

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01791

研究課題名（和文）ブリルアン散乱による人工アンチフェロ構造におけるテラヘルツ波デバイスの開拓

研究課題名（英文）Research of synthetic antiferromagnet for THz devices with Brillouin light scattering

研究代表者

菊池 伸明（Kikuchi, Nobuaki）

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：80436170

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：テラヘルツ領域での人工アンチフェロ構造におけるテラヘルツ波デバイスの開拓を目指し、磁化ダイナミクス計測装置のためのブリルアン散乱装置の構築を行った。マグノンによる磁気信号は微弱であるため、二枚の半透鏡からなる干渉計の間隔および平行度を光の波長にくらべ十分に小さな値で制御する必要がある。本研究では、干渉計の温度制御およびフィードバック回路を最適化することにより、1cps程度の50GHz程度のブリルアン散乱信号を安定して計測することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁性体はテラヘルツ領域での応用が期待される一方、その領域での評価手法は限られているのが現状であった。本研究では、光とマグノンの相互作用を計測するブリルアン散乱を本領域での計測法として確立することを目指した。本手法では、既存の手法と比べて大振幅の励起が不要であり、安定状態での挙動を計測できるという利点がある。本課題では、最終目標とした0.1THz以上の周波数までの到達はできなかったものの、その半分の50GHzでの信号検出と、今後のアプローチについての知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：A Brillouin scattering system for magnetization dynamics measurement has been constructed to explore terahertz wave devices in artificial antiferrostructures in the terahertz region. The magnetic signal from magnons is weak, so the spacing and parallelism of the interferometer, which consists of two semipermeable mirrors, must be controlled at sufficiently small values relative to the wavelength of light. In this study, by optimizing the temperature control and feedback circuit of the interferometer, we succeeded in stably measuring the Brillouin scattering signal of about 1 cps at about 50 GHz.

研究分野：磁性材料

キーワード：ブリルアン散乱 磁性体 磁化ダイナミクス 強磁性共鳴

1. 研究開始当初の背景

現在、テラヘルツ波と呼ばれる周波数領域の電磁波の研究が進められている。その周波数は定義によりまちまちであるが、ミリ波帯も含んだおおよそ $0.1\sim 10\text{THz}$ 程度の範囲を指すことが多い。光に近い THz 帯では、その透過性を生かした非破壊検査への応用が、また、電波に近い 300GHz 近傍の周波数では帯域幅を活かした高速な近距離通信や演算機器への展開が期待されている。その一方で、光と電波の境界領域と呼ばれるように、例えばミラーや導波路などの既存の素子が使えず、新原理・材料の開拓が求められている。

テラヘルツ波素子への利用が期待される材料の一つに、磁性体が挙げられる。磁性体中の磁気モーメントは、その有効場に従って歳差運動を行う。この歳差運動周期以下では磁化が磁場に追従するため、磁性体は効率的にエネルギーを伝搬し、歳差運動周期近傍ではエネルギーを吸収するという異なった役割を果たすことができる。それぞれの代表例はトランスと電波吸収体である。磁性体の歳差運動周期は、その有効磁場の大きさで決まり、典型的な強磁性体では $1\sim 300\text{GHz}$ 程度、反強磁性体では $1\sim 10\text{THz}$ 程度であり、テラヘルツ波との相互作用が極めて大きく、エネルギーの伝播や吸収によるデバイスの実現が期待される。さらに、磁性体は、例えば外部磁場やスピン分極電流など様々な手法により有効場の変調が可能で動作周波数を制御できるという特徴があり、テラヘルツ波の伝送や演算素子の材料としても大きな可能性を秘めている。

一方で、これまでに進められてきたテラヘルツ波領域での磁化ダイナミクス研究を振り返ると課題が多い。過去の研究は時間分解計測と周波数分解計測の主に二つの手法に分けられる。時間分解計測の代表的な手法としては光ポンプ=プローブ法が挙げられる。この手法では、試料をパルスレーザーにより熱的あるいは光学的に励起し、その緩和過程での磁化変化や歳差運動の挙動を計測する[例えば E. Beaurepaire 他, PRL76, 425 0(1996)]が、大振幅の励起が必須であり、測定時の光学・磁場配置や試料の選択に大きな制約がある。周波数分解による計測の代表例は強磁性共鳴 (FMR) であり、一般的には磁性体によるマイクロ波の吸収を測定する。測定周波数の広帯域化が進んでいるが、現状では 50GHz 程度が上限となっている。パルス光をフーリエ変換することにより情報を得るテラヘルツ時間領域分光 (THz-TDs) も著しく発展しているが、磁性体への適用はまだ多くはなく 1THz 以下の低周波領域での分解能が不十分であるという課題がある。そのため、テラヘルツ波への磁性体の応用が可能であると考えられる $0.1\sim 1\text{THz}$ の周波数領域での挙動についてはいまだ未開の領域となっており、新たな材料の探索・計測手法の確立が望まれていた。

2. 研究の目的

背景で述べたように、本研究での課題は大きく分けて二つあり、(1)ブリルアン散乱のテラヘルツ波領域のスピン波検出手法としての確立、(2)人工フェリ/アンチフェロ構造などのテラヘルツ波領域での磁化ダイナミクスの理解と制御に分けられる。それぞれについて以下に述べる。

(1)ブリルアン散乱のテラヘルツ波の周波数領域でのスピン波検出手法としての確立

これまでに述べたように、テラヘルツ波の周波数領域でのスピン波を検出できる手法は極めて限られている。特に $0.1\sim 1\text{THz}$ のテラヘルツ波の中でも低周波数領域での計測手法は光励起によるポンプ=プローブ法を除けば皆無であり、この領域でのスピン波の挙動の解明は未踏の分野と言っても良い。本課題では、ブリルアン散乱によって $0.1\sim 1\text{THz}$ での周波数領域でのスピン波検出手法を確立することを目指した。

(2)人工フェリ/アンチフェロ構造のテラヘルツ波領域での磁化ダイナミクスの理解と制御

人工フェリ/アンチフェロ構造は、巨大磁気抵抗効果の発見とも強く関連する構造であり、ハードディスクドライブの読み取りヘッドや磁気抵抗変化メモリなどにも応用されている。近年になって反強磁性結合した磁性層の磁壁の移動速度などに関する研究が報告されているが、 10GHz 程度の周波数領域にとどまっている。本研究では、 $0.1\sim 1\text{THz}$ の周波数領域における磁気・構造パラメータによる人工フェリ/アンチフェロ構造のスピン波ダイナミクスの制御手法の開拓を目的とした。

3. 研究の方法

(1)ブリルアン散乱計測のための干渉計の構築

これまで述べてきたように、本研究の中心はブリルアン散乱計測装置の構築である。一般にブリルアン散乱計測装置はフォノンの計測などに用いられている。一方、磁性体のマグノンによる

信号はフォノンに比べて微弱であり、より長時間の積算測定が要求される。また、より高周波領域での計測には干渉計の制御精度の向上が必要である。微弱なブリルアン散乱計測のためには、高い安定性を持つ干渉計の構築が必要であることから、

(2) 人工フェリ/アンチフェロ構造のテラヘルツ波領域での磁化ダイナミクスの理解と制御

本研究では、人工フェリ/アンチフェロ構造として、Co/Ru 積層構造を作製し、その磁化曲線の評価を行った。

4. 研究成果

(1) ブリルアン散乱計測のための干渉計の構築

前述のように、本研究の中心をなすのは高精度・高安定のタンデム・マルチパス型ファブリー=ペロー干渉計の構築である。本干渉計は、図1に示すように、二組の二枚の半透鏡（エタロン）を組み合わせた構造で、光を複数回干渉させることにより性能向上を実現するものであり、原理は比較的単純である。その一方で、干渉条件を一定に保つためには、エタロンの平行度および間隔を光の波長に比べて十分に小さい、つまりナノメートルの精度で安定に制御し続ける必要がある。このような制御には安定した環境が重要であることから、本研究ではまず、環境温度の安定化を図った。種々の実験の結果、干渉計の温度変化を日差 0.1℃以下に保つ必要があることが分かった。実験室全体をこのような精度に保つことはスペースおよび金銭的な制約からも現実的ではない。そこで、実験室・計測装置を覆う実験ブース・干渉計のカバーなど、複数の空間の入れ子構造にして温度制御することにより、干渉計位置での日差 0.1℃を実現した。また、干渉計を構成する材料も熱膨張の小さな材質などを用いることで温度変化の影響の低減を図った。このように、環境変化による影響の低減を図ったうえで、測定中の信号を用いたフィードバック制御の構築を行った。フィードバック制御の改善を図るため、一段目の干渉計を通過した直後の信号を計測する光電子増倍管を設置した。

図2は、エタロンの間隔を 1.5mm にしたうえで計測した、(a)ニトログリセリン、(b)アクリル、(c)ガラスの振動に起因するブリルアン散乱スペクトルの測定結果である。エタロンの間隔を 1.5mm にした場合のフリースペクトルレンジ (Free Spectral Range:FSR) はおよそ 100 GHz となる。図2(a)~(c)で示したように、いずれの試料においても物質の振動に起因した明瞭なピークが表れている。特に、ガラスにおいては 1count/scan 程度のきわめて微弱な信号がピークとして明瞭に計測されている。また、100GHz のFSRの全域にわたって非常に小さなバックグラウンドノイズが実現できており、本手法が 100GHz までの振動による信号を検出する手法として極めて有用であることを示すことができ、他の手法によってはアプローチすることが困難である磁化の歳差運動やスピン波などの計測手法としての有用性を明らかにすることができた。

(2) 人工アンチフェロ構造の磁化ダイナミクス

本研究では、垂直磁気異方性を持つ Pt/Co/Ru/Co/Pt の積層構造を作製し、その反強磁性結合強度の計測を異常 Hall 効果の計測により行った。本構造では、Ru 層厚により磁性層間の結合強度および符号が、Co 層厚により垂直磁気異方性の大きさを独立に制御することができる。Ru 層厚を 0.6nm 前後にすることにより、最大で 5T 程度の大きさの反強磁性結合を得ることができ、テラヘルツ領域の周波数帯で動作が期待できる構造を作製することができた。

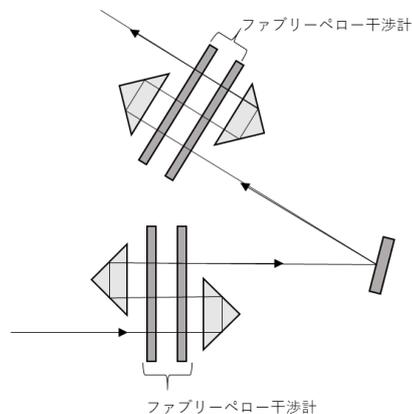


図1 タンデム・マルチパス型ファブリー=ペロー干渉計

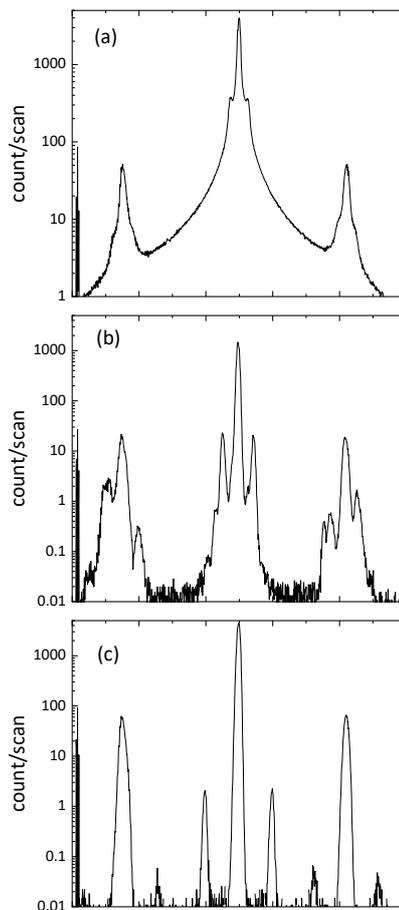


図2 測定したブリルアン散乱スペクトル (a)ニトログリセリン (b)アクリル (c)ガラス

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kikuchi Nobuaki, Sato Katsunari, Shimatsu Takehito, Okamoto Satoshi	4. 巻 62
2. 論文標題 Microwave-assisted switching in granular media with continuous magnetic overlayers for interaction control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SB1015 ~ SB1015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac9910	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 N. Kikuchi, K. Sato, T. Shimatsu, O. Kitakami, S. Okamoto
2. 発表標題 MICROWAVE ASSISTED SWITCHING IN GRANULAR MEDIA WITH CONTINUOUS CAPPING LAYERS FOR INTERACTION CONTROL
3. 学会等名 MORIS2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菊池伸明, 佐藤勝成, 畑山正寿, 島津武仁, 岡本聡
2. 発表標題 磁性膜厚のマイクロ波アシスト磁化反転挙動への影響
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菊池伸明, 富田知志, 岡本聡
2. 発表標題 時間変調メタマテリアルに向けた磁性細線の透磁率制御
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季講演会
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
研究 分担者	岡本 聡 (Okamoto Satoshi) (10292278)	東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301)	
研究 分担者	島津 武仁 (Shimatsu Takehito) (50206182)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・教授 (11301)	

	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
研究 協力者	吉原 章 (Yoshihara Akira)		

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
---------	---------