

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13330

研究課題名(和文)磁気ドメインの高感度ベクトル可視化手法の開発と光によるドメイン制御

研究課題名(英文)Visualizing magnetic domains with terahertz radiation

研究代表者

貴田 徳明(Kida, Noriaki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30587069

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁性と強誘電性を示す数々の磁性強誘電体における巨視的な磁気ドメインの「光による制御」に挑戦した。特に、室温において、フェムト秒レーザーを照射することで、超高速磁化変調を起源とするフェリ磁性を示す強誘電体からのテラヘルツ電磁波放射現象の観測に初めて成功した。さらに、試料を二次元的に走査しテラヘルツ電磁波振幅の場所依存性を測定したところ、今回、サブピコ秒の時間分解能で、磁化ベクトルが簡便に可視化できることを見出した。すなわち、磁化ベクトルの方向を決定することのできる新たな磁気ドメインイメージング手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：We report the terahertz radiations in various polar and ferrimagnetic insulating oxides upon irradiation of a femtosecond laser pulse at room temperature. By the resonant optical excitation of an originally spin-forbidden transition, we observed the emission of terahertz waves, which is attributable to the magnetic-dipole radiation originating from the light-induced subpicosecond magnetization modulation. By mapping out the emission of the terahertz waves, we successfully visualized the vector images of in-plane magnetic domains in magnetic fields. The terahertz-radiation imaging presented here is useful as a new tool to observe ferro- or ferri-magnetic domains.

研究分野：テラヘルツ波物性

キーワード：テラヘルツ電磁波 磁気ドメイン

1. 研究開始当初の背景

近年、多くの磁性体において強誘電性が発現することが見出され、磁場による分極の制御、電場による磁化の制御が実現され、従来、独立な物性であると考えられてきた磁性と強誘電性が強く相関することが実証されてきた。このような磁性強誘電体に特徴的な新しい機能の開拓は産業応用にも展開できる重要な研究テーマである。特に、光によって強誘電性・磁性・光学特性の超高速制御が実現できれば、新しい全光型スイッチング素子等への応用が期待出来る。

磁性強誘電体において新しい機能を実現するためには、誘電率や磁化などの物理量の平均値を測定することだけでは不十分であり、磁性強誘電体ならではの強誘電・磁気ドメインを実空間で観察し、ピコ秒から数秒の時間スケールでドメイン構造が外場によって変化するダイナミクスを明らかにすることが重要な課題である。特に、磁性強誘電体においては、ドメイン壁近傍の電気分極や磁化が、非自明なドメイン構造を形成することで安定化していると考えられている。このような従来の強誘電体や磁性体と質的に異なる磁性強誘電体の特徴的なドメイン構造を明らかにするためには、従来の測定では実現できない時間分解能が高く、かつドメインのベクトル方向を決定できる新たな観察手法の開発が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、申請者が独自に発展させてきたテラヘルツ技術に立脚した新たな強誘電・磁気ドメイン可視化手法によって磁性強誘電体のドメイン観察手法を確立した上で、光パルスによるドメインの超高速制御に挑戦する。

3. 研究の方法

磁性強誘電体に特徴的な新しい機能を引き出し、強誘電性、磁性、光学特性を顕在化することは、新たな産業用途の創出につながる重要な研究テーマであると考えられる。従来、光照射によって劇的な相転移現象が誘起されることが、強誘電体ならびに磁性体において独立に知られている。実際、ポンプ・プローブ分光法などの従来の研究手法を用いて、光励起後の反射スペクトル等を測定することで、そのダイナミクスを議論することが行われていった。しかしながら、磁性強誘電体における強誘電特性、磁気特性、光学特性を理解すること、さらに進んで制御するためには、上記のような物理量の平均値を測定することだけでは不十分で、強誘電ドメインや磁気ドメインを実空間で観察し、そのドメイン構造が外場によって変化するダイナミクスを明らかにすることが必要不可欠である。

磁気ドメインを可視化するために、申請者が最近見出したフェムト秒レーザー照射によるテラヘルツ電磁波放射現象を利用する。

この手法は、磁気双極子放射を利用して、磁化の方向に依存して、放射したテラヘルツ電磁波の位相が反転することを利用している。このような新しい計測手法によって磁気ドメインの新しい可視化手法を開発する。

4. 研究成果

本研究では、磁性と強誘電性を示す数々の磁性強誘電体における巨視的な磁気ドメインの「光による制御」に挑戦した。そのためには、強誘電・磁気ドメインを実空間で観察し、ピコ秒から数秒の時間スケールでドメイン構造が外場によって変化するダイナミクスを明らかにすることが重要な課題である。

このような観点から、(1)フェムト秒レーザー励起によるテラヘルツ電磁波発生現象の探索、(2)テラヘルツ電磁波発生を利用した磁気ドメインイメージング手法の開発を行った。数々の磁性体(LiFe₅O₈、BaFe₁₂O₁₉、BiFeO₃など)を対象として、具体的に、以下の研究成果を得た。

(1) 磁性体からの磁化変調によるテラヘルツ電磁波発生

室温において、Ti:sapphire パルスレーザー(パルス幅 100 fs, 中心波長 800 nm, 繰り返し周波数 80 MHz)を照射すると、フェリ磁性を示す強誘電体 LiFe₅O₈ からのテラヘルツ電磁波放射現象の観測に初めて成功した(図1)。テラヘルツ帯や赤外・可視域における光学特性やテラヘルツ電磁波放射特性を測定し、テラヘルツ電磁波放射機構が、フェムト秒レーザー励起による高速磁化変調による磁気双極子放射であることを明らかにした。特徴的なことは、磁化の反転によって放射したテラヘルツ電磁波の位相が反転することを見出したことである。図1(b)にその結果を示す。図1(c)の○は、0 psにおけるテラヘルツ電場振幅の磁場依存性であり、実線で示す測定試料の磁化依存性と対応していることがわかる。

さらに、磁性絶縁体においてテラヘルツ電磁波放射現象の探索を行ったところ、強誘電性を示さないフェリ磁性体 BaFe₁₂O₁₉ からも、磁気双極子放射によってテラヘルツ電磁波が発生することを初めて見出した。磁性体からも普遍的にテラヘルツ電磁波が発生することは、予期していなかった発見であった。

また、光整流効果を利用することで、磁性強誘電体である BiFeO₃ からのテラヘルツ電磁波発生にも成功した。

(2) 磁性体からの磁化変調によるテラヘルツ電磁波発生を利用した磁気ドメインの可視化

磁気特性を超高速に制御するためには、磁化などの物理量の平均値を測定することだけでは不十分であり、磁気ドメインを実空間で観察し、ピコ秒から数秒の時間スケールでドメイン構造が外場によって変

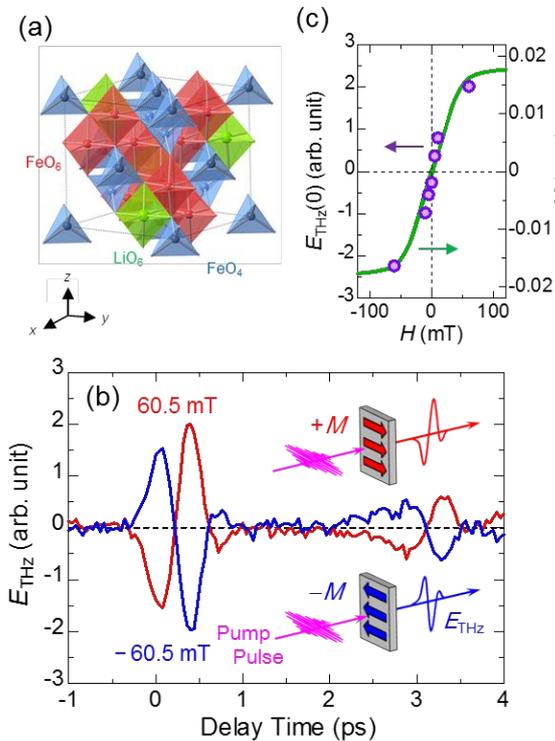


図1. 室温でフェリ磁性を示すLiFe₅O₈からのテラヘルツ電磁波発生。(a) 結晶構造。(b) 磁場の反転によって観測したテラヘルツ電磁波波形が反転する。(c) 放射したテラヘルツ電磁波と磁化の磁場依存性。

化するダイナミクスを明らかにすることが重要な課題である。このような現状の中、試料を二次元的に走査しテラヘルツ電磁波振幅の場所依存性を測定したところ、今回、サブピコ秒の時間分解能で、磁化ベクトルが簡便に可視化できることを見出した。すなわち、磁化ベクトルの方向を決定することのできる新たな磁気ドメインイメージング手法を開発した。

LiFe₅O₈において、磁化容易化軸に磁場を印加した実験を行ったところ、磁場の反転によって放射したテラヘルツ電磁波の位相が反転することを見出した [図 1(b), 1(c)]。これを利用すると、テラヘルツ電場 E_{THz} を測定することのみで、磁化の方向を区別して磁気ドメインを可視化できることが予想される。図 2(a)に測定原理を示す。出射したテラヘルツ電磁波をワイヤグリッド偏光子を用いて、ベクトル分解することで、テラヘルツ電場ベクトルを決定した。実際、ラスタースキャン法によって E_{THz} の場所依存性を測定すると、光学顕微鏡像 [図 2(b)] では判別できない磁気ドメインが簡便に可視化できることがわかった。図 2(c)には、測定したテラヘルツイメージング像、図 2(d)には、テラヘルツベクトル像、すなわち磁化ベクトル像を示す。

このように、磁性体からのテラヘルツ電磁波発生に成功し、それを利用した新しい磁気ドメイン可視化法を開発したことによって、磁気ドメインの光制御に関して、重要な基盤が築けたと考えている。

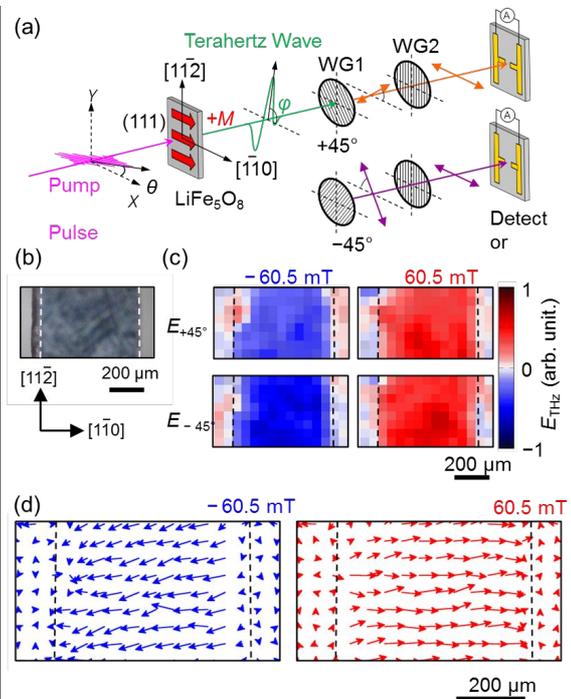


図2. 室温でフェリ磁性を示すLiFe₅O₈からのテラヘルツ電磁波発生を利用した磁気ドメインイメージング。(a) 測定の原理。(b) 光学顕微鏡像。(c) 磁場下によるテラヘルツ電場振幅イメージング。(c)のイメージより見積もった(d) 磁気ドメインのベクトルイメージング。

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 1 件)

Y. Kinoshita, N. Kida, M. Sotome, T. Miyamoto, Y. Iguchi, Y. Onose, and H. Okamoto, “Terahertz Radiation by Subpicosecond Magnetization Modulation in the Ferrimagnet LiFe₅O₈”, ACS Photonics 3, 1170-1175 (2016). (査読有)

〔学会発表〕(計 9 件)

貴田徳明, “磁化変調による磁性体からのテラヘルツ電磁波発生とそれを利用した磁気ドメインの可視化”, (シンポジウム - テラヘルツ科学の最先端 - 三国観光ホテル, 福井県坂井市, 2016年11月23日~25日) (招待講演)
Y. Kinoshita, N. Kida, M. Sotome, N. Ito, T. Miyamoto, T. Terashige, Y. Iguchi, Y. Onose, T. Ito, Y. Tokunaga, T. Arima, H. Okamoto, “Terahertz radiation by subpicosecond magnetization modulation in ferrimagnets”, (ICMM2016 The 15th International Conference on Molecule-Based Magnets, Sendai International Center, Sendai, Miyagi, September 4-8, 2016) (ポスター発表)
木下雄斗, 貴田徳明, 宮本辰也, 加納学, 笹川崇男, 岡本博 “ラシュバ型極性半導体 BiTeBr における円偏光フェムト

秒レーザー誘起スピン偏極電流変調によるテラヘルツ電磁波発生”, (日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月 17 日 ~ 20 日)

木下雄斗, 伊藤望, 宮本辰也, 貴田徳明, 徳永祐介, 有馬孝尚, 岡本博, “フェムト秒レーザー誘起高速磁化変調を利用したフェリ磁性体 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ における磁化ダイナミクスの観測”, (日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016 年 9 月 13 日 ~ 16 日)

木下雄斗, 貴田徳明, 宮本辰也, 伊藤利充, 岡本博, “フェムト秒レーザー誘起テラヘルツ電磁波発生を利用した BiFeO_3 単結晶における強誘電分極ドメインの可視化”, (日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日 ~ 22 日)

宮本辰也, 木下雄斗, 山川大路, 森本剛史, 伊藤利充, 岩野薫, 貴田徳明, 岡本博, “テラヘルツ電場による BiFeO_3 単結晶の超高速分極変調”, (日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日 ~ 22 日)

木下雄斗, 伊藤望, 寺重翼, 宮本辰也, 貴田徳明, 徳永祐介, 有馬孝尚, 岡本博, “ $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ におけるフェムト秒レーザー誘起高速磁化変調によるテラヘルツ電磁波発生”, (日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日 ~ 22 日)

木下雄斗, 貴田徳明, 宮本辰也, 矢田祐之, 井口雄介, 小野瀬佳文, 岡本博, “フェムト秒レーザー誘起高速磁化変調によるテラヘルツ電磁波発生を利用したフェリ磁性体 LiFe_5O_8 における磁化ダイナミクスの観測”, (日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015 年 9 月 16 日 ~ 19 日)

N. Kida, “Terahertz radiation by ultrafast magnetization modulation in magnetic insulators”, (The 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2015) and The 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 6), Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST), Onna-Son, June 30-July 4, 2015) (招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

貴田 徳明 (KIDA NORIAKI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号 : 30587069