

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 12 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25410006

研究課題名(和文) テラヘルツ波超集束効果を用いた新規なテラヘルツ時間領域分光法の開拓

研究課題名(英文) Investigation of terahertz time-domain spectroscopy using terahertz superfocusing effect

研究代表者

山本 晃司 (Yamamoto, Kohji)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・准教授

研究者番号：70432507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本申請課題は、テラヘルツ波の超集束効果を用いることで、これまでに回折限界によってテラヘルツ時間領域分光測定が困難であった薄膜・微小試料に対するテラヘルツ時間領域分光法を可能にし、これまで試料の調整、特に、十分に大きなサイズの試料を作成することが困難であったために、テラヘルツ時間領域分光研究が不可能であった試料に対しても適用が可能となり、特に、30分の1の試料でも測定可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the feasibility of minute-sample terahertz spectroscopy using a metal parallel-plate waveguide with tapered-structure. We carried out terahertz time-domain spectroscopy of L,L-cystine, powdered samples of which were diluted with hydrocarbon-based grease. These mixed samples were sandwiched between metal parallel plates with several hundred-micrometer gap in the THz transmission measurements. We observed both of the sharp absorption peak and the dispersion feature of the refractive index of L,L-cystine at 24 cm⁻¹. We found that background feature of powdered samples in THz absorption spectra possibly due to THz wave scattering was reduced by diluting the samples with the grease. We also obtained the quantitative THz spectra of L,L-cystine in the absorption coefficient spectrum. We succeeded in THz measurements of one-order of magnitude smaller sample of L,L-cystine relative to the sample amount necessary for the traditional terahertz measurements.

研究分野：物理化学

キーワード：テラヘルツ 導波路 遠赤外

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ時間領域分光測定は、主に、10 mm 以上のサイズを持つ均一なバルク試料に対して行われてきた。このような試料サイズに関する制限は、波長よりも小さい領域に電磁波を集光することが不可能であること(回折限界)に起因するため、薄膜試料やサブミリメートル以下のサイズの対象物をテラヘルツ時間領域分光測定することは非常に困難な状況である(0.1 THz の電磁波の波長 = 3 mm)。この結果、テラヘルツ帯の研究対象となる物質系は非常に限定されたものとなり、テラヘルツ分光の研究の広がりを阻害してきた。例えば、これまでに微小試料や粉末試料に対して行われてきた測定では、フォノン吸収による鋭いピークを識別することはできているが、その定量性を検討されてこなかった。

2. 研究の目的

テラヘルツ波の回折限界に起因する問題を解決するため、本申請課題では、テラヘルツ波に対して波長よりも狭い間隔でも電磁波の透過(超集束)が可能となる金属導波路構造に着目し、
 ・薄膜や微小試料のテラヘルツ時間領域分光測定法の確立
 ・従来の測定試料の 10 分の 1 以下で、かつ、テラヘルツスペクトルの定量性の達成を目指して研究を行った。

3. 研究の方法

本申請課題では、
 課題[1]: 金属導波路構造の最適化によるテラヘルツ波の超集束効率の向上
 課題[2]: 金属導波路を用いた、薄膜および微小試料に対するテラヘルツ時間領域分光法の開拓
 に取り組んだ。
 課題[1]では、テーパを有する金属導波路に対して、開き角と平行平板長を変化させることで、金属導波路とテラヘルツ電磁波との結合効率の構造最適化を行い、最適化構造に対してテラヘルツ波透過率のスリット開口幅依存性を明らかにした。課題[2]では、課題[1]で最適化した金属導波路を用いて、薄膜試料および微小試料の測定を行い、金属導波路を利用したテラヘルツ時間領域分光法による定量測定を検討した。

4. 研究成果

テラヘルツ波の導波路として、金属平行平板に金属テーパの角度を、テラヘルツ波の集光角度と一致させることで、最もテラヘルツ波が透過することを明らかにした。また、平行平板長を 2, 4, 8 mm と変化させても透過率に大きな変化が見られないことが分かった。最適化の結果、スリット開口が 200 μm で振幅透過率 50%、スリット開口が 100 μm で振幅透過率 30%を達成することに成功し

た。

また、金属平行平板と測定試料との間に空間があると、金属平行平板間の伝搬モードの周波数分散が大きくなることを実験的に見出し、金属平行平板間における 2 層誘電体モデルを用いて説明することができることが分かった。これらのように、金属平行平板間に配置する試料の条件などを改善することで、通常のテラヘルツ時間領域分光法を用いた得られるスペクトルを同程度のスペクトルを得ることに成功した。

次に、試料にはアピエゾングリースで希釈した L,L-シスチンを使用して、金属導波路を用いたテラヘルツ分光の微量測定、および、定量測定を確認した。図に、金属導波路を用いて測定した L,L-シスチンのテラヘルツ吸収スペクトルを示す。9 cm^{-1} 、23.9 cm^{-1} に、急峻なピークが観測されている。自由空間を伝搬させたテラヘルツ波による従来のテラヘルツ時間領域分光測定では、回折などの影響を回避するために直径 5 mm 以上の試料が必要となり、その結果、多くの分量の試料が必要となることが多い。自由空間を伝搬したテラヘルツ波を使用する場合と比較して、金属導波路を用いた場合では 30 分の 1 の試料で同程度の吸収強度をもつスペクトルを得ることが可能であることが分かった。また、L,L-シスチンの濃度を変えて測定することにより、9 cm^{-1} 、23.9 cm^{-1} に対してバンド強度と濃度に関して検量線を引くことができ、吸収に関する絶対量(モル吸光係数)を得ることに成功した。

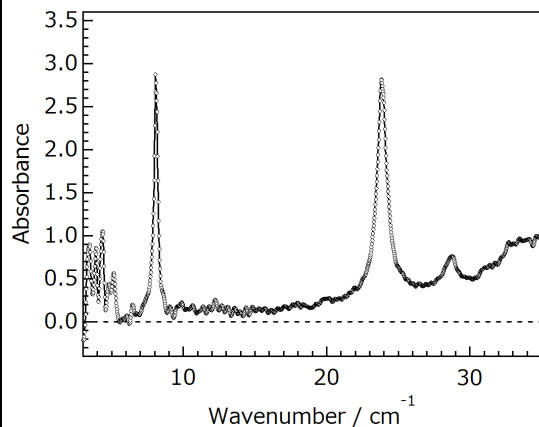


図 L-シスチンのテラヘルツ吸収スペクトル (金属導波路を使用)

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 12 件)

Takashi Furuya, E.S.Estacio, Kazuki Horita, Christopher T. Que, Kohji Yamamoto, Fumiaki Miyamaru, Seiji Nishizawa, Masahiko Tani, "Fast-Scan Terahertz Time Domain Spectrometer

Based on Laser Repetition Frequency Modulation,” Jpn. J. Appl. Phys. 52, 022401 (5pages) (2013).

Hidekazu Nakajima, Christopher T. Que, Elmer Estacio, Kohji Yamamoto, Masahiko Tani, “Lens Coupler and Magnetic Field Terahertz Emission Enhancement in InSb and InAs under 1.55-um Excitation,” Jpn. J. Appl. Phys. 52, 032201(3pages) (2013).

Jasher John Ibanes, Ma. Herminia Balgos, Rafael Jaculbia, Arnel Salvador, Armando Somintac, Elmer Estacio, Christopher T. Que, Satoshi Tsuzuki, Kohji Yamamoto, Masahiko Tani, “Terahertz emission from GaAs-AlGaAs core-shell nanowires on Si (100) substrate: effects of applied magnetic field and excitation wavelength,” Appl. Phys. Lett. 102(6), 063101(3 pages) (2013).

Masahiko Tani, Tetsuya Kinoshita, Tomohiro Nagase, Kazuki Horita, Christopher T. Que, Elmer Estacio, Kohji Yamamoto, Michael I. Bakunov, “Non-ellipsometric detection of terahertz radiation using heterodyne EO sampling in the Cherenkov velocity matching scheme,” Opt. Express 21(7), 9277-9288 (2013).

Masaya Kawase, Kohji Yamamoto, Keita Takagi, Ryohei Yasuda, Masafumi Ogawa, Yasutoshi Hatsuda, Sonoyo Kawanishi, Yoshihiko Hirotsu, Michiaki Myotoku, Yoko Urashima, Katsuhito Nagai, Kenji Ikeda, Hiroki Konishi, Junji Yamakawa, and Masahiko Tani “Non-Destructive Evaluation Method of Pharmaceutical Tablet by Terahertz-Time-Domain Spectroscopy: Application to Sound-Alike Medicines”, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 34, 566–571 (2013). (August 2013).

Stefan Funkner, Katsuya Saito, Gudrun Niehues, Yoshiki Yazawa, Takashi Furuya, Kohji Yamamoto, and Masahiko Tani, “Utilization of chirped laser pulses to measure stimulated Raman scattering of organic liquids in the terahertz regime,” Applied Physics Letters 105, 021103 (2014). doi: 10.1063/1.4890092.

Satoshi Tsuzuki, Daiki Takeshima, Tomoya Sakon, Tetsuya Kinoshita, Tomohiro Nagase, Kazuyoshi Kurihara, Kohji Yamamoto, Fumiyoshi Kuwashima, Takashi Furuya, Elmer Estacio, Kodo Kawase, Michael I. Bakunov, Masahiko Tani: “Highly sensitive electro-optic sampling of terahertz waves using field enhancement in a tapered waveguide structure” Applied Physics Express Vol. 7, 112401(10 Oct 2014) (doi:10.7567/APEX.7.112401)

T. Saito, K. Ozaki, K. Fukui, H. Iwai, Kohji Yamamoto, H. Miyake, and K. Hiramatsu, “Vacuum ultraviolet ellipsometer using inclined detector as analyzer to measure stokes parameters and optical constants — With results for AlN optical constants,” Thin Solid Films 571, No.3, 517-521 (2014). (November 2014); doi:10.1016/j.tsf.2014.02.099.

Zhenyu Zhao, Gudrun Niehues, Stefan Funkner, Elmer Estacio, Qifeng Han, Kohji Yamamoto, Jingtao Zhang, Wangzhou Shi, Qixin Guo, and Masahiko Tani, “Terahertz surface emission from Cu₂ZnSnSe₄ thin film photovoltaic material excited by femtosecond laser pulses,” Applied Physics Letters 105, 231104 (2014), (December 2014); doi: 10.1063/1.4903740.

Katsunari Irie, Keisuke Takano, John C. Young, Kohji Yamamoto, Masahiko Tani, and Takehito Suzuki, “Spectral Characteristics of Photoconductive Dipole Antennas Including Photocurrent and Receiving Antenna Effects,” Journal of Modeling and Simulation of Antennas and Propagation 1, No.1, 20–24 (2015), (January 2015).

Presto Jorge Michael M, Prieto Elizabeth Ann P, Omambac Karim M, Afalla Jessica Pauline C, Lumantas Deborah Anne O, Salvador Arnel A, Somintac Armando S, Estacio Elmer S, Kohji Yamamoto, Masahiko Tani, “ Confined photocarrier transport in InAs pyramidal quantum dots via terahertz time-domain spectroscopy,” Optics Express Vol.23, Issue 11, pp. 14532-14540 (2015)

Satoshi Tsuzuki, Nobu Kuzuu, Hideharu Horikoshi, Katsuya Saito, Kohji Yamamoto, and Masahiko Tani, “Influence of OH-group concentration on optical properties of silica glass in terahertz frequency region,” Applied Physics Express 8, 072402 (2015) (DOI:10.7567/APEX8.072402)

〔学会発表〕(計5件)

岩崎宏紀, 岩村信平, 辻新生, 山本晃司, 栗原一嘉, 桑島史欣, 福井一俊, 谷正彦, 「金属テーパー構造結合平行平板導波路におけるテラヘルツ波伝搬の平行平板長依存性」(ポスター講演) 講演番号:P7, 第23回(平成25年度)日本赤外線学会研究発表会、2013年10月31日~11月1日、防衛大学校、横須賀市、神奈川

岩村 信平, 辻 新生, 山本 晃司, 福井 一俊, 谷 正彦, 栗原 一嘉, 桑島 史欣: 「金属テーパー構造結合平行平板導波路に2層誘電

体を挟み込んだときの THz 波伝播モードの解析」(口頭発表), 平成 26 年度レーザー学会中部支部講演会(2014 年 8 月 12 日(火)), 福井工業大学 FUT タワー6 階 601 教室)

山本晃司、「テラヘルツ時間領域分光で迫る物質の性質」(招待講演番号 13-1) 平成 27 年度(第 48 回)照明学会全国大会、計測・標準分科会/光放射応用分科会 テーマ:光放射の生物産業分野などへの応用と基礎計測技術, 2015.08.27-29, 福井大学, 福井

Kohji Yamamoto, Kazuyoshi Kurihara, Fumiyooshi Kuwashima, Osamu Morikawa, and Masahiko Tani, "Minute-sample terahertz spectroscopy using a metal parallel-plate waveguide with tapered-structure," Pos1.03 (Poster), The Second International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT2015) (Hamamatsu, Shizuoka, Japan, August 30 - September 2, 2015.)

山本晃司、饗庭大輝、倉田 樹、田畑寛明、前田満月、戸澤理詞、古屋 岳、森川 治、栗原一嘉、桑島史欣、福井一俊、谷正彦、「金属テーパー構造結合平行平板導波路を用いた微量試料のテラヘルツ分光の検討」(ポスター4p-PA7-12) 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会(2015 年 9 月 13 日~16 日、名古屋国際会議場)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 2 件)

名称:電磁波の位相速度制御方法及び位相速度制御構造

発明者:谷 正彦、左近 知也、竹嶋 大貴、都築 聡、山本 晃司、栗原 一嘉、古屋 岳、桑島 史欣

権利者:同上

種類:特許

番号:特許願 2013-102527 号

出願年月日:2013 年 5 月 14 日

国内外の別: 国内

名称:電磁波検出器及び電磁波検出方法

発明者:栗原 一嘉、谷 正彦、山本 晃司、古屋 岳、桑島 史欣

権利者:同上

種類:特許

番号:特許願 2014-038817 号

出願年月日:2014 年 2 月 28 日

国内外の別: 国内

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

<http://fir.u-fukui.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山本 晃司 (YAMAMOTO, Kohji)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・准教授

研究者番号: 70432507

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

塩島 謙次 (SHIOJIMA, Kenji)

福井大学・工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号: 70432151

(4)研究協力者

なし