

最終報告

## テラヘルツレーダーを利用した新たなヒューマンインターフェース

研究代表者：鈴木左文 東京工業大学 准教授

共同研究者：



### 1. 研究の背景と達成目標

ゲームや映画など特定分野のみに展開する仮想現実（VR）技術であるが、微細動作で入力可能な静的な入力インターフェースが実現できれば、場所に依存しない新たな VR 技術の利用ができ、真の普及につながると考えられる。テラヘルツレーダーセンサは、ミリ波よりも空間分解能が高く、衣服で隠れた状態でもセンシングが可能であり、そのような入力インターフェースの有力な候補である。

本研究では、レーダーに用いることが出来る信号源として、高分解能が期待できる高周波動作が可能な共鳴トンネルダイオード（RTD）発振器に着目し、低損失なスプリットリング共振器（SRR）を用いた 600-800 GHz 帯の発振器、および、作製した発振器を用いた独自のレーダー方式を組み合わせたミリメートルの分解能を持つレーダーシステムの構築を目標として研究を行った。

### 2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- ・ スプリットリング共振器を集積した共鳴トンネルダイオード THz 発振器について解析・設計手法を確立すると共に、目標を大幅に上回る 1 THz を超える発振可能性を明らかにし、作製したデバイスから 1.2 THz の発振を得た。
- ・ 低損失な空洞共振器とスロットリングアンテナを集積した高出力構造を提案し、700 GHz で 1 mW を超える記録単体出力を得た。
- ・ 独自のサブキャリアを用いたレーダー方式によりミリメートル分解能の 3 次元的な画像取得に成功した。

### 3. 研究成果

共鳴トンネルダイオード（RTD）はテラヘルツ信号源の 1 つの候補であり、トランジスタや他のダイオードと比べて高い周波数で動作ができる。しかしながら、普及を見据えた簡易的なスロット構造では損失が大きく、レーダーで高分解能が可能な 600 GHz 以上の周波数を発生させることは困難だった。そこで、我々はメタマテリアルに良く用いられる低損失なスプリットリング共振器（SRR）を RTD と集積した構造を提案し、まず、その高周波発振の特性について電磁界解析と独自の RTD の回路モデリングを組み合わせる理論解析を行った。図 1 デバイス構造および発振特性の理論解析について示す。RTD 面積を縮小することで高周波化でき、最高で約 1.4 THz の発振が可能であることが見積られた。この設計に基づき、デバイスを作製したところ、図 1 に示すように理論とほぼ一致した特性が得られ、最高で 1.2 THz の発振を得ることに成功した。

このように、600-800 GHz の目標を大きくクリアする高周波発振が得られたが、その出力はまだ 10  $\mu$ W 程度と小さかった。そのため、この SRR 集積構造から、より低損失な空洞共振器とスロットリングアンテナを集積した構造を提案し、多層レジストプロセスを駆使することで 3 次元的なデバイス構造を形成した。デバイス構造、および、作製したデバイス写真を図 2 に示す。600-800 GHz 帯で効率よくア

アンテナから放射が得られるようスロットリングアンテナの周囲長を設計したところ、700 GHz で 1 mW を超えるの高出力発振が得られた。これは、この周波数帯における単体テラヘルツ発振器の記録出力である。

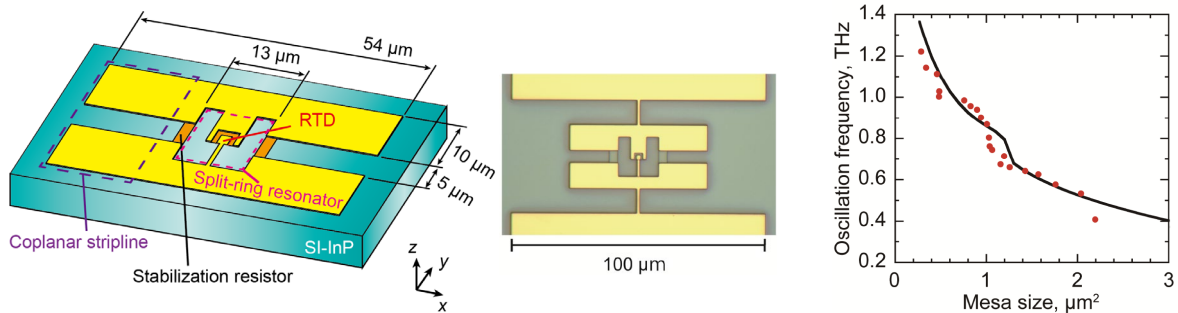


図 1：SRR 集積 RTD 発振器の構造、作製したデバイス、および、周波数の面積依存性

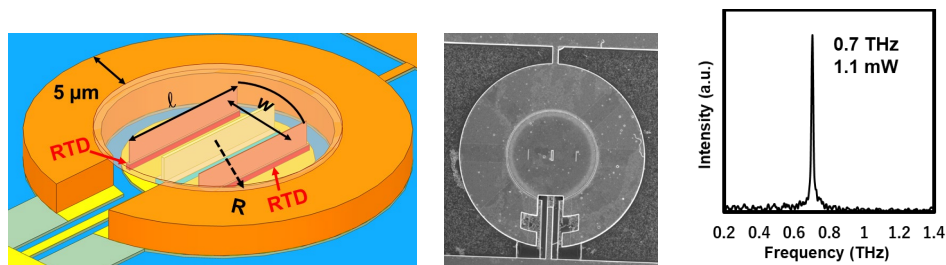


図 2：空洞共振器とスロットリングアンテナ集積 RTD 発振器、作製したデバイス、発振スペクトル

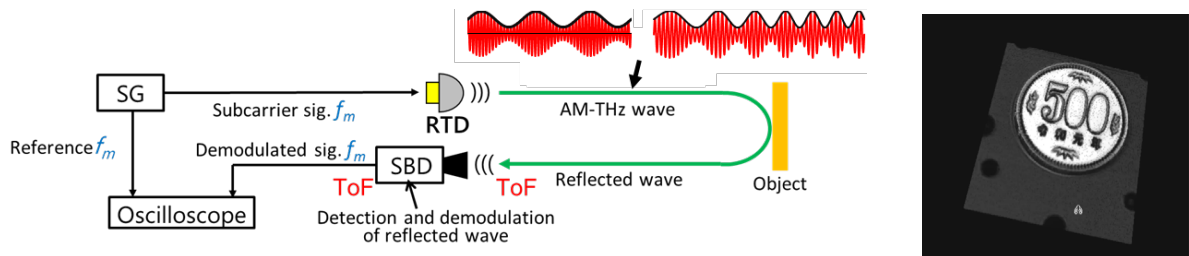


図 3：サブキャリアを用いたレーダーシステム、および、コインの 3 次元イメージング結果

発振デバイスの研究開発と並行して 3 次元的なレーダー測定を可能とする測定システムの構築を行った。構築したシステムの概要を図 3 に示す。シグナルジェネレータ (SG) からの変調信号をバイアス電圧と共に RTD に入力することで、AM 変調された THz 波を発生させ、ターゲットに照射する。ターゲットで反射された THz 波は受信器で受信および復調される。復調された信号を SG から送られる変調信号と同じ周波数の参照信号と比較することで飛行時間に対応した位相差を取り出すことができる。この振幅変調連続波方式 (AMCW) と 2 次元ステージスキャンを用いてコインのイメージングを行った。用いたのは 660 GHz の発振器であり、変調信号は 4.5 GHz である。イメージング結果を図 3 に示す。500 円の細かな凹凸を良くとらえていることが分かる。横方向分解能は 0.5 mm、高さ精度は 20  $\mu$ m でありミリメートル以下の分解能での 3 次元計測に成功した。

このような AMCW であるが、測定レンジが広くなると位相の不確実性が生じる。そのため、変調信号を時間的に変化したサブキャリア型の周波数変調連続波方式 (サブキャリア FMCW) を提案した。さらに、ステージ移動不要な 3D イメージングの実現のため、ガルバノミラーを用いたビームスキャン

を組み合わせたシステムを構築した。図 4 に測定系を示す。使用した RTD 発振器の発振周波数は 680 GHz である。FMCW の変調信号（チャープ信号）は任意波形発生装置（AWG）より発生させ、RTD に入力した。強度変調された THz 信号はターゲットで反射され、戻ってきた信号を受信器で受信し、復調した RF 信号はミキサーで AWG からの LO 信号とミキシングした。この時、RF 信号は LO 信号と比べて伝搬時間の分だけ時間遅延が発生するため、これによりミキシングで出力される IF 信号はターゲット位置に応じた周波数を持つビート信号となる。この IF 信号をオシロスコープでフーリエ変換した後に PC で距離計算を行った。この際、正確な信号のピーク抽出のため最小二乗近似法によるパラボラフィッティングを適用した。X スキャンと Y スキャン用の 2 つのミラーを用意し、ターゲットとして置いた 5 個のコーナーキューブに対しラスタースキャンを行った。スキャンを行った結果を図 4 右に示す。コーナーキューブの位置をしっかりと測定できており、その精度はおよそ 2.8 mm であった。

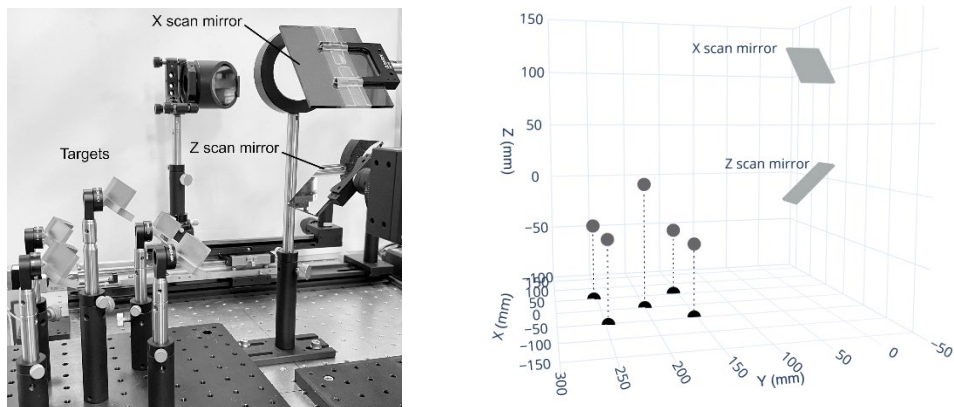


図 4：RTD 発振器を用いたサブキャリア FMCW 方式 3 次元イメージングシステム

#### 4. 今後の展開

本研究により、RTD 発振器を用いたミリメートル精度の 3 次元計測に成功すると共に、レコードとなる高出力発振を得た。しかしながら、まだシステムはコンパクトではないため、今後、MEMS ミラーやメタ材料を用いた機能反射板（RIS）などを用いたビームフォーミングシステムを導入する予定である。さらに、RTD 発振器は外部信号により注入同期が可能のため、CMOS の集積回路とハイブリッド集積し、CMOS 回路で発生させた低周波の信号で RTD 発振器を高調波注入同期させる新たなデバイスを開発し、さらにこれをアレイ化することによって図 5 に示すようなフェーズドアレイの実現を目指したい。

これにより、RTD の高周波・高出力特性を持ち、さらに、CMOS 回路の高機能性が両立した新たなアナログ集積回路が期待される。このようなフェーズドアレイが実現できればコンパクトに機器への搭載が可能となり、様々な携帯機器への本格的な実装が期待される。現在、電波利用の標準化を行っている国際電気通信連合の世界無線会議（WRC27）では 700 GHz までのセンシング議題が WRC23 から継続して議題に上がっており、無線通信よりもセンシングにこれから注目が集まると考えられる。継続して、センシングデバイスの開発、および、センシングのデモンストレーションを続けていき、テラヘルツの利便性を明らかにすると共に、標準化活動も行うことで社会実装を目指したい。

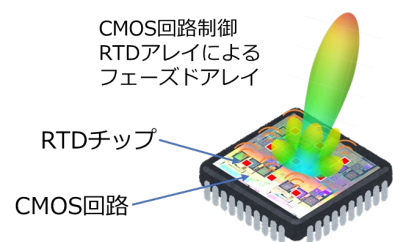


図 5：RTD と CMOS 回路を組み合わせたフェーズドアレイ

## 5. 発表実績

### 【論文】

- [1] H. Konno, A. Dobroiu, S. Suzuki, M. Asada, H. Ito, *Sensors*, 21, 4367, 2021.
- [2] M. V. Ta, Y. Suzuki, X. Yu, S. Suzuki, and M. Asada, *Appl. Phys. Express*, 15, 042003, 2022.
- [3] A. Dobroiu, Kotaro Asama, S. Suzuki, M. Asada, H. Ito, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, 43, 464, 2022.
- [4] Y. Suzuki, T. V. Mai, X. Yu, S. Suzuki, M. Asada, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 12, 481, 2022.
- [5] T. V. Mai, M. Asada, T. Namba, Y. Suzuki, S. Suzuki, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 13, 405, 2023.
- [6] F. Han, T. Shimura, H. Tanaka, S. Suzuki, *Appl. Phys. Express*, 16, 064003, 2023.
- [7] S. Endo and S. Suzuki, *Appl. Phys. Express*, 17, 044001, 2024.

### 【学会発表】

- [1] A. Dobroiu, K. Asama, S. Suzuki, M. Asada, and H. Ito, *Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, Mo-AM-4-4, Chengdu, China, 30, Aug. 2021.
- [2] J. Ito, A. Dobroiu, S. Suzuki, M. Asada, and H. Ito, *Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, WE-AM-4-2, Chengdu, China, 1, Sep. 2021.
- [3] X. Yu, T. Miyagawa, Y. Suzuki, M. V. Ta, S. Suzuki, and M. Asada, *Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, Th-AM-5-4, Chengdu, China, 2, Sep. 2021.
- [4] S. Suzuki, "Resonant Tunneling Diode Technology for Future Terahertz Applications" *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 4.4, San Francisco, USA, 5, Dec. 2022. (招待講演)
- [5] A. Dobroiu, Jia Ito, S. Suzuki, M. Asada, and H. Ito, *Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, Tu-P-58, Delft, Netherlands, 30, Aug. 2022.
- [6] F. Han, H. Fujikata, H. Tanaka, S. Suzuki, and M. Asada, *Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, Th-PM1-2-1, Delft, Netherlands, 1, Sep. 2022.
- [7] S. Suzuki, *The 10th International Symposium on Terahertz-Related Devices and Technologies (TeraTech 2023)*, Th3-3, University of Aizu, 7, Sep. 2023. (招待講演)
- [8] S. Suzuki, *The 26th edition of the European Microwave Week (EuMW 2023)*, WS2, Berlin, Germany, 17, Sep. 2023. (招待講演)
- [9] S. Endo, S. Suzuki, *The 48th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Th-P1-10, Montreal, Canada, 21, Sep. 2023.
- [10] S. Suzuki, *The 20th International Conference on IC Design and Technology (ICICDT)*, Tutorial 5, Tokyo, Japan, 25, Sep. 2023. (チュートリアル講演)

### 【特許】

- [1] 鈴木左文、マイヴァンタ、鈴木雄成、浅田雅洋“テラヘルツ発振器及びその製造方法” PCT/JP2021/000069
- [2] 鈴木左文、マイヴァンタ、鈴木雄成、浅田雅洋“テラヘルツ発振器及びその製造方法” 特願 2020-030428

### 【その他】

- [1] “ノーベル賞受賞50年未踏の分野を切り開く 江崎玲於奈さんインタビュー”、NHK おはよう日本、2023年10月2日
- [2] “受賞50年 江崎玲於奈さん(98)「科学と技術こそ人類の文明の根底」”、NHK NEWS WEB、2023年9月29日