

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K15159

研究課題名（和文）フェムト秒レーザー励起テラヘルツ波発生を利用した電気磁気ドメインの観測

研究課題名（英文）Observation of multiferroic domains using terahertz radiation induced by the femtosecond laser

研究代表者

木下 雄斗（Kinoshita, Yuto）

東京大学・物性研究所・特任助教

研究者番号：90825340

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）：磁性強誘電体の電気磁気ドメイン可視化に向けて、フェムト秒レーザーのYbファイバーモード同期レーザーを光源とした用いてシングルショットテラヘルツ波発生光学系の作成を試みた。また、電気磁気ドメインの可視化に向けて、電場によって発現する磁化を磁気光学センサおよび偏光顕微鏡を用いて空間分解して直接観測することで、反強磁性体Cr203の電気磁気ドメイン観測を試みた。その結果ネール温度以下で数百 $\mu\text{m}$ サイズのドメイン構造を観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

将来新しいメモリなどへの応用が期待される磁性強誘電体内部に生じる電気磁気ドメインに関して、今回シングルショットテラヘルツ波発生光学系を用いた観測には至らなかったものの、通常的手法での観測が困難である電気磁気ドメインを電場印加と偏光顕微鏡を用いて観測することに成功した。テラヘルツ波発生による観測の試みも今後続けていく予定であり、磁性強誘電体のデバイス応用や基礎学理の解明に向けて本研究による可視化手法の開発は学術的にも社会的にも意義深い。

研究成果の概要（英文）：To visualize the electromagnetic domain of multiferroics, we have attempted to construct an optical system for single-shot terahertz wave generation using a femtosecond Yb fiber mode-locked laser as a light source. In addition, to visualize the electromagnetic domain of Cr203, we attempted to observe the magnetization induced by an electric field using a magneto-optical sensor and a polarizing microscope to visualize the spatial distribution of the magnetization. As a result, a domain structure with size of several hundred micrometers was observed below the Neel temperature.

研究分野：固体物理

キーワード：テラヘルツ科学 マルチフェロイクス

## 1. 研究開始当初の背景

磁性と強誘電性を同時に発現する磁性強誘電体が数多く見出されており、この物質群ではスピン軌道相互作用や交換歪等の機構を通じ、スピン秩序に由来して強誘電性が発現することが知られている。すなわち磁性と強誘電性の間に強い相関が存在する。さらに磁性強誘電体では光の電場成分によって駆動される素励起であるエレクトロマグノンが見出されている。エレクトロマグノンは主にテラヘルツ帯に共鳴振動数を有しており、テラヘルツパルスの電場成分によって共鳴励起することで、通常の磁性体や強誘電体では不可能な磁気ドメイン・分極ドメインの超高速制御が実現できる可能性がある。これらの実現によって、ドメインを利用した全光スイッチや超高速応答可能な磁気メモリといった広範囲な応用が期待される。

しかしながら、磁性強誘電体のように磁気ドメイン・分極ドメインがクランプした状態におけるドメイン構造については未だわかっていない部分が多くある。例えば、磁性体における磁気ドメインにおいては、ネール壁もしくはブロッホ壁によって磁気ドメインが隔てられるが、古典電磁気学に従えば強誘電体ではそのようなドメイン構造は禁制である。前述した光による超高速制御実現のためには、磁性強誘電体特有のドメイン構造を実空間で観察し、電場や磁場といった外場を加えることでどのような応答をするかを明らかにすることが必要不可欠である。さらに、ドメイン構造が光照射によって超高速に変化するダイナミクスを時間分解して観測しなければならない。しかしながら、従来の可視化ドメイン可視化手法では、磁気ドメイン・分極ドメインの双方を観測することが難しい。

## 2. 研究の目的

本研究では、磁性強誘電性を示す酸化物に着目し、そのドメインの動力学を明らかにするためにフェムト秒レーザー照射によるテラヘルツ波発生現象を利用した新たな電気磁気ドメインの可視化技術を開拓し、電場や磁場といった外場下応答を明らかにすることを目的とする。さらに、電気磁気ドメインの「光による超高速制御」を目指す。

## 3. 研究の方法

フェムト秒レーザー励起によるテラヘルツ波発生を利用して電気磁気ドメインを可視化する。具体的には、分極に由来した成分と磁化に由来した成分を独立に測定することで分極ドメインおよび磁気ドメインの可視化を行う。ドメイン構造可視化の空間分解能はフェムト秒レーザーの集光径によって決まる。対物レンズを用いることで1  $\mu\text{m}$  程度の空間分解能が実現可能である。さらに、本計画では新たにポンプパルスを導入し、ポンプ光照射後のドメインダイナミクスを明らかにする。測定的时间分解能はサブピコ秒程度であり、ポンプ光照射によるドメインの超高速応答観測が可能となっている。

## 4. 研究成果

### (1) Yb ファイバーレーザーを用いたテラヘルツ波発生光学系の構築

磁性強誘電体の電気磁気ドメイン可視化にむけてテラヘルツ波発生の光学系構築を行った。テラヘルツ発生にはフェムト秒レーザー励起による光整流過程を利用する。フェムト秒レーザーにはYb ファイバーモード同期レーザーを用いた。Yb ファイバーレーザーはオシレータ、アンプ、コンプレッサーで構成されており、オシレータで発生させたレーザー光の出力をアンプで増幅し、コンプレッサーにおいてレーザーのパルス幅を $\sim 100$  fs程度まで圧縮する。これらのレーザーシステムは物性研究所の小林研究室より作成方法を提供いただき、自作した。オシレータから発生するレーザー光は、繰り返し周波数100 MHz、パルス幅 $\sim 200$  fs、パワー50 mW、中心波長1040 nmである。オシレータから出力されたレーザー光はアンプにおいてパワー1 W程度まで増幅され、コンプレッサーにおいて120 fs程度までパルス幅を圧縮し出力される。電気磁気ドメイン可視化ならびにパルス磁場、パルス電場下でのドメインダイナミクス観測にはシングルパルスでのテラヘルツ発生光学系の構築が必要不可欠である。その前段階として、通常のテラヘルツ発生で用いられるステップバイステップによる手法による光学系構築は必要となる。これは、可動ステージによりテラヘルツ波と、テラヘルツ検出に用いるプローブ光の光路長を走査することでテラヘルツ波の時間波形を取得するものである。検出にはE0 サンプリングを用い、E0 結晶としてGaPを用いる。また、テラヘルツ波発生には非線形光学結晶にフェムト秒レーザーを照射した際に生じる光整流効果を用い、結晶としてGaPを用いた。ステップバイステップによる光学系については一度構築できたものの、その後レーザートラブルが生じ、現在本手法によるテラヘルツ波発生光学系構築には至っていない。今後も構築を進め、最終的にシングルショットによるテラヘルツ波発生光学系構築を目指す。

## (2) 偏光顕微鏡を用いた磁気光学イメージングによる電気磁気ドメインの観測

電気磁気ドメインの可視化に向けて、電場によって発現する磁化を磁気光学センサおよび偏光顕微鏡を用いて空間分解して直接観測することを試みた。対象として  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  に着目した。 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  はコランダム構造を有し、307K 以下で Cr のスピンの  $c$  軸方向に反強磁性秩序を形成する。反強磁性相では線形の電気磁気効果を示すことが知られ、電場  $E$  によって誘起される磁化  $\Delta M$  は、線形の電気磁気テンソル  $\alpha_{33}$  を用いて  $\Delta M = \alpha_{33}E$  と表される。二種類の反強磁性ドメインが存在し両方で電気磁気効果の符号は反転する。試料に張り付けた磁気光学センサを偏光顕微鏡観察し、磁化成分の漏れ磁場による偏光回転を空間分解することでドメイン観察を行った。図(a)に実験配置の模式図を示す。280 K における測定結果を図(b)に示す。赤い領域では  $\alpha_{33}$  がプラス、青い領域では  $\alpha_{33}$  がマイナス、白い領域はドメイン壁を表す。図(b)から明らかなようにネール温度以下で数百  $\mu\text{m}$  サイズのドメイン構造を観測することに成功した。本手法は電気磁気効果を介して電場で誘起される磁化成分を直接観測している。本研究では主に分極成分に由来したテラヘルツ放射を介した電気磁気ドメイン観測を目指していた。本手法によって、将来的な電気磁気ドメイン観測に向けて磁化成分からもアプローチ可能となることから非常に意義のある結果が得られた。

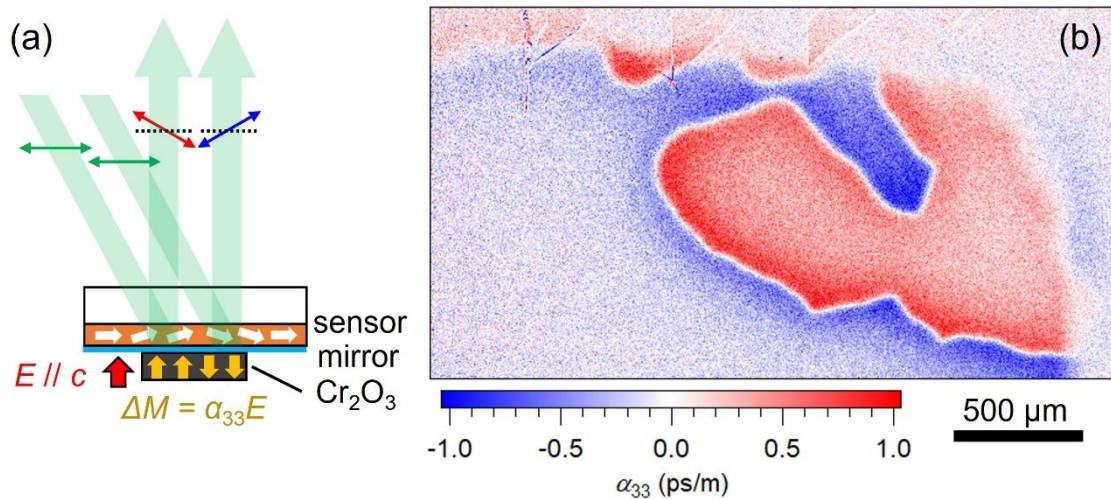


図 (a) 実験配置の模式図。(b) 280 K における  $\alpha_{33}$  の空間分布。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuto Kinoshita and Masashi Tokunaga
2. 発表標題 Direct observation of the spatial distribution of the magnetoelectric effect using a polarizing microscopy with a magneto-optical sensor
3. 学会等名 International Conference on Magnetism 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------------------------	-----------------------	----

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