

# 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 波計測の高速化のため、1.5 $\mu\text{m}$  帯光変調器を導入して励起用半導体レーザ光の高速変調を検討した。また、前年度に構築したビーム走査型イメージング計測システムを THz 波計測に発展させるため、THz 波ビーム径に合わせた大口径のガルバノスキャナを導入し、システム動作の安定化を検討した。さらに高解像 THz イメージングに向け、極微細の THz 波ビームを生成する表面プラズモン共振器の数値解析・動作実証実験を検討した。

## 【連続テラヘルツ波光源励起用半導体レーザの高速変調実験】

UTC-PD から放射される連続 THz 波を高感度に測定するためには、THz 波に強度変調をかけてロックイン検出することが不可欠であり、UTC-PD に入力する 1.5 $\mu\text{m}$  帯 2 波長励起光に強度変調を与えればこれを達成できる。昨年度は DFB 半導体レーザ (DFB-LD) の電流変調を検討し、1.5 $\mu\text{m}$  帯 2 波長光に kHz オーダの強度変調に成功したが、消光比は最大で 1.8dB に留まっていた。

そこで本年度は、UTC-PD 光学系への 1.5 $\mu\text{m}$  帯動作光変調器 (BATi VOAP402HP-4455) 導入を検討した (図 1)。

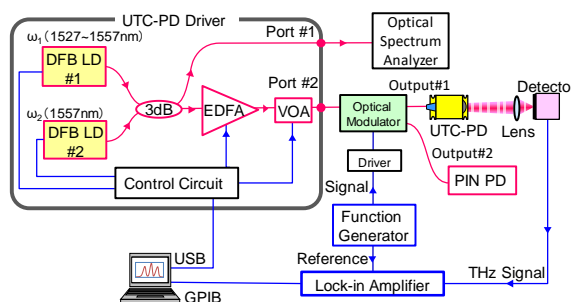


図 1 外部変調器を用いた UTC-PD の光学実験系

外部変調器の導入に先立ち、従来の低速変調 (光ファイバ増幅器の 70Hz 電流変調) を用いて UTC-PD からの THz 波出力を測定した結果、0.1~2THz 領域の THz 波の検出に成功し、ダイナミックレンジ約 30dB を得た (図 2)。

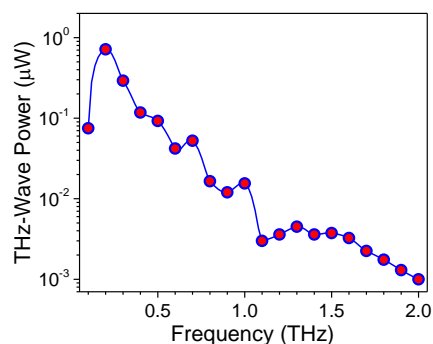


図 2 UTC-PD からの THz 波出力特性

次に光ファイバ・電気配線系および駆動回路の準備を行い、外部変調器を導入した UTC-PD 光学系を構築した (図 1)。1.5 $\mu\text{m}$  帯 2 波長光の出力を PIN フォトダイオードでモニタした結果、図 3 に示すように 100Hz~1kHz の変調周波数に

において高い消光比（約 13dB 以上）を得ることに成功した。これより、高速 THz 波検出への基盤を得た。

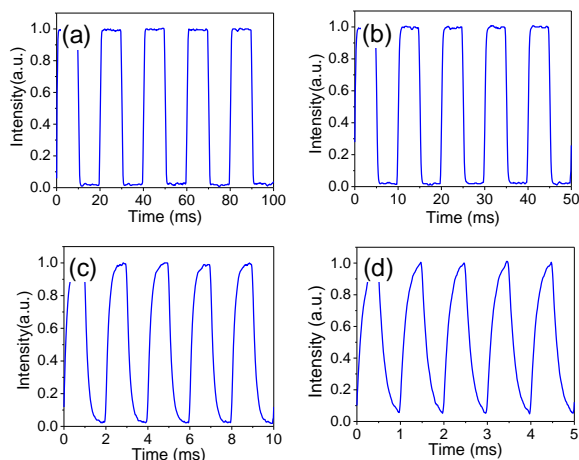


図 3 励起光の強度変調波形 (a) 変調周波数 50Hz  
(b) 100 Hz (c) 500 kHz (d) 1 kHz

【ガルバノ制御高速イメージングシステム】

THz 波イメージングの高速化には、ビーム走査型のイメージングが必須であり、昨年度は基礎システムを構築した。これを THz 波イメージングシステムへと発展させるため、本年度は THz 波ビーム径（10mm）に対応した大型ガルバノスキャナを導入し、光源（半導体レーザ）のビーム径を 10mm に調整してビーム走査型のイメージングシステムを構成した（図 4）。

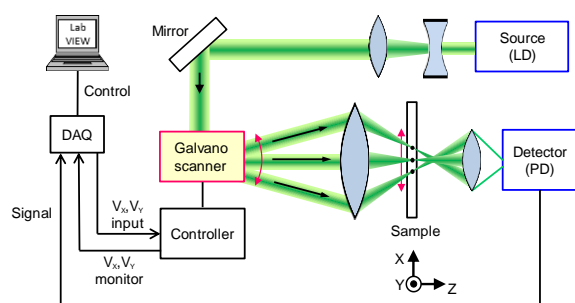


図 4 ガルバノスキャナを用いたビーム走査型イメージングシステム

これまで横（X 軸）方向のビーム走査に用いる制御電圧に鋸波形を使用していたが、原点復帰の

際に X 軸ミラーが振動し、横方向の画像の乱れにつながる事が分かった。そこで、図 5 に示すように画像取得（+X 方向）の走査では線形に電圧を増加させ、最大値に到達した後は正弦波形状の電圧を用いて緩やかに原点復帰することにより、X 軸ミラーの振動抑制を図った。

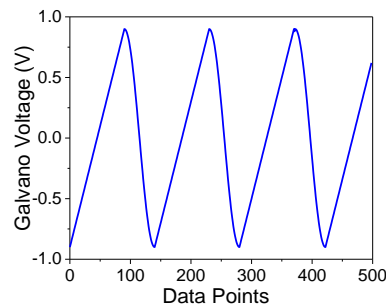


図 5 X 軸制御に用いた電圧波形

システム全体の動作確認を行うため、半導体レーザ光とテスト試料を用いた 2 次元透過イメージング測定を行った。ここでガルバノスキャナには X,Y 軸ともに 0.9~+0.9V の制御電圧を与え、2.5mm×2.5mm の領域でビーム走査を行った。図 6 は文字の付近で 90 点×60 点で測定した透過像であり、5 分以内の計測時間で像歪みの少ない安定した画像が得られた。このシステムにおいて、光源を THz 波光源に置き換え、光学素子を THz 波用のものに変更すればビーム走査型の高速 THz イメージングが可能となる。

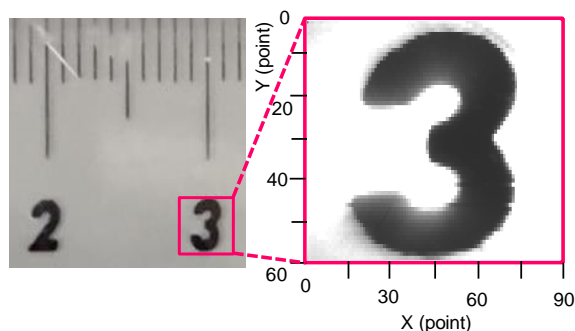


図 6 ビーム走査型 2 次元イメージングの測定例

【ガルバノ制御高速イメージングシステム】

微小開口の周囲に円形回折格子を付した表面プラズモン共振器は回折限界を超える極微細の

THz 波ビームを生成し、超高解像度の THz イメージングを実現する「THz 帯スーパーレンズ」としての応用が注目されている。我々は世界に先駆けて THz 帯の表面プラズモン共振器の開発に成功している[2, 3]。このデバイスは集束イオンビームで凹凸加工したステンレス基板に金薄膜を付して作製した。

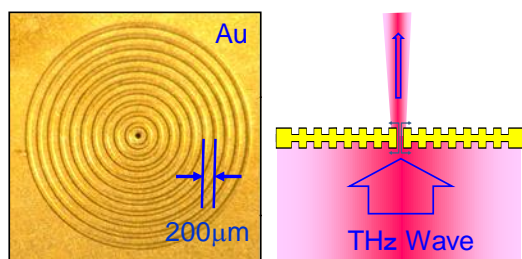


図 7 THz 帯表面プラズモン共振器デバイス

図 8 は THz 帯表面プラズモン共振器を透過する THz 波 (1.5THz) の電磁場強度を解析した結果であり、開口付近での局所的な電場集中と微細な THz 波ビーム放射を確認した。その際、共振器面内で共振する表面プラズモンは、励振方向 (X 軸方向) に偏った部分的な領域での共振し、自由伝搬する THz 波の電場強度も X 軸方向に顕著であることを確かめた。さらに本共振器への THz 波入射角特性を解析し、有限の入射角において透過ピーク (共鳴周波数) がスプリットし、角度変化に応じて連続的にピーク位置がシフトする現象を新たに見出した。

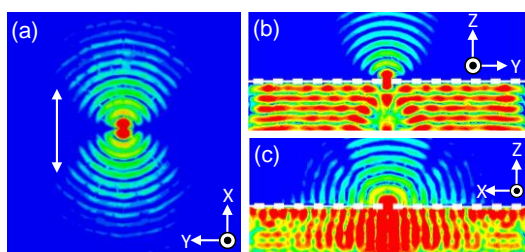


図 8 デバイスを透過する THz 電磁場の解析結果

これを実証するため、これまでに開発してきた周波数可変 THz 波光源[4-7]を用いて THz 帯透過

スペクトルの入射角依存性を測定した結果、図 9 に示すように角度に依存したレベルスプリットを初めて観測することに成功した[8-10]。

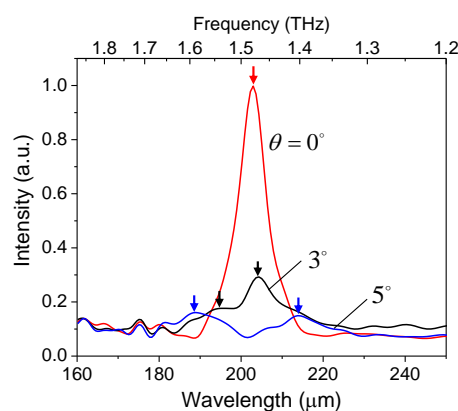


図 9 THz 帯透過スペクトルの測定結果

### 【結論】

本年度は、THz 波光源である UTC-PD の高速変調の研究を進め、kHz オーダの高速変調と高い消光比を得た。また高速 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、システム動作の安定化を達成した。さらに高解像 THz イメージングに不可欠な THz 波ビーム制御デバイスの解析と動作実証実験にも成功した。以上の成果から、人体に無害で非侵襲な 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基盤を得た。

### 参考文献

- [1] T. Ishibashi, S. Kodama, N. Shimizu, and T. Furuta, Jpn. J. Appl. Phys. **36**, 6263(1997).
- [2] K. Ishihara, T. Ikari, H. Minamide, J. Shikata, K. Ohhashi, H. Yokoyama, and H. Ito, Jpn. J. Appl. Phys. **44**, L929 (2005).
- [3] K. Ishihara, K. Ohashi, T. Ikari, H. Minamide, H. Yokoyama, J. Shikata, and H. Ito, Appl. Phys. Lett. **89**, 201120 (2006).
- [4] J. Shikata, K. Kawase, K. Karino, T. Taniuchi, and H. Ito, IEEE Trans. Microwave Theory Tech.

**48**, 653 (2000).

- [5] H. Minamide, S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, and K. Kawase, *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **35**, 25 (2013).
- [6] S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, K. Kawase, and H. Minamide, *Scientific Reports* **4**, 5045 (2014).
- [7] 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).
- [8] 四方潤一, 時実 悠, 南出泰丞, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (2018).
- [9] 時実 悠, 四方潤一, 南出泰丞, 理研シンポジウム第6回光量子工学研究 (2018).
- [10] 時実悠, 四方潤一, 瀧田佑馬, 南出泰丞, レーザー研究 **47** (2019), in press.