慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	マグノン量子凝縮の電気的制御
Sub Title	Electrical control of magnon condensation
Author	関口, 康爾(Sekiguchi, Koji)
Publisher	
Publication year	2016
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2015.)
JaLC DOI	
Abstract	安定的なマグノン量子凝縮を電気的に実現し, 巨視的コヒーレンス現象の出現を明らかにすることを目的とし, 磁性絶縁体および金属磁性体におけるマグノン励起現象を研究した。金属磁性体において, 量子凝縮に必須のマグノンモードの波形観測に成功し, 干渉効果によるマグノン密度上昇の観測する成果を得た。また, ナノピラー構造のマグノン励起研究を行った。一方, 磁性絶縁体においては, 外部パラメータとして温度勾配を制御してマグノン量子凝縮の実現レートを変調できるようにするため, 分光装置の改良をおこない, マイクロ波照射法による量子凝縮の観測に成功した。温度勾配下での量子凝縮実現のためのパルス励起法の開発に成功した。 We studied the formation of Bose-Einstein condensation of magnons by electrical excitation methods to investigate the quantum coherence in magnon gases. In a ferromagnetic metals, we have succeeded in observing a clear spin wave waveform of backward volume wave (BVW) which is essential to realize the condensation. The increase of magnon density is quantitatively observed by utilizing magnon interference effect. While in a ferromagnetic insulator (yttrium iron garnet), we have detected Bose-Einstein condensate in the presence of temperature gradient. The Brillouin light scattering spectroscopy was successfully improved to harness wavevector- and time-resolutions.
Notes	研究種目：若手研究(A) 研究期間：2013～2015 課題番号：25706004 研究分野：マグノニクス
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_25706004seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２８ 年　 ５ 月 ２５ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2013～2015
課題番号：２５７０６００４

研究課題名（和文）マグノン量子凝縮の電気的制御

研究課題名（英文）Electrical control of magnon condensation

研究代表者
関口　康爾（SEKIGUCHI, Koji）

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：００５２５５７９

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　19,500,000円

研究成果の概要（和文）：安定的なマグノン量子凝縮を電気的に実現し、巨視的コヒーレンス現象の出現を明らかにすることを目的とし、磁性絶縁体および金属磁性体におけるマグノン励起現象を研究した。金属磁性体において、量子凝縮に必須のマグノンモードの波形観測に成功し、干渉効果によるマグノン密度上昇の観測する成果を得た。また、ナノピラー構造のマグノン励起研究を行った。一方、磁性絶縁体においては、外部パラメータとして温度勾配を制御してマグノン量子凝縮の実現レートを変調できるようにするため、分光装置の改良をおこない、マイクロ波照射法による量子凝縮の観測に成功した。温度勾配下での量子凝縮実現のためのパルス励起法の開発に成功した。

研究成果の概要（英文）：We studied the formation of Bose-Einstein condensation of magnons by electrical excitation methods to investigate the quantum coherence in magnon gases. In a ferromagnetic metals, we have succeeded in observing a clear spin wave waveform of backward volume wave (BVW) which is essential to realize the condensation. The increase of magnon density is quantitatively observed by utilizing magnon interference effect. While in a ferromagnetic insulator (yttrium iron garnet), we have detected Bose-Einstein condensate in the presence of temperature gradient. The Brillouin light scattering spectroscopy was successfully improved to harness wavevector- and time-resolutions.

研究分野：マグノニクス

キーワード：マグノン　スピン波　量子凝縮

１．研究開始当初の背景

電子電気機器はエネルギー消費が急激に増大し、省エネ性能と高性能化の両立という現代社会の要請にこたえることが徐々にできなくなってきている。そのような背景において、磁性体に存在する磁気的な波、スピン波（マグノン）は超高速伝搬・ジュール損失レスという特性から次世代デバイス原理において中心的役割を果たすことが期待されている。エレクトロニクスになぞらえて、マグノニクスと呼ばれるこのデバイス原理において、磁気の波は基本的には古典的波動としてとらえられている。しかしながら、ここで未解明として残っている性質があり、それがマグノン量子性である。マグノンはボーズ粒子の特性により安定な量子相を形成することが期待できるため、これら量子相を活用したこれまでにない高度な量子情報処理システムの構築の可能性を秘めている。

２．研究の目的

本研究では、これまでのスピン流を用いた、マグノン生成・伝搬に関する制御工学的研究や近年の micro/nano-BLS 装置開発の成果を踏まえ、安定的なマグノン量子凝縮を電気的に実現して、巨視的コヒーレンス現象の出現を明らかにし、固体素励起の Bose-Einstein 凝縮（BEC）というユニバーサルな基礎物理研究やマグノンスピントロニクス(magnon spintronics) に関する研究に貢献することを目的としている。以上の大きな枠内において、具体的にはスピンポンピング・スピンゼーベック効果などの外的電気制御を加えることで、量子凝縮体の安定性を検証する。そして室温巨視的コヒーレント現象、例えば、”マグノン超流動体”の探索を目的とする。

３．研究の方法

スピン波伝搬研究において国内で唯一稼働させているμ-BLS 実機を活用することで、マイクロ波照射法によるマグノン量子凝縮（BEC）の検出を行う。ハイパワーのマグノン励起によってマグノンの密度を非線形領域まで増大させることで BEC を実現できる。この BEC に対して、外部制御方法として、スピン軌道相互作用の強い金属電極を接合させてヘテロ界面を構築する。直流電流を注入すると、逆スピンホール効果によって直流スピン流を磁性体に注入できると想定できる。一方、マグノンを励起する媒体の温度分布をペルチェ素子で制御することで、熱励起マグノン（スピンゼーベック効果）によるスピン流を生むことができる。これら手法によりマグノン量子凝縮体のスピン流に対する安定性を検証でき、巨視的コヒーレンスを検証する。

また、量子凝縮体としての伝搬現象や巨視的コヒーレンス現象を検証するため、空間分解を有した上での BEC を実現する。すなわちマグノン BEC 状態を局所的に達成させて、外部パラメータを制御して、BEC の実現レートを変調できるようにする。スピン流だけで角運動量を受け渡してマグノンを生成する”直流スピントルク法”をあたらしく考案・構築する。材料として磁性絶縁体 YIG や磁性金属 FeNi を微細加工し、ピラー構造によるスピン流注入素子を作製し、スピン流注入端子近傍のマグノン密度観察を目指す。

４．研究成果

本研究期間において、

(1) 金属強磁性細線におけるマグノン密度の増大化実験を行った。強磁性細線におけるマグノン干渉効果を引き起こすことで、マグノン密度が空間的に急激に増大することを 250 ナノメートル分解能をもって定量的に検出できた。これはボーズアインシュタイン凝縮（BEC）が生じる前の線形領域であるが、今後、量子凝縮が生じることを証明するための比較対象となる基礎実験成果である。

(2) マグノン BEC を起こすのに必須であるマグノンの特定モード（バックワードモード）を、金属強磁性体 FeNi において初めて実時間波形として検出できた。これにより金属強磁性体での BEC 研究の足がかりを得ることができた。金属強磁性体における局所 BEC の実現に向けて、直流スピントルク法の研究を行った。

(3) 磁性絶縁体 YIG におけるマグノン量子凝縮を観測するため、マイクロ波ストリップライン、およびマイクロ波注入素子、ペルチェ素子構造などアタッチメントを作製した。マイクロ波ストリップラインに注入するマイクロ波強度を最大で数 W に達するように、マイクロ波アンプによって入力マイクロ波を増幅し、マイクロ波照射法（パラメトリック励起）によってマグノン数増大を検出し、マグノン量子凝縮を実現した。

(4) マグノン量子凝縮の位相情報を研究するためには、運動量空間（マグノン波数）の情報を検出する必要が見つかり、時間・波数分解能を持たせる装置改造を行った。また強大なマイクロ波を連続波として注入し続けることは、パラメトリック励起における熱効果を増大化し、量子凝縮現象の研究を阻害することが明らかとなったので、熱の効果を排除するためにパルスパターン信号発生器と高速スイッチによるパルス・マイクロ波励起法の導入を行った。パルス励起法により試料における発熱量を大幅に改善することができた。

(5) 室温における磁性絶縁体 YIG のマグノンの量子凝縮過程において、マイクロ波で生成させたマグノンがエネルギー再安定状態に落ち込むまで数百ナノ秒の時間がかかることを検出できた。さらに、運動

量分解測定も行うため、ピンホールによる反射光分割を行い時間･波数同時分解測定を行った。この結果、運動量がマグノン分散関係で示される最安定状態に落ち込むことを実験的に確認できた。さらに熱的スピン流注入効果の測定を行ったところ、数ケルビンの温度差によるスピン流注入下では現在のところ安定に量子凝縮相を観測できることがわかった。一方、YIG の熱安定性から数十ケルビンの温度をつけた場合の量子凝縮相では分光測定に難しさが生じることがわかり、量子相の安定性に関する今後の定量的検証における指標を見つけることができた。

以上の結果は当初計画の完全達成とまでになっていないが、今後、マグノン量子相研究の基礎研究を支える十分な成果である。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計５件）

1) “Spin wave differential circuit for realization of thermally stable magnonic sensors”, T. Goto, N. Kanazawa, A. Buyandalai, H. Takagi, Y. Nakamura, S. Okajima, T. Hasegawa, A. B. Granovsky, K. Sekiguchi, C. A. Ross, and M. Inoue, Applied Physics Letters, 2015, Vol.106, 132412(2015). 査読有
2) “Criteria for electric determination of antivortex creation in ferromagnetic thin film”, M. Goto, Y. Nozaki, and K. Sekiguchi, Jpanese Journal of Applied Physics 54, 023001 (2015). 査読有
3) “Propagating spectroscopy of backward volume spin wave in a metallic FeNi film”, N. Sato, N. Ishida, T. Kawakami, K. Sekiguchi, Applied Physics Letters, 2014, Vol.104, 032411 (2014). 査読有
4) “Electrical Demonstration of Spin-Wave Logic Operation”, N. Sato, K. Sekiguchi, Y. Nozaki, Applied Physics Express, 2013, Vol.6, 063001 – 063003(2013). 査読有
5) “Excitation of Continuous Magnetostatic Surface Spin Wave in Ferromagnetic Thin Films”, N. Sato, K. Sekiguchi, Y. Nozaki, Journal of Magnetics Society of Japan, 2013, Vol.37, 214-217 (2013). 査読有

〔学会発表〕（計３４件）

○招待講演

1) “Nano Magnonics in Cooperation with Spin-Current”, K. Sekiguchi, Colloquium on Functional Magnetic Materials and Future Magnetics: The 100th Anniversary Magnetics Lab Seminar, 2016.03.11, 豊橋技術科学大学（愛知県・豊橋市）
2) “スピン波輸送の基礎とその先端研究動向～電気と光の融合から生まれるマグノニクス～”, 関口康爾、日本大学先端材料科学若手フォーラム２０１６、2016.02.06 日本大学理工学部（千葉県・船橋市）
3) “Spin-interchange between electron and magnon currents”, K. Sekiguchi, WEH‐Seminar on 'Magnonics Spin Waves Connecting Charges, Spins and Photons', 2016.01.08, Badhonef (Germany)
4) “スピン波輸送とマグノニック機能デバイス”, 関口康爾、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会2015.09.15，名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市）
5) “Control of spin-wave interference in metallic nanostructures”, K. Sekiguchi, Energy Materials Nanotechnology Fall Meeting, 2014.12.08, Orlando (USA)
6) CONTROL OF MAGNON IN FERROMAGNETIC METALS: MAGNON SPINTRONICS, K. Sekiguchi, Magnetics and Optics Research International Symposium, 2014.12.03, OMIYA SONIC CITY (Saitama, Omiya)
7) SPIN WAVE MANIPULATION IN FERROMAGNETIC METALS: MAGNON SPINTRONICS, K. Sekiguchi, Moscow International Symposium on Magnetism 2014.06.30, Moscow (Russia)
8) Control of Spin wave Interference in Metallic Nanostructures: Development of Magnon Spintronics, K. Sekiguchi, Euro-Asian Symposium "Trends in Magnetism" Nanomagnetism, 2013.09.20, Vladivostok (Russia)
9) “Development of Magnon Spintronics: Spin-Wave Logic Operation in Metallic FeNi film”, K. Sekiguchi, Donostia International Conference on Nanoscale Magnetism and Applications, 2013.09.12, San-Sebastian (Spain)
10) “Generation of Backward Volume Spin Wave in Metallic FeNi films”, K. Sekiguchi, International Conference on Nanoscale Magnetism, 2013.09.05, Istanbul (Turkey)
11) “マグノンスピントロニクスの最前線”, 関口康爾、先端ナノデバイス・材料テクノロジー１５１委員会 ; 日本学術振興会１５１委員会、2013.05.09 、東京大学（東京都・文京区)

招待講演他 6 件

○学会発表

1) “Spin wave phase interference using yttrium iron garnet waveguide”, T. Goto, N. Kanazawa, H. Takagi, Y. Nakamura,C. Ross, A.B. Granovsky, T. Hasegawa, S. Okajima, K. Sekiguchi and M. Inoue, MMM | INTERMAG 2016 JOINT CONFERENCE, 2016.01.15 , San Diego (USA).
2) “スピン電流による BackwardVolumeWave の周波数シフト”, 佐藤奈々, 関口康爾, 第 39 回日本磁気学会学術講演

会,2015.09.10. 名古屋大学（愛知県・名古屋市).

3) “Spin torque modulation on backward volume spin waves”, N. Sato and K. Sekiguchi, 4th International Workshop on Magnonics, 2015.08.04, Seeon (Germany)
4) “Fast spin-wave propagation in epitaxial Fe film”, N. Ishida, K. Sekiguchi, H. Sukegawa, 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials Conference, 2014.11.07, Honolulu (USA)

他１３件

〔受賞〕（計　１件）
文部科学大臣表彰　若手科学者賞
（H27 年度）

〔その他〕
ホームページ等
http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/216/0021536/profile.html

６．研究組織
(1)研究代表者
関口　康爾　（SEKIGUCHI, Koji）
慶應義塾大学・理工学部・講師
研究者番号：００５２５５７９