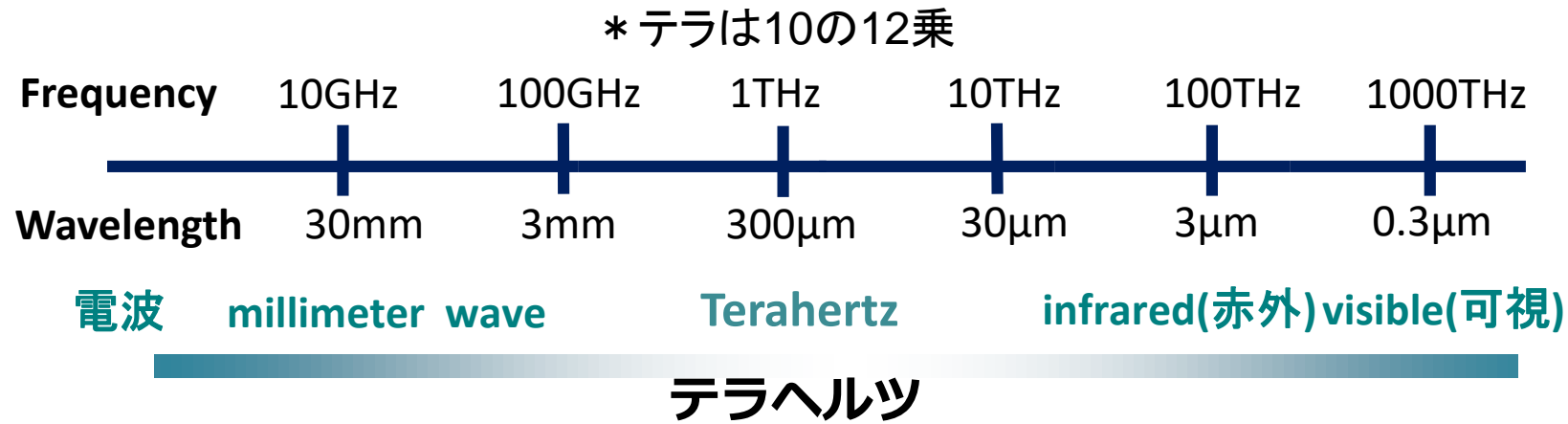


Tokyo Tech

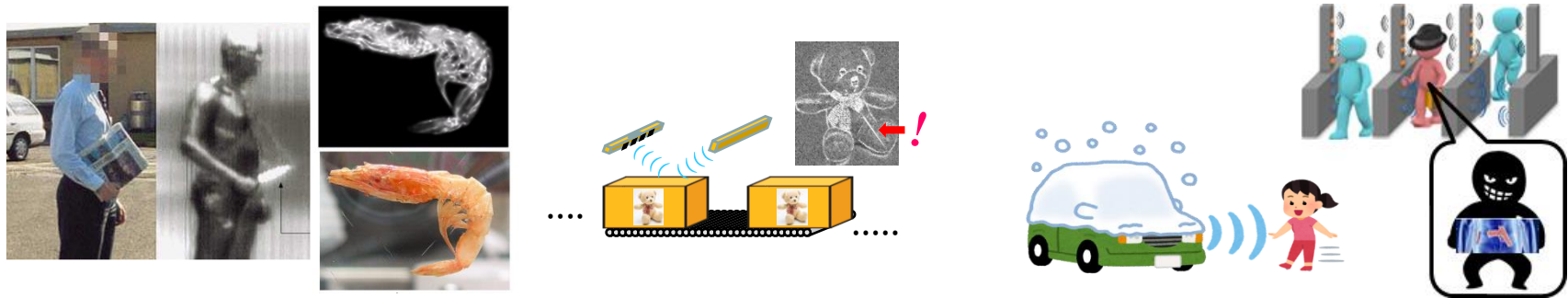
100kV電子ビーム描画装置を用いた 3次元構造を有するテラヘルツ帯発振デバイスの形成

- テラヘルツとは
- 共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器
- これまでのデバイス作製結果
- 3次元的な構造形成手法
- まとめ

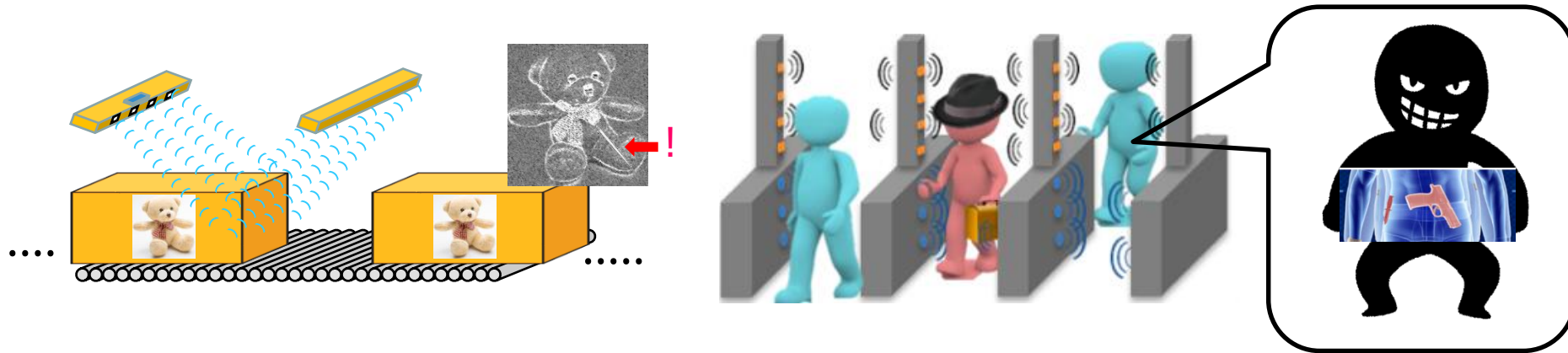
テラヘルツって？



- ◇ 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・・・）、
セキュリティ、医療、大容量通信・信号処理・・・



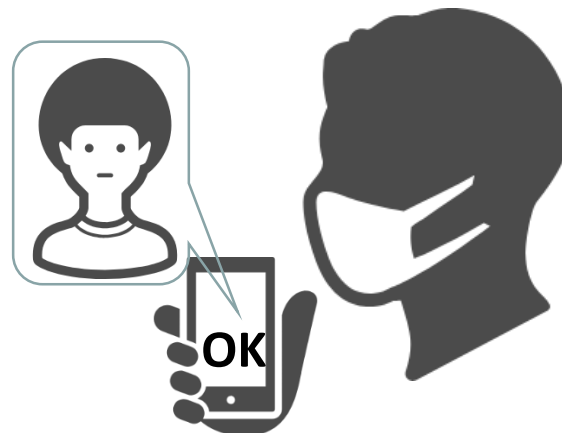
製品ライン、空港、スタジアム等での3次元透過検査



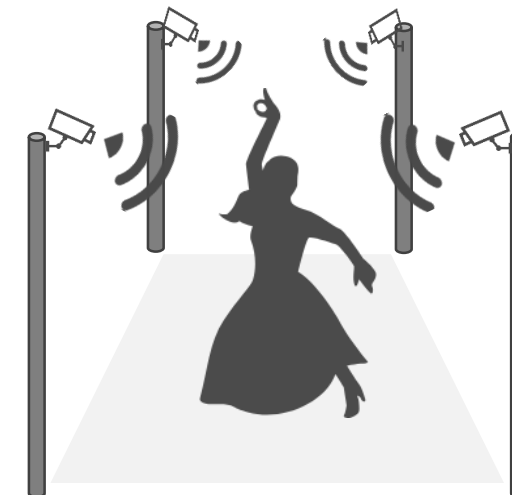
不良視界下でも 検知可能なレーダー



3次元顔認証



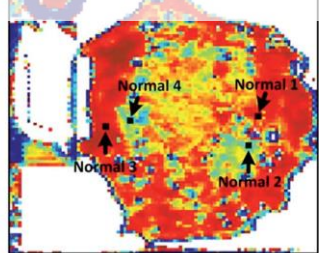
モーションキャプチャ



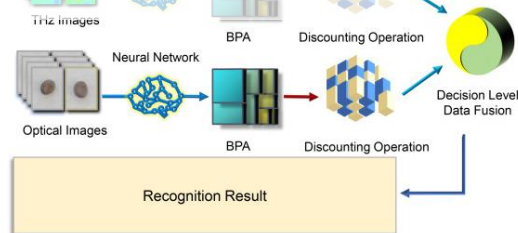
テラヘルツへの新たな医療応用

AIアシストテラヘルツイメージング

癌化箇所の特定

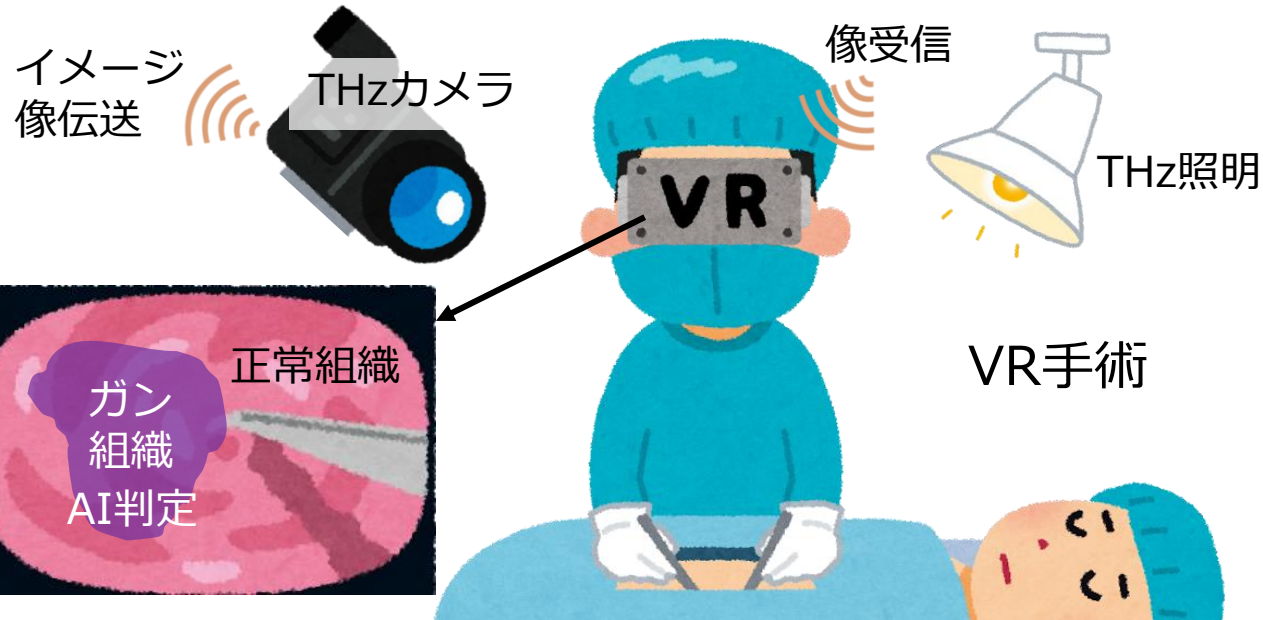


AIによる組織判別



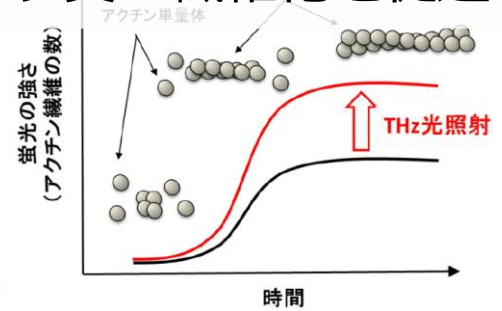
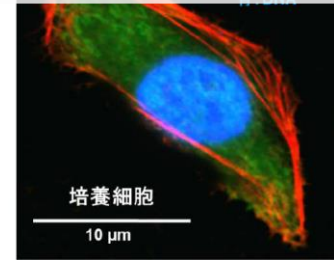
Yu, et al., RSC Advances 9354, 2019

Xiong, et al., iScience 24, 103316, 2021



照射による細胞機能の制御

アクチンタンパク質の繊維化を促進



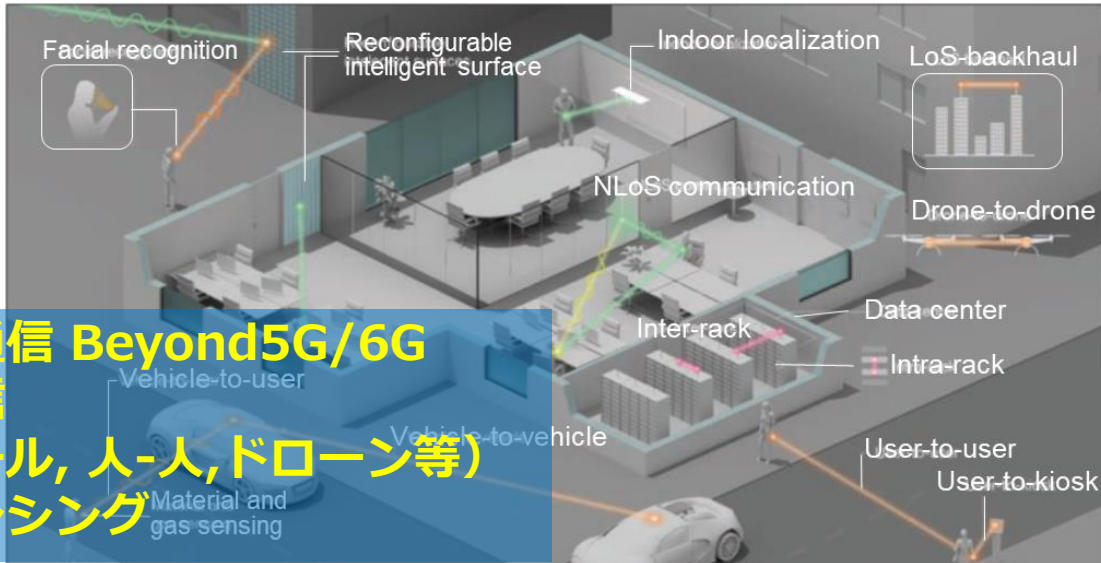
Yamazaki, et al, Sci. Rep. 8, 9990 (2018)

テラヘルツ絆創膏



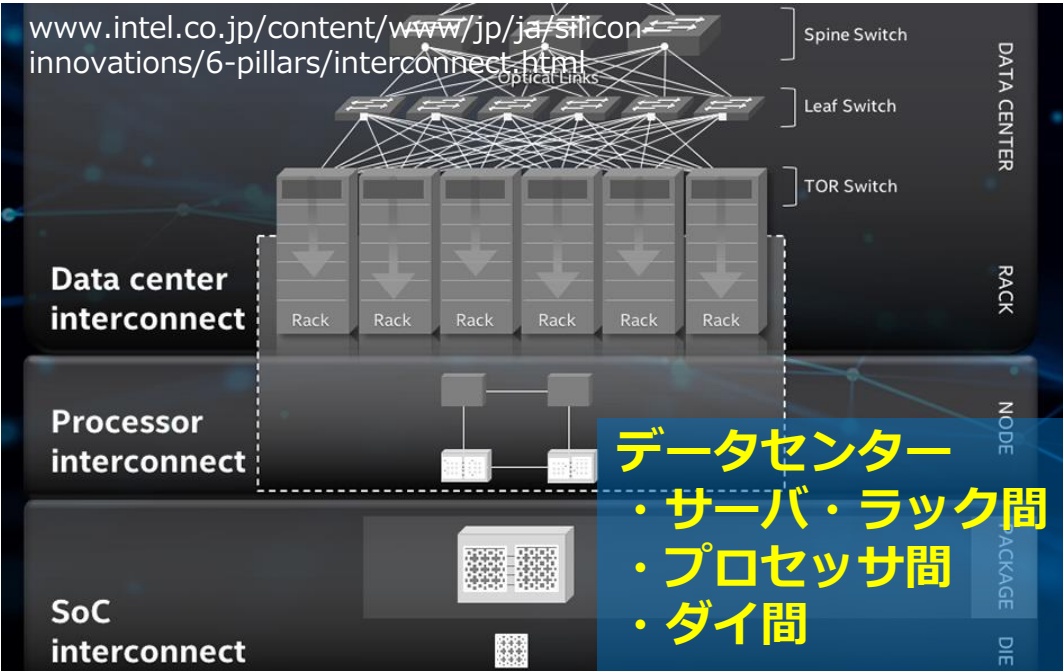
高出力コヒーレント動作、>2THz広範囲周波数カバー、高感度検出などが新たに必要

未来の通信・インターフェース



Sariedeen, et al, IEEE Com. Magazine, 69, May 2020

未来の情報通信 Beyond5G/6G
 ・新たな通信 (バックホール, 人-人, ドローン等)
 ・多様なセンシング



- 未来の情報通信 (Beyond5G/6G) や空間コンピュータ、データセンターなどでは、**新たな“モノ-モノをつなぐ”、“見る”技術が求められており、広帯域・高分解能のテラヘルツへの期待が高まっている**

天体観測



Tokyo Tech

ALMA望遠鏡

宇宙から注ぐテラヘルツを
観測。ガスや塵といった今
まで見えなかったものが見
えるように



チリ、アタカマ砂漠



バンド	波長 (mm)	雑音温度	周波数 (GHz)	開発機関	受信器
1	6-8.6	32	35 - 50	ASIAA (Taiwan) / NAOJ (Japan)	HEMT
2	2.6-4.5	47	67 - 116	OSO (Sweden) / NOVA (Netherlands) / INAF (Italy) / NAOJ (Japan)	HEMT
3	2.6-3.6	60	84 - 116	HIA (Canada)	SIS
4	1.8-2.4	82	125 - 163	NAOJ (Japan)	SIS
5	1.4-1.8	105	163 - 211	OSO (Sweden) / NOVA (Netherlands)	SIS
6	1.1-1.4	136	211 - 275	NRAO (US)	SIS
7	0.8-1.1	219	275 - 373	IRAM (France)	SIS
8	0.6-0.8	292	385 - 500	NAOJ (Japan)	SIS
9	0.4-0.5	261	602 - 720	NOVA (Netherlands)	SIS
10	0.3-0.4	344	787 - 950	NAOJ (Japan)	SIS



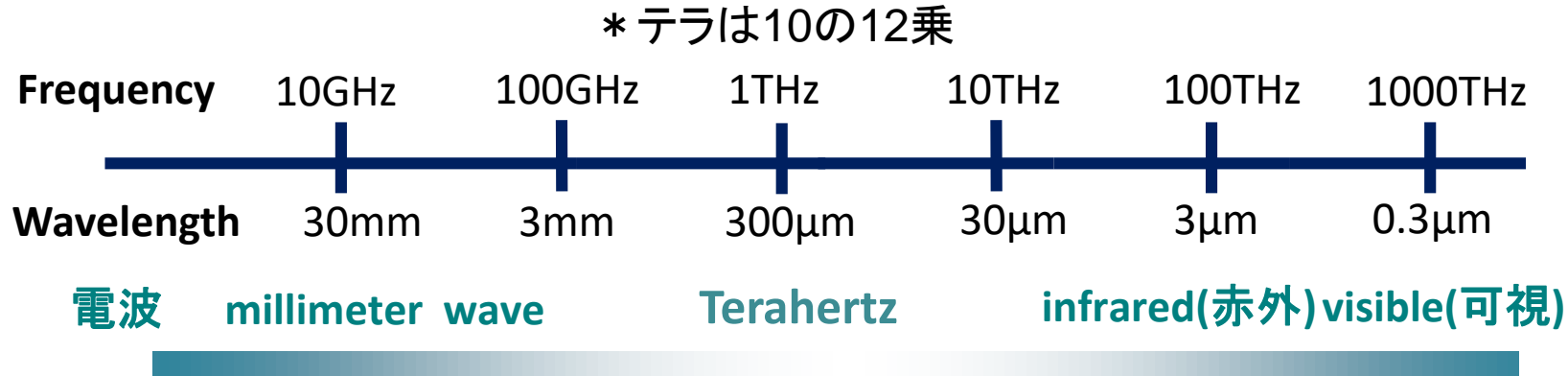
ブラックホール
の観測



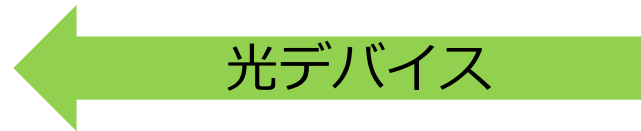
テラヘルツによる
132億光年先の
酸素と塵の発見
→初期宇宙の観測

半導体のテラヘルツ信号源を作るには？

半導体デバイスは小型で使いやすい！半導体でテラヘルツが出せたら良い！



**1THz→時間1ピコ秒、エネルギー4meV (温度~50K)
デバイスの極限領域！**



* 1eV(電子ボルト)
=1.6 × 10⁻¹⁹ジュール

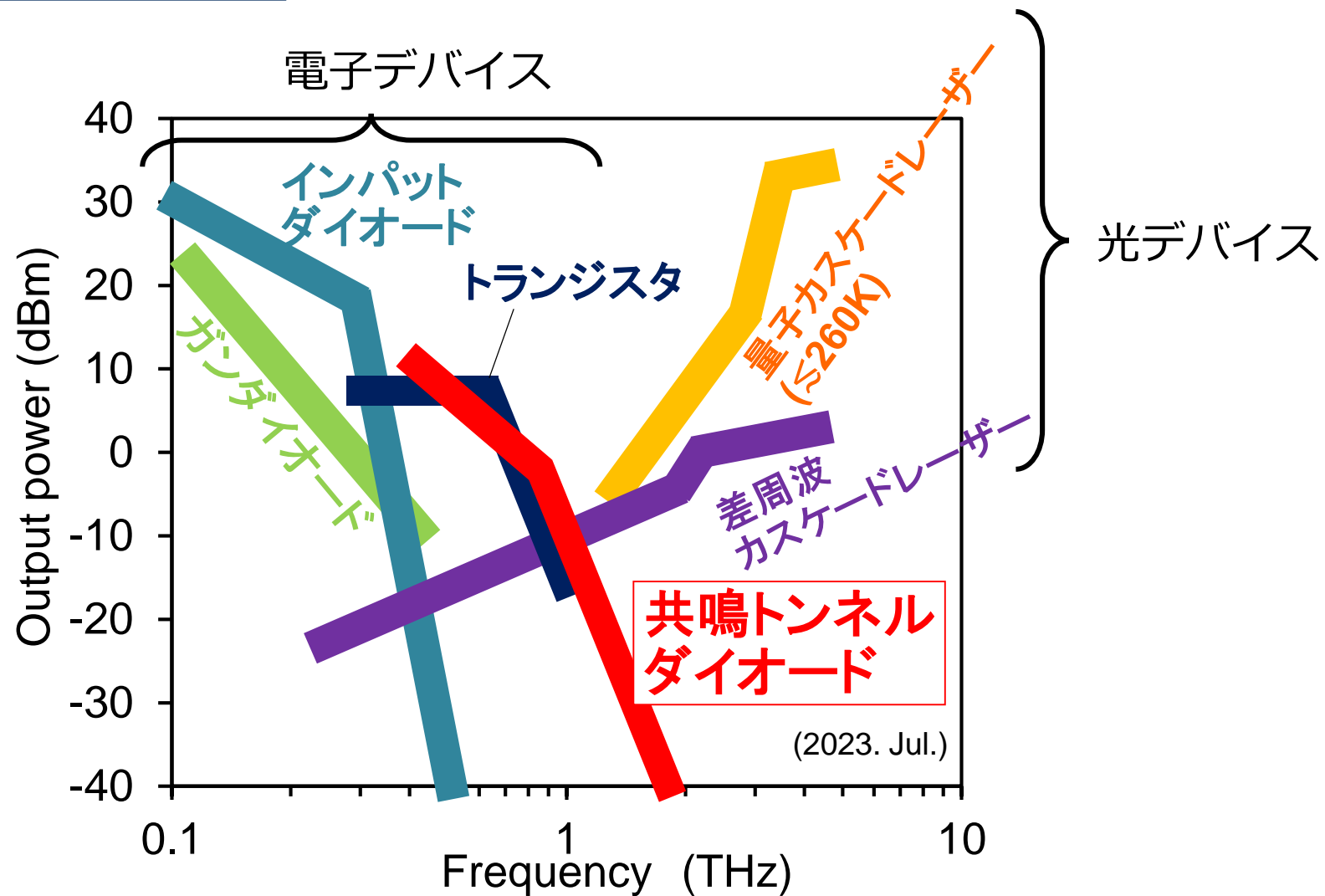
アプローチ手法

- 速く電子を半導体中で走らせる
- 余計な抵抗や容量を減らす

アプローチ手法

- 半導体の積層構造 (超格子) の工夫や低温動作などで、微小エネルギーの遷移を実現

半導体テラヘルツ信号源



共鳴トンネルダイオードは世界で一番早いアクティブ電子デバイス、2THz信号発生

共鳴トンネルダイオードの歴史

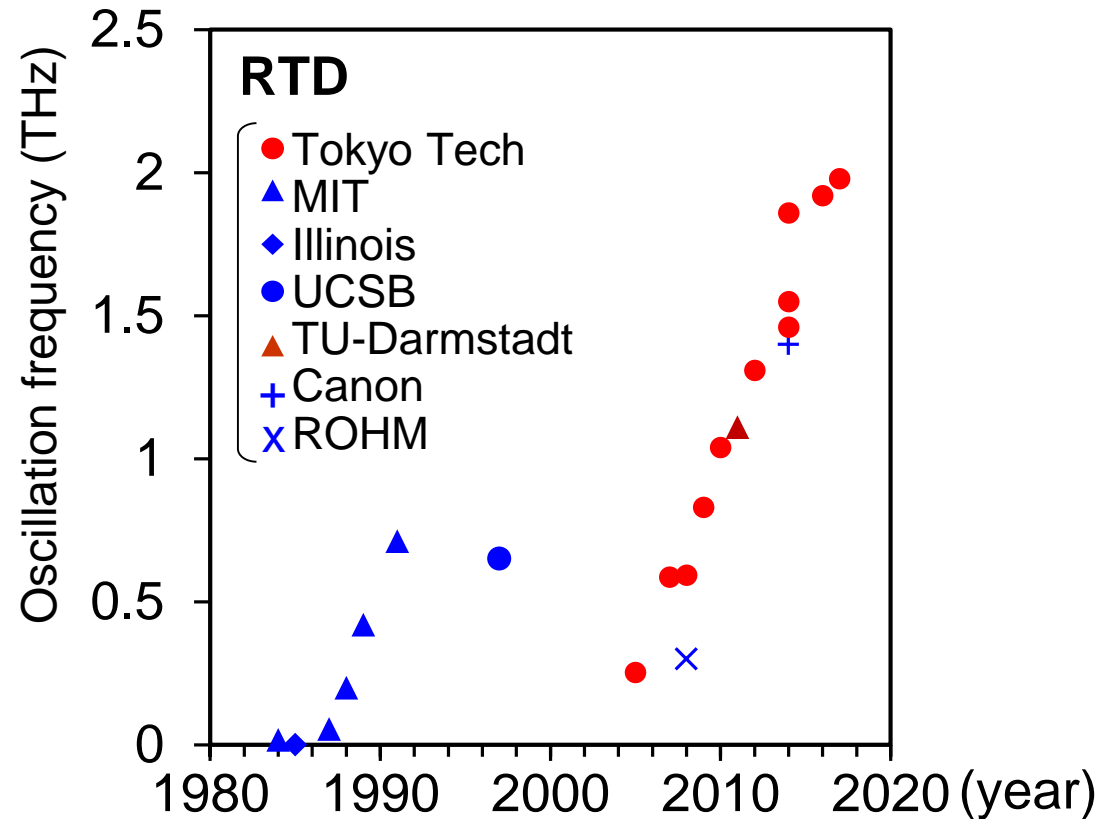


RTD

- 1973** Proposal (Tsu and Esaki)
- 1974** First operation @ 77K, GaAs/GaAlAs (Chang, *et al*)
- 1985** Room-temperature operation GaAs/GaAlAs (Tsuchiya, *et al*)
- 1987** InGaAs/AlAs RTD (Inata, *et al*)

RTD 発振器

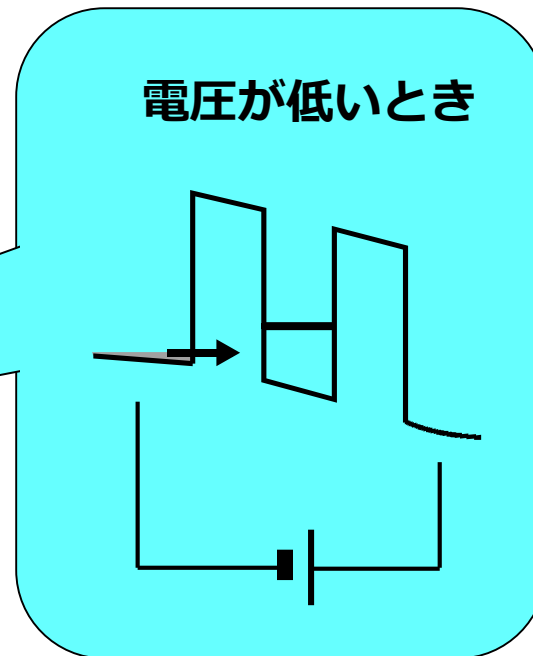
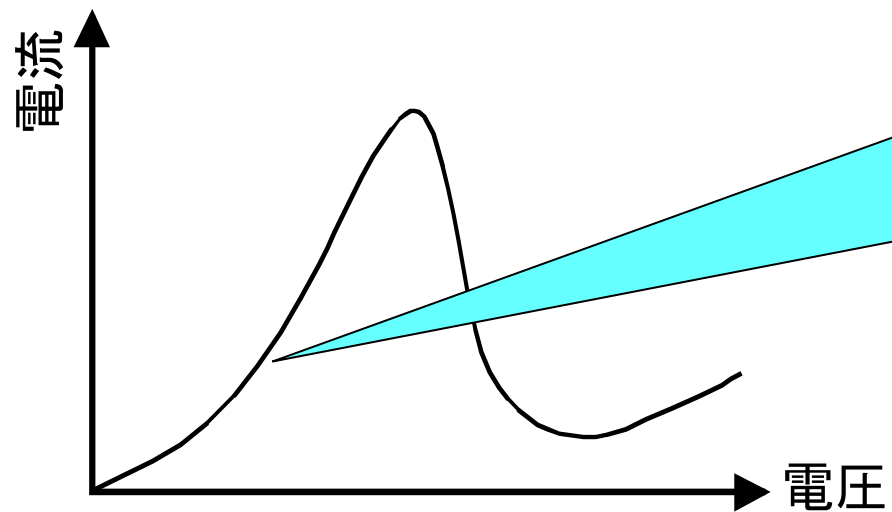
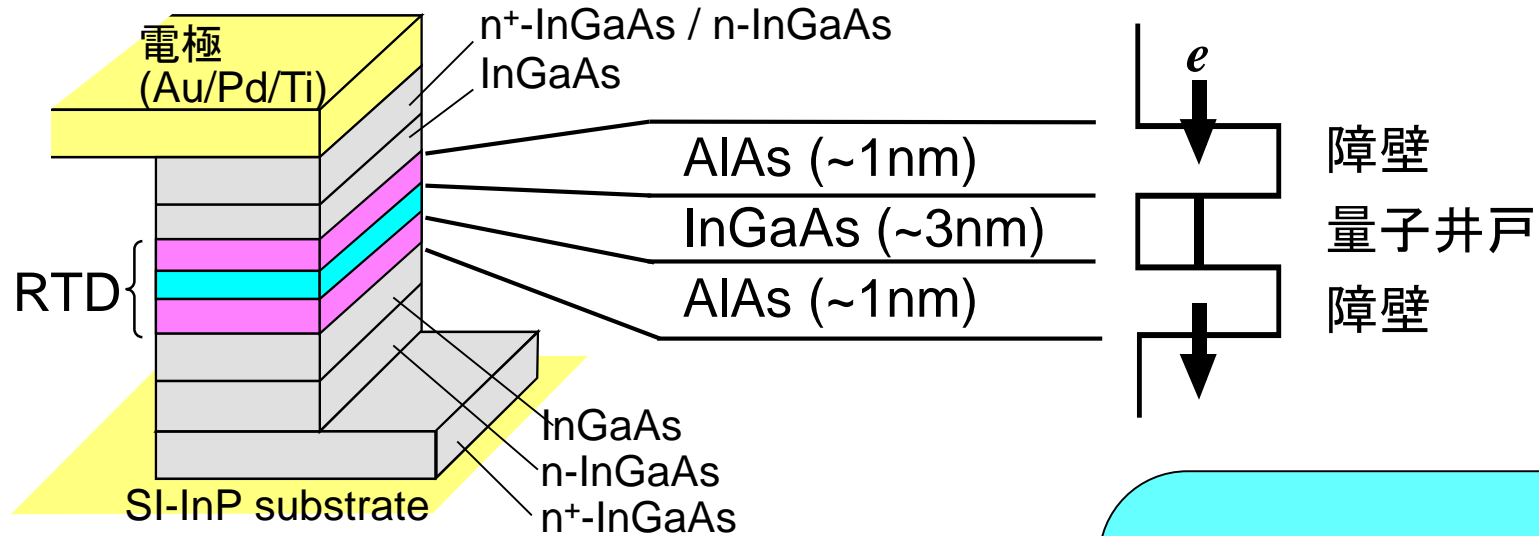
- 1984** 18GHz @ $\leq 200\text{K}$, GaAs/GaAlAs Integrated into coaxial cable (Sollner, *et al*)
- 1985** 420GHz @ R.T., GaAs/GaAlAs Waveguide (Brown, *et al*)
- 1991** 712GHz @ R.T., InSb/InAlSb Waveguide (Brown, *et al*)
- 1997** 650GHz @ R.T., InGaAs/AlAs Planar slot array (Reddy, *et al*)



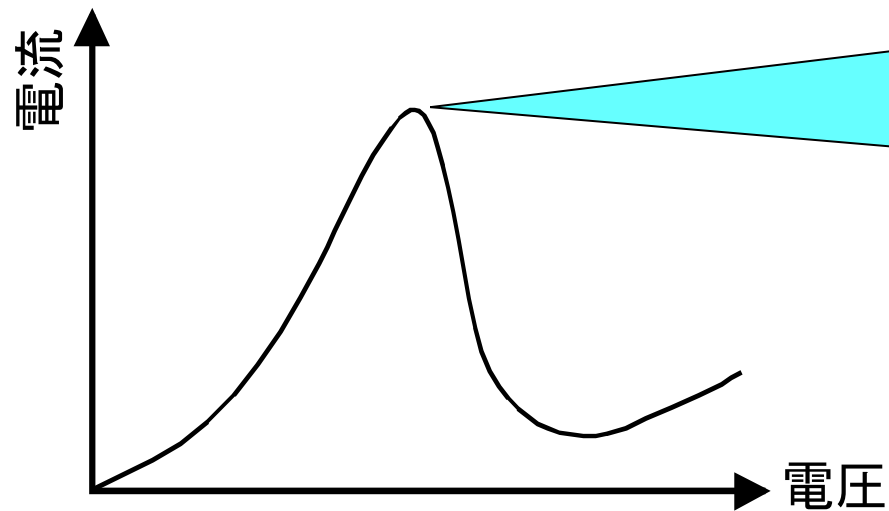
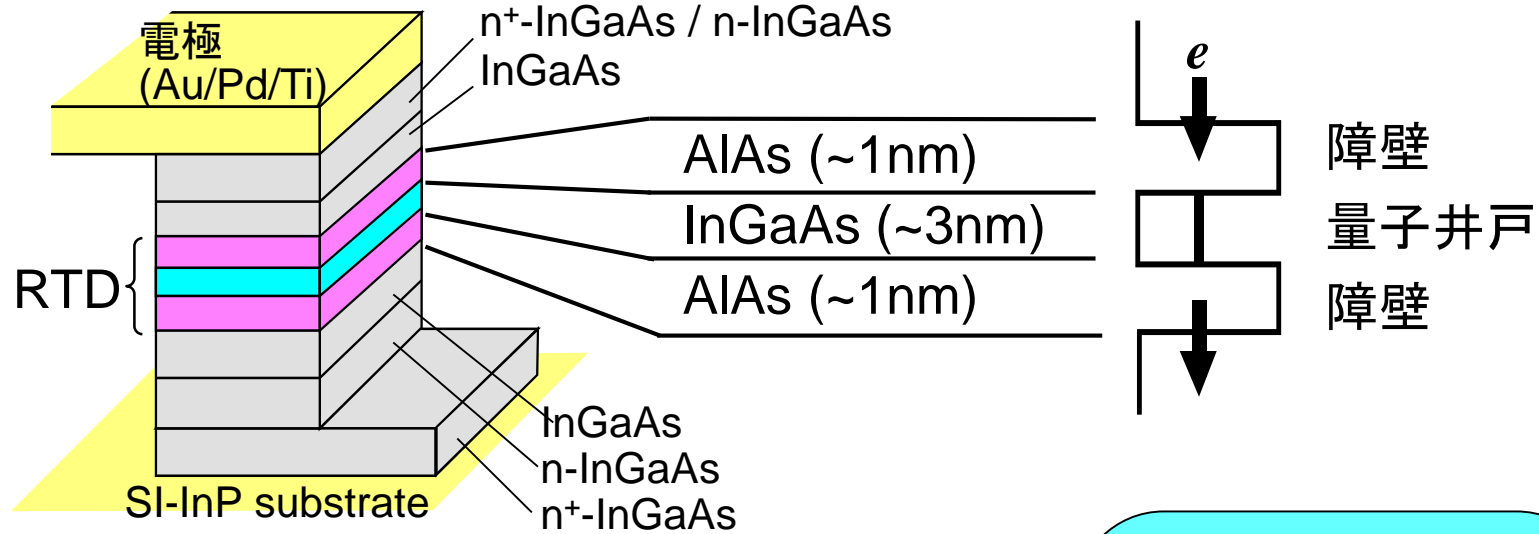
2010 1.04THz@R.T., InGaAs/AlAs Planar slot antenna (Suzuki, Asada, *et al*)

2017 1.98THz@R.T., InGaAs/InAs Planar slot antenna (Izumi, Suzuki, Asada)

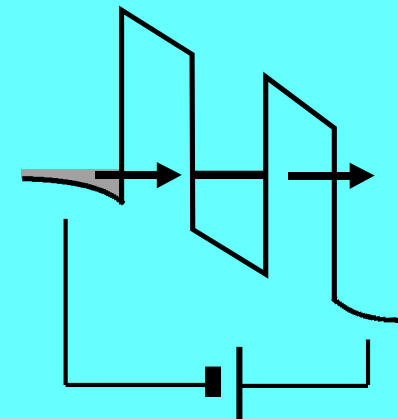
共鳴トンネルダイオード (RTD)



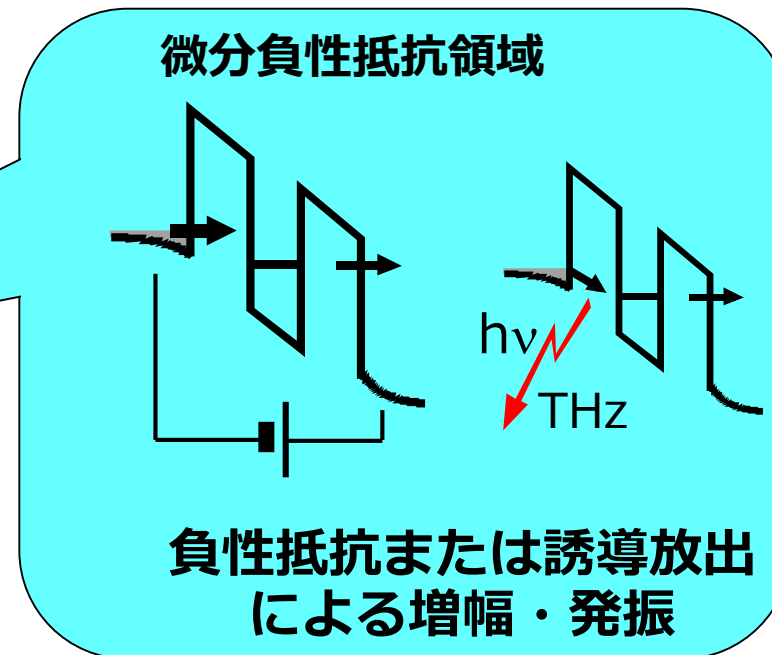
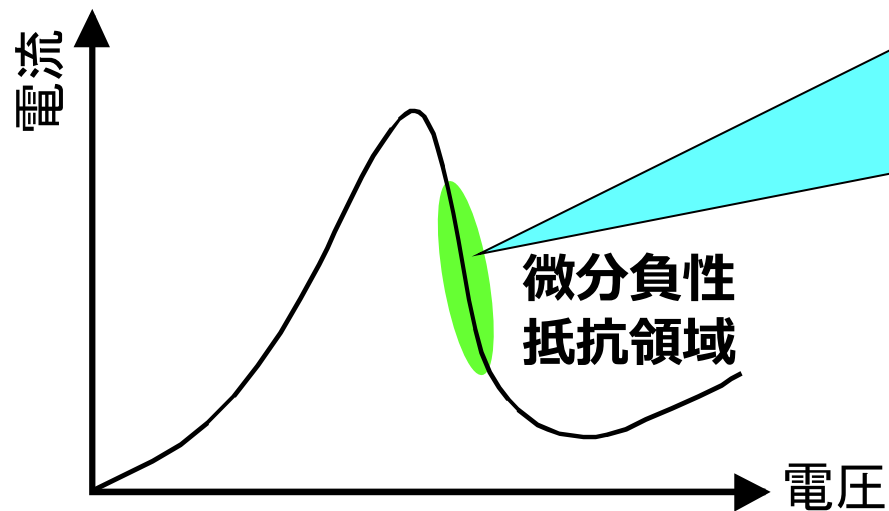
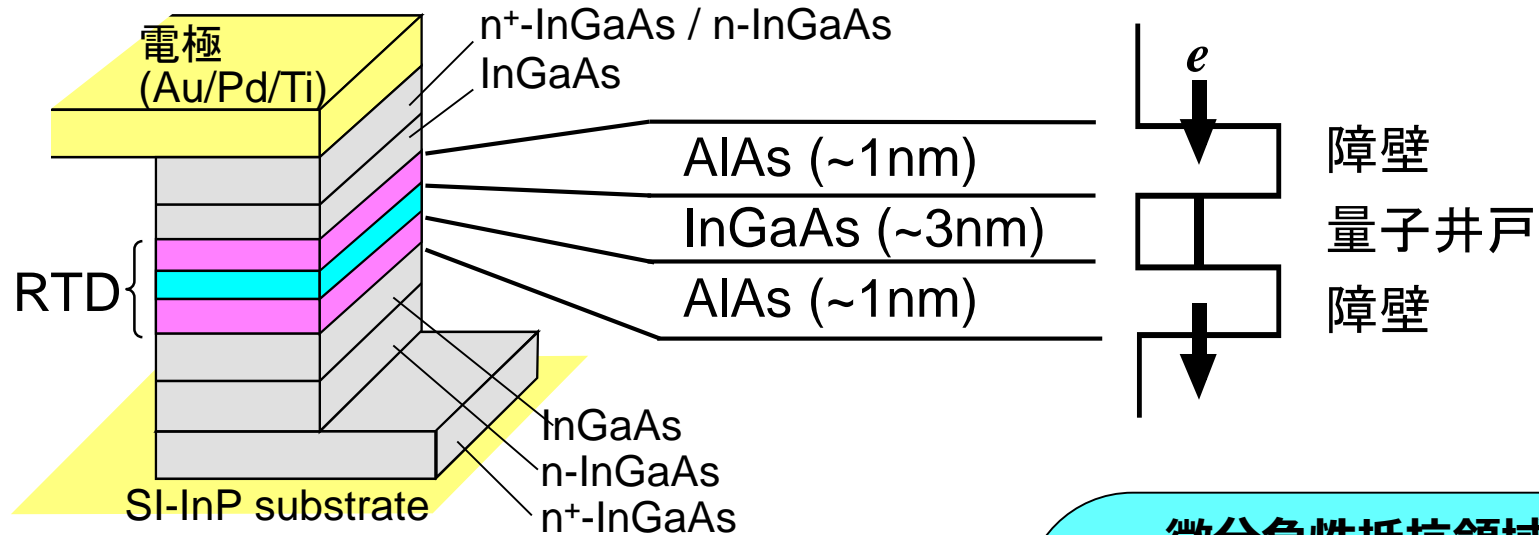
共鳴トンネルダイオード (RTD)



電流ピーク点

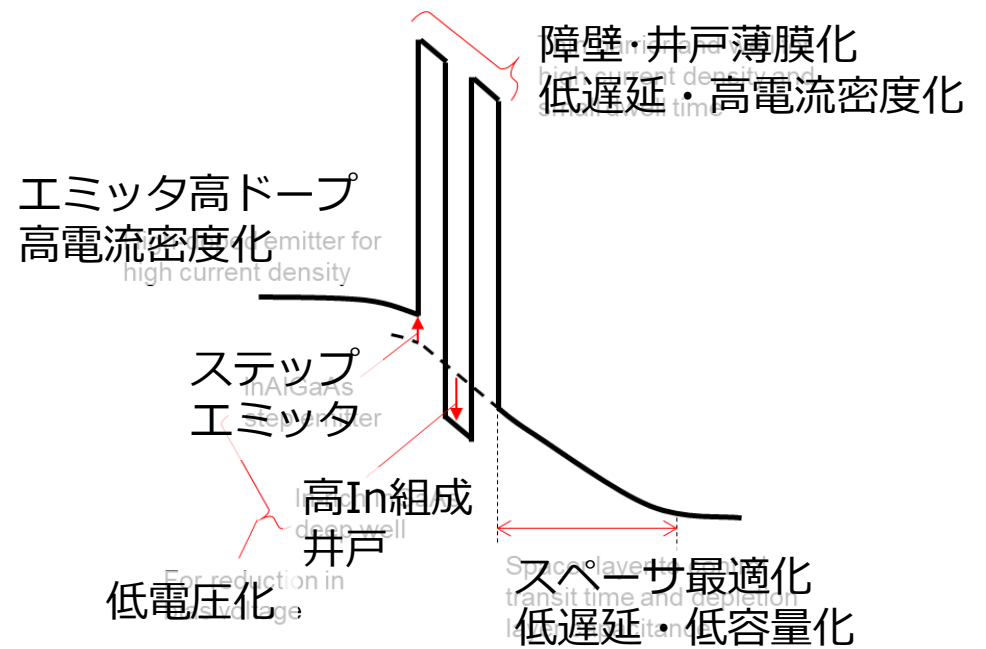
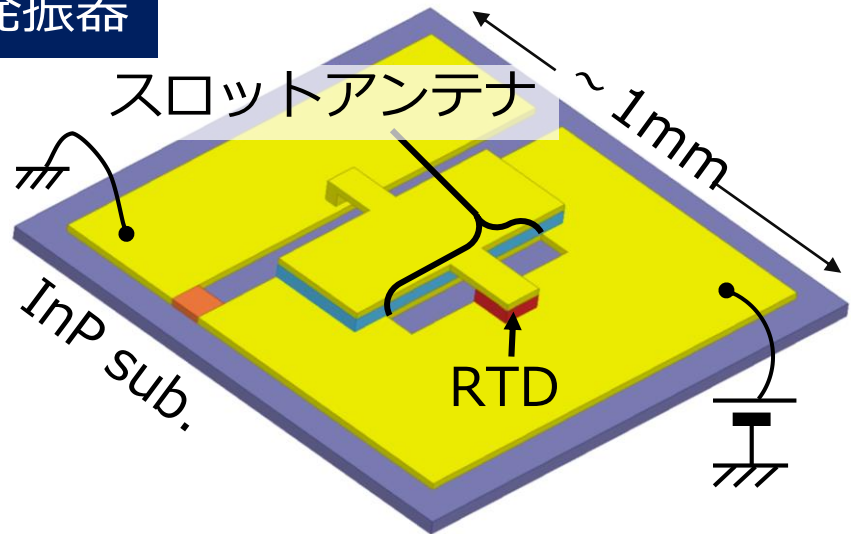


共鳴トンネルダイオード (RTD)



これまでの研究@東工大

RTD発振器



RTD構造

電流密度
3mA/μm²

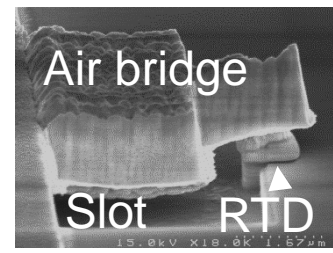
障壁薄膜化

スペーサ最適化

ワイドエミッタ・薄膜井戸

放熱構造

電流密度 世界最高 → 40-50mA/μm²



高周波化

スロットアンテナ
高電流密度化

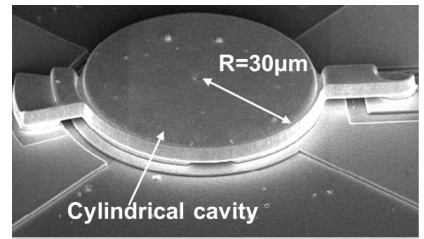
障壁薄膜化

薄膜井戸

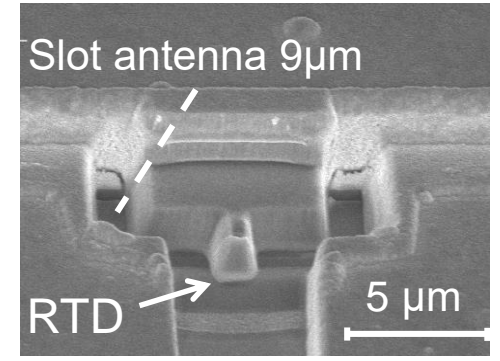
スロットアンテナ短縮

厚膜電極低損失化

世界最高 → 2THz



空洞共振器で>3THz可能



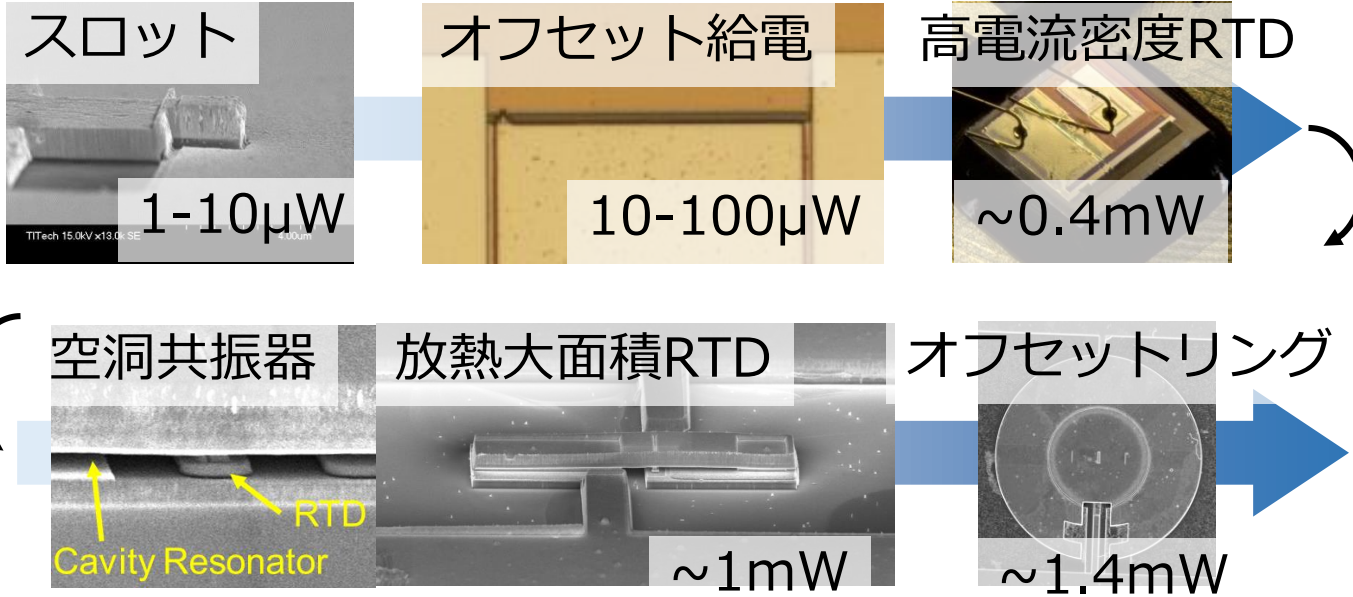
これまでの研究@東工大



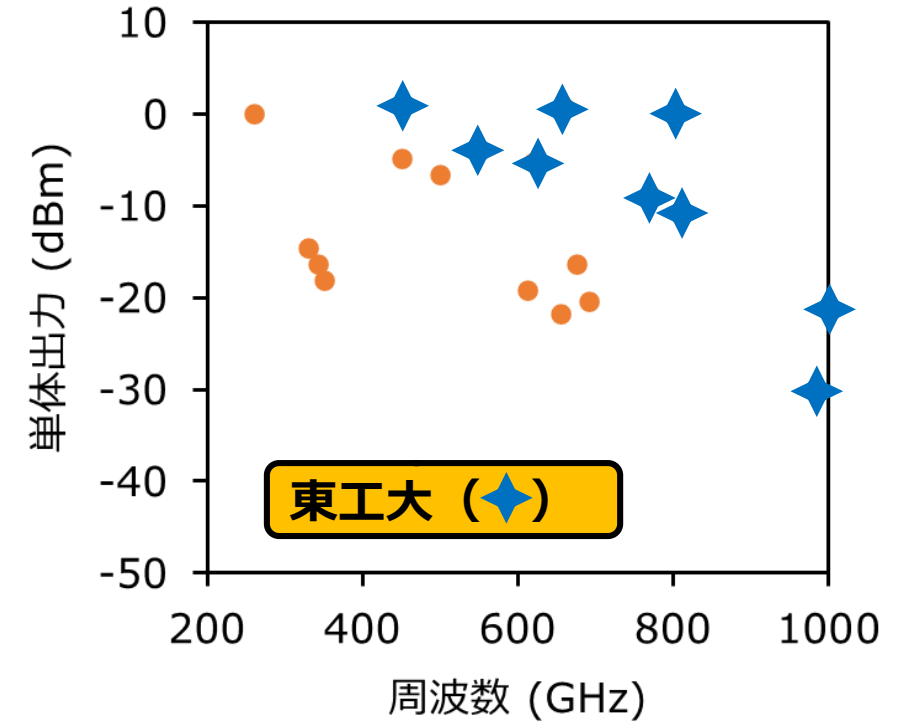
Tokyo Tech

高出力化

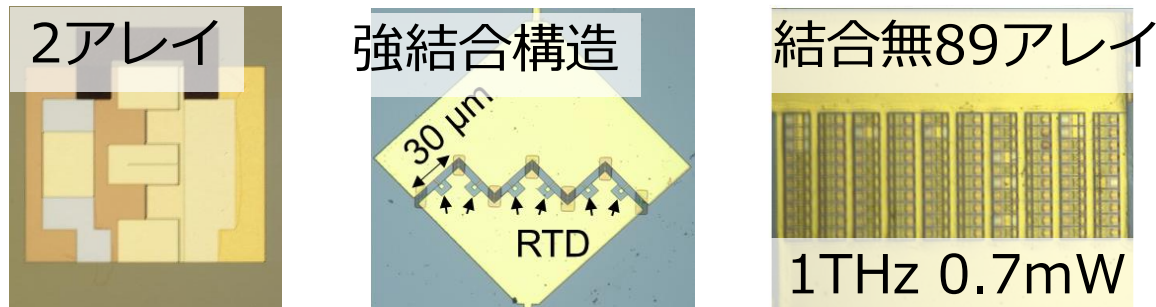
・素子単体の高出力化



>400GHzで世界最高の単体出力

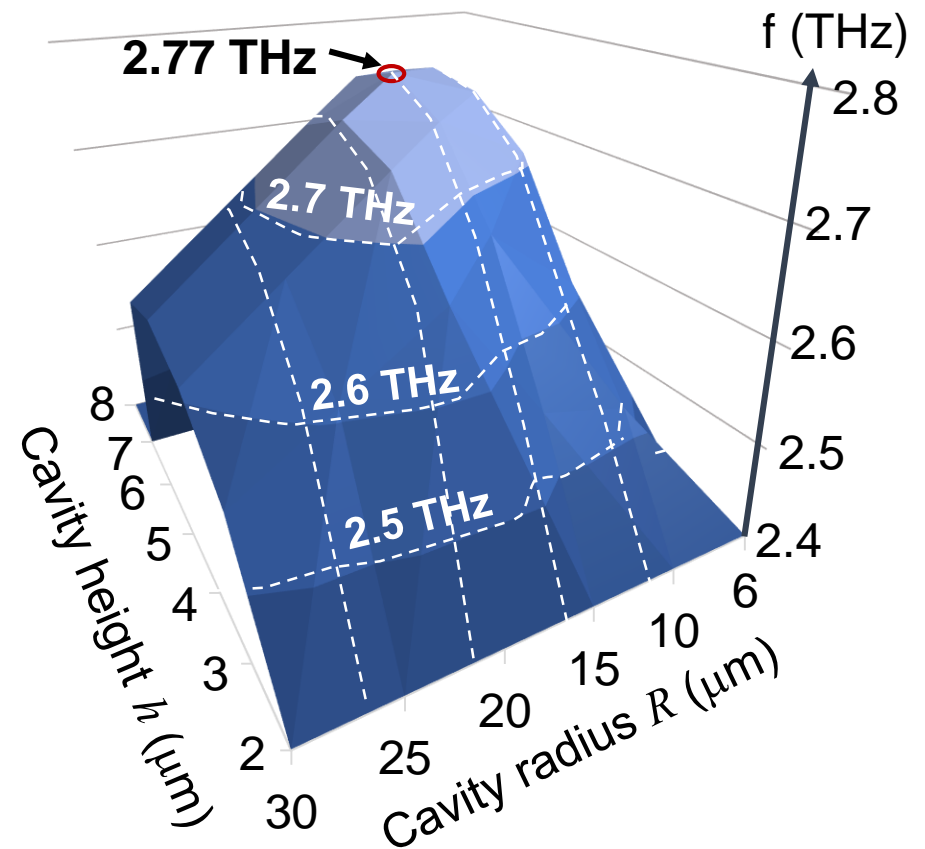
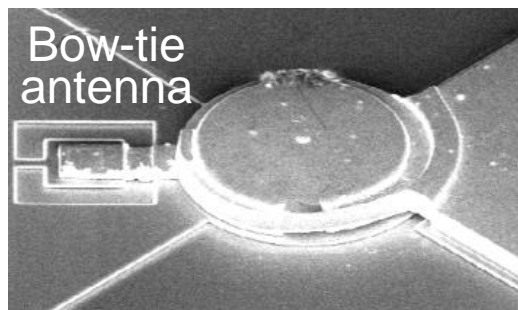
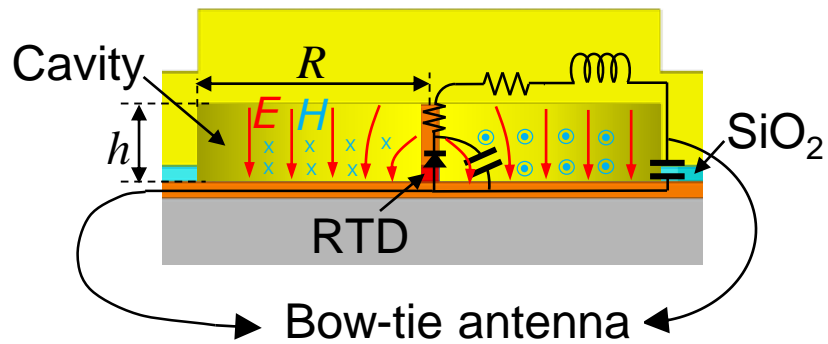
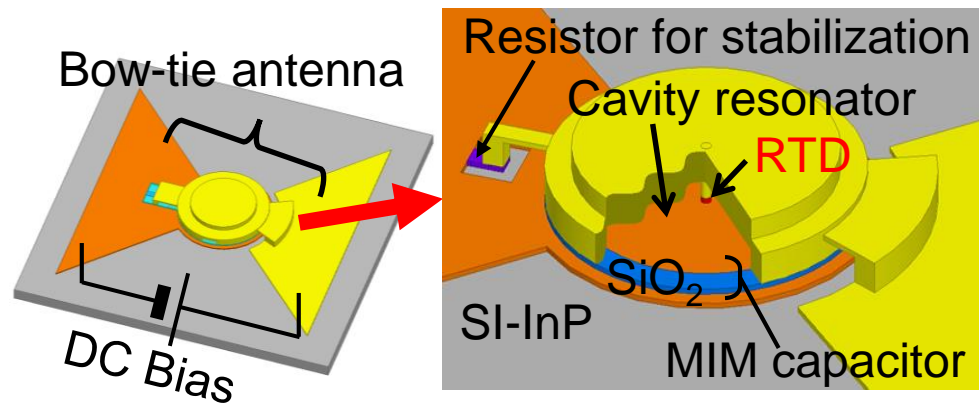


・アレイ化



従来のスロット構造から空洞共振器構造に変更することにより大幅な特性向上が可能
→3次元的な構造形成が必要

高周波のための円筒形空洞共振器

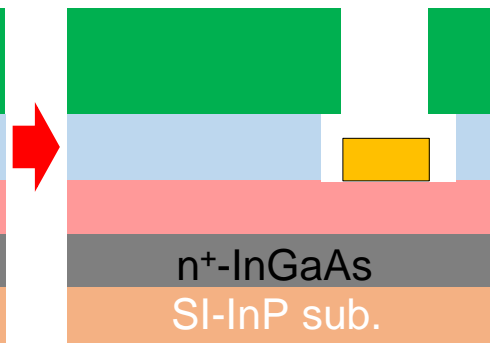
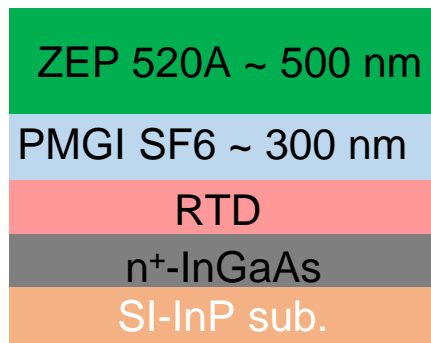


- ▶ 低損失、低インダクタンスの円筒空洞共振器構造
- ▶ 構造最適化により約2.8 THzまで発振可能

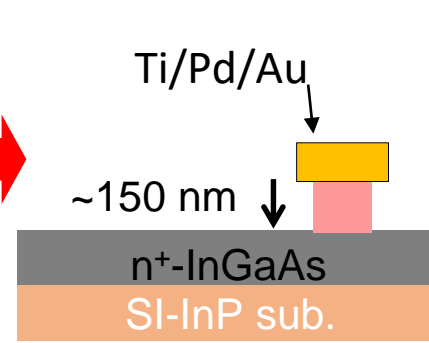
(Bezhko, *et al*, JJAP, 59, 032004, 2020; JJAP, 60, 121002, 2021)

空洞共振器の形成プロセス

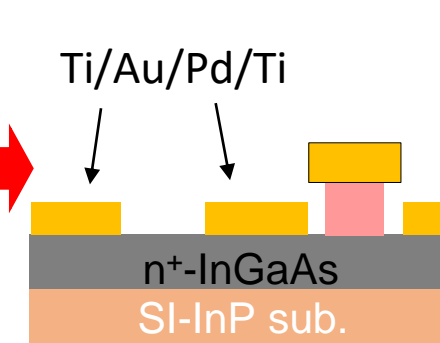
1. RTD Top electrode evaporation (EB evaporation)



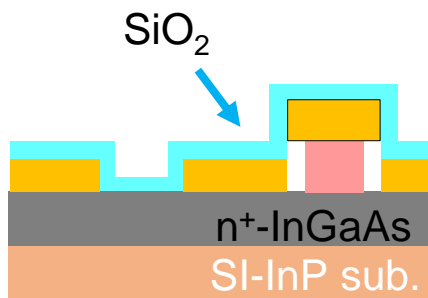
2. RTD mesa fabrication (Wet etching)



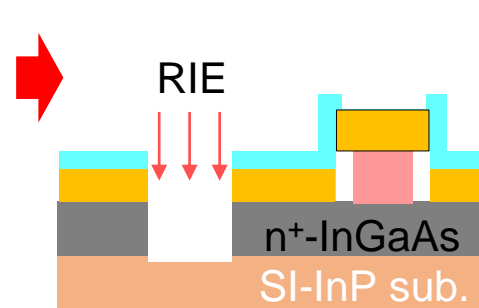
3. Antenna and bottom electrode (EB evaporation)



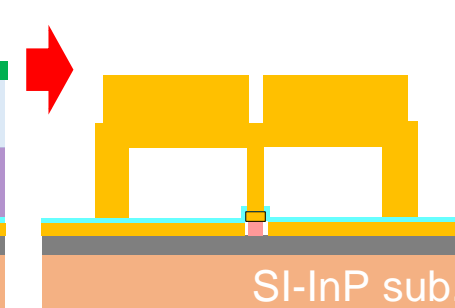
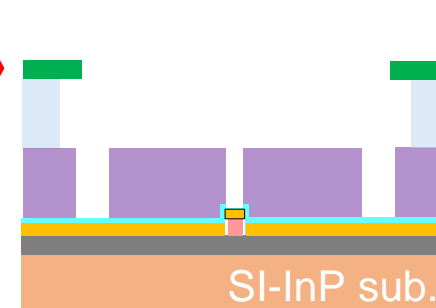
4. Isolation by SiO₂ film (PCVD)



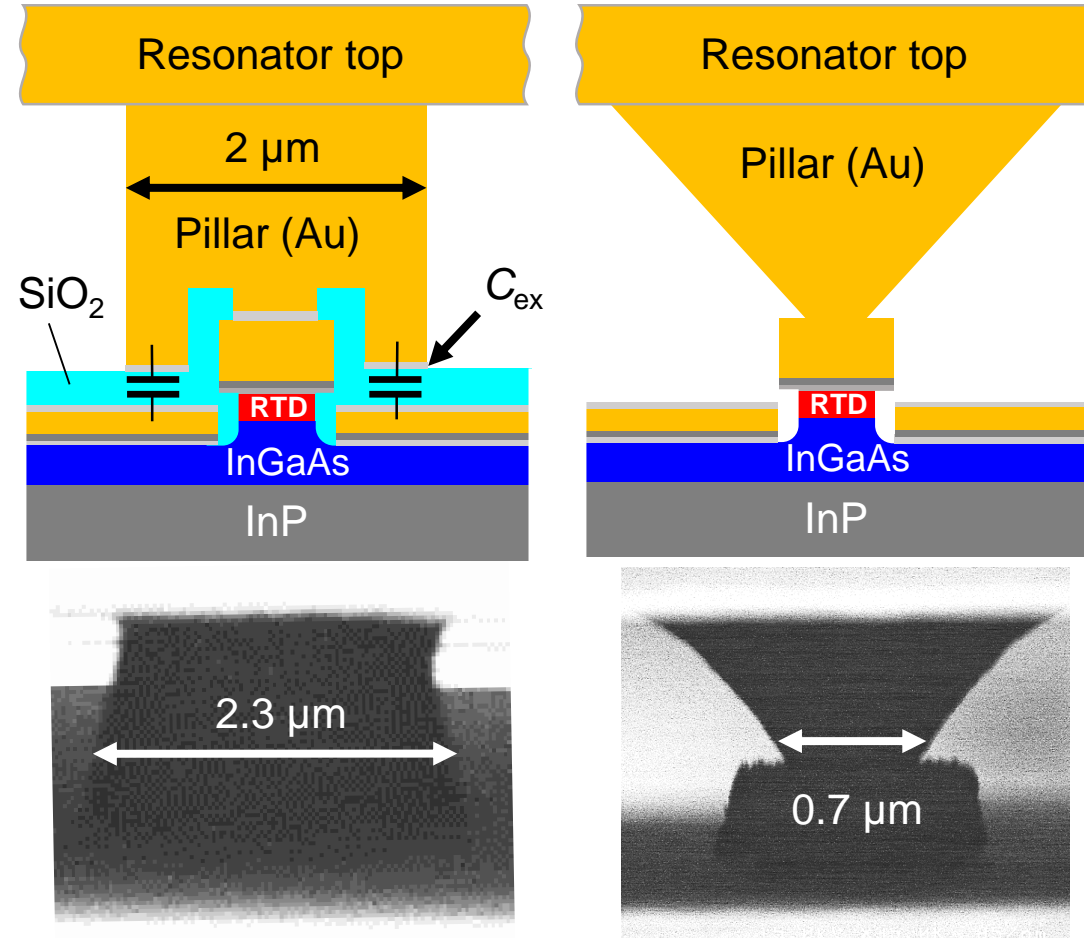
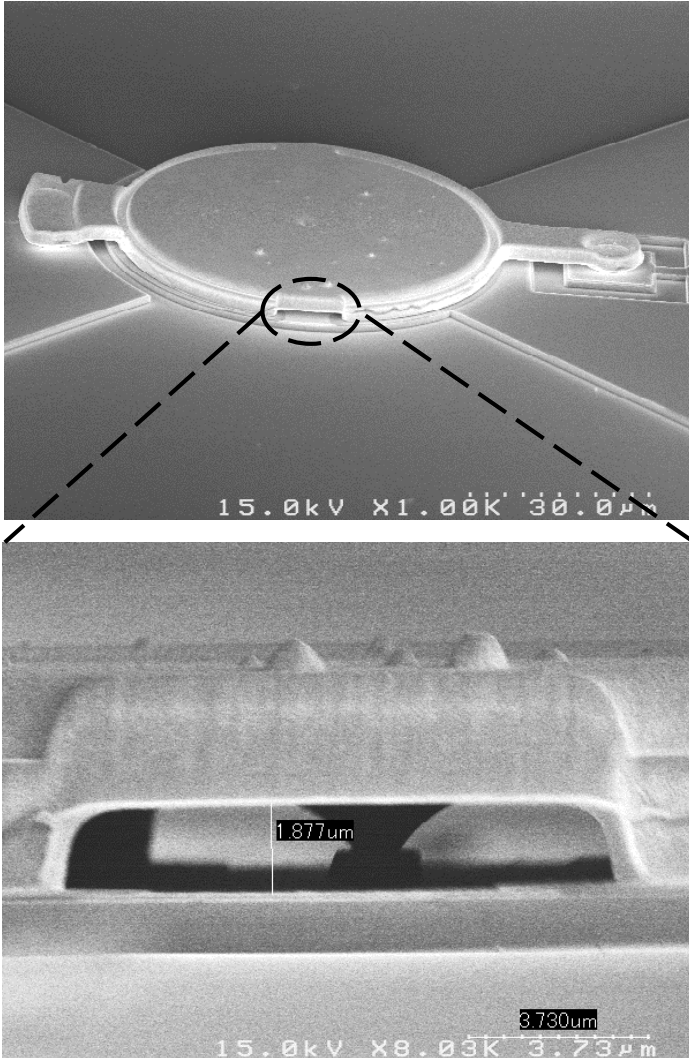
5. Element separation (RIE)



6. Resonant cavity (3-layer resist EB evaporation)

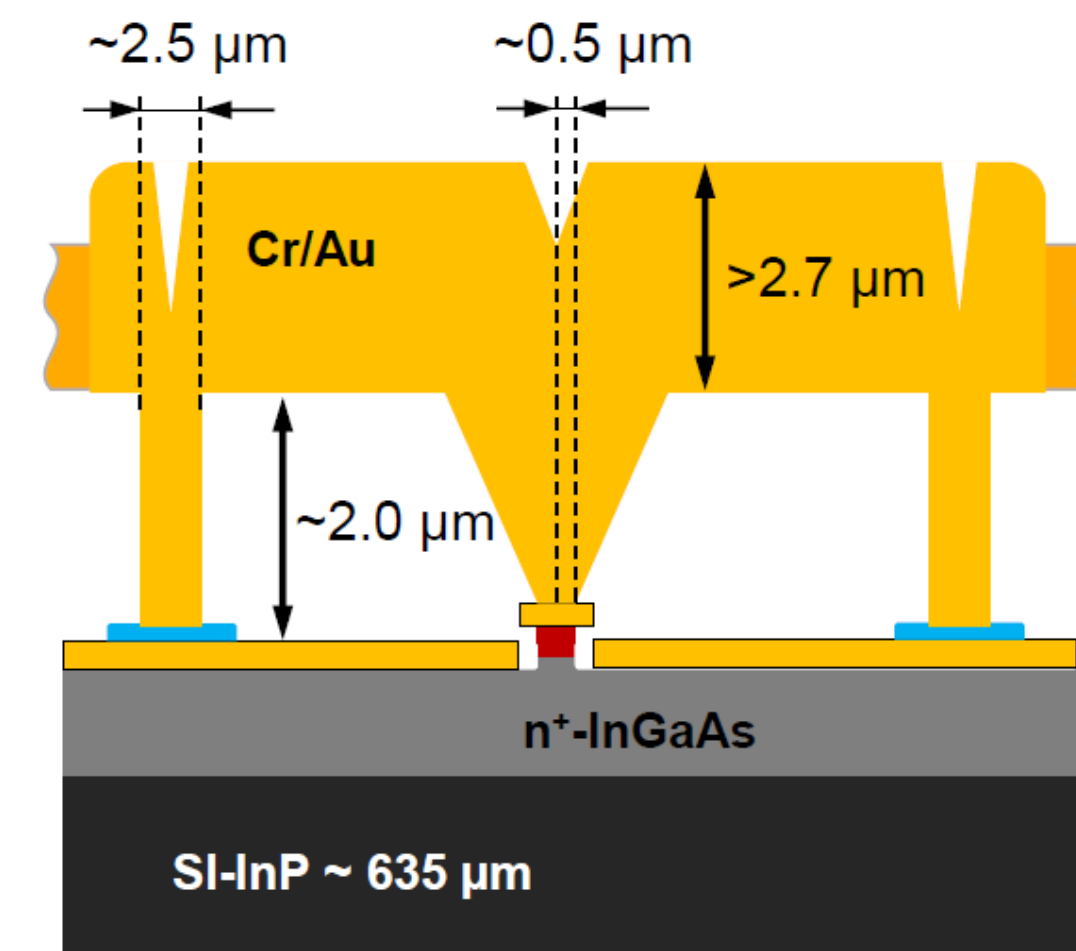
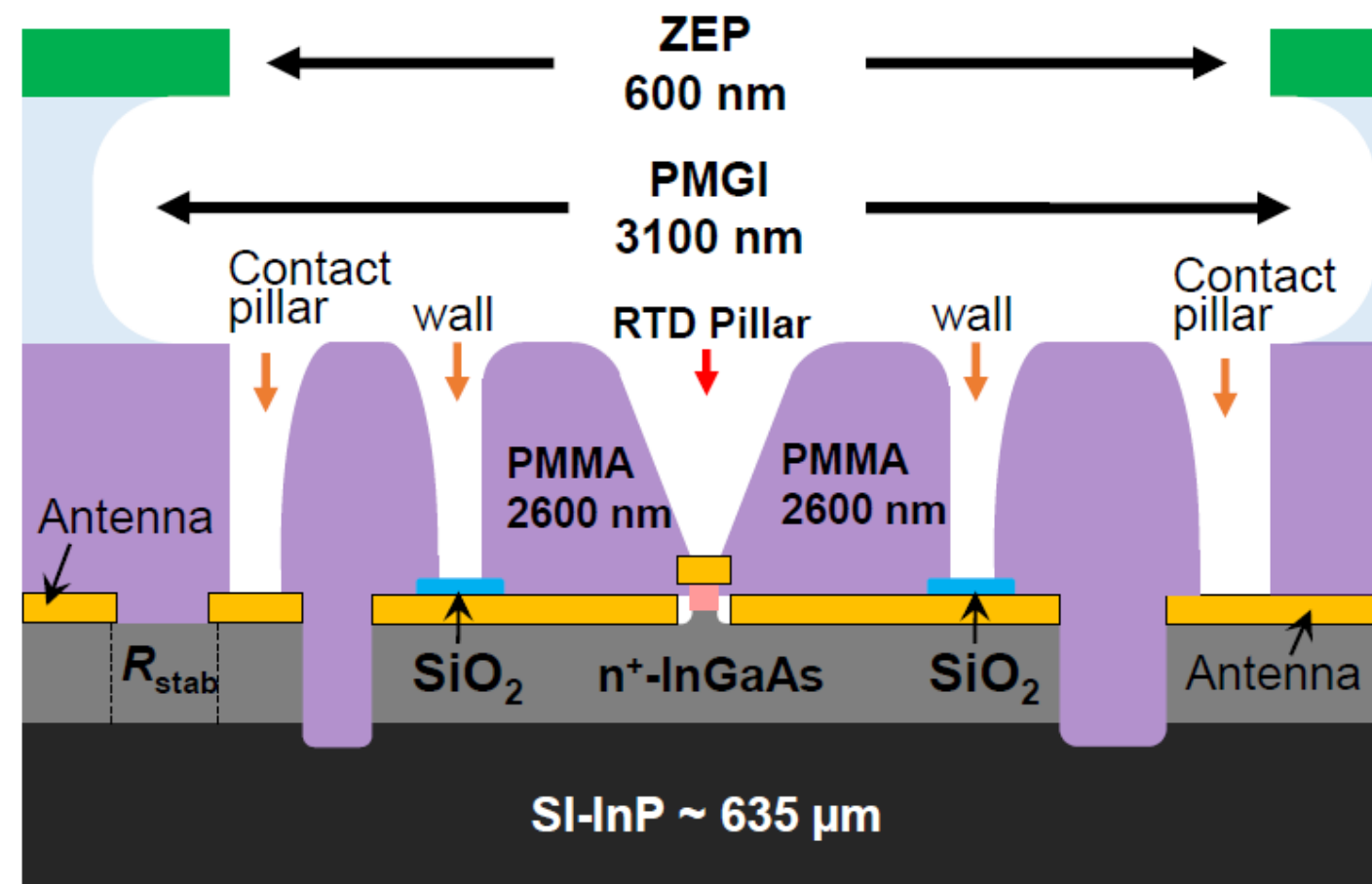


V型ピラー電極形成の必要性



大きな幅のピラーだと寄生容量がつき発振周波数が低下
→RTDメサ頭部とくつつくV型ピラー電極の形成が必要

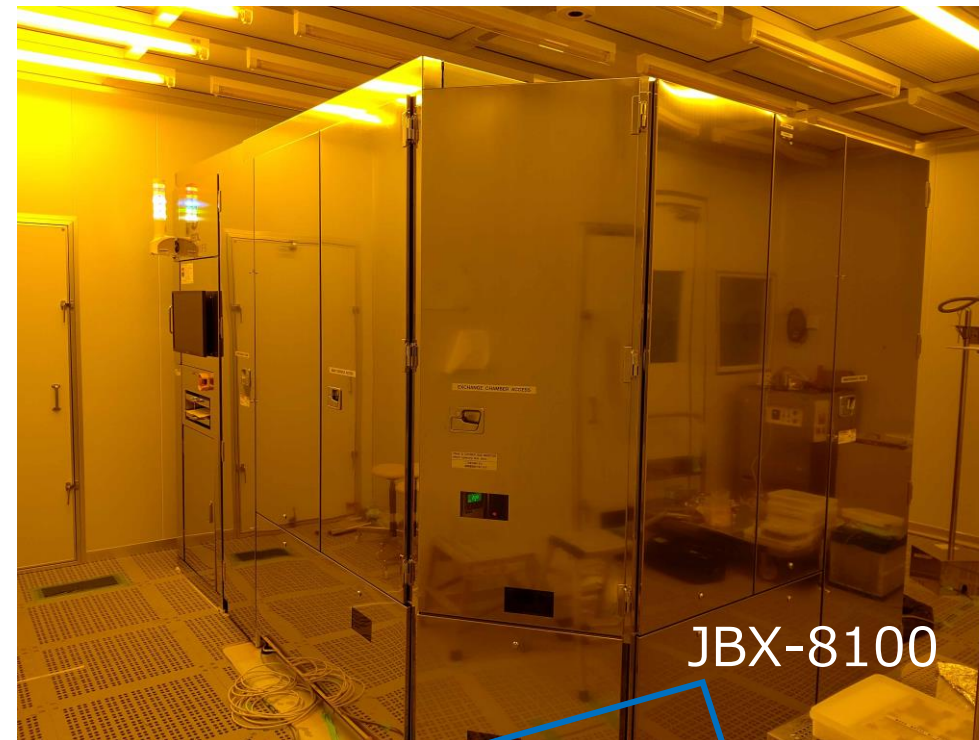
ピラー形成のためのレジストパターン



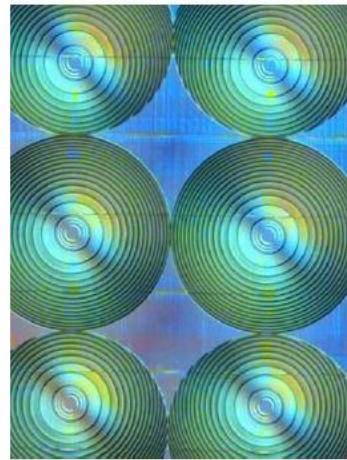
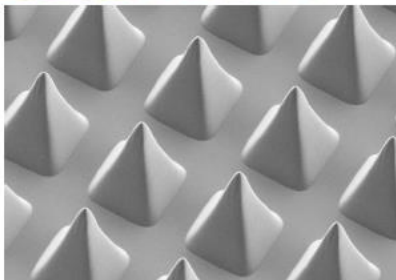
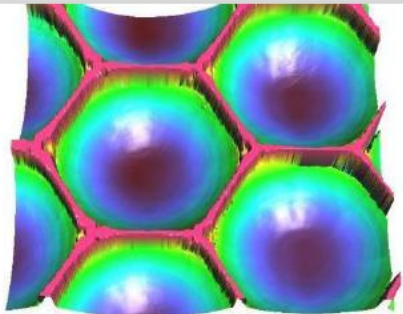
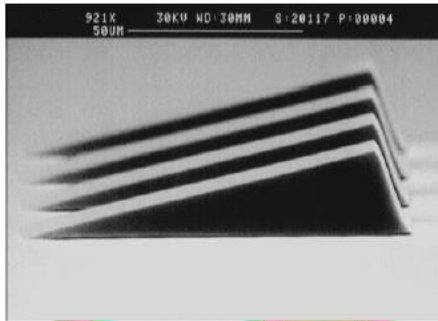
V型ピラーを作るにはレジストにスロープ形状を作らなければならない

電子ビーム露光装置

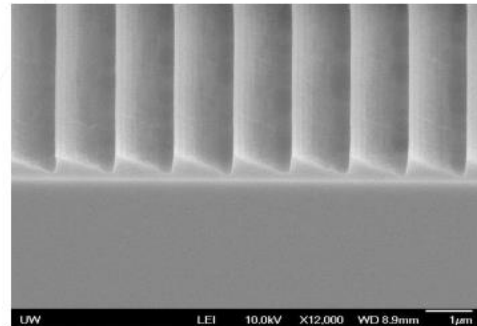
現在、東工大で保有する電子ビーム露光装置



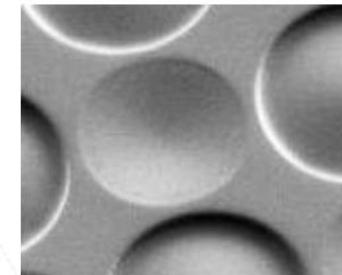
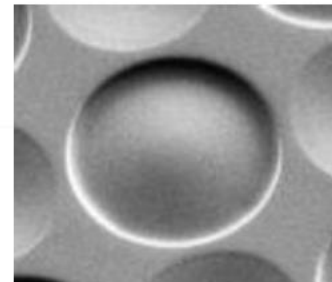
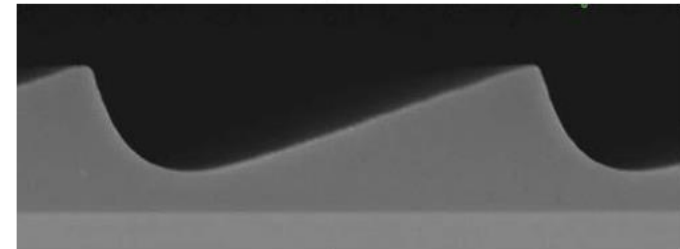
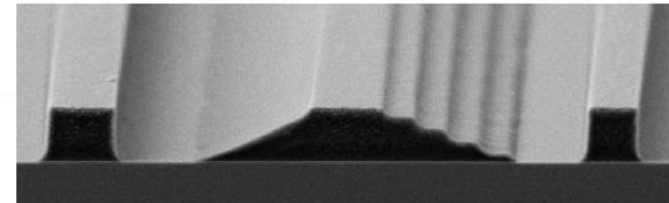
スポットビーム、ベクタースキャン方式
ビーム径:3nm以下(100kV)、最小線幅:8nm
つなぎ精度:仕様20nm/実測7.6nm (フィールドサイズ1000 μ m)
重ね合わせ精度:仕様20nm/実測9.8nm (フィールドサイズ1000 μ m)



- Micro Lenses
- Lens Arrays
- Blazed Gratings
- Holograms
- Integrated Optics
- Prisms
- MEMS



3D Lithography Example



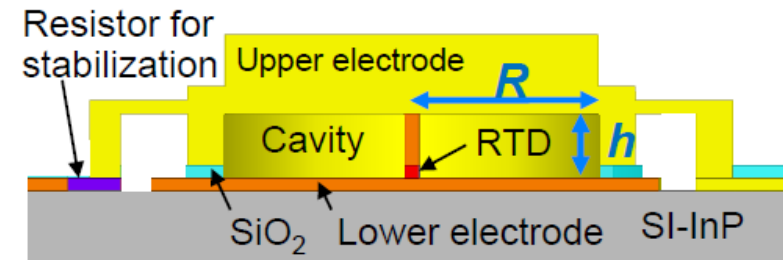
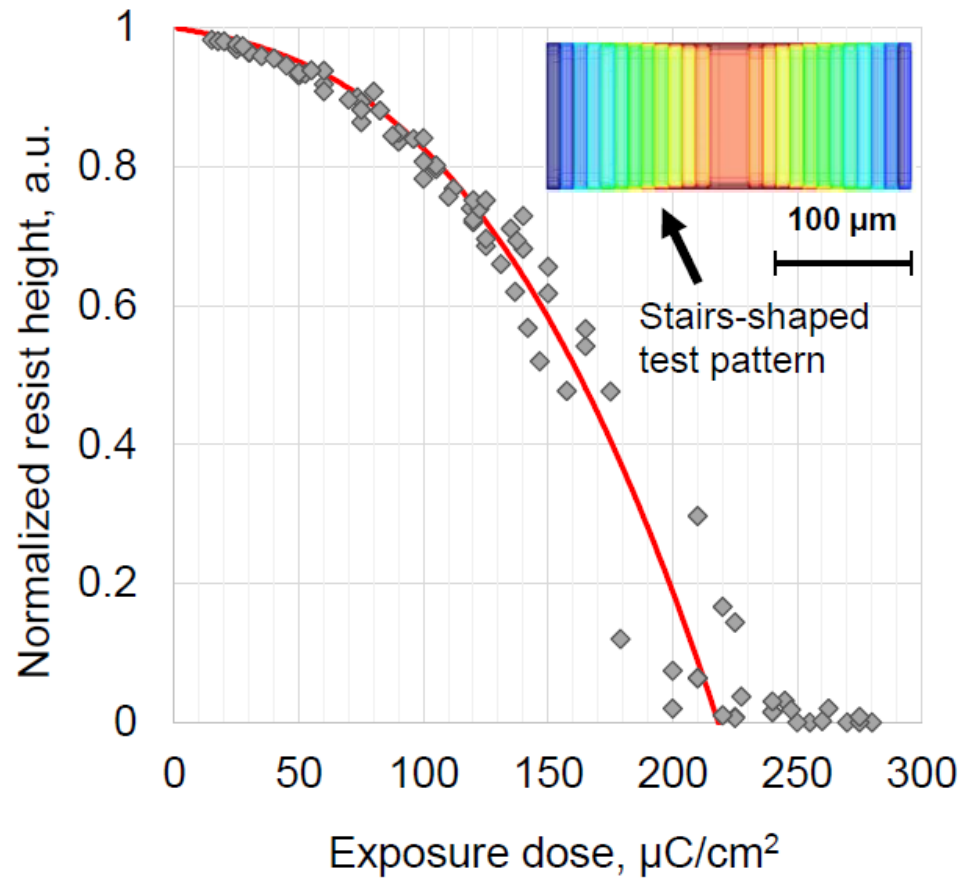
<https://www.genisys-gmbh.com/3d-pec.html>

モンテカルロシミュレーションによってPSF (Point-Spread Function)を求め近接効果補正

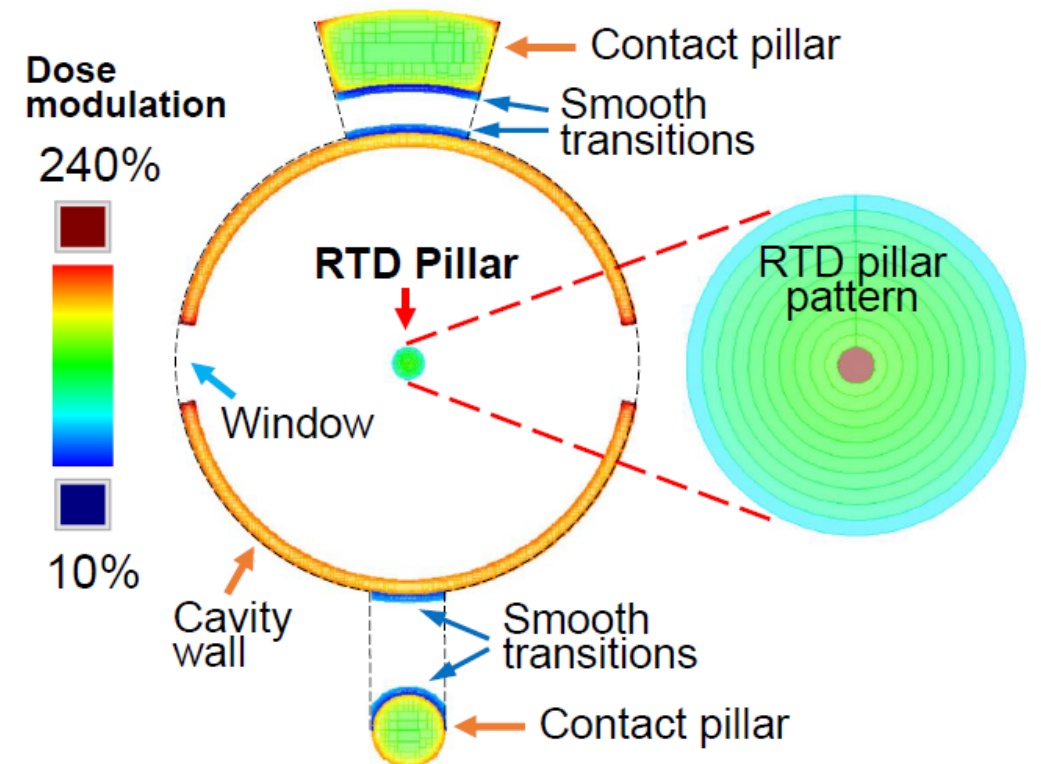
グレートーンリソグラフィ



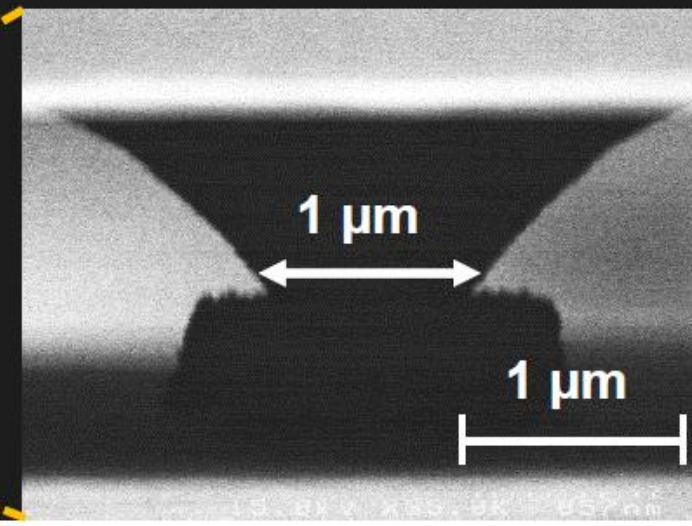
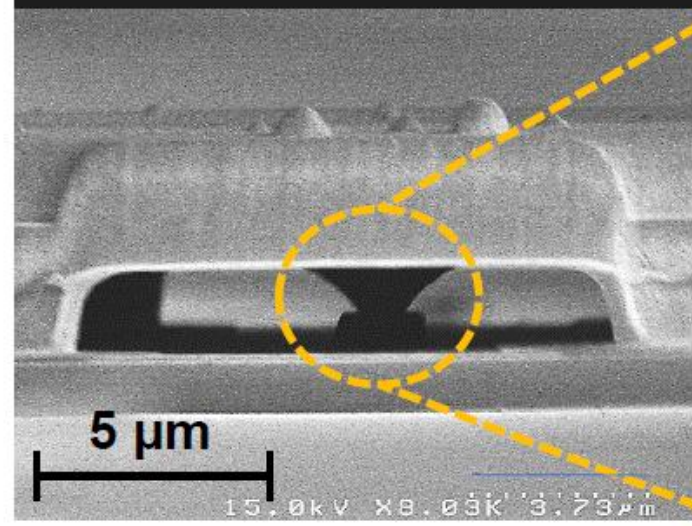
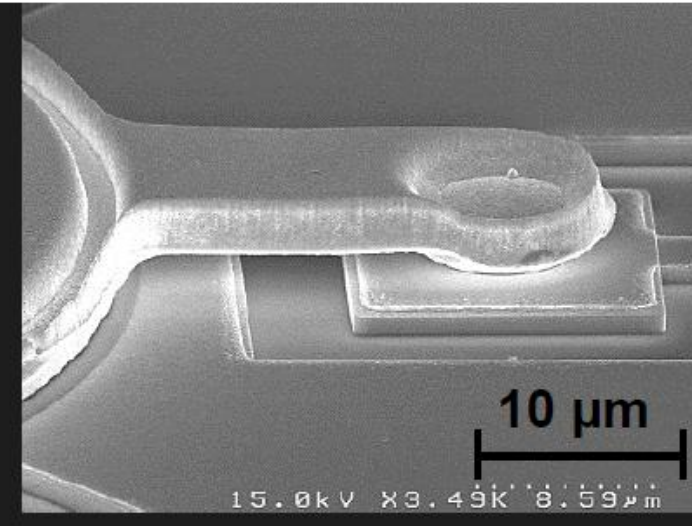
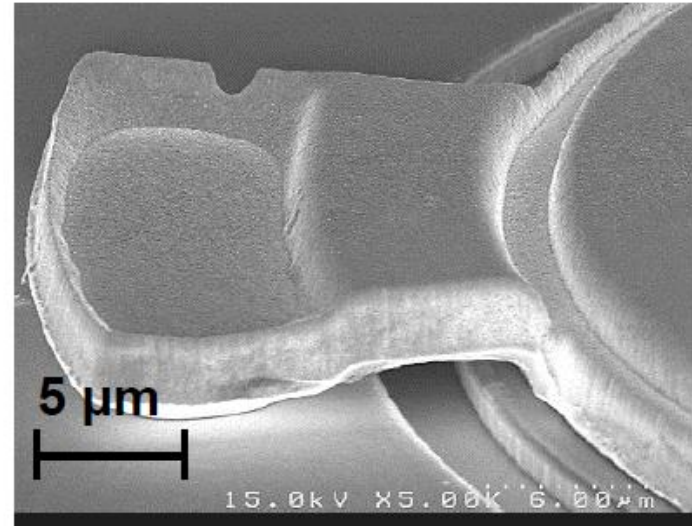
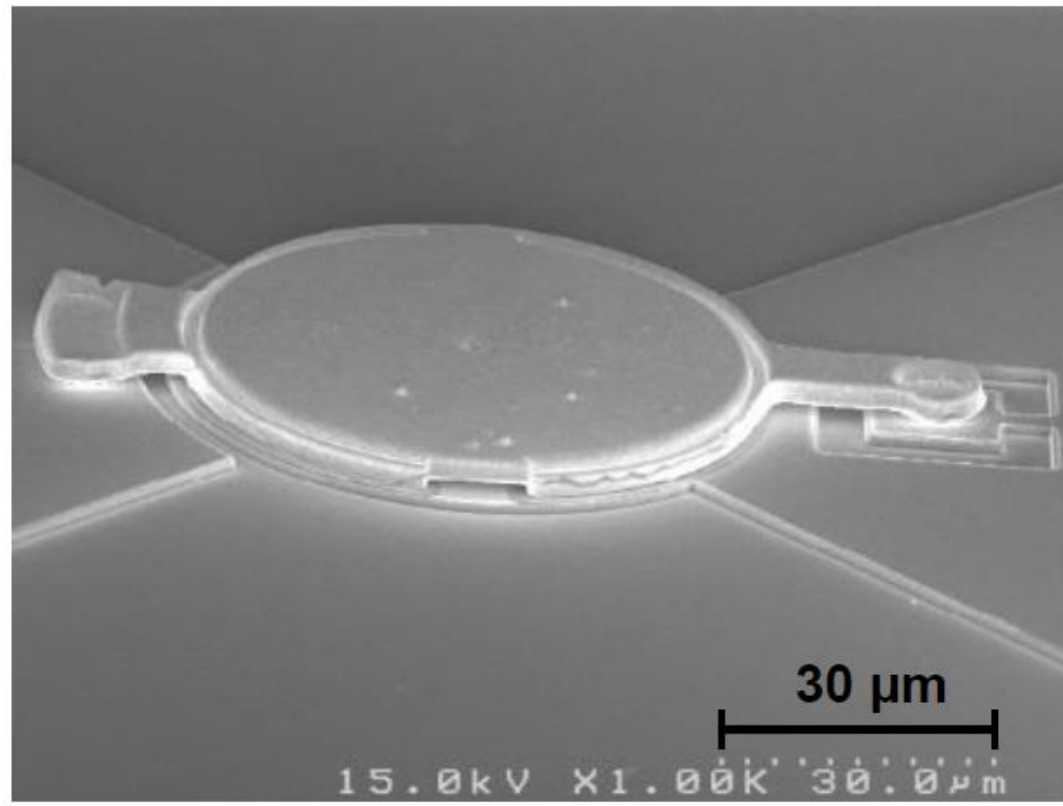
Normalized dose-depth correlation
(contrast curve)



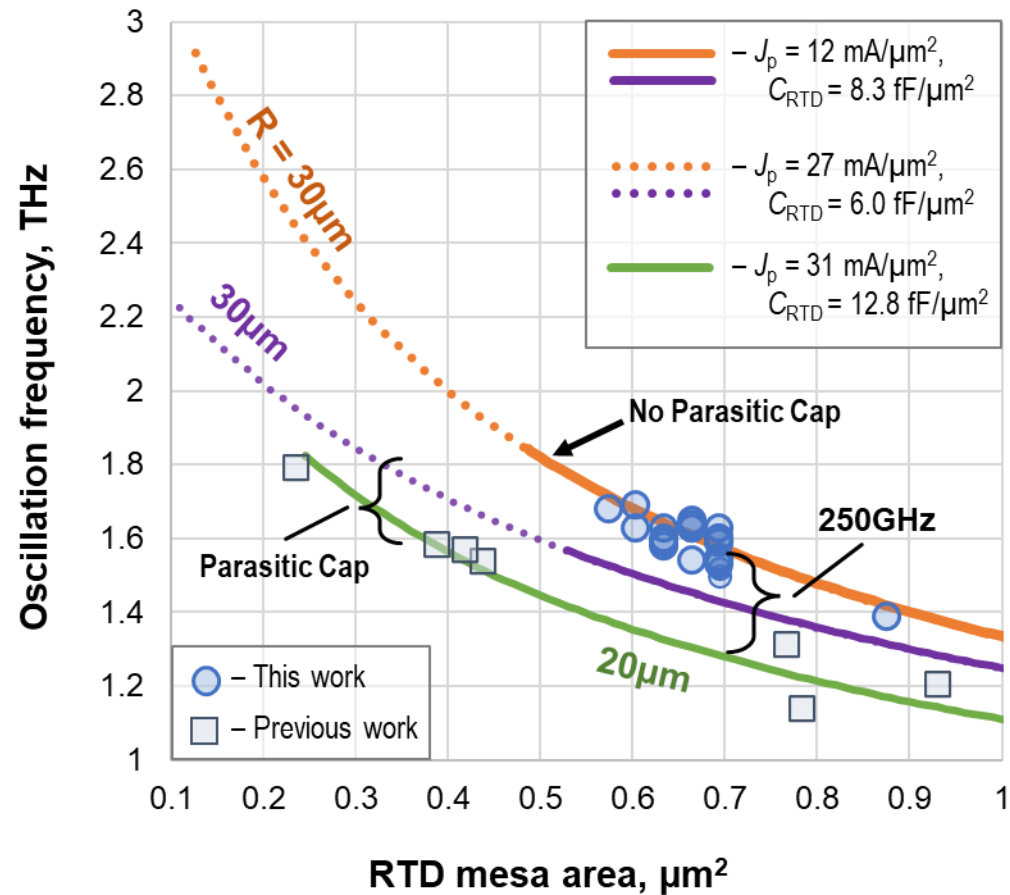
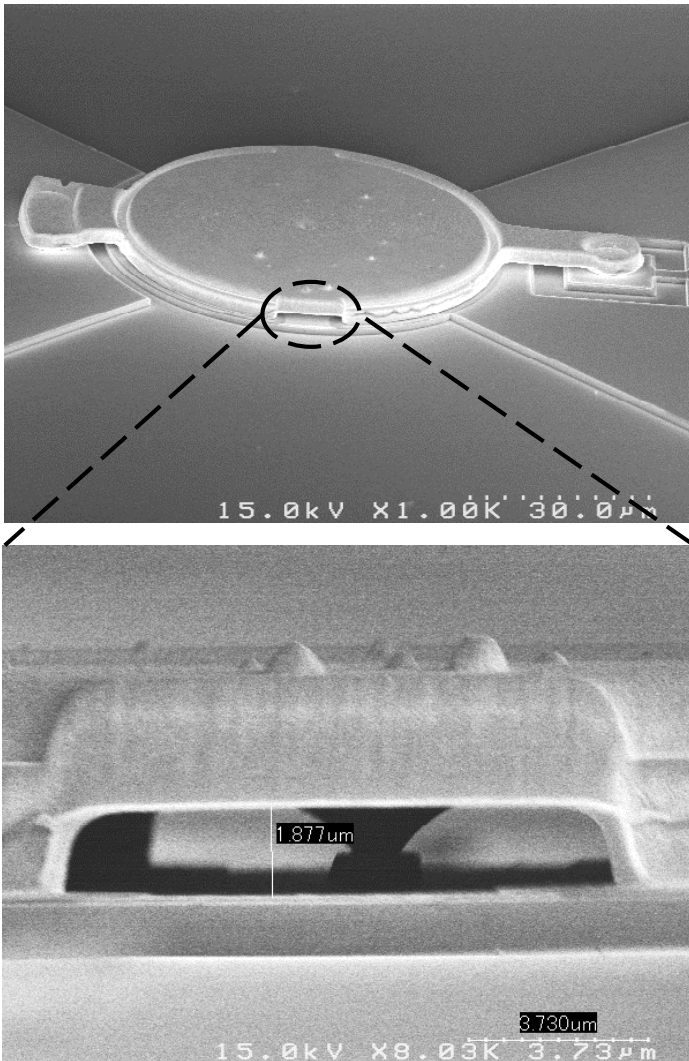
Dose modulation for the PMMA pattern



形成した構造



V型ピラー電極による寄生容量削減

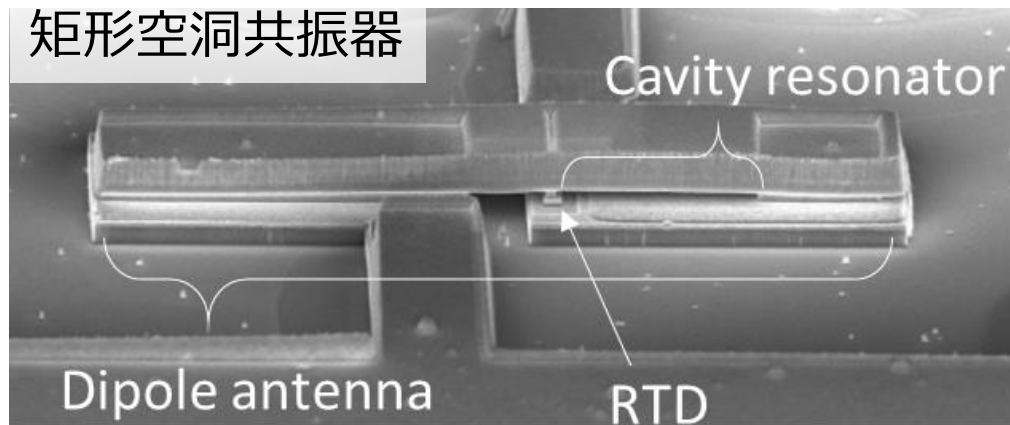


同一RTD面積で比較すると、寄生容量削減により250GHzの周波数向上に成功

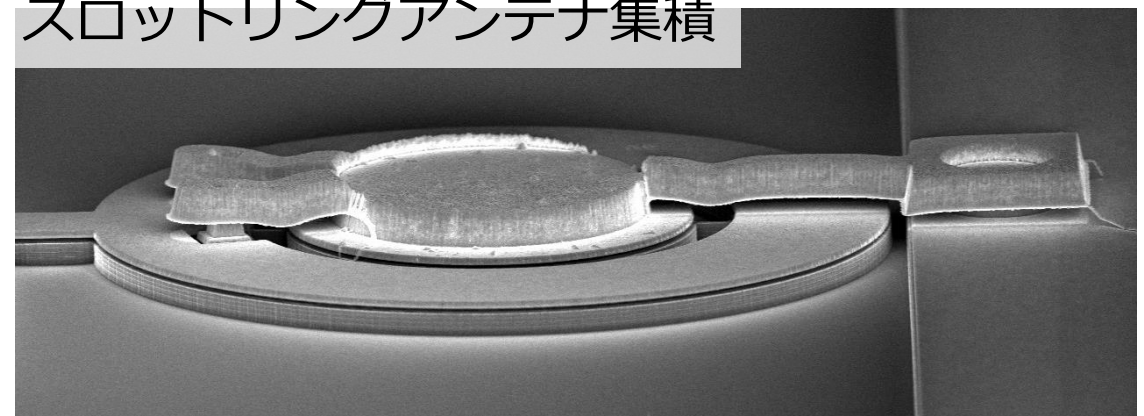
*[Mikhail Bezhko et al., IRMMW-THz 2021]

その他の形成構造

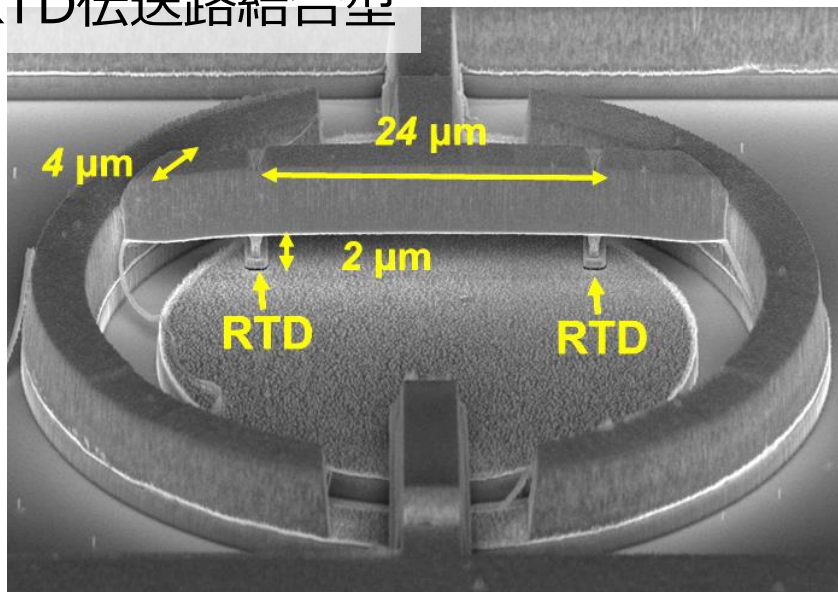
矩形空洞共振器



スロットリングアンテナ集積



2RTD伝送路結合型



2次元アレイ・メタマテリアル



- テラヘルツの利用シーンは色々なところに
(ただ、決定的な応用はまだ無い)
- テラヘルツ信号源の開発は着々と進んでいる
- 共鳴トンネルダイオードは有望なデバイス
高周波~2THz動作、単体高出力~1mW
- 高性能なデバイスの実現には多層レジストと露光技術が必要
- 東工大ARIMは微細構造形成のノウハウを有する

【実習に使う装置名】

電子ビーム露光装置日本電子JBX-8100、および、
マスクレス露光装置大日本科研MX-1205

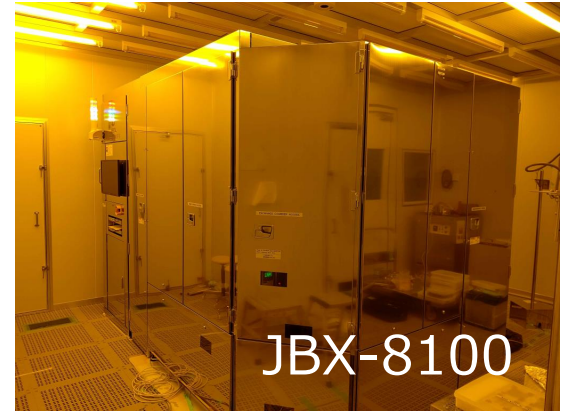
【内容】 EBとマスクレスのMix and Match を体験

【日時】 2024年3月7日（木） 10:00～17:00

【場所】 東工大大岡山キャンパス

【定員】 2名（既に達しました）

【料金】 2,000円



次の機会でのお申込みをお待ちしております。



Tokyo Tech

Thank You

