

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24656236

研究課題名(和文) マグノン系ボーズ凝縮を用いたマイクロ波デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of microwave device using Bose-Einstein condensation at magnon system

研究代表者

味野 道信 (Mino, Michinobu)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：30222326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：室温でマグノン系にボーズアインシュタイン凝縮が発生する事が光散乱実験により報告されている。この非線形緩和過程を利用する新しいマイクロ波デバイスを開発する目的で、パラメトリック励起された強磁性マグノンからのマイクロ波放射を実験的に調査した。平行励起とスール1次不安定化過程による垂直励起により、強磁性体イットリウム・鉄・ガーネット(YIG)のマグノン励起を行った。大電力励起下では、多くの周波数成分を持つ放射が同時に観測される。放射スペクトルは静磁場、つまり静磁モードに強く依存していることが分かった。また、放射の時系列データからも4マグノン散乱過程が放射機構に関与している事が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Bose Einstein condensation of a magnon system driven by microwave at room temperature has been reported with using the Brillouin light scattering technique. Another effective experiment about a nonequilibrium magnon system is to study microwave radiations from a parametrically excited sample. As a viewpoint of developing new nonlinear microwave devices, microwave radiation from parametrically excited magnons was studied experimentally. Parallel pumping excitations and transverse pumping at the first-order Suhl instability were carried out on a ferromagnetic yttrium iron garnet (YIG). A high sensitivity microwave circuit was used to detect spectra of radiation microwave. At high pumping power, multi-frequency components are observed simultaneously. The spectra depend on static field, or magnetostatic modes. These spectra and the time series of microwave radiation show that a four-magnon scattering is important in a nonlinear relaxation process.

研究分野：物性実験

キーワード：マグノン 非線形緩和 マイクロ波放射 ボーズ凝縮

1. 研究開始当初の背景

大電力マイクロ波によって非線形励起された強磁性体中のマグノン系では、マグノン間相互作用によりマグノンバンド底に位置する最低振動数モード付近にエネルギーが蓄積される。このことは、試料からのマイクロ波放射スペクトルを調べることで確認できる。入射とは異なる周波数のマイクロ波が放射されることより、周波数変換や2波以上の混合などマイクロ波デバイスとしての応用が考えられている。最近、光散乱実験の研究からこの最低周波数モードの増加にポーズアインシュタイン凝縮が関連することが指摘された。この巨視的な量子効果の特性解明とデバイスへの応用が期待されている。

2. 研究の目的

マグノン系でのポーズ凝縮現象について、その特性を詳しく調べ、マクロな現象としてマイクロ波デバイスにどのように活用できるかを調査する。特に、ポーズ凝縮を発生させるためのマグノン系を効率よく励起するための条件、コヒーレントな最低振動数モードからのマイクロ波放射特性に重点を置いた研究を進める。

3. 研究の方法

現在観測されているポーズアインシュタイン凝縮に関連する最低周波数モードからのマイクロ波放射はきわめて弱い。これは、今までの研究が薄膜を中心に進められていることにも起因している。そのため、球形や円柱形などのバルク試料を用いた実験により、放射マイクロ波の発生機構や特性を明らかにする。今までの研究では、マイクロ波放射に間接的に静磁モードが寄与することが推測されている。この静磁モードが試料形状で変化することに着目し、放射マイクロ波が強くなる条件を明らかにすることを最初の目標とする。次に、周波数の異なるマイクロ波で励起を行

い、ポーズ凝縮を利用した周波数の可変や電力の合成に関して研究を進める。また、マグノン系の励起手法に関しても、平行励起だけでなく、垂直励起によるスール1次及び2次不安定化過程を利用して、放射マイクロ波への変換効率の向上やポーズ凝縮発生条件や特性を調査する。そして、それらの成果を基にデバイスへの応用を検討する。

4. 研究成果

(1)球状試料によるマグノン系緩和機構と放射マイクロ波の特性に関する研究を実施した。

図1は、直径1[mm]のイットリウム・鉄・ガー

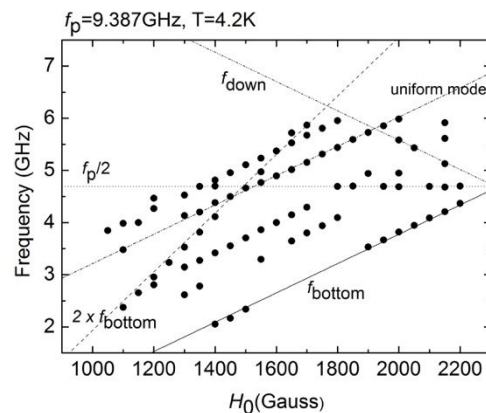


図1. 球状試料 4.2 Kでの放射スペクトル

ネット(YIG)試料を液体ヘリウム温度4.2[K]において、ピーク電力40[W]の9.39[GHz]のマイクロ波で平行励起した場合の放射マイクロ波スペクトルである。最低振動数 f_{bottom} 以外の放射が、各測定磁場で同時に観測されている。これらはユニホームモードと平行に磁場変化しており、静磁モードからの放射であることが分かる。放射強度が強いのは、最低振動数モードの2倍の放射 $2x f_{\text{bottom}}$ であるが、これは1100から1500[G]の特定の領域のみで観測される。この原因は今後詳しく調べる必要がある。また、 f_{down} で示したモードの存在から、高磁場領域で最低振動数モードに緩和する過程に4マグノン散乱が関与していることを確認した。この他にも、放射振動数が外

部磁場に依存しないモードがあるが、これは励起周波数の1/2振動数を持つ放射マイクロ波である。このモードは、マイクロ波励起を開始して400ナノ秒程度で放射が観測される。一方、最低振動数 f_{bottom} およびその2倍振動数モードは励起から放射開始まで5 μ 秒程度必要で、先述のモードより1桁長い時間が必要である(図2)。これは、1/2励起周波数モードはマイクロ波によって直接励起されたマグノンからの放射であるのに対して、 f_{bottom} モードは4マグノン散乱を経由して最低振動数モードが増加することによって観測されるためである。

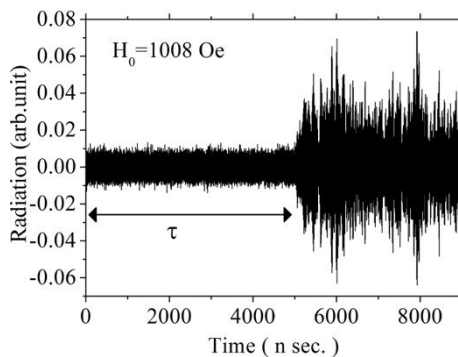


図2. 2x最低振動数モードの放射強度の変化。時刻0からマイクロ波による平行励起を開始している。

(2)放射マイクロ波の周波数は、外部静磁場強度のみに依存し、励起周波数には依存しない。図3に球状試料について4つの異なる励起周波数の条件下で観測された放射スペクトルを重

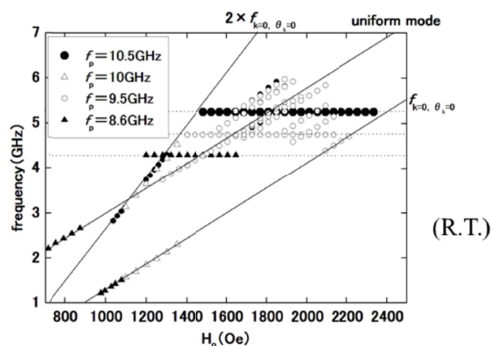


図3. 異なる励起数波数での放射スペクトル

ねてグラフに示す。1/2励起周波数のモードはそれぞれ異なるが、他のモードは4つの周波数が同一の磁場変化する直線上にある。このことから、磁場によって出力周波数をコントロールできる周波数変換デバイス等に活用できることを確認する事ができた。

(3)薄膜試料を面内方向に磁化した場合、放射マイクロ波は主としてユニホームモードを通して放射される。図3に膜面内に磁化したYIG薄膜中のマグノン系に対して、平行励起と垂直励起(スール1次過程)の手法を用いた場合

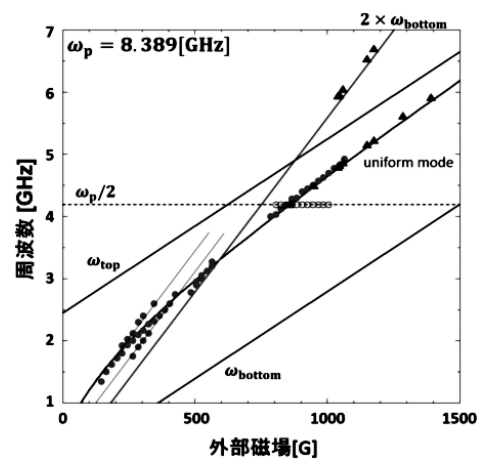


図3. 面内に磁化した薄膜で観測された放射

に観測された放射スペクトル例を示す。は平行励起で観測された放射ピーク、は垂直励起で観測された放射ピークの位置である。最低周波数モード f_{bottom} からの、直接放射は観測されていない。これは、面内方向磁化では最低振動数モードがゼロでない波数となるため、同一振動数フォトンへの直接緩和は運動量を保存しないため発生しにくいと考えられる。しかし、 $\pm k$ の波数を持つ最低振動数モードマグノン対が消滅し2倍の周波数を持つフォトン1つを生成する過程は観測されている。この2倍の周波数がユニホームモードと一致する磁場領域で放射が強くなる。

(4)薄膜を面直方向に磁化した場合には、最低振動数モードと考えられるユニホームモード

より低周波数側にマイクロ波放射が確認された。この放射については発生理由など不明な点が多く、今後の研究が必要である。

(5)放射強度が強い球状試料で、同時に観測される複数のマイクロ波放射の強度比を、励起電力を可変しながら測定した。ボーズアインシュタイン凝縮を示す分布関数の変化は、40Wまでの励起電力下では確認できていない。放射強度を上げるにはバルクYIGが有利であるが、ボーズ凝縮を発生させるためにはより強くマグノン系を励起することが必要である。

5. 主な発表論文等 〔学会発表〕(計4件)

味野道信, 川原裕貴
非平衡マグノン系からの放射マイクロ波時系列観測
日本物理学会 2015年秋季大会
2015年9月16日
関西大学(大阪府吹田市)

M.Mino, H.Kawahara
Microwave radiation from parametrically excited magnons
20th International Conference on Magnetism, 5-10 July 2015.
Barcelona, Spain.

味野道信, 河村伸吾
非線形励起されたマグノン系における放射マイクロ波の制御
日本物理学会第69回年次大会
2014年3月27日
東海大学(神奈川県平塚市)

味野道信, 村上宏輔
非平衡マグノン系から放射されるマイクロ波の時間変化
日本物理学会2013年秋季大会
2013年9月25日
徳島大学(徳島県徳島市)

6. 研究組織

研究代表者

味野 道信(MINO, Michinobu)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 30222326