

# 共鳴トンネルダイオードによる高速信号伝送可能な室温テラヘルツ発振素子の研究開発 (135003104)

Research and development of room-temperature terahertz oscillators capable of high-speed data transmission with resonant tunneling diodes

## 研究代表者

浅田雅洋 東京工業大学 科学技術創成研究院

Masahiro Asada Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology

研究期間 平成 25 年度～平成 27 年度

## 概要

テラヘルツ (THz) 帯の応用として期待されている超高速無線通信のキーデバイスとして、共鳴トンネルダイオード (RTD) THz 発振素子の開発を行った。RTD の電子遅延時間短縮とアンテナの損失低減により、室温電子デバイスでは最高の 1.92 THz の発振に成功するとともに、THz 無線通信の初期実験として、周波数および偏波の異なる RTD 素子を集積し、それぞれを高速直接変調することにより、500 および 800 GHz の周波数多重伝送、および、500 GHz での偏波多重伝送を行い、それぞれ 28 Gbps×2 の高速無線伝送を達成した。

## 1. まえがき

テラヘルツ (THz) 周波数帯 (0.1~10 THz 程度) は様々な応用が期待されているが、なかでもその高周波・広帯域の特性を生かして、超高速無線通信の可能性が期待されている。このような応用にはコンパクトな室温 THz 光源が必要不可欠となる。我々は共鳴トンネルダイオード (RTD) を用いて、本研究の開始以前に電子デバイスでは初めて室温で 1 THz を超える発振を達成した。

本研究はこれを基に、超高速 THz 無線通信のキーデバイスとなる RTD 発振素子の開発を目的として行い、室温電子デバイスでは最高の 1.92 THz の発振に成功するとともに、バイアス電圧による高速直接変調が可能な発振素子を作製し、この素子の集積構造を用いて、周波数および偏波多重による THz 高速無線伝送を達成した。

## 2. 研究開発内容及び成果

### 2. 1. RTD 発振素子の高周波化

図 1 に示す RTD-THz 発振素子を作製し、その高周波化を行った。RTD は共振器と放射器を兼ねたスロットアンテナの一辺に集積され、上部電極はエアブリッジと MIM (金属-絶縁体-金属層) キャパシタンスを介してスロットアンテナのもう一方の辺に高周波的に接続されている。

RTD は GaInAs(量子井戸)/AlAs(障壁)の二重障壁構造で半絶縁 InP 基板上に形成されており、量子効果によって生じる微分負性コンダクタンスがアンテナの損失を補うことにより発振が起こる。微分負性コンダクタンスは RTD 内の電子遅延時間により周波数とともに減少するため、量子井戸と障壁の薄層化およびコレクタペーサー層厚の最適化を行い高周波化した。また、これまでの素子構造では、エアブリッジ下に残っていた GaInAs 層が THz 波に対して大きな損失になることを電磁界シミュレーションから見出し、これを除去する作製プロセスを考案した。

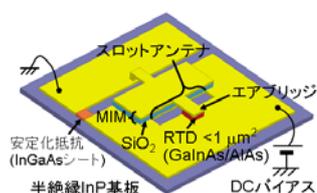


図 1 作製した RTD-THz 発振素子

これらの構造により、図 2 に示すように 1.92 THz の基本波発振が室温で得られた。これは単体の室温電子デバイスで現在までに報告されている最高発振周波数である。素子構造最適化により 2THz を超える高周波化が可能なことも理論的に示された。

出力はこの最高周波数では発振限界に近いために 0.4  $\mu$ W と小さいが、同様の構造で 1~1.2 THz で 20~30  $\mu$ W が得られている。高出力化構造として、RTD の位置をスロットの中央からずらすオフセット構造により、0.61 mW が 620 GHz において 2 素子アレイで得られている。また、高出力化に対して、これまでの Si 半球レンズを用いて基板側から出力を取り出す方法と異なり、発振素子上部に誘電体薄膜とパッチアンテナまたはダイポールアレイアンテナを立体集積した構造を提案・作製し、パッチアンテナでは 3 素子アレイで 60  $\mu$ W@1 THz、ダイポールアレイでは 26 素子アレイで 0.44 mW@0.9 THz の比較的高出力の発振が得られた。

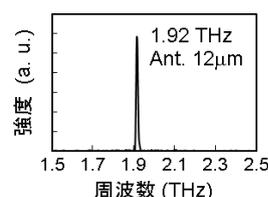


図 2 最高周波数 1.92THz の室温発振スペクトル

### 2. 2. RTD 発振素子による THz 無線伝送

RTD 発振素子は、バイアス電圧の直接変調により容易に THz 波出力を強度変調でき、簡易な超高速無線伝送が期待できる。直接変調周波数の上限は、図 1 の MIM キャパシタンス ( $C_{MIM}$ ) が小さいほど高い。これまでの素子構造では、 $C_{MIM}$  の低減に伴って、安定化抵抗膜に付随するインダクタンス成分と  $C_{MIM}$  の共振により寄生発振が発生する問題があった。図 1 の構造では InGaAs による小型安定化抵抗の導入によりこの発振を抑圧し、直接変調の 3dB カットオフ周波数として 30 GHz が得られた。 $C_{MIM}$  をさらに低減すると THz 出力の漏れが発生するが、これを防止するフィルタ構造を提案し、理論的に 100 GHz の変調が可能であることも示した。

THz 無線伝送の基礎実験として、RTD 発振素子の直接変調とショットキーバリアダイオード (SBD) 受信器を用いて、490GHz において前方誤り訂正限界 (FEC) 以下で 30 Gbps の伝送レートを達成した。

さらに、図 3 のように異なる周波数 (500 および 800 GHz) と直交する偏波の THz 波を出力する RTD 素子を集積した構造を作製し、偏波多重および周波数多重による大容量化を行った。

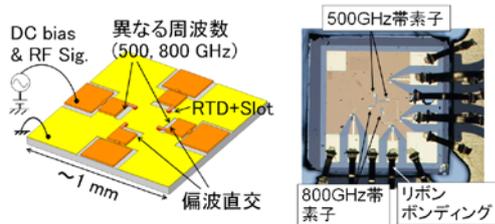


図 3 周波数・偏波多重通信用の集積 RTD-THz 発振素子

図 4(a)に偏波多重無線伝送の実験系を示す。RTD 集積発振素子からの 2 つの偏波出力をワイヤグリッドで分離し、それぞれ SBD で検出した。RTD 発振素子はオフセットスロットアンテナ構造を用い、Si 半球レンズ上の位置を出力取出効率が最大となるように最適化した。各素子の Si レンズ射出出力は約 60 mW であった。図 4(b)のアイパターンに示すように、500 GHz 帯において 28 Gbps×2 チャンネルの無線伝送が FEC 限界以下で得られた。図 4(b)の両偏波の伝送でアイの開きがやや異なっているのは、検出側で用いた増幅器 (LNA) の利得の違いによる。

周波数多重伝送は、図 4(a)と同様の系でワイヤグリッドの代わりに 800 GHz 帯の帯域通過フィルタ (500 GHz を反射) を用い、各周波数帯それぞれの SBD により検出して行った。周波数多重伝送についても、図 5 のアイパターンに示すように、28 Gbps×2 チャンネルの無線伝送が FEC 限界以下で得られた。

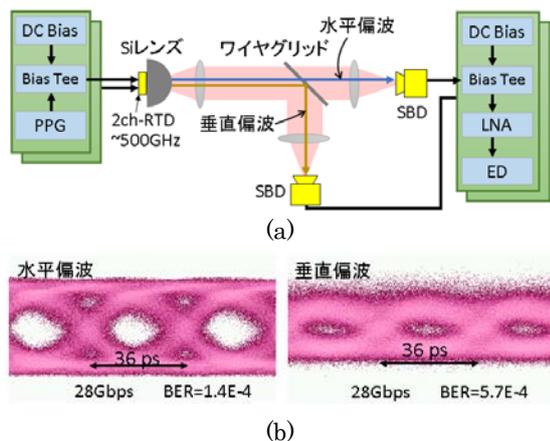


図 4 偏波多重無線伝送系。(a)実験系 (b)アイパターン

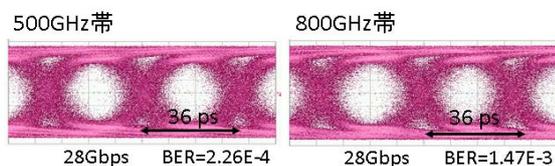


図 5 周波数多重伝送のアイパターン観測結果

これらは初期実験であり、信号発生装置 (PPG) の制限でチャンネルあたり 28Gbps の 2 チャンネル伝送までであるが、より高速の伝送および周波数と偏波の多重を組み合わせた伝送も可能である。また、受信系では個別部品を用いたチャンネル分離を行ったが、検出器も集積構造にすることにより小型化が可能である。

### 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

本研究は、高速直接変調可能でコンパクトな室温 THz 発振器の開発による大容量 THz 無線通信を目指した。高周波化・高出力化・周波数多重化など本研究の成果をさらに発展させることにより、大気吸収の大きい 1THz 以上ではキオスクダウンロードや LSI チップ・ボード間などの短距離大容量通信、また、1THz 以下ではビル間や光ファイバ端末からのシームレスな通信など比較的長距離の大容量無線通信が簡易なデバイスで可能になり、幅広い応用が期待できる。また、RTD 発振素子は、この他にもイメージングや分析など、THz 帯の種々の応用に対して簡易な光源として波及効果があると考えられる。

### 4. むすび

THz 帯の超高速無線通信のキーデバイスとして、RTD-THz 発振素子の開発を行い、室温電子デバイスでは最高の 1.92 THz の発振に成功するとともに、THz 無線通信の初期実験として、RTD 発振素子の直接変調により、周波数および偏波の多重伝送を行い、それぞれ 28 Gbps×2 の高速無線伝送を達成した。RTD 発振素子の構造最適化と周波数多重の多チャンネル化により、さらに大容量の無線伝送が期待できる。

#### 【誌上発表リスト】

- [1]S. Kitagawa, S. Suzuki, and M. Asada, "Wide frequency-tunable resonant tunnelling diode THz oscillators using varactor diodes", Electron. Lett vol.52 No.6 pp479-481 March 2016
- [2]T. Maekawa, H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada, "Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss", Appl. Phys. Express vol. 9 024101(1-4) January 2016
- [3]K. Okada, K. Kasagi, N. Oshima, S. Suzuki, and M. Asada, "Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator Using Patch Antenna Integrated on Slot Resonator for Power Radiation", IEEE Trans. THz Sci. Tech vol. 5 no. 4 July pp613-618 July 2015

#### 【申請特許リスト】

- [1]鈴木左文、北川成一郎、浅田雅洋、周波数可変テラヘルツ発振器及びその製造方法、日本、平成 26 年 5 月 8 日

#### 【受賞リスト】

- [1]浅田雅洋、鈴木左文、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞、“テラヘルツ固体素子の先駆的研究” 2015 年 9 月

#### 【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、(Tech-On サイト掲載 2013 年 12 月、誌上掲載 2014 年 1 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/>