

大口径光伝導アンテナによる大出力テラヘルツ波発生と高速イメージング技術

筑波大学 大学院数理物質科学研究科 電子・物理工学専攻 服部 利明

はじめに

テラヘルツ波とは、およそ 0.1 から 10THz（波長にして 3mm から 30 μ m）の周波数領域の電磁波のことを指す。この領域の電磁波は、より低周波のいわゆる「電波」と、より高周波のいわゆる「光」（赤外・可視・紫外を含む）の境界に位置し、これまで発生・制御・検出が困難であったため、あまり研究・利用がなされてこなかった「未踏領域」であったが、最近、関連技術が進歩するにつれて、セキュリティ検査や医療診断への応用が注目され、今後の急激な発展が期待されている⁽¹⁻³⁾。ここでは、テラヘルツ波の特長とその発生法を概観したのち、我々がおもに研究している、大出力テラヘルツ波パルスの発生とそれを用いた実時間イメージング、高速イメージングについて述べる。

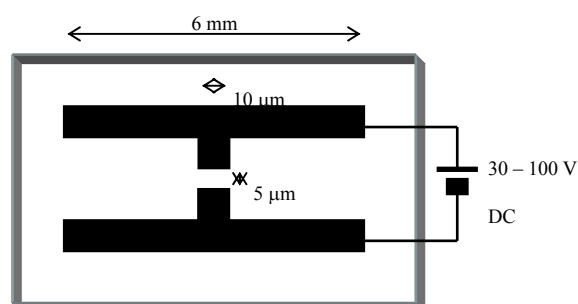
テラヘルツ波の特長と発生法

テラヘルツ波の物理的な特徴は、まさに電波と光の中間的なものであり、それに加えて、物質との相互作用において、この周波数領域ならではの特徴がある。それらを以下に列挙する。①適度な直進性・集光性を持つためにイメージング（画像計測）が可能であり、1mm 程度の分解能が得られる。②水などの極性液体に強く吸収され、金属に反射される。③波長以下の細かい構造による散乱を受けないため、紙、布、陶器などをよく透過する。④多くの物質がこの周波数領域において特徴的なスペクトルを有するため、それにより物質の特定が可能である。

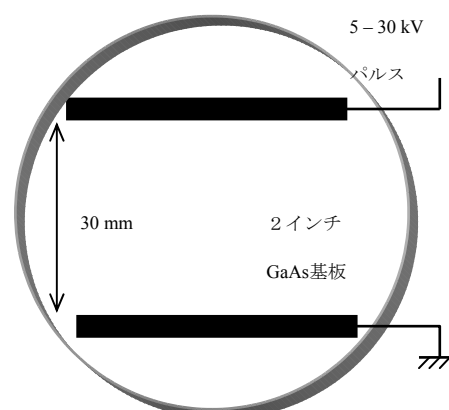
上記の特徴をうまく組み合わせて利用することにより、以下のような応用が期待されている。①空港等における、金属、火薬類、可燃性液体、禁止薬物等に関するセキュリティチェック。②郵便物内の粉体、禁止薬物等の検査。③皮膚がん等の診断や、その他のがん組織等の病理診断。④集積回路の欠陥検査。⑤さまざまな物質における低エネルギー励起に関する分光学研究。

テラヘルツ波の発生法はさまざまあるが、それぞれ得意とする周波数範囲、出力、パルス幅または連続発振、スペクトル幅等が異なる。また、多くのものは、装置の大きさや価格の面で、広く使用されるにはまだまだ問題があるが、実験室レベルではさかんに用いられている。有力なテラヘルツ波発生法とそれぞれの特徴を次に挙げる。①量子カスケードレーザ。連続波またはパルス発振。現状では液体窒素による冷却が必要。②ガン・ダイオード等の固体素子と周波数逡倍器の組み合わせ。連続波。狭帯域。③後進波管（BWO）。連続波。狭帯域。短寿命。④非線形光学による 2 波長のレーザの差周波。大出力レーザが必要。⑤フェムト秒レーザによる超短テラヘルツパルス。超広帯域。⑥自由電子レーザ、加速電子、超高出力超短パルスレーザ、ジャイロトロン等。大出力だが装置が大規模。

上記のなかで⑤のフェムト秒レーザを用いる方法は、用いる発生素子によっておもに以下の 3 種類があるが、どれもフェムト秒光パルスによって物質中の電流や分極を急激に変化させ、それによって電磁波を発生させる。得られるテラヘルツ波はモノサイクルあるいはハーフサイクルといった 1 ピコ秒程度の超短パルスであり、ほぼ DC から数 THz（場合によっては 100THz 以上）におよぶ非常に広いスペクトルを有する。テラヘルツ時間領域分光法（THz-TDS）と呼ばれる、時間波形を測定しフーリエ変換によってスペクトル情報を得る方法と合わせて用いることにより、非常に豊富な情報を得ることができる。基礎研究分野では最も幅広く用いられており、実用上はフェムト秒レーザの価格の高さが問題であるが、フェムト秒レーザの普及に伴って、応用範囲が広がるものと思われる。テラヘルツ発生源としては、おもに以下の 3 種類がある。①光伝導アンテナ。素子構造によって各種あり。最も汎用的。大出力化が可能。②半導体表面。安価で容易。③非線形光学結晶。高周波の発生が可能。



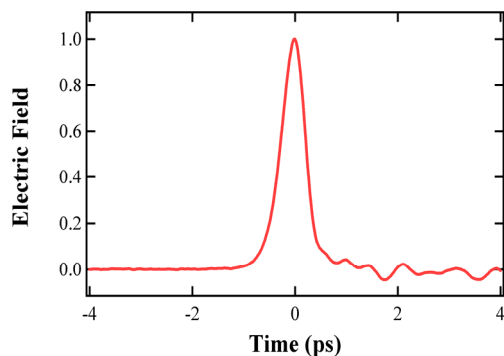
第 1 図 小口径光伝導アンテナとその典型的なサイズ



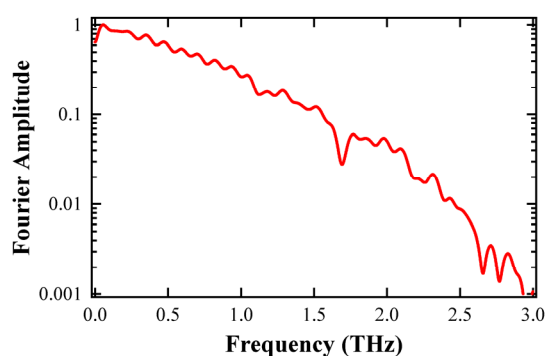
第 2 図 大口径光伝導アンテナとその典型的なサイズ

大出力テラヘルツ波発生

上記のように、さまざまなテラヘルツ波発生法が研究・開発されているが、多くの用途にとっては、出力が十分ではない。特に、現状では実時間測定が可能なだけの出力が得られない場合が多く、今後の開発が必要である。大出力のテラヘルツパルスの発生法としては、上記の 3 種類の方法やその他の方法を用いた大出力化が考えられるが、最も広い範囲への利用が期待できる光伝導アンテナについて、ここでは述べる。光伝導アンテナとは、低温成長 GaAs などの光伝導体にフェムト秒光パルスを照射し、瞬間的にキャリアを生成することにより光電流を誘起し、その急激な電流の立ち上がりにより電磁波パルスを発生させるものである。通常用いられるのは、図 1 に示すような小口径のものであり、シリコン半球レンズなどを付けて用いることが多い。しかし、照射光のフルエンス（単位面積あたりのパルスエネルギー）が数 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 程度で出力が飽和してしまうため、比較的低出力の用途に限られる。大出力のテラヘルツパルス発生には、図 2 に示すような大口径光伝導



第 3 図 大口径光伝導アンテナから得られる
テラヘルツ波のパルス波形

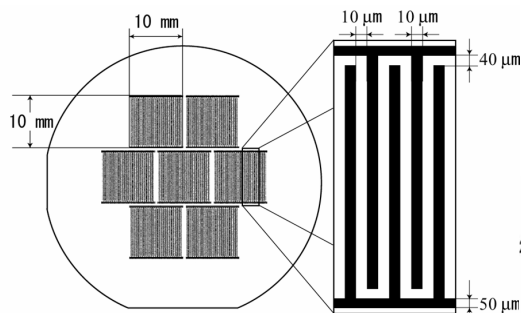


第 4 図 スペクトル振幅

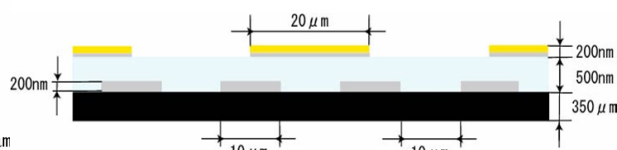
アンテナが用いられる。30mm 程度の電極ギャップをバイアスするために 10kV 程度の高電圧の印加が必要であるが、放電を防ぐために時間幅が数 μ s のパルス電圧を印加する。照射光は、100 μ J 程度まで増幅されたフェムト秒レーザパルスを用いる。その場合のパルスの繰り返しは、1kHz 程度である。レーザ増幅器が必要なことのほかに、大きな高電圧電源が必要であり、感電等の危険があること、またパルス電圧が大きな電磁ノイズを発生することが難点である。このような素子により、エネルギー約 1 μ J、電場 10kV/cm 程度のテラヘルツパルスが得られる。図 3 に典型的なパルス波形、図 4 にその波形をフーリエ変換して得られるスペクトル振幅を示す。ここに示す波形は電気光学 (EO) サンプリングの手法により得られたものである。この程度の出力が得られると、下に述べるような実時間イメージングが可能となり、その他の新しい測定法への道も開けるものと期待される。

微細構造素子

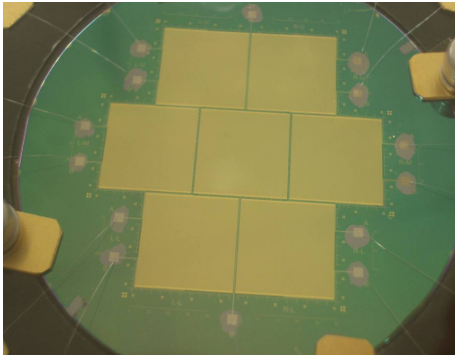
大口径光伝導アンテナにおける上記の難点を克服するため、微細構造電極を有する光伝導アンテナを、半導体微細加工技術を用いて開発している⁽⁴⁾。その構造の概略を図 5 と図 6 に、写真を図 7 に示す。素子はギャップ幅、電極幅とも 10 μ m の櫛型電極からなり、ひとつのユニットのサイズは 10mm x 10mm である。素子全体は独立して動作が可能な 7 つの



第 5 図 櫛型電極光伝導アンテナ素子の
構造の概略



第 6 図 櫛型電極光伝導アンテナ素子の
断面図

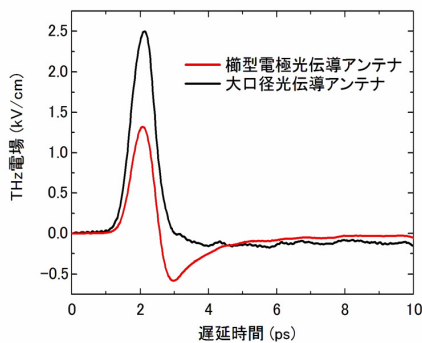


第 7 図 櫛型電極光伝導アンテナ素子の写真

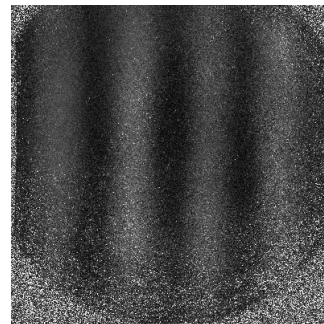
ユニットからなる。電極間の電場は、正負交互の向きになるため、素子全面に光を照射すると、発生するテラヘルツ波が遠方では互いに打ち消しあってしまう。そこでシャドウマスクを設けて照射光を交互にマスクする。数 cm 角の大面积全体にわたって均質で欠陥のない素子を微細加工によって作成することは容易ではないが、電極とシャドウマスクとのあいだの絶縁層の材料や電極パターン作成の方法を調整することにより、ほぼ欠陥のない素子が作成できた。このような素子により、DC 数十 V の印加バイ

アス電圧で、図 8 に示すように、従来型の大口径アンテナと同程度の出力が得られる。また、電圧をパルス化することで、より高電圧の印加が可能となる。

この素子を用いた場合の実用上の最大の難点は、高出力のフェムト秒レーザが必要なことであるが、ファイバレーザ増幅器技術が急速に進展しているので、このタイプの素子を用いた実用的な大出力テラヘルツ波発生装置の実現が期待できる。また、レーザ発振器からの比較的弱い照射光を用いた場合でも、この素子により、従来の小口径アンテナよりは強いテラヘルツ波出力が得られる。



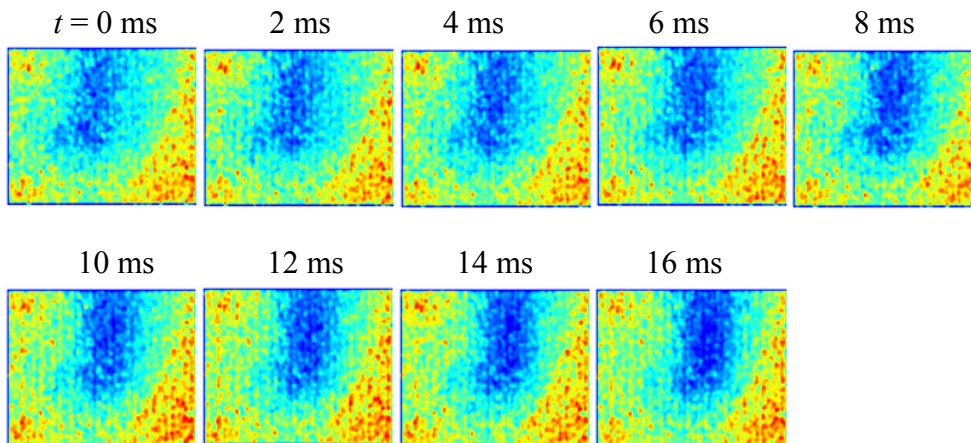
第 8 図 大口径光伝導アンテナと櫛型電極光伝導アンテナ素子からのテラヘルツ波出力



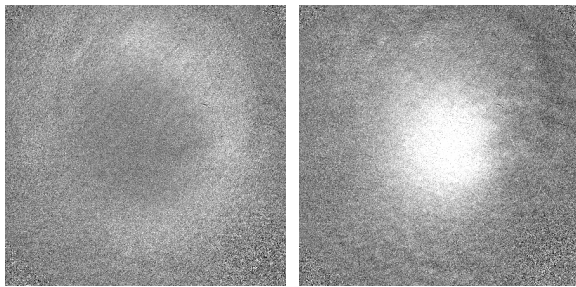
第 9 図 実時間テラヘルツ画像の例

実時間テラヘルツイメージングと高速テラヘルツイメージング

テラヘルツ波の多くの応用分野において、イメージング（画像計測）を行うことが重要である。今日得られる多くのテラヘルツ波源は比較的低出力であるため、実時間のイメージングは困難であり、数十分ほどの時間をかけて物体の位置をスキャンしながら画像を得る方法が採用されている。しかし、上記のような大出力のテラヘルツ波を用いると、同時 2 次元計測が可能となり、数秒以内の実時間画像計測や、毎秒 1000 フレームの高速ビデオ撮



第 10 図 テラヘルツ高速ビデオ



第 11 図 楕型電極光伝導アンテナ素子からのテラヘルツ波の空間分布の実時間計測画像

影が実現できる⁽⁵⁾。具体的には、EO サンプリングによるテラヘルツ波計測を 2 次元化することにより、それが可能となる。すなわち、空間的に広げられた大出力テラヘルツ波を ZnTe などの電気光学結晶に照射し、その電場によって生じた結晶の複屈折性をプローブ光の偏光状態の変化によって検出する。プローブ光は、テラヘルツ波発生素子への照射光の一部を用いることにより、テラヘルツ波と同期しており、遅延時間をスキャンすることにより、時間波形も得られる。

図 9 に示したのは、大口径アンテナからのテラヘルツ波を用いた実時間テラヘルツ画像の例で、2mm の金属のライン・アンド・スペースを透過したテラヘルツ波の画像である。また、図 10 は、繰り返し 1kHz のテラヘルツ波パルス 1 発ごとに 1 枚の画像を得る高速イメージングにより得られた運動中の金属棒の画像である。図 11 は、上記の微細構造素子からのテラヘルツ波の集光面における電場分布を画像化したものであり、これも同様の実時間イメージングによって得られた。

現状では、EO サンプリング法を用いた実時間テラヘルツイメージングには、上に記したようにパルス・エネルギー 100μJ 程度のフェムト秒レーザパルスが必要であり、大型のレーザ装置が実用上のネックとなるが、今後、固体検出素子の 1 次元または 2 次元アレイ化などにより、より小型かつ簡便な装置で実時間テラヘルツイメージングが実現できるよう

になることが期待される。

おわりに

テラヘルツ波に関する技術は現在大いに注目を集めているが、期待される多くの用途にとっては、発生素子の小型化・低価格化・大出力化が欠かせない。そのための努力の中で、ここで述べた技術が単独で、あるいは他の技術との組み合わせで用いられることであろう。テラヘルツ波に関する技術は発生、制御、検出、いずれもまだ十分ではないが、どれもが急速に進展しており、実用化に向けて、開発の状況から目が離せない。

<参考文献>

- (1) 西澤潤一編著：“テラヘルツ波の基礎と応用”、工業調査会、(2005).
- (2) テラヘルツテクノロジー動向委員会編：“テラヘルツ技術”、オーム社、(2006).
- (3) “講座 テラヘルツ・遠赤外分光”、分光研究 54 巻 1－6 号、(2005).
- (4) T. Hattori, K. Egawa, S. Ookuma, and T. Itatani : “Intense terahertz pulses from large-aperture antenna with interdigitated electrodes” , Jpn. J. Appl. Phys. **45**, (2006) L422-L424.
- (5) R. Rungsawang, A. Mochiduki, S. Ookuma, and T. Hattori : “1-kHz real-time imaging using a half-cycle terahertz electromagnetic pulse” , Jpn. J. Appl. Phys. **44**, (2005) L288-L291.