

共鳴トンネルダイオード発振器の直接 ASK 変調による大容量テラヘルツ通信 (112103026)

High-Capacity Terahertz Wireless Communication using Resonant Tunneling Diode Oscillator with Direct ASK Modulation

研究代表者

鈴木 左文 東京工業大学

Safumi Suzuki, Tokyo Institute of Technology

研究期間 平成 23 年度～平成 25 年度

概要

共鳴トンネルダイオード発振素子に直接 ASK 変調を行い、ショットキーバリアダイオードにより受信するようなテラヘルツ伝送システムを構築し 500GHz 帯で 3Gbps までの通信を達成した。さらに、大容量無線通信を達成するために必要な、発振器の高出力化、応答速度の向上、コンパクトな高指向性アンテナ構造の集積、および、高電流感度のための短チャネル HEMT を用いた受信器の開発を行った。また、1.55 μm 帯光信号により直接変調可能な共鳴トンネルダイオード発振器を実現した。

1. まえがき

光と電波の境界であるテラヘルツ (THz) 周波数帯を用いた、大容量無線通信に対する期待が近年高まっている。テラヘルツ帯無線通信における最大のメリットは、その超広帯域性であり、複雑な変調方式を必要とせず、簡易なシステムにより大容量伝送が簡単に実現可能である。伝送レートは、mW 程度の出力と指向性の高いアンテナを組み合わせれば、数 10~100Gbps が可能である。

現在 THz 無線通信を牽引しているのは、UTC-PD などの光デバイスであるが、高い周波数で動作する手軽な単体のテラヘルツ光源を利用すれば、デバイスを大幅に小型化し微細チップに収めることが可能となる。共鳴トンネルダイオード (RTD) を用いたテラヘルツ帯の発振デバイスは、これまでに、電子デバイスでは初めての 1THz を越える室温基本波発振などを達成している。また、電流数 10mA、電圧 1V 程度で室温単体動作し、さらに直流電源により駆動できる手軽さをもっており、出力は若干小さいものの現在種々研究されている他のテラヘルツデバイスには無い手軽な光源という特徴を備えていたため、テラヘルツ無線通信の光源として有望である。

本研究は以上のような背景のもと、大容量テラヘルツ無線通信の実現のための研究として、RTD テラヘルツ発振器の直接 ASK 変調による簡易なテラヘルツ無線通信システムの構築を行った。次に、大容量伝送に向けて、RTD 発振器の周波数と出力およびパッチアンテナ集積構造による指向性向上、さらに、高速変調構造を導入した。また、HEMT を用いた受信素子の提案と作製、および、1.55 μm 帯光信号による RTD 発振器の直接変調と変調速度の測定も行った。

2. 研究開発内容及び成果

スロットアンテナを集積した RTD 発振器とそのパッケージを図 1 に示す。半絶縁性 InP 基板上にスロットアンテナが形成され、その中央に InGaAs/AlAs 二重障壁 RTD が配置されている。RTD は微分負性抵抗特性を持ち、これにより電磁波を増幅させ、共振器としてアンテナを用いることで発振する。アンテナ両端には MIM キャパシタが形成されており、これが高周波で短絡し直流では開放となるため、アンテナの形成と RTD への直流電圧印加が可能となる。発振は RTD の微分負性コンダクタンスがアンテナの放射損失を上回ったときに生じ、アンテナの LC 成分と RTD の容量で発振周波数が決定される。

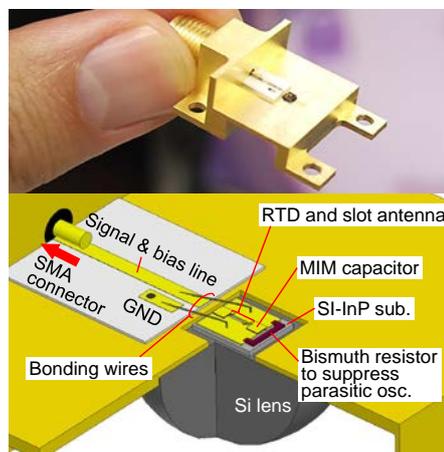


図 1 発振素子構造と素子パッケージ

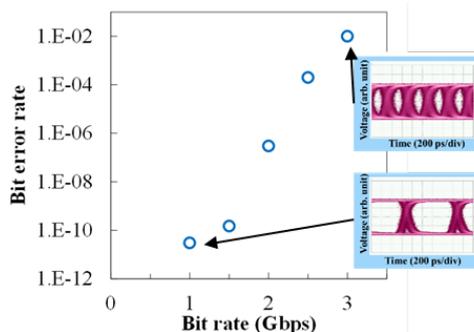


図 2 ビットエラーレートの伝送速度依存性

この RTD 発振素子(発振周波数 542GHz、ピーク出力 210 μW)を送信器として、ショットキーバリアダイオード (SBD) を受信器として用い通信実験を行った。図 2 は各ビットレートでのエラーレートおよびアイパターンである。3Gbps 程度までは、誤り訂正可能なエラーレートに収まっていることが確認された。伝送容量が増加すると共に誤り率は増加しているが、これは発振素子に付随する寄生素子により RTD に入力される高周波変調信号が制限されるためである。伝送容量増加には高カットオフと SN 比増大のための出力向上が必要であることが分かった。

次に、伝送容量増加に向けた高出力化、および、THz 周波数のカバー範囲拡大のための高周波化を行った。微分

負性コンダクタンスは、RTD 内の遅延時間のため、周波数増加とともに減少するため、高周波・高出力の発振を得るためには遅延短縮が必要である。遅延短縮のための、薄膜バリア構造と狭井戸構造導入、および、コレクタスペーサ層最適化を行い、1.42 THz の発振を得た。さらにアンテナ縮小を組み合わせることで、1.55THz までの発振を達成した。これは室温単体電子デバイスにおける最高基本波発振周波数である。これら遅延短縮を行った RTD とインピーダンスマッチングのためのオフセット給電スロットアンテナ、およびそれら発振素子アレイによる出力合成を行い、624 GHz で 610 μ W の高出力発振を達成した。

上記の高周波・高出力化と平行して、高速変調のために、変調信号を制限している寄生素子である MIM キャパシタを縮小した高周波変調構造を提案し、30GHz の高いカットオフを実現した (図 3)。この素子を用いた伝送試験では、7Gbps までの伝送にチャレンジしたがインピーダンスマッチングが不十分な小出力の素子のため、明瞭なアイ開口は得られなかった。

さらに、伝送距離の拡大のために必要な高指向性化を達成するために、パッチアンテナを集積した新たな発振器構造を提案し、その初期実験を行い 7dBi の指向性を得た。シミュレーションによりパッチアンテナのアレイ構造を用いることによって 16dBi の指向性が得られることも見積もっている。また、高電流感度のため短チャネル HEMT を用いた受信器の提案と作製を行い 1.5A/W の感度を達成した。これら得られた結果を組み合わせることによって、数 10Gbps のテラヘルツ帯無線伝送が可能となる。また、簡易なシステムの構築を目指して、1.55 μ m 帯光信号を発振器に直接照射し変調を行い、90%の変調度と 10MHz 程度のカットオフも得ている。

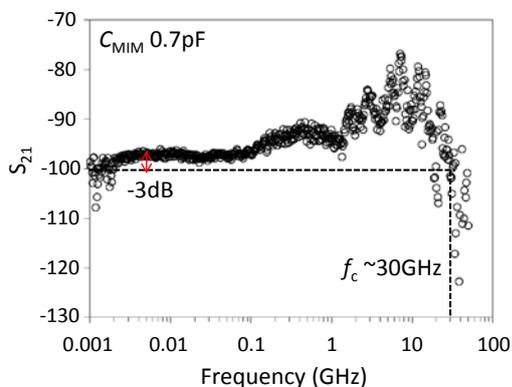


図 3 高速変調構造の変調特性

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本研究開発で実現した RTD は超高速トランジスタなど他の THz 帯電子デバイスとは異なり、精密な微細加工を必要とせずに数倍高い発振周波数を達成できるため、量産化プロセスが確立できれば広く普及する可能性がある。現在、化合物半導体を扱うファウンダリーが国内外にあるため、これを利用して素子が外部で作製可能であることを示す。また、本研究で提案したパッチアンテナアレイはデバイスと一体集積可能で平面コンパクトのため、従来テラヘルツ分野で一般的に用いられてきたシリコンレンズや導波管などに代わり、将来のテラヘルツ集積回路に広く利用される可能性がある。アレイ化を行い高指向性化し、これを HEMT 受信器にも適用することで、コンパクトな無線通

信チップを実現する。これらにより、近年で急速に利用の拡大したスマートフォン、また、将来のウェアラブル端末として期待される時計型や眼鏡型デバイスに搭載が可能であることを示す。

4. むすび

RTD 発振器を用いたテラヘルツ無線通信システムの構築と 3Gbps までの通信を達成した。大容量伝送に向けた高出力化では、遅延時間を減少し高電流密度化した RTD を提案・導入し、さらに発振素子をアレイ化することによって、ミリワットクラスの出力を得た。また、1.55THz の室温電子デバイス最高の発振周波数も得ている。高速変調のために、変調信号を制限している MIM キャパシタを縮小した高周波変調構造を提案し、30GHz の高いカットオフを達成した。さらに、伝送距離の拡大のために必要な高指向性化を達成するために、パッチアンテナを集積した新たな発振器構造を提案しその初期実験を行い 7dBi の指向性を得た。またシミュレーションによりパッチアンテナのアレイ構造を用いることによって 16dBi の指向性が得られることを見積もった。受信器については、HEMT を用いた高電流感度受信器の提案と作製を行い、1.5A/W の受信感度を達成した。伝送試験では、7Gbps までの伝送にチャレンジしたが明瞭なアイ開口は得られず、最終目標である数 10Gbps のテラヘルツ帯無線伝送は今回の研究開発では実現できなかったが、今後、指向性と電流感度を向上させこれを達成する。1.55 μ m 帯光信号による直接変調では、約 90%の変調度と 10MHz 程度のカットオフを得た。

【誌上発表リスト】

- [1] K. Ishigaki, M. Shiraishi, S. Suzuki, M. Asada, N. Nishiyama, and S. Arai, "Direct intensity modulation and wireless data transmission characteristics of terahertz-oscillating resonant tunnelling diodes," *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 10, pp. 582-583, (May 10, 2012)
- [2] S. Suzuki, M. Shiraishi, H. Shibayama, and M. Asada, "High-Power Operation of Terahertz Oscillators with Resonant Tunneling Diodes Using Impedance-Matched Antennas and Array Configuration", *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, vol. 19, no. 1, p. 8500108, (Feb. 1, 2013)
- [3] H. Kanaya, R. Sogabe, T. Maekawa, S. Suzuki, and M. Asada, "Fundamental Oscillation up to 1.42 THz in Resonant Tunneling Diodes by Optimized Collector Spacer Thickness", *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, vol. 35, pp. 425-431, (Feb. 2014)

【受賞リスト】

- [1] Hidetoshi Kanaya, IPRM Best Student Paper Award, "Fundamental Oscillation up to 1.31 THz Using Thin-Well Resonant Tunneling Diodes", Aug. 28, 2012.

【報道掲載リスト】

- [1] "RTD 素子の性能が大きく向上、室温で 1.42THz を発振—テラヘルツ波の用途拡大に道"、日経エレクトロニクス、(2014 年 1 月)
- [2] "1.42THz で発振する共鳴トンネルダイオード"、日経エレクトロニクス、(2014 年 3 月)

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

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