

Active aging を支援する人に優しい診断治療機器の開発 — 生体計測用テラヘルツ波分光イメージングシステムの開発 —

四方 潤一
日大工・電気電子

【緒論】

人体に無害で非侵襲のテラヘルツ波 (THz 波) は、分子の識別能力をも有する未開拓の電磁波であり、医工学等の新分野への応用が期待されている。本プロジェクトでは、THz 波を用いた超高感度・超高解像度のバイオイメージングシステムの開発を目的とする。

本年度は、光ファイバ接続型で小型・省電力の連続動作のテラヘルツ波光源である UTC-PD (Uni-Traveling Carrier Photodiode [1]) を用いた THz 波計測の高速化を目的として励起用半導体レーザー光の高速変調を行った。また、高出力パルス動作の TPO (THz-wave Parametric Oscillator [2-5]) について周波数掃引や光源の出力校正を含むシステムの自動制御化を行い、THz 分光の自動計測にも成功した。さらに、THz イメージングの高速化のため、ガルバノスキャナの自動制御によるビーム走査型イメージング計測システムを構築し、光イメージングにおいて測定時間の大幅な短縮化にも成功した。

【連続テラヘルツ波光源励起用半導体レーザーの高速変調実験】

図 1 は UTC-PD からの THz 波を高感度に測定するためのロックイン検出系である。励起半導体レーザー光に強度変調をかけて UTC-PD に入力すると THz 波に強度変調をかけることができる。その際、強度変調の速さ (変調周波数) がロックインアンプによる THz 波計測の迅速性を決める。

図 2(a) は従来用いてきた半導体光増幅器

(EDFA) の電流変調による半導体レーザー光の強度変調波形であり、EDFA の応答の遅さ (~ 10 ms) がボトルネックとなって 100 Hz 以上の強度変調が不可能であった。

そこで本年度は、3 桁程度応答の速い ($\sim 10\mu\text{s}$) 半導体レーザー (DFB-LD) の電流変調実験を行った。その結果、まず 10 kHz の変調で図 2(b) のように鋭い立上り・立下りを有する変調波形が得られた。さらに、変調周波数を 50~100 kHz に上げ

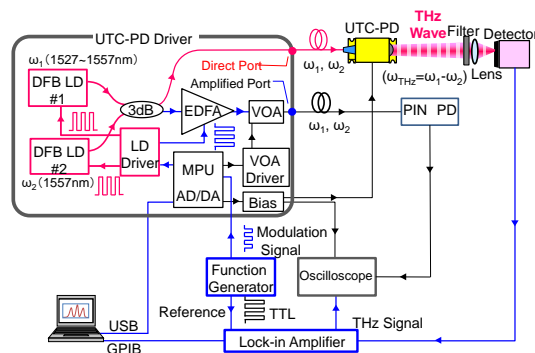


図 1 連続 THz 波光源 UTC-PD の光学実験系

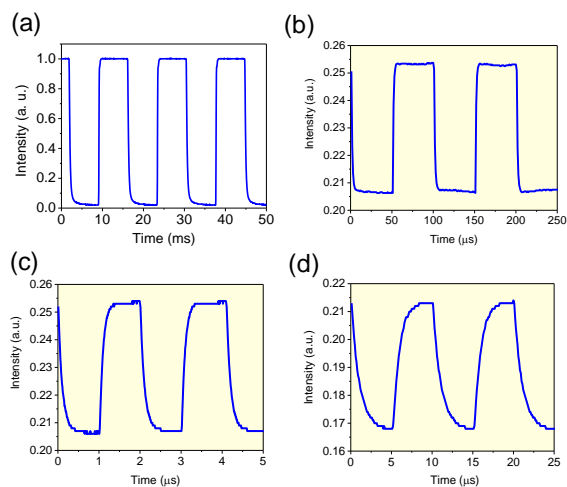


図 2 励起半導体レーザー光の強度変調波形 (a) 従来の低速変調 (70Hz) (b) 10 kHz 変調 (c) 50 kHz 変調 (d) 100 kHz 変調

ても、図 2(c)および図 2(d)のように、少し応答の遅れが出始めているものの、THz 波の強度変調に十分な光変調波形が得られた。これにより、THz 波計測の時間を飛躍的に（3桁レベルで）短縮化することに見通しを得た。

【テラヘルツ波パルス光源の自動制御とテラヘルツ分光実験】

高輝度なナノ秒 THz 波パルスを得て Hz 波分光計測にも成功している TPO（図 3）についても、周波数掃引や出力校正の自動化を含む THz 波自動計測システムの構築を進めた。

まず角度同調型の TPO において周波数掃引の要となるガルバノスキャナについて、偏向角の入力電圧依存性を精密に測定し、線形に近い特性（0.258deg/V）であることを明らかにした（図 4(a)）。さらに THz 波発生部の LiNbO₃ 結晶の位相整合角（角度同調特性）を計算し（図 4(b)）、上記の測定結果を自動制御プログラムに取り込み、THz 波の周波数掃引を自動化した。さらに、THz 波検出器（常温パイロ素子）からの出力信号を、ディジタ

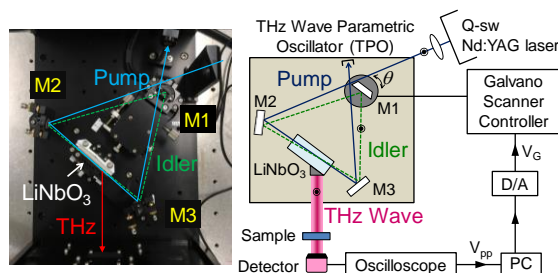


図 3 パルス動作 TPO の光学実験系

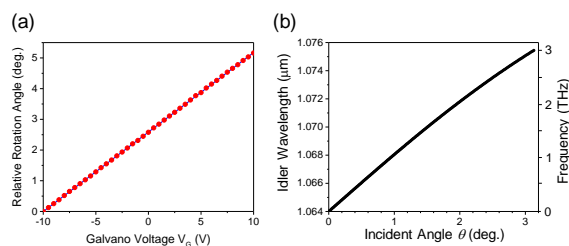


図 4 角度同調の基礎データ (a)ガルバノスキャナの電圧制御特性 (b) LiNbO₃ の位相整合角

ル・オシロスコープを通して PC に自動取込む制御プログラムを追加し、パルス間でばらつく THz 波出力の校正を自動で行える機能を実現した。

この自動制御プログラムを用いて THz 波出力の周波数依存性を自動計測した結果が図 5(a)である。1.2~2.0THz 領域で THz 波出力を連続的に計測することに成功し、1.5THz 付近で最大出力を得た。これにより、THz 分光計測に必要な周波数掃引と THz 波出力測定を含む自動計測動作を確認した。

これに基づき、参照試料（THz 波フィルタ材料：紙、および散乱体：布）を用いて THz 分光の自動計測を行った結果が図 5(b)である。測定データを図 5(a)の出力特性で規格化し、1.3~1.8THz 領域で連続的な透過スペクトルを得ることに成功した。

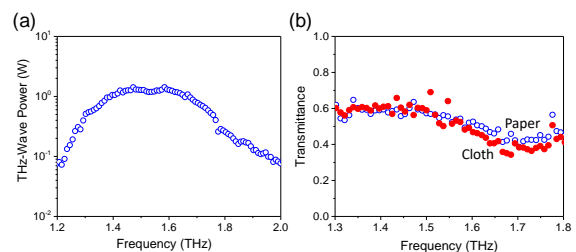


図 5 TPO の自動計測結果 (a) THz 波出力の周波数依存性 (b) THz 分光測定例

【ガルバノ制御高速イメージングシステムの構築】

これまでの THz 波イメージング応用では、試料走査型のシステムを用いてきたが、1 万画素（100 点×100 点）レベルの計測を行うと、計測時間に数時間を要する問題点があった。これを高速化するためには、ビーム走査型のシステムを構築することが必須である。しかし、THz 波領域で用いるビームスキャナには光波とは違った困難があり、THz 帯で透明でかつ、周波数依存性が少ないことが要求される。

そこで本年度は、この要求を満たすビームスキ

ャナとして2軸のガルバノスキャナに着目し、これを自動制御するシステムを構築した(図6)。

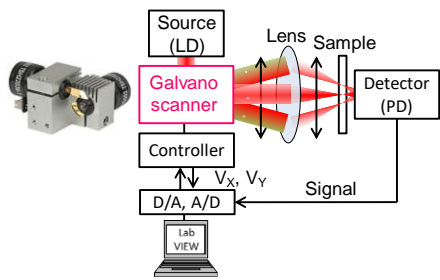


図6 ガルバノスキャナを用いたビーム走査型イメージングシステム

本システムは、光波領域でも使用できるため、本年度はまず半導体レーザを用いてその動作を評価した。まず1次元のビーム走査を行い、焦点位置付近のビーム径をナイフエッジ法により測定した結果が図7である。測定されたビーム径(23 μm)は理論値(19 μm)に近く、測定が妥当であることが確かめられた。

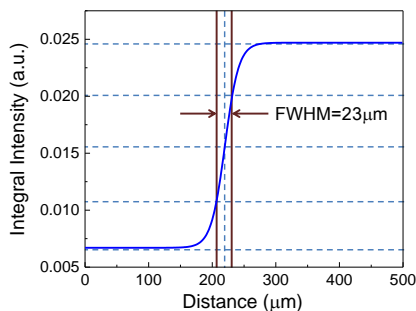


図7 ナイフエッジ法による最小ビーム径の測定結果

さらにこのシステムを2次元の透過イメージングに応用した例が図8である。測定では、ガラス基板上の金属パターン(図8左側)を測定試料に用い、ガラス基板を透過する光信号のマッピングを行った。得られた結果が図8(右側)であり、

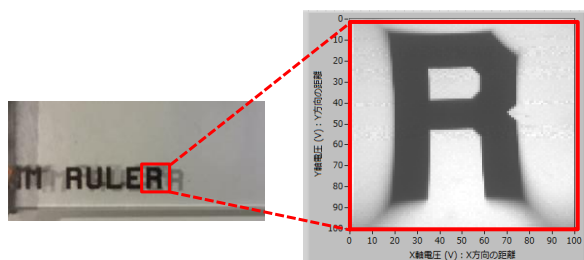


図8 ビーム走査型2次元イメージングの測定例

1万画素(100点 \times 100点)の透過測定の所要時間は数分であり、従来の1/100以下の計測時間で鮮明な画像が得ることに成功した。

ただし、円弧状のビーム走査によるイメージングを反映して、画像の4隅付近は歪みが生じることが確かめられ、走査範囲が大きい場合には画像の補正が必要である。この補正機能を制御プログラムに付与し、高速THz波イメージングの実現を図っていく予定である。

【結論】

本年度は、連続THz波光源であるUTC-PDの高速変調の研究を進め、従来の100Hz以下の低速変調動作から、3桁高い100kHzまでの高速変調に成功した。また、パルス動作THz波光源であるTPOの周波数掃引と出力補正の機能を含めた完全自動化を行い、THz分光の自動計測に成功した。さらに、高速THz波イメージングに不可欠なビーム走査型イメージングシステムの基盤を構築し、システムの正常動作を確認した。これらに基づいて、実用性と高性能を兼ね備えたTHz生体計測の実現を目指して、システムを完成させていく予定である。

参考文献

- [1] T. Ishibashi, S. Kodama, N. Shimizu, and T. Furuta, Jpn. J. Appl. Phys. **36**, 6263(1997).
- [2] J. Shikata, K. Kawase, K. Karino, T. Taniuchi, and H. Ito, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **48**, 653 (2000).
- [3] H. Minamide, S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, and K. Kawase, J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves **35**, 25 (2013).
- [4] S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, K. Kawase, and H. Minamide, Scientific Reports **4**, 5045 (2014).

- [5] Y. Takida, J. Shikata, K. Nawata, Y. Tokizane, Z. Han, M. Koyama, T. Notake, S. Hayashi, and H. Minamide, *Phys. Rev. A* **93**, 043836 (2016).