

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656043

研究課題名(和文) テラヘルツ波パルスによる近接磁場効果と磁気イメージング

研究課題名(英文) Nearfield magnetic effect of THz pulses and magnetic THz imaging

研究代表者

中嶋 誠 (Nakajima, Makoto)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40361662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、テラヘルツ波パルスを用いた時間領域分光法に、近接場効果を加えて、高感度検出や高空間分解能化に関する研究を行った。磁性体を近接場プローブに用いること、および磁性体におけるスピンドイナミクスを測定対象として研究を進めた。金属探針を用いた近接場イメージングシステムの開発をはじめ、磁性体 Ba ferrite を探針とした近接場顕微鏡の開発を行った。磁性体表面に金属微細構造(メタマテリアル)を作製し、THz波の磁場成分の増強を行い、大振幅のコヒーレントとスピン歳差運動の観測に成功した。金属微細構造とスピン系との間での相互作用の存在を示唆する結果が得られている。

研究成果の概要(英文)：We studied development of the THz time domain spectroscopy system using near field effect for high sensibility and high space resolution. We used magnetic materials as a sample and/or near field scanning tips. We developed the near field imaging system using metal or magnetic material (Ba ferrite) scanning tips. We succeeded the observation of the coherent spin precession motion with the large amplitude by making metal split ring resonators on surface of magnetic material (ErFeO₃). We obtained the results of the interaction between the spin system and the split ring resonators.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：テラヘルツ波 近接場 磁性 超高速 スピンドイナミクス 磁気光学 フェムト秒パルスレーザー

1. 研究開始当初の背景

近年我々は、THz パルスを磁性体に適用し、スピン(コヒーレントパルク磁化)歳差運動の実時間観測や、THz 領域で磁気光学素子として利用可能な磁性体の磁気共鳴の報告をし、さらには THz パルスの磁場成分を用いたスピン歳差運動のコヒーレント制御を行うなどテラヘルツ帯での磁性体の研究およびテラヘルツ帯での磁気デバイスの可能性について示してきた。

一方で応用研究が活発に進められる THz 波であるが、THz 波を応用へ展開する際の問題の一つとして、空間分解能の問題がある。その大きな波長(1THz で波長 300 μm に相当)によって空間分解能が制限されてしまう点である。その解決法として、近接場を利用する方法が提案されており、誘電率を対象にした近接場効果については盛んに研究されている。本研究では磁気応答に着目し、磁性体による近接場効果に着目し、さらには測定対象として磁性体のスピンドYNAMIKSを展開していくことを念頭に研究・開発をすすめることにした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、テラヘルツ(THz)帯に磁気応答を示す磁性体を用いて、近接場効果の有効性を確認し、それを用いた高感度検出や高空間分解能の達成、およびは磁場増強効果を利用したスピンドYNAMIKSの観測を目的とする。近接場効果やメタマテリアル等を有効に活用し、磁性体におけるスピンドYNAMIKSの研究を高度に進めることである。

3. 研究の方法

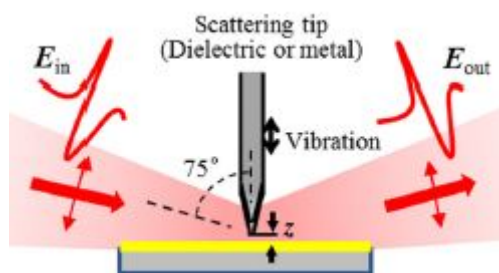


図 1. 散乱型近接場検出の模式図

研究の方法として、図 1 に示すような、散乱型のスキャン型の近接場検出法を導入し、テラヘルツ波時間領域分光法の高空間分解能を試みた。微小な領域における測定感度の高感度化について調べた。まずは金属探針を用いたテラヘルツ波近接場顕微鏡の開発を行い、さらには試料および/もしくは探針に磁性体を用いた効果を調べた。また、磁性体表面に金属微細構造、いわゆるテラヘルツ波に対して、メタマテリアルとして動作する分割リング共振器(Split ring resonator: SRR)

を作製し、テラヘルツ波磁場成分の増強や、スピン系との共鳴効果について調べた。

4. 研究成果

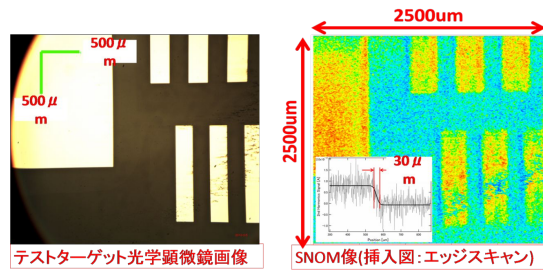


図 2 金属探針を用いた近接場イメージング

図 2 は、金属探針を用いた散乱型の近接場効果を用いたイメージング像である。分解能を確認するためにテストターゲットを用いている。左側は光学顕微鏡像、右側がテラヘルツ波パルスを用いたものであり、ここでは磁気共鳴を考慮した周波数として、50GHz の周波数での測定を行っている。50GHz の波長は 6mm に相当する。図 2 右図の挿入図に分解能を調べたものがあるが、30 μm の分解能(λ/200 相当)が得られており、これは回折限界を大きく超えたものであり、近接場効果を用いたことによる有効性が確認された。

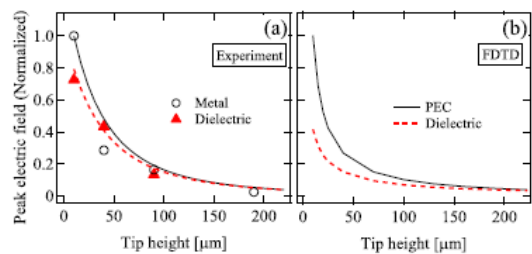


図 3 金属および磁性体探針による近接場散乱信号強度の比較

続けて、磁性体による探針を作製し、透磁率による近接場効果の確認を試みた。しかしながら、現状においては、透磁率の大きさがそれほど大きなものを選択することができないこともあるが、有意な結果を得ることはできていない。ただ磁性体針(Baフェライト)を用いて磁性体試料での測定を行った結果について、金属探針を用いたものと同等の信号強度が得られることが分かった(図 3)。これはBaフェライトの誘電率がテラヘルツ帯で ~ 16 と比較のおおきな値を持つために誘電的な応答によるものと考えられるが、金属を用いずとも有意な近接場効果が得られることが分かり、この成果は Applied Physics Letters に掲載された。

続いて磁性体(ErFeO3)表面上に、金属微細構造を作製して得られた結果について記す。ErFeO3 表面上に、電子線リソグラフィ技術を用いて、1 辺 60 μm のアルミニウムによる分割リング共振器(SRR)を作製し

た。この共振器をもちいることで、テラヘルツ波電場によって誘起される共振器中の渦電流成分により試料深さ方向に実効的な磁場成分を発生させることが可能であり、この共振器によって誘起される磁場成分は、入射させる磁場成分よりも増強されたものを得ることが可能である。我々は、この効果を確認するために、入射テラヘルツ波の偏光特性を調べることで、増強された磁場成分によって誘起されるスピン歳差運動と、入射されたテラヘルツ波パルスによる磁場成分によって誘起されたスピン歳差運動を比較することが可能である。また本試料・ErFeO₃は温度によって、磁気共鳴周波数がシフトすることが知られており、SRRによる共鳴効果が表れている状態と現れない状態を、温度を制御することでも確認した。実際に67Kおよび69Kで測定したときには、その誘起されるスピン歳差運動の振幅が大きく増強されることが確認できた。非共鳴下での測定に比べて、共鳴状態においては8倍もの大きな振幅が得られている。また観測された振動波形は、共鳴下と非共鳴下で異なることがわかり、たとえば共鳴下においては、振幅の立ち上がり時間が長くなることが確認できている。このような違いは、スピン系とSRR構造との間で相互作用が生じるためと考え、それを考慮した計算では、その特徴をよく再現する結果が得られており、このモデルの有効性を示している。

本研究では、テラヘルツ時間領域分光に近接場効果を導入することにより、高空間分解能化と高感度化を達成、さらには金属微細構造をもちいることにより、磁場成分の増強を行い、これを磁性体におけるスピンドイナミクスに適用した。

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9件)

1. "Terahertz Time-Domain Observation of Spin Reorientation in Orthoferrite ErFeO₃ through Magnetic Free Induction Decay" K. Yamaguchi, T. Kurihara, Y. Minami, M. Nakajima, and T. Suemoto, 査読有 Physical Review Letters 110, 137204 (2013). [DOI:10.1103/PhysRevLett.110.137204]
2. "Mechanism of enhanced optical second-harmonic generation in the conducting pyrochlore-type Pb₂Ir₂O_{7-x}" Y. Hirata, M. Nakajima, Y. Nomura, H. Tajima, Y. Matsushita, K. Asoh, Y. Kiuchi, A.G. Eguiluz, R. Arita, T. Suemoto, and K. Ohgushi, 査読有 Physical Review Letters 110, 187402 (2013). [DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.187402]

3. "Access to hole dynamics in graphite by femtosecond luminescence and photoemission spectroscopy" T. Suemoto, S. Sakaki, M. Nakajima, Y. Ishida, and S. Shin, 査読有 Physical Review B 87, 224302 (2013). [doi:10.1103/PhysRevB.87.224302]
4. "Longitudinal THz wave generation from an air plasma filament induced by a femtosecond laser" Y. Minami, T. Kurihara, K. Yamaguchi, M. Nakajima, and T. Suemoto, 査読有 Applied Physics Letters 102, 151106 (2013). [doi: 10.1063/1.4802482]
5. "High-power THz wave generation in plasma induced by polarization adjusted two-color laser pulses" 査読有 Y. Minami, T. Kurihara, K. Yamaguchi, M. Nakajima, and T. Suemoto, Applied Physics Letters 102, 041105 (2013). [doi:10.1063/1.4789773]
6. "Dielectric Probe for Scattering-type Terahertz Scanning Near-field Optical Microscopy" T. Kurihara, K. Yamaguchi, H. Watanabe, M. Nakajima, and T. Suemoto, 査読有 Applied Physics Letters 103, 151105 (2013). [doi:10.1063/1.4824496]
7. "Development of a High Resolution and Wide Band Terahertz Spectrometer based on a 1 μ m-Band External Cavity Diode Laser" K. Kitahara, K. Oto, M. Nakajima, and K. Muro 査読有 Review of Scientific Instruments 84, 126102 (2013). [doi: 10.1063/1.4842275]
8. "The synthesis of rhodium substituted -iron oxide exhibiting super high frequency natural resonance" A. Namai, M. Yoshikiyo, S. Umeda, T. Yoshida, T. Miyazaki, M. Nakajima, K. Yamaguchi, T. Suemoto, and S. Ohkoshi, 査読有 Journal of Materials Chemistry C 1, 5200-5206 (2013). [doi: 10.1039/C3TC30805G]
9. "Probing of local structures of thermal and photoinduced phases in rubidium manganese hexacyanoferrate by resonant Raman spectroscopy" R. Fukaya, A. Asahara, S. Ishige, M. Nakajima, H. Tokoro, S. Ohkoshi, and T. Suemoto, 査読有 Journal of Chemical Physics 139, 084303 (2013). [doi: 10.1063/1.4818809]

{学会発表}(計24件)

1. "(BEDT-TTF)(TCNQ)における低温下でのテラヘルツ波分光" 日本物理学会 第69回年次大会 2014年春(東海大学, 2014.3.27-30),

- 29pPSA-64, 貞本貢汰, 三野弘文, 酒井正俊, 中嶋誠.
2. “CdTe/Cd_{1-x}MnxTe 量子井戸における光誘起励起子スピン歳差運動の観測” 日本物理学会 第 69 回年次大会 2014 年春(東海大学, 2014.3.27-30), 29pPSA-50, 上村翔太, 伊達晃良, 中嶋誠, 三野弘文.
3. “カット入り 2 次元金属メッシュにおけるテラヘルツ分光” 日本物理学会 第 69 回年次大会 2014 年春(東海大学, 2014.3.27-30), 29pPSA-34, 齋藤友未, 関根雄大, 久住裕貴, 奥井雄一郎, 高野恵介, 萩行正憲, 音賢一, 中嶋誠.
4. “THz 領域におけるリング共振器を用いたオルソフェライト磁気共鳴の観測” 日本物理学会 第69回年次大会 2014年春(東海大学, 2014.3.27-30), 27aCK-2, 栗原貴之, 中村圭太, 山口啓太, 関根雄大, 齋藤友未, 音賢一, 中嶋誠, 渡邊浩, 末元徹.
5. “テラヘルツ波パルスによるスピン分光” 先端光量子科学アライアンス(APSA)セミナー(慶應大学, 2014.3.1) 中嶋誠.
6. “超短光パルス励起テラヘルツ電磁波による超高速スピン分光” テラヘルツ波科学技術と産業開拓第 182 委員会 研究会(大阪大学中之島センター, 2014.1.30) 中嶋誠.
7. “誘電体探針による THz 近接場効果の観測” 日本物理学会 秋季大会 2013 年秋(徳島大学, 2013.9.25-28), 28aDA-3, 栗原貴之, 山口啓太, 渡邊浩, 中嶋誠, 末元徹.
8. “アルミニウム置換型イプシロン酸化鉄におけるゼロ磁場強磁性共鳴の特異的温度依存性の観測” 日本物理学会 秋季大会 2013 年秋(徳島大学, 2013.9.25-28), 26aDB-13, 吉清まりえ, 生井飛鳥, 中嶋誠, 末元徹, 大越慎一.
9. “超高周波ミリ波吸収を示すロジウム置換型イプシロン酸化鉄の新規合成法” 日本物理学会 秋季大会 2013 年秋(徳島大学, 2013.9.25-28), 26aDB-12, 生井飛鳥, 吉清まりえ, 梅田小矢佳, 吉田貴行, 宮崎達郎, 中嶋誠, 山口啓太, 末元徹, 大越慎一.
10. “弱強磁性共鳴周波数の弱磁場誘起大規模シフトのテラヘルツ分光による観測” 日本物理学会 秋季大会 2013 年秋(徳島大学, 2013.9.25-28), 25pDB-2, 山口啓太, 栗原貴之, 中嶋誠, 末元徹.
11. “2 次元金属メッシュフィルムのテラヘルツ時間領域分光測定” 日本応用物理学会 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会 2013 年秋(同志社大学, 2013.9.15-18), (16p-P1-21), 関根雄大, 大城亮介, 久住裕貴, 齋藤友未, 奥井雄一郎, 高野恵介, 萩行正憲, 音賢一, 中嶋誠.
12. “狭線幅スペクトルの測定に向けた高分解能 CW テラヘルツ分光システムの開発” 日本応用物理学会 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会 2013 年秋(同志社大学, 2013.9.15-18), (16p-P1-11), 北原憲, 中嶋誠, 音賢一, 室清文.
13. “テラヘルツ時間領域分光による DyFeO₃ の磁気共鳴とスピン再配列転移の観測” 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年春(広島大学, 2013.3.26-29), 28pPSB-71, 山口啓太, 栗原貴之, 中嶋誠, 末元徹.
14. “テラヘルツ近接場を用いた磁性体の高空間分解観察” 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年春(広島大学, 2013.3.26-29), 28pPSB-38, 栗原貴之, 山口啓太, 中嶋誠, 渡邊浩, 末元徹.
15. “反転対称性の破れた導電性パイロクロア型酸化物 Pb₂Ru₂O₆ の電子物性” 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年春(広島大学, 2013.3.26-29), 27pXH-13, 平田靖透, 中嶋誠, 末元徹, 大串研也.
16. “ロジウム置換型イプシロン酸化鉄における超高周波ミリ波吸収の観測” 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年春(広島大学, 2013.3.26-29), 27pEJ-2, 生井飛鳥, 吉清まりえ, 後藤崇, 吉田貴行, 宮崎達郎, 中嶋誠, 末元徹, 大越慎一.
17. “ロジウム置換型イプシロン酸化鉄における巨大保磁力の観測” 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013 年春(広島大学, 2013.3.26-29), 27pEJ-1, 吉清まりえ, 生井飛鳥, 後藤崇, 吉田貴行, 宮崎達郎, 中嶋誠, 末元徹, 大越慎一.
18. “Study of Spin Reorientation Phenomena in Erbium Orthoferrite Observed by Free Induction Decay Signals After Half Cycle THz Pulse Excitation”, K. Yamaguchi, T. Kurihara, Y. Minami, M. Nakajima, and T. Suemoto, International Symposium on Frontiers in Terahertz Technology (FTT 2012), Pos2.31 (Nov. 29), Nov. 27-29, 2012, Nara, Japan.
19. “Observation of Spontaneous Spin Reorientation in ErFeO₃ with Terahertz Time Domain Spectroscopy”, K. Yamaguchi, T. Kurihara, Y. Minami, M. Nakajima, and T. Suemoto, The 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves (IRMMW-THz 2012), Thu-B-4-3 (Sep. 27), September 23-28, 2012, Wollongong, Australia.
20. “光磁性シアノ錯体におけるフェムト秒時間分解ファラデー効果” 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年秋(横浜国立大学, 2012.9.18-21), 18pHC-15, 浅原彰文, 中嶋誠, 石毛俊, 所裕子, 大越慎一, 末元徹.
21. “テラヘルツ波パルスによるインパルススピン励起とコヒーレント制御” 応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会 若手研究者サマースクール 2012 (浅間温泉, 松本市, 2012.8.6-8), 中嶋誠.
22. “Separation of electron and hole dynamics in graphite from untrafast luminescence and photoelectron spectroscopy” T. Suemoto, S. Sakaki, M. Nakajima, Y. Ishida, S. Shin,

International Conference on Ultrafast Phenomena (UP 2012), Post deadline paper (July 12), July 8-13, 2012, Lausanne, Switzerland.

23. “Ultrafast Faraday effect in a photoinduced magnetic phase transition of rubidiummanganese hexacyanoferrate”, A. Asahara, M. Nakajima, S. Ishige, H. Tokoro, S. Ohkoshi, T. Suemoto, The 10th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXCON'12) 018 (Jul. 4) July 2 to July 6, 2012, Groningen, The Netherlands.

24. “Zero-gap and nonzero-gap behaviours of recombination luminescence evidenced in graphite and InAs”, T. Suemoto, S. Sakaki, M. Nakajima, Y. Ishida, S. Shin, The 10th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXCON'12) P107 (Jul. 3) July 2 to July 6, 2012, Groningen, The Netherlands.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ <http://nak.matrix.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 誠 (NAKAJIMA MAKOTO)
千葉大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：4 0 3 6 1 6 6 2

(2) 研究分担者

末元 徹 (SUEMOTO TOHRU)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号：5 0 1 3 4 0 5 2

(3) 連携研究者 なし