

# 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】

光波・マイクロ波の中間周波数帯にあるテラヘルツ波 (THz 波) は、最近注目を集めつつある未開拓の電磁波である。THz 波は、生体に無害な低エネルギーの電磁波であるが、生体分子の識別能力をもち、特異な物質透過性をも有する。近年、THz 波を用いた DNA や癌組織等のラベルフリー検出等[1,2]の応用研究が報告され始めている。

我々は THz 波技術研究の黎明期より、レーザ・フォトニクス技術を用いた THz 波発生・検出とその制御に関する研究開発を行ってきた[3-7]。本プロジェクトでは人に優しい THz 波技術の医工学応用を目的として、先端のテラヘルツ光学と高度なエレクトロニクスを融合し、生体分光・イメージング機能を備えた小型・高性能の新しい診断治療機器の研究開発に挑む。

初年度である本年度は、顕微鏡・内視鏡応用にも適したフレキシブルな光ファイバ接続型で小型・省電力の連続 THz 波光源である UTC-PD (Uni-Traveling Carrier Photodiode [8]) に着目し、発生した THz 波の高感度検出を検討した。その結果、0.1~1.5THz 領域のテラヘルツ波発生・検出に成功し、THz 波イメージングの第一歩となる THz 波ビームプロファイルの計測に成功した。また、高輝度のパルス動作 THz 波光源については、従来の THz 波出力制約の要因を解明し、テーブルトップ型 THz 波光源で世界最高レベルの THz 波出力 (ピーク出力 > 50kW) に成功した [9-11]。

## 【連続テラヘルツ波発生の光学実験系】

図 1 に本研究で用いた THz 波光源と光学実験系の概要を示す。励起光源である UTC-PD ドライバは、1.5 $\mu\text{m}$  帯で広帯域に波長可変な DFB LD#1 (12ch の集積型 DFB 半導体レーザ) と波長固定の半導体レーザ DFB LD#2 を内蔵している。これらの 1.5 $\mu\text{m}$  帯レーザ光を合波し、光増幅器 (EDFA) を通して増幅し、高出力の 1.5 $\mu\text{m}$  帯 2 波長光を得る。これを UTC-PD に入力すると、2 波長光の差周波の周波数成分をもつ連続 THz 波が発生する。

本年度は、小型簡便な常温動作の焦電型検出器を用いて微弱な連続 THz 波を高感度に検出するため、熱雑音の少ない電子的な強度変調を用いて THz 波のロックイン検出を行った (図 1)。その際、可変減衰器 (VOA) に外部変調信号を入力して強度変調された 2 波長光を UTC-PD に入力し、THz 波に強度変調を与えた。また、UTC-PD からの THz 波出力に混じる 1.5 $\mu\text{m}$  帯 2 波長光をカットするため光学フィルタを挿入し、THz 波成分をレンズ集光して焦電型検出器に入射した。

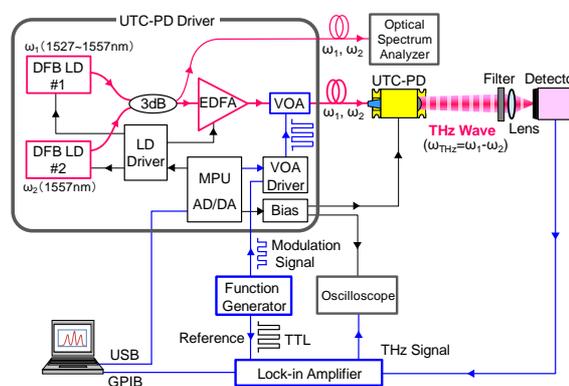


図 1 連続 THz 波光源と光学実験系

### 【1.5 $\mu\text{m}$ 帯 2 波長励起光源の動作特性】

まず励起光源である UTC-PD ドライバの光出力特性を調べた。図 2 は光スペクトラムアナライザを用いて 1.5 $\mu\text{m}$  帯 2 波長光のスペクトルを測定したものであり、所望の周波数間隔 0.1~2THz の掃引を確認した。また、外部変調信号 (0~1V の矩形波) を入力した際の時間波形を InGaAs フォトダイオードにより観測した結果が図 3 である。これより消光比約-17dB が得られ、所望の光変調動作を確認した。

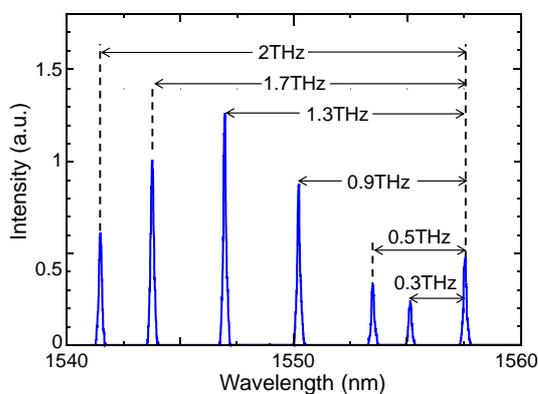


図 2 1.5 $\mu\text{m}$  帯 2 波長励起光のスペクトル

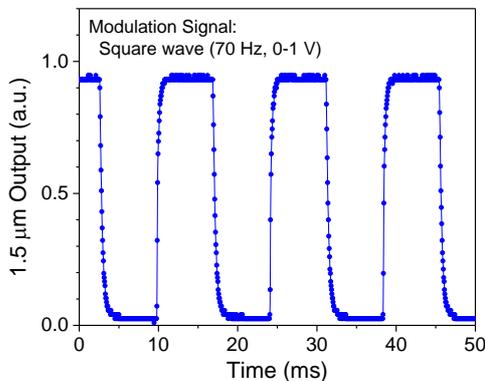


図 3 1.5 $\mu\text{m}$  帯 2 波長励起光の強度変調

### 【UTC-PD の動作特性】

強度変調した 1.5 $\mu\text{m}$  帯 2 波長光の入力に対する THz 波 (0.3THz) の出力特性を図 4 に示す。光入力を増加させると THz 波出力は光パワーの 2 乗に近い増加を示し、光入力が増加すると THz 波出力が飽和し始めることが分かった。そこで光入力を 12.5mW に固定し、THz 波の周波数

(=2 波長光の周波数間隔) を掃引した際の THz 波出力を図 5 に示す。これより、0.1~1.5THz の周波数領域において THz 波の検出に成功した。その際、UTC-PD からの THz 波出力は、0.3THz 付近において最大出力となることが分かった。

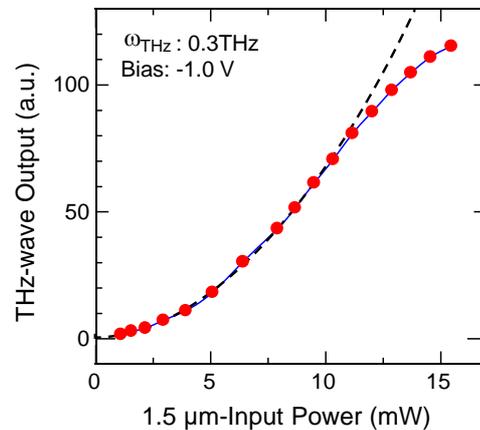


図 4 励起光入力-THz 波出力特性

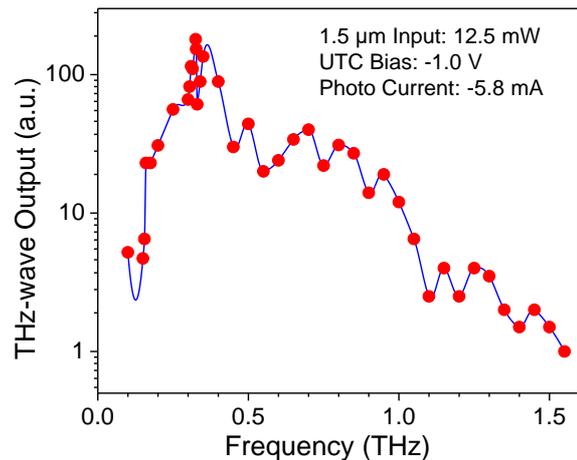


図 5 THz 波出力の周波数特性

さらに、THz 波イメージングの第一歩として、ナイフエッジ法による THz 波ビームプロファイルの自動計測を行った。実験では UTC-PD から出力される THz 波ビームの光軸に垂直にナイフエッジを設置し、その位置を 1 軸ステージで制御しつつ、ロックインアンプの出力を測定した。そこで得られた THz 波の積分強度を空間微分して得たビームプロファイルの例 (伝搬距離 100mm における横方向の THz 波強度分布) が図 6 である。これより、基礎となる 1 次元 THz 波イメー

ジングを達成できた。

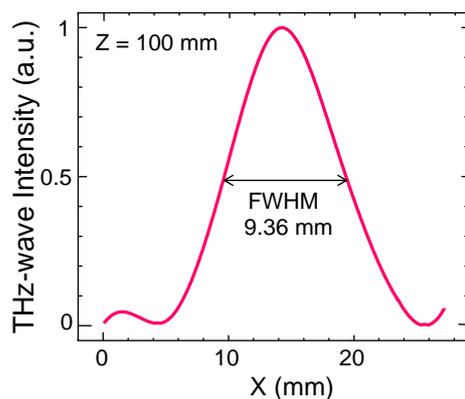


図 6 THz 波のビームプロファイル測定例

### 【パルス動作テラヘルツ波光源の高出力化】

一方、これまでから研究を進めてきたパルスレーザ励起の THz 光源である THz 波パラメトリック発生器 (TPG) [3-7]は、パルス動作ながら高輝度な THz 波を出力するため、THz カメラ等を用いて高速なシングルショット THz イメージングに適している。そこで本年度は、この TPG の高出力化についても検討した。

まず、これまで用いてきたナノ秒パルス動作の Nd:YAG レーザ (パルス幅 10~25ns) にて非線形光学結晶 ( $\text{LiNbO}_3$  もしくは  $\text{MgO:LiNbO}_3$ ) をこれまで用いてきたパワーレベル (ピーク出力 1MW 程度) で励起すると、結晶内にブリルアン散乱を励起を引き起こし、レーザ光が逆戻りして THz 波出力を制約することを見出した[9-11]。

そこで、ブリルアン散乱の問題の解決法として、結晶内の音響フォノン寿命 (約 1.5ns) より短いパルス幅の励起レーザ (Nd:YAG マイクロチップレーザ、パルス幅 420ps) を使用し、光注入型の光学実験系 (図 7) にて THz 波の出力特性を検討した。その結果、従来の 1~100W (ピークパワー) 程度の THz 波出力から飛躍的な出力向上が観測され、図 8 に示すように最大で 50kW (ピークパワー) 以上を達成し、0.7~3THz の広帯域な周波数可変域が得られた[9-11]。この TPG システ

ムはテーブルトップの小型 THz 波光源ながら、大規模施設である自由電子レーザ (ピーク出力~2kW) をも凌駕する世界最高レベルの THz 波出力が得られた。

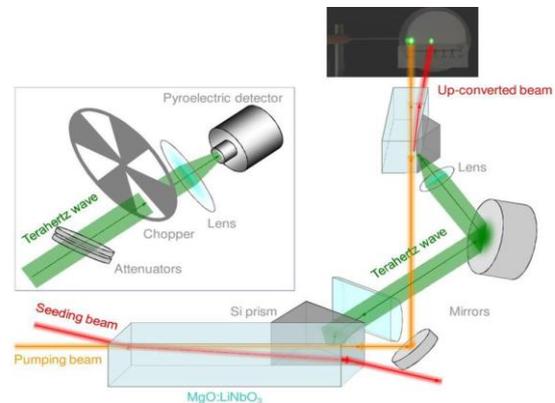


図 7 パルス動作 TPG の光学実験系

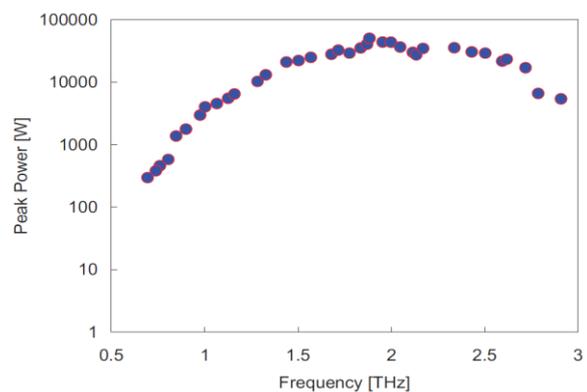


図 8 THz 波出力の周波数特性

### 【結論】

本年度は、常温検出器を用いて小型・省電力の UTC-PD からの連続 THz 波の検出に成功し、THz 波のビームプロファイル測定を行った。また、パルス動作 THz 波光源の大幅な出力向上を達成した。今後、本光源を用いて小型・移動可能な THz 波分光・イメージングシステムの構築を行い、生体材料等への応用展開をめざす。

### 参考文献

- [1] M. Brucherseifer, M. Nagel, P. Haring Bolivar, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, Appl. Phys.

- Lett. **77**, 4049 (2000).
- [2] P. Knobloch, C. Schildknecht, T. Kleine-Ostmann, M. Koch, S. Hoffmann, M. Hofmann, E. Rehberg, M. Sperlings, K. Donhuijsen, G. Hein, and K. Pierz, *Phys. Med. Biol.* **47**, 3875 (2002).
- [3] J. Shikata, M. Sato, T. Taniuchi, H. Ito, and K. Kawase, *Opt. Lett.* **24**, 202 (1999).
- [4] J. Shikata, K. Kawase, K. Karino, T. Taniuchi, and H. Ito, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **48**, 653 (2000).
- [5] J. Shikata, K. Kawase, and H. Ito, *Electron. Commun. Jpn.: Part 2* **86**, 52 (2003).
- [6] K. Ishihara, K. Ohashi, T. Ikari, H. Minamide, H. Yokoyama, J. Shikata, H. Ito, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 201120 (2006).
- [7] H. Minamide, S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, and K. Kawase, *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **35**, 25 (2013).
- [8] T. Ishibashi, S. Kodama, N. Shimizu, and T. Furuta, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 6263(1997).
- [9] S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, K. Kawase, and H. Minamide, *Scientific Reports* **4**, 5045 (2014).
- [10] 四方潤一,平成 26 年度応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会若手研究者サマースクール(招待講演), 木更津(2014).
- [11] 四方潤一,IEEE MTT-S Kansai Chapter ワークショップ(招待講演), 豊中(2014).