

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340070

研究課題名(和文) 高速・高精度・広時間域スピンドYNAMICS イメージング計測装置の開発と応用

研究課題名(英文) Development and application of high speed, high accuracy, and time-dependent spin dynamics imaging measurement system

研究代表者

渡邊 紳一 (Watanabe, Shinichi)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：10376535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,600,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ電磁場によって誘起される磁性体構造内部の磁化の動的な挙動を計測するための技術開発を行った。顕微磁気光学イメージング計測装置や交流電流印加装置を駆使してパーマロイ薄膜ディスク中の磁気渦構造の静的および動的挙動についてのプローブ技術を開発し、さらに、高強度テラヘルツパルス電磁場照射実験によってその変化の様子を調べた。また、テラヘルツ周波数帯域における新規偏光計測手法を開発および深化させ、将来の偏光テラヘルツ電磁場を用いた磁化制御に向けた基礎固めを行った。

研究成果の概要(英文)：We developed a technology in order to measure a dynamic behavior of the magnetic structure induced by the intense terahertz pulse irradiation. We developed a magneto-optic imaging microscope system and current-induced rectifying signal measurement system in order to probe the static and dynamic behavior of the vortex core in a thin-film permalloy disk sample. We applied an intense terahertz pulse field to the sample, and investigate the structural change. Moreover, we developed a terahertz polarization measurement system for the future magnetic control by using the polarized terahertz electromagnetic field.

研究分野：光物性物理学

キーワード：高速スピン制御 テラヘルツ波

1. 研究開始当初の背景

微細加工技術の進歩により、ハードディスク等磁気デバイスの小型化と情報書き込み速度向上への要求が年々高まっている。研究開始当初、磁気渦の中心スピン方向を記録媒体に用い、ナノ秒(=ギガヘルツ帯)~ピコ秒(=テラヘルツ帯)の瞬時磁場トルクで高速にスピン反転させ情報を書き込む技術が提案されていた。スピン反転動作には「スピン歳差運動」「磁気渦の運動」が重要な役割を果たし、マイクロマグネティクス計算による数値解析や、光カー回転法によるダイナミクス検証が行われていた。磁性体以外でも、スピン軌道相互作用の大きい半導体ピスマス化合物における弱磁場下での円偏光テラヘルツ光照射による、量子直接遷移を利用したスピン偏極電流生成が予測されていた。また逆ファラデー効果によるパーマロイマイクロディスクのピコ秒オーダーでの磁化反転も理論的に予測されていた。

以上のように「電波」と「光」の間にあるテラヘルツ帯域の光を「古典論的ピコ秒瞬時磁場」あるいは「量子論的低エネルギー光」とみなして高速スピン制御を目指す研究が幕を開けつつあった。

2. 研究の目的

以上に記した背景の下、申請者は「テラヘルツ光ポンプ-近赤外光プローブ計測技術」を発展させ、波形整形したテラヘルツ電磁場によって誘起されるスピン運動のダイナミクスを近赤外プローブパルスによって空間分解イメージング計測する技術を開発することを目的に研究を行った。特に、レーザー再生増幅器とLiNbO₃を中心とした近年の高強度テラヘルツパルス発生技術の進展に鑑み、ピコ秒持続する瞬時磁場をポンプ源として用い、その後のスピン挙動について近赤外光プローブを用いて時空間分解して観測・評価することを目指した。

3. 研究の方法

「空間分解能」、「計測可能プローブ時間領域」、「偏光分析能力」すべての項目について最高性能を持つテラヘルツ光磁気ポンプ・近赤外光偏光プローブイメージング計測装置の確立を目指した。平成25年度以降は、磁性体材料のテラヘルツ光ポンプ実験を行い、得られたデータを解析した。

4. 研究成果

(1) 400 nmの空間分解能を有する顕微磁気光学イメージング計測装置の開発(学会発表[8])

動的なスピンダイナミクスを検証するための前駆研究として、静的な磁性体薄膜マイクロディスクの顕微磁気光学イメージング計測装置を開発し、イメージング計測を行った。サンプルは、シリコン基板上に真空蒸着で作製した直径10 μm、厚さ20 nmのパーマロイ(Fe₁₉Ni₈₁)薄膜ディスクを用いた。顕微鏡システムを構築することでサンプルを常時観察しながら、PC制御でディスクの面内方向に静磁場をかけることができる装置を開発した。

磁気光学イメージング計測用の光源としては、パルス幅90 fs、繰り返し周波数80 MHzのTi:Sapphireレーザーの第二高調波(波長400 nm)を用いた。偏光子を通して直線偏光にした光源を、顕微鏡システムを通してサンプルに対して斜めから照射し、反射した光を検光子に通した後にCCDカメラを用いてイメージング計測を行った。検光子の検出偏光方向は、偏光子の透過偏光方向とほぼ垂直になるようにし、磁化の存在に起因する光源のわずかな磁気カー回転を計測できるようにした。なお、顕微磁気光学イメージングの空間分解能は約400 nmであり、波長程度の高空間分解能での磁気光学イメージング計測が可能である。

図1は、図のY方向に1.44 mTの静磁場をかけたときの、パーマロイ薄膜ディスクの磁気光学イメージである。我々は、まずサンプルに10 mTの静磁場をかけディスクをY方向に一樣に磁化したときのCCDカメラ上の光の強度分布を参照画像として保存し、静磁場1.44 mT印加時のCCDカメラ上の光の強度分布との間で差分信号を計算した。図1の白黒の明暗は、以上の方法で計算した差分信号イメージをあらわしている。図1のイメージでは、円形部分で示されたパーマロイ薄膜ディスクの左側部分に明暗の境があることに特徴があり、この部分は外部磁場の大きさや向きを変えて計測すると左右に移動した。

一般にパーマロイマイクロディスク上に形成される磁気渦構造では、磁化が円盤に沿って図のXY平面内を渦を巻くように整列し、渦の中心では磁化が面直方向(図の±Z方向)を向くことが知られている。我々はディスク左側の明暗の境がある点を磁気渦の中心と判断し、さらに、印加した外部磁場の方向と渦中心の移動方向との関係から、磁気渦構造のスピン旋回方向を判別することができた。

以上のように、波長程度の空間分解能を持つ磁気光学イメージング装置を構築し、パーマロイ薄膜ディスク上に形成された磁気渦構造とその旋回方向を明瞭に観測することに成功した。本イメージング計測ではフェムト秒パルス光源を用いているため、ポンププローブ法と組み合わせれば、動的な磁気渦運動の観察も可能である。

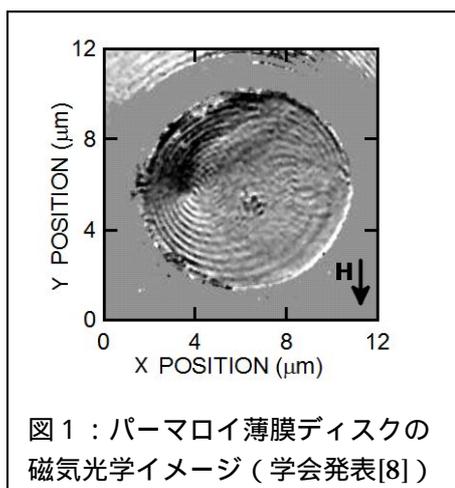


図1：パーマロイ薄膜ディスクの磁気光学イメージ（学会発表[8]）

（2）中心磁化方向を判別するための局所プローブ顕微鏡および小型電気計測装置の開発（学会発表[1], [11]）

本研究テーマの一つの大きな目標は、テラヘルツ光ポンプによって、パーマロイ薄膜ディスクに形成される磁気渦構造の中心磁化を反転させることである。中心磁化反転を確認するためには、その向きを適切にプローブする手法の開発が欠かせない。中心磁化の直径は数十 nm 程度と極めて小さく、通常の顕微磁気光学イメージングシステムではその向きを観察することは難しい。実際、（1）に記した装置の開発によって、磁気渦の旋回方向のプローブには成功したものの、同装置では中心磁化の向きを判別することはできなかった。そこで下記に示す二つの方法を用いてパーマロイ薄膜ディスク上の磁気渦中心磁化を判別する方法の開発を行った。

一つ目の方法として、近接場磁気光学信号検出による中心磁化の向きの判別を目指した。その準備として原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscopy: AFM)の開発を行った。計測自由度を高めるために、すべての構成部品を個別に調達することで、自ら系を構築した。具体的には、AFM 探針をその共振周波数近傍の固定周波数で加振し、振動する探針に参照レーザー光を照射し、反射したレーザー光の位置を分割フォトダイオードで検出することで、その振動の様子をとらえた。探針とサンプルが近づくと、探針の共振周波数が低下することが原因で、検出信号の振幅と位相が変化する。この検出信号の変化を指標として

フィードバック制御をかけ、探針-サンプル間の距離を一定に保つようにする系を構築した。本 AFM 装置開発によって薄膜ディスクの表面トポグラフィ計測や、AFM 探針先端における電場増強効果を利用した光の回折限界以下（およそ 100 nm）の領域での局所的な磁性体破壊のデモンストレーションに成功した。一方で、磁気渦中心における面直磁化の向きについてはプローブすることはできなかった。

次に、過去の文献(M. Goto *et al.*, Phys. Rev. B vol. 84, 064406 (2011).)を参考に、パーマロイ薄膜ディスク上に取り付けられた電極端子を通して試料に交流電流を流し、磁気渦の旋回運動に起因する整流信号を各周波数ごとに計測したときのスペクトル形状から、中心磁化の向きを判断できる装置の開発を行った。

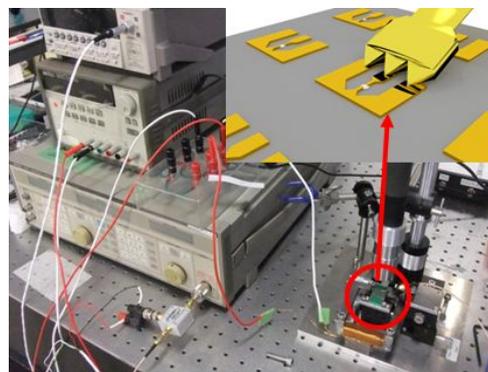


図2：パーマロイ薄膜ディスクの中心磁化電気計測装置の写真および模式図（学会発表[1]）

図2に、開発した中心磁化電気計測装置の写真と模式図を示す。模式図に示すように、パーマロイ薄膜ディスク上に金属電極を蒸着し、プローバーを通してサンプルに交流電流を流す。交流電流の印加は信号発生器を用いて行い、その周波数を主に 60-100 MHz の範囲で掃引しながら計測を行った。その結果、交流電流の周波数が 80 MHz 近傍で、磁気渦の旋回運動に起因する整流信号のピークが観測され、その符号から中心磁化の符号を判別することに成功した。

なお、電気計測装置を構成するすべての機器を可搬化できるように小型化した。次の（3）で示すカナダモントリオールの Advanced Laser Light Source(ALLS)における実験では、上記の小型・可搬化した装置を慶應義塾大学からモントリオールに郵送し、テラヘルツパルス光照射実験後のディスク中心磁化をオンサイトで確認できるようにした。

(3) パーマロイ薄膜ディスクにおける高強度テラヘルツパルス光照射実験 (学会発表[1])

我々は高強度テラヘルツパルス光印加に伴う磁気渦の磁化反転の有無を確認するため、カナダモントリオールの Advanced Laser Light Source(ALLS)において高強度テラヘルツパルス光を照射する実験を行った。これは、瞬時磁場数十 mT に相当するピコ秒パルス磁場を印加したときと同等の効果を試料に与えるものである。

我々はパーマロイ薄膜ディスク試料、および(2)で説明した中心磁化電気計測装置を ALLS に運び、オンサイトで高強度テラヘルツパルス光を照射した直後に電気計測を行うことで、中心磁化の反転の有無を判断する実験を行った。ALLS では、レーザー再生増幅器の出力を光伝導アンテナに照射する方式で高強度テラヘルツパルスを発生させた。実験開始当初は光電動アンテナの高電圧印加に伴って発生する電磁ノイズによって試料が破壊されるなどの困難を伴ったが、テラヘルツパルス光照射時にプローバーを試料から離すなどの工夫を行った結果、瞬時磁場 39 mT のピコ秒パルス磁場を試料に照射することが可能となった。

実験では、瞬時磁場 36 mT 以下のピコ秒パルス磁場を印加しても、中心磁化の上下の向きへの反転は実現しないことが、電気計測によって明らかになった。一方で瞬時磁場 39 mT のピコ秒パルス磁場を試料に照射すると、電気計測信号に大きな変化が表れた。電子顕微鏡による観察の結果、パーマロイ薄膜表面が、電気計測のために取り付けた金属電極の近傍を中心に破壊されていることが分かった(図3)。時間領域差分法(FDTD法)による電磁界シミュレーションの結果、破壊が起きた部分ではテラヘルツ光の電場成分が集

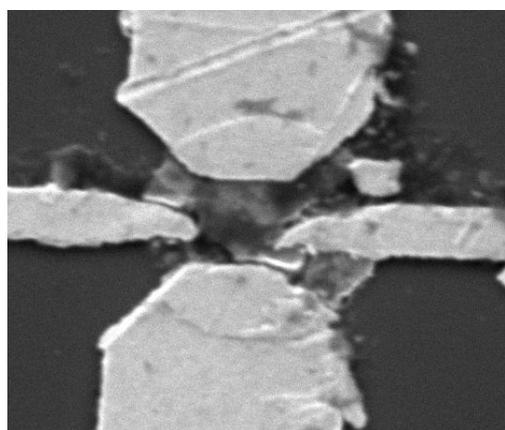


図3：瞬時磁場 39 mT のピコ秒パルス磁場印加後のパーマロイ薄膜ディスクの電子顕微鏡写真(学会発表[1])

中することが明らかとなり、テラヘルツ光の磁場成分ではなく、電場成分が電極近傍に集中することで試料の破壊が起こったことが推測された。

(4) テラヘルツ周波数帯域における新規偏光計測手法の開発(論文[1]-[6])

将来のテラヘルツ光ポンプにおける磁化制御を実現するためには、照射するテラヘルツ光の偏光状態を制御し、それを正確に計測する技術が不可欠である。研究代表者は自ら発明した電気光学結晶の結晶構造対称性を利用した高速テラヘルツ電場ベクトル計測装置について理論・実験の両面から様々な考察と装置の改善を行った。その結果、テラヘルツ光とプローブ光に対する結晶内の屈折率の違いに起因する位相不整合の効果や、結晶内の残留複屈折の効果を取り入れた解析方法の考案[1,4]や、瞬時ベクトル電場ベクトルイメージング[2]、電気光学変調器を用いた高速ベクトル時間波形計測[3]、高繰り返しレーザーを用いた計測手法の考案[5]など、様々な実績を残した。

以上、本研究はテラヘルツ光ポンプ - 近赤外光プローブ計測技術による磁性体の高速磁化制御を目指し、試行錯誤を繰り返しながら様々な装置開発を行った。研究開発期間内で、テラヘルツパルス光照射に伴う明瞭な磁化の変化をとらえることはできなかった。しかしながら、本開発で得られた知見は、将来の高速磁化制御に向けて有用であり、今後の継続的な研究によって成果が期待できるものである。

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 6件)

[1] K. Oguchi, N. Yasumatsu, and S. Watanabe

"Polarization detection of terahertz radiation via the electro-optic effect using zinc-blende crystal symmetry."

J. Opt. Soc. Am. B **31**, 3170-3180 (2014).

査読有

DOI: 10.1364/JOSAB.31.003170

[2] M. Takai, M. Takeda, M. Sasaki, T. Tachizaki, N. Yasumatsu, and S. Watanabe
"Video-rate terahertz electric-field vector imaging."

Appl. Phys. Lett. **105**, 151103 (2014).

査読有

DOI:10.1063/1.4897996

[3] N. Yasumatsu, A. Kasatani, K. Oguchi, and S. Watanabe

"High-speed terahertz time-domain polarimeter based on an electro-optic

modulation technique."
[Appl. Phys. Express](#) **7**, 92401 (2014).
査読有
DOI:10.7567/APEX.7.092401
[4] N. Yasumatsu, and S. Watanabe
"Robustness of electric field vector sensing of electromagnetic waves by analyzing crystal angle dependence of the electro-optic effect."
[J. Opt. Soc. Am. B](#) **30**, 2940-2951 (2013).
査読有
DOI:10.1364/JOSAB.30.002940
[5]S. Watanabe, N. Yasumatsu, K. Oguchi, M. Takeda, T. Suzuki, and T. Tachizaki
"Real-time terahertz time-domain polarization analyzer with 80-MHz repetition-rate femtosecond laser pulses."
[Sensors](#) **13**, 3299-3312 (2013).
査読有
DOI:10.3390/s130303299
[6] 渡邊紳一, 安松直弥
「回転検出結晶法によるテラヘルツ光の高速・精密偏光計測法の開発」, 固体物理 47巻 737-746 (2012)
査読有
<http://www.agne.co.jp/kotaibutsuri/kota1047.htm#no561>

〔学会発表〕(計 12 件)
[1] 曾澤将昇, 立崎武弘, Xavier Ropagnol, Hadi Razavipour, 尾崎恒之, David Cooke, 能崎幸雄, 渡邊紳一
「強磁性体磁気渦構造への高強度テラヘルツ光パルス照射実験」
日本物理学会第 70 回年次大会(早稲田大学・東京都新宿区)24aCN-8(2015 年 3 月 24 日).
[2] 高井茉莉子, 渡邊紳一
「ビデオレートテラヘルツ電場ベクトルイメージング装置の構築」
第 62 回応用物理学会春季学術講演会(東海大学・神奈川県平塚市)
13p-A14-4(2015 年 3 月 13 日).
[3] (招待講演) 渡邊 紳一, 安松直弥, 笠谷敦, 小口研一
「テラヘルツ時間領域偏波計測技術の開発」
テラヘルツテクノロジーフォーラム平成 26 年度第 2 回技術セミナー
(大阪産業大学梅田サテライトキャンパス・大阪府大阪市)(2014 年 12 月 15 日).
[4] (招待講演) 渡邊紳一
「テラヘルツ光ベクトル波形計測技術開発と物性科学への応用」
平成 26 年度第 2 回光・量子デバイス技術委員会 研究会
(岡山理科大学・岡山県岡山市)
(2014 年 10 月 7 日).
[5] 小口研一, 安松直弥, 渡邊紳一
「電気光学検出における楕円偏光テラヘルツ波の位相整合の検証」
日本物理学会第 69 回年次大会(東海大学・

神奈川県平塚市) 29pPSA-59
(2014 年 3 月 27 日-30 日).
[6] 小口研一, 安松直弥, 渡邊紳一
「位相整合条件を考慮した回転電気光学結晶法の理論と検証実験」
第 61 回応用物理学会春季学術講演会(青山学院大学・神奈川県相模原市) 18p-E17-3
(2014 年 3 月 17 日-20 日).
[7] 安松直弥, 渡邊紳一
「回転 EO 結晶法によるテラヘルツ電場ベクトル計測のロバスト性の検証」
第 74 回応用物理学会秋季学術講演会(同志社大学・京都府京田辺市) 18a-A14-6
(2013 年 9 月 16 日-20 日).
[8] 曾澤将昇, 立崎武弘, 後藤穰, 渡邊紳一, 能崎幸雄
「パルスレーザーを用いたパーマロイ薄膜ディスクの磁気渦イメージング計測」
第 37 回日本磁気学会学術講演会(北海道大学・北海道札幌市) 5pF-15
(2013 年 9 月 3 日-6 日).
[9] K. Oguchi, N. Yasumatsu, M. Takeda, T. Tachizaki, and S. Watanabe,
"An oscillator based real-time terahertz time-domain polarization measurement system with a spinning electro-optic crystal," International Workshop in Terahertz Science and Technology 2013 (Kyoto Terrsa・京都府京都市)(2013 年 4 月 1 日-5 日)
[10] 小口研一, 安松直弥, 竹田雅俊, 立崎武弘, 渡邊紳一
「高繰り返しフェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ波偏光計測装置の開発」 第 60 回応用物理学会春季学術講演会(神奈川県厚木市)(2013 年 3 月 29 日)
[11] 宮崎貴洋, 立崎武弘, 渡邊紳一
「高空間分解能を持つ局所分光計測に向けたプローブ顕微鏡の設計と開発」 日本物理学会第 68 回年次大会(広島大学・広島県東広島市)(2013 年 3 月 28 日)
[12] N. Yasumatsu, and S. Watanabe,
"Precise polarization measurements of terahertz electromagnetic waves with a spinning electro-optic crystal: theory, experiments, and applications," International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT 2012) (東大寺文化会館・奈良県奈良市)(2012 年 11 月 28 日)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 1 件)

名称: 電磁波の偏光方位計測方法及び装置
発明者: 渡邊紳一, 安松直弥, 碓智文
権利者: 同左
種類: 特許

番号：特願 2014-178942
出願年月日：2014 年 9 月 3 日
国内外の別：国内

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/watanabe/index.html>

6．研究組織

(1)研究代表者

渡邊 紳一 (WATANABE SHINICHI)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号：10376535

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし