

# テラヘルツ領域シングルショットマルチスペクトラルイメージングのための 実証用フィルタサンプルとチャープ用導波路の作製

Fabrication of filter sample and waveguide for chirp for single-shot multispectral imaging in terahertz region

高澤 一輝 (B4), 鈴木 敬和 (D1), 山口 勇輝 (M2), 根本 寛史 (M1), 松下 一輝(B4)

Kazuki Takasawa, Takakazu Suzuki, Yuki Yamaguchi, Hirofumi Nemoto, Kazuki Matsushita

## Abstract

We fabricated waveguides for frequency-chirped terahertz wave generation and filters as samples for demonstrating the principle of multispectral imaging. Frequency chirped terahertz wave is required for terahertz region multispectral imaging. We fabricated terahertz filters with different transmission frequencies by periodic structure of holes.

## 1. はじめに

テラヘルツ領域は電波と光波の中間の周波数をもつ電磁波であり、近年フェムト秒パルスレーザーが進展してきたことで、急速にテラヘルツ領域の発展が進んでいる。特に CPA(Chirped Pulse Amplification) システムと波面傾斜法を用いたテラヘルツ波発生では、 $1.2 \text{ MV/cm}$  もの高強度でテラヘルツ波を集光できることが報告されている[1]。テラヘルツ波の応用の1つとしてイメージングがあり、電波の持つ高透過性と光の持つ高分解能を両立した撮像が可能となることや、有機物の指紋スペクトルと呼ばれる特有の吸収がテラヘルツ帯で現れるため、幅広い分野での応用が期待されている。例えば、セキュリティの分野では空港での隠匿物検査や、指紋スペクトルを利用して違法薬物の検知に利用できる。よってテラヘルツ領域において各波長のイメージ(マルチスペクトラルイメージ)を取得することで、どの周波数で吸収が起きるか等をイメージングによって判別することが出来、これは有用である。

従来テラヘルツ波で、テラヘルツ波に対してプロ

ーブ光の時間遅延を走査し、電気光学効果を利用したプローブ光の偏光変化を計測することで電界時間波形を再生し、この波形をフーリエ変換することでテラヘルツ領域の分光計測を行う手法である THz-TDS(Terahertz-Time Domain Spectroscopy)を用いて 2次元空間イメージングをする際には、空間軸方向や時間軸方向に走査する必要があり、対象は再現性のある現象に限定されてしまうととも計測時間も短くはならない。我々は、周波数チャープレーザー光を用い、単一ショットで最大 25 フレームのバーストイメージングを実現する方法として SF-STAMP (Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) utilizing spectral filtering)法を開発し、近赤外域で超高速相変化等のイメージ計測に成功している[2]。そこで、プローブ光として用いるテラヘルツ波を導波路による分散を利用して線形周波数チャープさせ、SF-STAMP と組み合わせることで、シングルショットテラヘルツ領域マルチスペクトラルイメージングが可能になると期待できる。

本研究では、マルチスペクトラルイメージングする上で必要な周波数チャープテラヘルツ波発生用の導波路と、マルチスペクトラルイメージング原理実証用のサンプルとしてフィルタを作製した。

## 2. 実験セットアップ

### 2.1. テラヘルツ波発生系

高強度のテラヘルツ波を発生するため、CPA か

らのフェムト秒パルスレーザーを使って波面傾斜法 [3]を用いてテラヘルツ波発生を行った。光源は中心波長 800 nm, 繰り返し周波数 1 kHz, パルス幅 50 fs, パルスエネルギー 700  $\mu$ J を用い, 溝本数 1800 line/mm の回折格子に水平偏光で入射した。焦点距離  $f=170$  mm と  $f=100$  mm のシリンダリカルレンズを使って回折格子の像を LN 結晶内部のテラヘルツ発生面付近に結像するように LN 結晶を設置する。テラヘルツ発生系を Fig. 1 に示す。

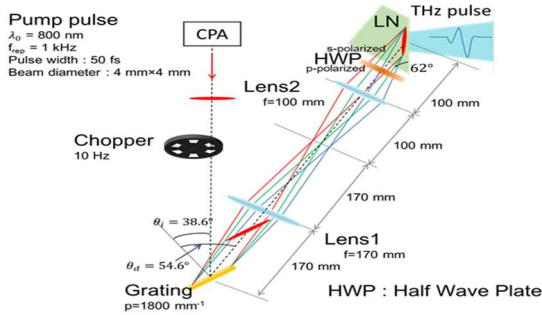


Fig.1 Experimental setup for terahertz wave generation using pulse front tilt method

## 2.2. テラヘルツ波検出系(THz-TDS)

テラヘルツ波の時間波形やスペクトルを計測するための手法として THz-TDS がある。THz-TDS の実験系を Fig. 2 に示す。プローブ光は遅延光学系を通過後, 時空間的に一致するように P 偏光で EO 結晶に入射し, テラヘルツ波による EO 効果を受けて楕円偏光となり, 四分の一波長板によってリタレーション  $\pi/2$  を加えられる。これをウォラストンプリズムで P 偏光成分, S 偏光成分に分離し, バランスディテクタで強度差を検出することでテラヘルツ波電界強度を計測している。検出感度をより高めるために, ロックインアンプを信号の増幅に用いて, その信号成分を取り出すためにテラヘルツ波には CPA システムと同期した 500 Hz の変調がかけられている。

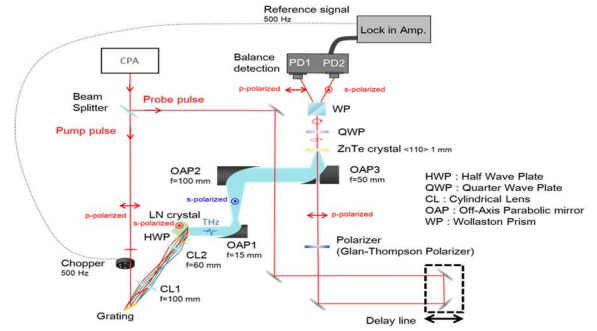


Fig.2 Experimental setup of THz-TDS

## 2.3. 周波数チャープテラヘルツ波発生系

PPWG(parallel-plate waveguide)[4]と呼ばれる金属導波路を用いた周波数チャープテラヘルツ波発生系のセットアップを Fig.3(a) に示す。PPWG(Fig.3(b))はアルミ板を用い, テラヘルツ波は 2mm の隙間を 4mm 伝搬するように設計した。テラヘルツ波の集光点に PPWG を配置し, 真ん中のくり抜かれた隙間部分をテラヘルツ波が通過するようにする。

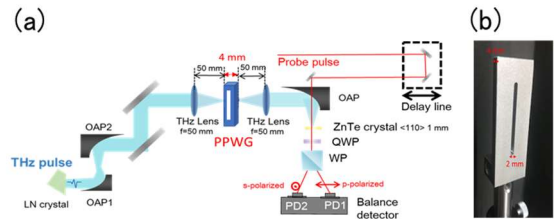


Fig.3 (a) Setup of frequency chirp terahertz wave generation using PPWG (b)PPWG

## 3. 実験結果

### 3.1. PPWG によるチャープ

PPWG 伝搬後のテラヘルツ波の波形を THz-TDS で取得した。この時の時間波形を Fig.4(a), スペクトルを Fig.4(b)に示す。また, 入力 of テラヘルツ波の時間波形を Fig.5(a), スペクトルを Fig.5(b)に示す。

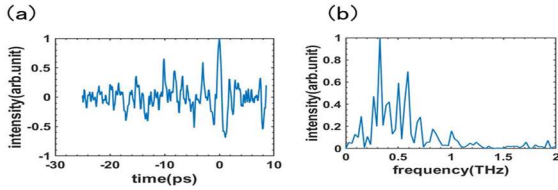


Fig.4(a) Temporal waveform after PPWG propagation ; (b) Spectrum after PPWG propagation

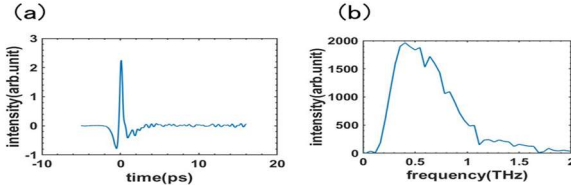


Fig.5(a) Temporal waveform(incident terahertz wave); (b) Spectrum(incident terahertz wave)

PPWG 伝搬後の時間波形は入射のテラヘルツ時間波形と比べると、サイクル数が増えており時間幅が伸びていることがわかる。しかしきれいにチャープした波形とはなっておらず、PPWG 伝搬後のスペクトルもギザギザした形となっている。おそらく、導波路内での単一モード伝播が実現されておらず、モード間の干渉が起きていると予想される。導波路への THz 波の結合の改善が必要である。

### 3.2. フィルタサンプルの作製

イメージング用のサンプルとして MHA(Metal Hole Array)[5]と呼ばれるフィルタを作製した。MHA は Fig.6(a)のように厚さ 0.3 mm、一辺 25 mm のステンレス板に Fig.6(b)のような穴の大きさ・間隔で周期的に穴を開けて作製したものである。この周期構造によって透過周波数が変化する。

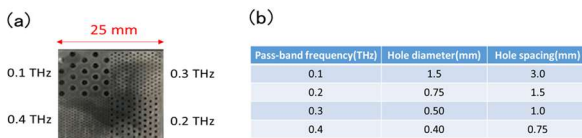


Fig.6(a) Fabricated MHA; and (b) Design parameters of MHA

MHA の特性評価をするために、透過周波数の異なる 4 か所にそれぞれコリメートした光束の大きいテラヘルツ波を当て、透過するテラヘルツ波のスペクトルを THz-TDS で計測した。得られたスペクトルを Fig.7 に示す。4 か所でそれぞれ 0.1~0.4 THz のピークを示しており、テラヘルツ波の当たる位置によって透過する周波数の異なるテラヘルツフィルタとして機能していることがわかる。

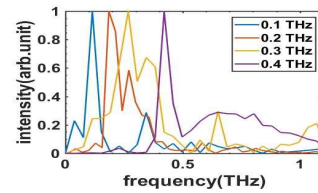


Fig.7 Transmission spectrum of MHA(0.1~0.4 THz)

## 4. まとめ

PPWG を伝搬することで時間幅の伸びた波形は得られたが、チャープは見られず改善が必要である。テラヘルツフィルタを作製し、周期構造によって透過周波数が異なることを確認した。マルチスペクトラルイメージング用のサンプルとして利用できると考えられる。

## 5. References

1. W. Withayachumnankul and M. Naftaly, "Fundamentals of Measurement in Terahertz Time-Domain Spectroscopy," *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* **35**, 610–637 (2014).
2. T. Suzuki, F. Isa, L. Fujii, K. Hirose, K. Nakagawa, K. Goda, I. Sakuma, and F. Kannari, "Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) utilizing spectral filtering," *Opt. Express* **23**, 30512–30522 (2015).
3. H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka, "Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO<sub>3</sub>,"

Appl. Phys. Lett. 98, 91106 (2011).

4. R. Mendis and D. M. Mittleman, "An investigation of the lowest-order transverse electric (TE<sub>1</sub>) mode of the parallel-plate waveguide for THz pulse propagation," *Josa B* **26**, A6 (2009).
5. T. Yasui, K. Sawanaka, A. Ihara, E. Abraham, M. Hashimoto, and T. Araki, "Real-time terahertz color scanner for moving objects," *Opt. Express* **16**, 1208 (2008)