は、高速・広帯域・高感度の磁気測定を可能にする有用な手段として知られているが、スピン系を量子コンピュータに応用する可能性が示唆され、近年特に、スピン系を光で超高速に制御しようとする機運が世界中で高まっている。

(2) 磁性半導体などで行われている光制御

は、光吸収によって電子状態が変化し、純粋なスピン制御とは言えず、また緩和時間の短い室温では実用的応用は困難である。核スピン系においてNMR法によるスピン制御が実現されているが、制御速度の点で実用的価値は低い。実用化に向けた量子情報処理技術の新たな発展のためには、純粋な超高速スピン制御の実現が強く望まれている。

2. 研究の目的

(1) 可視領域の吸収帯が大きな磁気円偏光二色性をもつ結晶中の希土類イオンにおいて、共鳴円偏光のパルス励起と円偏光二色性を利用して基底状態のスピン偏極(磁化)を生成し、横磁場中の超高速コヒーレント磁気歳差運動を時間領域で観測する。

また、不均一広がり磁化が消失した後、制御光を入射させ、スピンを180度回転させる位相反転操作を行い、一度失われたスピニコヒーレンスが回復できることを示す。スピンの位相を光で制御するこの光誘起スピネコー法は、不均一広がり大きい半導体量子ドットにおけるコヒーレンス制御でも興味をもたれ、スピンを使った量子コンピュータに不可欠である。

(2) 非共鳴の円偏光は、特定のゼーマン準位に対してのみライトシフトと呼ばれるエネルギーシフトを与える。これは光のビーム方向に仮想的な磁場が加わったと見なすことができ、光が入射したときだけの超高速磁場スイッチが可能になる。つまり、非共鳴円偏光の制御パルスによって仮想パルス磁場を発生させ、任意軸周りにスピンを超高速回転させることができる。回転軸は光の入射方向、回転角は光強度で調整できる。

気体原子あるいは固体中のスピン系において、磁気光学効果を利用して磁化を生成する。ライトシフト効果を利用した仮想パルス磁場の発生による任意軸周りのスピン回転とスピン歳差の周波数・位相制御を実現し、超高速かつ幾何学的に光でスピンを自由に操ることが可能であることを示す。

3. 研究の方法

(1) フェムト秒パルス励起超高速磁気共鳴法によるスピンのコヒーレント光制御

2波長同時発振フェムト秒レーザーとポンプ-プローブ偏光分光法を用いたフェムト秒パルス励起超高速磁気共鳴システムを製作し、スピンの光学的生成、制御、および検出の実験を行った。

① 高精度スピン状態検出器の製作

電子スピンの状態を偏光の変化として光学的に検出する高精度・高感度な検出器ポラリメーターを製作した。プローブ光を偏光ビームスプリッターで分けて2つのフォトダイオードで受け、それらの光電流の差をとることにより、 $1\mu\text{rad}$ 以下のファラデー回転角が

検出可能である。磁気円偏光二色性を利用する場合は、 $1/4$ 波長板を通し偏光面の回転に変換してファラデー回転と同様にして検出できる。ポラリメーターにより電子スピンの磁化の大きさと向きに関する情報が得られる。

② フェムト秒スピン制御検出システムの製作

現有のパルスレーザーを利用した2波長可変ポンプ-プローブ光源を構築し、光学ディレイラインを組んでプローブ光を遅延させて、時間分解能100フェムト秒のスピン制御検出システムを製作した。ポンプ光の偏光を光弾性変調器でスイッチし、ロックインアンプを用いた高感度な検出を可能にした。

(2) テラヘルツ時間領域分光法による反強磁性共鳴の観測

フェムト秒レーザーと非線形光学結晶(ZnTe)中の光整流によってテラヘルツ電磁波を発生させ、電気光学サンプリング法によってテラヘルツ電場を検出するテラヘルツ時間領域分光(terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS)システムを製作し、反強磁性体マグノンのコヒーレント振動を観測した。

① テラヘルツ光源の製作

フェムト秒チタンサファイア再生増幅器の出力を2つに分けてポンプ光とプローブ光とした。ポンプ光を半導体結晶ZnTeの(110)面に照射し、帯域0.1~2.5THzのテラヘルツ波を発生させた。

② テラヘルツ時間領域分光システムの製作

軸外し放物面鏡とシリコン板を使った光学系と光学ディレイラインを組んだ。テラヘルツ波の検出には、遅延させたプローブ光をもう1つのZnTe結晶に照射して、結晶中の光整流効果を利用した。ポンプ光を光チョッパーでオンオフし、ロックインアンプを用いた高感度な検出を行った。時間領域の波形をフーリエ変換することによって周波数領域のスペクトルが得られる。

4. 研究成果

(1) スピンのコヒーレント光制御

純光学的にスピンをコヒーレントに制御する研究を行った。スピンをコヒーレントに光制御するためには、磁化の光学的生成、光学的検出、位相制御、および任意軸周りの回転の実現が必要である。

① アルカリ原子気体におけるスピンのコヒーレント光制御

ルビジウム原子において、 D_1 線の磁気円偏光二色性・複屈折を利用した共鳴励起による光誘起スピン歳差および光誘起スピンエコーの観測を行った。これにより、磁化の光学的生成と検出、及び位相制御の実現が確認できた。また、ライトシフト効果を用いて仮想磁場を発生させ、非共鳴励起による光誘起スピン歳差および光誘起スピンエコーの観測を行った。スピンオ差周波数の増減とスピン回転の実現を確認し、才差位相の制御と任意軸周りのスピン回転の実現の可能性を示した。応用上は固体試料で実現することが重要であり、その実現は今後の課題である。

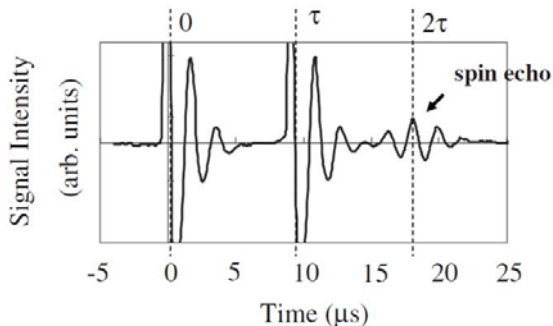


図 1. ルビジウム原子における光誘起スピンエコー信号。

② 結晶中の希土類イオンにおけるスピンのコヒーレント光制御

可視領域の吸収帯が大きな磁気円偏光二色性をもつことが知られている CaF_2 および SrF_2 結晶中の Tm^{2+} イオンの405nm近傍の吸収線において、共鳴円偏光のパルス励起と円偏光二色性を利用して基底状態のスピン偏極(磁化)を生成し、横磁場中のスピンのラーモア歳差運動を時間領域で観測した。また、不均一広がりで磁化が消失した後、制御光を入射させてスピンを180度回転させる位相反転操作を行い、一度失われたスピンコヒーレンスが回復できることを示した。これらは、パルス光の共鳴吸収による効果である。

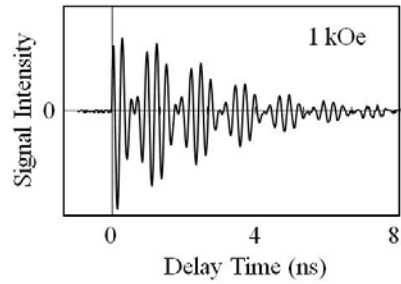


図2. CaF_2 結晶中 Tm^{2+} イオンにおける光誘起スピン歳差運動(1kOe)。2つの周波数成分のギガヘルツ量子ビート信号。

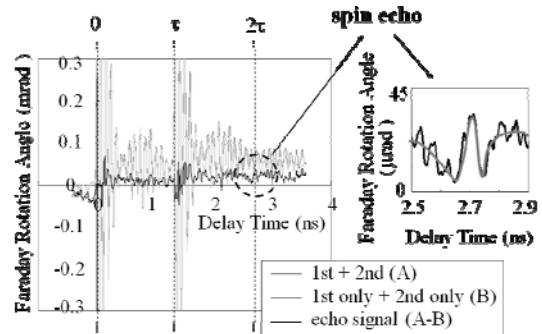


図3. SrF_2 結晶中 Tm^{2+} イオンにおける光誘起スピンエコー信号。

同じ試料で、非共鳴円偏光の制御パルスによって仮想パルス磁場を発生させ、スピンのコヒーレントな位相制御を試みたが、残念ながらライトシフトの効果によるスピンの光制御は確認できなかった。

③ 反強磁性マグノンの光励起とスピン運動の観測

反強磁性体酸化ニッケル(NiO)において、スピン波の振動(マグノン振動)の生成と検出の実験を行った。円偏光のポンプ光で生成した磁化の運動をプローブの透過光のファラデー回転を利用して、コヒーレントマグノン信号として観測した。低温において1.1THz付近と1.3THz付近の高振動数側の2本のモードと0.15THz付近の低振動数側のモードが観測された。この3本のピークを6K~500Kの温度領域において測定し、ネール温度に向けたソフト化の振る舞いを確認した。

本研究では、高感度で高精度のデータが得られ、他グループの実験では見えてないモードも観測することができた。

(2) テラヘルツ時間領域分光法による反強磁性共鳴の観測

反強磁性体である酸化マンガン(MnO)において、テラヘルツ時間領域分光法を用いた反強磁性マグノンの減衰振動波形の観測を行っ

た。低温では 0.8THz 付近に反強磁性共鳴周波数が存在することが確認できた。共鳴周波数の温度依存性の測定から、共鳴周波数の温度上昇とともにネール温度(116K)に向かってソフト化していくことが確認できた。スピン 5/2 に対する分子場近似を用いた理論によって、観測された共鳴周波数の温度変化を説明できることがわかった。また、ネール温度近傍における線幅の臨界現象やテヘルツ領域の屈折率の異常などが明らかになった。

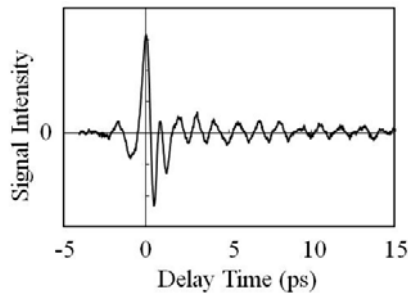


図 4. 反強磁性体 MnO を透過したテラヘルツ電磁波に現れるマグノン振動信号(4.4K)。

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 5 件)

- ① T. Moriyasu, T. Yamauchi, and T. Kohmoto, Optically Induced Spin Echoes in a Tm^{2+} Doped Crystal, Proc. 5th Int. Conf. on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications, 査読有 (June 2012, Nara) 1P-28.
- ② 若林 傑, 垣田賢一, 守安毅, 河本敏郎, MnO における THz-TDS を用いた反強磁性共鳴吸収の観測, 光物性研究会論文集, 査読無, 22 (2011) 237-240.
- ③ 秦豪均, 高原真幸, 若林傑, 山内崇弘, 守安毅, 河本敏郎, 反強磁性体 NiO におけるスピンと格子の超高速ダイナミクス, 光物性研究会論文集, 査読無, 21 (2010) 118-121.
- ④ 若林傑, 垣田賢一, 守安毅, 河本敏郎, THz-TDS を用いた MnO における反強磁性共鳴の観測, 光物性研究会論文集, 査読無, 21 (2010) 22-25.
- ⑤ T. Kohmoto, H. Jinn, S. Wakabayashi, T. Yamauchi, and T. Moriyasu, Observation of coherent magnons in an antiferromagnet nickel oxide, Proc. Int. Conf. on Quantum Electronics and

Laser Science, 査読有 (San Jose, May 2010) JThE107.

[学会発表] (計 11 件) (総計 25 件)

- ① T. Moriyasu, T. Yamauchi, and T. Kohmoto, Optically Induced Spin Echoes in a Tm^{2+} Doped Crystal, 5th Int. Conf. on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications, June 2012, Nara.
- ② 若林 傑, 垣田賢一, 守安毅, 河本敏郎, MnO における THz-TDS を用いた反強磁性共鳴吸収の観測, 第 22 回光物性研究会, 2011 年 12 月, 熊本大学
- ③ 若林傑, 守安毅, 河本敏郎, 酸化マンガンにおける THz-TDS を用いた反強磁性共鳴吸収の観測, 平成 23 年度日本分光学会年次講演会, 2011 年 11 月, 理化学研究所横浜
- ④ 若林傑, 垣田賢一, 守安毅, 河本敏郎, THz-TDS を用いた MnO におけるマグノンの観測, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月, 富山大学
- ⑤ 秦豪均, 高原真幸, 若林傑, 山内崇弘, 守安毅, 河本敏郎, 反強磁性体 NiO におけるスピンと格子の超高速ダイナミクス, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月, 新潟大学
- ⑥ 若林傑, 垣田賢一, 守安毅, 河本敏郎, THz-TDS を用いた MnO における反強磁性共鳴の観測, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月, 新潟大学
- ⑦ 秦豪均, 高原真幸, 若林傑, 山内崇弘, 守安毅, 河本敏郎, 反強磁性体 NiO におけるスピンと格子の超高速ダイナミクス, 第 21 回光物性研究会, 2010 年 12 月, 大阪市立大学
- ⑧ 若林傑, 垣田賢一, 守安毅, 河本敏郎, THz-TDS を用いた MnO における反強磁性共鳴の観測, 第 21 回光物性研究会, 2010 年 12 月, 大阪市立大学
- ⑨ 守安毅, 河本敏郎, ルビジウム原子におけるスピンの光制御と光誘起スピンエコー, 物性研短期研究会「外部場の時間操作と実時間物理現象」, 2010年6月, 東京大学
- ⑩ 秦豪均, 河本敏郎, 反強磁性体酸化ニッケルにおけるコヒーレントマグノンの観測, 物性研短期研究会「外部場の時間操作と実時間物理現象」, 2010年6月, 東京大学
- ⑪ T. Kohmoto, H. Jinn, S. Wakabayashi, T. Yamauchi, and T. Moriyasu, Observation

of coherent magnons in an
antiferromagnet nickel oxide, Int.
Conf. on Quantum Electronics and Laser
Science, May 2010, San Jose.

[その他]

ホームページ等

[http://www.phys.sci.kobe-u.ac.jp/facult
y/kohmoto.html](http://www.phys.sci.kobe-u.ac.jp/faculty/kohmoto.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河本 敏郎 (KOHMOTO TOSHIRO)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号 : 70192573

(2) 研究協力者

守安 毅 (MORIYASU TAKESHI)

神戸大学・理学研究科・学術研究員