

# 雑誌会 (前期)

M2 木村 洸仁

# 未開拓電磁波テラヘルツ帯

電波 ← **テラヘルツ波** → 光

ミリ波

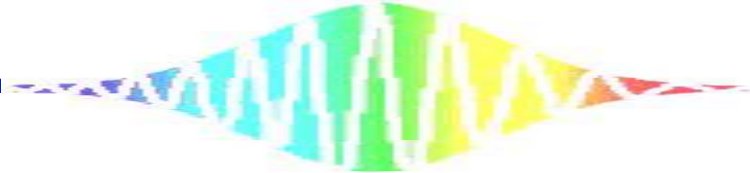
遠赤外

IR

UV

300 MHz 3 GHz 30 GHz 300 GHz 3 THz 30 THz 300 THz  
1 m 100 mm 10 mm 1 mm 100 μm 10 μm 1 μm

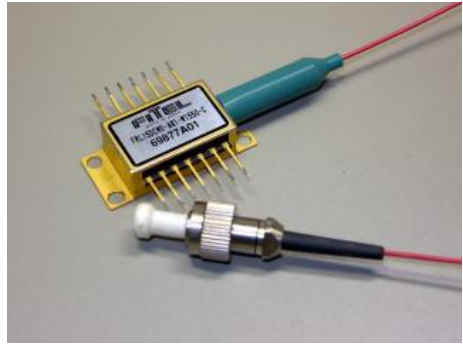
- 1. 新しいセンシング技術の創成**  
＞バイオ・生体・セキュリティ・非破壊検査への展開
- 2. 大容量情報通信を目指した技術革新**  
＞極限デバイスの開発・100GHz超の論理回路
- 3. 社会貢献技術基盤の形成**  
＞テラヘルツ標準の開発
- 4. 新しいサイエンスの創成**  
＞新しい物理の誕生



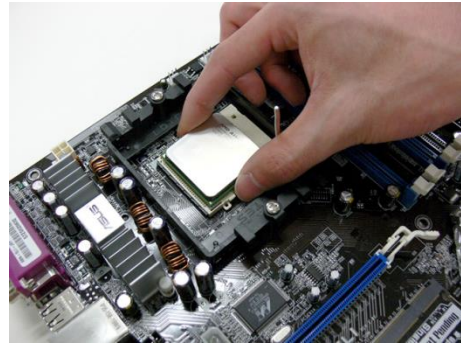
# テラヘルツテック/ロジ



**テラヘルツ波  
Terahertz Wave**

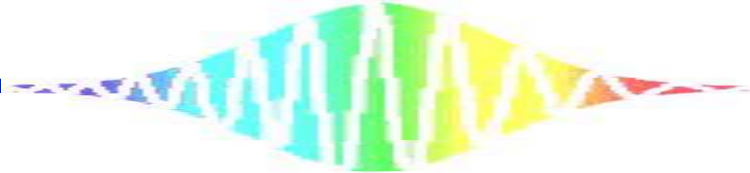


**テラヘルツテック/ロジ  
Terahertz Technology**

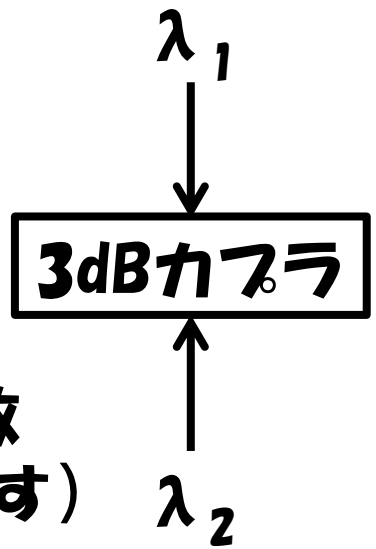
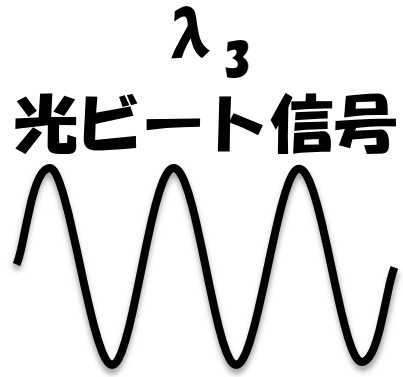
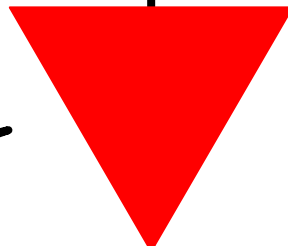
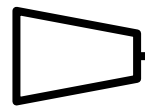
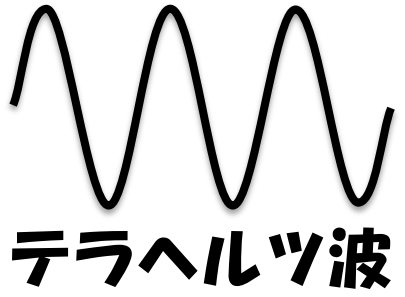


**テラヘルツフォトンクス  
Terahertz Photonics**

**テラヘルツエレクトロニクス  
Terahertz Electronics**



# フォトミキサの原理



**UTC-PD等の  
超高速光電変換**

テラヘルツ周波数  
(差周波のみ抜き出す)

※従来：pin-PD (動作速度の高速化に限界)

Ex.)  $\lambda_1 : 1550\text{nm}$ ,  $\lambda_2 : 1555\text{nm}$  のとき

差周波発生  $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$

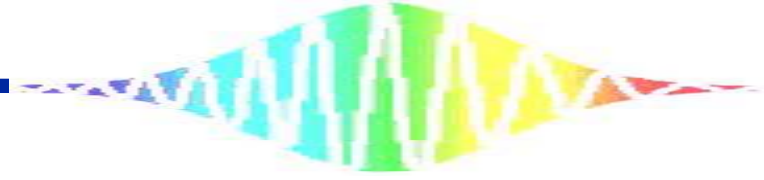
$(1/\lambda_3) \times 299792458 \doteq 0.62\text{THz}$

# 紹介論文

① Qudsia Quraishi, Martin Griebel, Thomas Kleine-Ostmann, and Rudolf Bratschitsch, "Generation of phase-locked and tunable continuous-wave radiation in the terahertz regime" *Optics Letters*, Vol. **30**, Issue **23**, pp. **3231-3233** (2005)

② F. Hindle, G. Mouret, S. Eliet, M. Guinet, A. Cuisset, R. Bocquet, T. Yasui, and D. Rovera, "Widely tunable THz synthesizer" *Applied Physics B*, Volume **104**, Issue **4**, pp. **763-768** (2011)

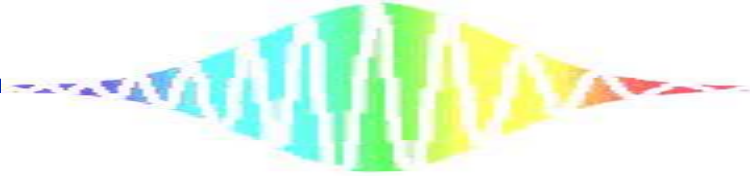
③ Namje Kim, Young Ahn Leem, Hyunsung Ko, Min Yong Jeon, Chul Wook Lee, Sang-Pil Han, Donghun Lee, and Kyung Hyun Park, "Widely Tunable 1.55- $\mu\text{m}$  Detuned Dual-Mode Laser Diode for Compact Continuous-Wave THz Emitter" *ETRI Journal*, Volume **33**, Number **5**, pp. **810-813** (2011)



# ***Generation of phase-locked and tunable continuous-wave radiation in the terahertz regime***

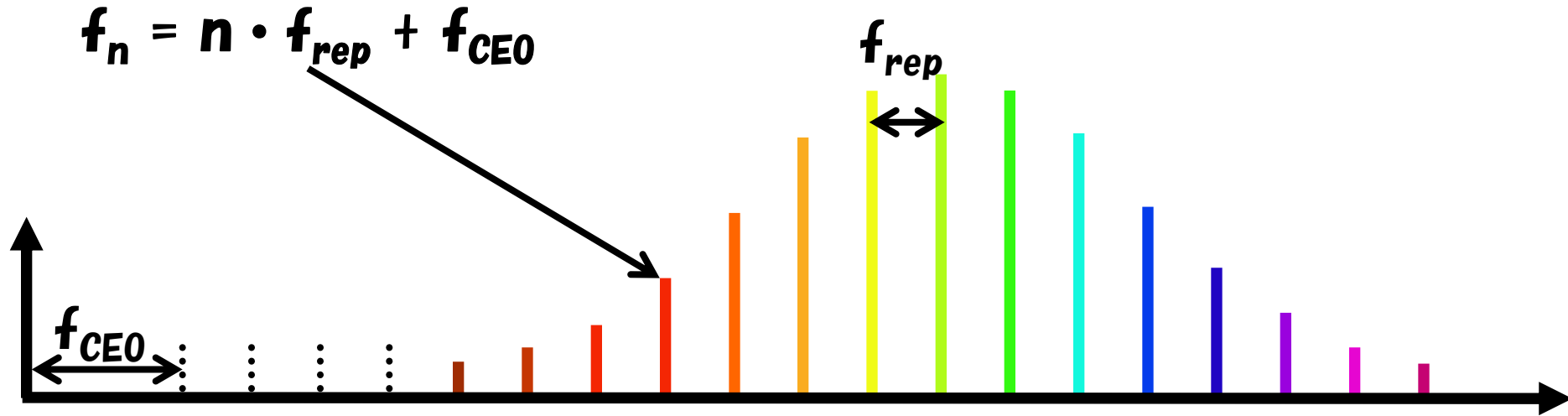
Qudsia Quraishi, Martin Griebel, Thomas Kleine-Ostmann, and Rudolf Bratschitsch

Optics Letters, Vol. 30, Issue 23, pp. 3231-3233  
(2005)



# 光周波数コムの安定化

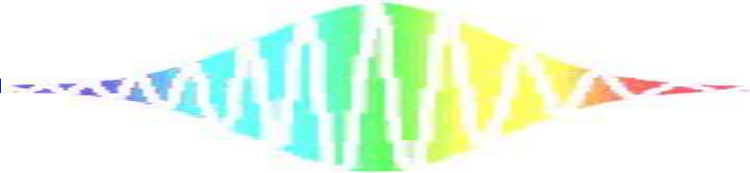
$$f_n = n \cdot f_{rep} + f_{CEO}$$



$f_{rep}$ を周波数標準に同期

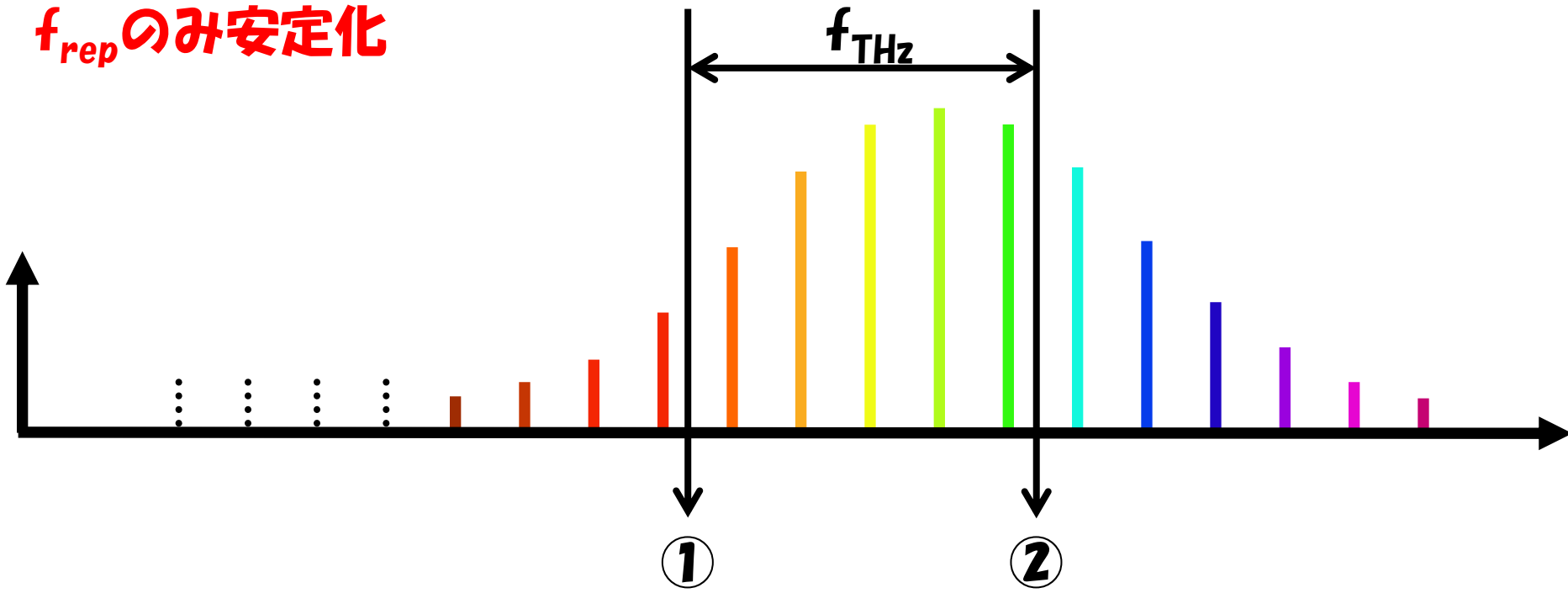
$f_{CEO}$ を周波数標準に同期

「光周波数のものさし」となる！



# 光コムを用いたTHz発生

$f_{rep}$ のみ安定化



①

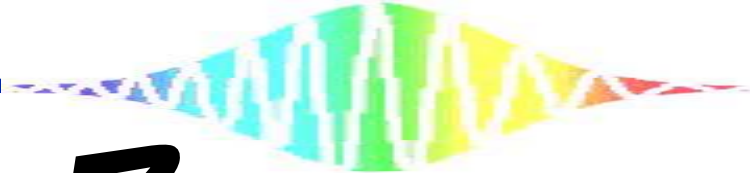
②

$$f_1 = n \cdot f_{rep} + f_{CEO} + f_{beat1}$$

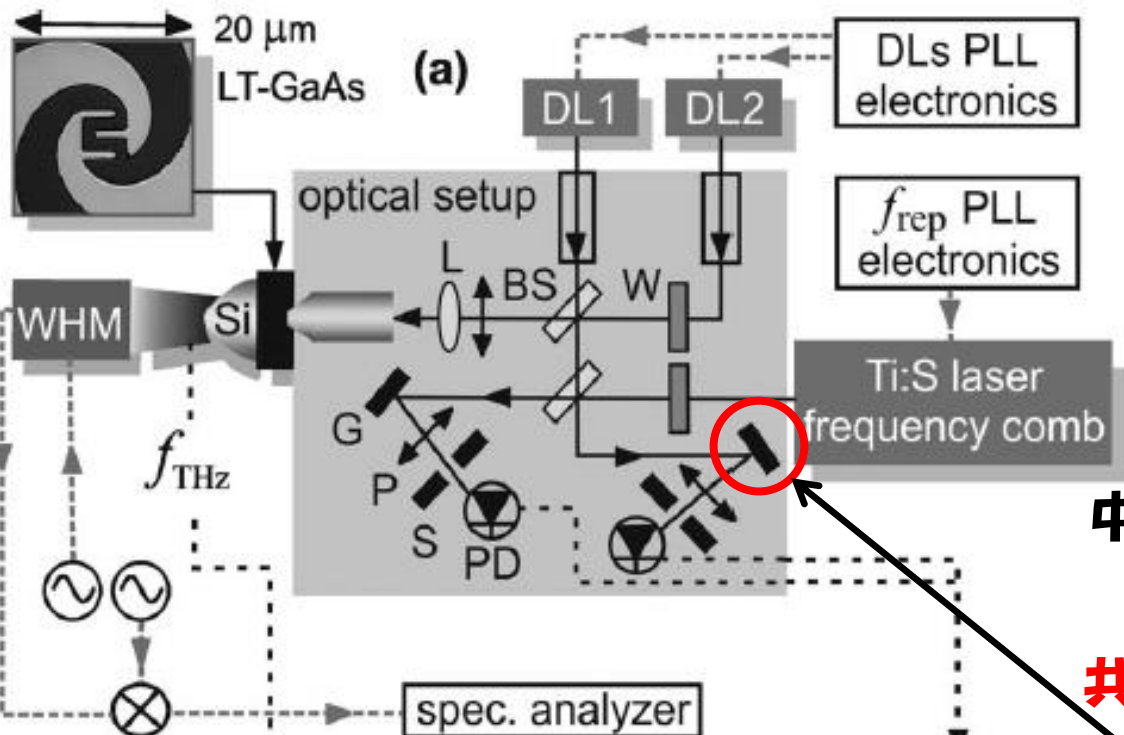
$$f_2 = m \cdot f_{rep} + f_{CEO} + f_{beat2}$$

$f_{CEO}$ の揺らぎは打ち消される!





# セットアップ



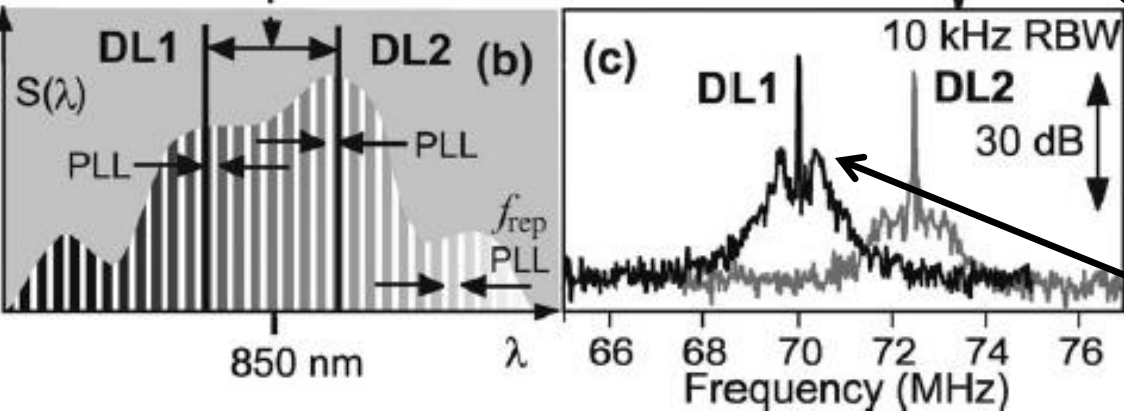
**Ti:S laser**  
 繰り返し周波数 : 92.8MHz  
 中心波長 : 850nm  
 スペクトル幅 : 65nm  
 出力 : 400mW  
**繰り返し周波数のみロック**

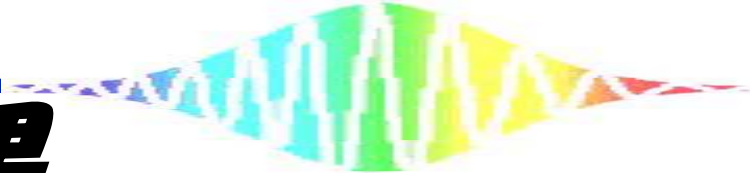
	DL1	DL2
中心波長	850nm	850nm
出力	100mW	40mW

**共振器内のグレーティングを調整**

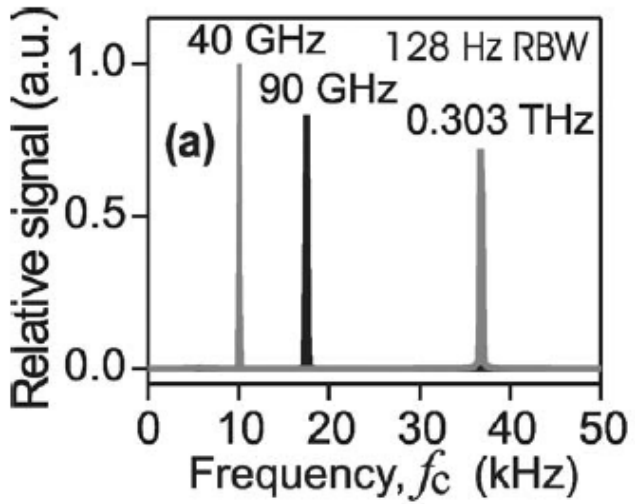
コム1本とDLのみを抜き出す  
 ★偏光により取得信号分配

PLLによるノイズ

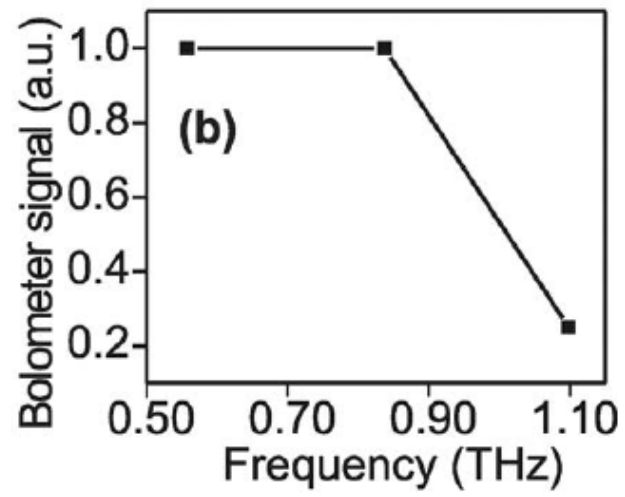




# 実験結果

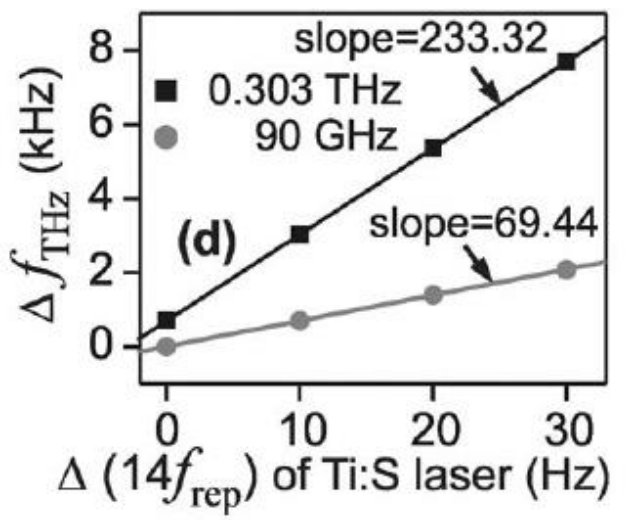
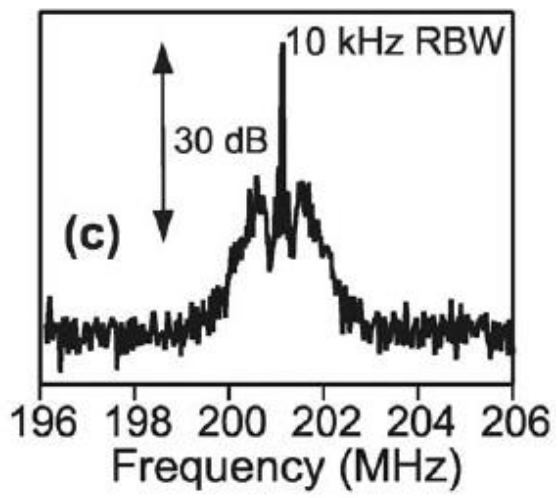


**1 nW @ 0.303 THz**  
**10 nW @ 90 GHz**  
**6 nW @ 40 GHz**



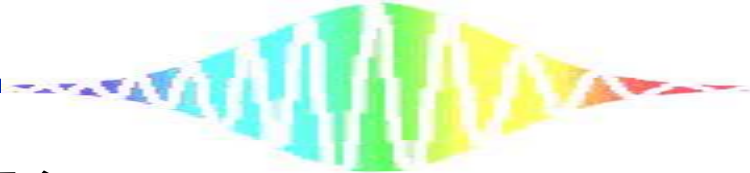
(a) シンセ高調波とのビート

(b) ボロメータによるTHz検出

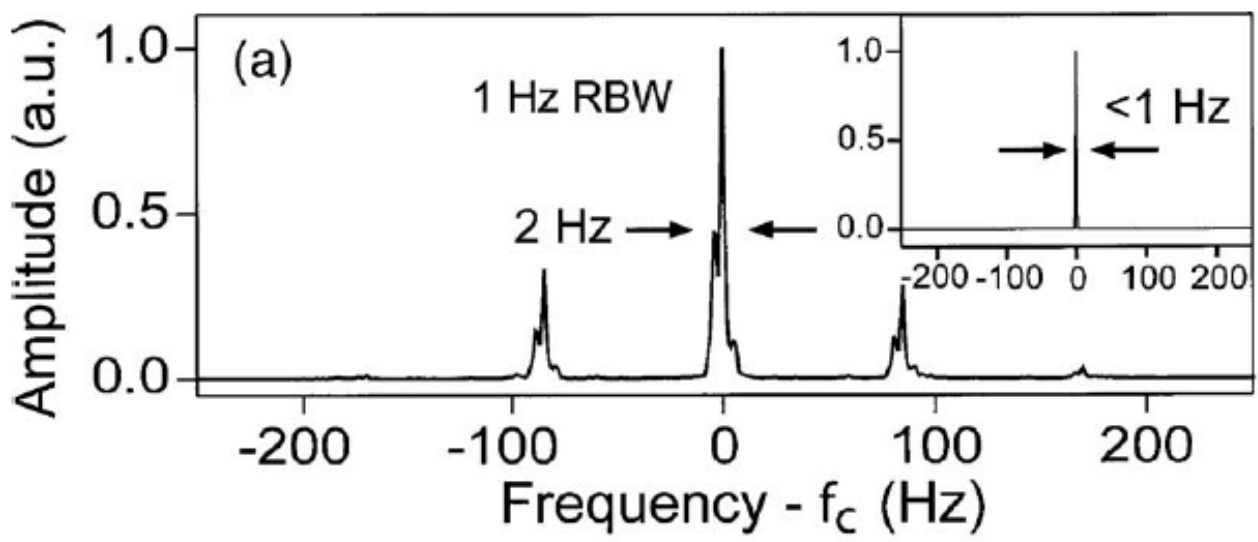


(c) 線幅特性 @ 40GHz位相同期

(d)  $f_{rep}$ 走査によるTHzチューン

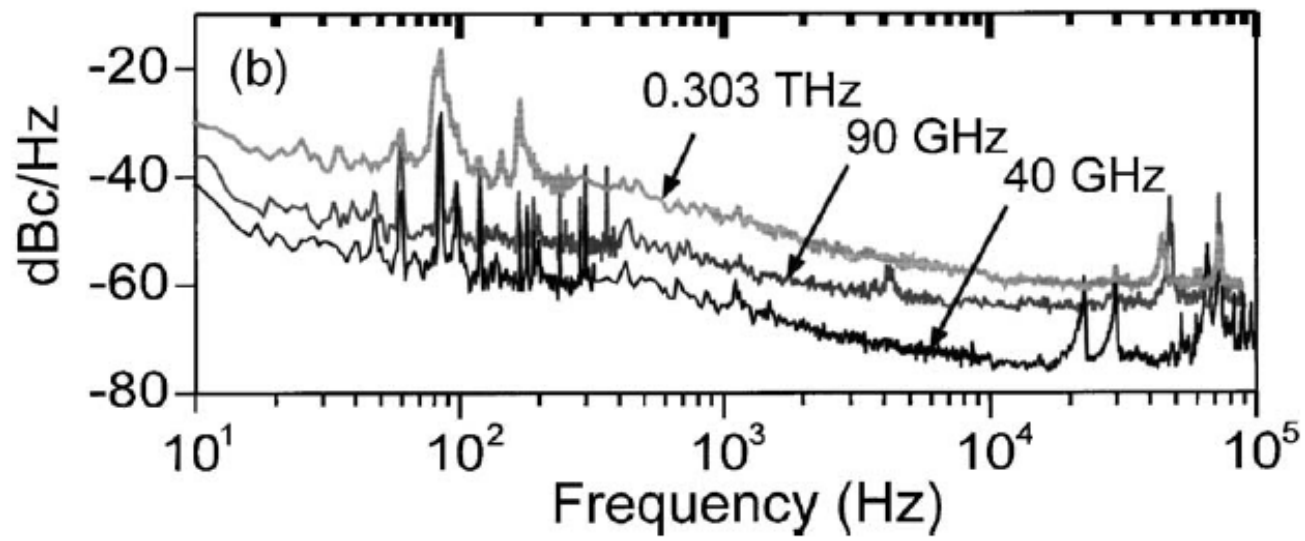


# ノイズ評価



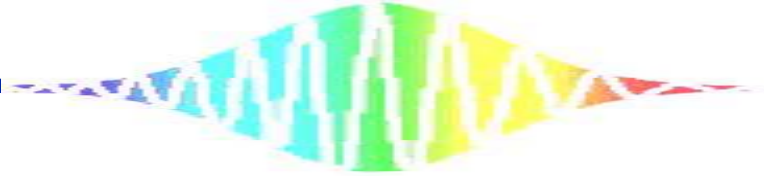
(a)  
**0.303 THz線幅評価**

共振器内ミラー可動時の  
**振動ノイズ**



(b)  
**位相&増幅ノイズ**

100Hz帯 : PLLノイズ  
10kHz帯 : 水晶ノイズ



# まとめ

● 1つの光コムに2台のCWレーザをロックさせたTHz  
シンセサイザの紹介

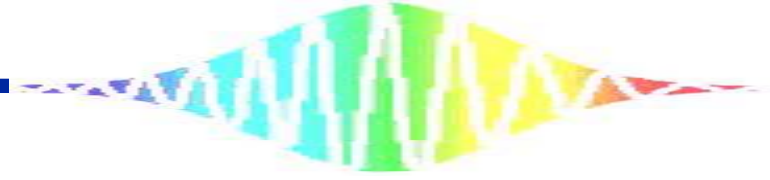
● 推定出力

1nW@0.303THz

10nW@60GHz

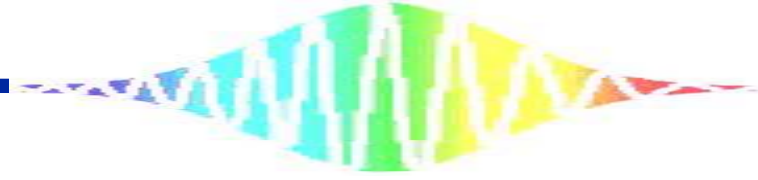
6nW@40GHz

● < 1.1THzチューニング可能



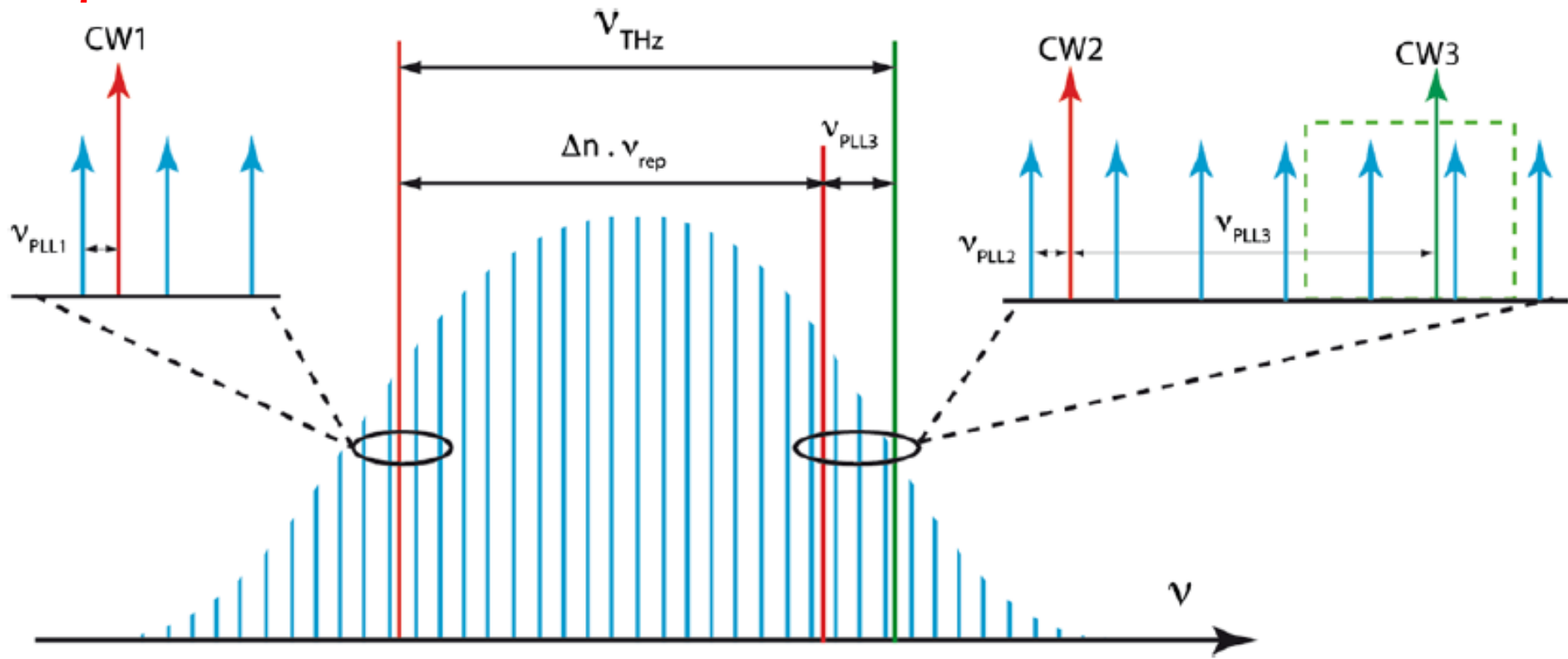
# ***Widely tunable THz synthesizer***

F. Hindle, G. Mouret, S. Eliet, M. Guinet, A. Cuisset, R. Bocquet, T. Yasui, and D. Rovera ”  
Applied Physics B, Volume 104, Issue 4, pp. 763-768 (2011)

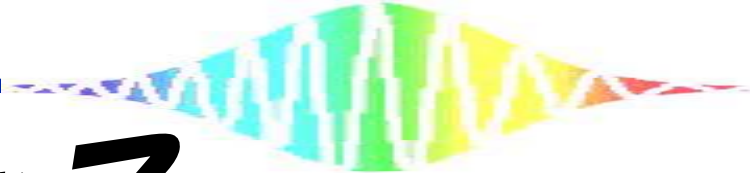


# 3台のCWレーザーを用いたTHzシンセ

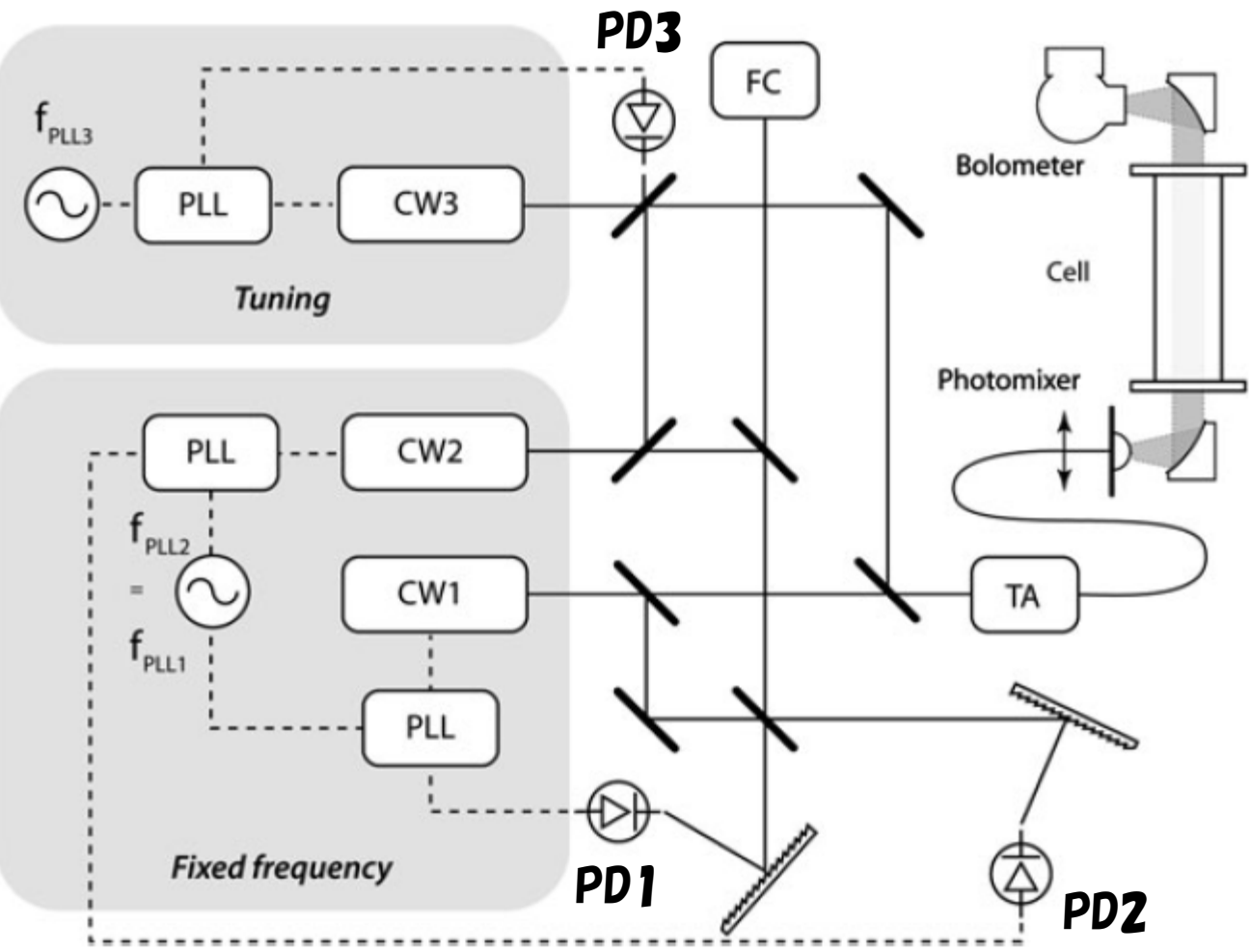
$f_{rep}$ のみ安定化



より広いテラヘルツ領域, 連続的なチューニングを可能に!



# セットアップ



**Erファイバレーザ**  
 繰り返し周波数: 100MHz  
 中心波長: 1570nm  
 スペクトル幅: 60nm  
 パルス幅: 150fs

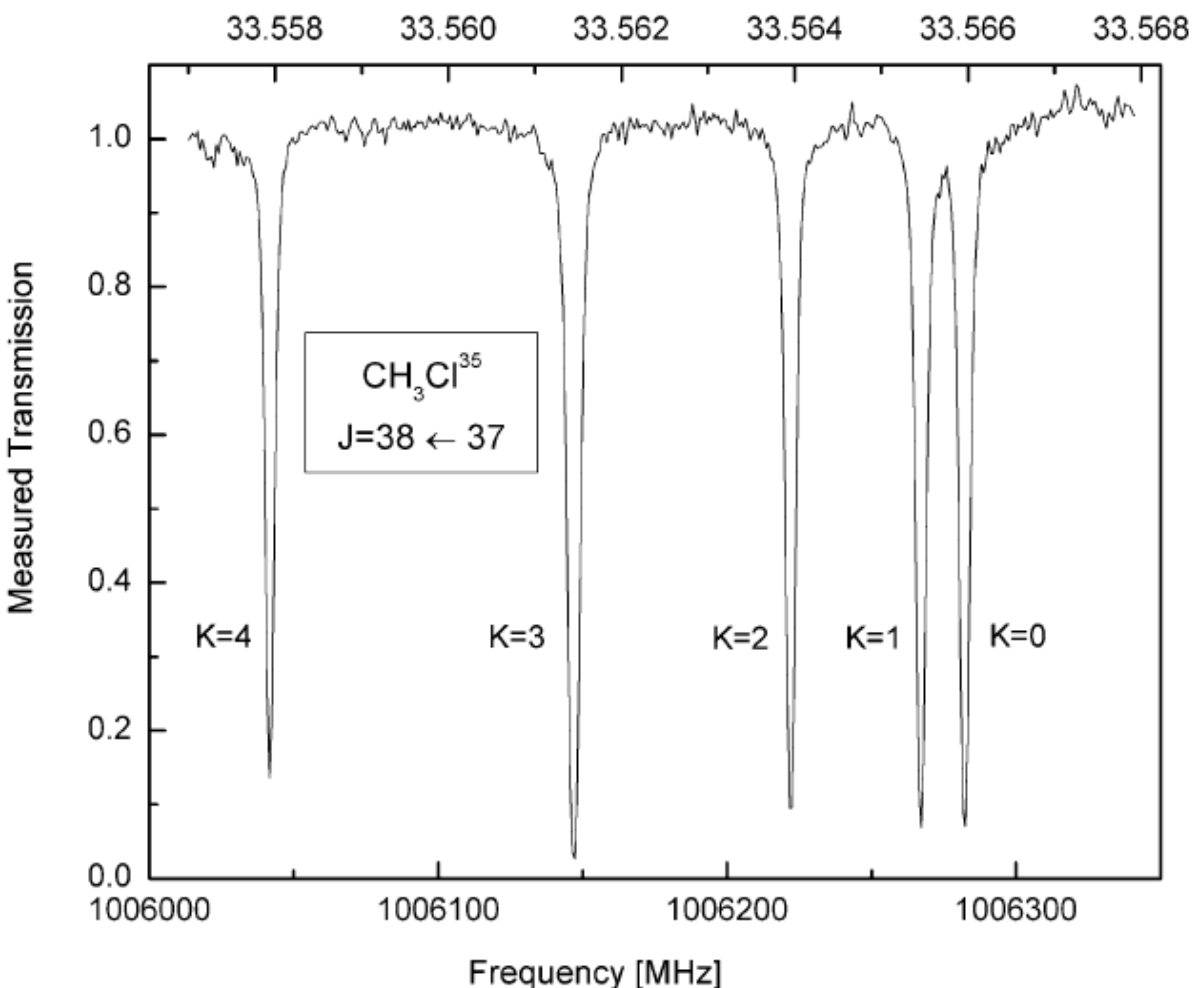
**ECLD 1, 2, 3**  
 中心波長: 780nm  
 出力: 50mW

**THz出力**  
 1 μW@0.5THz  
 100nW@1THz  
 80pW@3THz  
 連続チューニング  
 50 ~ 375MHz

# CH<sub>3</sub>Clの吸収スペクトル

CH<sub>3</sub>Cl(クロロメタン) = 温室効果ガス

Wavenumber [cm<sup>-1</sup>]



セルパス長: 65cm

7.8Pa, 293Kにおける

主量子数: J = 38 ← 37

主軸投影: 0 ≤ K ≤ 4

分解能: 800kHz

測定時間: 5分

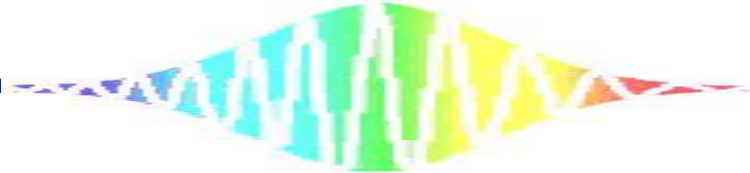
JPLデータベースとの比較

ピーク誤差: < 100kHz

市販フーリエ変換分光計

分解能: 300MHz





# エタノール&メタノール

Wavenumber [cm<sup>-1</sup>]

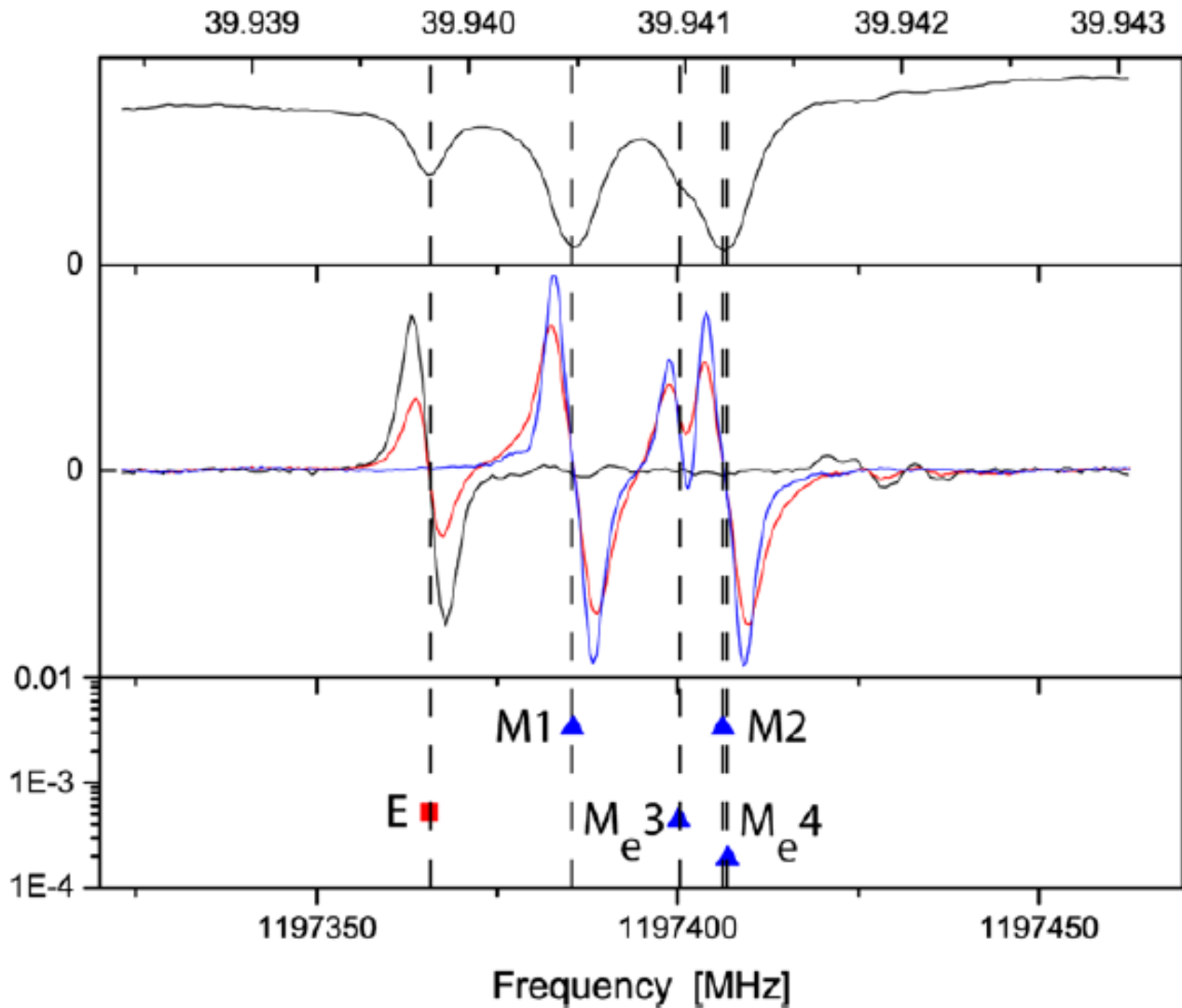
セルパス長: 4.24m  
294Kにおける

エタノール(10Pa)  
メタノール(5Pa)

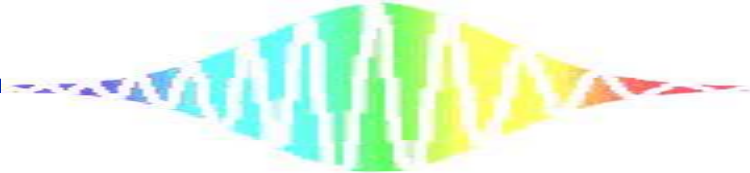
AM signal

FM signal

I [nm<sup>2</sup>MHz]

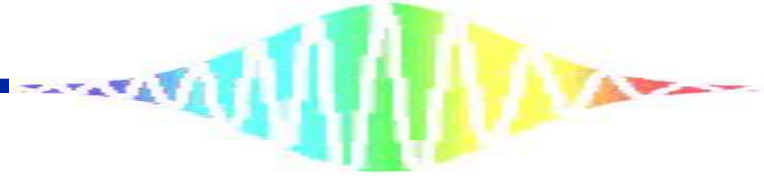


黒: エタノール(5Pa)  
青: メタノール(5Pa)  
赤: エタノール(7Pa)  
メタノール(5Pa)



## まとめ

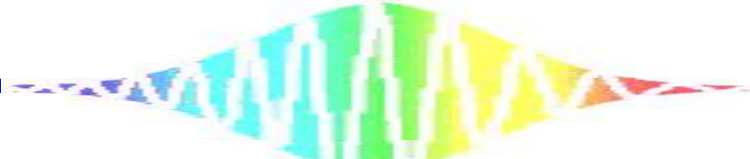
- 3台のECLDと光コムを用いたTHzシンセサイザ
- 広いテラヘルツ領域可変 & 連続チューニングレンジ: 50 ~ 375MHz
- 推定出力
  - 1  $\mu$ W@0.5THz
  - 100nW@1THz
  - 80pW@3THz
- ガス分光において分解能: 800kHzを実現
  - ※ 市販フーリエ変換分光計: 300MHz



***Widely Tunable 1.55- $\mu\text{m}$  Detuned  
Dual-Mode Laser. Diode for  
Compact Continuous-Wave THz  
Emitter***

Namje Kim, Young Ahn Leem, Hyunsung Ko, Min  
Yong Jeon, Chul Wook Lee, Sang-Pil Han,  
Donghun Lee, and Kyung Hyun Park

ETRI Journal, Volume 33, Number 5, pp. 810-813  
(2011)



# 波長可変DMLデバイス構造

DML : Dual - Mode Laser diode

DFBレーザ × 2

単一波長発振動作

温度により波長変化

フェイズセクション



逆方向バイアス

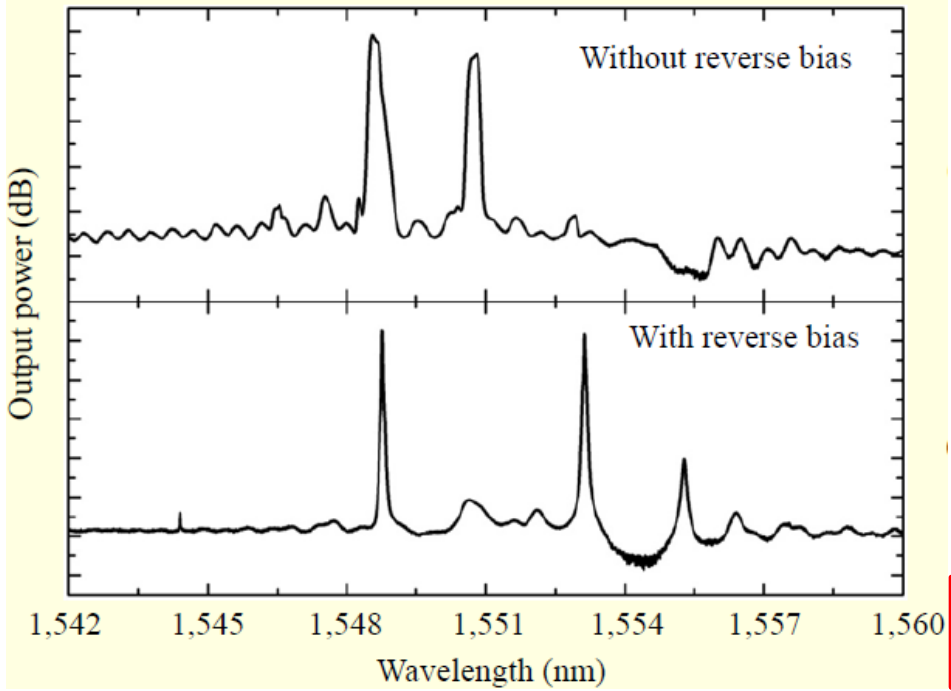
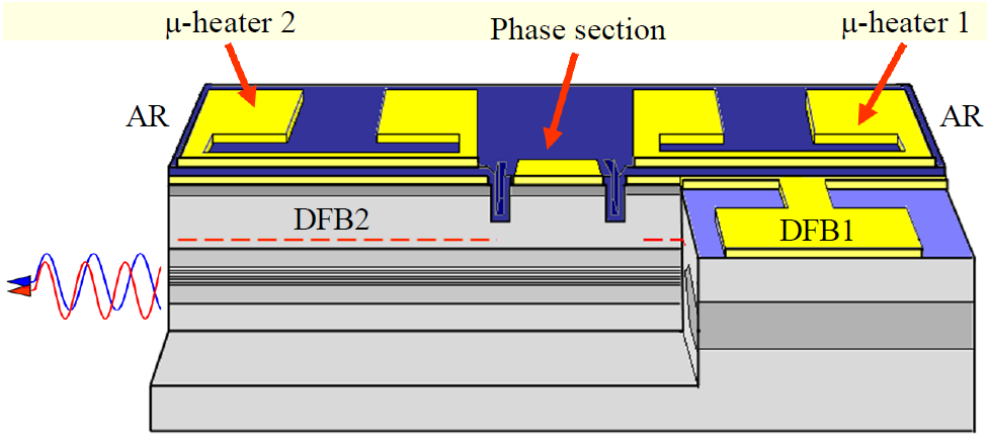


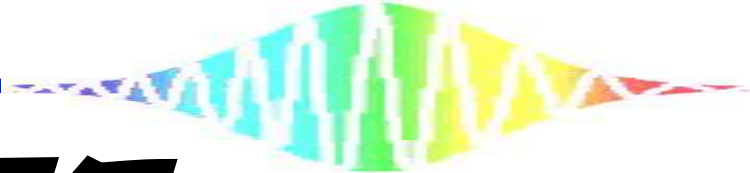
過飽和吸収体の働き



狭窄化

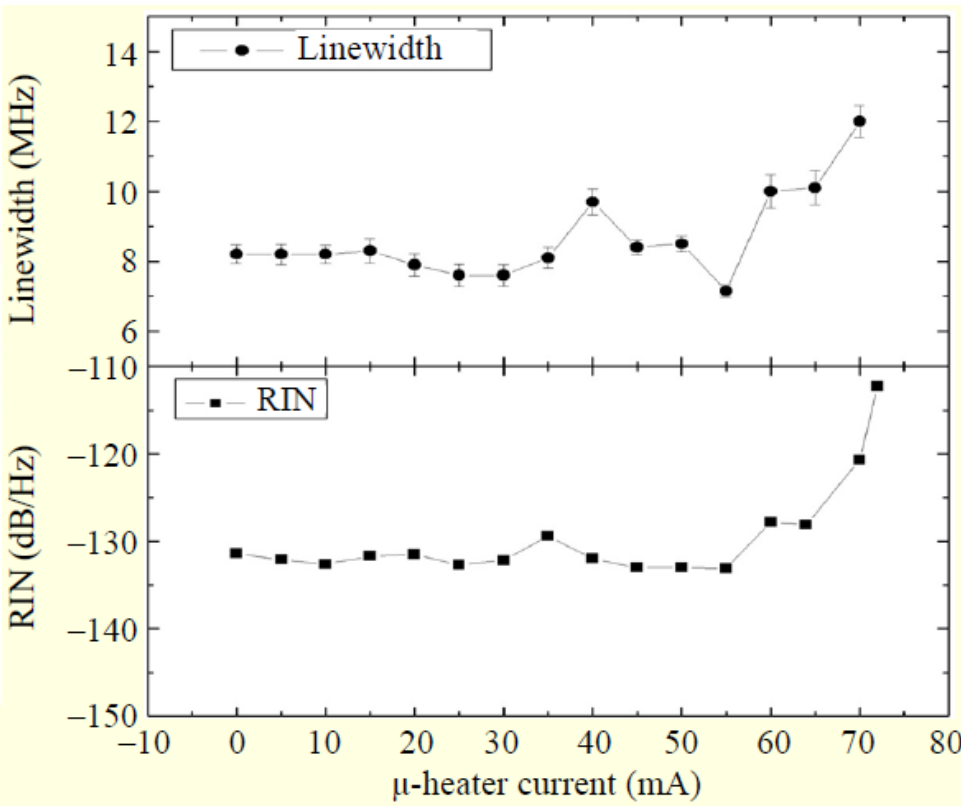
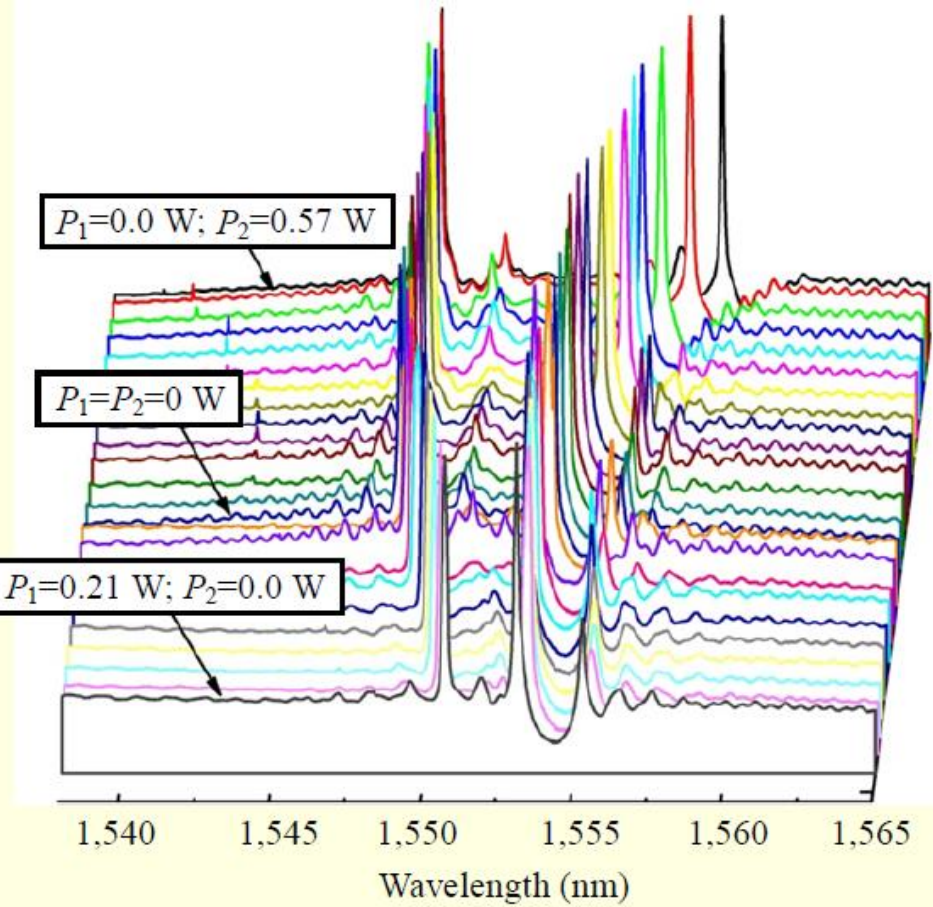
同一共振器 : 同様に揺らぐ





# DML特性評価

市販DFBレーザー線幅：3MHz



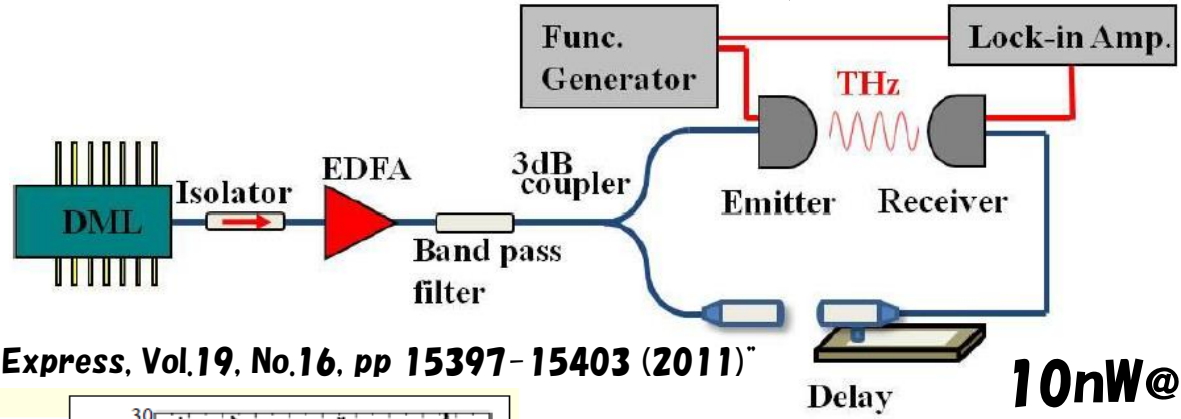
DFB1, 2波長変化

2.4 ~ 9.3nm (0.3 ~ 1.15THz)

DFB2における (上) 線幅評価  
(下) 相対強度ノイズ

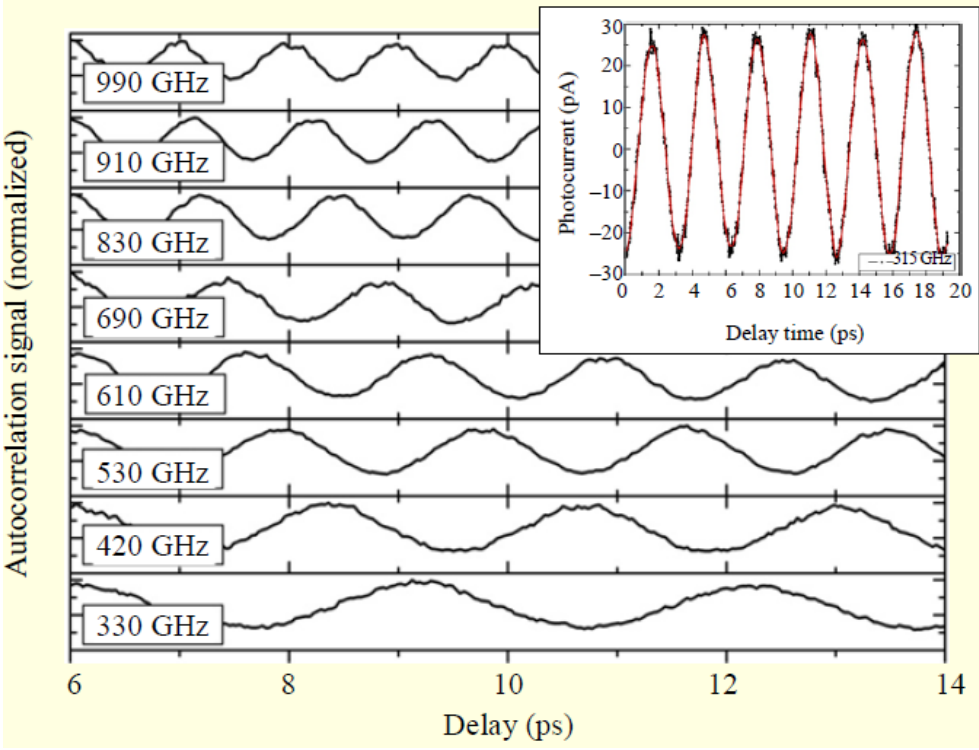
40mA付近：EDFAのASE

# セツアツ

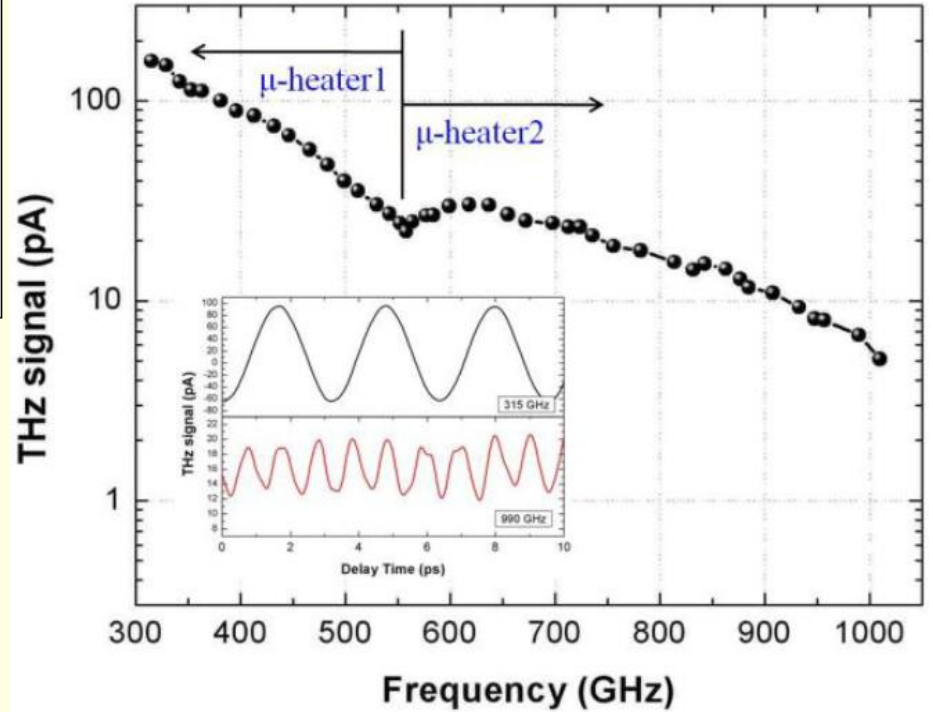


引用: "Namje Kim et al., *Optics Express*, Vol.19, No.16, pp 15397-15403 (2011)"

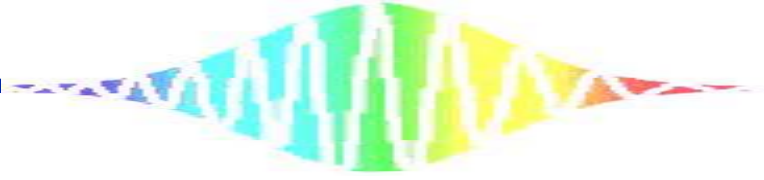
**10nW@0.315THz**



自己相関トレースTHz波形

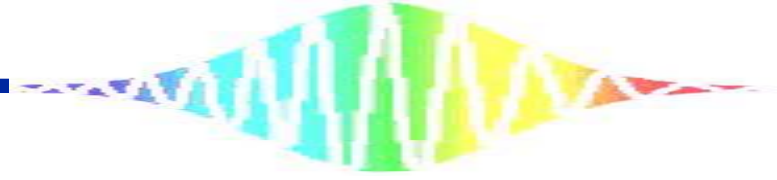


チューニング特性



# まとめ

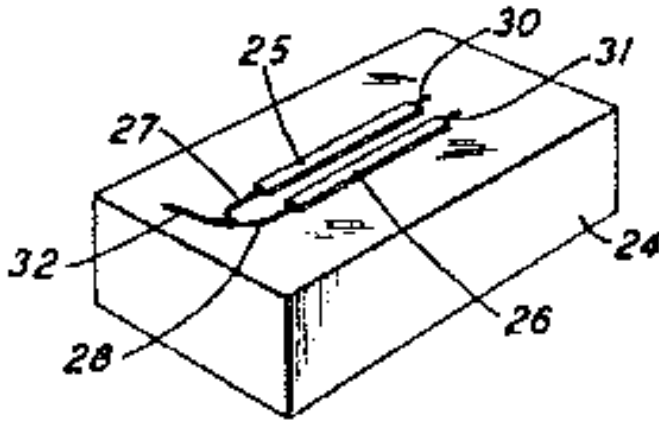
- 2台のDFBLレーザを1つのデバイスDMLへ
- コンパクト&ロバストなTHz光源
- 偏光&レーザの揺らぎを気にしなくて良い
- 推定出力  
10nW@0.315THz
- カタログスペック上のチューニング範囲  
0.3THz~1.15THz
- ※ただし、光コムTHzシンセと比べ連続的ではない





# ボロメータ

抵抗の温度変化率が大いサーミスタ



24：石英基板 25、26：金属酸化物抵抗体  
27、28、30、31：電極  
(米国特許 2,414,792)

**ボロメータ：電磁波を検出する素子であり、温度の上昇を測定。**

**如何なる周波数、波長の電磁波に対しても感度が一定である。**

**※絶対零度付近まで冷却する事によって真価を発揮する。**

**非冷却マイクロボロメータ仕様の遠赤外線カメラ：赤外線が酸化バナジウム等の感熱素子に照射されて温度が変化し、抵抗値が変化するのでそれを検出し、撮像する。**



# スペクトル広がり①

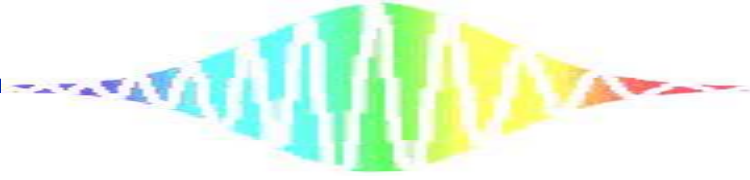
●自然広がり:不確定性原理は励起状態の寿命とエネルギーの揺らぎを関係づける。自然広がりには周波数シフトを伴わないローレンツ型のスペクトル分布をもたらす。

●熱ドップラー広がり:気体中の原子は、ある速度分布を持っている。原子から放出される光子は、ドップラー効果により原子と観測者の相対速度に依存して周波数がシフトする。気体の温度が高いほど、気体分子の速度分布は広くなる。スペクトル線は放出された多数の光子のスペクトルの重ね合わせとなるため、高温の気体であるほど、放出される光子のスペクトル線は広くなる。この効果による広がりには、中心周波数シフトを伴わないガウス型の広がりスペクトルをもたらす。

●圧力による広がり:光子を放出する気体分子の近くに他の気体分子が存在すると、放射される電場が変化する。これが発生する2つの制約状況がある

○衝突によるスペクトル広がり:他の気体分子との衝突により、光子放出過程が妨げられる。衝突は放出過程よりもはるかに短い時間で生じる。この効果は気体の密度と温度の両方に依存する。衝突によるスペクトル広がりにはローレンツ関数型となり、中心周波数シフトを伴うことがある。

○準定常的な圧力によるスペクトル広がり:近くに存在する他の粒子がもたらす摂動により粒子のエネルギーレベルが変化し、そのため放出される光子の周波数が変化する。この効果は、光子放出過程より長い時間持続する。ガスの密度には依存するが、温度にはあまり依存しない。スペクトル線の形状は、摂動力が距離にどう依存するかによって決定される。中心周波数シフトを伴うこともある。



# スペクトル広がり②

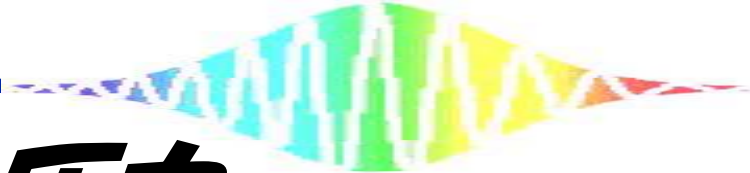
●圧力広がり、摂動力の性質により以下のように分類することもできる

○線形シュタルク広がり: 一次のシュタルク効果によって生じる。それは光放出する粒子と電場の相互作用に起因するものである。

○共鳴広がり: 摂動を及ぼす粒子が光子を放出する粒子と同じ種類のものである場合に生じ得るエネルギー交換過程に起因する。

○2次シュタルク広がり: 2次のシュタルク効果に起因する。線形シュタルク効果と同様、粒子と電場の相互作用の結果であり、電場の2乗に比例する中心周波数シフトをもたらす。

○ファンデルワールス広がり: 光放出を行う粒子がファンデルワールス力の摂動を受けている場合に生じる。準静的な場合には、ファンデルワールス力で線幅広がりを記述できる場合が多い。



# 混合気体の圧力

1 atm = 101325 Pa

全圧……………混合気体の圧力

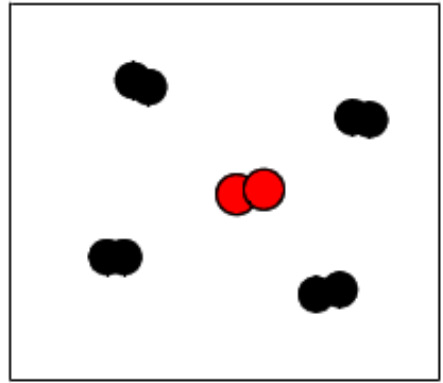
分圧……………一つの成分気体だけを、混合気体と同温、同体積にしたときに示す圧力

全圧 = 分圧の和

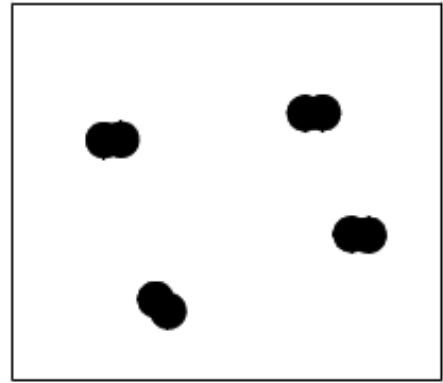
$$P = P_A + P_B + P_C + \dots$$

例) 空気

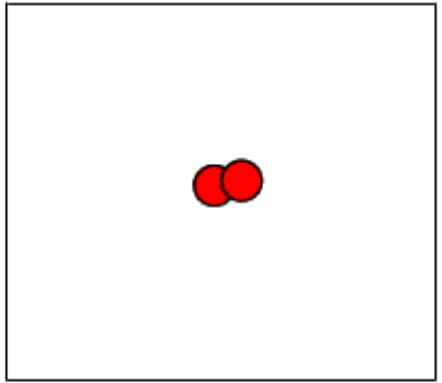
空気



窒素 N<sub>2</sub>



酸素 O<sub>2</sub>



$$\begin{aligned}
 5 \text{ atm} &= ( 4 ) \text{ atm} + ( 1 ) \text{ atm} \\
 1 \text{ atm} &= ( 0.8 ) \text{ atm} + ( 0.2 ) \text{ atm}
 \end{aligned}$$