

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800214

研究課題名(和文)外部共振器を用いたテラヘルツ波増強技術の確立

研究課題名(英文)Development of enhanced terahertz radiation using external cavity

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、共振器の増強効果を用いてTHz波を増強させることを考案し、その実証と増強技術の確立を目指した。実験では30 cmの共振器長を有したコンパクトな高繰り返し周期フェムト秒レーザーを作製し、市販品の数倍の出力を達成した。また、励起レーザー同じ共振器長をもつTHz波用のリング型の外部共振器を設計し、構築した。時間領域分光法を用いて共振器内を周回するTHz波パルス調べた結果、THz波パルスが共振器内を5回以上周回していることを時間波形で初めて確認した。そして、外部共振器を同期させた時には、THz波パルス列が重畳し、測定できた全域で一様にTHz波が増強されている事を確認した。

研究成果の概要(英文)：We proposed using enhanced terahertz (THz) waves travelling in an external cavity and have been working on the development of enhanced THz wave techniques. We have fabricated a customized high-repetition-rate mode-locked Ti:sapphire laser system with a cavity length of 30 cm for enhanced THz wave experiments. The average power of the laser system is ~900 mW, which is several times higher than that of commercial laser systems. We have also designed and constructed an external THz ring cavity with a high-resistivity silicon plate input/output coupler and several metallic mirrors. We have detected the temporal waveforms of 5-round-trip THz pulses propagated in the external ring cavity when the external cavity length differed slightly from the laser cavity length. Additionally, we have observed $\times 1.1$ - enhanced THz waves transmitted outside the external THz ring cavity when the external cavity length was the same as the laser cavity length.

研究分野：テラヘルツ波工学

キーワード：テラヘルツ波 外部共振器 エンハンスメント効果 高繰り返し周期フェムト秒レーザー 時間領域分光法

1. 研究開始当初の背景

電波と光の間の電磁波領域であるテラヘルツ波領域(以後、THz 波領域と記す.)は、過去には適当な光源と検出素子が存在しなかったため未開拓電磁波帯などと呼ばれていたが、今日では様々な産業用途に対応する光源ができつつある。現在に至るテラヘルツ技術の飛躍的な発展には、ナノスケールの精度を可能とする半導体プロセス技術などのエレクトロニクスの著しい進展や、レーザーに代表されるフォトリソグラフィの飛躍的な進展に依るところが大きい。とりわけ、フォトリソグラフィを用いたテラヘルツ波技術では、Austonらにより、光伝導スイッチを用いた方法が発明され、常温動作で簡便な発生および検出が可能となり、今日のように世界中でこの領域の研究が盛んに行われている。また、励起レーザーの多様性に伴って THz 波光源も様々なものが提案され、今日では、他の周波数帯と同様に、広帯域、高強度、高コヒーレンス、波長可変などに秀でた光源が開発されてきている。近年では、テーブルトップサイズで、かつ、是迄よりも遙かに簡便な方法でサブ mJ 級の高強度 THz 波パルス発生方法も発表されており、THz 波領域における非線形ダイナミクスという未知な学術領域も開拓され始めている。

しかしながら、高強度な THz 波光源を得るには、再生増幅器などを必要とするのが現状で、自由電子レーザーなどの大規模実験施設を要さずには済むものの、依然として高額で大きな装置を要するのが現状である。その要因の一つには、非線形光学効果などの代表的な発生機構が、原理上、高強度な光励起を要求することにある。その為、連続発振レーザーや増幅器のないレーザーでは波長変換効率は依然として低いままである。他にも、低変換効率の要因は励起方法にあり、励起レーザーを発生媒体に一度照射させるだけの受動的な手法であるため、波長変換技術の分野からみると変換効率が低く、励起レーザーを効率的に利用しているとは言いがたい。

THz 波領域、およびその周辺領域が今後より広く利用される為には、光源や検出および計測における低コスト化が必要であり、低コスト化が望める低励起光強度領域における波長変換効率の向上が求められている。

低励起光強度領域における変換効率向上の問題に対して、光の波長変換技術の分野では、外部共振器を用いた方法があり、低励起光強度領域において数十%に達する程の高い変換効率を得られている。この方法は、外部に配置した共振器構造を用いて励起レーザーを増強させて波長変換を行う方法である。この方法の利点は、増幅器がなくても光の増強が得られることにあり、共振器設計次第では飛躍的に光の増強を得ることが可能である。この手法を活用して研究代表者等は、ピコ秒チタンサファイアレーザーを外部共振器により増強し、従来の 1%程度の出力で

LiNbO₃ 結晶からのパラメトリック THz 波発振に成功した。

2. 研究の目的

研究代表者は、低励起光強度領域において、外部共振器を用いた光増強による波長変換技術は、THz 波においても応用が可能で、大幅な高効率化が期待できると考えている。そこで、このレーザー技術の一つである共振器構造を用いた光増強技術を、発生する THz 波そのものを共振器効果で増強して、従来よりも高強度の THz 波を発生する技術を確立することを目指している。

3. 研究の方法

(1) THz 波パルス列の高繰り返し化の為に励起レーザーの開発

THz 波を対象とする外部共振器を導入することを実行する場合、その外部共振器は、発生した THz 波の繰り返し周波数、即ち、励起レーザーの繰り返し周波数に対応する共振器長を設定する必要がある。通常の市販のフェムト秒レーザーの場合、その多くの繰り返し周波数は約 100 MHz のものが多く、したがって、共振器長は 3 m 程度にする必要がある。この場合、THz 波の大気中の伝搬損失が問題となり、(温度や湿度にも依存するが)吸収損失は 0.7 m⁻¹ 程度であることから、THz 波が 3 m 分大気中を伝搬したときの強度は 13%程度にまで減少してしまう。そのため、共振器長は短い方が効率的であり、高繰り返し周波数のフェムト秒レーザーが求められる。そこで、研究代表者らは THz 波パルス列の高繰り返し化の為に励起レーザーとして、共振器長にして 30 cm (繰り返し周波数が 1 GHz)のフェムト秒レーザーを用いて外部共振器を設計し、作製した。作製するフェムト秒レーザーには発振出力が得易いことや共振器の自由度が高いことから 0.8 μm 帯のチタンサファイアレーザーを選択した。

(2) THz 波を対象とする外部共振器の設計および作製

是迄の外部共振器を用いた波長変換技術では、主に励起光に対して外部共振器を構成し、励起光の増強を利用して非線形光学媒質中での 2 次の非線形分極を増強させる方式であった。これに対し本研究では、共振器の対象を発生する THz 波としている。このことにより、共振器長の制御が光領域よりも容易になる等のメリットがある反面、目視できない微弱な THz 波を取り扱うことや回折、および使用するオプティクスについても光領域とは異なり、大きく見直す必要がある。そこで、まずは外部共振器を周回する THz 波の検出と増強効果を得られることを実証することを第一優先事項として、インプット兼アウトプットカプラーの結合効率が比較的高い、シリコンなどの THz 波領域の透明材料を選択して実行することにした。

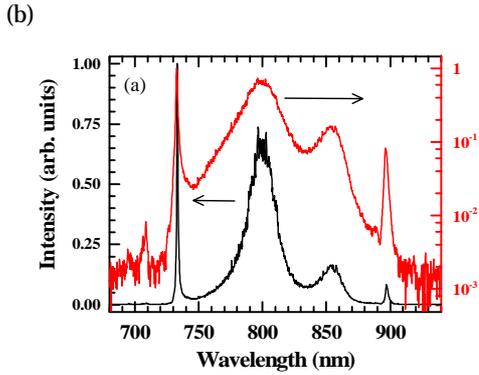
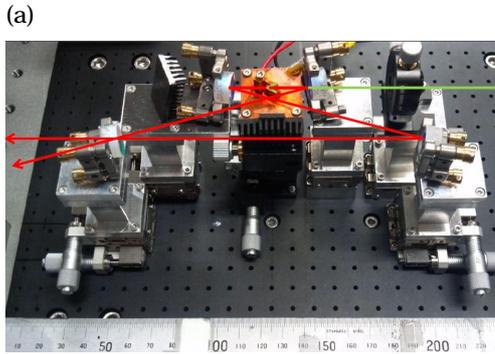


図 1. (a) 高繰り返し THz 波パルス発生用に作製した 1-GHz フェムト秒タンサファイアレーザー, (b) モード同期発進時のスペクトル.

4. 研究成果

本研究では、共振器を用いたエンハンスメント効果を用いて THz 波を増強させることを考案し、その検討を行った。その実現の為に、共振器長が 30 cm のコンパクトな高繰り返し周期フェムト秒レーザーを自作し、市販品の数倍に相当する 900 mW の平均出力を達成した(図 1)。その励起レーザーを用いて InAs ウエハから THz 波を発生させ、THz 波用のレンズでコリメートされた THz 波ビームを THz 波用に設計されたリング型共振器に結合させた(図 2)。インプット兼アウトプットカップラーには、高抵抗シリコンウエハを採用した。外部共振器の共振器長を調整して励起レーザーと非同期 (=異なる共振器長の状態)にした際に、励起レーザーに同期した THz 波パルス列が共振器内を周回していることを時間波形で初めて確認し、それらを僅か 10 ps 程の(遅延)時間領域で計測することに成功した(図 2(a))。測定された各 THz 波パルス列はほぼ相似形であり、即ち、共振器内の群速度分散が小さくキャリアエンベロープ位相が安定であることを確認することができた。また、フリーラン時の共振器長揺らぎによるタイミングジッターの影響が、THz 波の 1/100 程度と無視できる程小さいことも別の実験で確認した。そして、共振器長を励起レーザーと同期させた時には、そ

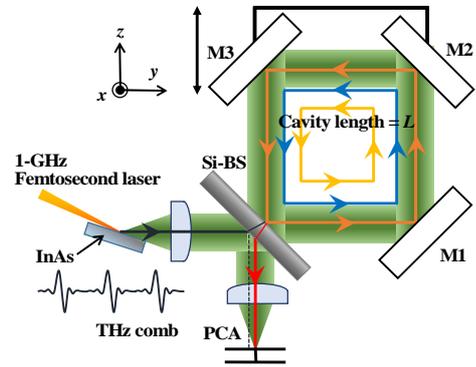


図 2. 高抵抗シリコン製インプット/アウトプットカップラーを用いた THz 波用外部共振器の模式図.

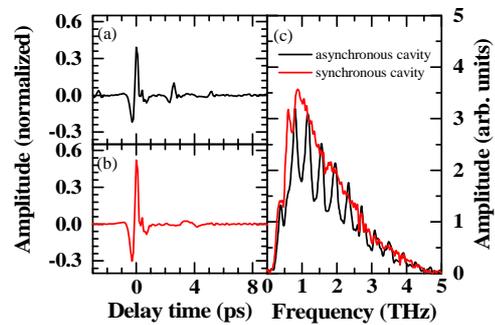


図 3. (a) 非同期な共振器長の外部共振器を周回してきた THz 波パルス列の時間波形. (b) 同期な共振器長の外部共振器を周回してきた THz 波パルス列の時間波形. (c) (a)および(b)のフーリエ変換振幅スペクトル

れらの THz 波パルス列が重畳し、検出できた THz 波スペクトル領域全域で一様に増強されたことを確認した(図 2(b), (c)). 使用した外部共振器は、共振器内を周回する THz 波の確認と同期の制御、および増強効果の定量的な評価を主の目的とした為、比較的low finesseの共振器になるよう設計されたが、シングルパスの励起で発生する THz 波電場よりも 10%増強される結果を達成することができた。これらの研究成果から、ウィスパーリングギャラリモードに代表される高 finesseな共振器を導入することにより、是迄の数千倍級の THz 波の増強を得る見通しが得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 7 件)

中川 慶一, 村岡 勇宜, 菜嶋 茂喜, “ウィスパーリングギャラリモードを用い

たテラヘルツ波電場のエンハンス効果” レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, 2017 年 1 月 7 日, 徳島大学 三島キャンパス(徳島県徳島市)。

中川 慶一, 村岡 勇宜, 菜嶋 茂喜, “テラヘルツパルス列によるモード同期ウイスパリングギャラリーモードのコヒーレント制御” 第 27 回光物性研究会, 2016 年 12 月 2 日, 神戸大学百年記念会館(兵庫県神戸市)。

中川 慶一, 村岡 勇宜, 菜嶋 茂喜, “ウイスパリングギャラリーモード共振器を用いたテラヘルツ波増大の検討” 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年 9 月 16 日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)。

村岡 勇宜, 菜嶋 茂喜, 細田 誠, 瀧田 佑馬, 田所 譲, 熊谷 寛, “高繰り返しフェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ波のエンハンスメント共振の検討” レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会, 2016 年 1 月 9 日, 名城大学 天白キャンパス(愛知県名古屋市)。

村岡 勇宜, 菜嶋 茂喜, 細田 誠, 瀧田 佑馬, 田所 譲, 熊谷 寛, “キャビティ効果によるテラヘルツ波放射の増大の検討” 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015 年 9 月 14 日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)。

下井 陵平, 瀧田 佑馬, 田所 譲, 菜嶋 茂喜, 細田 誠, 熊谷 寛, “高繰り返し周期フェムト秒チタンサファイアレーザーの製作” レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会, 2015 年 1 月 11 日, 東海大学(東京都港区)。

下井 陵平, 菜嶋 茂喜, 細田 誠, “高繰り返し周期フェムト秒チタンサファイアレーザーの製作” 第 23 回日本赤外線学会研究発表会, 2013 年 10 月 31 日, 防衛大学校(神奈川県横須賀市)。

瀧田 佑馬 (TAKIDA, Yuma)
田所 譲 (TADOKORO, Yuzuru)
熊谷 寛 (KUMAGAI, Hiroshi)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

細田 誠 (HOSODA, Makoto)