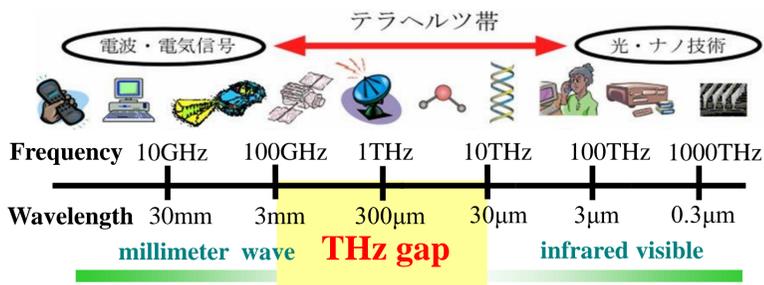


# 共鳴トンネルダイオードによる室温THz発振器

東京工業大学 大学院総合理工学研究科 浅田雅洋研究室

## 背景

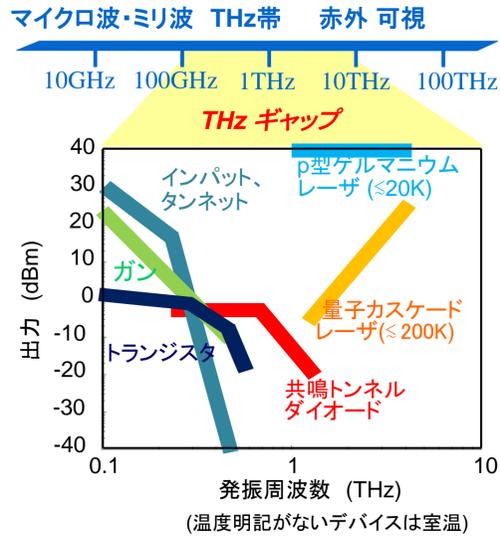
### テラヘルツギャップ



#### テラヘルツギャップ

- ◇ 光と電波の中間の未開拓領域
- ◇ 種々の応用への期待  
イメージング・分光分析(生体、物性、化学物質...), 天体観測、広帯域信号処理・通信....
- ◇ コンパクトな固体の発振・増幅素子が望まれる

### 半導体のテラヘルツ発振・増幅素子(単体)



#### 量子カスケードレーザ(QCL)

- ▶ 3.2THz, 200K (Fatholouloumi, et al, Opt. Exp. 20(2011) 3866)
- ▶ 1.2-1.6THz, 84K (Walther, et al, APL 91 (2007) 131122)

#### トランジスタ

- ▶ HBT, 413GHz(280μW), 573GHz(12μW) (Seo, et al, IEEE JSSC 46 (2011) 2203)
- ▶ Si-MOS, 482GHz (160μW), 3-push (Momeni, et al, IEEE JSSC 46 (2011) 583)

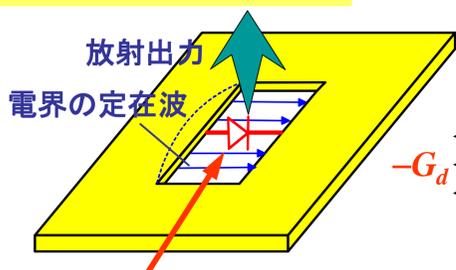
#### 共鳴トンネルダイオード(RTD)

- ▶ 1.31THz (10μW) (Kanaya, et al, APEX 5 (2012) 124101)
- ▶ 620GHz (610μW) (Suzuki, et al, IEEE-JSTQE 19(2013) 8500108)
- ▶ 1.40THz (Koyama, et al, APEX 6(2013) 064102)
- ▶ 1.42THz (金谷 他, 通信学会ED研2013年12月)

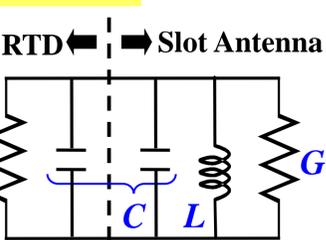
## RTD発振器

### 発振原理

#### RTD + スロットアンテナ



#### 等価回路



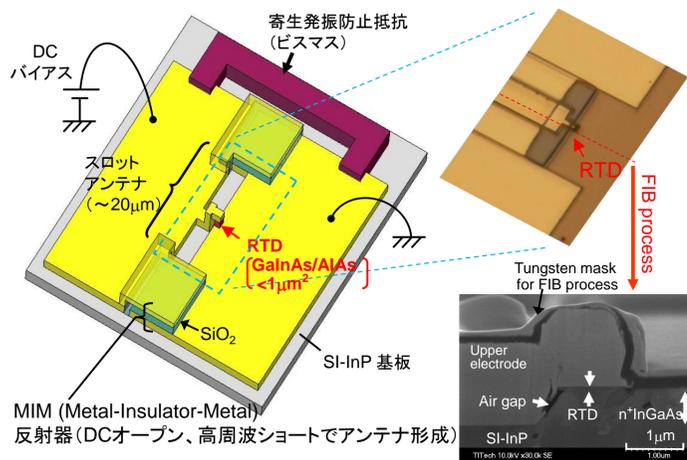
#### 発振の電力条件:

$$G_d > G$$

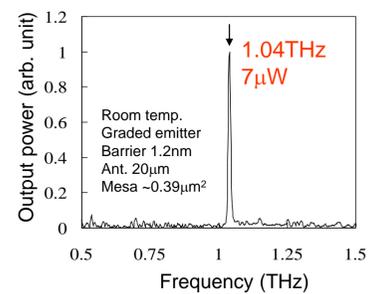
#### 発振周波数:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

### 作製したデバイスの構造



### 発振スペクトル

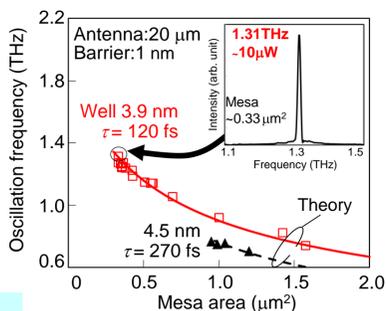
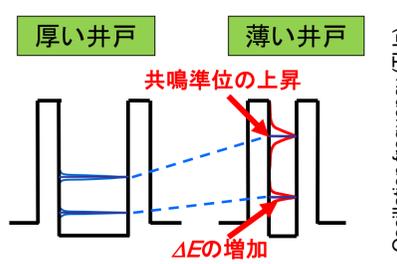


- ▶ 薄層バリアとグレイデッドエミッタの導入による高周波化
- ▶ 半導体電子デバイスで初めて1THzを超える室温発振に成功 (Suzuki, et al, APL 97 (2010) 242102)

## 高周波化・高出力化

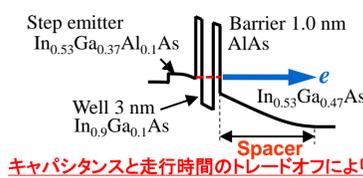
### 高周波化

#### 量子井戸薄層化

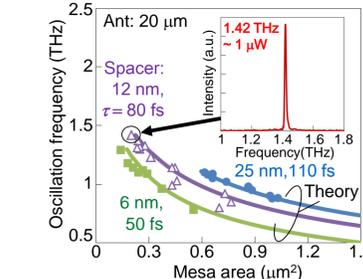


- ▶ 0.7-1.3 THz (10-30 μW) の基本波発振
- ▶ QCLと電子デバイス間のTHzギャップにブリッジ
- ▶ 最高発振周波数1.31 THz (~10 μW)

#### コレクタスペーサー厚最適化



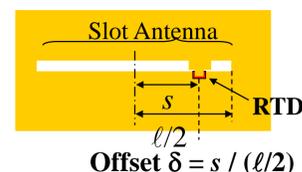
キャパシタンスと走行時間のトレードオフにより最適厚が存在



- ▶ スペーサー層厚12nmにおいて1.42THz室温基本波発振
- ⇒ 半導体電子デバイス最高の周波数

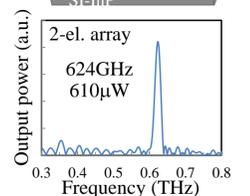
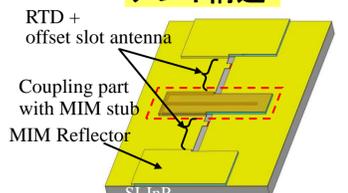
### 高出力化

#### オフセットスロットアンテナ



- ▶ 発振周波数を放射コンダクタンスのピークに一致させ高出力化
- ▶ 初期実験  
• 0.42mW@550GHz (Offset  $\delta=89\%$ )  
• DC-to-RF効率 1.45% (外部回路を除く)
- ▶ アンテナとRTDの構造最適化により >1mWの高出力化の期待

#### アレイ構造

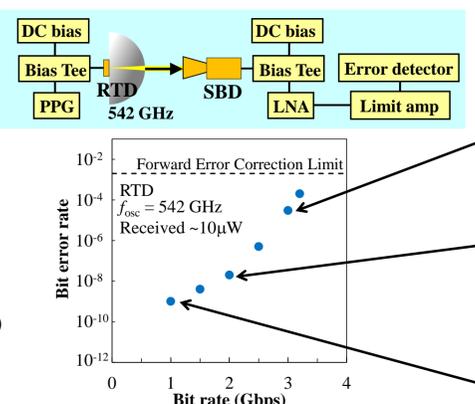
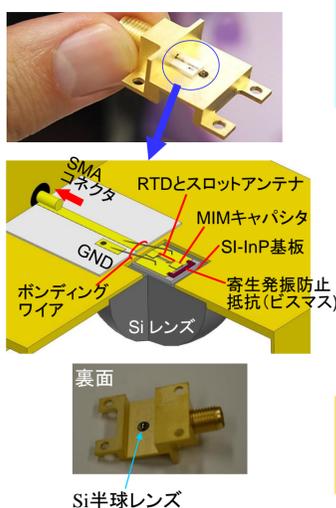


- ▶ 相互注入同期によるコヒーレント電力結合
- ▶ 初期実験 (2素子アレイ)  
0.6mW@620GHz,  
0.27mW@770GHz,  
0.18mW@810GHz

## 無線伝送実験、スペクトル特性

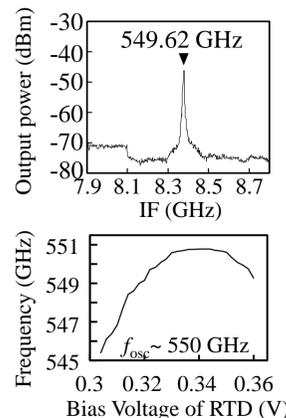
### 無線伝送の初期実験

#### パッケージ化



- ▶ 約3.2Gbpsまで訂正可能な誤り率で伝送を達成
- ▶ データ速度はRTDの変調信号導入回路で制限
- ⇒ 変調回路の構造最適化でより高速変調可能

### VCO特性



- ▶ バイアスによる周波数変化
- ▶ PLLによる周波数制御に有用

## まとめ

#### RTDによる室温THz発振器

- ☞ スロットアンテナ集積RTD発振器
- ☞ 高周波化へ向けた構造
  - ▶ 量子井戸薄層化とスペーサー層厚最適化による電子遅延時間の短縮
  - ⇒ 電子デバイスで最高の1.42THz室温発振達成
  - ⇒ 構造最適化でさらに高周波化(~2THz)可能
- ☞ 高出力化へ向けた構造
  - ▶ オフセット構造により0.42mW@550GHz
  - ▶ アレイ化による出力合成で0.61mW@620GHz
- ☞ 無線伝送実験
  - ▶ RTDの直接変調で~3Gbpsまでのデータ伝送達成
  - ⇒ 変調回路の構造最適化で高速化が可能
- ☞ スペクトル特性
  - ▶ VCO特性 ⇒ PLL, 周波数直接変調に有用

➡ RTD はコンパクトなTHz光源の有力候補