

## 「デュアル THz コムを用いた CW-THz 波のリアルタイム周波数計測」

## 1. イントロダクション

周波数は電磁波の最も基本的な測定量の一つであり、電波領域や光波領域では周波数を計測するために様々な手法が用いられている。周波数計測の従来手法として、光波領域では干渉計測、電波領域では電氣的ヘテロダイン法が用いられてきた[1]。干渉計測では、干渉計によって干渉縞を生成し、被測定光源と既知周波数光源（周波数安定化レーザーなど）の干渉縞の比較から周波数を測定する。一方、電氣的ヘテロダイン法では、被測定波と局部発振器（既知周波数）の信号をミキシングし、発生したビート信号から周波数を求める。

近年、光波と電波の境界に位置するテラヘルツ（THz）波がセンシングや通信の新しい手段として注目されており、THz 領域における周波数測定の必要性が高まっている。しかし、上記の従来手法を THz 領域まで拡張する場合、検出器やミキサの熱ノイズを抑制するため極低温まで冷却しなければならなかった。

そこで本研究では、室温環境で高精度な周波数測定が可能な光伝導ミキシング法を用いて THz コム参照型スペクトラム・アナライザ（THz スペアナ）を構築し、実験を行っている[2]。THz スペアナでは、ヘテロダイン法的一种である光伝導ミキシングを用いて、THz 帯の信号を RF 帯までビートダウンし、周波数計測を行う。光伝導ミキシングは、連続発振（CW）-THz 波を受信するアンテナ機能と局部発振器からの信号とミキシングする機能を併せ持つ光伝導アンテナ（PCA）を用いていて、室温動作が可能である。また局部発振器にフォトキャリア（PC）-THz コムを用いることで、THz 帯を高い周波数確度でフルカバーすることも出来る。

この手法を用いて我々のグループでは CW-THz 波の絶対周波数を決定[2]、UTC-PD のビート信号のモニタリング[3]を行ってきた。しかし、THz スペアナを用いた実用的な周波数計測装置を構築するために二つの問題点があった。一つ目は、絶対周波数を決定する際に異なる繰り返し周波数で、それぞれのビート周波数を計測しなければならないといった 2 ステップ計測が必要であるということ。二つ目は、実験装置が自由空間系になっていることで持ち運びが出来ず、外乱に影響されやすいことが挙げられる。

そこで本報告では、デュアル PC-THz コムを用いて絶対周波数測定をリアルタイムで行えるよう改良した。また、コンパクトで持ち運びが可能な THz スペアナを目指すために、PCA に直接 1.5 $\mu\text{m}$  光のファイバーを接続し、ビート信号の検出を試みた。

## 2. 実験原理

THz スペアナでは、ヘテロダイン法的一种である光伝導ミキシングを用いて、THz 帯の信号を RF 帯までビートダウンし、周波数計測を行う。

光伝導ミキシングは図 1 に示すように、連続発振テラヘルツ (CW-THz) 波を受信するアンテナ機能と局部発振器からの信号とミキシングする機能を併せ持つ PCA を用いており、室温動作が可能である。また局部発振器に PC-THz コムを用いることで THz 帯を高い周波数精度でフルカバーすることも出来る。レーザー光により PCA 上に生成された PC-THz コムと CW-THz 波がミキシングされ、電極間に電流が流れる。これにより発生した RF 帯電流ビート信号は電流電圧変換アンプを介してスペアナで検出される。

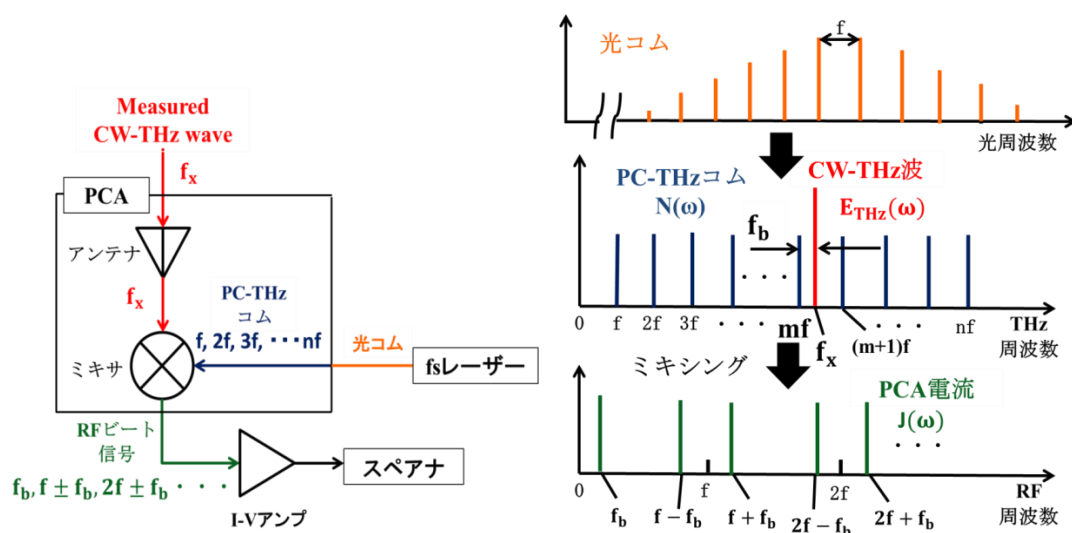


図 1 光伝導ミキシング法

また、従来のビート信号から被測定 CW-THz 波の絶対周波数を決定する方法について説明していく。図 2 に周波数領域上での PC-THz コムと CW-THz 波の関係を示している。ここで、CW-THz 波周波数  $f_x$  とビート周波数  $f_b$  の関係は

$$f_x = mf \pm f_b \quad (2.1)$$

となる。モード同期周波数  $f$  と、ビート周波数  $f_b$  は周波数カウンター、あるいは RF スペアナで直接測定することが出来るため、絶対周波数  $f_x$  を求めるためには次数  $m$  と  $f_b$  の符号の決定が必要となる。

そこで、次数  $m$  を求めるためには、まず、共振器長制御により、モード同期周波数

を  $f$  から  $f + \delta f$  に変化させる. この時,  $f_x$  が一定であるならば, ビート周波数は  $f_b$  から  $f_b + \delta f_b$  に変化する. ここで,  $|\delta f_b| = |m\delta f|$  であるので,

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|} \quad (2.2)$$

となり, 次数  $m$  が決まる. これにより, 絶対周波数  $f_x$  は  $\delta f_b / \delta f < 0$  のとき,

$$f_x = mf + f_b \quad (2.3)$$

$\delta f_b / \delta f > 0$  のとき,

$$f_x = mf - f_b \quad (2.4)$$

となり, 絶対周波数が決定できる [2].

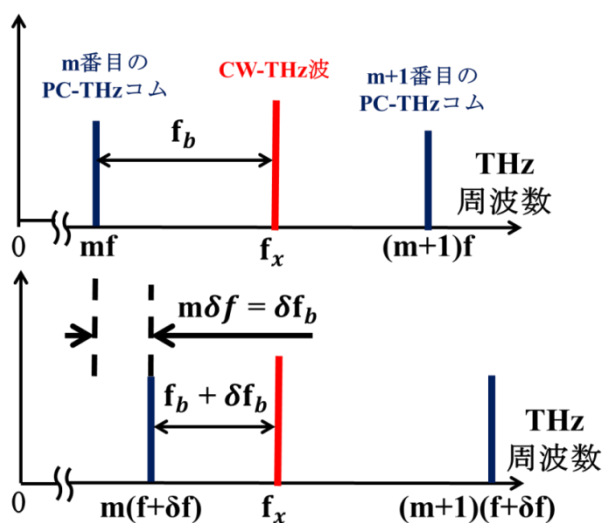


図 2 絶対周波数の決定方法 (2 ステップ)

しかし上記の手法では2ステップの測定が必要となる．そこで本研究では，繰り返し周波数の異なるPC-THzコム1, 2 ( $f_{rep1}$ ,  $f_{rep2}$ ) と，測定CW-THz波の絶対周波数  $f_x$  から生成されるビート周波数はそれぞれ  $f_{beat1}$ ,  $f_{beat2}$  となり， $f_x = mf_{rep1} \pm f_{beat1} = mf_{rep2} \pm f_{beat2}$  と表すことが出来る．よって  $f_{rep1}$ ,  $f_{rep2}$ ,  $f_{beat1}$ ,  $f_{beat2}$  をそれぞれ測定することで，次数  $m$  は  $|f_{beat1} - f_{beat2}| / |f_{rep1} - f_{rep2}|$  から求めることができ，ビート周波数の符号は  $m$  の符号と反転の関係にあるので，最終的に絶対周波数を決定することが出来る (図3)．

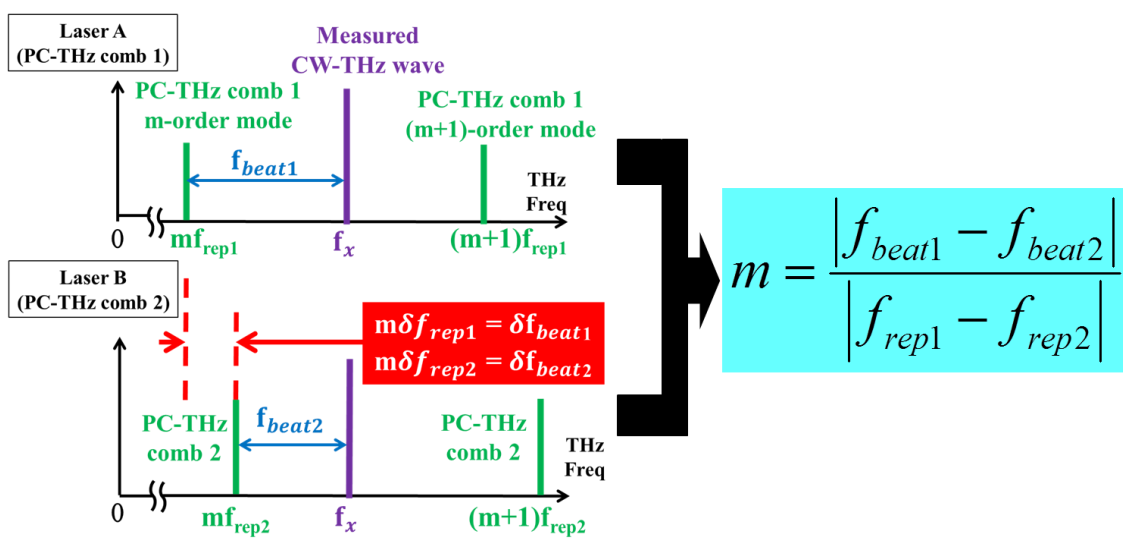


図3 リアルタイムでの絶対周波数の測定方法

### 3. デュアル THz コムを用いたリアルタイム絶対周波数計測

#### 3.1 実験装置 ( $f_{\text{rep}1}$ , $f_{\text{rep}2}$ 固定, $f_{\text{beat}1}$ , $f_{\text{beat}2}$ 測定)

実験装置を図4に示す。用いた2台のレーザーは、それぞれ 100,000,000Hz, 100,000,050Hz の繰り返し周波数に安定化制御されている。このレーザー光（波長:1550nm）は非線形光学結晶である PPLN によって波長変換（775nm）され、PCAに入射される。また、シンセサイザーの出力を6通倍したものを CW-THz 波（周波数:75~110GHz）として PCA に入射する。これによって発生する電流ビート信号は、カレント・プリアンプ（帯域:1MHz, トランスインピーダンスゲイン:1MV/A）によって増幅される。その後、トラッキングオシレーターにより周波数カウンターで精度よく測定できる信号レベルまで増幅され、周波数カウンターに入れられる。周波数カウンターで測定された2つのビート周波数はPC上で計算が行われ、リアルタイムで CW-THz 波の絶対周波数がモニタリングできる。

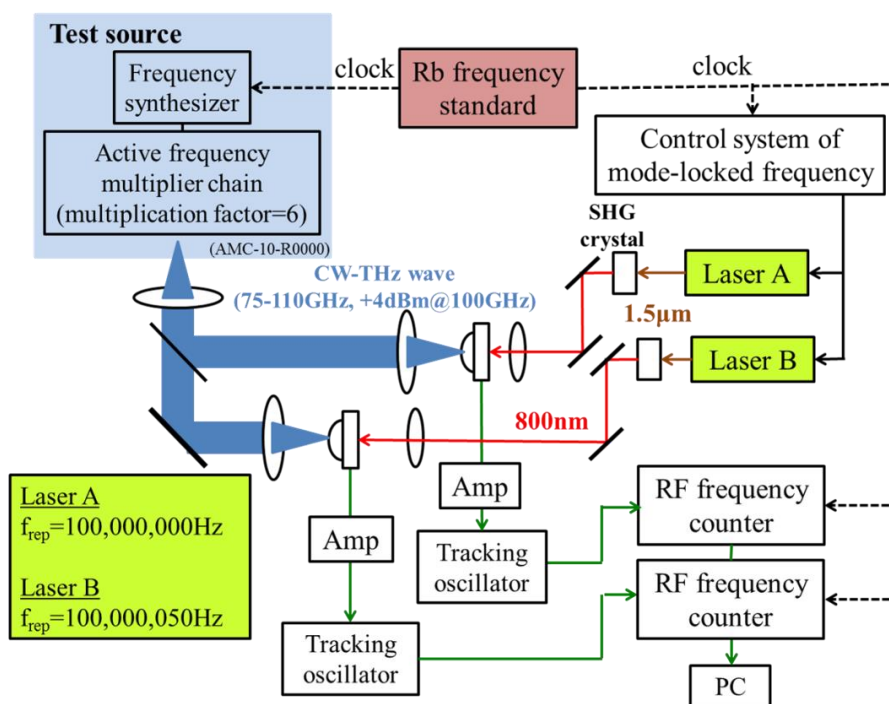


図4 実験装置 ( $f_{\text{rep}1}$ ,  $f_{\text{rep}2}$  固定,  $f_{\text{beat}1}$ ,  $f_{\text{beat}2}$  測定)

### 3.2 実験装置 ( $f_{\text{beat1}}$ , $f_{\text{beat2}}$ 固定, $f_{\text{rep1}}$ , $f_{\text{rep2}}$ 測定)

上記の手法では, CW-THz 波の周波数が変化するとビート周波数が変化する. しかし, ビート信号の帯域は用いるカレント・プリアンプによって制限され, 周波数カウンターで精度よくビート周波数を測定するためには高ゲイン・狭帯域なアンプを選択する必要がある. そこで, ビート周波数を一定になるように制御を行い, その時の繰り返し周波数を測定することでカレント・プリアンプに制限されることなく絶対周波数測定を行えるようにした. 実験装置を図 5 に示す. ビート信号を生成する過程は上記と同じであり, その 2 つの信号をそれぞれ 1MHz と 1.1MHz のパルジェネの信号とミキシングし, そのエラー信号をフェムト秒ファイバーレーザーの制御部にフィードバックすることでビート周波数を安定化している. そして, その時の繰り返し周波数を 2 台の周波数カウンターでそれぞれ測定し, PC に取り込んで絶対周波数をリアルタイムで算出する.

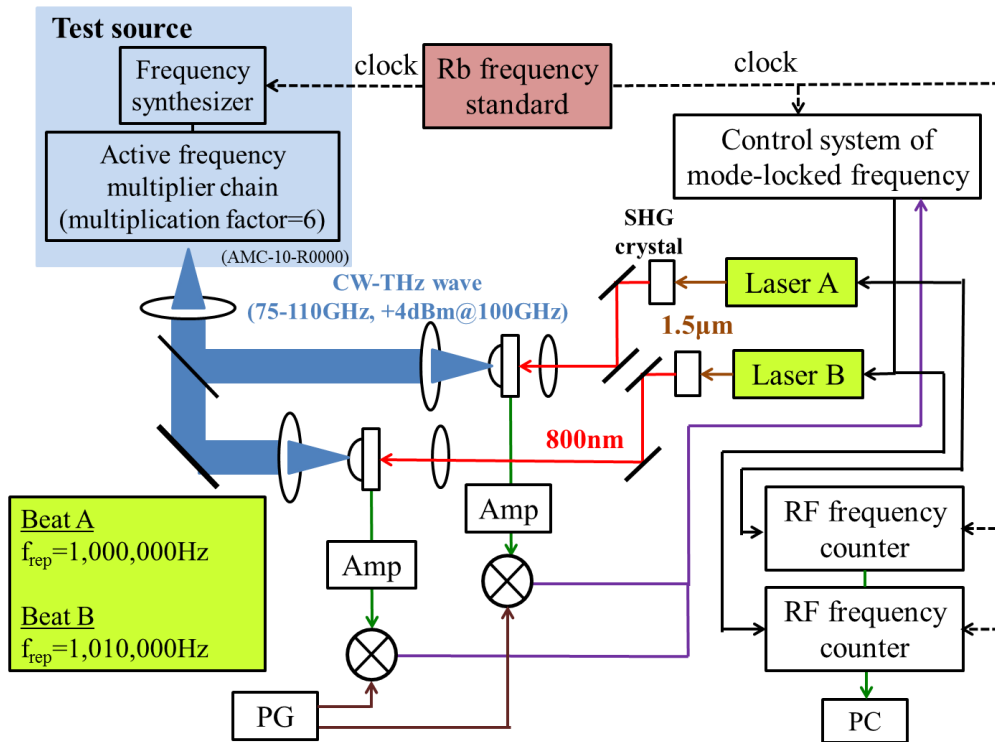


図 5 実験装置 ( $f_{\text{beat1}}$ ,  $f_{\text{beat2}}$  固定,  $f_{\text{rep1}}$ ,  $f_{\text{rep2}}$  測定)

### 3.3 実験結果 ( $f_{\text{rep1}}$ , $f_{\text{rep2}}$ 固定, $f_{\text{beat1}}$ , $f_{\text{beat2}}$ 測定)

まず, CW-THz 波を直線的にスイープした時に絶対周波数が測定出来ているかを確認した. 実験結果を図 6 に示す. 図 6 より, 直線的なスイープを正確に追えていることが分かり, 精度よく絶対周波数計測が出来ていることが分かる. また, CW-THz 波を 80~110GHz に調節した時の絶対周波数計測結果を図 7 に示す. 横軸に設定周波数を示し, 縦軸にその時のエラーと確度を示している. この場合での平均確度は  $3.8 \times 10^{-14}$  であり, 十分な精度が得られていることが分かる.

さらに, CW-THz 波を不連続に走査した時に絶対周波数が追えているかどうか実験を行い, 結果を図 8 に示す. 実験結果から, 次数が大きく変化した場合でもリアルタイムで絶対周波数を決定出来ていることが分かる.

しかし本実験方法では, 原理でも説明したように CW-THz 波の走査範囲に制限があり, 大きな変化では正確に絶対周波数測定することが出来ないといった問題がある.

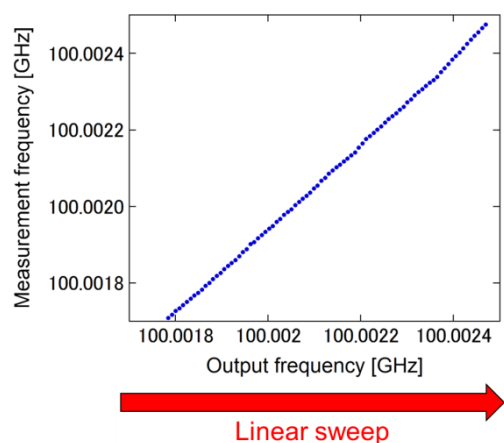


図 6 実験結果①

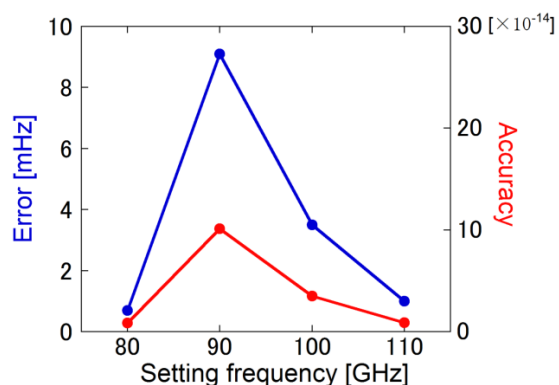


図 7 実験結果②

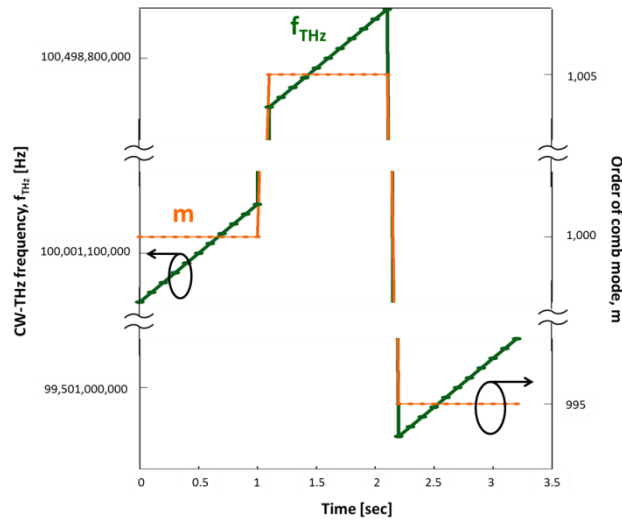


図 8 実験結果③

### 3.4 実験結果 ( $f_{\text{beat1}}$ , $f_{\text{beat2}}$ 固定, $f_{\text{rep1}}$ , $f_{\text{rep2}}$ 測定)

図 9 に CW-THz 波の絶対周波数を線形に走査した時の結果を示す. 本手法ではビート周波数をそれぞれ 1MHz と 1.1MHz に制御しているため, レーザーの繰り返し周波数である 100MHz の走査でも精度よく計測出来ていることが分かる. また, 本実験手法で CW-THz 波の絶対周波数を 80~110GHz に設定した時の測定エラーと確度を図 10 に示す. 本実験で得られた平均確度は  $1.3 \times 10^{10}$  である. この理由として, ビート周波数に比べ繰り返し周波数の方が 2 ケタ程度大きいいため, それを計測する本手法ではビート周波数を測定する手法よりも確度が落ちていると考えられる.

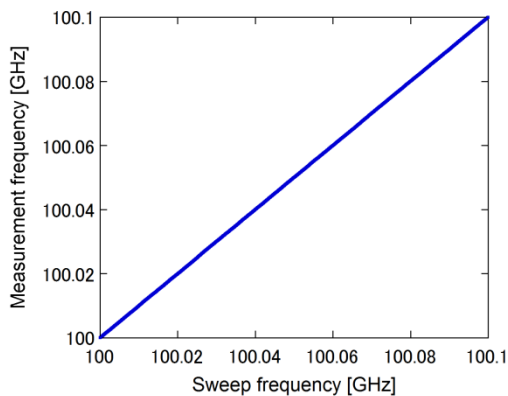


図 9 実験結果④

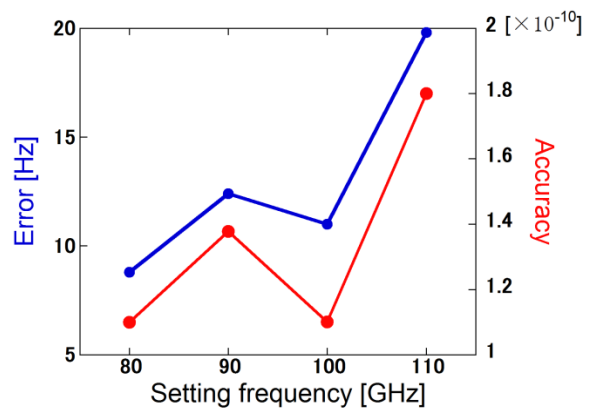


図 10 実験結果⑤



#### 4. 直接 PCA に 1.5 $\mu\text{m}$ 光のファイバーを接続

##### 4.1 実験装置

THz スペアナの実用化に向けて、持ち運びができ、メンテナンスフリーな装置が望まれているが、それにはビート信号の PCA 検出系を考える必要がある。図 11 に実験装置を示す。

従来法では 2 種類の PCA によるビート検出方法があった。(1)に示す方法では 1.5 $\mu\text{m}$  のレーザー光を自由空間に出し、非線形光学結晶で波長変換後、バンドギャップ対応波長が 800nm に近い GaAs の PCA に集光している。しかし、自由空間系が必要となるため装置が大きくなってしまい可搬化が出来ないといった問題がある。(2)に示す方法では、バンドギャップ対応波長が 1.5 $\mu\text{m}$  に近い InGaAs の PCA を用いており、1.5 $\mu\text{m}$  のレーザー光を波長変換なしで集光している。しかしこの PCA は感度が低く、高 SN なビート信号が期待できないといった問題があった。そこで今回、(3)に示すように 1.5 $\mu\text{m}$  光のファイバーを直接 GaAs の PCA に接続することで自由空間系なしで、ある程度の SN 比のビート信号を期待できると考えている。

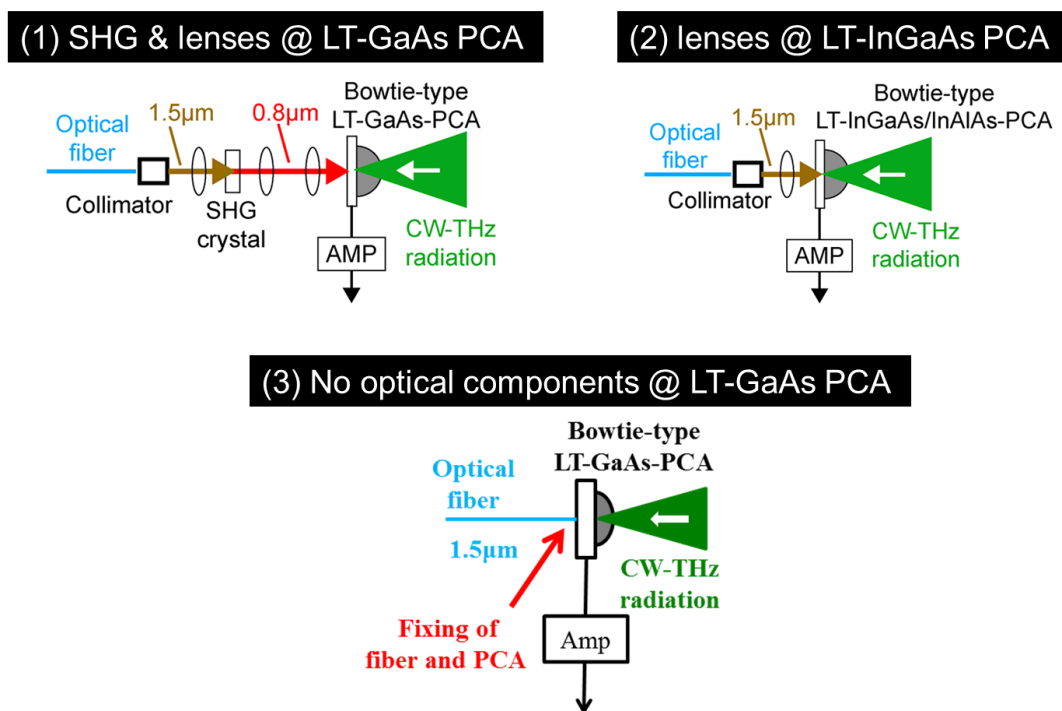


図 11 PCA を用いたビート信号検出方法

そこで、800nm用のGaAs-PCAを用いて800nm光と1.5 $\mu$ m光でのフォトキャリアの発生効率を調べるためにPCAの抵抗値と、抵抗値を同じにした時のビート信号を測定した。実験装置を図12に示す。両方とも自由空間を伝搬しており、800nm光は1.5 $\mu$ m光を波長変換することで作られた。

また1.5 $\mu$ m光ファイバーをGaAs-PCAに直接カップリングしてビート信号を検出するための実験装置を図13に示す。1.5 $\mu$ m光のファイバーの先端はPCAのモジュール上に固定されており、反対側からCW-THz波が入射するとビート信号が生成する。これをアンプで増幅し、スペアナで検出した。

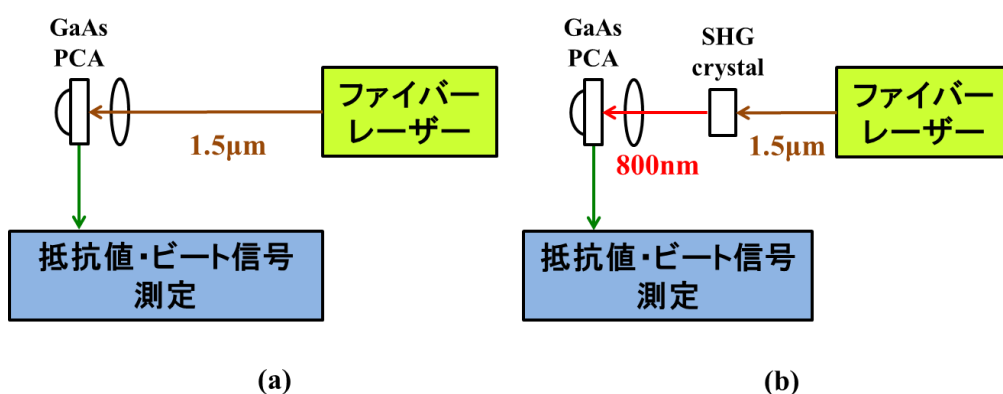


図12 実験装置 (抵抗値, ビート信号 SN 比測定)

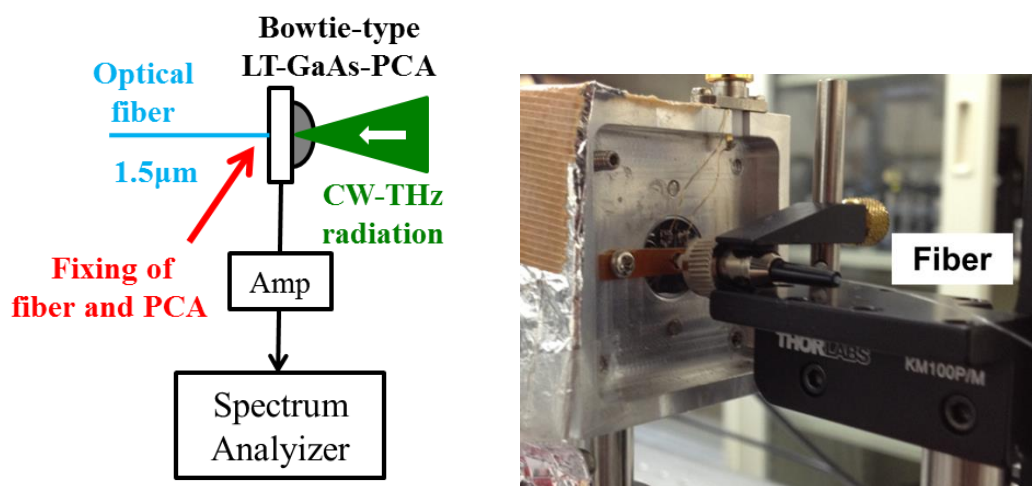


図13 実験装置 (ファイバーをPCAに直接カップリング)

## 4.2 実験結果

800nm 光と 1.5 $\mu\text{m}$  光で入射パワーと PCA の抵抗値の関係を比較した実験結果を図 14 に示す。800nm の方が低パワーで抵抗値が下がっているが、1.5 $\mu\text{m}$  でも入射パワーを高くすることで抵抗値が下がっているため、同じ SN 比のビート信号が得られると考えられる。そこで、抵抗値を同じにした状態でビート信号を比較した。実験結果を図 15 に示す。同じ抵抗値に設定しているため、発生しているフォトキャリアの数も同程度と考えていたが、800nm 光に比べ 1.5 $\mu\text{m}$  光の方が 25dB も SN 比が低い結果となった。しかし今回の実験では、ビーム径の違いや実験系の違いなど完全に比較できるような条件下で実験を行っていないため、このような結果になったと考える。しかし、1.5 $\mu\text{m}$  光でもビート信号の検出が出来たため、直接 PCA に 1.5 $\mu\text{m}$  光のファイバーを接続してビート信号を検出した。実験結果を図 16 に示す。今回の条件ではビート信号 SN 比は 25dB であったが、入射パワーを高くすることが出来ると SN 比の向上が望めると考える。

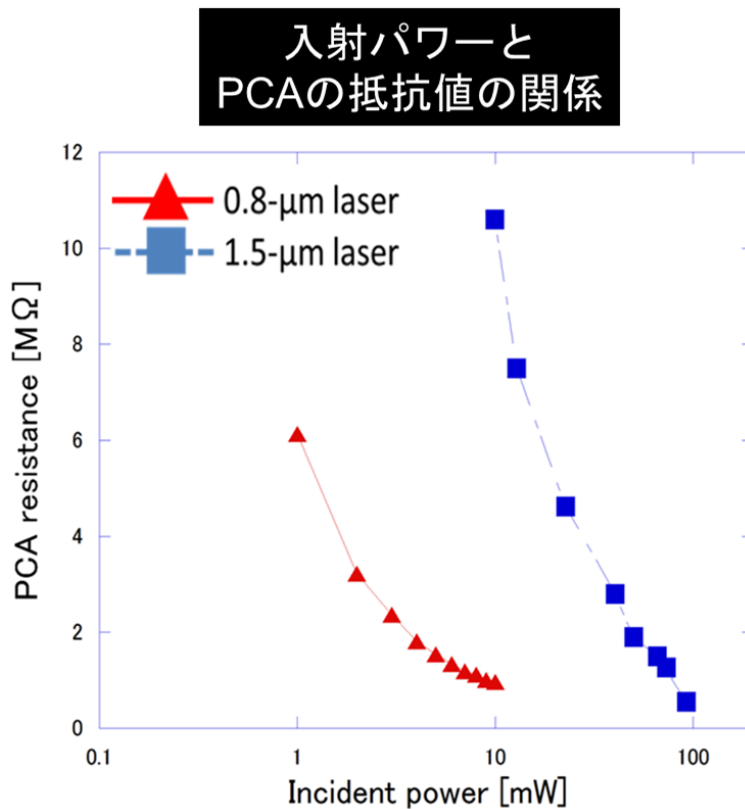


図 14 実験結果（抵抗値比較）

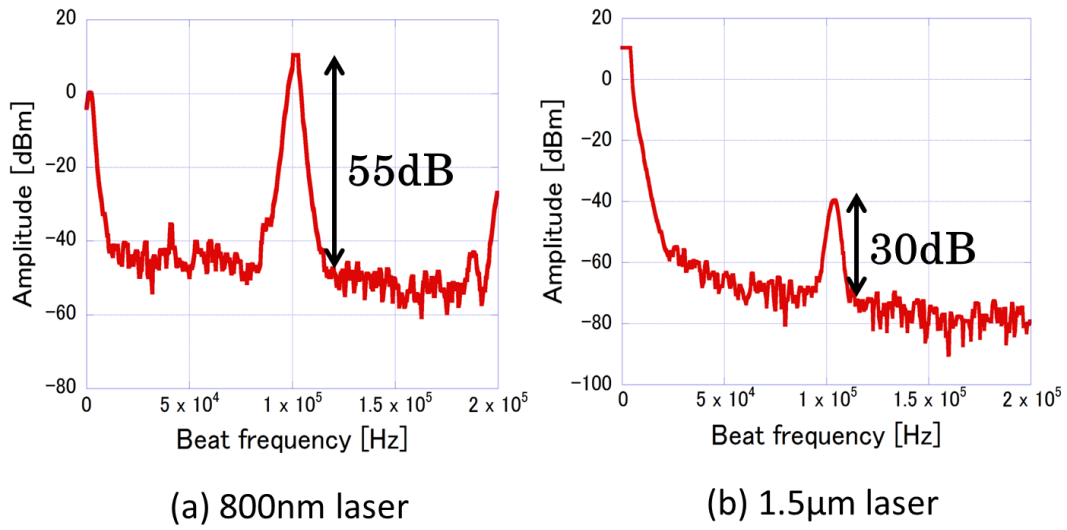


図 15 ビート信号比較

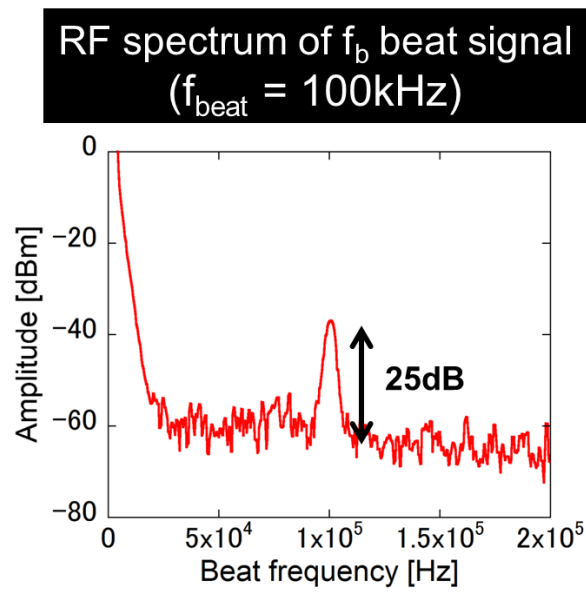


図 16 ファイバー直接カップリングによるビート信号検出

## 5. まとめと今後の予定

本研究では、デュアルPC-THzコムを用いたリアルタイム絶対周波数測定と、可搬型THzスペアナの実現に向けたファイバーとPCAの直付けによるビート信号検出を行った。

リアルタイム絶対周波数測定では、2種類の方法で実験を行った。1つ目は繰り返し周波数をロックしてビート周波数を計測する方法で、絶対周波数計測の結果から  $3.8 \times 10^{-14}$  の平均確度を得た。さらに、絶対周波数を数MHz程度リニアにスイープしてもその変化を高精度に測定することが出来た。2つ目のビート周波数をロックして繰り返し周波数を測定する方法では、絶対周波数計測の結果から  $1.3 \times 10^{10}$  の平均確度を得た。そして、レーザーの繰り返し周波数である100MHzにおいて絶対周波数のリニアスイープを測定することが出来た。

また、直接PCAに1.5 $\mu$ m光のファイバーを接続してビート信号を検出する実験では、800nmに感度のあるGaAs-PCAを用いて、800nm光と1.5 $\mu$ m光でフォトキャリアの発生効率を比較した。そして、ビート信号を検出しSN比を測定したが800nm光に比べ1.5 $\mu$ m光の方は25dB程度低い値となった。しかしビート信号は検出できたので、このSN比を上げることで、その他の応用に用いることが出来ると考える。

今後の予定としては、絶対周波数を決定するために測定する2つの周波数を同時計測できるようにしていく。そのために、高速デジタイザーを用いた瞬時周波数計測が必要になると考えられるので、ヒルベルト変換のプログラムの再調整を行う。また、一つのPC-THzコムを用いて絶対周波数計測も行う予定である。1.5 $\mu$ m光のファイバーを800nm用のGaAs-PCAに直接カップリングする実験に関しては、800nm光と1.5 $\mu$ m光のビーム径を同じにして同様の実験を再度行う予定である。さらにカレント・プリアンプ一体型のPCAを製作し、動作確認を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 大森豊明「テラヘルツテクノロジー～発生・計測・応用技術・展望～」, NTS, p146-152, (2005).
- [2] S. Yokoyama et al., Opt. Express, **16**, 17, 13052-13061 (2008).
- [3] T. Yasui et al., Opt. Express **17**, 19, 17034-17043 (2009).