

テラヘルツ・スタンダードコム内蔵型周波数カウンターの開発
Terahertz frequency counter based on a terahertz frequency comb

1 0 8 1 0 3 3

研究代表者 大阪大学大学院基礎工学研究科・特任研究員 横山修子
共同研究者 大阪大学大学院基礎工学研究科・教授 荒木勉

〔研究の目的〕

近年、光波と電波の境界に位置し長らく未開拓電磁波領域とされてきたテラヘルツ領域（THz 帯：周波数=0.1～10THz、波長=30 μ m～3000 μ m）の電磁波（THz 波）が注目されている。THz 波は良好な物質透過性を有する一方で、極めて低エネルギー・低侵襲であるため、X 線に替わる安心安全な電磁波として注目されている。このような THz 波が有効な応用分野と期待されているのが生体計測（ガン診断など）であり、そこでは正確な周波数計測が必要とされている。しかしながら光波や電波領域では確立された技術である周波数計測も、THz 帯では十分に成熟した技術が存在しなかった。近年の THz テクノロジーの急速な発展に伴い THz 帯全域をカバーする超精密 THz 周波数計測技術、更には THz 周波数標準が強く望まれている。

光領域では、周波数標準の新しい手段として光周波数コムが注目されている。光周波数コムは高安定・高精度、広帯域選択性、狭線幅、周波数通倍機能等の特徴を有し、光周波数領域における周波数物差しとして利用されている。本研究では、独自に開発した『多周波ヘテロダイン光伝導検出』を用いることにより、光周波数コムの概念を THz 領域まで拡張を行った。マイクロ波帯から THz 帯の広帯域に亘り、絶対周波数が高精度に値付けされた『THz 周波数の物差し』による『THz 周波数標準』（テラヘルツ・スタンダードコム）を確立し、これを内蔵する事によりマイクロ波帯から THz 帯の広帯域を一挙にカバーする超精密な THz 周波数カウンターの開発を行った。

〔研究の内容、成果〕

1. 測定原理

『多周波ヘテロダイン光伝導検出』の測定原理を図 1 に示す。多周波ヘテロダイン光伝導検出ではフェムト秒レーザー光でトリガされた光伝導アンテナ

（PCA:photoconductive antenna）内に誘起されるフォトリヤ THz コム（PC-THz コム）を THz 領域の周波数物差しとする。PCA は被測定 CW-THz 波の検出器兼ミキサーとしてを用いられ、PC-THz コムは TH 領域をフルカバー可能な多周波局部発振器として機能する。このようにヘテロダイン検出器として PCA を利用することにより、室温環境下での高精度・広帯域のスペクトル感度が可能となる。

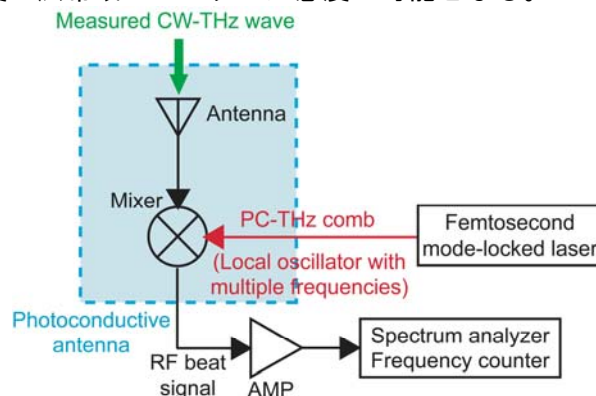


Fig. 1. Principle of THz frequency counter.

図 2(a) に示すように、フェムト秒レーザー光が PCA アンテナギャップに入射される際の PCA 内でのスペクトルの様子を図 2(b) に示す。モード同期周波数 f のフェムト秒レーザー光から出力されたプローブ光パルス列は周波数領域では図 2(b) 上図の様な間隔 f の光周波数コムを構成する。PCA がこのパルス列でトリガーされると、フォトリヤが瞬時的に PCA 内に生成・消滅するが、その時間関数を $N(t)$ と定義すると、 $N(t)$ のフーリエ変換である $N(\omega)$ もまたコムスペクトル（PC-THz コム）を示す（図 2(b) の中段）。PC-THz コムの生成は PCA を介した光コムの超広帯域復調と見なされるので、光コムのコム間隔 f は間隔の変化なく THz 領域までダウンコンバートされる。その結果の PC-THz コムはオフセット周波数を有しない高調波コムとなり、モード同期周波

数の基本波成分 f と高調波成分群 $2f, 3f, \dots, nf$ から構成される。これが、オフセット周波数を有する光コムとの大きな違いであり、THz コムの安定化も含めて単純かつ実用的な THz 周波数標準の構築を可能にする。

次に、プローブ光によって PC-THz コムが誘起された PCA 検出器に被測定 CW-THz 波(時間関数: $E_{\text{THz}}(t)$ 、周波数関数: $E_{\text{THz}}(\omega)$) が入射される場合を考える。フォトキャリア $N(t)$ は $E_{\text{THz}}(t)$ によって加速され、 $N(t)$ と $E_{\text{THz}}(t)$ の積で表される過渡光電流 $J(t)$ が検出される。時間領域における $J(t)$ の、 $N(t)$ と $E_{\text{THz}}(t)$ の積の関係は、周波数領域ではコンボリューション関係になるので、 $J(t)$ をフーリエ変換した $J(\omega)$ は、図 2(b) 下段で表されるように、CW-THz 波 $E_{\text{THz}}(\omega)$ と PC-THz コム $N(\omega)$ のコンボリューションで与えられる。これを光伝導ミキシングと呼ぶ。このような PCA における光伝導ミキシング過程は、CW-THz 波と PC-THz コム間のビート信号群を RF 帯に生成する。ここで、最も低周波のビート信号に注目する。ビート信号(周波数 f_b) は CW-THz 波(周波数 f_x) とそれに最隣接した m 次のコムモード(周波数 mf) のミキシングによって生成しているので、 f_b 値は以下のように与えられる。

$$f_b = |f_x - mf|. \quad (1)$$

それ故、 m の次数と $f_x - mf$ の符号が測定できれば、 f_x が決定できる。 m の次数と $f_x - mf$ の符号を決定するためには、レーザー共振器長の調節によりモード同期周波数を f から $f + \delta f$ に変化させる。この結果、ビート周波数は $f_b + \delta f_b$ に変化する。 δf_b と $m\delta f$ は等しいので、 m の次数は下記のように決定される。

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|}. \quad (2)$$

$\delta f_b / \delta f$ の符号は、 $f_x - mf$ の符号の反転となる。最終的に、被測定 CW-THz 波の絶対周波数は、下記の式から、 $f, f_b, \delta f_b, \delta f$ を測定することによって決定できる。

$$f_x = mf + f_b \quad (\delta f_b / \delta f < 0) \quad (3a)$$

$$f_x = mf - f_b \quad (\delta f_b / \delta f > 0) \quad (3b)$$

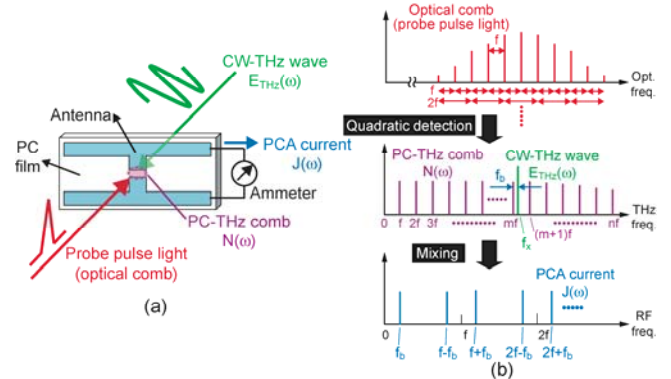


Fig. 2. (a) Geometry of a measured CW-THz wave and probe pulse light on the PCA, and (b) the corresponding spectral behavior in optical, THz, and RF regions.

2. 実験装置

図 3 は、THz 周波数カウンターの装置図を示す。PCA 内に PC-THz コムを生成するため、プローブレーザーとしてモード同期チタン・サファイアレーザーを用いる。モード同期周波数 f は、ルビジウム原子時計を基準としたレーザー制御システムによって、ルビジウム原子時計と同程度まで安定化されている。その結果、ルビジウム原子時計と等価な PC-THz コムが PCA 内に生成される。

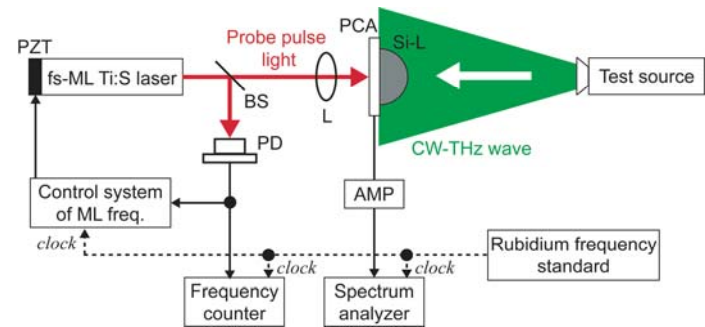


Fig. 3. Experimental setup of THz frequency counter for measurement of a sub-THz test source. fs-ML Ti:S laser: femtosecond mode-locked Ti:sapphire laser; PZT: piezoelectric transducer; BS: beam splitter; L: objective lens; PCA: photoconductive antenna; Si-L: silicon lens; PD: photodetector; AMP: amplifier.

テストソースからの被測定 CW-THz 波は、プローブ光入射方向と反対に取り付けられた半球シリコンレンズを介して、PCA に入射される。CW-THz 波と

PC-THz コム間での光伝導ミキシングにより、PCA から微弱電流信号が出力される。出力電流信号はアンプで増幅された後、RF スペアナで周波数値とスペクトル形状を測定する。モード同期周波数 f が周波数カウンターで測定される。RF スペアナと周波数カウンターにはルビジウム原子時計を外部基準として与えている。

3. 測定結果

THz 周波数カウンターの性能を評価するため、周波数シンセサイザーの出力をアクティブ周波数通倍器で6通倍したものをテストソースとして用いた。周波数シンセサイザーはルビジウム原子時計に同期させている。PCA から出力された電流信号は広帯域アンプで増幅され、RF スペアナで測定された。図 4(a) は、テストソース周波数を 90,008,480,000Hz、レーザーモード同期周波数を 81,840,000Hz に設定した時の測定信号スペクトルを示している。CW-THz 波と PC-THz コム間のビート信号群が観測されている。図 4(b) は、100MHz までの領域を拡大したスペクトルである。周波数 f_b と $f-f_b$ にビート信号のペアが確認できる。

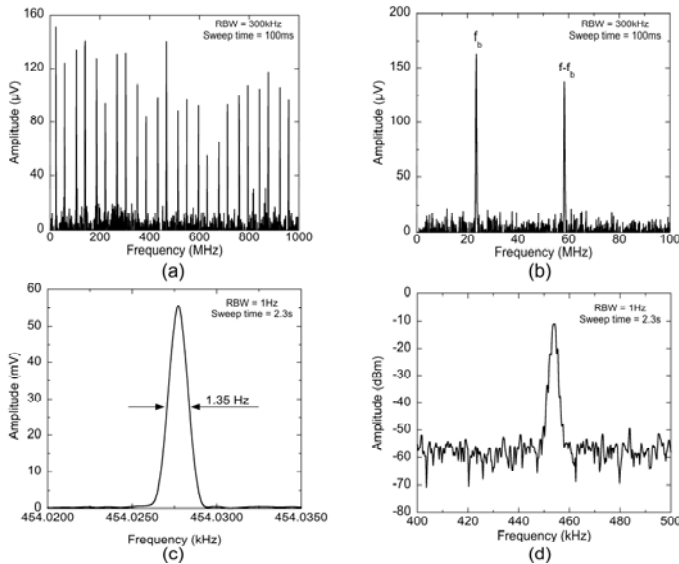


Fig. 4. Spectra of the PCA current under irradiation of a CW-THz wave (freq. = 90,008,480,000 Hz) with frequency span of (a) 1000 MHz and (b) 100 MHz. (c) Linear-scale and (d) logarithmic-scale spectra of the f_b beat signal when the f_b value is set below 1 MHz.

f_b 信号のスペクトルをさらに拡大したのが図 4(c) であり、ビート信号の線幅は 1.35Hz であった。図 4(c) の縦軸を対数表示で表したのが図 4(d) であり、50dB の測定 SN 比が得られている。テストソースの平均パワーが 2.5mW であるので、検出限界パワーは 25nW と考えられる。

テストソースの絶対周波数を決定するためには、モード同期周波数をチューニングしながらビート周波数の変化を測定する必要がある。初期モード同期周波数を 81,823,757Hz に設定した時の最低次ビート信号を RF スペアナで計測した結果を図 5 に示す。この時のビート周波数は 454,037.976Hz であった。次に、レーザー制御システムを用いて、モード同期周波数を 81,823,857Hz に設定した。その時のビート信号は図 5 の青色で示されており、周波数は 333,027.731Hz になった。これらの値を式 (2) に代入すると、以下ようになる。

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|} = \frac{|333,027.731 - 454,027.976|}{|81,823,857.000 - 81,823,757.000|} = 1210.00245 \quad (4a)$$

$$\frac{\delta f_b}{\delta f} < 0. \quad (4b)$$

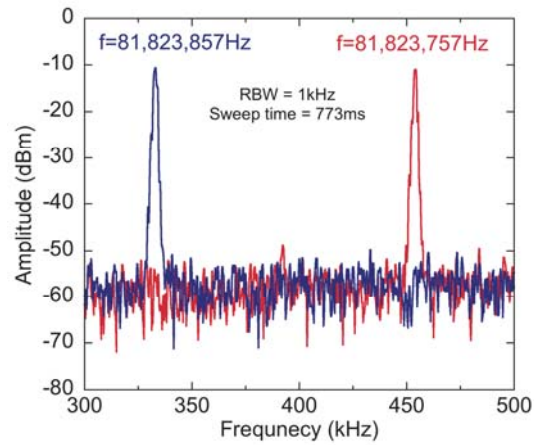


Fig. 5. Spectra of the f_b beat signal when the laser mode-locked frequency (f) is set at 81,823,757 (red curve) Hz and 81,823,857 Hz (blue curve).

それ故、テストソースの絶対周波数 f_x は、式 3(a) を使って、以下のように決定された。

$$\begin{aligned} f_x &= mf + f_b \\ &= 1210 \times 81,823,757 + 454,027.976 \end{aligned}$$

$$=99,007,119,997.976 \text{ Hz.} \quad (5)$$

テストソースの設定周波数は 99,007,200,000.000Hz であるので、測定値のエラーはわずか 2.024Hz である。

次に、テストソースの周波数を 75GHz から 110GHz まで 5GHz 刻みでチューニングしながら絶対周波数を測定した。設定周波数と測定周波数線形性および各周波数における測定誤差を図 6 に示す。THz スペアナの測定精度を設定値に対する測定誤差と定義すると、この実験での平均精度は 2.8×10^{-11} である。

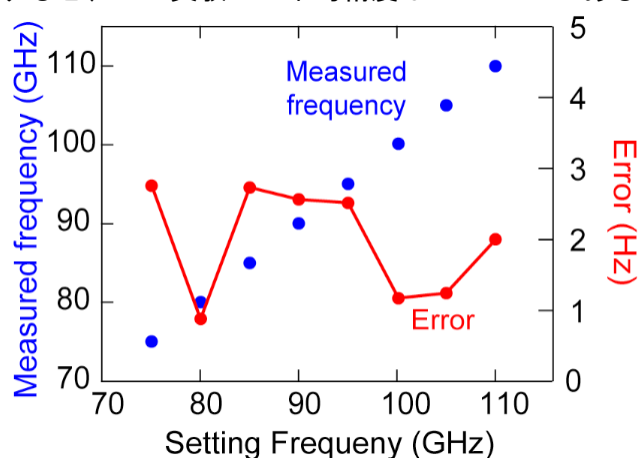


Fig. 6. Relationship between setting frequency and measured frequency (black plot), and measurement error at each frequency (blue plot).

4. まとめ

CW-THz 波の絶対周波数とスペクトル形状の計測が可能な THz 周波数カウンターを開発した。提案された『多周波ヘテロダイン光伝導検出』は光伝導ヘテロダインに基づいており、PCA をヘテロダインレシーバー、PC-THz コムを多周波局部発振器として利用することにより実現されている。PCA 中に生成された安定な PC-THz コムを基準とすることにより、テストソースの絶対周波数が 2.8×10^{-11} の精度で決定され、これは Rb 原子時計と同等の精度である。

また、スペクトル形状は分解能 1Hz 以下、測定 SN 比 50dB で測定され、検出パワー限界は 25nW であった。

〔今後の研究の方向、課題〕

本研究では、『多周波ヘテロダイン光伝導検出』により CW-THz 波の絶対周波数が高精度で決定されることが確認されたが、現在は大型で高価なチタンサファイア型フェムト秒モード同期レーザーを用いている為、装置そのものが大型となり実用性に欠ける。今後は近年の充実した光ファイバー技術（フェムト秒ファイバーレーザー、光ファイバー結合光伝導アンテナ）との融合により、装置の小型化・安定化・汎用化・メンテナンスフリー化をはかり、『誰でも使える』THz 帯周波数カウンターを実現する。本研究開発の達成により、量子カスケードレーザーを始めとした実用的 THz デバイスの研究開発、さらにはこれらのデバイスを用いた応用計測（THz 無線、センシング、セキュリティほか）の展開が加速することが期待される。

〔成果の発表、論文等〕

1. S. Yokoyama, R. Nakamura, M. Nose, T. Araki and T. Yasui, "Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb", Optics Express, Vol.16, No.17, 13052 (2008)
2. T. Yasui, R. Nakamura, S. Yokoyama, and T. Araki, "Precise frequency measurement of sub-THz CW test source based on terahertz frequency comb", EOS Annual Meeting 2008: Topical meeting of Terahertz Science and Technology (2008).
3. R. Nakamura, S. Yokoyama, T. Yasui, and T. Araki, "Precise frequency measurement of sub-THz test source referring to as terahertz frequency comb", Joint 33rd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15th International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW-THz), Proceeding R2A5 (2008).