

## MZM ベース超平坦光コム発生器を用いた 600GHz 帯高精度周波数計測

桐ヶ谷 茉夕 <sup>†</sup>	諸橋 功 <sup>††a)</sup> (正員)	金子 優太 <sup>†</sup>
片山 郁文 <sup>†</sup>	入交 芳久 <sup>††</sup> (正員)	坂本 高秀 <sup>††</sup> (正員)
関根 徳彦 <sup>††</sup> (正員)	笠松 章史 <sup>††</sup> (正員)	寶迫 巖 <sup>††</sup> (正員)

Frequency Measurement of 600GHz-band Waves Using MZM-Based Flat Comb Generator

Mayu KIRIGAYA<sup>†</sup>, *Nonmember*, Isao MOROHASHI<sup>††a)</sup>, *Member*, Yuta KANEKO<sup>†</sup>, Ikufumi KATAYAMA<sup>†</sup>, *Nonmembers*, Yoshihisa IRIMAJIRI<sup>††</sup>, Takahide SAKAMOTO<sup>††</sup>, Norihiko SEKINE<sup>††</sup>, Akifumi KASAMATSU<sup>††</sup>, and Iwao HOSAKO<sup>††</sup>, *Members*

あらまし マツハツェンダ変調器型光コム発生器 (MZ-FCG) を用いた電気光学 (EO) サンプリング法による 600GHz 帯信号の周波数測定について報告する。MZ-FCG により発生された光コムをゲート光とし、EO 結晶を用いたヘテロダイン検出により、600GHz 帯信号の高精度検出を実証した。

キーワード 光周波数コム, マツハツェンダ変調器, 電場検出, 電気光学サンプリング法

## 1. ま え が き

近年、テラヘルツ (THz) 波は高速無線通信やガスセンシング等、様々な分野に応用されている。それらの応用では、高い周波数精度をもつ信号源や計測法が必要となる。しかしながら、量子カスケードレーザーや共鳴トンネルダイオード等の THz 信号源は、数 MHz 程度の線幅をもっているため、上述の応用には不十分である。したがって、それらの周波数を高精度に観測し、信号源を制御する技術が要求される。Barbieri らは電気光学 (EO) サンプリングを用いて 2.7THz 帯量子カスケードレーザーから放出される THz 波の周波数計測とその周波数安定化を実現している [1]。しかし、ここでは光周波数コムとしてモード同期レーザーを用いているため、レーザーの繰返し周波数を高精度に安定化する必要がある。

高安定かつフレキシブルな周波数コム光源として、マツハツェンダ変調器型超平坦光コム発生器 (MZ-FCG) が開発され [2]、それを用いた THz 波発生が実証されている [3]。MZ-FCG はモード間隔とその安定度が変調器を駆動する高周波 (RF) 信号により決まるため、モード間隔可変かつ高い周波数精度をもつ光コ

ムを簡便に発生できる。そこで本論文では、広帯域かつ高精度な周波数測定技術として、MZ-FCG を用いた THz 帯周波数計測について報告する。

## 2. 実験及び結果

THz 帯周波数計測は光ヘテロダイン法をベースとし、EO 結晶をミキサーとして用いる。EO 結晶に THz 波と光コムを入射すると、光コムがテラヘルツ波の電場により位相変調を受け、光コムの各モードにサイドバンドが生成される。この変調を受けた光コムをフォトダイオードで検出することにより、THz 波の周波数が中間周波数 (IF) にダウンコンバージョンされる。この IF 信号の周波数を計測することにより、THz 波の周波数を決定することができる。本方式における周波数精度は、光コムのモード間隔により決まるため、MZ-FCG を用いることによって、簡便に高い周波数精度の測定が可能になる。

図 1 に THz 帯周波数測定の実験構成を示す。MZ-FCG と高非線形分散シフトファイバ (HNL-DSF) の組み合わせにより、10GHz 間隔の広帯域光コムを発生した。光コムがチャープをもつ場合、ヘテロダイン検出後のモード間干渉により検出効率が劣化するため、1 対の波長・帯域可変光バンドパスフィルタ (TBPF, 最小バンド幅: 6GHz) を用いて光 2 トーン信号を抽出した [3]。2 トーン信号の間隔は、TBPF の中心周波数及び RF 信号の周波数により、精密に制御できる。

600GHz 帯信号源には、Gunn 発振器の 6 連倍の周波数通倍器 (出力 0.3mW) を用いた。THz 信号源から出力された THz 波を一对の軸外し放物面鏡を用い

<sup>†</sup> 横浜国立大学, 横浜市

Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, 240-8501 Japan

<sup>††</sup> 情報通信研究機構, 小金井市

National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei-shi, 184-8795 Japan

a) E-mail: morohashi@nict.go.jp

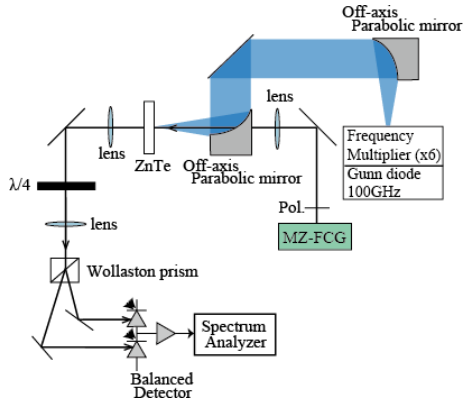


図1 THz帯周波数測定の実験構成

Fig. 1 The experimental setup for the measurement of terahertz waves.

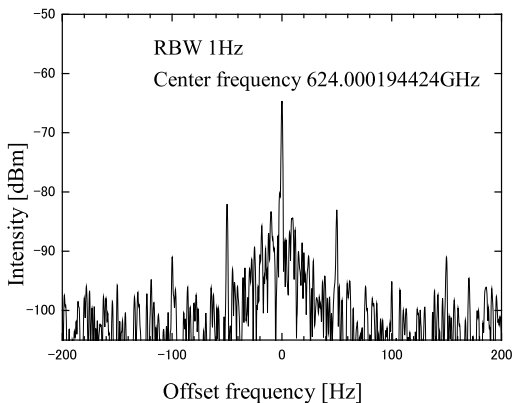


図2 観測された600GHz帯信号のスペクトル

Fig. 2 An observed spectrum of a 600 GHz-band signal.

て集光し、光2トーン信号とはほぼ同軸にZnTe結晶に入射した。その後、光2トーン信号をバランス検出器(Newport製 Auto-balanced receiver 2017)で検出し、出力されたIF信号をスペクトラムアナライザで観測した。

図2に600GHz帯信号のスペクトルを示す。観測された信号の線幅は、スペクトラムアナライザの分解能以下( $< 1\text{Hz}$ )であり、信号対雑音比(SNR)は21dB(RBW: 100Hz)であったことから、本方式はTHz波を高感度かつ高精度に検出できることが示された。光2トーン信号の間隔を62モード、MZ-FCGを駆動するRF信号の周波数を10.064517650GHzとし、その

ときのIF信号の周波数が100.124kHzであったことから、観測された信号の周波数は624.000194424GHzであった。これは、ハーモニックミキサにより求めた周波数と一致する。

本方式における周波数精度は、光コムのモード間隔の安定度に一致するため、MZ-FCGを駆動するRF信号の周波数安定度に依存する。MZ-FCGを用いてフォトミキシング法により発生された700GHz帯信号の周波数安定度が $10^{-11}$ 程度(平均化時間: 1s)であることから[3]、本実験においても、それと同等の周波数精度が得られる。

### 3. むすび

MZ-FCGを用いたEOサンプリング法によるTHz帯周波数計測を行った。MZ-FCGとHNL-DSFの組合せにより発生された広帯域光コムと600GHz帯信号をEO結晶上でミキシングし、出力されたIF信号を観測した。その結果、IF信号のSNRは21dBであり、線幅は1Hz以下であった。これにより、本方式が高感度かつ高精度に周波数決定できることが示された。

謝辞 本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)の委託研究「広帯域短パルスレーザーを用いたテラヘルツ電場検出技術の開発と応用(No.145003103)」として実施した。

### 文 献

- [1] S. Barbieri, P. Gellie, G. Santarelli, L. Ding, W. Mauneult, C. Sirtori, R. Colombelli, H. Beere, and D. Ritchie, "Phase-locking of a 2.7-THz quantum cascade laser to a mode-locked erbium-doped fiber laser," *Nat. Photon.*, vol.4, no.9, pp.636-640, June 2010. DOI: 10.1038/nphoton.2010.125
- [2] T. Sakamoto, T. Kawanishi, and M. Tsuchiya, "10 GHz, 2.4 ps pulse generation using a single-stage dual-drive Mach-Zehnder modulator," *Opt. Lett.*, vol.33, no.8, pp.890-892, April 2008. DOI: 10.1364/OL.33.000890
- [3] I. Morohashi, Y. Irimajiri, M. Kumagai, T. Sakamoto, N. Sekine, T. Kawanishi, M. Yasui, and I. Hosako, "Evaluation of frequency stability of terahertz waves generated by Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator," *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, W4-22, pp.206-209, Oct. 2013. DOI: 10.1109/MWP.2013.6724056

(平成28年5月30日受付, 7月14日公開)