

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔平成31（2019）年度研究進捗評価用〕

平成28（2016）年度採択分

令和元（2019）年5月10日現在

研究課題名（和文） **電子の走行と遷移が融合したテラヘルツ放射の解明によるデバイス限界の打破**

研究課題名（英文） High-performance semiconductor terahertz devices unifying quantum transition and traveling of electrons

課題番号：16H06292

研究代表者

**浅田 雅洋** (MASAHIRO ASADA)

東京工業大学・科学技術創成研究院未来産業技術研究所・教授



研究の概要：

光と電波の間にある未開拓のテラヘルツ周波数帯で期待されている様々な応用には、高性能の光源デバイスが必要不可欠である。本研究では、我々が室温半導体電子デバイスとして初めて1THzを超える発振に成功した共鳴トンネルダイオードを基に、テラヘルツデバイス物理の解明、高出力化・高周波化など半導体テラヘルツ光源の高性能化、および、この光源を用いたイメージングや大容量無線通信などの応用展開を行い、テラヘルツ分野の発展に資する。

研究分野：工学

キーワード：電気電子工学、電子デバイス、ミリ波テラヘルツ波

#### 1. 研究開始当初の背景

光と電波の間にある、周波数がおおよそ0.1~10THzのテラヘルツ帯は未開拓領域であるが、イメージングや分析、大容量通信など様々な応用が期待されている。これらの応用には、小型・高出力・室温動作などの性能を持つ半導体テラヘルツ光源が必要不可欠である。我々はこれまでに、半導体電子デバイスのひとつである共鳴トンネルダイオード（RTD）を用いて、単体の室温電子デバイスでは初めて1THzを超える発振を実現してきた。しかしながら、出力や周波数範囲などの特性は不十分で、テラヘルツ帯の様々な応用に資するためには、電子の走行と量子論的な遷移の両面からこのテラヘルツデバイスの基礎特性を解明し、高出力化や高周波化、周波数制御などの高性能化を行うとともに、種々の応用への可能性を示すことが必要であった。

#### 2. 研究の目的

本研究は以上の背景のもと、RTDテラヘルツ発振器を基にして、光と電波を繋ぐテラヘルツデバイス物理の解明と学術基盤の確立、これに基づいた高性能半導体テラヘルツ光源の実現、および、この光源を用いた応用展開の可能性を示すことを目的とする。

#### 3. 研究の方法

（1）電子デバイスと光デバイスを繋ぐテラヘルツデバイス物理の開拓：RTDの発振特性の温度依存性や構造依存性の測定から、光と電波の中間のテラヘルツ周波数に対して電子の走行と量子論的な遷移の両面を持つ応答特性を実験的・理論的に明らかにし、テラヘルツデバイス物理の基盤を構築する。

（2）テラヘルツデバイスの高性能化：（1）の結果に基づき、RTDの層構造、共振器やアンテナ構造を考案して、テラヘルツ光源の高出力化・高周波化などの高性能化を目指す。また、広域周波数掃引や発振狭線化を行う。

（3）高性能テラヘルツデバイスの応用展開：高性能化した光源で可能になる高感度リアルタイムイメージング、高精度分光分析、大容量無線通信など、応用の基本となる実験を展開し、テラヘルツ分野の発展に資する。

#### 4. これまでの成果

（1）電子デバイスと光デバイスを繋ぐテラヘルツデバイス物理：RTDテラヘルツ発振器の周波数と出力の温度特性を詳細に測定し、基本パラメータである微分負性コンダクタンスの周波数特性を抽出した。その結果、テラヘルツ帯の微分負性コンダクタンスが直流時から大きく低下すること、および、1THz付近において周波数とともに上昇する特性が得ら

れた。これらの結果は電子デバイスの特性である電子の走行遅延だけでは説明できず、共鳴トンネル構造中の電子の量子効果と輸送の両方を考慮した理論が必要であることがわかった。引き続き、理論解析との比較や広い周波数での特性測定を行い、微分負性コンダクタンスのテラヘルツ特性を理論的・実験的に明らかにしていく。

(2) テラヘルツデバイスの高性能化: RTD 発振器の高周波化を行うため、(1)と並行して発振器の損失低減に着目し、スロットアンテナの厚膜化でこれを行って、1.98THz の発振を得た(図1)。この周波数は、室温電子デバイスの最高発振周波数である。

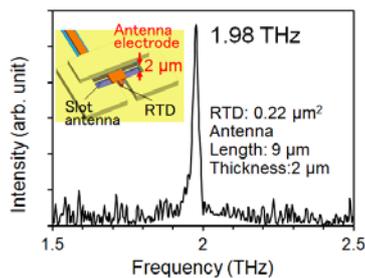


図1 スロットアンテナの厚膜化による1.98THz 発振。

さらなる高周波化・高出力化のため、スロットから拡張した新たな構造として、空洞共振器を立体集積した発振器を考案し、現在作製中である。

大規模アレイ集積による高出力化も行い、誘電体薄膜と多素子ダイポールを積層した素子構造で、1THzにおいて89素子で0.72mWとこの周波数の電子デバイスでは最大の出力が得られた。

出力の偏波面制御に対して、ラジアルラインスロットアレイを集積した平面型発振器により、円偏波および渦波出力発生を達成した。

周波数制御では、バラクタダイオードを集積した周波数可変発振器の位相同期回路(PLL)を構成し、スペクトル線幅1Hz以下の高 coherence の周波数可変発振に成功した。

(3) 高性能テラヘルツデバイスの応用展開: バラクタダイオードを集積した広域周波数可変 RTD アレイ(約0.4~1THz)により、薬剤(アロプリノール)を例に用いてコンパクトな分光分析デバイスが可能なことを示した。通信への応用として、異なる周波数と偏波の発振素子を集積したチップにより、2周波数および2偏波テラヘルツ多重通信を行い、それぞれにおいて、28Gビット/秒×2の大容量伝送を達成した。

RTD 発振器のテラヘルツレーダーへの応用では、テラヘルツ出力をサブキャリアで振幅変調し、その位相変化を測定する新たな方法を見出し、分解能0.06mmの測定結果を得た。

## 5. 今後の計画

(1) 光デバイスと電子デバイスを繋ぐテラヘルツデバイス物理の確立: 新たに考案した高周波・高出力が可能な空洞共振器を立体集積した発振器構造を用いて、その構造依存性などの測定から、より広い周波数範囲の微分負性コンダクタンスの周波数特性を抽出し、理論解析と比較することにより、RTDの基礎特性を明らかにして発振限界周波数を探る。

(2) テラヘルツデバイス高性能化: 高周波・高出力が可能な空洞共振器集積構造について、引き続き発振器を作製する。発振特性の詳細な理論解析に基づいた構造最適化を作製に反映させる。

(3) 高性能テラヘルツデバイスによる応用展開: 今年度得られた RTD 発振器の振幅変調による新たなレーダシステムについて、分解能などの特性を理論的に考察し、極限的な性能を調べる。また、この方法をサブキャリアの周波数変調を用いる方式などに拡張し、多層構造の測定や3Dイメージングへの展開を図る。

## 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む) 発表論文

(1) K. Kasagi, S. Suzuki, and M. Asada, "Large-scale array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillators for high output power at 1 THz", J. Appl. Phys., vol. 125, 151601, 2019.

(2) N. Oshima, K. Hashimoto, S. Suzuki, and M. Asada, "Terahertz Wireless Data Transmission With Frequency and Polarization Division Multiplexing Using Resonant-Tunneling-Diode Oscillators", IEEE Trans. THz Sci. Technol., vol. 7, no. 5, pp. 593-598, 2017.

(3) M. Asada, S. Suzuki, and T. Fukuma, "Measurements of temperature characteristics and estimation of terahertz negative differential conductance in resonant-tunneling-diode oscillators", AIP Advances, vol. 7, 115226, 2017.

(4) K. Ogino, S. Suzuki, and M. Asada, "Spectral Narrowing of a Varactor-Integrated Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator by Phase-Locked Loop", J. Infrared Millimeter Terahertz Waves, vol. 38, pp.1477-1486, 2017.

(5) M. Asada and S. Suzuki, "Room-Temperature Oscillation of Resonant Tunneling Diodes close to 2 THz and Their Functions for Various Applications", J. Infrared Millimeter and THz Waves, vol. 37, pp.1185-1198, 2016. 他

受賞

浅田雅洋、文部科学大臣表彰(研究部門)「室温半導体テラヘルツ光源の先駆的研究」2018年4月。

ホームページ等

<http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab>