

中間報告

「テラヘルツコム参照型 スペクトラム・アナライザーに よる高精度周波数計測」

H25/8/8 M1 林 建太

背景

近年、テラヘルツ (THz) 波が大容量無線通信のための新しい手段として注目

- THz無線通信など

多数局間の混信を避ける必要がある



THz領域において高精度な周波数計測技術が必要

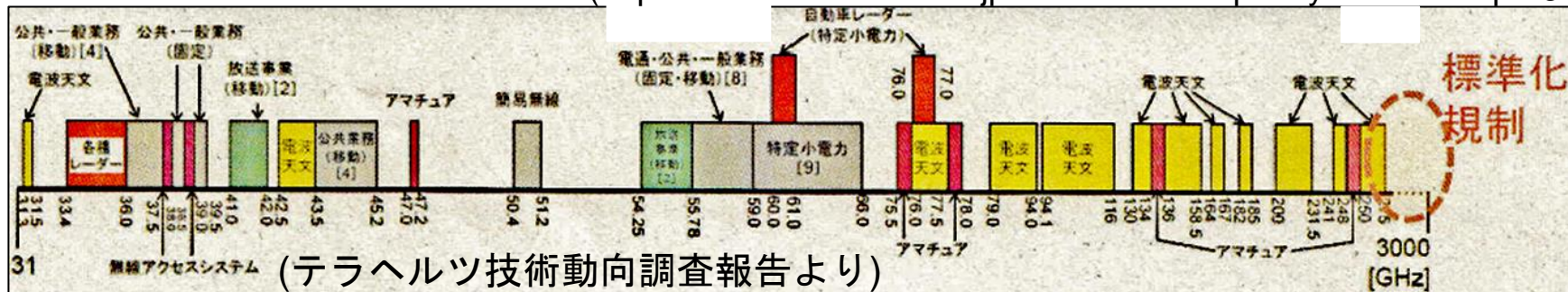
テンポラリなネットワーク

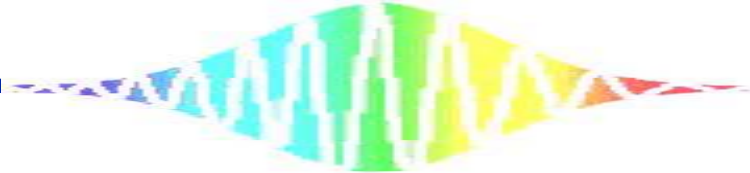


ホットスポット、レンタルDVDショップ



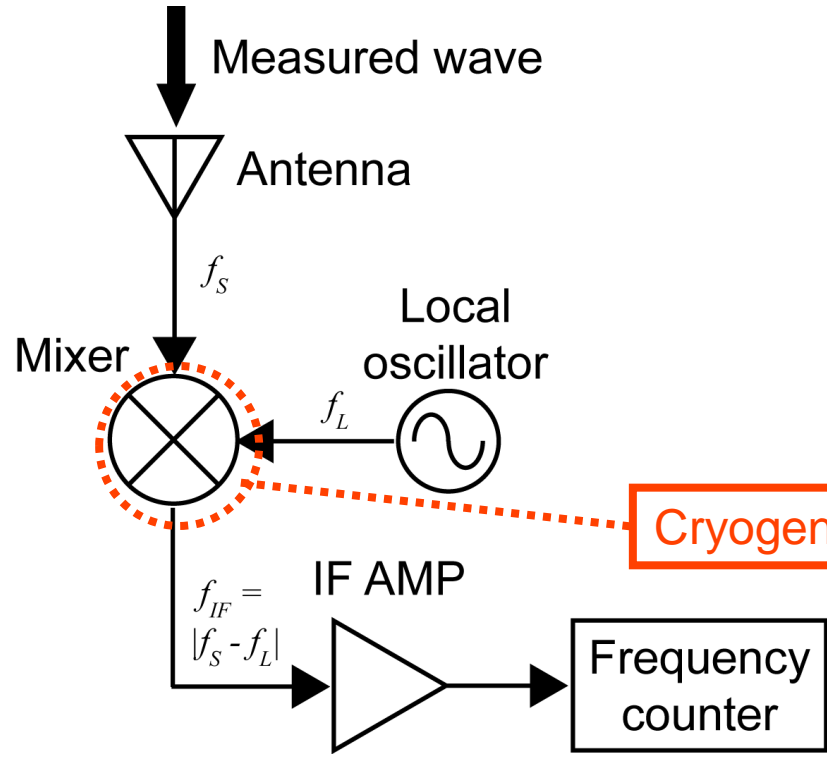
(<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/THP/pdf/oyobuturi300.pdf>より)



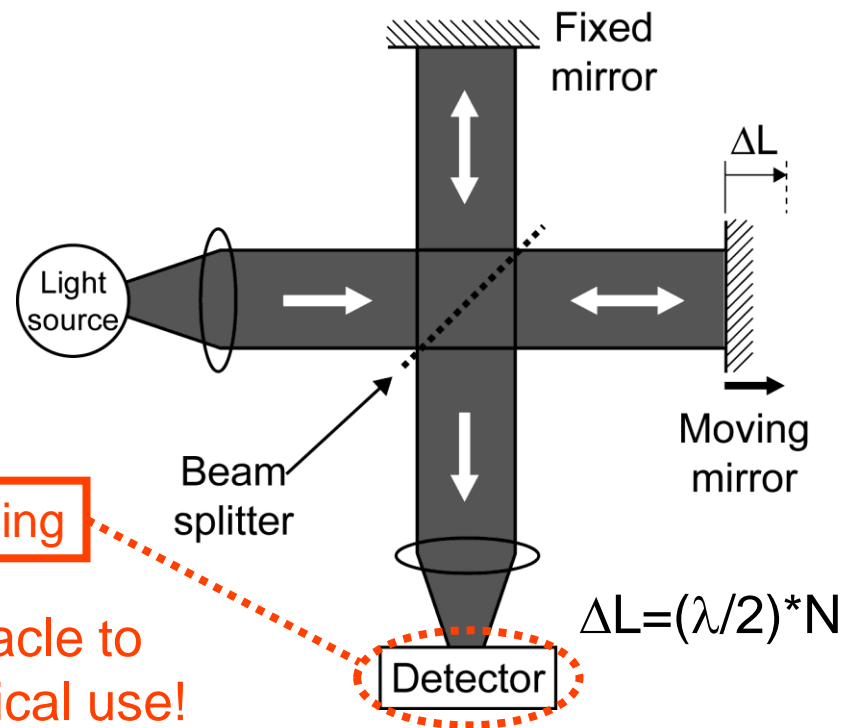


従来法

電氣的ヘテロダイン法



光學的手法 (干渉計測)

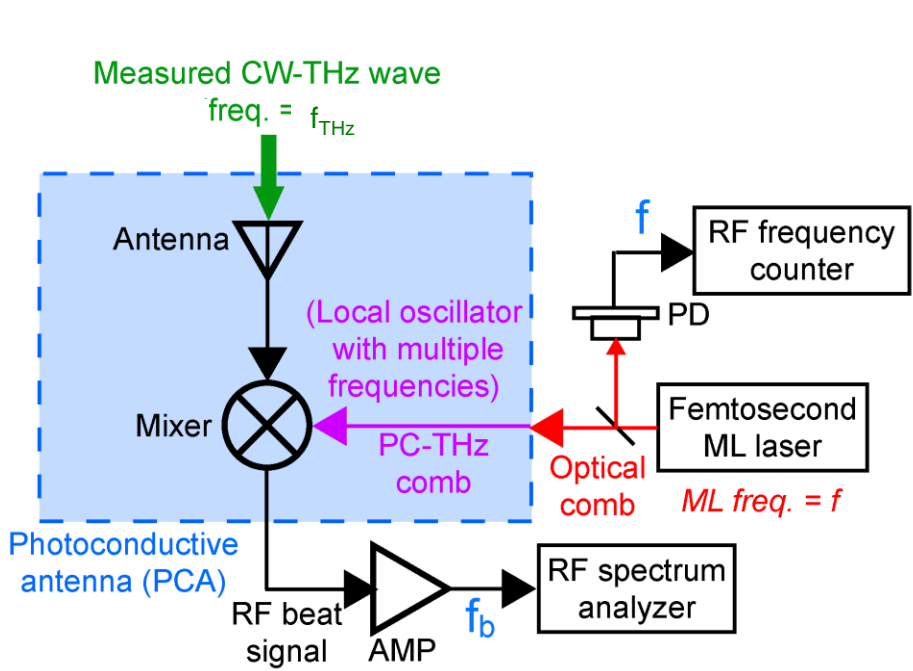


Cryogenic cooling

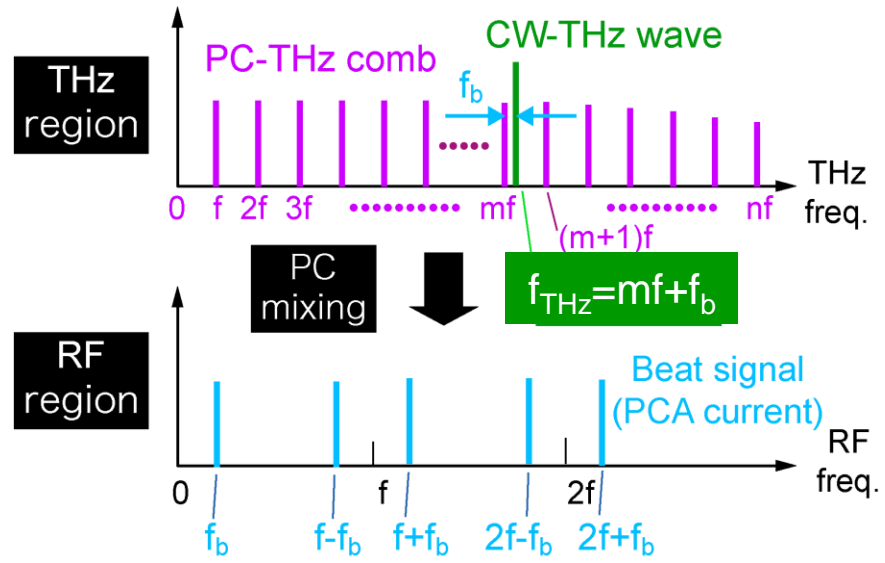
Obstacle to practical use!

テラヘルツ領域 (0.1~10THz) をカバーすることは難しい
 → THz波をカバーできる新しい手法が必要!

光伝導ミキシング法を用いた THzコム参照型スペクトラム・アナライザ(1)



Freq. domain



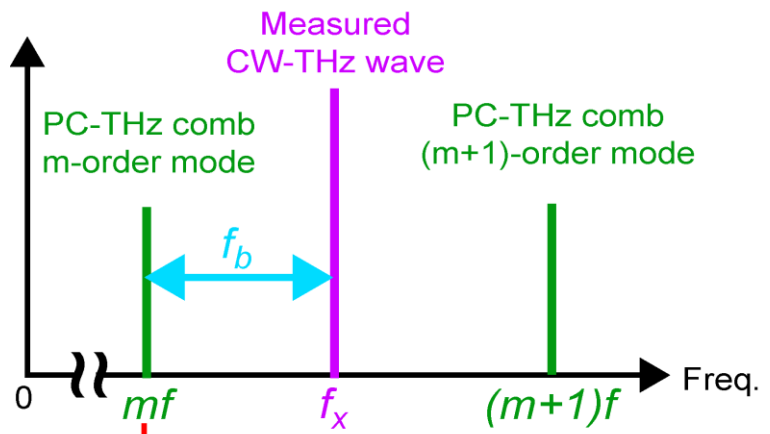
$$f_{\text{THz}} = mf \pm f_b$$

m: order of comb mode
f: ML frequency
f_b: beat frequency

Ref) S. Yokoyama et al, *Opt. Express* **16**, 13052-13061 (2008).
 T. Yasui et al. *Opt. Express* **17**, 17034-17043 (2009).

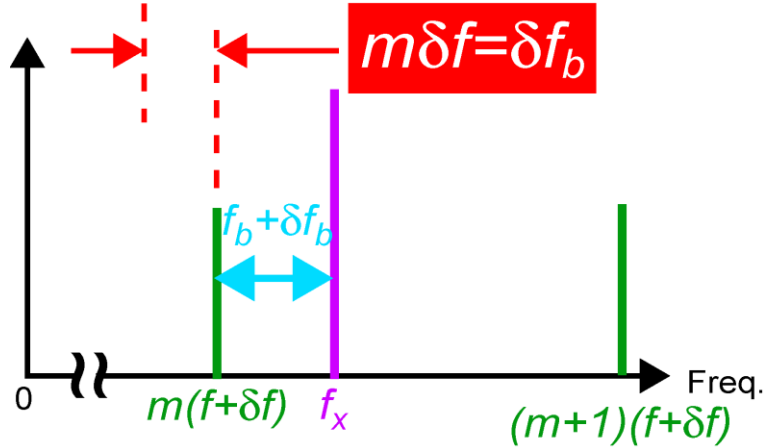
光伝導ミキシング法を用いた

THzコム参照型スペクトラム・アナライザー(1)



Shift of ML freq. by δf
 $(f \rightarrow f + \delta f)$

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|}$$



Change of beat freq. by δf_b
 $(f_b \rightarrow f_b + \delta f_b)$

$$f_{THz} = mf - f_b \quad (\delta f_b / \delta f > 0)$$

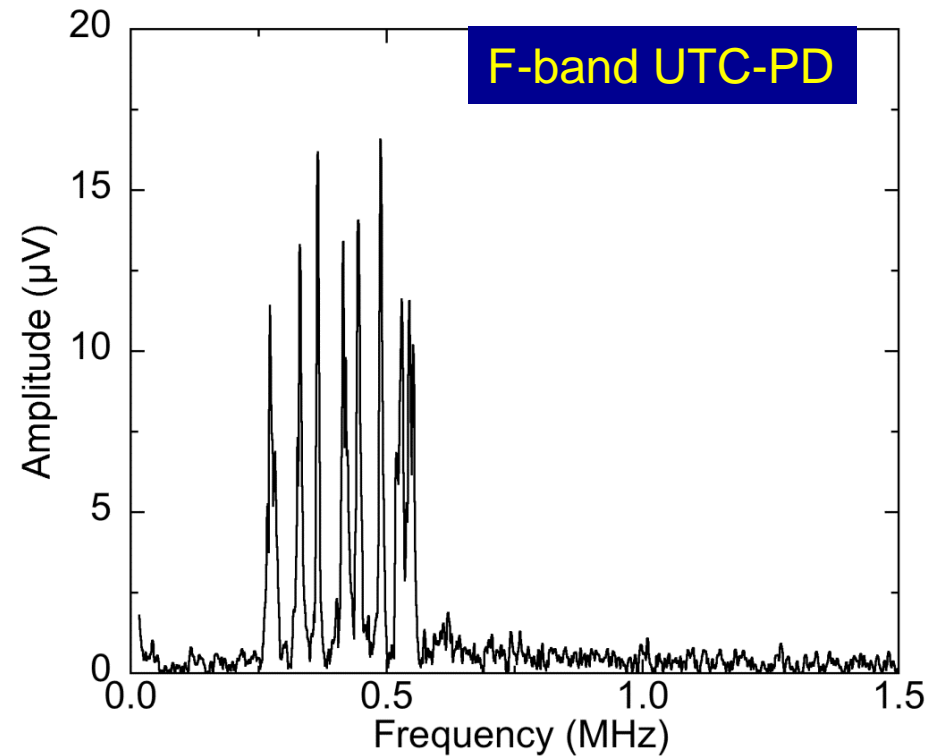
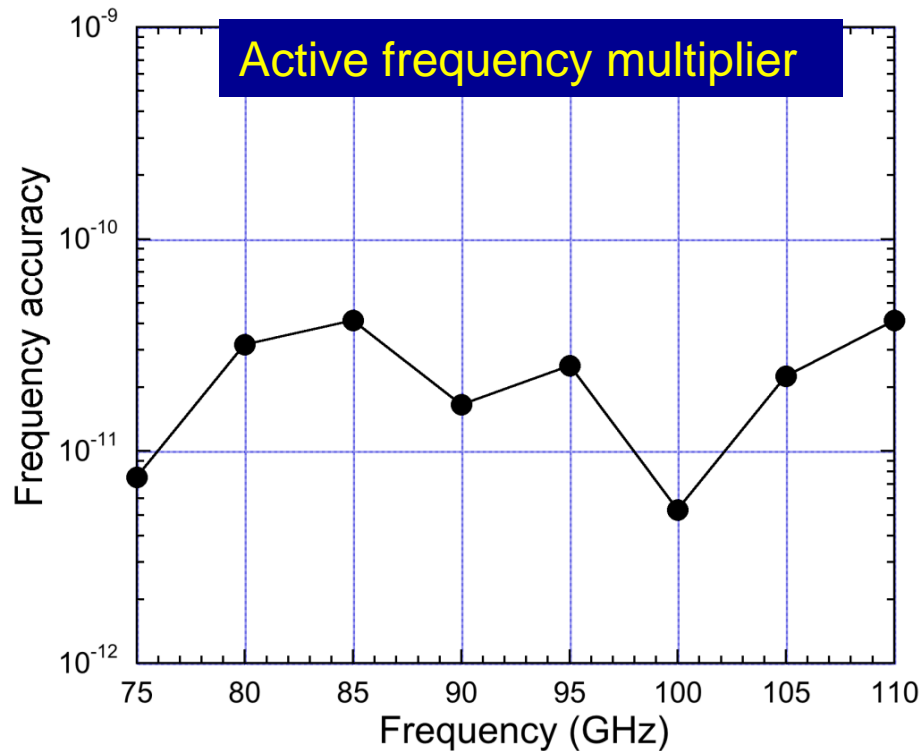
$$f_{THz} = mf + f_b \quad (\delta f_b / \delta f < 0)$$

従来研究



Ref) T. Yasui et al. *Opt. Express* 17, 17034-17043 (2009).

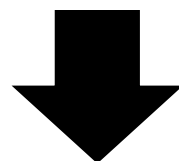
絶対周波数計測

CW-THz波のリアルタイムモニタリング



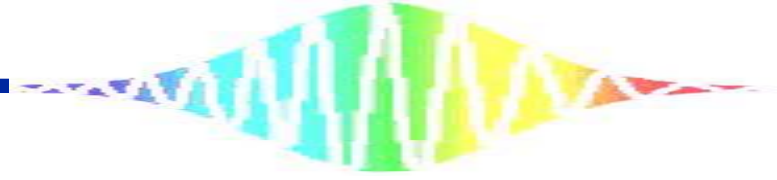
Problems of previous studies for practical use

- (1) 絶対周波数を決定するためのビート周波数計測が2ステップである  **リアルタイムではない!**
- (2) 1.5 μm のファイバーレーザー光をPCAに入射する際に光学系が必要である  **持ち運び出来ない!**



Present talk

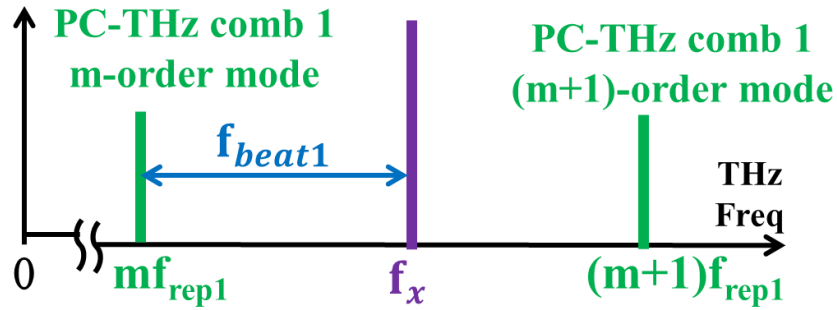
- (1) 2つのPC-THzコムを用いることで、絶対周波数を**リアルタイムで決定する**
- (2) 1.5 μm 光のファイバーをLT-GaAs-PCAに**直付けする**



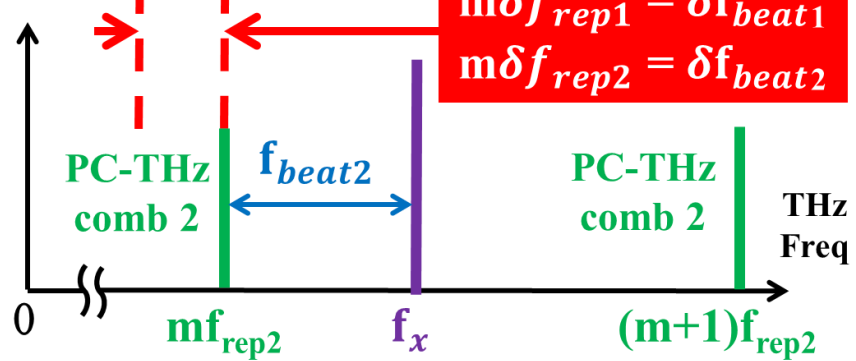
(1) Real-time determination of absolute frequency using dual PC-THz combs

リアルタイムでの絶対周波数の決定法

Laser A
(PC-THz comb 1)



Laser B
(PC-THz comb 2)

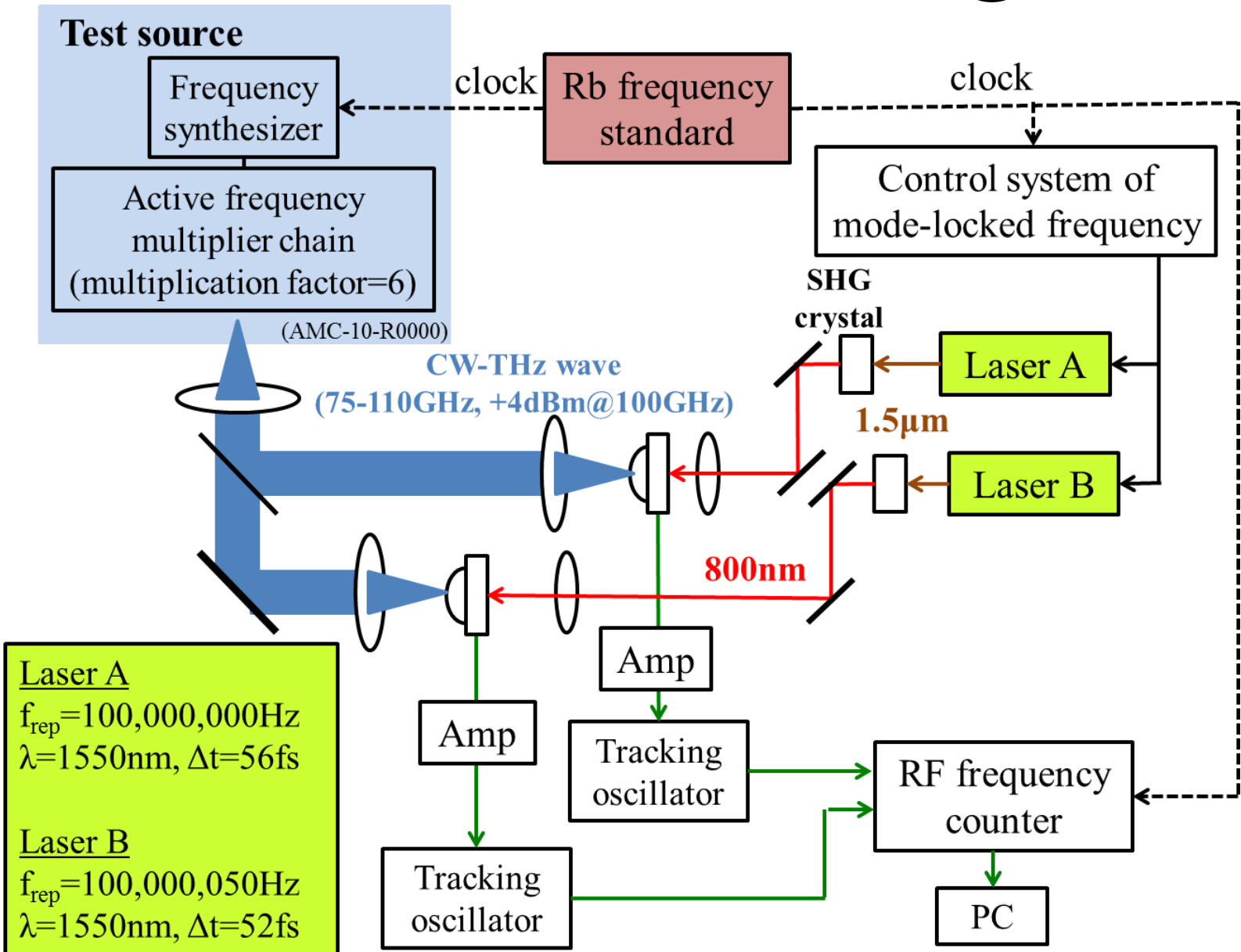


$$m = \frac{|f_{beat1} - f_{beat2}|}{|f_{rep1} - f_{rep2}|}$$

$$f_{THz} = mf_{rep1} - f_{beat1} \quad (\delta f_{beat} / \delta f_{rep} > 0)$$

$$f_{THz} = mf_{rep1} + f_{beat1} \quad (\delta f_{beat} / \delta f_{rep} < 0)$$

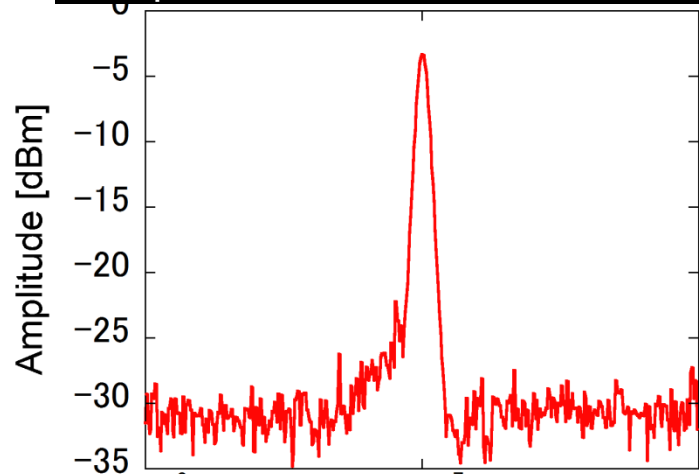
実験セットアップ①



CW-THz波と2つのPC-THzコム間のビート信号

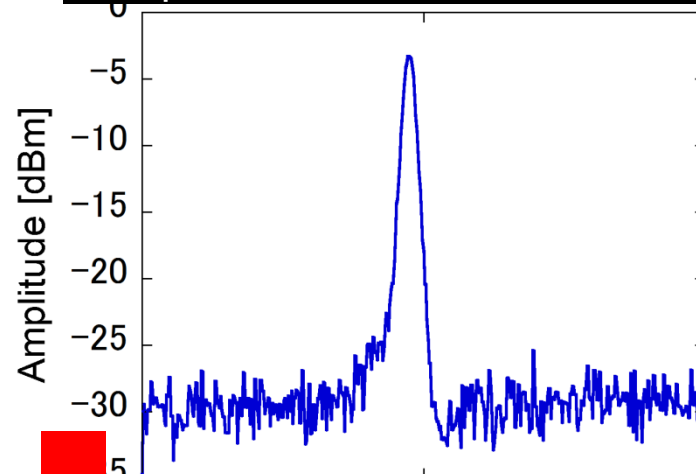
PC-THz comb (1)

($f_{\text{rep1}} = 100,000,000$ Hz)



PC-THz comb (2)

($f_{\text{rep2}} = 100,000,050$ Hz)

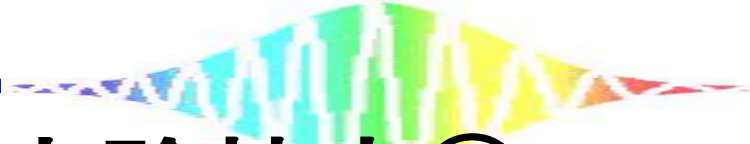


Real-time determination!

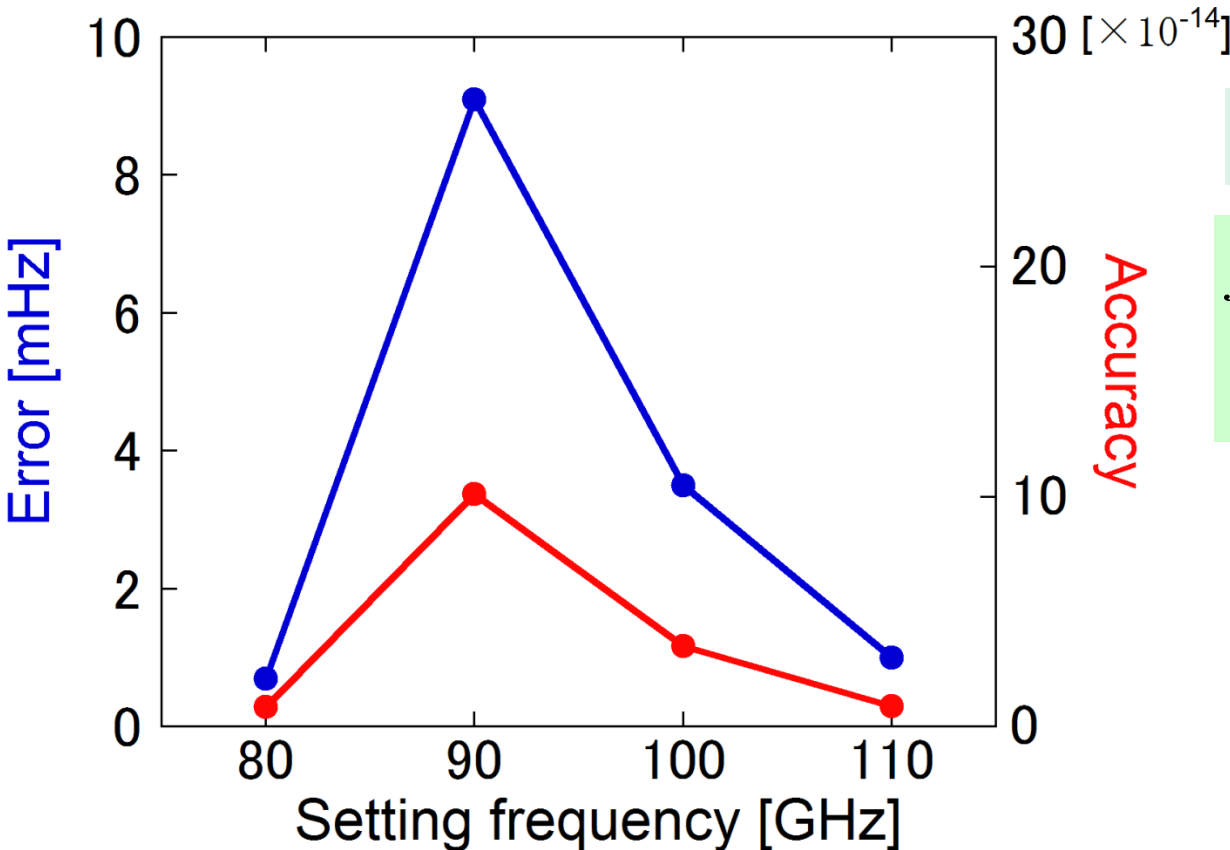
$$m = |f_{\text{beat1}} - f_{\text{beat2}}| / |f_{\text{rep1}} - f_{\text{rep2}}|$$

$$= |10,004,000.01 - 9,953,700.002| / |100,000,000 - 100,000,050| = 1006$$

$$f_{\text{THz}} = m f_{\text{rep1}} + f_{\text{beat1}} = 1006 * 100,000,000 + 10,004,000.01 = 100,610,004,000 \text{ Hz}$$



絶対周波数計測の実験精度①



測定誤差の見積もり

$$f_{THz} = mf_{rep1} + f_{beat1}$$

$$Df_{THz} = mDf_{rep1} + Df_{beat1}$$

$$\Delta f_{rep1} = 400\mu\text{Hz}$$

$$\Delta f_{beat1} = 21\text{mHz}$$

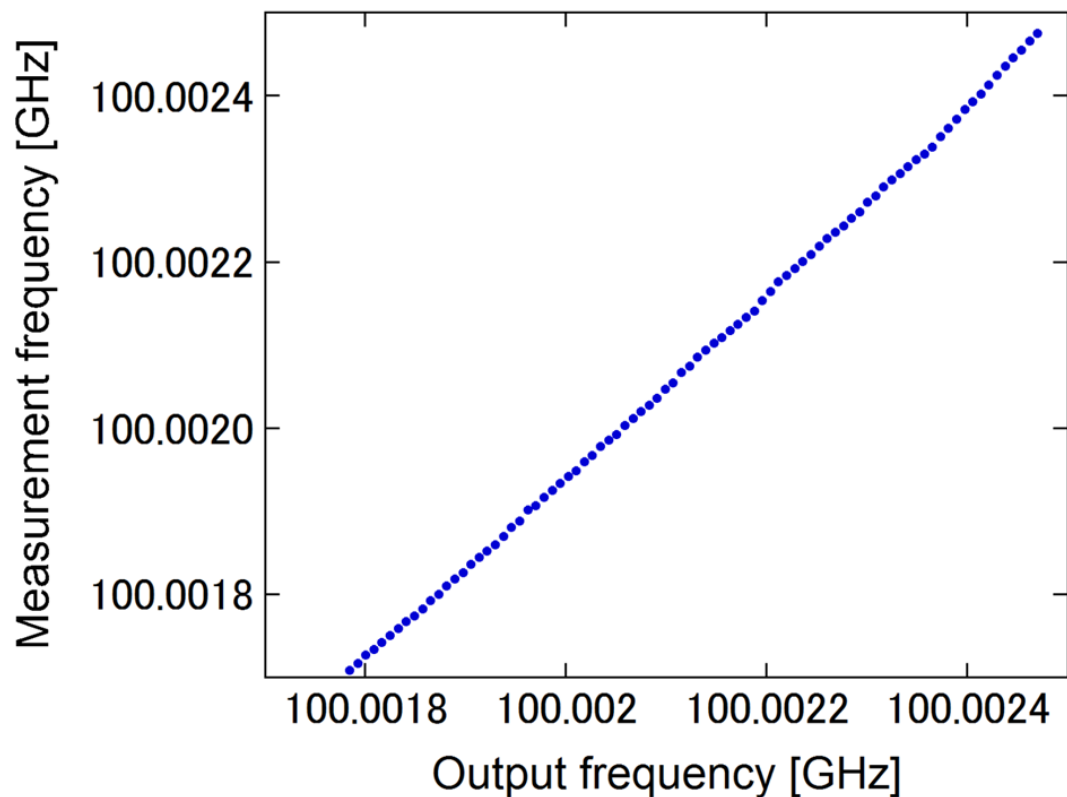
$$m = 800 \sim 1100$$

↓

$$\Delta f_{THz} = 341 \sim 461\text{mHz}$$

Mean precision= 3.8×10^{-14}

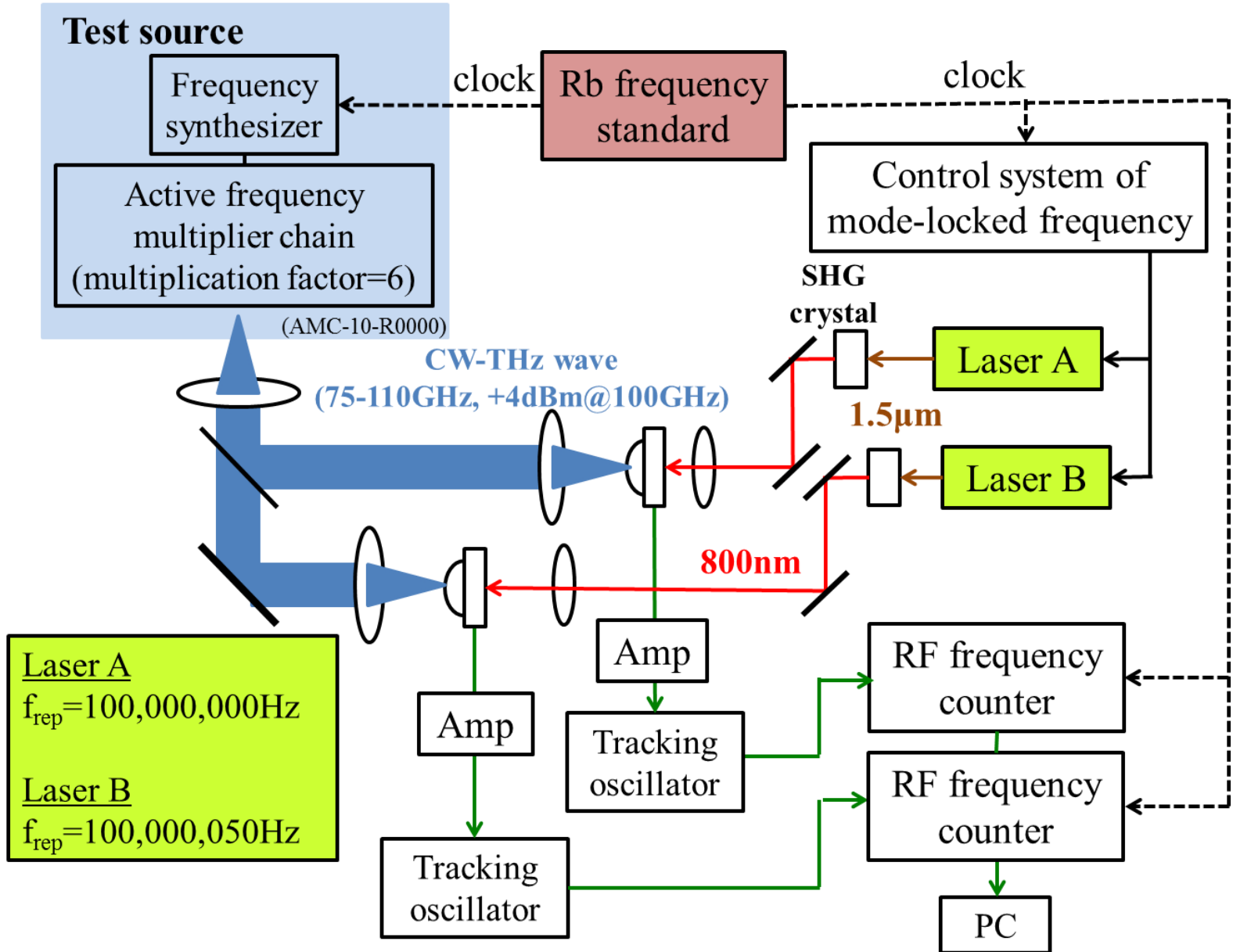
CW-THz波を直線的にスイープした時のリアルタイムモニタリング①

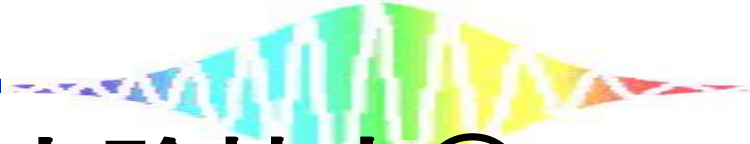


Linear sweep

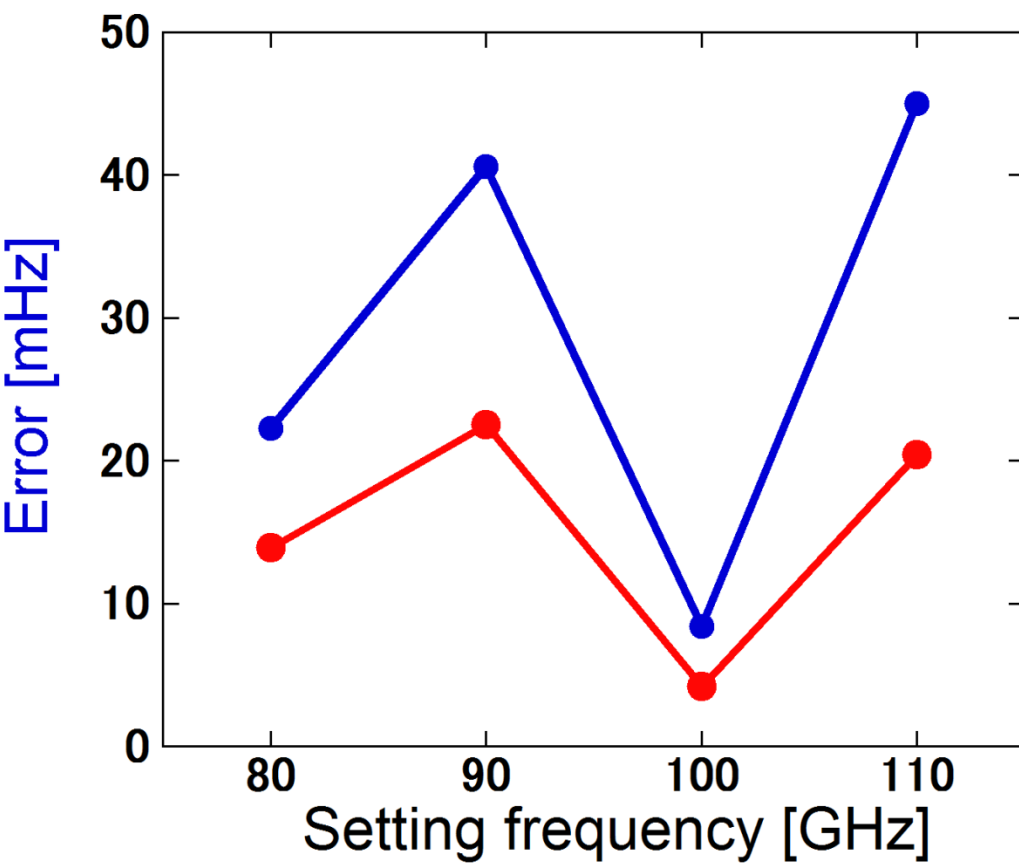
- 700kHzのスweepをリアルタイムモニタリング
- ビート周波数が変化するため、CW-THz波を大きくスイープすることが出来ない

実験セットアップ②





絶対周波数計測の実験精度②



100 [$\times 10^{-14}$]

測定誤差の見積もり

$$f_{THz} = mf_{rep1} + f_{beat1}$$

$$Df_{THz} = mDf_{rep1} + Df_{beat1}$$

Accuracy

$$\Delta f_{rep1} = 400\mu\text{Hz}$$

$$\Delta f_{beat1} = 21\text{mHz}$$

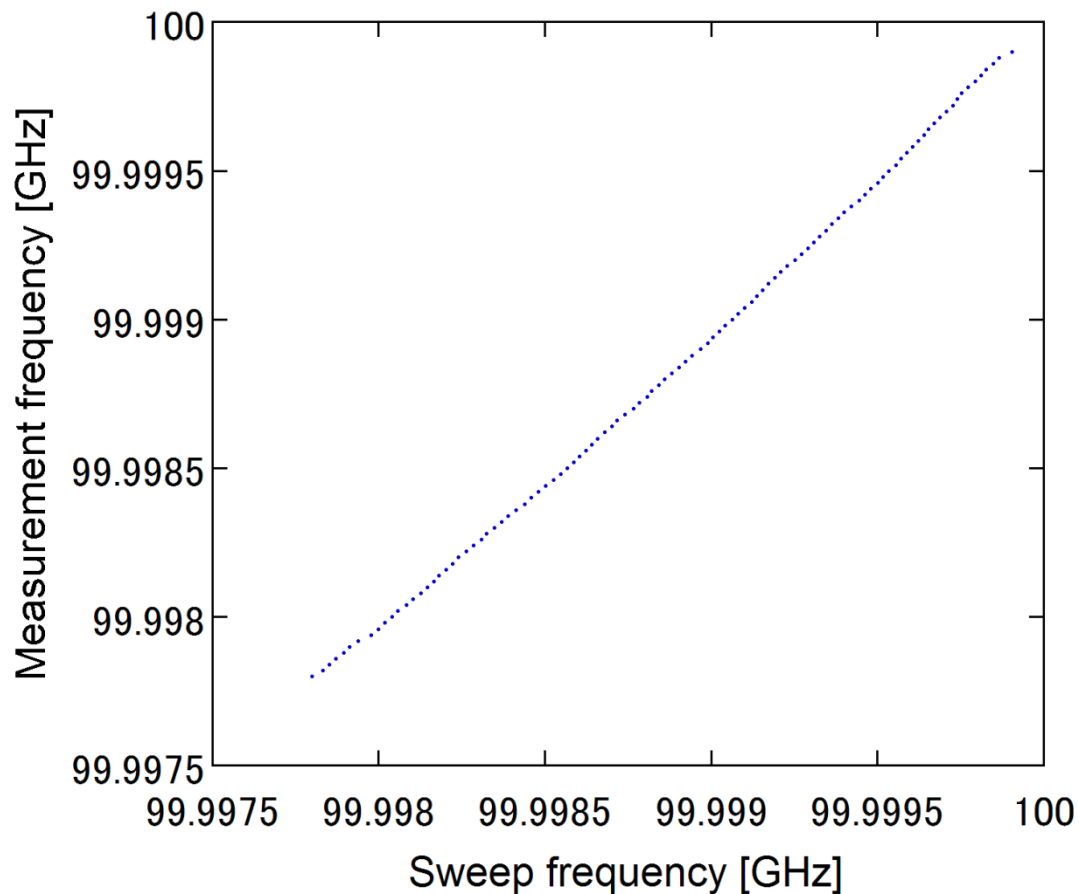
$$m = 800 \sim 1100$$

↓

$$\Delta f_{THz} = 341 \sim 461\text{mHz}$$

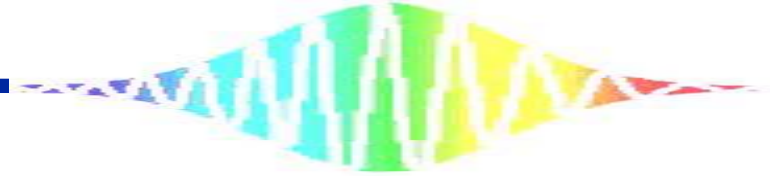
Mean precision= 3.1×10^{-13}

CW-THz波を直線的にスイープした時のリアルタイムモニタリング②



- 2MHzのスイープをリアルタイムでモニタリング
- この場合でもビート周波数が増えるため大きくスイープすることが出来ない

Linear sweep

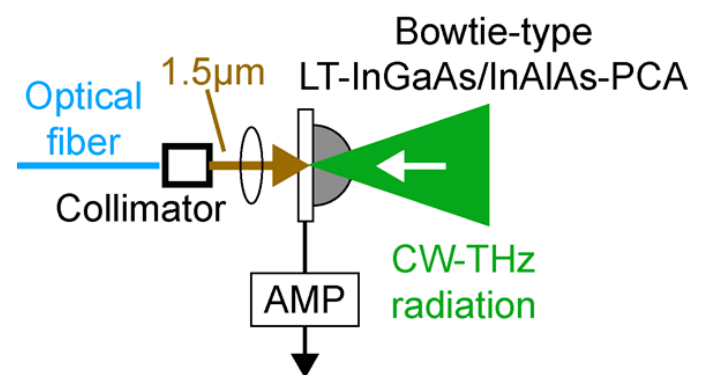
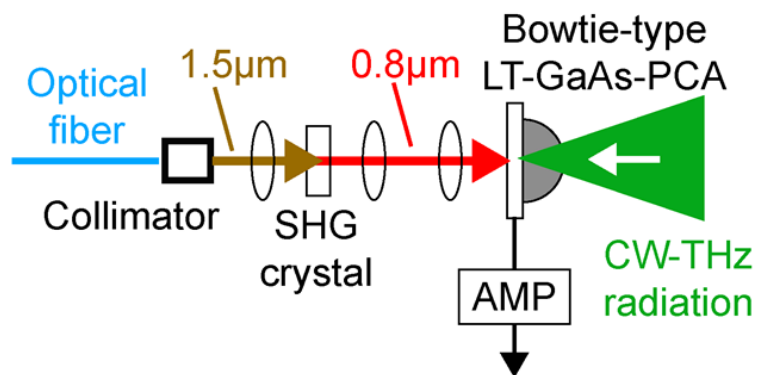


(2) Direct coupling of LT-GaAs-PCA with output fiber tip of 1.5 μm fiber laser

1.5μm光とPCAの接続方法

(1) SHG & lenses @ LT-GaAs PCA

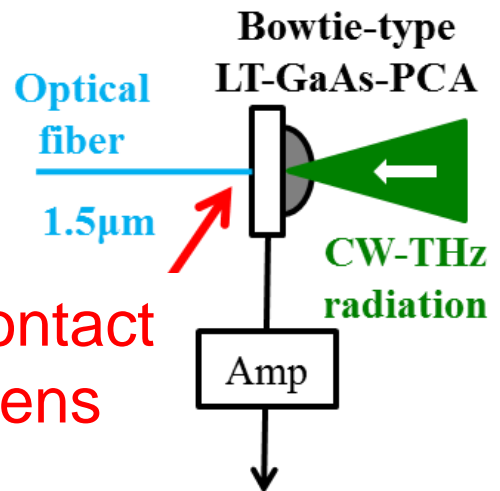
(2) lenses @ LT-InGaAs PCA



自由空間での光学系が必要

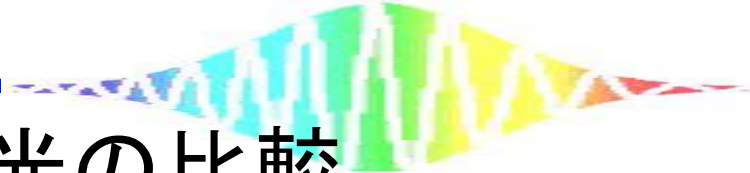
感度が低い

(3) No optical components @ LT-GaAs PCA



Direct contact without lens

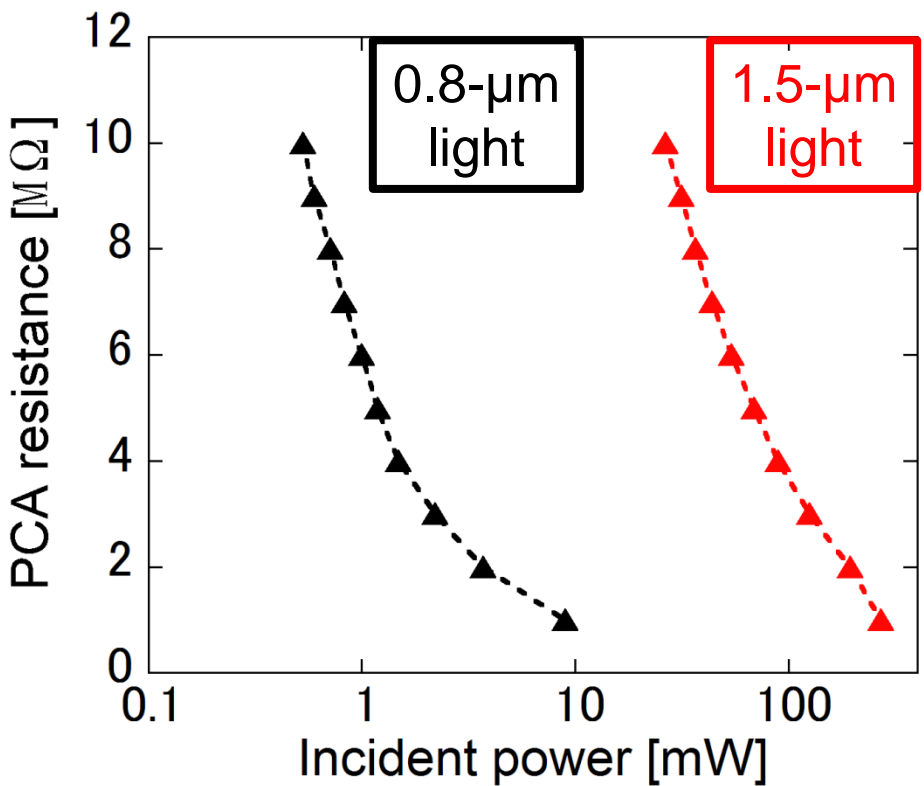
自由空間での光学系を必要とせず, ある程度の感度が望める



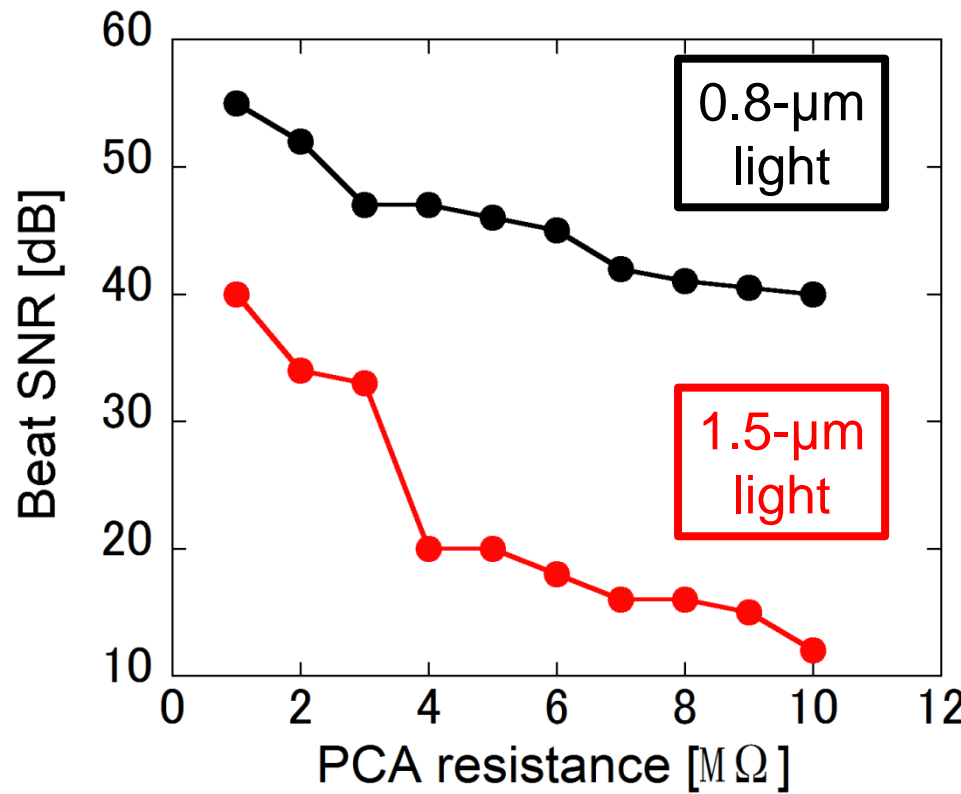
0.8 μm 光と1.5 μm 光の比較

ビート周波数100kHz (amp 100kHz, 50M Ω), RBW=3kHz

入射パワーとPCAの抵抗値の関係



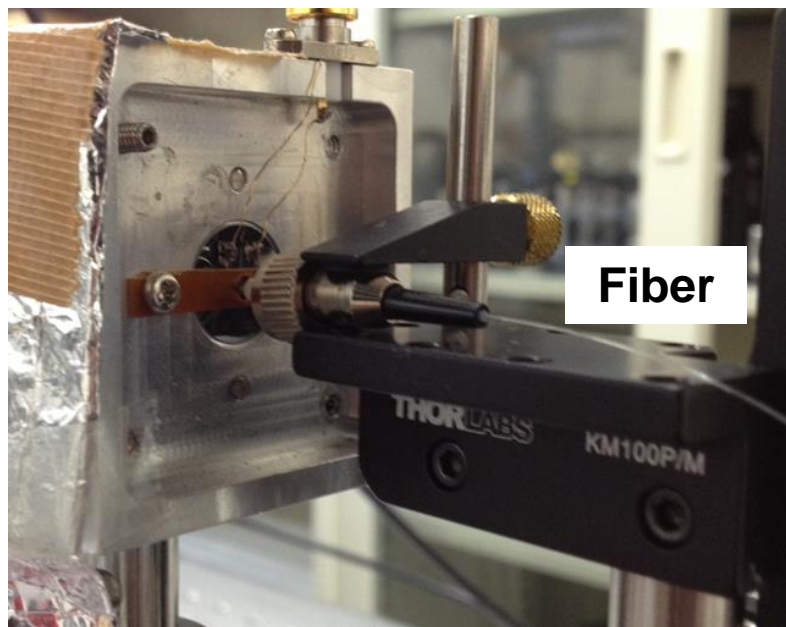
PCAの抵抗値とビート信号SN比の関係



実験結果

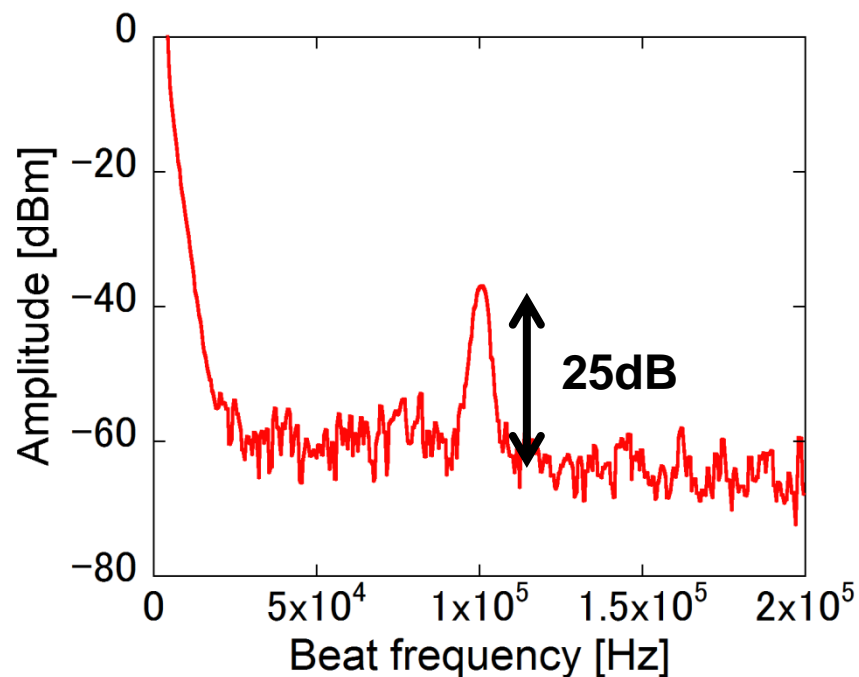
Direct fiber coupling without lens

($P_{\text{mean}} = 189\text{mW}$, $f_{\text{rep}} = 56\text{MHz}$)

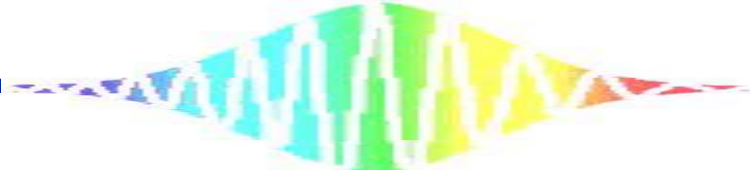


RF spectrum of f_b beat signal

($f_{\text{beat}} = 100\text{kHz}$)



PCAに直接ファイバーを接続する方法は、メンテナンスフリーで小型なTHzスペアナを実現し、実用的なアプリケーションになりうる!



まとめ

- リアルタイムでの絶対周波数計測を実現
- PCAに直接ファイバーを接続し, ビート信号を確認

今後の予定

- 周波数の速い変動も測定できるようにする
- ビート周波数を制御して, 繰り返し周波数の変化から絶対周波数を測定する