

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14589

研究課題名（和文）円盤状強磁性薄膜を用いた高効率な光 - マイクロ波変換器の創出

研究課題名（英文）Development of highly efficient optical-microwave converters using disk-shaped ferromagnetic thin films

研究代表者

久富 隆佑 (Hisatomi, Ryusuke)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：80870435

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000 円

研究成果の概要（和文）：高効率な光 - マイクロ波波長変換器は、全く異なる周波数（エネルギー）を持つ光子間での量子情報のやりとりを可能にする。特に、複数の希釈冷凍機内に設置されている超伝導量子ビット間を繋ぐことを可能にする重要な物理系であり、それらを用いた量子インターネットの構築が期待されている。本研究では、我々がこれまで世界に先駆けて原理実証を行ってきた強磁性マグノンを用いて、それを保持する強磁性体の構造を円盤状薄膜にすることにより、高効率な光 - マイクロ波波長変換器の創出を目指した。本研究の結果、高効率化に必須である円盤状強磁性単結晶の作製技術を確立し、試料中のマグノン及び光学特性の評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年急速に進展している超伝導量子ビットを用いた量子計算機開発は、全て希釈冷凍機内約10 mKの環境下で実施されている。それはマイクロ波の周波数帯を持つ超伝導量子ビットの量子状態が熱ノイズで乱されることを防ぐための措置である。一方、光周波数の光子のエネルギーは、マイクロ波光子に比べ5桁大きく、常温300 Kの熱ノイズ下においても全く乱されないという特長を持つ。加えて、光ファイバーの伝搬損失が非常に小さいことから、長距離情報伝送も可能となる。そのため、マイクロ波 - 光間での高効率波長変換器の開発は、異なる希釈冷凍機間での量子情報のやりとりを可能にし、量子インターネットの構築に寄与する。

研究成果の概要（英文）：Highly efficient optical-microwave wavelength converters enable the exchange of quantum information between photons with completely different frequencies (energies). In particular, it is an essential physical system that makes it possible to connect superconducting qubits installed in multiple dilution refrigerators, and it is expected that the quantum Internet will be constructed using them. In this study, we aim to create a highly efficient optical-microwave wavelength converter using ferromagnetic magnons, which we have pioneered and demonstrated in principle, and a disk-shaped thin film structure of the ferromagnetic material that holds them. As a result of this study, we established a fabrication technique for disk-shaped ferromagnetic single crystals. We evaluated the magnon and optical properties in the sample.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：強磁性マグノン 量子光学 波長変換器

1. 研究開始当初の背景

近年急速に進展している超伝導量子ビットを用いた量子計算機開発は、全て希釈冷凍機内約 10 mK の環境下で実施されている。それはマイクロ波の周波数帯を持つ超伝導量子ビットの量子状態が熱ノイズで乱されることを防ぐための措置である。一方、光周波数の光子のエネルギーは、マイクロ波光子に比べ 5 桁大きく、常温 300 K の熱ノイズ下においても全く乱されないという特長を持つ。加えて、光ファイバーの伝搬損失が非常に小さいことから、長距離情報伝送も可能となる。そのため、マイクロ波 - 光間での高効率波長変換器の実現は、異なる希釈冷凍機間での量子情報のやりとりを可能にし、量子インターネットの構築に向け重要となる[1]。

実際には、光 - マイクロ波間の波長変換は物質中の素励起を用いることにより実現可能である。その候補として、強磁性マグノンやフォノンが注目されているが、素励起と電磁波間の結合強度が弱いため、未だ実現には至っていない。我々がここ数年間で開拓してきた強磁性マグノンを用いたアプローチは、強磁性マグノンの共鳴周波数を外部磁場により制御できるため、フォノンに比べ自由度が高く注目されている[2,3]。しかし同時に、市販のミリメートルスケールの球状単結晶試料を用いて行ってきたこれまでの研究では、その試料構造に起因するスピン数の多さにより強磁性マグノン - 光間の結合強度が制限され、変換効率のボトルネックとなっていることも明らかとなっていた。

2. 研究の目的

その制限を打破するため、波長変換器に見合った構造である円盤状強磁性薄膜を創出し、その試料中のマグノン及び光学特性の評価を目指した。

3. 研究の方法

・円盤状強磁性単結晶薄膜作製とレーザー顕微鏡観察

本研究で開発を目指す、光 - マイクロ波波長変換器の概念図ならびに実際の配置を図 1(a), (b) に示す。光の波長は通信波長帯の 1550 nm の光を選定し、強磁性体は、マグノンの寿命が長く、通信波長帯の光に対して透明であるイットリウム鉄ガーネット (YIG) を選定した。基板はガーネット構造を持つ強磁性体用の基板として代表的な、ガドリニウムガリウムガーネット (GGG) 基板を用いる。その基板の上に YIG を RF マグネトロンスパッタリング装置を用いて成膜し、900 °C で 8 時間アニールすることにより単結晶化させる。さらにフォトリソグラフィとアルゴンイオンミリング装置を用いてドライエッチング加工を施すことにより、直径約 100 μm、厚さ約 1 μm の円盤状強磁性単結晶薄膜を作製する。本段階では顕微鏡を用いてサンプル形状を評価し、薄膜加工工程の最適化を行う。

・強磁性共鳴測定

また、本研究では、強磁性薄膜に面直方向に静磁場を印可し、強磁性スピン集団を飽和させることで発現する均一歳差運動モード (Kittel モード) を用いて光 - マイクロ波変換を行うことを想定している。そこで、作製した YIG 薄膜中の Kittel モードの特性を評価するため、薄膜面内方向に交流振動磁場を加え、強磁性共鳴現象の観測を行う。その結果を用いて Kittel モードの共鳴周波数・寿命・マイクロ波との結合強度 (図 1(a) の左側) の評価を行う。

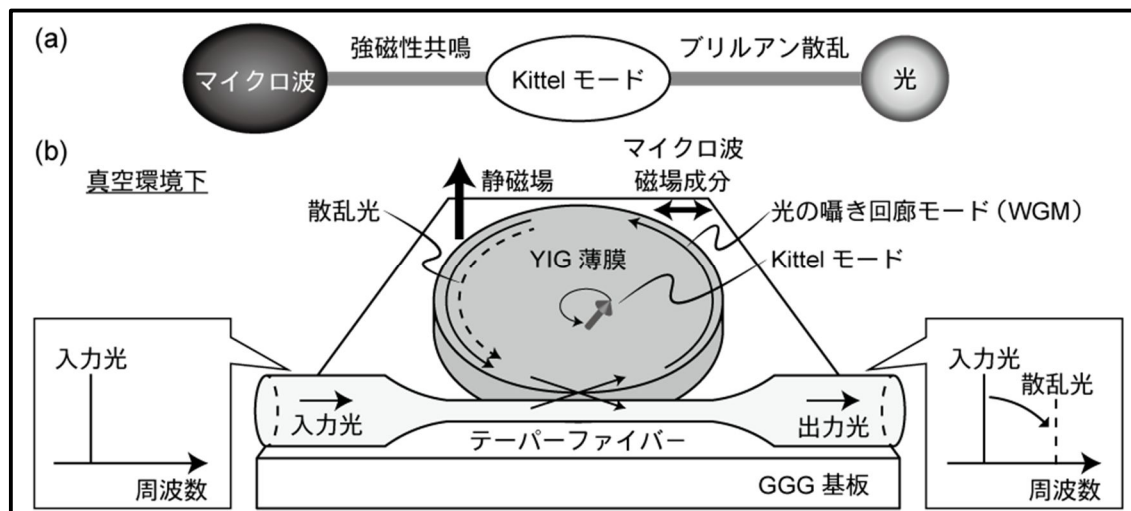


図 1 (a)光 - マイクロ波変換の概念図、(b)実際の変換器の配置

・コヒーレントなマグノンによって散乱されたマグノン誘起ブリルアン散乱の定量的観測

本研究では、円盤状強磁性薄膜側面に局在する光の囁き回廊モード(Whispering gallery mode: WGM)とKittelモードの相互作用を用いて光-マイクロ波変換を行う。具体的には、作製した円盤状薄膜にテーパファイバーを近づけることにより、通信波長帯の光(波長1550 nm)をWGMに導入する(図1(b))。WGM中の入力光は、マイクロ波によって強制励起されたKittelモードと相互作用することによりブリルアン散乱され、異なる周波数を持つWGMへと散乱される。その後再びテーパファイバーと結合し、出力光として伝搬していく。その出力光を我々が確立した光ヘテロダイン測定手法[2,3]を用いて定量的に観測することにより、マイクロ波光子と散乱光子間の変換効率の評価を行う。また、Kittelモードと光の結合強度(図1(a)の右側)の評価も行う。ここで、テーパファイバーが大気中の埃や水蒸気により早期に劣化してしまうことを考慮し、実験は円盤状薄膜とテーパファイバーを真空チャンバー内に設置し行う。

#### 4. 研究成果

実際に作製した円盤状強磁性薄膜の顕微鏡観察結果を図2(a)中に示す。YIG部分は直径200  $\mu\text{m}$ 、膜厚900 nmであり、円盤の周りに見える構造は交流振動磁場を発生させるための金属製のマイクロ波アンテナである。紙面面直方向に均一な静磁場0.34 Tを印可し、ネットワークアナライザを用いた透過測定によって観測した強磁性共鳴の結果を図2(b)に示す。共鳴周波数は静磁場強度から予想される値と概ね一致しており、Kittelモードの存在を確認することができた。今後は、Kittelモードとマイクロ波間の結合強度を最適化するため、マイクロ波アンテナの代わりにマイクロ波誘電体共振器の導入を検討している。

作製した円盤状強磁性薄膜側面に、図2(c)に示すようにテーパファイバーを近づけ、テーパファイバーを透過してくる光強度の周波数依存性を測定することによりWGMの存在を確認した。YIG部分は直径120  $\mu\text{m}$ 、膜厚900 nmである。実験結果を図2(d)に示す。波長1550 nm帯全域において、透過率が1より減少していることが見て取れる。この結果は、テーパファイバーを伝搬する光がYIG薄膜中のWGMと結合していることを示唆する。また、ディップの間隔2 nmは、試料の円周の長さから予想される自由スペクトル領域(FSR)と矛盾がなく、WGMの存在を裏付けている。今後は、WGMのQ値を向上させるため、熱リン酸を用いたウェットエッチングを施し円盤側面をさらに滑らかにする工程の最適化も行っていく。

以上のように、円盤状YIG薄膜の創出、そしてその試料中のマグノン及び光学特性の評価に成功した。今後はこの二年間で蓄積した知見をもとに、マグノン誘起ブリルアン散乱の観測、そして散乱効率の定量評価を目指す。

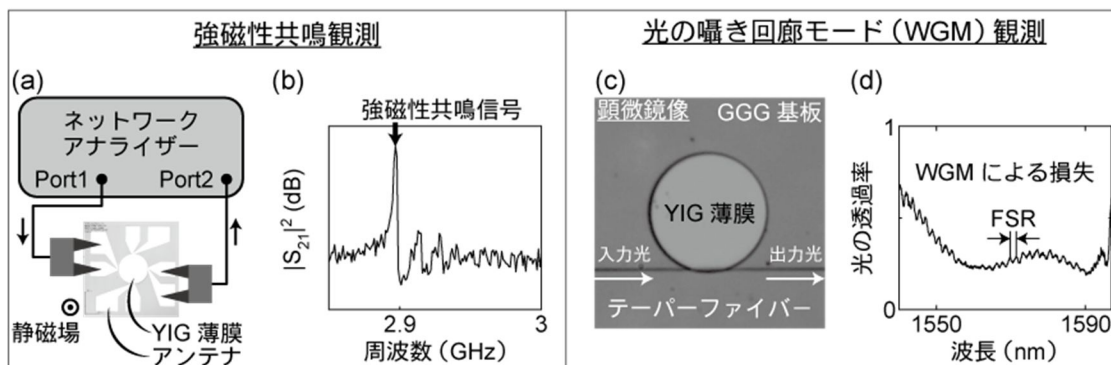


図 2 円盤状 YIG 薄膜を用いた強磁性共鳴測定 (a)測定系の概念図と (b)測定結果。円盤状 YIG 薄膜中の WGM を観測するための (c)光学測定系と (d)測定結果。

#### < 引用文献 >

- [1] H. J. Kimble, Nature **453**, 1023 (2008).
- [2] R. Hisatomi et al., Phys. Rev. B **93**, 174427 (2016).
- [3] A. Osada, R. Hisatomi et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 223601 (2016).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 H. Komiyama, R. Hisatomi, Y. Shiota, T. Moriyama, and T. Ono
2. 発表標題 Magnetic Measurements on Disk-Shaped Ferromagnetic Insulators Towards Enhancement of Photon-Magnon Coupling
3. 学会等名 ICMFS-2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Komiyama, R. Hisatomi, Y. Shiota, T. Moriyama, and T. Ono
2. 発表標題 Magnetic Measurements on Disk-Shaped Ferromagnetic Insulators Towards Enhancement of Photon-Magnon Coupling
3. 学会等名 Magnonics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小見山遥、久富隆佑、塩田陽一、森山貴広、小野輝男
2. 発表標題 光フォトン - マグノン間結合の増強に向けた円盤状強磁性絶縁体の強磁性共鳴観測
3. 学会等名 QEDサマースクール
4. 発表年 2022年

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------