

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21622

研究課題名(和文) 磁性-弾性結合を用いた音響・熱ダイオード効果の研究

研究課題名(英文) Research of acoustic/thermal diode effects via magnetoelastic coupling

研究代表者

新居 陽一 (NII, Yoichi)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：80708488

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：人工的マルチフェロイクス物質としてNi/LiNbO₃デバイスを作製し、マイクロ波領域の表面弾性波伝搬の性質を詳細に調べた。Niの強磁性共鳴周波数とフォノン周波数が合致するところで、音速や吸収係数が進行方向の正負で異なる非相反性が生じることを見出した。磁気弾性結合を考えた現象論モデルを立てることで、磁場角度依存性を含めた詳細な振る舞いを再現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have measured microwave phonon propagation on a hybrid multiferroic composed by a ferromagnetic Ni film on a piezoelectric LiNbO₃ substrate. We have observed that nonreciprocal phonon propagation emerges around a frequency where acoustically-induced ferromagnetic resonance takes place. Based on a phenomenological theory including magnetoelastic energy, we have succeeded in understanding the phonon nonreciprocity and its angular dependence.

研究分野：物性物理学(実験)

キーワード：磁気弾性結合 表面弾性波 マイクロ波フォノン 非相反性 マルチフェロイクス

1. 研究開始当初の背景

近年、エレクトロニクスやフォトニクスとの類似で「フォノンクス」という概念が提唱され、音波長程度の周期的構造を用いたフォノン制御が試みられている。これらの研究はフォトニック結晶の研究とのアナロジーで進められており、負の弾性率やフォノン整流効果のような新規フォノン物性がメタマテリアル上で実現され始めている。中でもフォノンの整流効果（非相反性）は、順方向と逆方向でフォノンが伝搬しやすさが異なる現象であり、大きな着目を集めている。メタマテリアルを用いたフォノン物性開拓は盛んになされてきていたが、対称性の破れた単一物質中のフォノン応答に関しては、よく分かっていなかった。

一方、近年磁性強誘電体であるマルチフェロイクスにおいて、フォトンやマグノンの非相反性が発見されてきた。これらの非相反性はマルチフェロイクスが時間反転対称性と空間反転対称性を同時に破っていることが本質的に重要である。これを自然に拡張すれば、マルチフェロイクスのような時間・空間反転対称性を同時に破った系では、フォノンも整流性を示すと期待される。しかしこれまでそのような研究はなかった。

2. 研究の目的

本研究では、ハイブリッドマルチフェロイクスとして強磁性 Ni 薄膜と圧電体 LiNbO₃ を併せたデバイスを作製し、フォノンの整流効果の実証とその原理解明を行う。

3. 研究の方法

本研究では 3 つの実験的工夫を行った。

(1) 表面弾性波デバイスを作製し GHz フォノンを励起した。物質中のフォノンは配位子の変形によって磁気異方性を変調しスピン系と結合することができる。従来用いられたフォノンの周波数は高々 MHz 程度であり、スピン系にとっては静的な外部摂動である。一方、フォノン周波数が GHz 領域まで上昇すると、強磁性体のスピン波の励起と同程度になるため、そのダイナミクスが本質的に重要になる。図 1 に示す通り GHz 領域では強磁性スピン波分散とフォノン分散が交差し互いの基準モードは混成する。これを利用すれば、音波による磁気共鳴といった MHz 領域では生じえない大きな磁気応答が期待される。本研究では GHz フォノン励起として比較的に簡単な表面弾性波(SAW)デバイスを採用した。図 2(a)に示すようなすだれ状電極を圧電基板上に作成することで SAW が励振でき、他方の電極で検出できる。このとき 5 μ m の微細電極において 13 次高調波を励起すると、図 2(b)に示す通り 2 GHz を上回る高周波フォノンが励起できた。これはゼロ磁場における Ni の強磁性共鳴を上回っている。

(2) 強磁性薄膜と圧電基板の複合デバイスの作製し、時間反転対称性と空間反転対称性

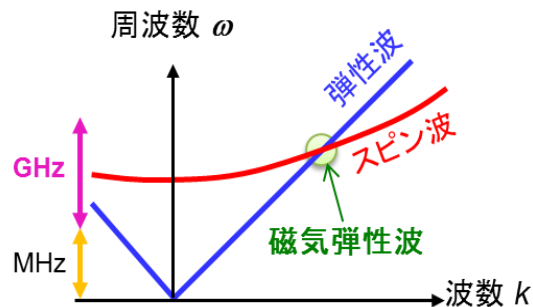
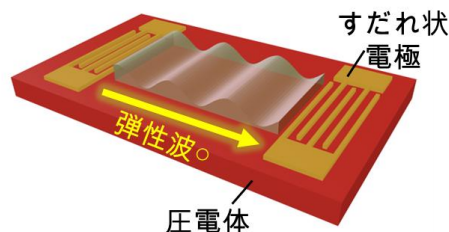


図 1. 弾性波と強磁性スピン波の分散関係。弾性波の周波数をマイクロ波(GHz)領域まで上昇させると、スピン波の分散と交差し、磁気弾性波として振る舞う。

(a)



(b)

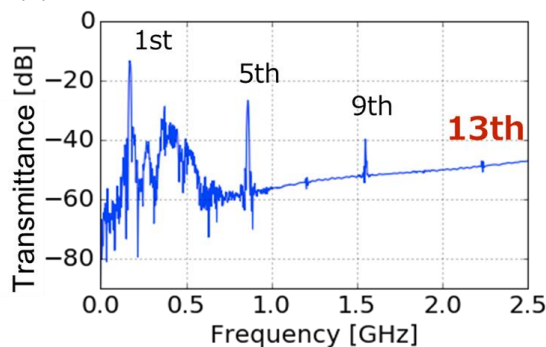


図 2. (a) 作成した表面弾性波デバイスの模式図。(b) 透過強度スペクトル。実験では 13 次高調波を用いることで Ni の強磁性共鳴周波数を上回る弾性波伝搬を調べた。

を同時に破った系を準備した。図 2(a)の LiNbO₃ 圧電基板の途中に Ni 薄膜を蒸着した。Ni が強磁性体であることと基板表面であることから、時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れた人工的マルチフェロイクスとみなせる。

(3) マイクロ波領域におけるパルスエコー法を確立し、SAW 応答を高感度で検出した。通常、マイクロ波領域まで高周波になると実時間測定は困難になり、ネットワークアナライザに代表されるような周波数空間での測定が一般的である。しかしこの場合、電磁波による直接透過と弾性波を介した透過の重ね合わせが信号として観測にかかる。したがって弾性波信号が大きくない場合、電磁波信

号に埋もれてしまい測定が困難になる。実際図 2(b)の透過スペクトルにおいて 13 次高調波付近のバックグラウンド信号は電磁ノイズに由来し、SAW 信号のピークが非常に小さいことが分かる。本研究ではこれらを切り分けるため、パルス変調をかけたマイクロ波信号を入力し、時間軸上で電磁ノイズ(EMW)と弾性波(SAW)の信号を分離した。図 3 は、ホモダイン検波回路によって復調した信号のオシログラムである。電磁波の速度は音速に比して 5 桁程度速いため、パルス変調をかけると時間軸上で両者は分離される。遅延されてきた SAW 信号のみを積算・解析すれば、高い精度でフォノン伝搬の振る舞い(音速や吸収係数)が明らかになる。

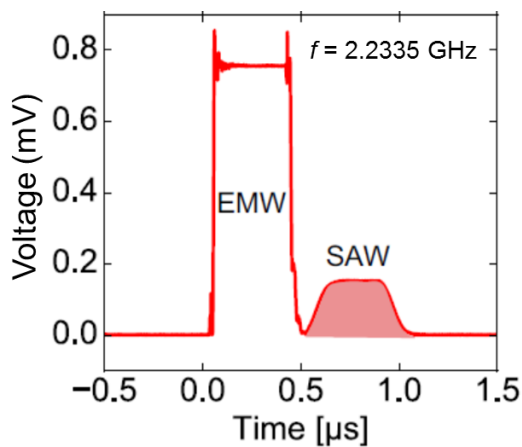


図 3. 復調した高周波表面弾性波信号の検出。パルス変調を施すことで、時間軸上で電磁ノイズ(EMW)と表面弾性波(SAW)信号を分離した。

4. 研究成果

(1) 以上の工夫を行い Ni/LiNbO₃ 複合デバイス上の SAW の非相反伝搬を観測した。図 4 は 2.2GHz の表面弾性波の吸収と位相速度の磁場依存性である。(a), (c)と(b), (d)でそれぞれ伝搬方向が反転している。いずれも磁場を 0 mT から上昇させていくと 100 mT 程度で最大値もしくは最小値となった後、ゼロへと漸近していく振る舞いが見られる。これは Ni の磁化成長過程とスピン波分散のゼーマンシフトによって理解される。まず低磁場領域では、全磁化が音波長と比較し一様でないため、弾性波吸収が小さく、100mT 程度までの急峻な変化は磁化の成長過程に対応する。高磁場領域の振る舞いはスピン波バンドが磁場によって高周波シフトするためである。今、励起しているフォノン周波数 $f = 2.23 \text{ GHz}$ は Ni の強磁性共鳴周波数を若干上回っている。したがって磁場を印加していくと、丁度分散交差点のところで、フォノン系のエネルギーがマグノン系へと移行し、大きな音波吸収が生じる。高磁場領域において吸収が消失して

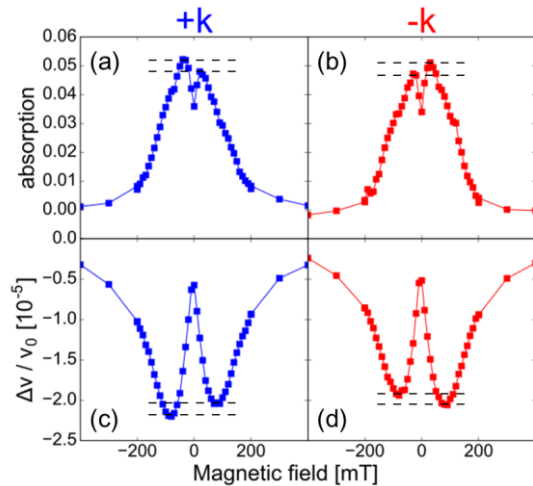


図 4. 表面弾性波の非相反伝搬。(a), (b)は弾性波の吸収、(c), (d)は位相速度の変化率を表す。また左(a), (c)と右(b), (d)は伝搬方向をそれぞれ反転したものに对应する。

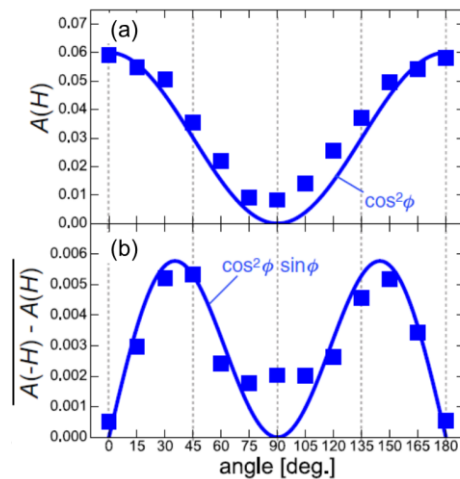


図 5. (a)弾性波吸収と(b)非相反性の磁場角度依存性。

いるのはスピン波周波数がフォノン周波数を上回ったためと理解される。

フォノン系とマグノン系が最も強く混成している 100mT 付近に着目すると、磁場の正負で差異が認められる。更に、弾性波の伝搬方向を逆転すると、非対称性も反転していることが分かる。これがフォノンの伝搬方向の正負によって吸収量や位相速度の差があることを示しており、非相反伝搬を観測したことに对应する。

(2) 非相反伝搬の起源

非相反性の起源を明らかにするため、LiNbO₃ 基板面内で磁場を回転し、磁場角度依存性を詳細に調べた。図 5 は、規格化した弾性波吸収量と非相反性の大きさを磁場角度に対してプロットしたものである。0 度は磁場と弾性波伝搬方向が平行で 90 度は垂直に対応する。特徴的なのは、吸収は 0 度で最大になるのに対して、非相反性は 45 度近傍で

最大になることである。

本研究では磁気弾性結合エネルギーを介した音響誘起磁気共鳴を考えることで、これらの振る舞いが理解できることを示した。表面弾性波によって誘起される歪みは、楕円偏向しているがその回転方向は進行方向に依存する。したがって磁気弾性結合によって生じる有効磁場も進行方向に依存する。加えて有効磁場の偏向度は初期の静磁化の方向にも依存するため、吸収に加え非相反性も角度依存性をもつことになる。図5に示す通り実線で示した理論モデルが実験と良く一致していることが分かる。強磁性共鳴と表面弾性波を用いたフォノンの非相反伝搬は本研究が初めてになる。本研究を皮切りに、磁性物質の選択、デバイス最適化、メタマテリアル化等を通じて、非相反性の巨大化など今後の進展が見込まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Y. Iguchi, Y. Nii, and Y. Onose, “Magnetolectrical control of nonreciprocal microwave response in a multiferroic helimagnet”, *Nat. Commun.* **8**, 15252, (2017), 査読有, doi: 10.1038/ncomms15252
- ② Y. Nii, R. Sasaki, Y. Iguchi, and Y. Onose, “Microwave Magneto-chiral Effect in the Non-centrosymmetric Magnet CuB_2O_4 ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 024707 (2017), 査読有, doi: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.024707>
- ③ R. Sasaki, Y. Nii, Y. Iguchi, and Y. Onose, “Nonreciprocal propagation of surface acoustic wave in Ni/LiNbO_3 ”, *Phys. Rev. B* **95**, 020407(R) (2017), 査読有, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.020407>
- ④ Y. Nii, T. Nakajima, A. Kikkawa, Y. Yamasaki, K. Ohishi, J. Suzuki, Y. Taguchi, T. Arima, Y. Tokura & Y. Iwasa, *Nat. Commun.* **6**, 8539 (2015), 査読有, doi: 10.1038/ncomms9539
- ⑤ 新居陽一、中島多朗、有馬孝尚、岩佐義宏、”圧力印加によるスキルミオン相の生成・消滅”, *応用物理*, **85**, 885 (2016) 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① Y. Iguchi, Y. Nii, and Y. Onose, “Magnetolectrical control of nonreciprocal microwave response in a multiferroic helimagnet”, *American Physical Society March Meeting 2017*, 2017年3月14日, 「New Orleans (USA)」
- ② R. Sasaki, Y. Nii, Y. Iguchi, and Y. Onose, “Nonreciprocal propagation of surface acoustic wave in Ni/LiNbO_3 ”, *American Physical Society March Meeting 2017*, 2017年3月13日, 「New Orleans (USA)」

Physical Society March Meeting 2017, 2017年3月13日, 「New Orleans (USA)」

- ③ 新居陽一、佐々木遼、井口雄介、小野瀬佳文, 「非反転対称磁性体 CuB_2O_4 のマイクロ波応答」, *日本物理学会 2016 年春季大会*, 2016年3月22日, 「東北学院大学泉キャンパス(宮城県・仙台市)」
- ④ 新居陽一、中島多朗, 「 MnSi における磁気スキルミオン相の一軸応力制御」, *2015 年度量子ビームサイエンスフェスタ(第7回 MLF シンポジウム/第33回 PF シンポジウム)*, 2016年3月15日, 「つくば国際会議場(茨城県・つくば市)」
- ⑤ 新居陽一、金澤直也、X.-X. Zhang, 永長直人、十倉好紀、岩佐義宏, 「カイラル磁性体 MnGe における巨大な弾性異常」, *日本物理学会 2015 年秋季大会*, 2015年9月16日, 「関西大学千里山キャンパス(大阪府・吹田市)」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新居 陽一 (NII, Yoichi)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：80708488