

共鳴トンネルダイオードによる テラヘルツ信号源とその応用

東京工業大学

鈴木左文

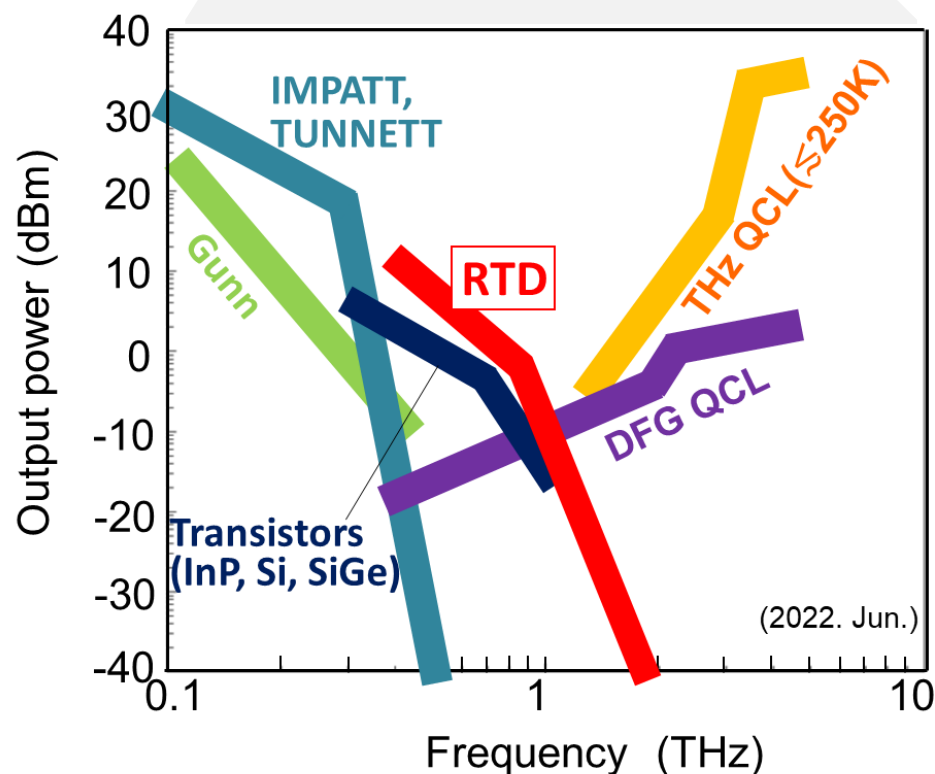


光源は様々なTHz応用のキーデバイス

マイクロ波・ミリ波 THz帯 赤外 可視
10GHz 100GHz 1THz 10THz 100THz

THz Gap

単体半導体THz光源の現状



▶ 量子カスケードレーザ (QCL)

- THz-QCL, 4THz, 250K (Khalatpour, *et al*, 2021)
- DFG-QCL, 0.4-6 THz, RT (Fujita, *et al*, 2022)

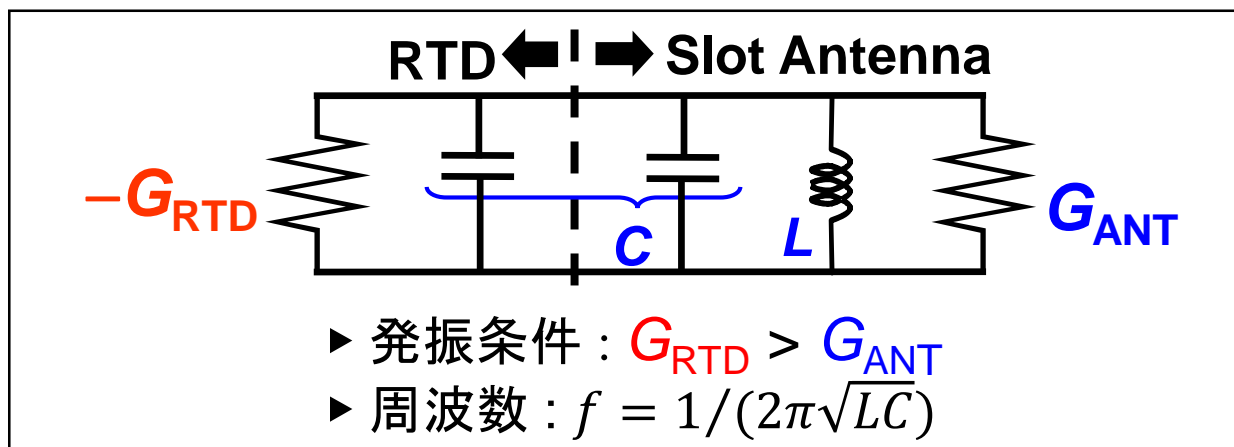
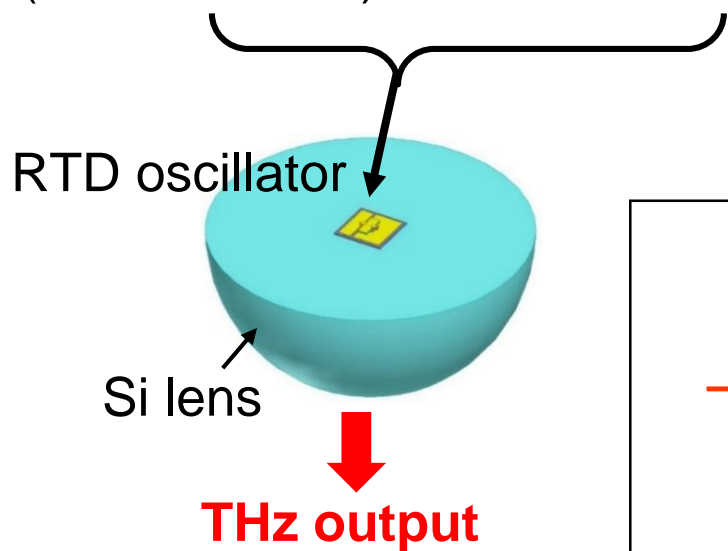
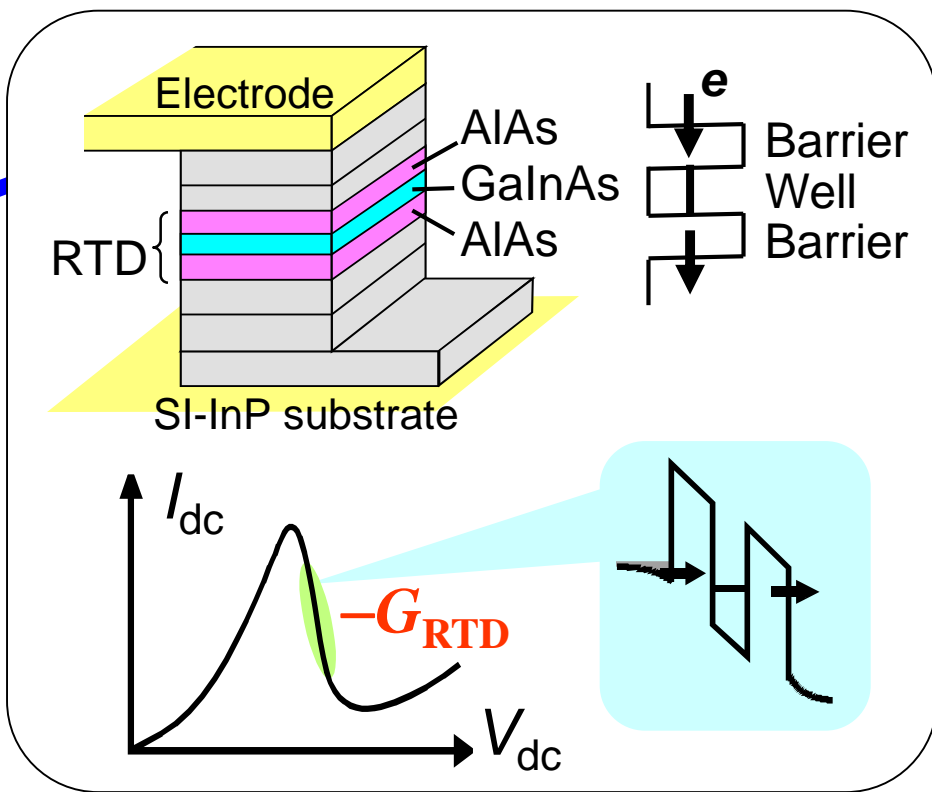
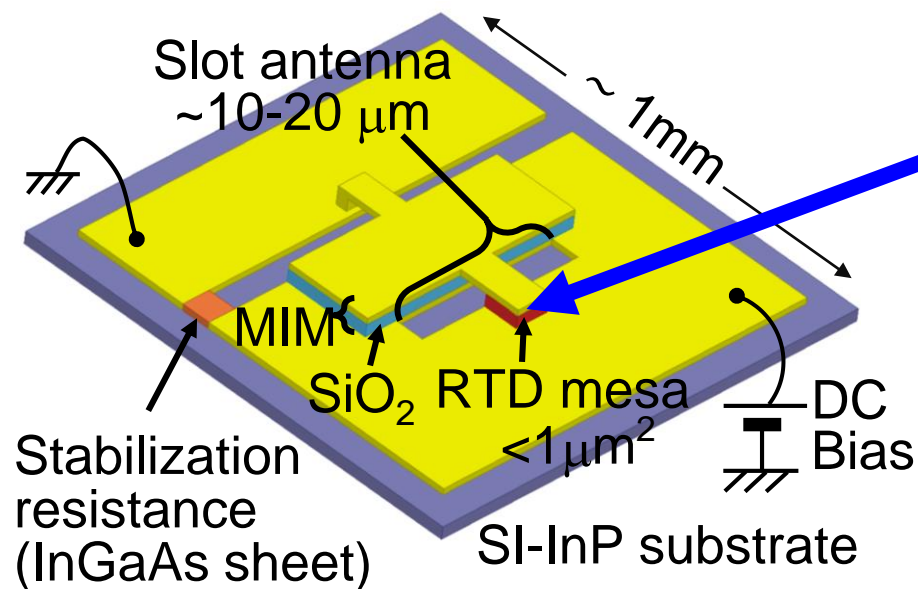
▶ トランジスタ (HBT, HEMT, CMOS)

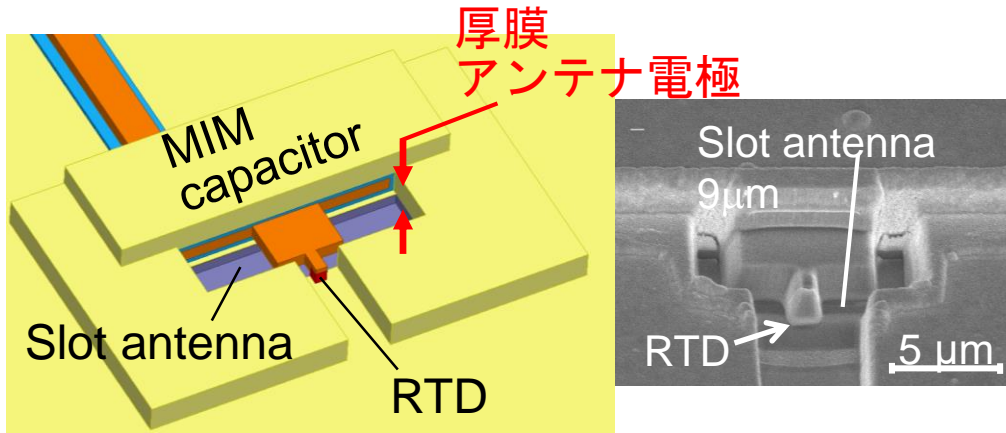
- InP-HBT, 688GHz (Urteaga, *et al*, 2017)
- SiGe BiCMOS
1mW@530GHz 16el. (Pfeiffer, *et al*, 2014)
80 μ W@1THz 42el. (Hu, *et al*, 2018)
- Si CMOS
0.5mW@700GHz 32el. (Gao, *et al*, 2022)
8mW@280GHz 30el. (Buadana, *et al*, 2020)

▶ 共鳴トンネルダイオード (RTD)

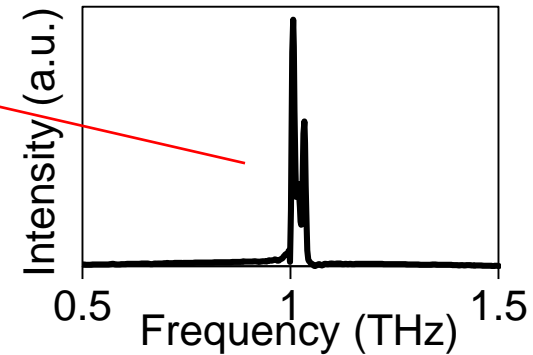
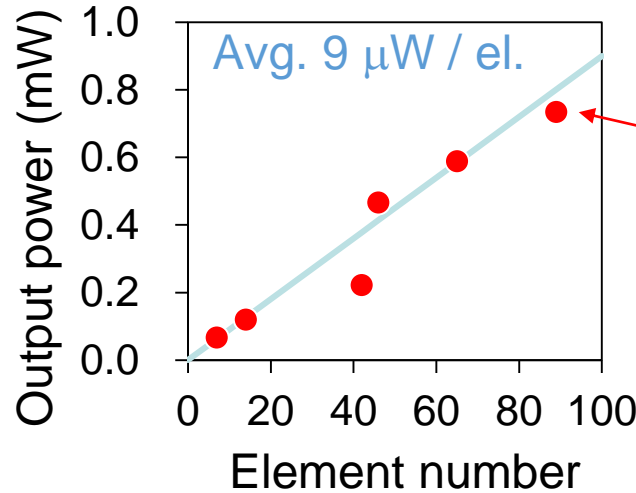
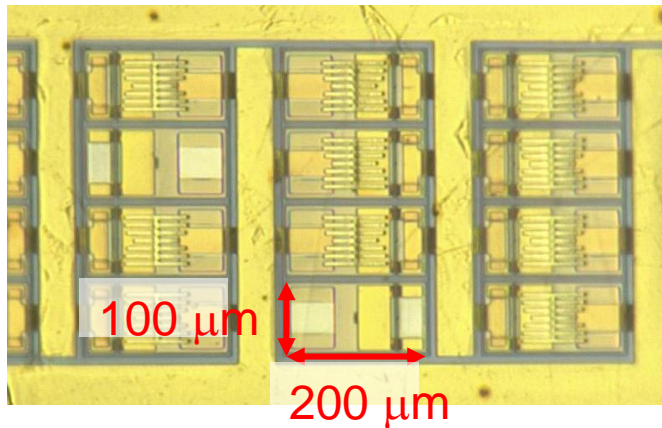
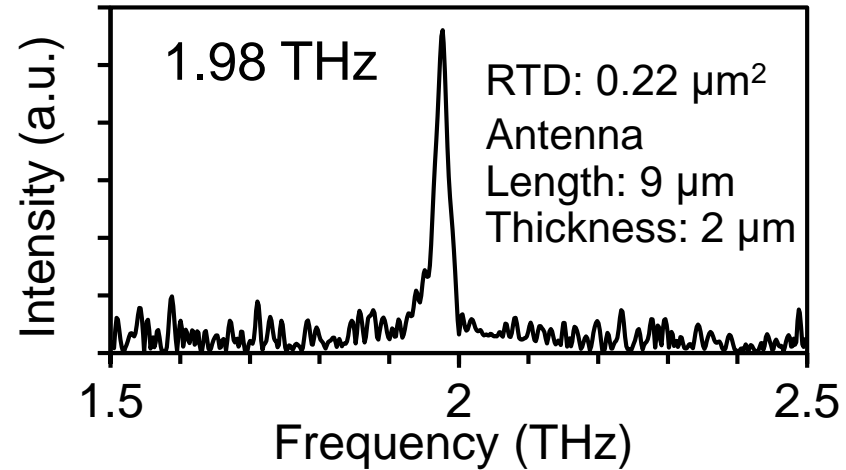
- 1.98THz (Izumi, *et al.*, 2017)
- 0.73mW @1THz, 89素子インコヒーレント (Kasagi, *et al*, 2019)
- 11.8mW @0.45THz, 36素子コヒーレント (Koyama, *et al*, 2022)

RTD発振器の従来構造





(Izumi, *et al*, AIP Advance, **9**, 085020, 2019)



(Kasagi, *et al*, JAP, **125**, 151601, 2019)

- ▶ アンテナ電極の厚膜化による損失低減 → 1.98THz発振 (室温単体デバイスで最高)
- ▶ 高密度・多素子アレイによる出力合成 → 0.73mW@1THz (ただしインコヒーレント)

- 高周波発振: 高電流密度RTD+アンテナ構造最適化による~2THz発振
- 高出力発振: 単体0.42mW@550GHz、大規模アレイ 0.73mW@1THz
- 効率: DC-RF効率 ~0.1-1%(ほとんど安定化抵抗で消費)
- 動作温度: 10-400Kで動作、温度による周波数変化は~1-2%以内
- 寿命: 少なくとも半年以上
- 周波数可変: RTDバイアス変化~1-5%、バラクタ集積>10%
- 線幅: フリーラン~10MHz、PLL<1Hz
- 変調特性: ~30GHz高速直接変調(MIMキャパシタ等の外部回路が制限)
- 放射: RLSA集積円偏波放射、テーパードスロット集積水平方向放射など
- 無線通信: シングルチャネル44Gbps@650GHz、2チャネル56Gbps
- 分光分析: 周波数可変素子アレイによる420-900GHz分光分析
- レーダー: サブキャリア方式レーダー<1mm精度測距



- 共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ信号源開発
 - 空洞共振器構造による高周波・高出力化
 - 構造簡略化による作製プロセス工程の削減
 - 注入同期現象を利用した新展開
- 共鳴トンネルダイオード信号源を用いたテラヘルツ応用
 - 無線通信応用
 - イメージング・レーダー応用

円筒空洞共振器集積構造

Bow-tie antenna

DC Bias

Resistor for stabilization

Cavity resonator

RTD

Si-InP

SiO₂

MIM capacitor

Cavity

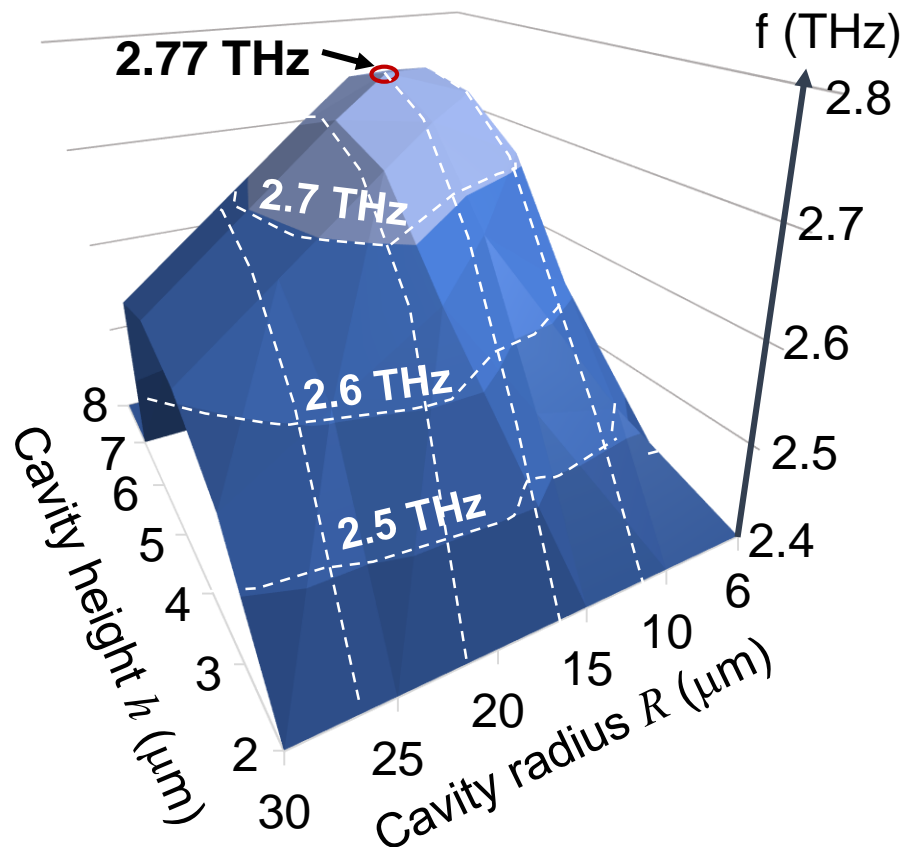
R

h

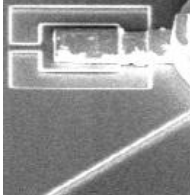
RTD

SiO₂

Bow-tie antenna

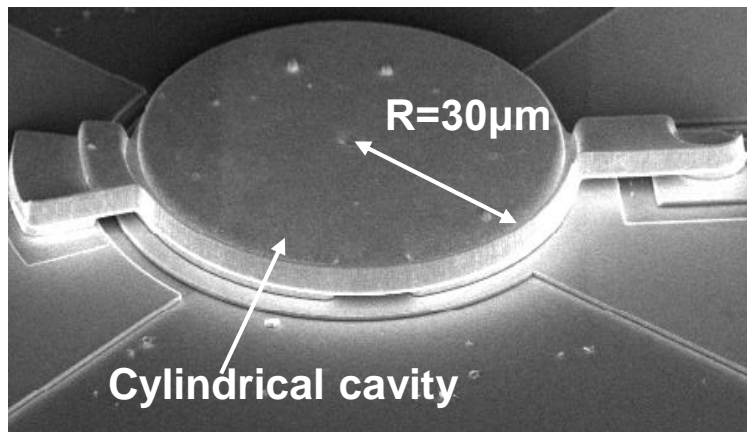


Bow-tie antenna

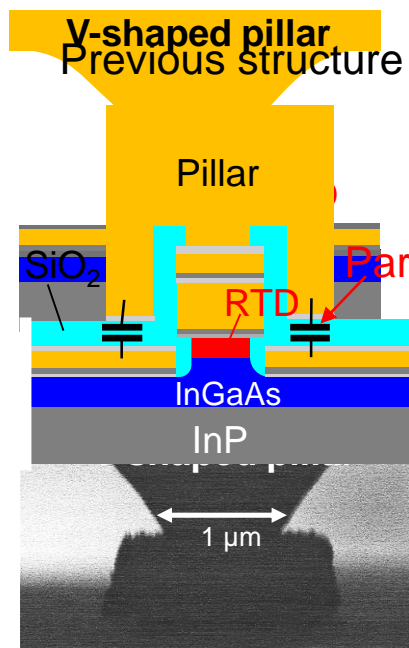


- ▶ 低損失、低インダクタンスの円筒空洞共振器構造
- ▶ 構造最適化により約2.8 THzまで発振可能

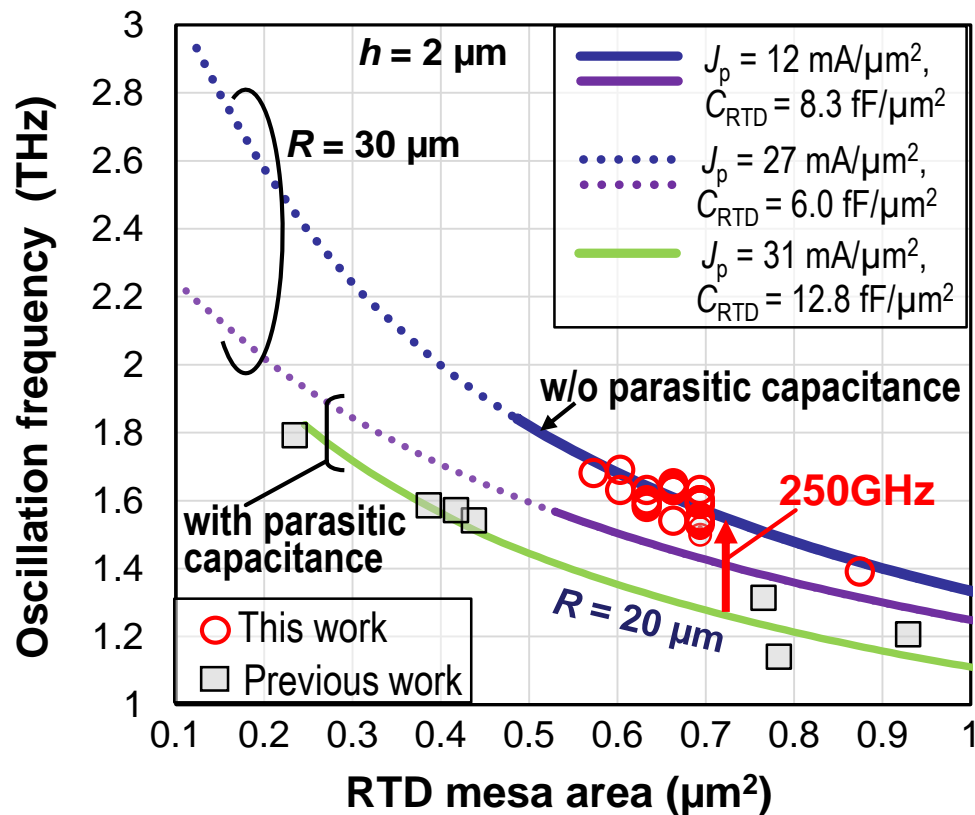
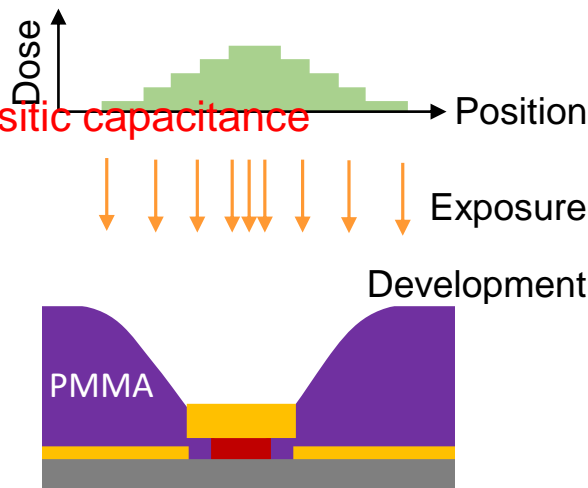
円筒形空洞共振器構造の作製



共振器上部とメサを接続するピラーの形成



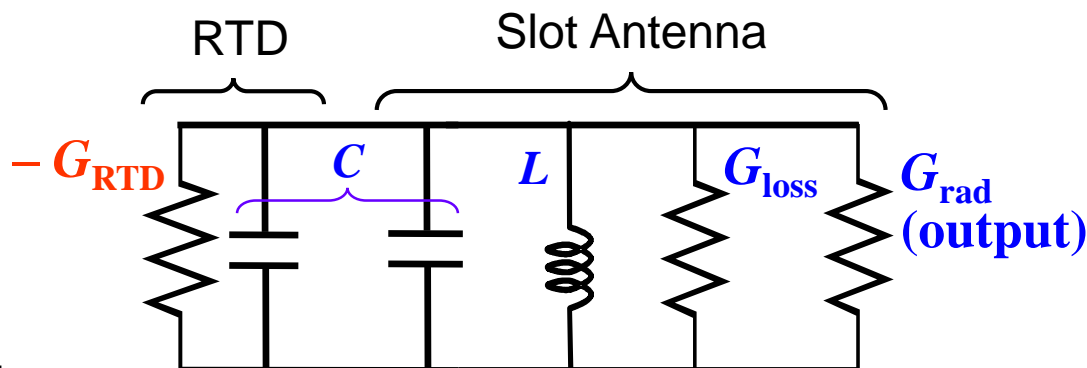
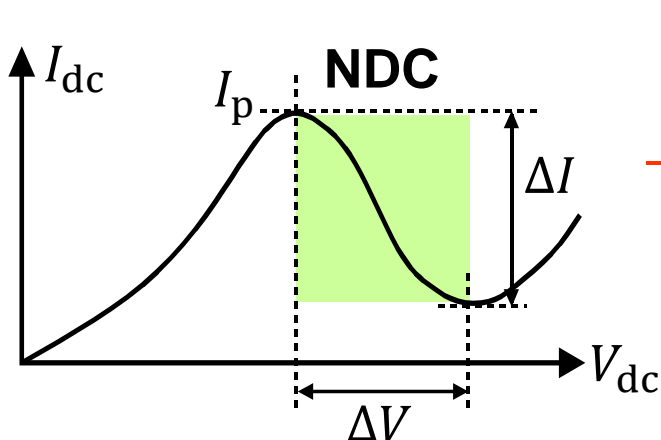
Grey-tone
(dose-modulated)
EB lithography



- ▶ グレートーン露光によるV型ピラー構造形成と寄生容量削減
- ▶ 同じ面積で比較した際に約250GHzの周波数向上を達成
- ▶ 微細メサにより>2 THz発振が可能

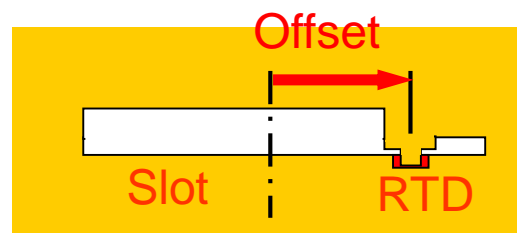
- ▶ RTD発振器の出力は通常 $\sim 10\mu\text{W}$ \Rightarrow 構造最適化により高出力化が可能
- ▶ アンテナとの整合による理論的な最大出力:

$$P_{\max} = \frac{3}{16} \Delta I \Delta V \cdot \left(1 - \frac{G_{\text{loss}}}{G_{\text{RTD}}}\right)^2 > 1 \text{ mW} \quad @ \quad G_{\text{rad}} = \frac{1}{2} (G_{\text{RTD}} - G_{\text{loss}})$$



高出力化の方法 :

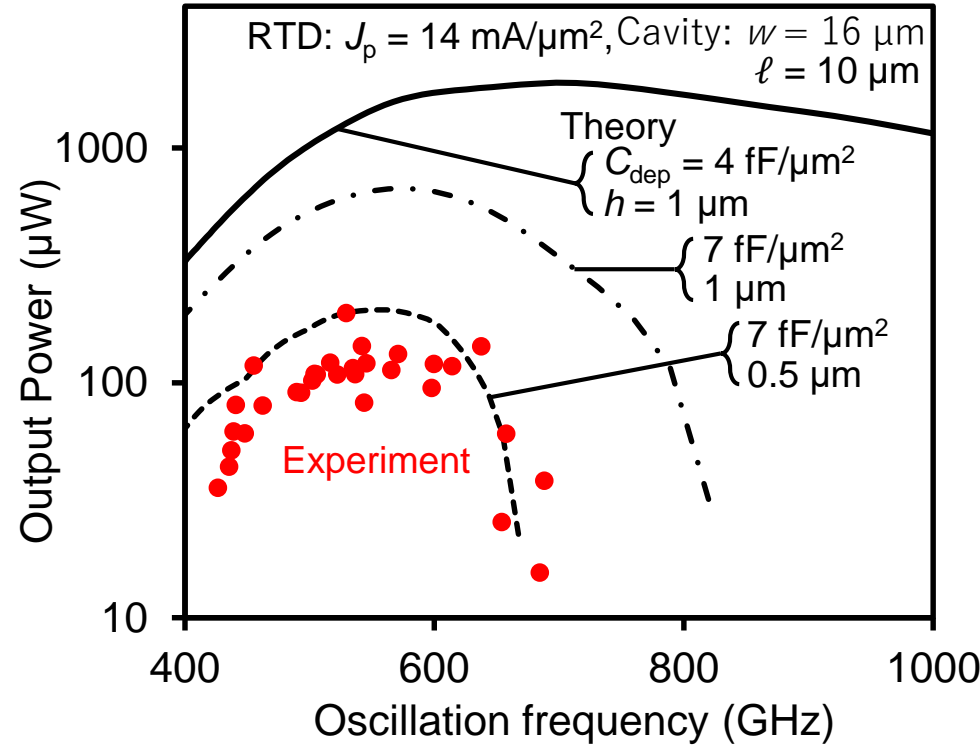
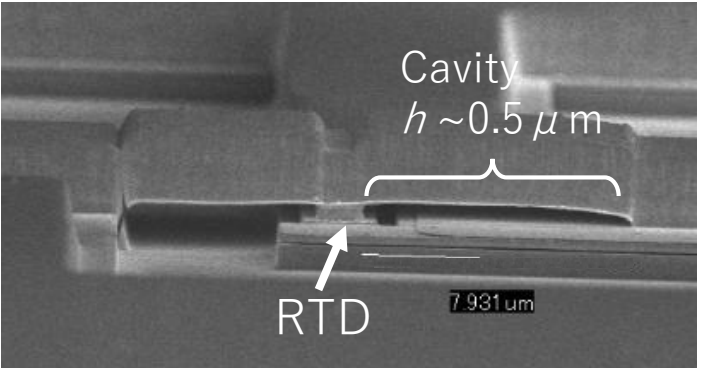
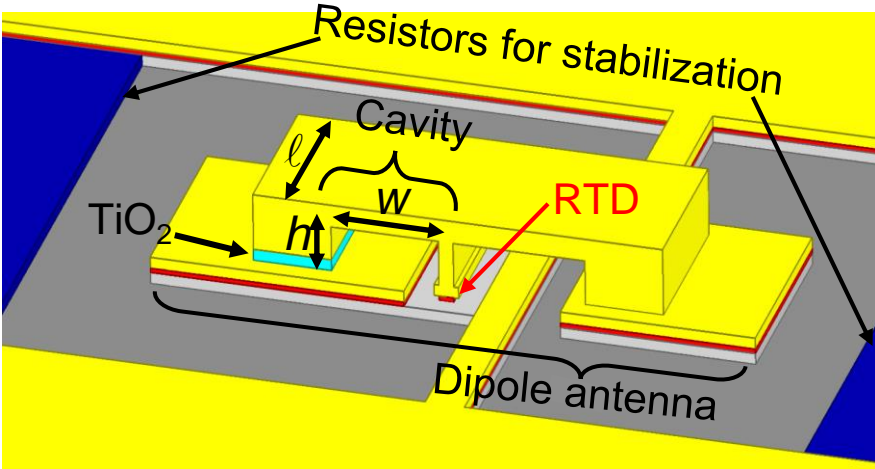
- ▶ G_{rad} のマッチング
- ▶ G_{loss} (主に導体損失) の低減
- ▶ ΔI と ΔV の増加
- ▶ 発振器アレイによる出力合成



0.42mW@550 GHz

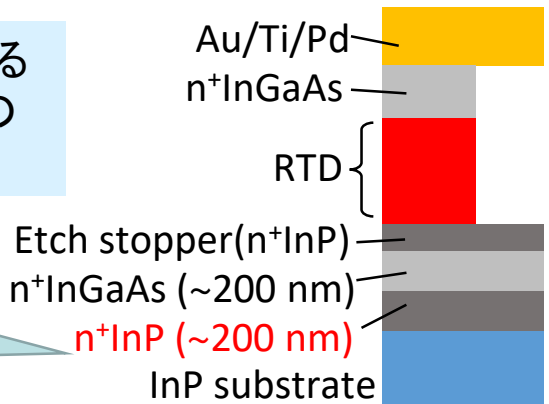
(Shiraishi, et al, APEX 4, 064101, 2011)

高出力のための矩形空洞共振器構造



大面積・大電流による熱破壊防止のための放熱改善の構造

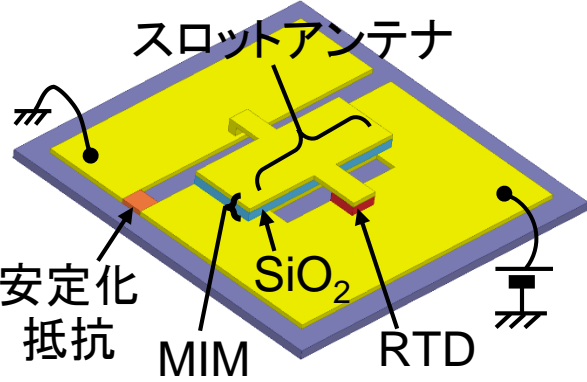
高热伝導 InP 導電層の導入



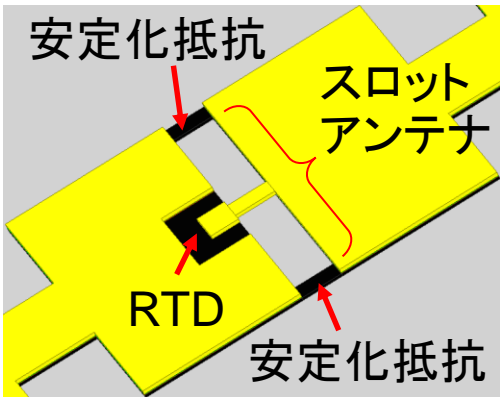
- ▶ 大面積RTD ($\sim 10 \mu\text{m}^2$)でも熱破壊なしで動作。 $\sim 200 \mu\text{W}$ @500GHz
- ▶ 理論と良い一致
- ▶ 単体高出力 $>1\text{mW}$ が高い共振器高さと低容量RTDで可能

(Fujikata, et al, to be presented at IRMMW-THz)

従来構造



新構造



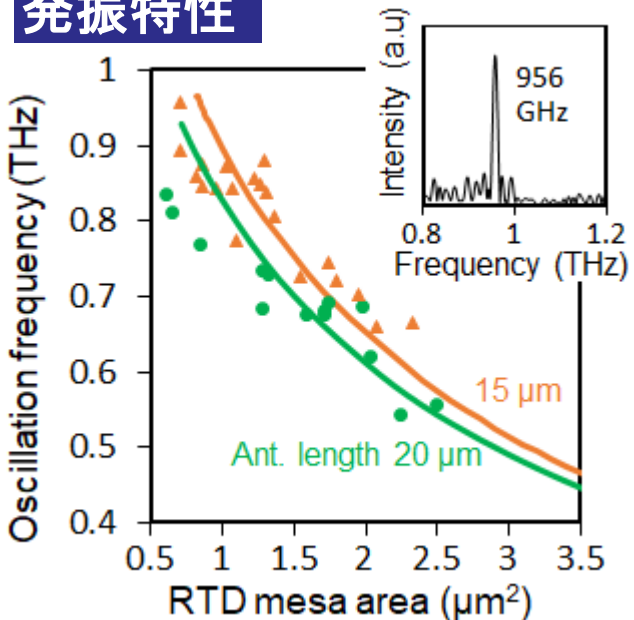
作製プロセスの大幅な簡略化

- MIMが不要な構造
- EBリソグラフィ

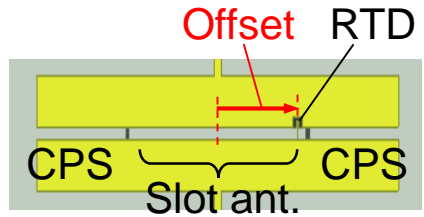
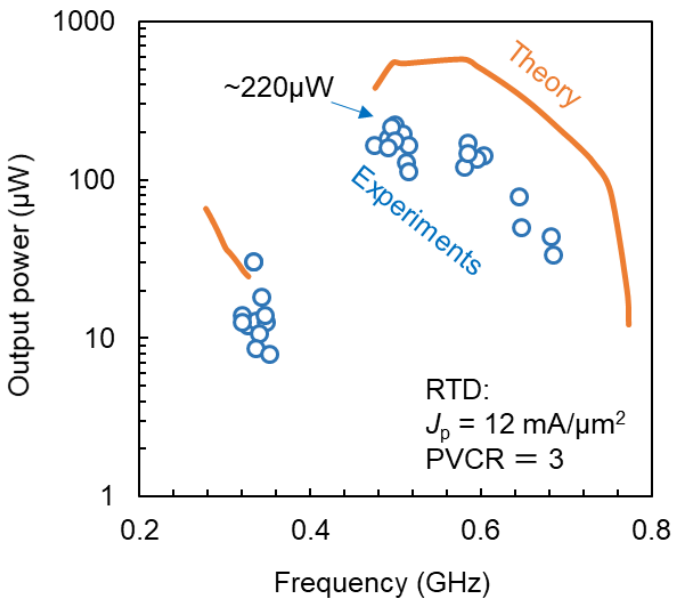
従来の6回を2回に減少
⇒ 作製時間の大幅短縮

- 従来構造と同等の発振特性

発振特性



オフセット構造による高出力化



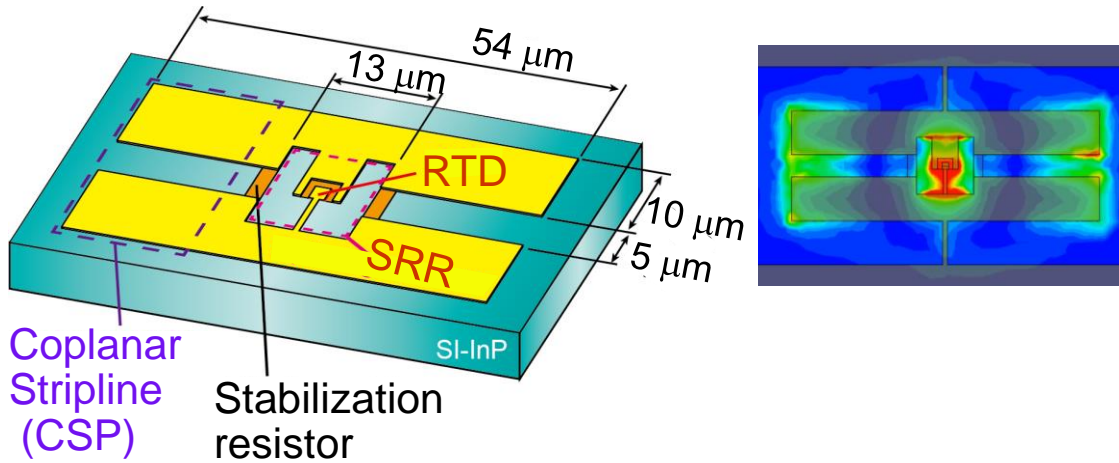
オフセットとCPSによるインピーダンス整合

- アンテナ長 120 μm
- オフセット 80%
- CPS 45 μm

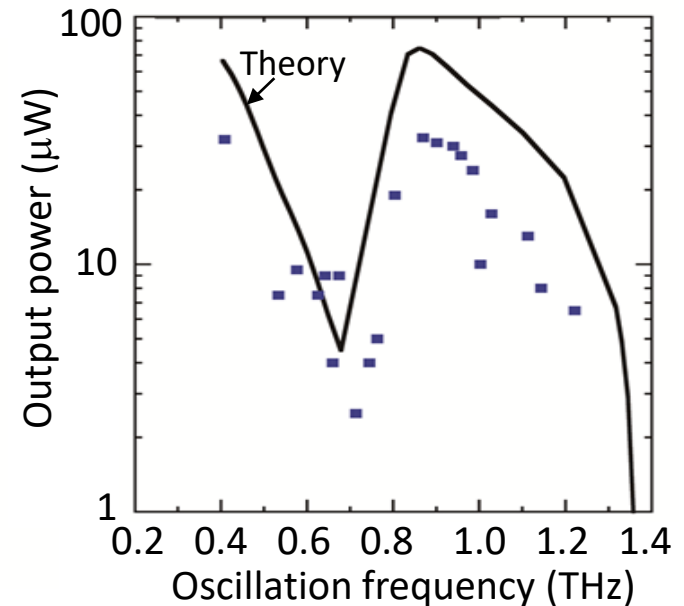
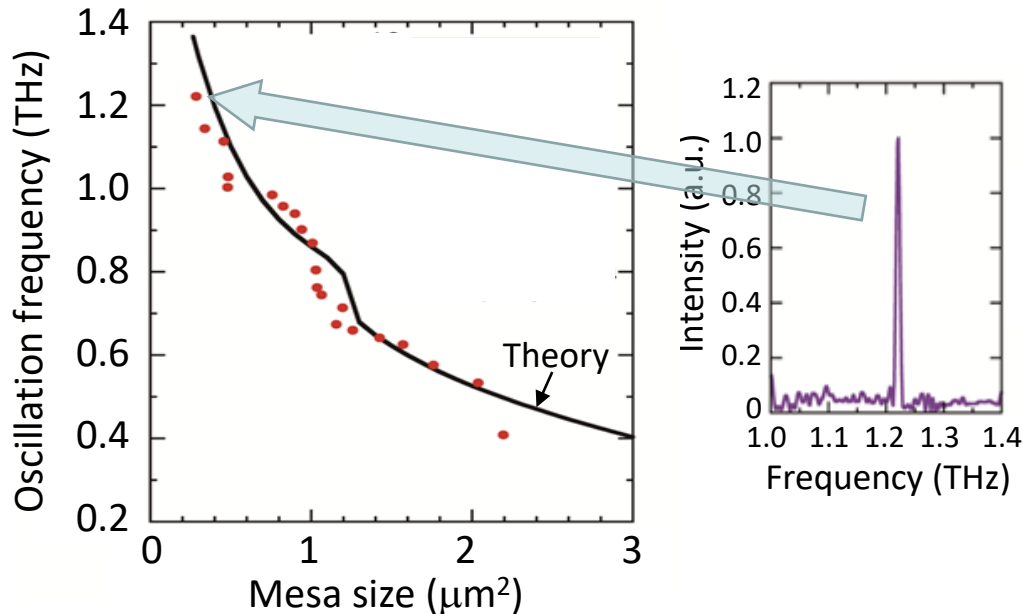
⇒ 出力: 約220 μW
@500 GHz

(Mai, et al, APEX, 15, 042003, 2022)

スプリットリング共振器 (SRR) の集積

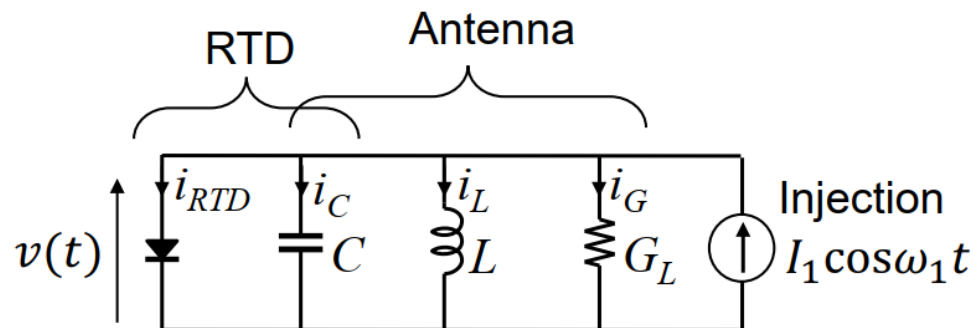
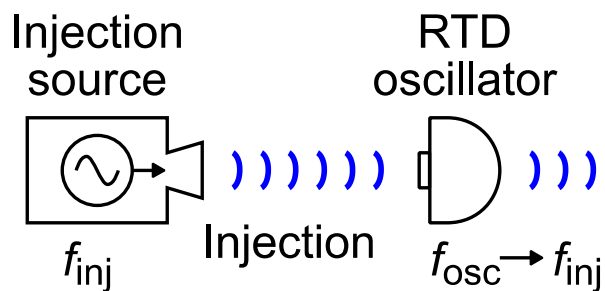


- SRR周辺に電界が集中
→ 導体損失の低減
- 実験:
 - 1.2 THzまでの発振
 - CSPとのマッチングによる
30 μW @ 0.9 THz
 - 理論とよい一致





- 共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ信号源開発
 - 空洞共振器構造による高周波・高出力化
 - 構造簡略化による作製プロセス工程の削減
 - 注入同期現象を利用した新展開
- 共鳴トンネルダイオード信号源を用いたテラヘルツ応用
 - 無線通信応用
 - イメージング・レーダー応用



同期範囲

$$|f_{osc} - f_{inj}| \leq \frac{f_{osc}}{Q} \sqrt{\frac{P_{inj}}{P_{osc}}}$$

f_{osc} : RTDのフリーラン周波数

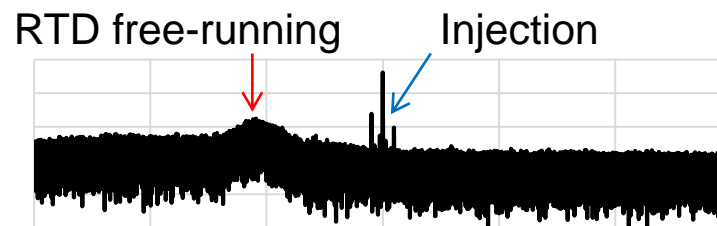
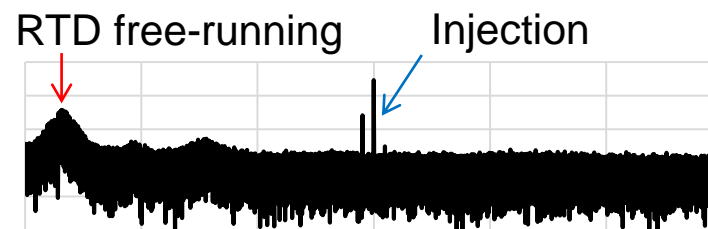
f_{inj} : 注入周波数

P_{osc} : 発振器出力

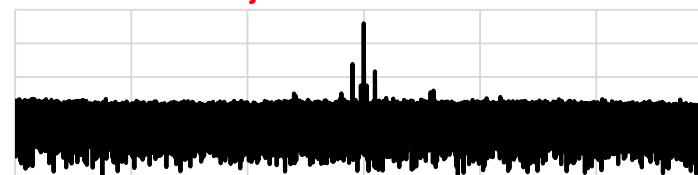
P_{inj} : 注入電力

Q : 共振器のQ値

同期による発振スペクトルの変化



Injection-locked



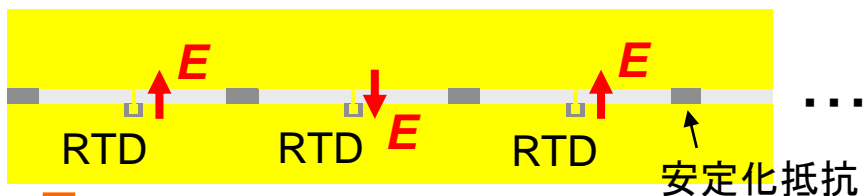


高密度集積アレイ

注入同期によって新たな高性能・高機能化が可能

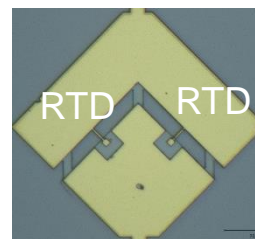
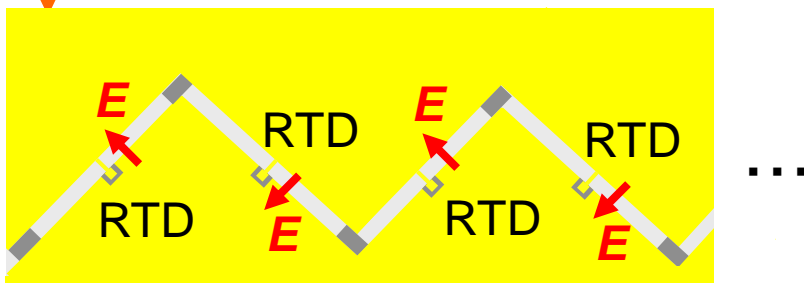
- ▶ 高密度アレイによる高出力コヒーレント光源
- ▶ 注入同期を用いた位相制御とフェーズドアレイ
- ▶ 受信信号への同期によるコヒーレント検波など

高密度アレイによる高出力光源



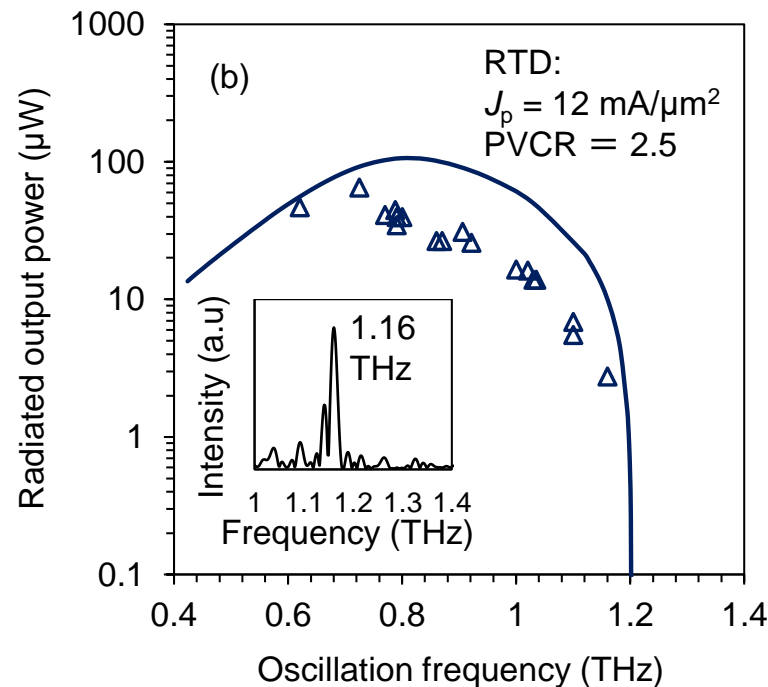
電界 E が交互になるモードが安定に発振

- 直線状アレイ: 真正面へ放射しない
- ジグザグアレイ: 真正面へ放射可能

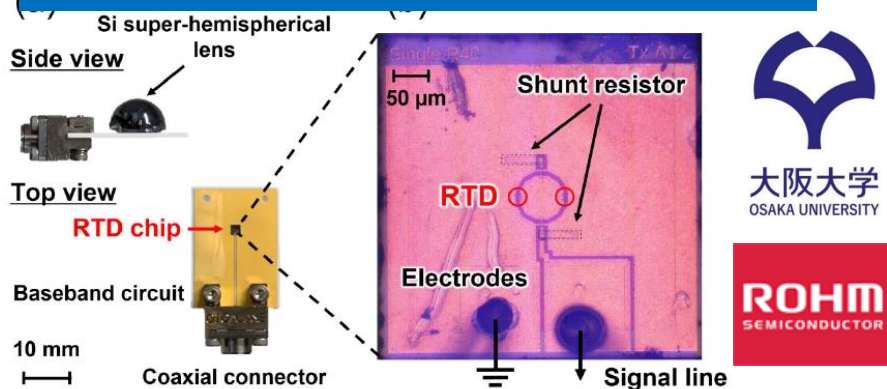


初期実験:

- ▶ 2素子ジグザグアレイ
- ▶ 低損失の E 分布により高出力
- ▶ 偏波から発振モードを確認

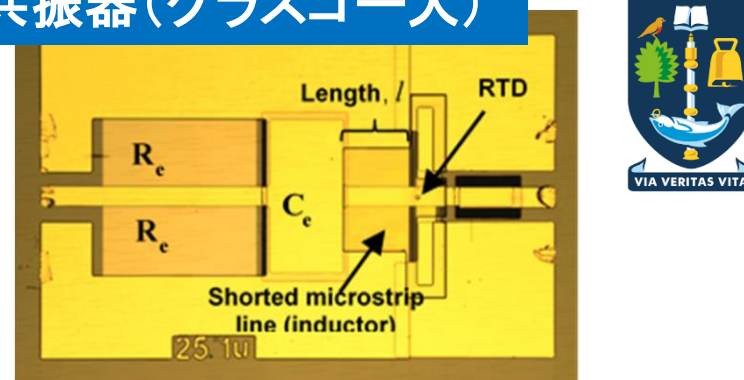


リングスロット集積(阪大・ローム)



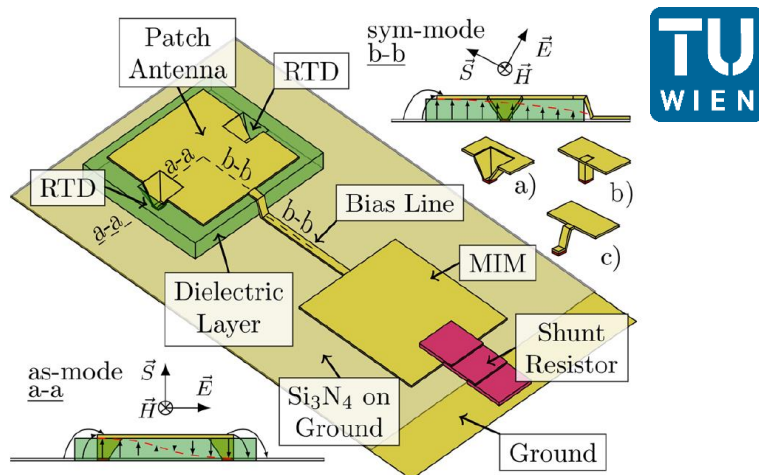
S Iwamatsu, et al., APEX, 14, 034001, 2020

マイクロストリップライン共振器(グラスゴー大)



Al-Khalidi, et al., IEEE Trans THz Sci Tech., 10, 150, 2020

パッチアンテナ(ウィーン工科大)

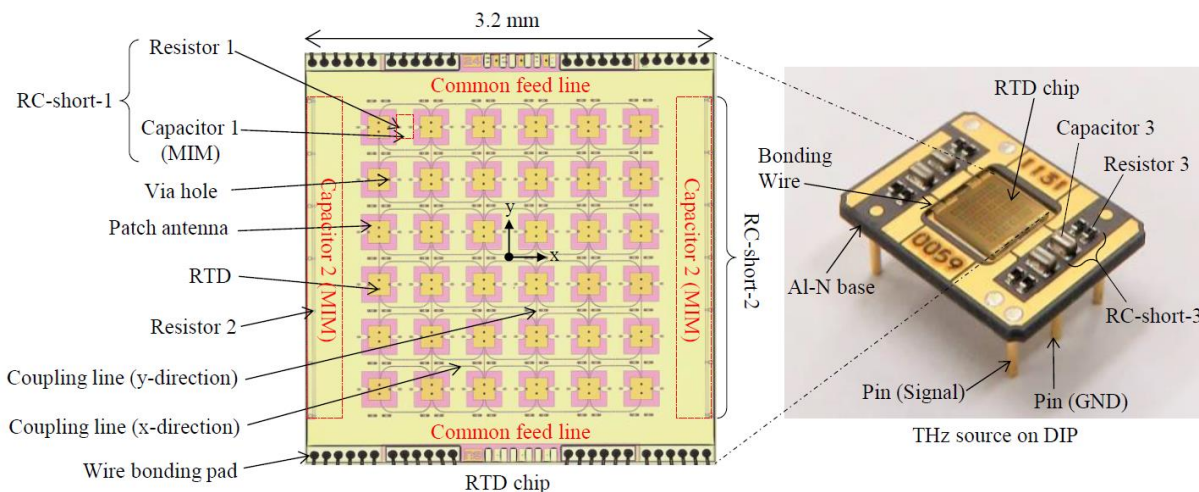


Ourednik, et al., APL, 120, 183501, 2022

各機関で2つのRTDを集積したデバイスが研究されている

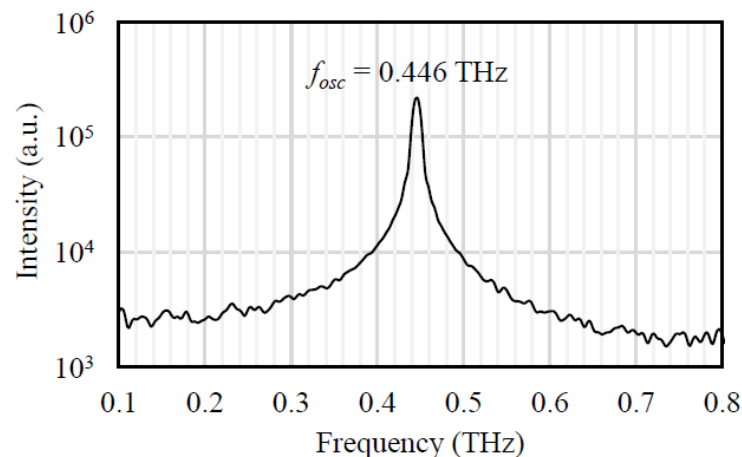
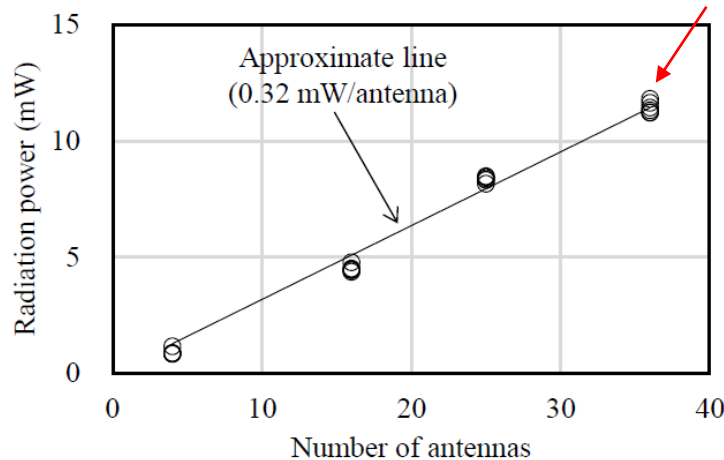
- リングスロットタイプではレンズと合わせて高指向性放射
- マイクロストリップ共振器を用いたものは高出力動作1mW@260GHz
- パッチアンテナ集積素子では1.09THz高周波+レンズなし放射

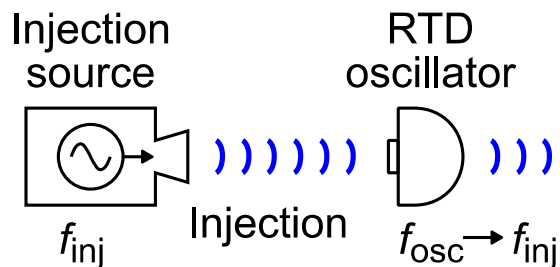
パッチアンテナ型RTD36素子コヒーレントアレイ(キヤノン)



- パッチアンテナに2つのRTDを集積した素子を6×6アレイ化
- 素子間をマイクロストリップラインで結合しコヒーレント動作
- レンズ不要
- 11.8mW@450GHz
DC-to-RF 効率 1%

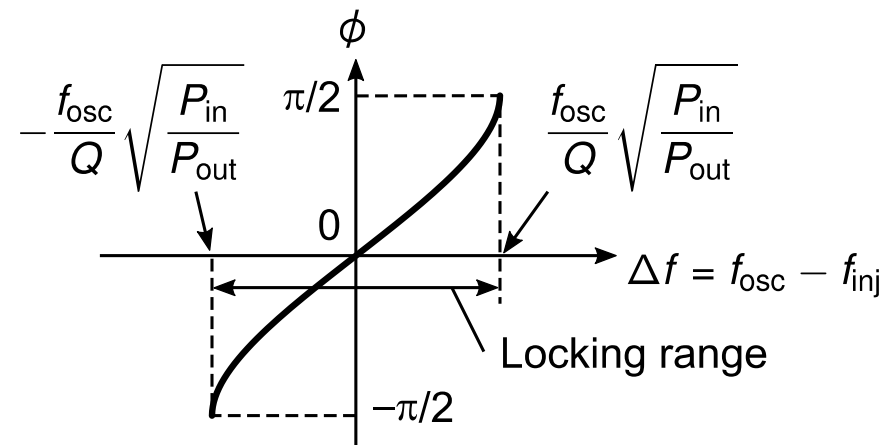
11.8mW !!





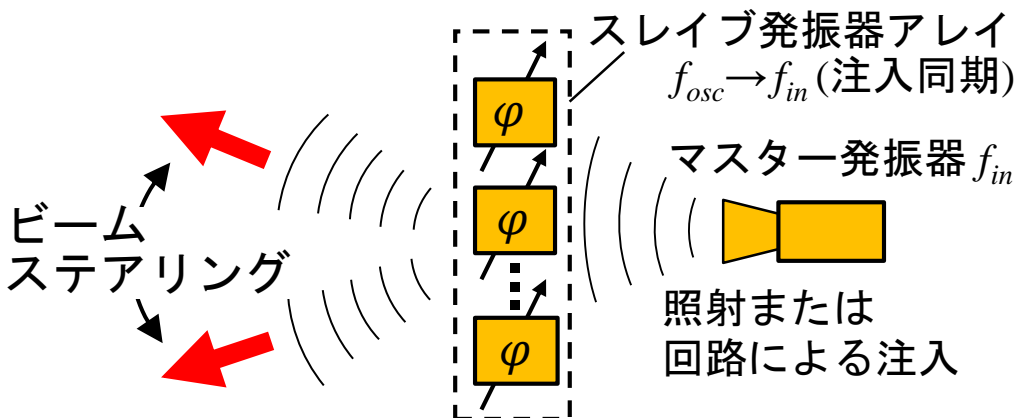
注入信号
に対する
相対位相

$$\phi = \sin^{-1} \left(Q \sqrt{\frac{P_{osc}}{P_{inj}} \frac{f_{osc} - f_{inj}}{f_{osc}}} \right)$$



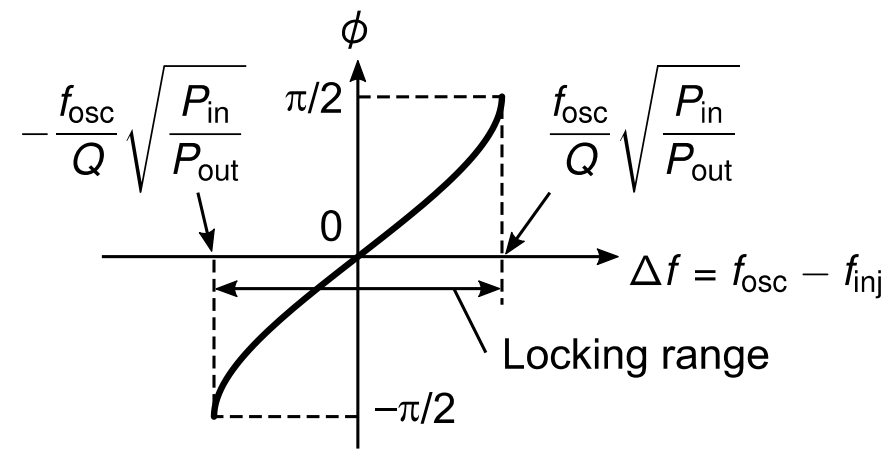
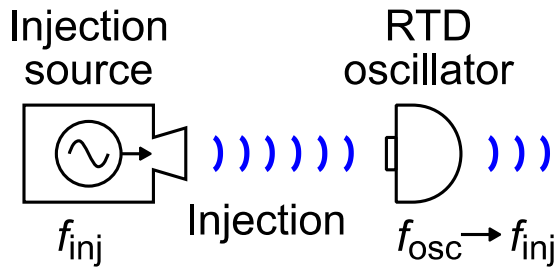
注入同期下で自励発振周波数を変えようとすると周波数の代わりに位相が変化

注入同期によるフェイズドアレイのビームフォーミング



RTDフェイズドアレイをマスター発振器で注入同期

- ⇒ 全素子の周波数をロック
- ⇒ 各素子の周波数可変機能が位相可変機能に変わる
- ⇒ 位相制御によるビームステアリング

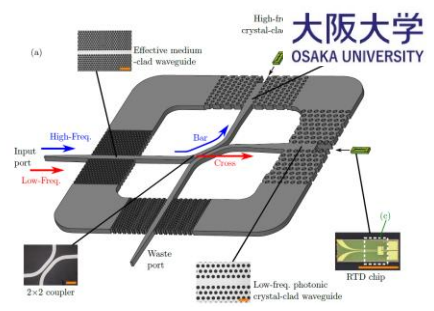
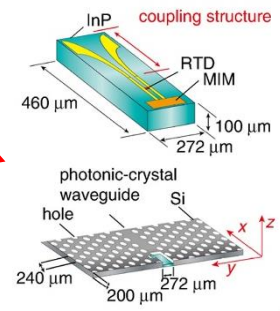
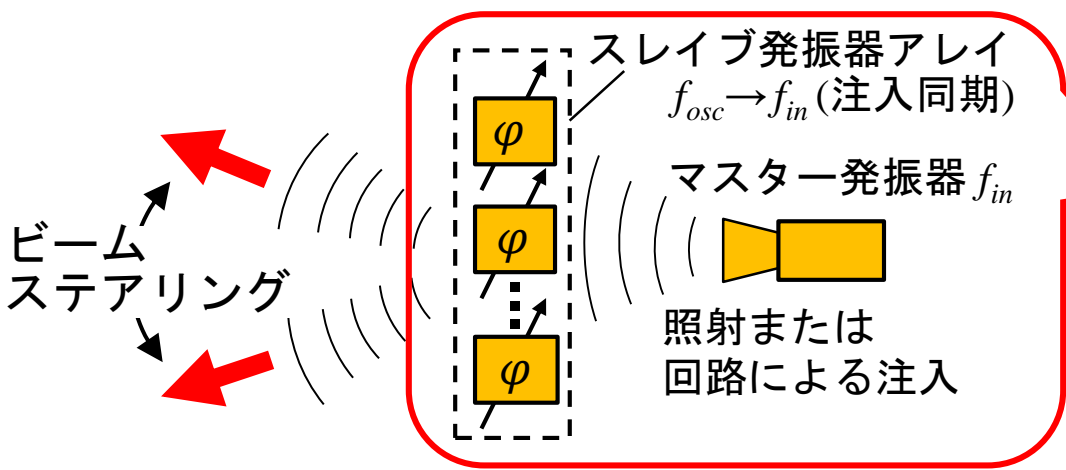


注入信号
に対する
相対位相

$$\phi = \sin^{-1} \left(Q \sqrt{\frac{P_{osc}}{P_{inj}}} \frac{f_{osc} - f_{inj}}{f_{osc}} \right)$$

注入同期下で自励発振周波数を変えようとすると周波数の代わりに位相が変化

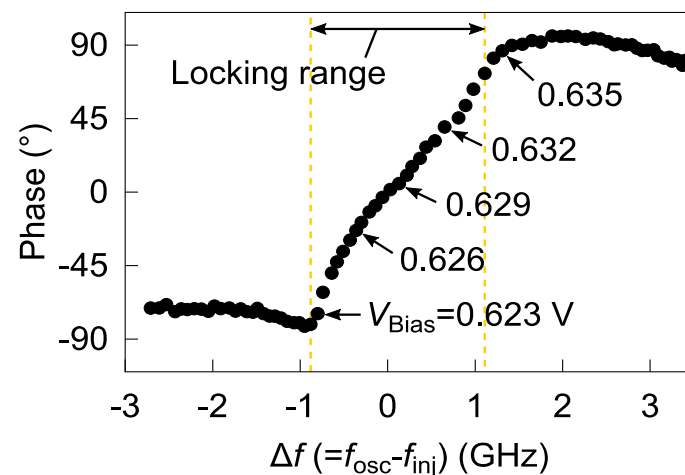
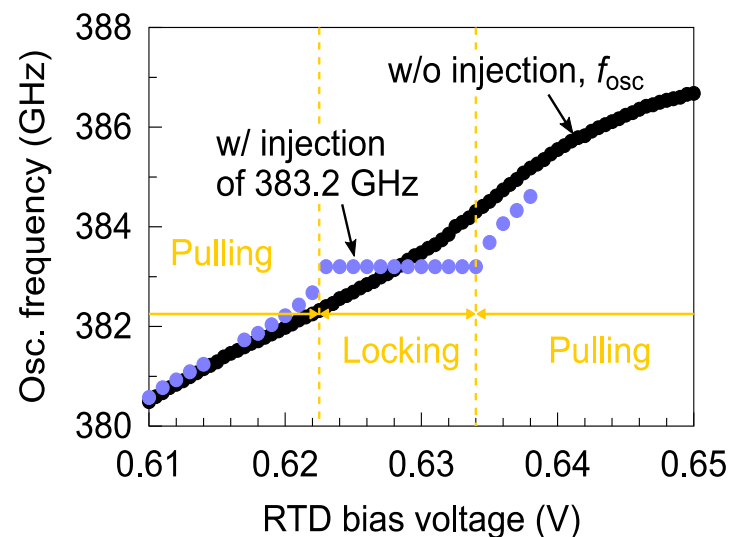
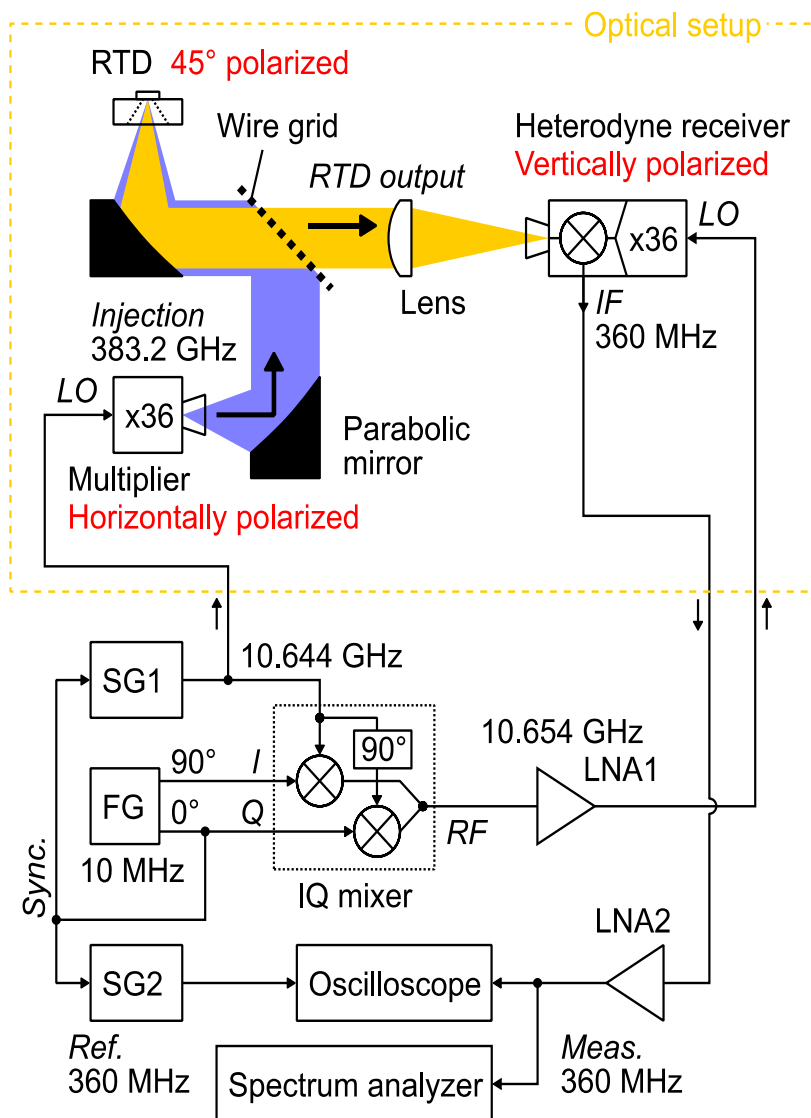
注入同期によるフェイズドアレイのビームフォーミング



Yu, EL, 55, 398, 2019. Yu, IEEE JSTQE, 28, 1, 2021.

フォトニック結晶回路で平面化が可能

注入同期による位相制御の初期実験

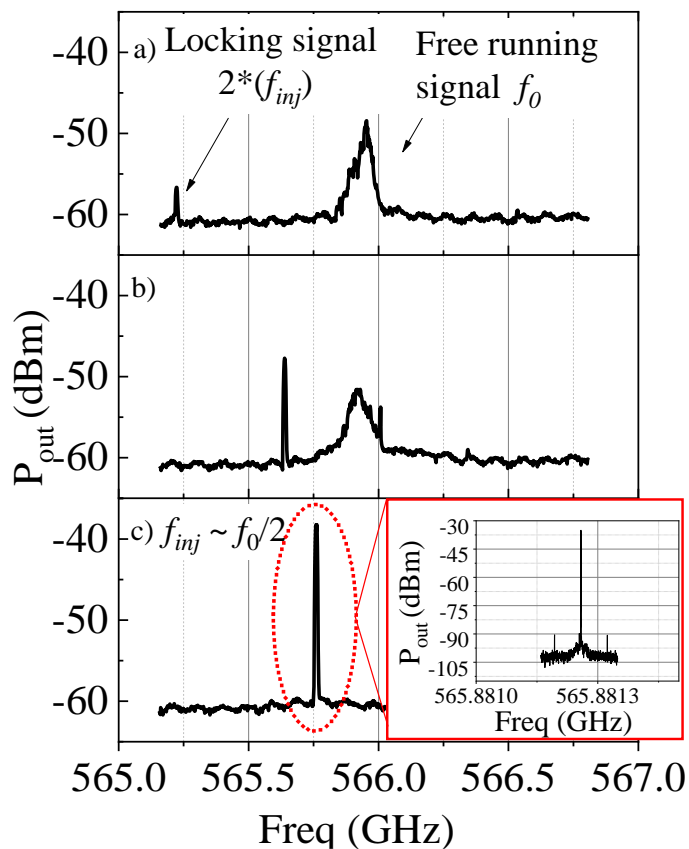


• 注入同期による位相制御を達成

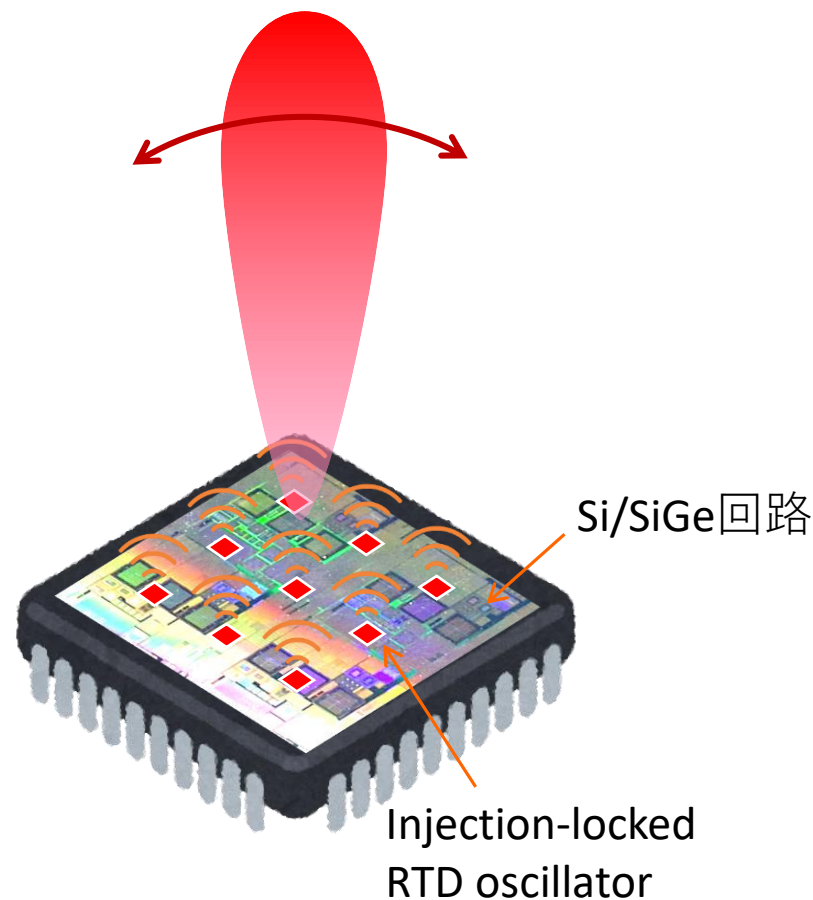
(Suzuki, et al, IEEE Trans THz Sci Tech., 2022)

2次高調波注入同期 (デュイスブルクエッセン大、東工大)

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

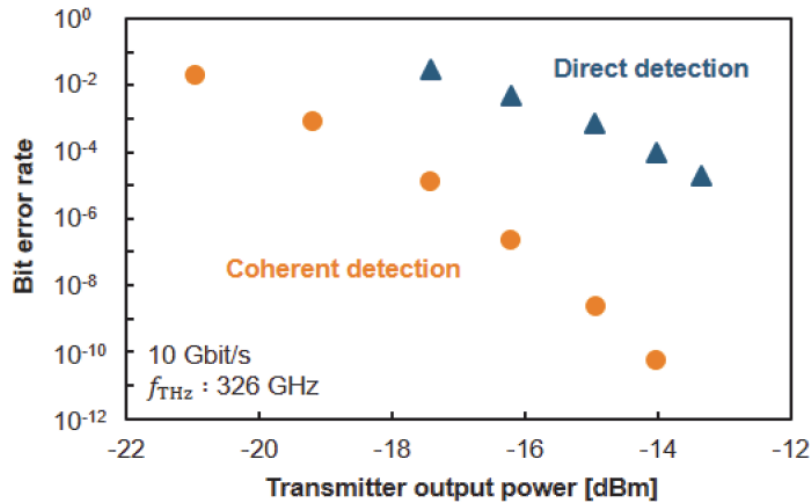


(Arzi, et al, IEEE Trans THz Sci Tech., 10, 221, 2020)



- 高調波でも同期が可能
- 高機能なSi回路と融合し、低い周波数の信号で発振器アレイをコントロールすれば高機能性を獲得できる

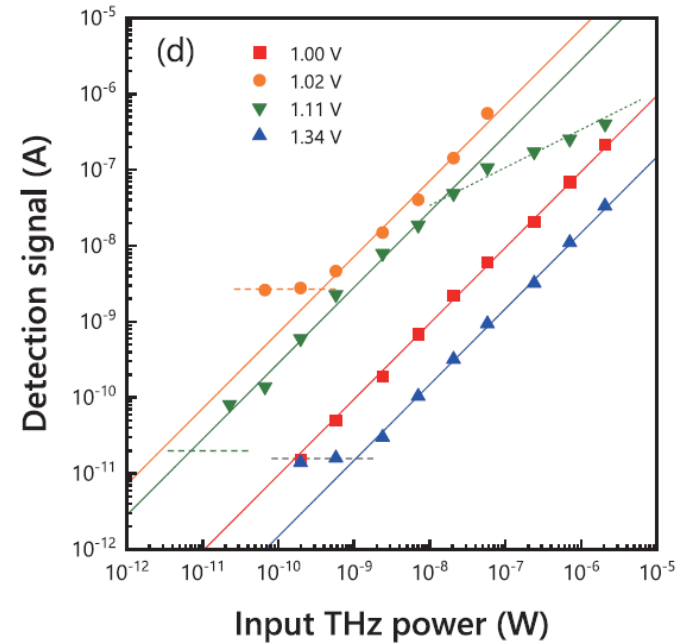
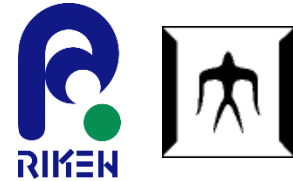
同期検波による高感度化と無線通信応用(阪大)



Nishida, et al., Scientific reports 9, 1, 2020

- 受信信号にRTD発振器が同期しコヒーレント検出するのを発見
- 非線形性を利用した直接検波に比べて高感度

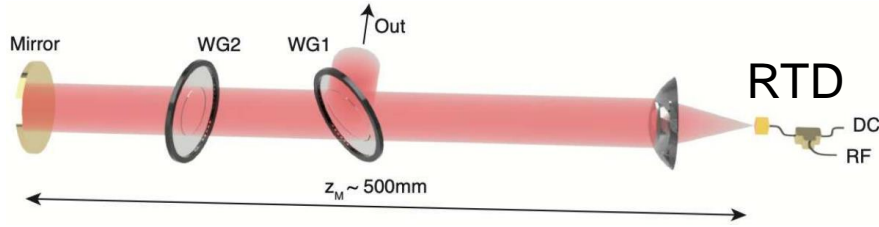
同期検波におけるNEPの評価(理研・東工大)



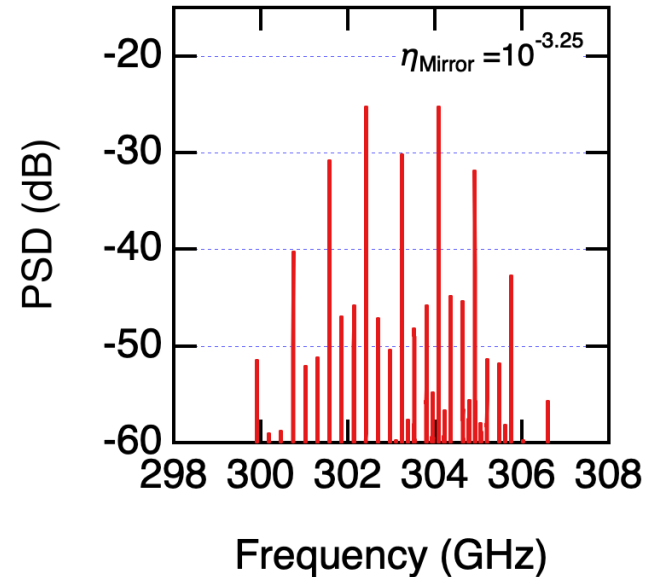
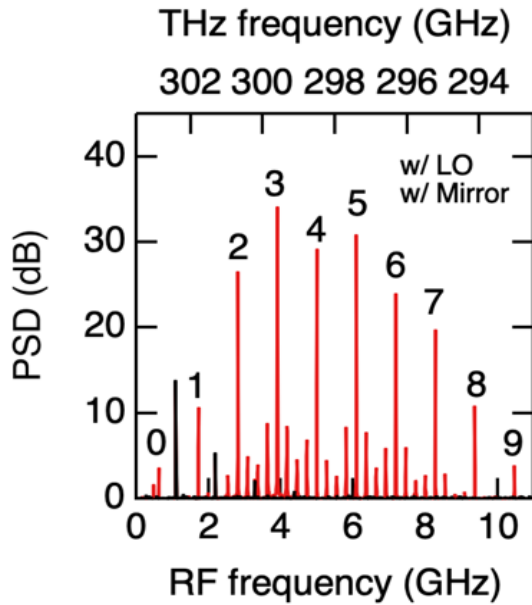
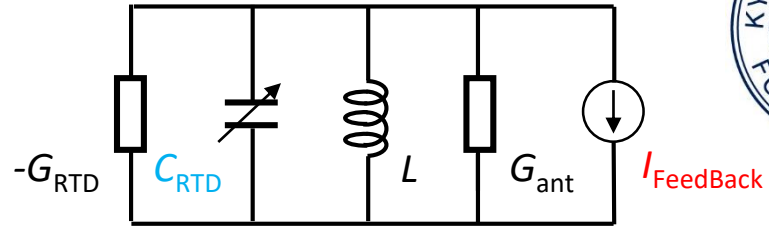
Takida, et al., APL, 117, 021107, 2020

- 直接検波とコヒーレント検波の切り替わりを観測
- NEP $\sim 7.7 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$

実験



回路解析



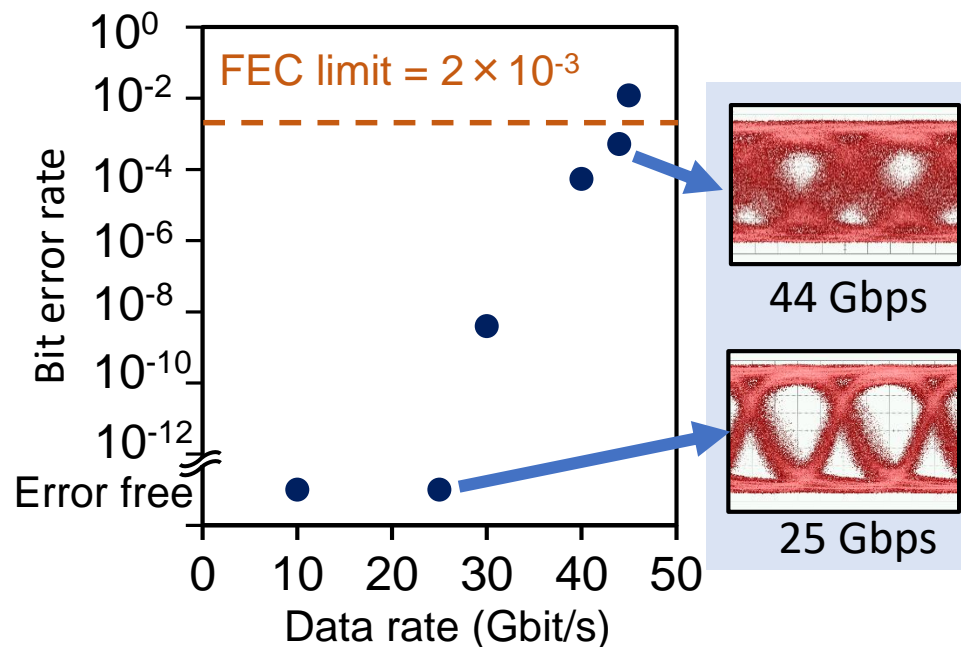
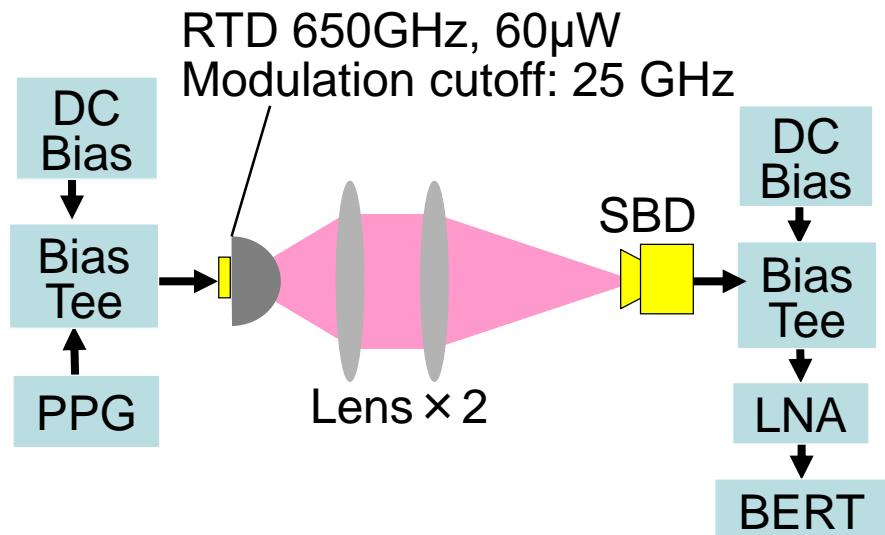
- 強い戻り光がある場合はコム状のスペクトルが発生
- 回路計算よりコムの発生の鍵は非線形容量



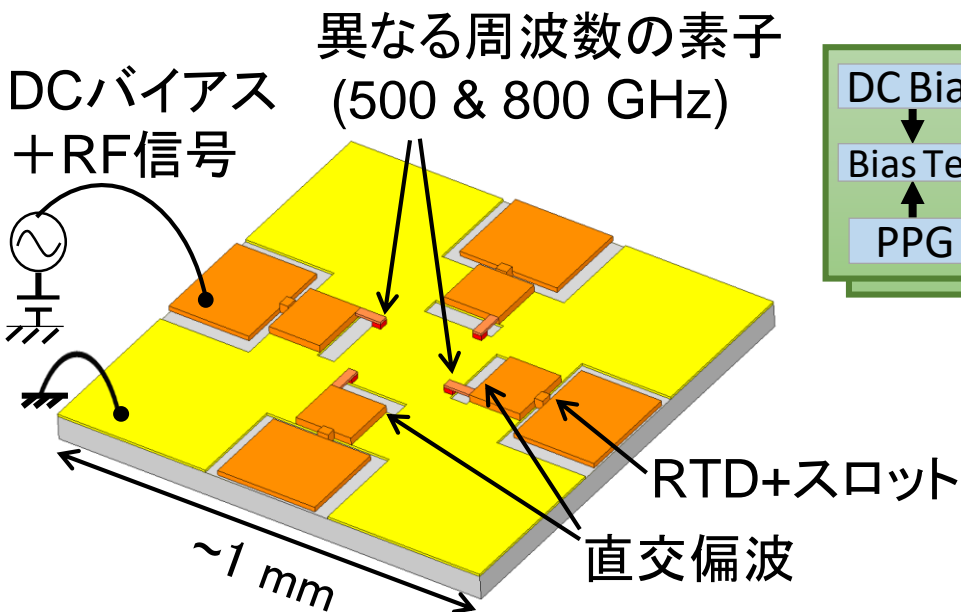
- 共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ信号源開発
 - 空洞共振器構造による高周波・高出力化
 - 構造簡略化による作製プロセス工程の削減
 - 注入同期現象を利用した新展開
- 共鳴トンネルダイオード信号源を用いたテラヘルツ応用
 - 無線通信応用
 - イメージング・レーダー応用

RTD-TxによるTHz大容量無線伝送の例 ⇒ RTDにより簡易なシステム構成が可能

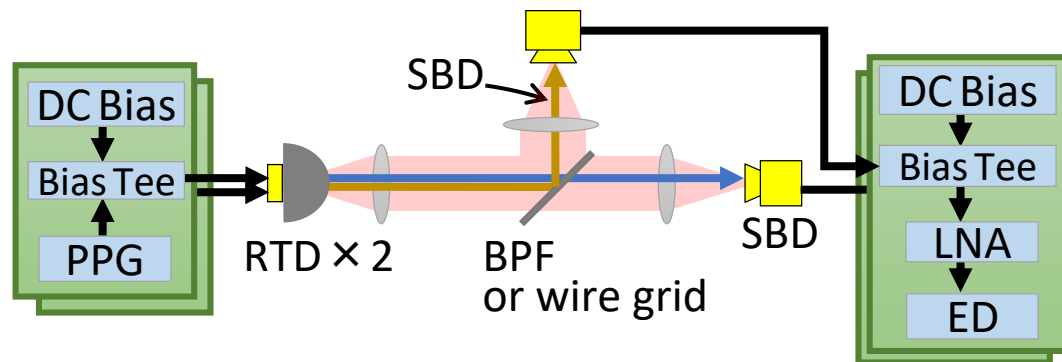
- ▶ 650 GHz, 25 Gbps w/o error, 44 Gbps with BER < FEC limit
(Asada and Suzuki, Workshop in EuMW, WTu-01, 2017)
- ▶ 500 & 800 GHz, FDM 56 Gbps, PDM 56 Gbps
(Oshima, *et al*, IEEE THz Sci Tech 7, 593, 2017)
- ▶ 340 GHz, 30Gbps w/o error, RTD-Tx & Rx (阪大)
(Nishida, *et al*: Sci. Rep. 9,18125, 2019)
- ▶ 300 GHz, 6Gbps w/o error, 20 Gbps with BER < FEC limit (グラスゴー大)
(Wasige, *et al*, Workshop in EuMW, WTh4-3, 2018)



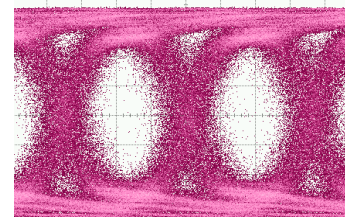
多重伝送用集積チップ



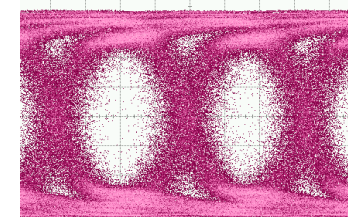
周波数／偏波多重伝送



FDM



490 GHz, 28 Gbps
BER = 2.3×10^{-4}

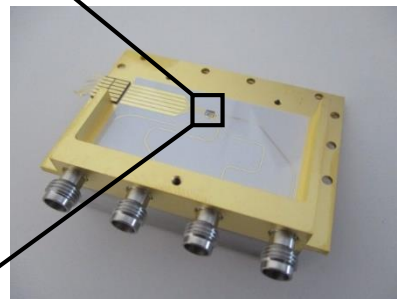
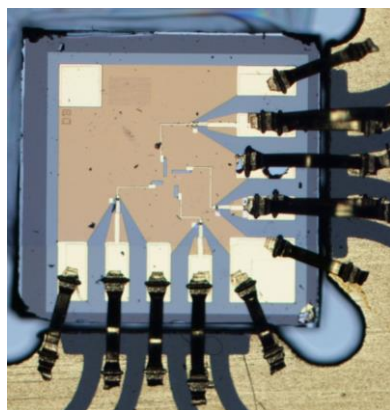


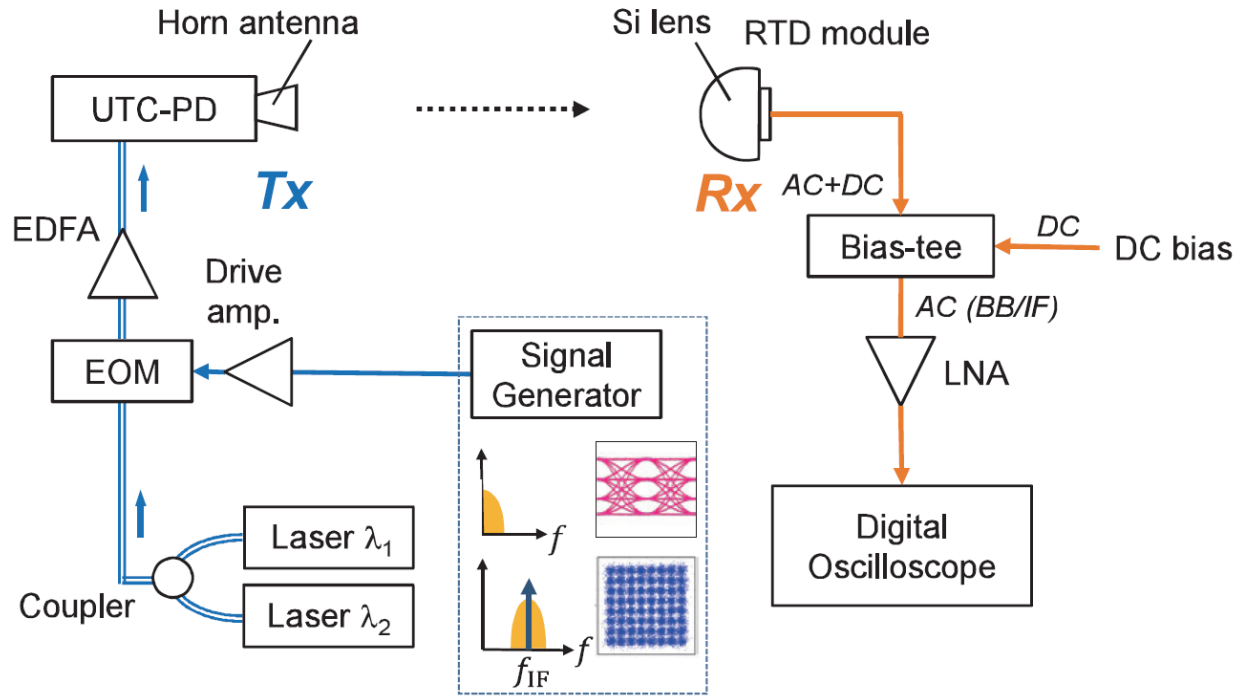
790 GHz, 28 Gbps
BER = 1.5×10^{-3}

**28 Gbps × 2ch = 56 Gbps
in FDM and PDM**

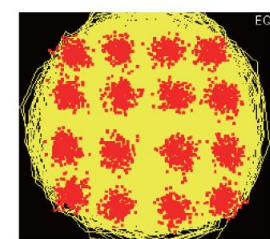
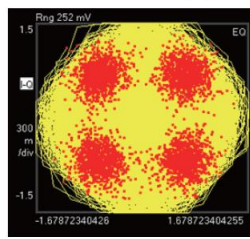
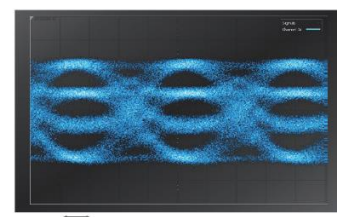
(Oshima, et al, IEEE THz Sci. Tech., 7, 593, 2017)

▶ チャンネル数増加および多値化によりさらに大容量伝送が可能

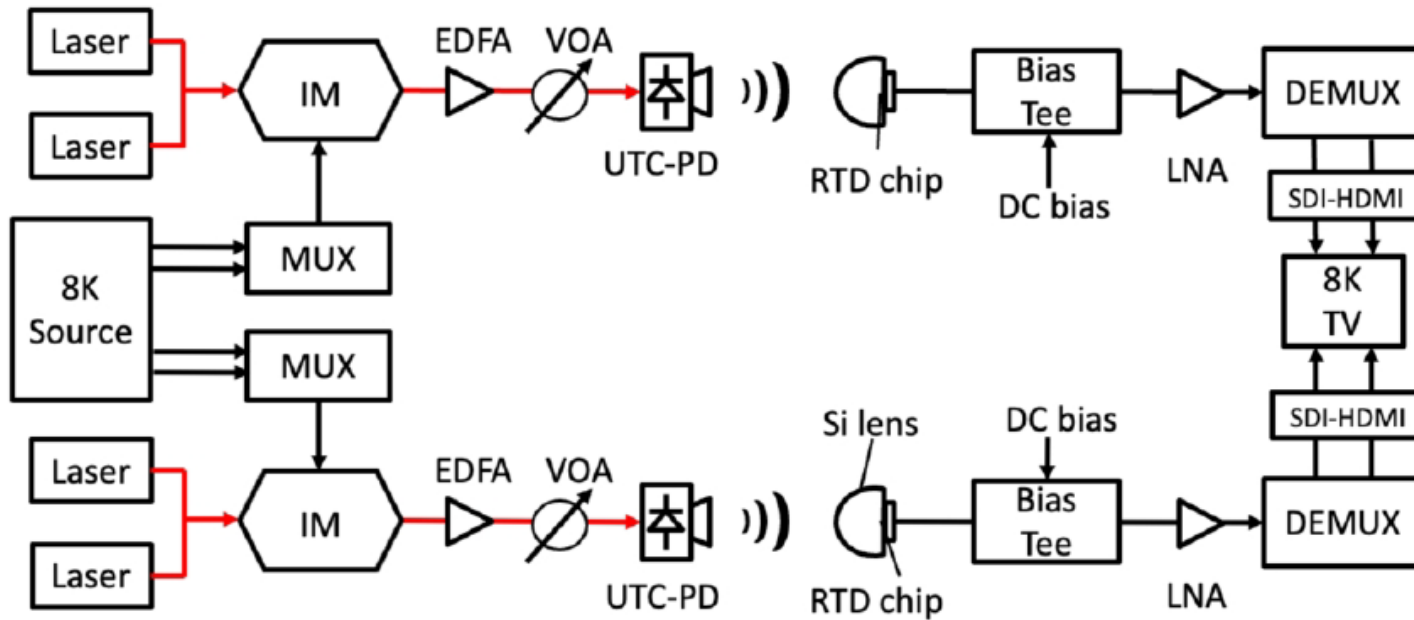




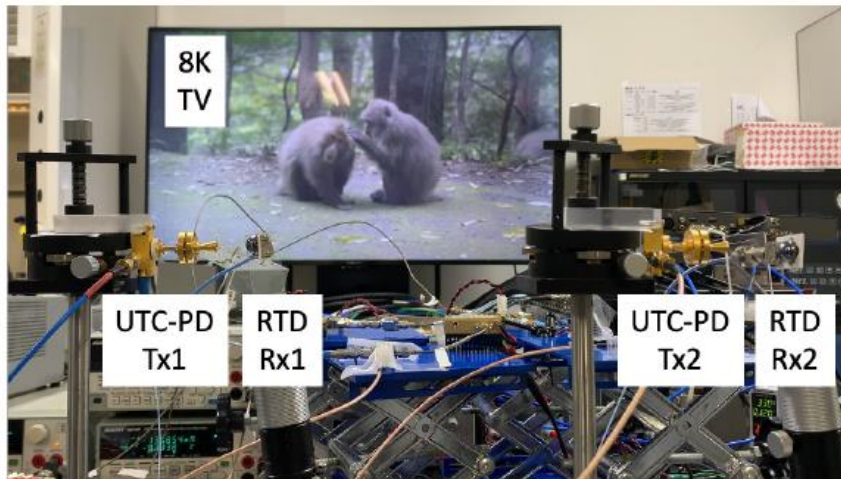
大阪大学
OSAKA UNIVERSITY



- UTC-PD Tx & RTD Rxによる
~300 GHz無線通信 (PAM4, QPSK, 16QAM)
- 48 Gbps (PAM4), 60 Gbps (QPSK), 68 Gbps (16QAM)



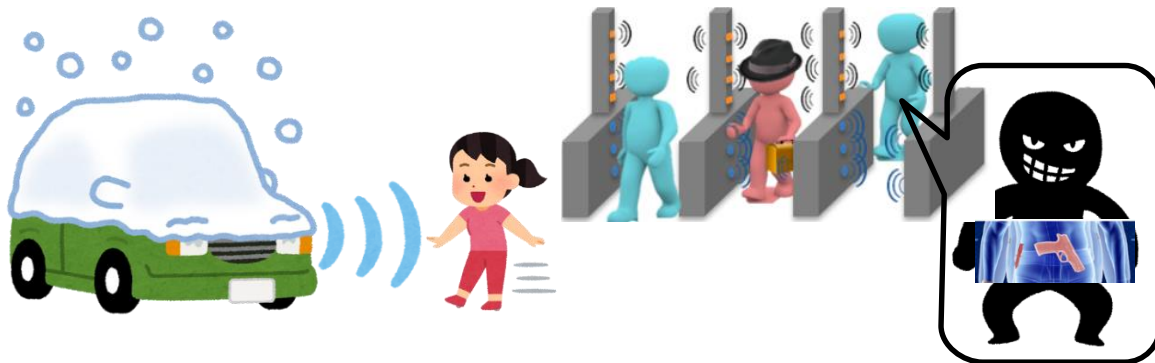
大阪大学
OSAKA UNIVERSITY



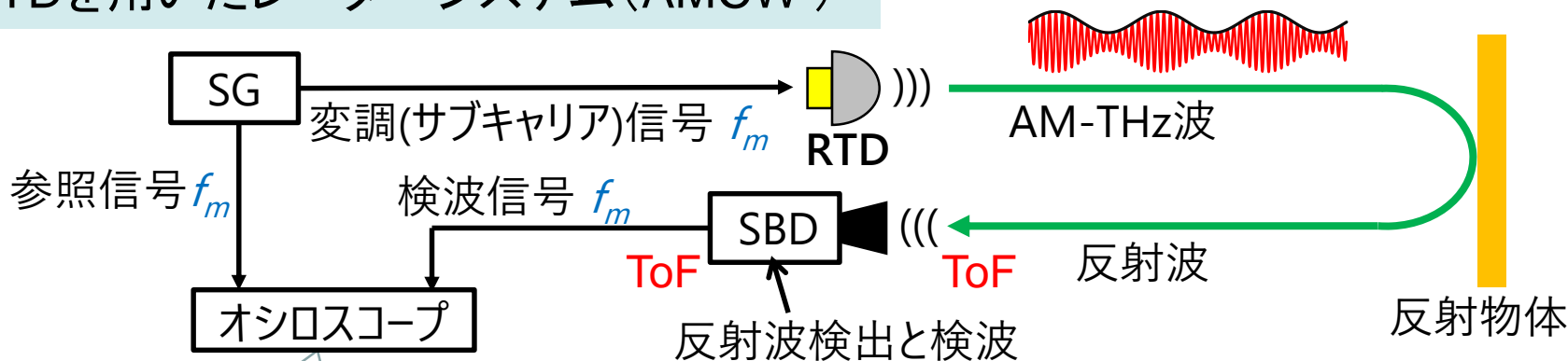
- UTC-PD Tx & RTD Rxによる計48 Gbps伝送
- 8K映像のリアルタイム送信に成功

THz レーダー

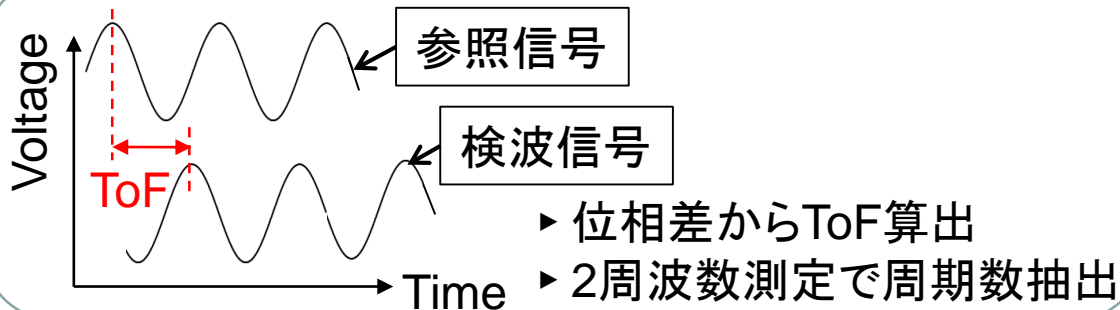
- 霧、雪、埃など視界不良環境でのレーダー
- 高解像度3D透過イメージング



RTDを用いたレーダーシステム (AMCW)

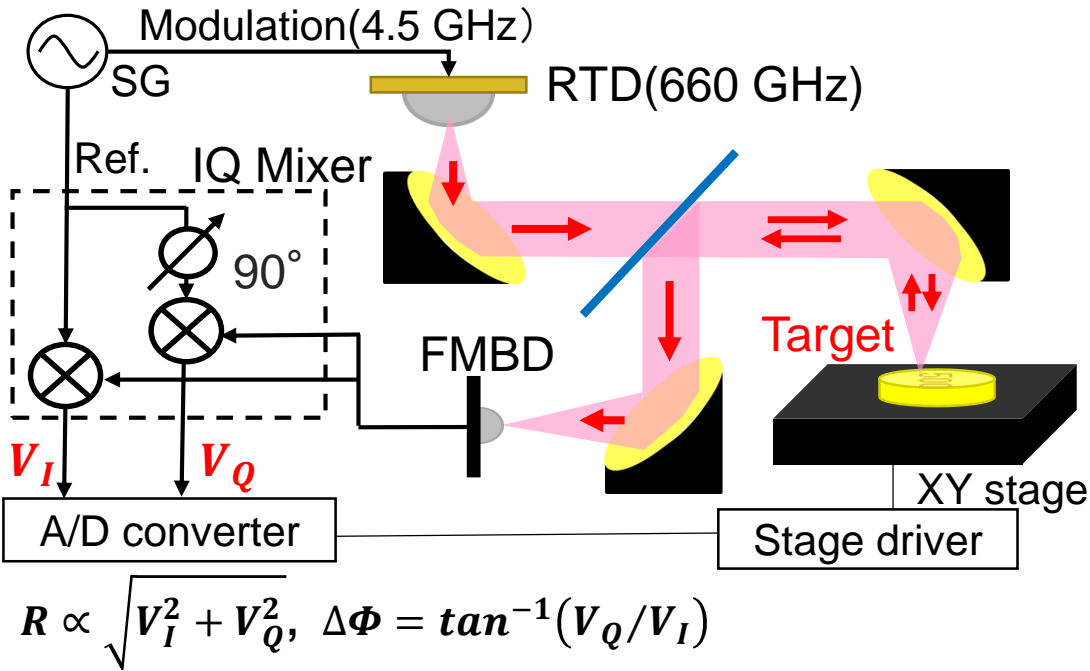


(Dobriou, et al, Photonics, 5, 52, 2018)



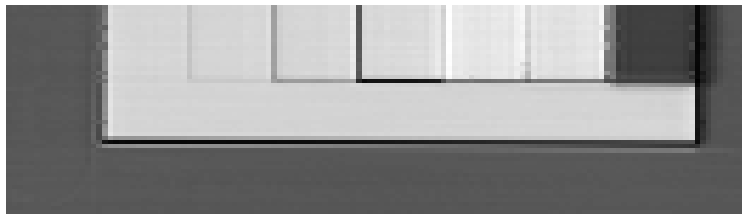
サブキャリア変調: RTDに有用

- 反射光注入の影響がない
- 他のレーダー方式にも拡張可能

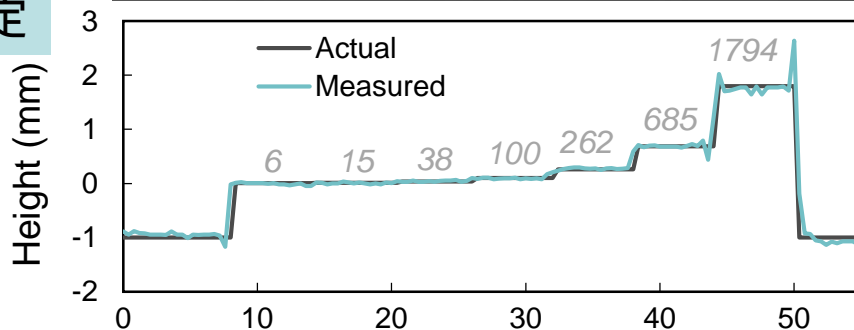


- ▶ 3Dイメージング
 - ・水平方向: 反射率分布
 - ・垂直方向: 位相分布 (AMCW)
- ▶ 横方向分解能: 0.56 mm (~THz波の波長)
- ▶ 高さ方向の精度:
 - ・0.02mm(標準偏差)
 - ・S/N比、変調周波数、および信号処理改善で高精度化可能

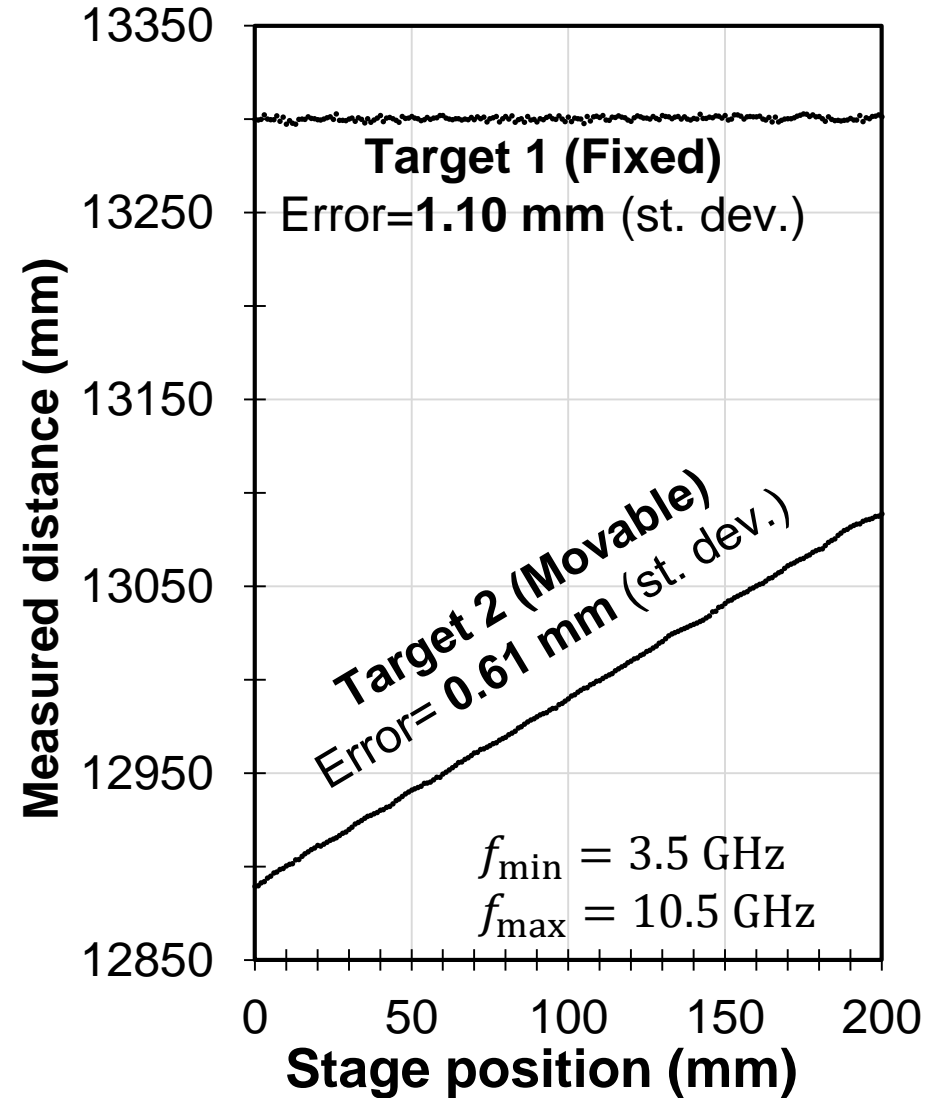
2Dイメージ



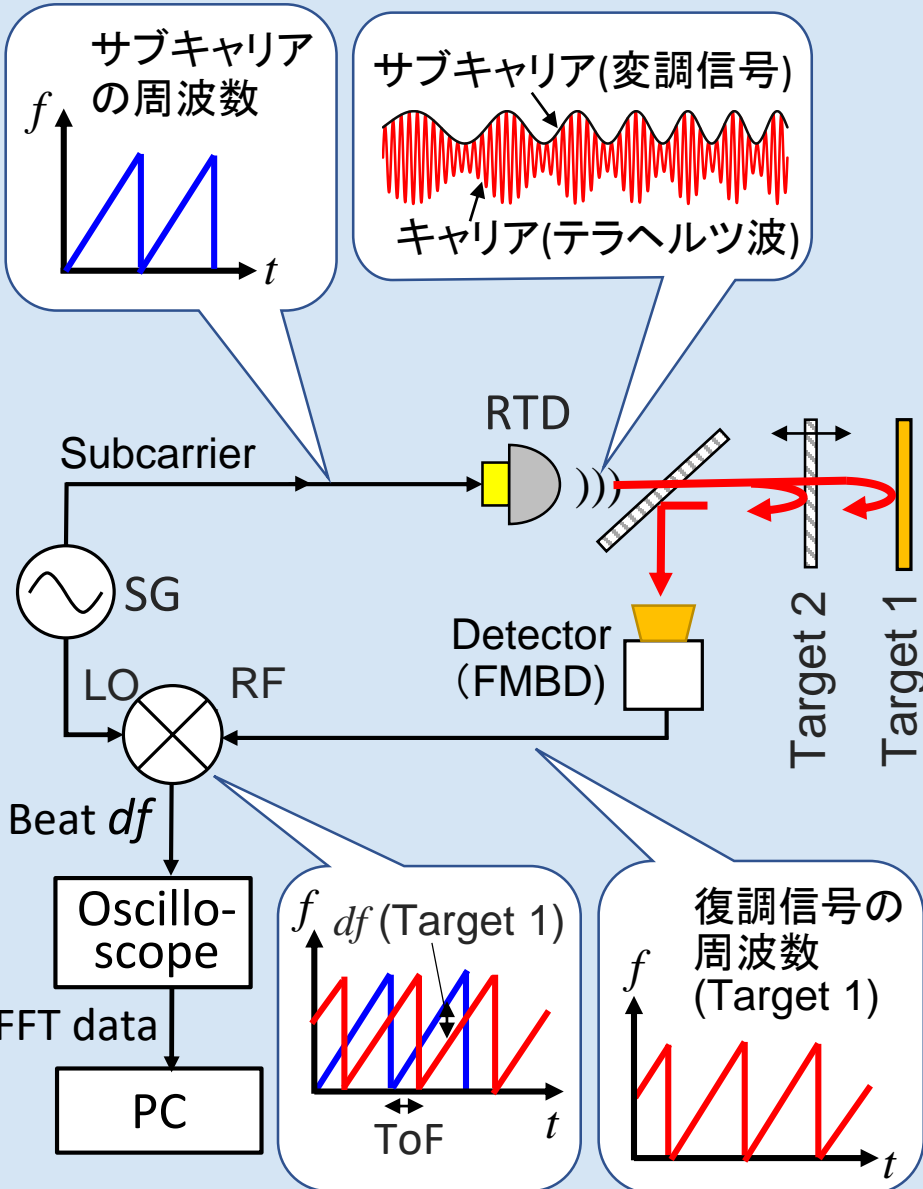
高さ測定



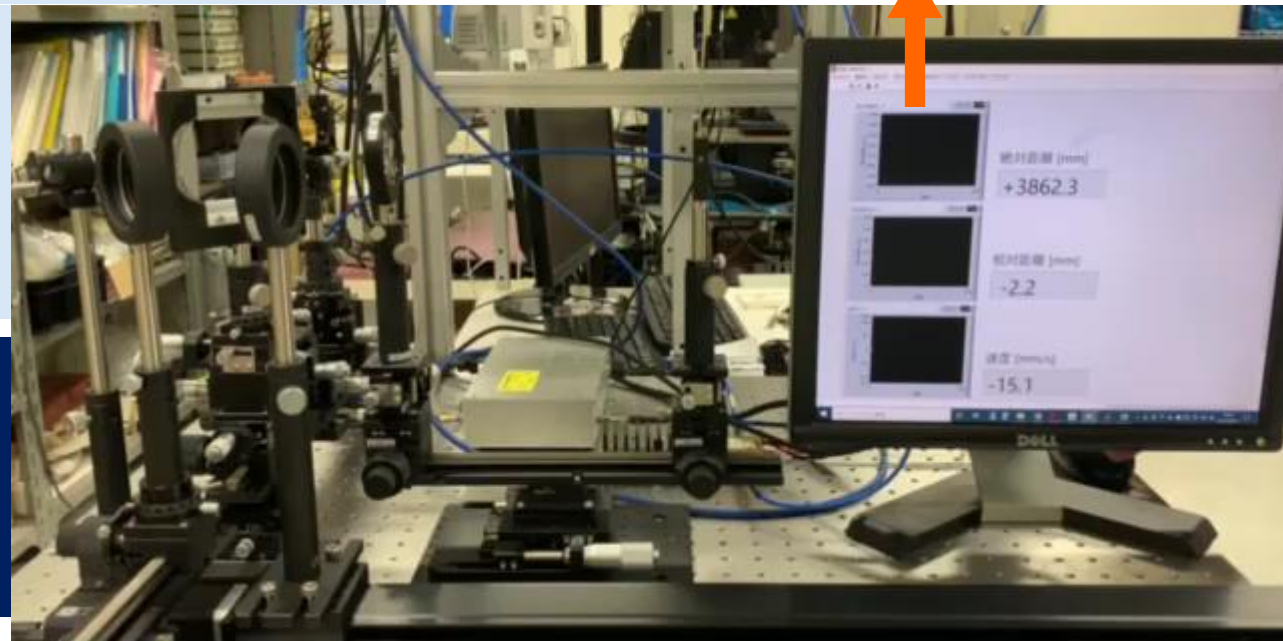
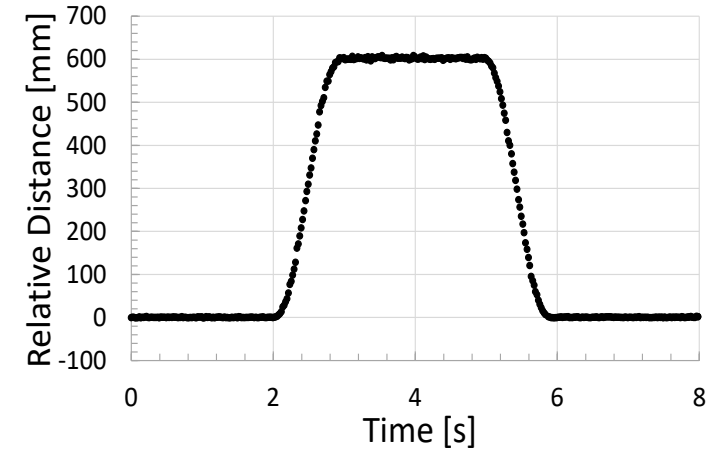
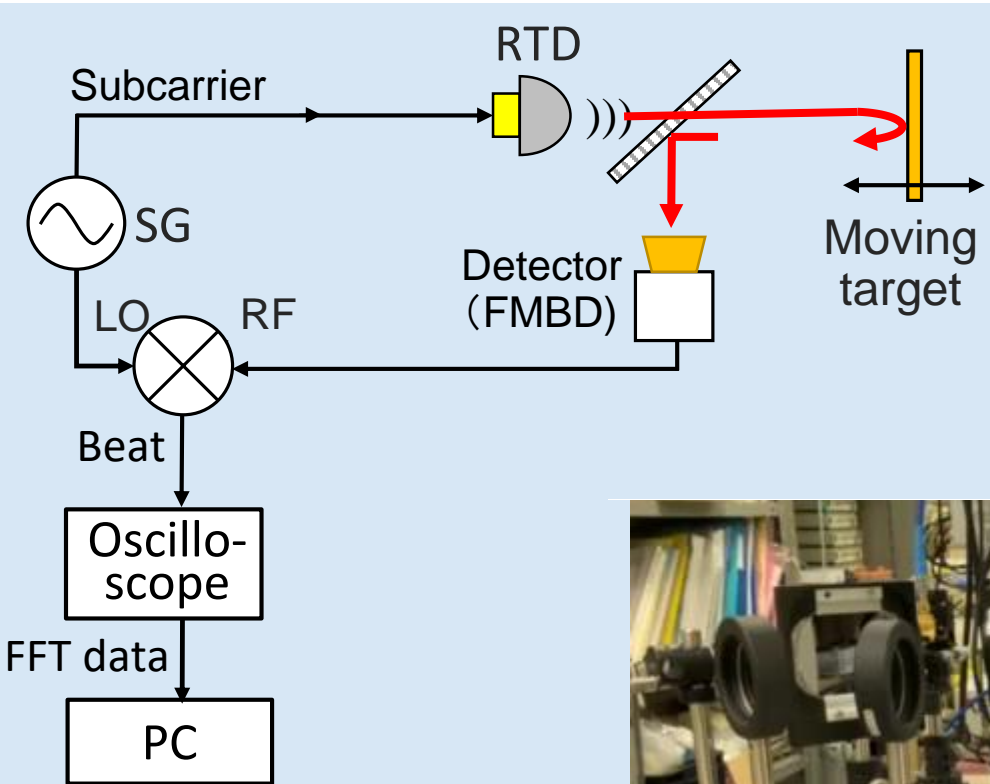
・2つのターゲットの同時測定



(Dobroiu, et al, Sensors, 20, 6848, 2020)



Real-time measurement



- ▶ 測定時間:
4ms/point (minimum)
- ▶ 今後の発展:
リアルタイム3Dイメージング

高周波・高出力化

- V字ピラー電極を有する円筒形空洞共振器集積による高周波化~1.6THz
- 矩形空洞共振器と放熱構造を用いた高出力発振器~0.2mW@500GHz

デバイス構造簡略化

- プロセス工程削減のための構造簡略化とメタマテリアル集積~1.2THz発振

注入同期を用いた高性能化

- 注入同期による2素子コヒーレント出力合成
- 注入同期を用いた位相制御の達成

RTD発振器を用いた応用

- AMCW方式3Dイメージング、サブキャリアFMCW方式リアルタイム測距

他機関でも精力的にデバイス開発と通信応用が行われており、RTDはTHz光源のダークホースから真の候補になる可能性が高まっている