

## フォトキャリアテラヘルツコムの応用

安井 武史

徳島大学ポスト LED フォトニクス研究所(〒 770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

### Application of Photo-Carrier Terahertz Comb

Takeshi YASUI

*Institute of Post-LED Photonics, Tokushima University, 2-1, Minami-Josanjima, Tokushima 770-8506, Japan*

(Received October 8, 2021)

When an optical frequency comb is incident on a photoconductive antenna (PCA) for terahertz (THz) detection, a THz comb of a photocarrier (PC-THz comb) is generated inside the PCA. This is equivalent to incorporating the function of a THz frequency ruler into the PCA, and can be used for various applications. In this review, we introduce the application of a PC-THz comb for the absolute frequency measurement of CW-THz waves and distance measurement with its phase slope.

**Key Words:** Terahertz, Optical comb, Terahertz comb, Photoconductive antenna, Photocarrier

#### 1. はじめに

光周波数コム(光コム)<sup>1-4)</sup>は、多数の狭線幅光周波数モード列が等間隔(= 繰り返し周波数 =  $f_{\text{rep}}$ )で櫛の歯状に立ち並んだ超離散マルチ・スペクトル構造を有し、広い周波数選択性・非常に高いスペクトル純度・周波数通倍機能・単純性といった特徴を有している。更に、レーザー制御技術により、全ての光周波数モード列を周波数標準に位相同期することが可能であるので、「光周波数の物差し」として利用できる。この光コムをテラヘルツ(THz)発生用光伝導アンテナ(PCA)に入射すると、 $f_{\text{rep}}$ を維持したまま、THz帯に波長変換された周波数コムが自由空間に放射される<sup>5)</sup>。これを電磁波 THz コム(EM-THz コム)と呼ぶ。この EM-THz コムは、光コム同様、広帯域 THz スペクトルの周波数目盛りとして利用できる。これをデュアル THz 分光分光法<sup>6)</sup>で読み取るにより高精度 THz 分光計測<sup>7-13)</sup>が可能になる。

一方、光コムを THz 検出用 PCA に入射すると、PCA ギャップ部(光伝導膜)における光励起キャリア(フォトキャリア)の生成・消滅が光コムによって変調されることになるので、フォトキャリアの THz コム(PC-THz コム)が PCA 内部に生成されることになる。これは、PCA 検出器に THz 周波数物差しの機能を内蔵させることと等価であり、これを基準として、CW-THz 波の周波数や位相を読み取るにより、様々な応用が可能になる。本稿では、CW-THz 波の絶対周波数計測<sup>14-18)</sup>と CW-THz 波の位相スロープを用いた距離計測<sup>19)</sup>について紹介する。

#### 2. CW-THz 波の絶対周波数計測

##### 2.1 測定原理

測定には、光伝導ミキシング用いる[Fig. 1(a)]. 従来の電氣的ヘテロダイン法との主な違いは、CW-THz 波の検出器兼ミキサー(ヘテロダイン検出器)として PCA を用いることにより、室温環境下で高感度かつ広帯域なスペクトル感度を実現している点である。もう一つの違いは、PCA 中に生成した PC-THz コムを、マルチ局部発振器群として利用することにより、THz 領域を広くカバーしている点である。THz 時間領域分光法(THz-TDS)を用いた先行研究で、PCA(光伝導膜: 低温成長 GaAs 薄膜)の検出スペクトル感度が 200 THz に達していることが報告されており<sup>20)</sup>、本手法により室温環境下で THz 領域をフルカバー可能な高調波ミキシングが可能である。

Fig. 1(b)は、光伝導ミキシング法における周波数スペクトル信号の振る舞いを示している。光コム(繰り返し周波数  $f_{\text{rep}}$ )を THz 検出用 PCA に入射すると、PCA 内部に PC-THz コム(周波数 =  $f_{\text{rep}}, 2f_{\text{rep}}, \dots, nf_{\text{rep}}$ )が生成される。このような状況下で、被測定 CW-THz 波(周波数 =  $f_{\text{THz}}$ )が PCA に入射されると、光伝導ミキシング過程を経て、両者のビート信号成分(周波数 =  $f_b, f_{\text{rep}} \pm f_b, 2f_{\text{rep}} \pm f_b, \dots, nf_{\text{rep}} \pm f_b$ )が PCA 出力電流信号として RF 帯に生成される。ここで、最も低周波のビート信号( $f_b$  ビート信号)は、被測定 CW-THz 波とそれに最隣接した  $m$  次のコムモード(周波数  $mf_{\text{rep}}$ )のミキシングによって生成しているので、被測定 CW-THz 波の絶対周波数  $f_{\text{THz}}$  は以下のように与えられる。

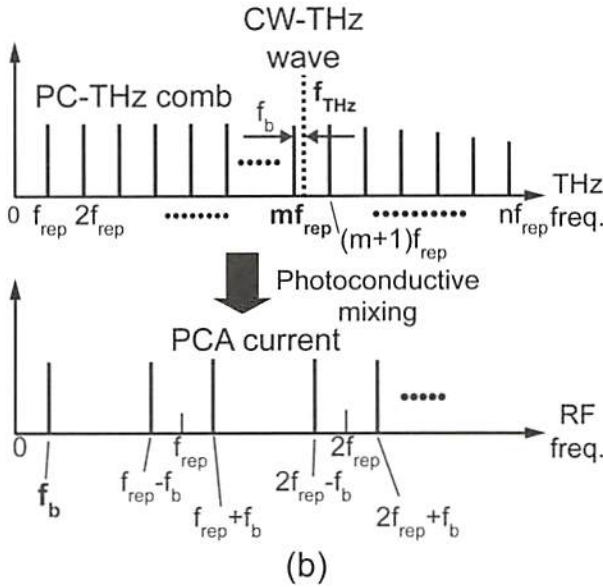
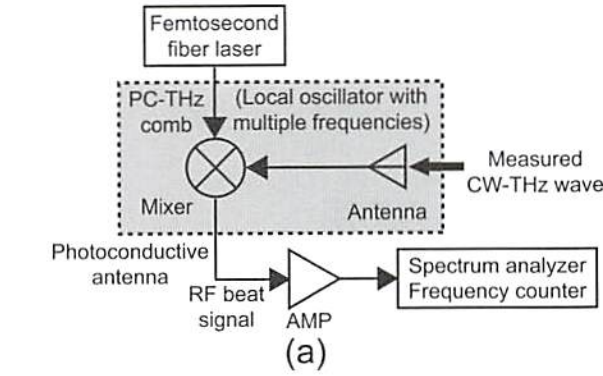


Fig. 1 Principle of operation. (a) Photoconductive mixing and (b) the corresponding spectral behavior.

$$f_{\text{THz}} = mf_{\text{rep}} \pm f_b \quad (1)$$

$f_{\text{rep}}$  および  $f_b$  は、RF 帯周波数計測機で直接測定可能である。  $m$  と  $f_b$  符号を決定するためには、モード同期周波数  $f_{\text{rep}}$  を  $\delta f_{\text{rep}}$  だけ変化させた時のビート周波数  $f_b$  の変化量  $\delta f_b$  を計測する。この場合、  $f_{\text{THz}}$  は以下のように与えられる。

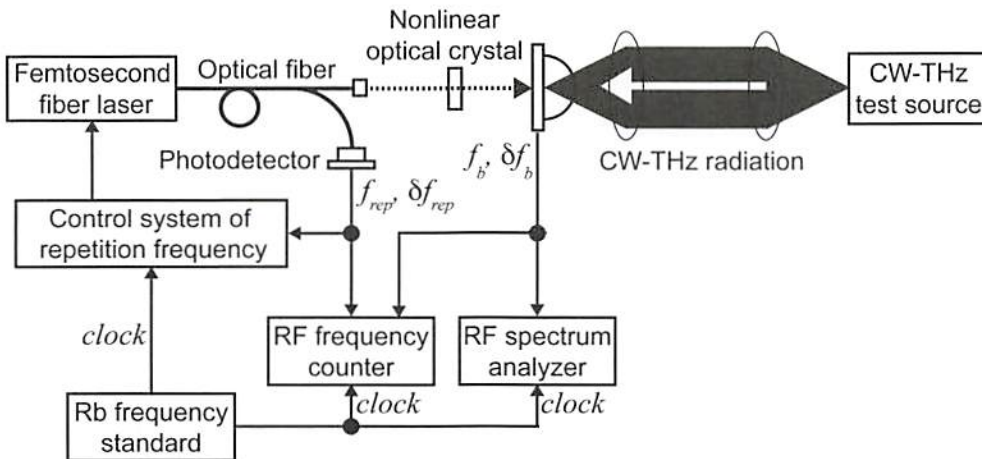


Fig. 2 Experimental setup for absolute frequency measurement of CW-THz wave.

$$f_{\text{THz}} = m(f_{\text{rep}} + \delta f_{\text{rep}}) \pm (f_b + \delta f_b) \quad (2)$$

式(1)と(2)の等号関係から、  $m$  と  $f_b$  符号が以下の式を用いて決定できる。

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f_{\text{rep}}|} \quad (3)$$

$$\text{sign}(f_b) = -\text{sign}\left(\frac{\delta f_b}{\delta f_{\text{rep}}}\right) \quad (4)$$

## 2.2 測定装置

測定装置を Fig. 2 に示す。繰り返し周波数(=  $f_{\text{rep}} = 56$  MHz)がルビジウム周波数標準に位相同期されたフェムト秒ファイバレーザー(中心波長 1550 nm, パルス幅 50 fs, 平均パワー 100 mW)から出力された光コムは、PCA 光伝導膜(低温成長 GaAs 薄膜)のバンドギャップ(約 1.5eV)を励起するため、非線形光学結晶で 2 倍波(波長 775 nm)に波長変換された後、ボウタイ型 PCA に集光される。CW-THz テストソースから出力された被測定 CW-THz 波は、THz レンズでコリメートされた後、別の THz レンズでボウタイ型 PCA に入射される。PCA からの出力電流信号( $f_b$  信号)は、トランス・インピーダンス・アンプで電流/電圧変換された後、RF スペクトラム・アナライザおよび RF 周波数カウンタで計測される。また、  $f_{\text{rep}}$  信号はレーザー出力を高速光検出器で検出し、RF 周波数カウンタで計測する。

## 2.3 実験結果

Fig. 3(a) は、マイクロ波周波数シンセサイザの出力を周波数通倍器で 6 通倍することによって得た狭線幅 CW-THz 波 ( $f_{\text{THz}} = 100$  GHz, パワー = 5 mW, 線幅 < 0.6 Hz) の  $f_b$  信号の周波数スペクトルを示している。狭線幅のスペクトル形状が極めて高分解能に測定できている。観測された線幅は、RF スペクトル・アナライザの周波数分解能によって制限されている。CW-THz 波のパワーレベルとビート信号の測定 SN 比から、最低検出限界パワーレベルは 11 nW と見積もられる。また、  $f_{\text{THz}}$  の



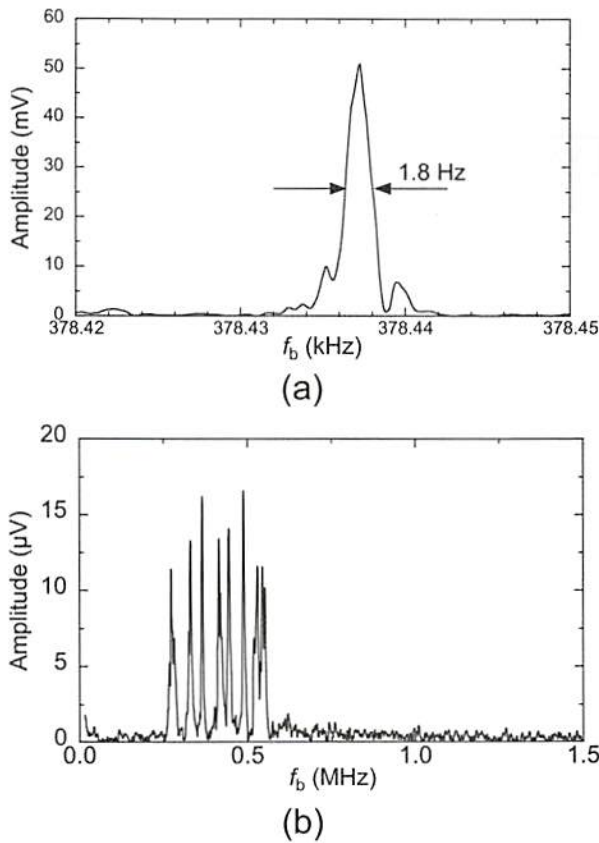


Fig. 3 Frequency measurement of  $f_b$  signal. (a) Frequency-multiplier CW-THz source and (b) photomixing CW-THz source.

周波数測定精度は  $10^{-11}$  に達しており、これはレーザー制御用基準信号源に用いたルビジウム原子時計と同等である。

Fig. 3 (b) は、THz 通信に用いられる F バンド (周波数 = 90 ~ 140 GHz) 単一走行キャリア・フォトダイオード (UTC-PD) 型フォトミキシング CW-THz 光源 ( $f_{\text{THz}} = 120$  GHz, パワー = 100  $\mu\text{W}$ ) をリアルタイム計測した例である。ビート信号が大きく揺らいでいる様子が確認できるが、これはフォトミキシングに用いた 2 台の近赤外 CW レーザーがフリーランニング状態であるためである。

### 3. CW-THz 波の位相スロープを用いた距離計測

#### 3.1 測定原理

PC-THz コムは、周波数計測のみならず、位相計測にも利用可能である。Fig. 4 は、フェムト秒モード同期レーザー光 (繰り返し周波数 =  $f_{\text{rep}}$ ) が THz 検出用 PC に入射された場合の、THz および RF 領域でのスペクトル振る舞いを示している。Fig. 1 (b) と同様、 $f_{\text{rep}}$  間隔の PC-THz コムが PCA 内部に生成される。更に、PC-THz コムを構成する各周波数モード列の位相は揃っている (モード同期)。ここで、CW-THz 波 (周波数 =  $f_{\text{THz}}$ ) が PCA に入射すると、PC-THz コムと CW-THz 波のビート信号 (周波数 =  $f_b$ ) が RF 帯に生成される。ここで、 $f_{\text{THz}}$  と  $f_{\text{rep}}$  が十分に安定で、 $f_b$  が一定である場合、 $f_b$  の位相計測を介して、CW-THz 波 (周波数 =  $f_{\text{THz}}$ ) の位相測定が可能になる。

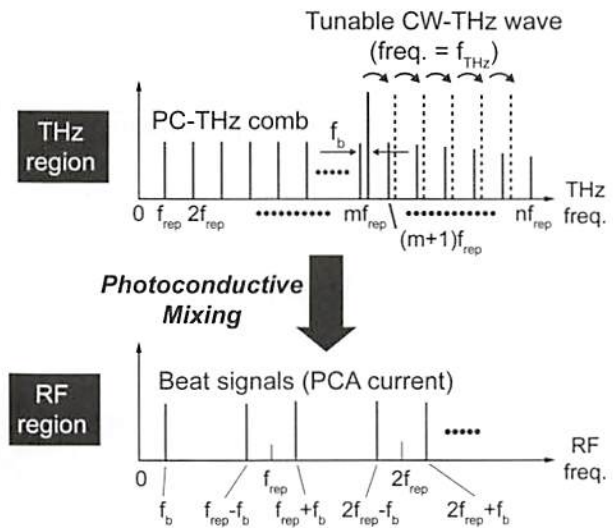


Fig. 4 Principle of operation for phase and phase slope measurement of tunable CW-THz wave.

次に、CW-THz 波の位相情報に基づいた距離計測を考える。単一 CW-THz 波 (波長 =  $\lambda_{\text{THz}} = c/f_{\text{THz}}$ ,  $c$ : 光速) の位相計測で距離計測を行う場合、ターゲット距離 ( $D$ ) は以下の式で与えられる。

$$D = \frac{\lambda_{\text{THz}}}{2} \left( \frac{\phi_{\text{THz}}}{2\pi} \right) = \frac{\lambda_{\text{THz}}}{2} (N_{\text{THz}} + \epsilon_{\text{THz}}) \quad (5)$$

$$= \frac{c}{2f_{\text{THz}}} (N_{\text{THz}} + \epsilon_{\text{THz}})$$

ここで、 $\phi_{\text{THz}}$  は絶対位相、 $N_{\text{THz}}$  は絶対位相の次数、 $\epsilon_{\text{THz}}$  は絶対位相の端数である。単一 CW-THz 波の位相計測では、 $2\pi$  位相折り返しのため、 $\epsilon_{\text{THz}}$  しか計測できない。すなわち、測定距離のダイナミックレンジが  $\lambda_{\text{THz}}/2$  に制限され、それ以上の  $D$  は直接的には算出できない。  $D$  を算出するためには、 $N_{\text{THz}}$  を決定する必要がある。

そこで、CW-THz 波の周波数 ( $f_{\text{THz}}$ ) を、 $f_{\text{rep}}$  間隔でステップ走査を行う。この場合、 $f_b$  は常に一定値を示すが、 $f_b$  の位相は  $\lambda_{\text{THz}}$  ( $f_{\text{THz}}$  の逆数) と  $D$  の関係性に依存して線形に変化する。 $f_{\text{THz}}$  変化量 ( $\Delta f_{\text{THz}}$ ) に対する  $\phi_{\text{THz}}$  変化量 ( $\Delta \phi_{\text{THz}}$ ) を位相スロープ ( $\Delta \phi_{\text{THz}}/\Delta f_{\text{THz}}$ ) と定義すると、 $D$  は以下の式で表せる。

$$D = \frac{c}{4\pi} \left( \frac{\Delta \phi_{\text{THz}}}{\Delta f_{\text{THz}}} \right) \quad (6)$$

それ故、式 (6) の位相スロープ ( $\Delta \phi_{\text{THz}}/\Delta f_{\text{THz}}$ ) 計測から  $D$  を算出し、式 (5) に代入すれば  $N_{\text{THz}}$  を決定できる。更に、単一 CW-THz 波の位相計測から  $\epsilon_{\text{THz}}$  を決定すれば、式 (5) に基づいて、 $\lambda_{\text{THz}}/2$  を超える  $D$  をサブ波長オーダーで精度良く決定できる。

#### 3.2 測定装置

実験装置を Fig. 5 に示す。フェムト秒チタン・サファイアレーザー (中心波長 780 nm, パルス幅 10 fs) の  $f_{\text{rep}}$  (= 81.8 MHz) は、ルビジウム周波数標準を基準信号として周波数安定化される。レーザー光は 2 つに分岐され、

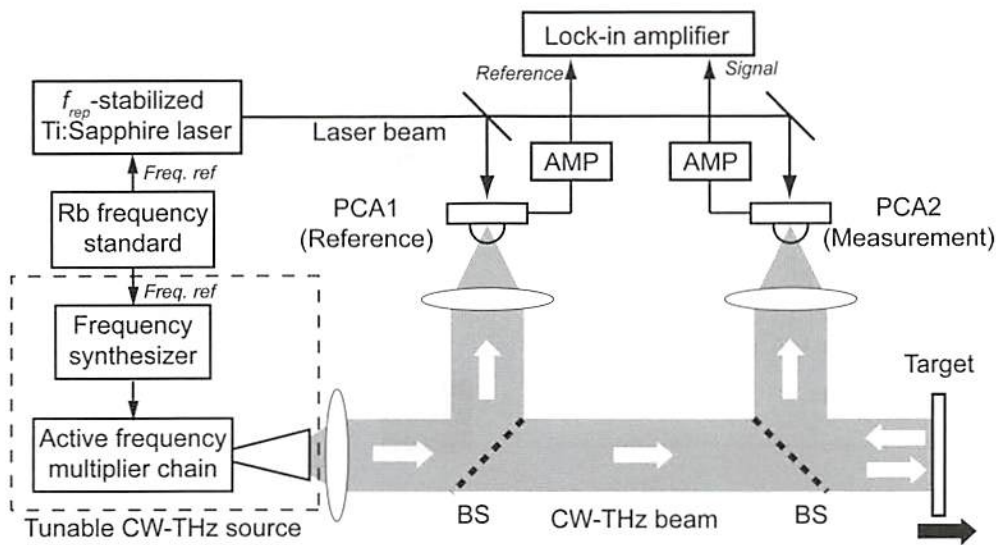


Fig. 5 Experimental setup for phase and phase slope measurement of tunable CW-THz wave.

参照 CW-THz 波用と測定 CW-THz 波用のボウタイ型 PCA に入射することにより、等価の PC-THz コム ( $f_{\text{rep}} = 81.8 \text{ MHz}$ ) をそれぞれ生成する。周波数可変 CW-THz 波は、マイクロ波周波数シンセサイザーの出力を周波数通倍器で 6 通倍することによって生成する ( $f_{\text{THz}} = 75 \sim 110 \text{ GHz}$ ,  $\lambda_{\text{THz}} = 2.73 \sim 4.00 \text{ mm}$ , 平均パワー = 2.5 mW, 線幅 < 0.6 Hz)。Si ビームスプリッター (BS) で反射された CW-THz 波は、参照 CW-THz 波用 PCA (PCA1) に入射される。BS を透過した CW-THz 波は、別の BS を透過した後、ターゲットに入射される。ターゲットで反射された CW-THz 波は、BS で反射された後、測定 CW-THz 波用 PCA (PCA2) に入射される。PCA1 及び PCA2 から電流信号として出力された  $f_b$  信号 (周波数 = 50 kHz) の位相差は、ロックインアンプによって計測する。 $f_{\text{THz}}$  を  $f_{\text{rep}}$  間隔で逐次走査しながら位相計測を行うことにより、位相スロープを算出する。

### 3.3 実験結果

まず、ターゲットを機械式ステージ (位置決め精度 < 2  $\mu\text{m}$ ) で移動させながら、位相スロープの計測を行った結果を Fig. 6(a) に示す。ここで、 $D$  は参照 CW-THz 波と測定 CW-THz 波の光路長差に対応している。 $D$  に比例して、位相スロープの勾配が変化している様子が確認できる。この位相スロープを式(6)に代入して算出した  $D$  とステージ位置の関係性を Fig. 6(b) に示す。良好な線形性が得られており、平均誤差は -16  $\mu\text{m}$  であった。

位相スロープから算出した  $D$  の測定精度は、式(5)の  $N_{\text{THz}}$  を決定するには十分であるので、 $D = 15 \text{ mm}$  で  $N_{\text{THz}} = 185$ 、 $D = 30 \text{ mm}$  で  $N_{\text{THz}} = 195$ 、 $D = 45 \text{ mm}$  で  $N_{\text{THz}} = 205$  と決定した。次に、単一 CW-THz 波 ( $f_{\text{THz}} = 101.25 \text{ GHz}$ ,  $\lambda_{\text{THz}} = 2.7254 \text{ mm}$ ) の位相測定で決定された  $\varepsilon_{\text{THz}}$  を式(5)に代入して算出した結果と測定誤差を Table 1 に示す。数  $\mu\text{m}$  オーダーの測定精度が得られていることが分かる。

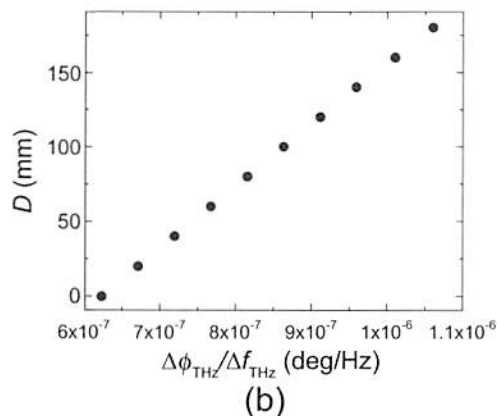
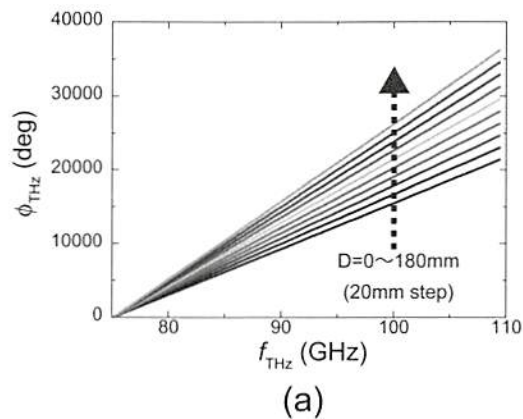


Fig. 6 Phase measurement of  $f_b$  signal. (a) Phase slope measurement and (b)  $D$  determined by the phase slope.

Table 1 Measurement precision.

Target position (mm)	$N_{\text{THz}}$	$\varepsilon_{\text{THz}}$	$D$ (mm)	Discrepancy ( $\mu\text{m}$ )
15	185	0.237735	14.9963	-3.7
30	195	0.366984	30.0021	2.1
45	205	0.490708	44.9996	-0.4



## 4. まとめ

本稿では、PC-THz コムを PCA が内蔵された「THz 周波数の物差し」として利用することにより、CW-THz 波の絶対周波数計測や位相計測が可能であることを示した。CW-THz の絶対周波数計測は、リアルタイムでスペクトル形状や絶対周波数の計測が可能であるので、実用的な各種 CW-THz 光源の評価やモニタリングに利用可能であると考えられる。また、CW-THz 波の位相計測はレーダー応用を始めとした測距分野での利用が期待できる。

## 参考文献

- 1) T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch: *Opt. Lett.* **24** (1999) 881.
- 2) M. Niering, R. Holzwarth, J. Reichert, P. Pokasov, T. Udem, M. Weitz, T. W. Hänsch, P. Lemonde, G. Santarelli, M. Abgrall, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 5496.
- 3) T. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch: *Nature* **416** (2002) 233.
- 4) S. A. Diddams: *J. Opt. Soc. Am. B* **27** (2010) B51.
- 5) T. Yasui, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** (2011) 191.
- 6) T. Yasui, Y. Kabetani, E. Saneyoshi, S. Yokoyama, and T. Araki: *Appl. Phys. Lett.* **88** (2006) 241104.
- 7) T. Yasui, M. Nose, A. Ihara, K. Kawamoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki: *Opt. Lett.* **35** (2010) 1689.
- 8) 弥永 祐樹, 謝 直達, 坂口 良幸, 横山 修子, 稲場 肇, 美濃島 薫, 荒木 勉, 安井 武史: *レーザー研究* **40** (2012) 513.
- 9) Y.-D. Hsieh, Y. Iyonaga, Y. Sakaguchi, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, F. Hindle, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, *et al.*: *IEEE Trans. THz Sci. Tech.* **3** (2013) 322.
- 10) Y.-D. Hsieh, Y. Iyonaga, Y. Sakaguchi, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, F. Hindle, T. Araki, and T. Yasui: *Sci. Rep.* **4** (2014) 3816.
- 11) T. Yasui, R. Ichikawa, Y.-D. Hsieh, K. Hayashi, H. Cahyadi, F. Hindle, Y. Sakaguchi, T. Iwata, Y. Mizutani, H. Yamamoto, *et al.*: *Sci. Rep.* **5** (2015) 10786.
- 12) G. Hu, T. Mizuguchi, R. Oe, K. Nitta, X. Zhao, T. Minamikawa, T. Li, Z. Zheng, and T. Yasui: *Sci. Rep.* **8** (2018) 11155.
- 13) J. Chen, K. Nitta, X. Zhao, T. Mizuno, T. Minamikawa, F. Hindle, Z. Zheng, and T. Yasui: *Adv. Photon.* **2** (2020) 036004.
- 14) S. Yokoyama, R. Nakamura, M. Nose, T. Araki, and T. Yasui: *Opt. Express* **16** (2008) 13052.
- 15) T. Yasui, R. Nakamura, K. Kawamoto, A. Ihara, Y. Fujimoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki: *Opt. Express* **17** (2009) 17034.
- 16) T. Yasui, K. Hayashi, R. Ichikawa, H. Cahyadi, Y.-D. Hsieh, Y. Mizutani, H. Yamamoto, T. Iwata, H. Inaba, and K. Minoshima: *Opt. Express* **23** (2015) 11367.
- 17) T. Minamikawa, K. Hayashi, T. Mizuguchi, Y.-D. Hsieh, D. G. Abdelsalam, Y. Mizutani, H. Yamamoto, T. Iwata, and T. Yasui: *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* **37** (2016) 473.
- 18) G. Hu, T. Mizuguchi, X. Zhao, T. Minamikawa, T. Mizuno, Y. Yang, C. Li, M. Bai, Z. Zheng, and T. Yasui: *Sci. Rep.* **7** (2017) 42082.
- 19) T. Yasui, M. Fujio, S. Yokoyama, and T. Araki: *Opt. Express* **22** (2014) 17349.
- 20) I. Katayama, R. Akai, M. Bito, H. Shimosato, K. Miyamoto, H. Ito, and M. Ashida: *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 021105.