

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05599

研究課題名(和文) テラヘルツ - キャビティエンハンスト分光システムの開発

研究課題名(英文) Development of terahertz-cavity enhanced spectroscopy system

研究代表者

菜嶋 茂喜 (Nashima, Shigeki)

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：90347485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：指紋スペクトルが存在するテラヘルツ波(THz波)領域では、それを活かした様々な分光応用が期待されている。従来の分光法ではシングルパスでの測定が殆どであり、微量な物質や吸収率の小さい物質の応答を得るのが困難であった。この技術課題に対し本研究では、テラヘルツ時間領域分光法(THz-Time domain spectroscopy, THz-TDS)にエンハンスメント共振器を作製・導入し、分光感度の向上に取り組んだ。その成果として、非同期状態の共振器外部に取り出されたTHz波を測定した結果、共振器を7周回したTHz波を観測し、0.29 THzで20倍を超える増強度を達成し分光感度の高感度化に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

共振器で閉じ込められたテラヘルツ波(電磁波)は増強されるだけでなく、同じ光路を何往復もすることから伝搬中の媒質との相互作用が増える為、分光センシングにも応用することができる。この技術を用いて光の領域では、高感度なレーザー吸収分光法として近年利用が進められている。しかしながら、テラヘルツ波領域では未だこの様な分光技術は確立されていない。指紋スペクトルや低エネルギー領域の特徴的な吸収がTHz波領域では見られることから、本研究の技術が確立されれば微量な分子分光や生化学反応などが求められる学術的な研究や同位体分析や呼気検査などの分光センシングへの応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：We have developed terahertz-time domain spectroscopy (THz-TDS) system using enhancement cavity. We observed temporal waveforms of 7th-round-trip THz pulses under the asynchronous cavity condition. We also found that maximum effective absorption length of the THz-TDS with enhancement cavity was over 20 at 0.29 THz. These results were expected the applicability of this technique to cavity-enhanced THz-time domain spectroscopy for trace chemical substance.

研究分野：テラヘルツ波工学

キーワード：テラヘルツ波 エンハンスメント共振器 テラヘルツ時間領域分光法 キャビティ増強吸収分光法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

THz 波は数～数十 meV のエネルギーであるため、気体ガスの固有吸収線や分子振動、誘電緩和、半導体等のキャリア応答など低エネルギー物性の重要な情報を得ることができる。THz 波領域の分光は、以前では、限られた研究者らが回折格子による分散型分光器やフーリエ分光 (Fourier Transform Infrared spectroscopy, FTIR) を用いて測定してきたが、レーザー励起型の発生技術や常温動作の検出器が簡便に利用できるようになった事に伴った新奇な THz 分光法が登場し、様々な分野のユーザーに拡大している。その分光法の一つであるテラヘルツ時間領域分光 (THz-Time Domain Spectroscopy, THz-TDS) は、THz 波パルスを光源とし、試料の有無による時間波形を測定して行われる。この分光法は THz 波の振幅と位相の両方を同時に測定できる特徴があり、透過率と位相差から、物質の複素誘電率 (複素屈折率) やフォトニック結晶などの分散特性や状態密度などを実験的に求めることができる。しかしながら、当初の分光法では一般的に試料をシングルパスで透過 (または反射) した THz 波を測定する為、相互作用長が短いことが制限を与えている。たとえば、 $10^{-2} \text{ cm}^{-1}$  レベル以下の吸収の小さい物質や、生体高分子などの微量物質、またその逆で、吸収や電気伝導度が高く、高反射する物質など対しては十分な S/N 比で電磁応答を得られない場合も多々ある。

### 2. 研究の目的

研究代表者らは、是迄に取り組んできた共振器構造を用いたテラヘルツ波 (THz 波) の増大技術が、高感度な吸収分光法として有用であることに注目し、レーザーガスセンシング技術として近年注目されているキャビティー増強吸収分光法を初めてテラヘルツ波領域に導入し、従来のテラヘルツ分光では検出不可能なレベルの微弱な吸収分光や分光センシングを可能とする革新的な分光技術の確立を目指している。それによって、低密度プラズマ診断、分子数レベルでの生体分子分光などの是からの先端的な基礎研究の分光手法としてや、環境保全や作用環境の安全、検査、医療などの応用が期待される高感度 (ガス) センシング応用などへ実現を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 1GHz 高繰り返し周波数フェムト秒チタンサファイアレーザー (自作) の安定動作発振 THz 波発生・検出およびエンハンスメント共振器長に関するフェムト秒チタンサファイアレーザーの安定動作発振に取り組んだ。本研究では THz 波用のエンハンスメント共振器の長さについて、コンパクト化を優先して 30 cm としたため、自作のフェムト秒レーザーの繰り返し周期を 1 GHz になる様に調整し、レーザー結晶やアウトプットカプラーの最適化により 10 fs 台のパルス幅で、約 1 W (1 nJ) の出力動作が得られる様に改良した。

(2) テラヘルツ波用エンハンスメント共振器の設計およびプロトタイプの評価  
フェムト秒レーザー励起により放射される THz 波を閉じ込めるエンハンスメント共振器を設計し、プロトタイプを試作・評価した。エンハンスメント共振器の設計では、放射素子が共振器の中にある内部共振器と、発生した THz 波を外部から入力する外部共振器を検討した。また、そのプロトタイプのエンハンスメント共振器の評価法として、非同期時に共振器から取り出された THz 波をテラヘルツ時間領域分光法で測定し、共振器の閉じ込め効果などを評価した。

### 4. 研究成果

図 1 は、考案したテラヘルツ波用エンハンスメント共振器の模式図である。図の共振器は、放射素子を共振器内に配置した内部共振器である。InAs を THz 波放射素子とすると共に共振器内のミラーとしても活用している。また、M3 と M4 はアルミ合金製の凹面鏡を採用しており、ビーム径の拡大による回折損失の抑制とともに、共振器内での Gouy 位相シフトの補償を担うようにしている。ミラーホルダーに取り付けられたマイクロメーターで共振器長を 30 cm 近傍にしてから、徐々に共振器長を変化させた際の時間波形を図 2 に示す。上の波形から下に行くにつれて徐々に共振器長を短くしている。図中に、1st (single pass) と記した破線上に見られる THz 波パルスは、共振器を周回せずに直接出力された THz 波を指す。2nd 以降はそれぞれ共振器を周回した THz 波を指す。また、共振器内に遮蔽板を挿入した際に 2nd 以降の THz 波が見られなかったことから、2nd 以降が周回パルスであることを確認している。 $\Delta t$  は周回パルス間の遅延時間であり、 $\Delta t = 0.0 \text{ ps}$  は励起レーザーの繰り返し周期とテラヘルツ波用エンハンスメント共振器の繰り返し周期が一致した、同期状態を意味する。図より共振器内を周回する THz 波は徐々に減衰しており、目視で 7 周回まで観測できる。これはつまり、180 cm 伝搬した THz 波を観測したことを意味している。また、同期状態の時の THz 波波形が一つになっていることから、全周波数帯での増強を達成しているのが確認できる。図 3 は、作製した THz 波用エンハンスメント共振器の増強度を周波数別に記している。1st (single pass) と記した THz 波パルスと同期状態時の THz 波パルスのスペクトルを比較して求めている。図より、0.293 THz で 23.8 倍、0 ~ 1.5 THz までの平均で 5.63 倍の増強を達成して

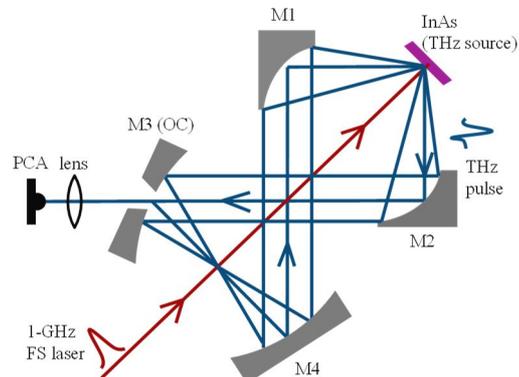


図1. 考案したテラヘルツ波用エンハンスメント共振器の模式図。図中の PCA は光伝導アンテナ素子を示している。

いることがわかる。この増強度は、研究代表者の知る限り、国内外で最も高いTHz波の増強度である。0.293 THzで増強度が特異的に大きくなった原因としては現在も検討中であるが、アウトプットカプラーとしていた穴あき凹面鏡の開口形状に由来するカットオフ周波数の影響ではないかと予想される。

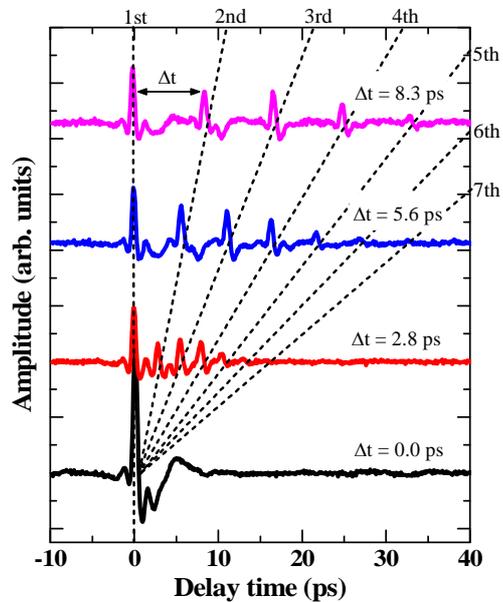


図2. 非同期状態および同時状態におけるテラヘルツ波用エンハンスメント共振器から出力されたTHz波波形。

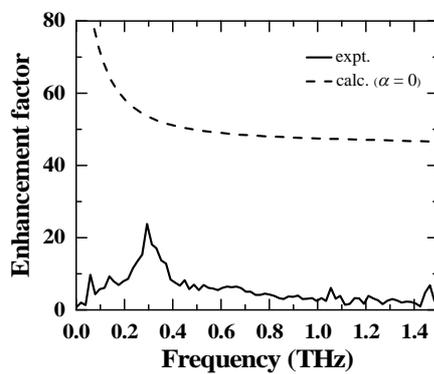


図3. 作製したテラヘルツ波用エンハンスメント共振器の増強度(実践)。破線は共振器内損失がないときの増強度(計算値)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 三山恭弘, 村岡勇宜, 中川慶一, 菜嶋茂喜, 瀧田佑馬, 熊谷寛	4. 巻 28
2. 論文標題 リング型共振器によるInAsから発生したテラヘルツ波の増強	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本赤外線学会誌	6. 最初と最後の頁 83-90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 三山恭弘, 植村祥伍, 菜嶋茂喜, 瀧田佑馬, 熊谷寛
2. 発表標題 内部型エンハンスメント共振器によるテラヘルツ波の増強
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 植村祥伍, 村岡勇宜, 中川慶一, 三山恭弘, 菜嶋茂喜, 瀧田佑馬, 熊谷寛
2. 発表標題 外部型エンハンスメント共振器によるテラヘルツ波の増強
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 植村祥伍, 村岡勇宜, 中川慶一, 三山恭弘, 菜嶋茂喜, 瀧田佑馬, 熊谷寛
2. 発表標題 エンハンスメント共振器を用いたテラヘルツ分光の高感度化
3. 学会等名 レーザー学会研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三山恭弘, 村岡勇宜, 中川慶一, 菜嶋茂喜, 瀧田佑馬, 熊谷寛
2. 発表標題 リングキャピティによるInAsから発生したテラヘルツ波の増強
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三山恭弘, 村岡勇宜, 中川慶一, 菜嶋茂喜, 瀧田佑馬, 熊谷寛
2. 発表標題 リング型共振器によるInAsから発生したテラヘルツ波の増強
3. 学会等名 第27回日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 植村祥伍, 村岡勇宜, 三山恭弘, 中川慶一, 菜嶋茂喜, 瀧田佑馬, 熊谷寛
2. 発表標題 テラヘルツ波における外部型エンハンスメント共振器の作製と評価
3. 学会等名 第27回日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川慶一, 三山恭弘, 村岡勇宜, 菜嶋茂喜
2. 発表標題 全反射プリズムを用いたウィスパリングギャラリーモードとの結合効率
3. 学会等名 第27回日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2018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
研究協力者	タキダ ユウマ  (Takida Yuma)	理化学研究所・基礎科学特別研究員	
研究協力者	クマガイ ヒロシ  (Kumagai Hiroshi)	北里大学・教授	