

令和 2 年 5 月 13 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18735

研究課題名（和文）誘導ラマン反強磁性共鳴を用いたマルチポート光非相反性素子

研究課題名（英文）Multi-port non-reciprocity optical device using Raman-induced antiferromagnetic resonance

研究代表者

大道 英二 (Eiji, Ohmichi)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00323634

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、反強磁性体を微小光共振器とするウィスパリングギャラリーモード（WGM）の観測を目指して測定系を構築した。微小共振器と光学系の結合方式は位相整合の観点からプリズムを用いた結合方式を採用した。微小球をプリズムに近接した状態で、レーザー光をプリズム内部へと導光し、その透過光強度を測定した。波長掃引は、レーザーの素子温度を精密に制御することにより行った。微小ガラス球を用いて測定系のテストを行い、ウィスパリングギャラリーモードによるものと思われる信号を観測することができた。また、二色のレーザー光をプリズム内部に導光し、微小共振器内に差周波数であるテラヘルツ波の発生を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した技術は、将来的にマルチポート光非相反性デバイスへとつながる成果として位置づけることができる。このデバイスは制御光の入力ポートによって、入出力光の透過特性を選択的に制御することが可能になる。また、反強磁性体を用いることで反強磁性共鳴の周波数をチューニングできることから、入出力光の動作周波数をチューナブルに変えることができる。このように外部からの制御光で透過特性を選択できるような光非相反性素子はこれまでになく、将来的には新規デバイスへの応用が期待される。その意味で、本研究は多彩な内部自由度と高速応答性を両立する反強磁性体光デバイスの新しい可能性を開拓するものである。

研究成果の概要（英文）： In this study, a whispering gallery mode resonator using antiferromagnet as a micro optical cavity was constructed. Coupling between a micro optical resonator and an optical system is made by a prism from the viewpoint of phase matching. Keeping a micro sphere close to the prism, laser light was fed into the prism interior, and the transmitted intensity was monitored. Wave-length tuning was done by thermal modulation of the laser device. A micro glass sphere was used to test the performance of the system, and signals, possibly assigned to whispering gallery mode, were observed. Two-color laser light was introduced to the prism interior to generate terahertz components within a micro optical cavity.

研究分野：固体物理学

キーワード：ウィスパリングギャラリーモード テラヘルツ波 反強磁性共鳴

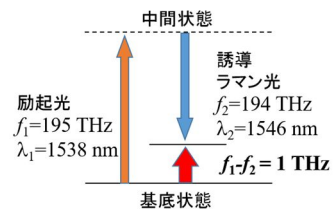
1. 研究開始当初の背景

近年、スピントロニクス分野では光を用いて電子スピンの自由度を制御する研究が盛んにおこなわれている。例えば、逆ファラデー効果やパルス光を用いたコヒーレントマグノン制御などが挙げられる。これらの研究ではほとんどの場合において、対象となる電子スピンは強磁性状態の電子スピンを対象としている。これは、強磁性体が巨視的な磁化を持っているため大きな光応答が期待されることやマグノンの周波数が数 GHz 帯にあるため実験的なアプローチが容易であることが大きな理由である。一方、もう一つのスピン秩序状態である反強磁性体に関して言えば、巨視的な光応答がなく、また、マグノンの周波数がテラヘルツ (THz) 領域になるため、これまでほとんど報告例がない。しかし、反強磁性マグノンには高い周波数による高速応答性という大きな利点があり、新しいスピントロニクスデバイスとしての可能性を秘めている。

2. 研究の目的

反強磁性マグノンでは強磁性マグノンに比べ 2-3 桁程度高い周波数を持っているため超高速応答といったデバイス上の大きな魅力がある。また、すべてのスピンの向きが同じ方向を向いた強磁性状態に比べ、副格子を持つ反強磁性状態には多様なスピン状態が可能であることから、新しいスピントロニクスデバイスとしての可能性がある。

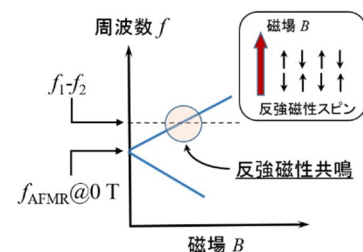
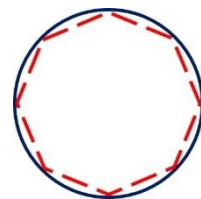
そこで本研究では、反強磁性スピンの光制御を目的として、連続光を用いた反強磁性共鳴の観測ならびにスピン状態制御を行う。この方法のポイントは、円盤状の反強磁性体中に 2 波長の赤外レーザー光を閉じ込め、誘導ラマン過程により差周波数波として高強度 THz 波を反強磁性体内に発生させる点である。微小光共振器は極めて高い Q 値 ($\sim 10^8$) が実現できることから、一般には高い出力を得ることが難しい THz 領域での誘導ラマン過程を可能にする。さらに光の伝搬方向の違いによる透過特性の違いから (光非相反性) 新しい反強磁性体光デバイスの可能性を開拓する。



3. 研究の方法

反強磁性スピン状態の磁気励起であるマグノンの周波数は強磁性状態のマグノンとは異なり、ゼロ磁場で数百 GHz 以上の周波数領域にあることが知られている。例えば、典型的な反強磁性体である NiO ($T_N=525$ K) の場合、波数 $k=0$ の状態にある反強磁性マグノンの周波数は約 1.07 THz となっている。そのため、反強磁性マグノンを光で制御しようとする、高強度の THz パルス光が必要になる。しかし、THz 帯では高強度かつ制御性の高い光源がなく、これまで反強磁性スピンの光制御はほとんど行われていない。

本研究ではこの問題を解決するため、微小光共振器と誘導ラマン過程を用いた新しい THz 帯反強磁性共鳴の観測手法を提案する。右図に示すように、円形の微小光共振器ではウィスパリングギャラリモード (WGM) と呼ばれる共振モードが存在する。このモードでは、光が円盤内部を円周に沿って全反射を繰り返しながら進行し、極めて高い Q 値 ($\sim 10^8$) を実現できる点が特徴である。本研究では通信波長帯 (~ 1550 nm) の 2 つの波長の光をフォトプラで結合し、プリズムを用いて微小光共振器と結合する。この時、それぞれの光の周波数を微調節することで、同じファイバー内を伝搬する 2 つの光を同時に微小光共振器内で WGM 共鳴状態にすることができる。したがって、微小光共振器を NiO (\sim 直径 0.5 mm) のような反強磁性体で作製し、共振器内部に 2 波長の光を同時に閉じ込めることができれば、誘導ラマン過程により 2 つの光のエネルギー差にあたる THz 帯のエネルギーを持つ反強磁性マグノンの吸収が観測できる。一般に誘導ラマン過程は遷移確率が低くパルス光を必要とするが、本課題では高 Q 値の微小光共振器を用いることで連続光に対しても誘導ラマン過程を可能にする点が独自性の高い点に挙げられる。



レーザー光の周波数を連続的に掃引すると、ウィスパリングギャラリモード共振が生じる周波数において透過光強度が減少する。誘導ラマン過程では、励起光側の強度が減少し、誘導ラマン光の強度が増大することを用いて反強磁性共鳴の観測を行う。この時、微小光共振器内部で同時に WGM 共鳴している 2 つの周波数 (f_1, f_2) の差周波数 ($f_1 - f_2$) が反強磁性マグノンの周波数 (f_{AFMR}) と一致している必要があるが、 f_1, f_2 の値は微小光共振器の形状で決まるため、一般に両者は一致しない。そこで、反強磁性共鳴周波数 f_{AFMR} が磁場に

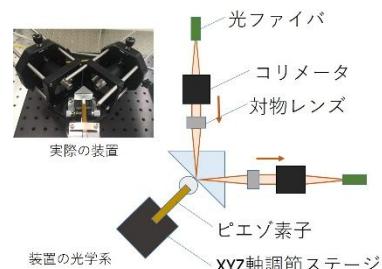
よって変化することを用いる。例えば、NiO の場合、磁化容易軸方向に磁場を印加すると、ゼロ磁場では縮退している 2 つのモードが分裂し、それぞれ低周波数側と高周波数側へとシフトする。そのため、あらかじめ適切な f_1 、 f_2 の値を設定しておけば、磁場掃引により $f_1 - f_2 = f_{AFMR}$ の条件を満たし、反強磁性共鳴を観測することができる。

4 . 研究成果

本研究では、反強磁性体を微小光共振器とする新しいウィスパリングギャラリーモードの観測用測定系を構築した。ウィスパリングギャラリーモードの観測では、エバネッセント波で光源と結合した微小光共振器に対し、入射光の周波数を掃引し、その透過光強度の観測を行う必要がある。また、2 波長の光を反強磁性体でできた微小光共振器に導入し、その差周波数での磁気的な励起を実現する必要がある。そのため、通信波長帯 2 色波長可変レーザーについて十分な光励起強度を実現するため、光源と微小光共振器の間にはエルビウムドープファイバー増幅器 (EDFA) を挿入し、20 dB 以上の入射光強度を実現した。以上の測定系、光学系を除震架台上に設置し、PC を介して外部から制御可能な環境を整えた。微小光共振器についても、入手先、反強磁性体材料の諸物性について検討を行い NiO が有望であることがわかった。

微小共振器と光学系の結合方式にはいくつかの方式があるが、位相整合の観点からプリズムを用いた結合が望ましいことが分かった。この方式ではプリズム内部端面で入射光を全反射させ、プリズムの外側にエバネッセント波を発生させる。光源である 1550 nm 帯ファイバー結合 DFB レーザーから出た光をコリメータにより集光し、プリズム内部へと入射した。プリズム内部端面で全反射したレーザー光を再びコリメータによりファイバーへ導光することで透過光強度の測定を行った。光学系全体は、微妙な位置調整が可能なステージを組み合わせ構成した。

本研究では DFB レーザーの素子温度を精密に制御することにより周波数掃引を可能にした。また、プリズム端面にガラスでできた微小球を近づけていくことでエバネッセント波とガラス球の結合を調節した。実際に、ガラス球の距離をプリズムに近づけていくと、ある特定の位置においてウィスパリングギャラリーモード共振によるものと思われる信号を観測することができた。また、二色のレーザー光をプリズム内部に導光し、微小共振器内に差周波数であるテラヘルツ波の発生を試みた。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----