

高指向性アンテナ一体集積ワンチップテラヘルツ無線通信デバイスの研究 (142103009)

Study on Terahertz Wireless Communication Devices Integrated with High-Gain Antennas

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 26 年度～平成 28 年度

概要

テラヘルツ帯の無線通信では大容量の無線通信が期待されるが、光学コンポーネントによりシステム全体の構成が大きくなっているため、半導体チップに発振器およびオンチップアンテナを集積した非常にコンパクトなデバイスを作製し、これを用いることで、コンパクトな無線通信システムを構築することを目的に研究を行った。高速変調可能かつ高出力な共鳴トンネルダイオード発振器を開発し、これを用いることで、650GHz 帯で 44Gbps の高速通信を実現した。オンチップアンテナと集積可能な高電子移動度トランジスタを用いた受信器を開発し、デバイスのゲート長を短縮し、また、直列抵抗成分を削減することで 13A/W の高感度を得た。また、26GHz の広い帯域を得ると共に、1.5Gbps の 300GHz 無線通信を達成した。さらに、共鳴トンネルダイオード発振器にレンズ等なしで高指向性の放射が可能なラジアルスロットアンテナを集積し、15dBi の指向性を得るとともに、軸比 2.2dB の円偏波放射を得た。これを用いた通信ではデバイスの回転角度に依存しない姿勢無依存通信を達成すると共に、完全にレンズフリーの通信を実現した。

1. まえがき

光と電波の境界である、テラヘルツ（数 100GHz～数 THz）周波数帯は、化学・医療・バイオテクノロジーなどの分野で分析やイメージングなど非常に幅広い応用に役立つことが期待され、近年の精力的な光源開発によって実際に初期的な応用のデモンストレーションが行われている。特に、最近の情報通信の大容量・高速化に対応できるテラヘルツ無線通信は国内外で精力的に研究されている。

テラヘルツ帯では、短距離の大容量無線通信が期待されるが、通信デモンストレーションに使われているコンポーネントが 10センチ程度と大きく一般への普及にはほど遠い。そのため本研究では、電子デバイスを用いた発振器と受信器に指向性の高い平面アンテナを実装することで、従来の大きなシステムを数ミリ程度に劇的にコンパクト化させ、モバイル端末に実装可能なテラヘルツ無線通信チップを実現することを目的とし、以下の研究を行った。まず、コンパクトで高速変調可能な高出力共鳴トンネルダイオード (RTD) 発振器および微細ゲートの高電子移動度トランジスタ (HEMT) を用いた高電流感度受信器を開発し、それらに高指向性の平面アンテナを集積した。これら開発したデバイスを用いレンズを用いないチップのみでのテラヘルツ無線通信デモンストレーションを行い、さらに、通信容量の拡大と送受信器の姿勢によらない円偏波を用いた通信を達成した。

2. 研究開発内容及び成果

2.1 高速変調可能で高出力な RTD 発振器

研究目的の一つである高速変調可能で高出力かつコンパクト発振器の実現を目指し、まず高速変調特性を達成するため、RTD 発振器に急峻な周波数特性を持つフィルタを集積し変調信号に対するカットオフの向上を狙った。作製したデバイスのカットオフ周波数を測定したところ、シグナルジェネレータの上限である 70GHz まで信号を入力したが、顕著な応答の劣化は見られず、カットオフは 70GHz 以上となることがわかった。これにより、OOK 等の簡単な変調方式でも 100Gbps 以上の通信が RTD 発振器で達成可能であることを示した。

次にレンズ不要の高出力 THz 放射を目指し、ダイポールアレイアンテナを RTD 発振器の上に積層した新たなデ

バイスを提案し、さらに、大規模なアレイ化を行うことで高出力化を図った。発振出力はアレイの個数に比例して増加し、単体での発振出力は約 $9\mu\text{W}$ 程度であったが 89 素子のアレイにすることによって出力合成され約 $730\mu\text{W}$ の出力が 1THz 得られた。これは 1THz 帯のデバイスとしては最高の発振出力であり、ミリワットクラスの出力を達成した。

以上のデバイスをベースに、高速変調可能な発振器を用いて無線通信実験を行った。RTD の発振周波数は 650 GHz、通信距離は 10cm 程度である。25 Gbps までは明瞭なアイ開口が得られ、エラーフリー (BER $<10^{-12}$) が得られた。高ビットレートの 44 Gbps ではアイが不明瞭になってきているが、 1.3×10^{-3} の前方誤り訂正可能 (FEC limit) な BER となり、擬似エラーフリーの通信を達成した。

2.2 高感度な HEMT 発振器

電界効果トランジスタを用いた THz 受信器において、短チャネルではバリスティックに電子が走行するため高い電流感度が期待出来ることから、微細ゲートを持つ高電子移動度トランジスタ (HEMT) にアンテナを集積した受信器の作製を行った。作製した HEMT はゲート長 $L = 45\text{ nm}$ 、ゲート幅 $W = 10\mu\text{m}$ 、アンテナインピーダンス $R_a = 50\Omega$ である。最大伝達コンダクタンス $g_{m,\text{max}} = 2.3\text{ S/mm}$ 、サブスレッショルド特性 $S.S. = 89\text{ mV/dec}$ であった。感度は 280GHz の通倍器からの信号を照射し測定したところ、約 13 A/W の高感度を達成した。これは商用の SBD ($\sim 3\text{ A/W}$) よりも数倍高い値である。また、デバイスの帯域も広く 26 GHz 程度のカットオフが得られ、10Gbps 以上の高いビットレートにも対応可能であることがわかった。さらに、作製した素子を用いて無線通信実験も行った。300 GHz の通倍器を送信器として用いたところ、送信パワーが 280 μW の時、明瞭なアイ開口が得られ、1.5 Gbps の無線伝送を達成した。通信距離は 10cm 程度である。

2.3 高指向性オンチップアンテナ集積素子とそれを用いた姿勢無依存無線通信

チップのみでの無線通信実現のため、高指向性のラジアルスロットアンテナ (RLSA) を集積した新たな素子の研究を行った。RLSA では円偏波放射となるため、直

線偏波と違って偏波の向き左右されることのない、姿勢無依存な通信も可能となる。デバイスは、中央にクロススロットが RTD メサと共に集積され、RTD より発生した THz 電磁波はクロススロットより基板側に放射される。基板は約 50 μm 程度になっており、下面には金属板が蒸着されている。これにより放射された電磁波は基板内を伝っていき、クロススロットの周りに同心円状に配置されたスロットペアから放射される。スロットペアからは円偏波として放射され、さらに多数のスロットペアのアレイ効果により高指向性が実現できる。デバイスサイズは 2mm 角程度と非常にコンパクトである。

作製したデバイスの発振特性(発振周波数および放射パターン)を測定したところ、発振周波数は 500GHz であり、放射は主に基板上面方向に得られ、指向性は 15dB であった。また、円偏波度を示す軸比についてもワイヤグリッド偏光子を利用し測定したところ、軸比は 2.2dB で円偏波の放射に成功した。

作製したデバイスを用いてレンズを全く用いない通信システムを構築し通信実験を行った。円偏波で、どのような姿勢でも通信リンクが確立できるか示すために、デバイスを回転させながらビットエラーレートを測定した。構築したシステムを図 1 上に示す。初期実験のため、通信速度は 1Gbps とし、SBD 受信器との距離は約 1cm とした。エラーレートはどの角度でも 2×10^{-3} 以下を保っており、また、角度に対してほとんどエラーレートは依存しないことがわかった(図 1 下)。これにより、円偏波による無線通信、および、完全にレンズ等のシステムを用いないコンパクトな無線通信システムを実現した。

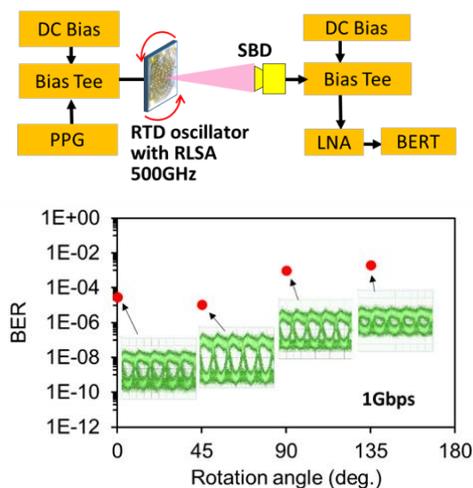


図 1 オンチップアンテナ集積 RTD 発振器による姿勢無依存通信の系とビットエラーレート

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

本研究により、RTD 発振器により、超高速の無線通信が実現できること、および、小型なアンテナがオンチップで集積可能であることを実験的に示した。今後は、まず、さらなる大容量化のために、テラヘルツ帯の周波数を最大限有効利用する周波数多重通信を行い、複数チャネルの通信により大容量化する。また、偏波多重や軌道角運動量の異なる電磁波を用いた多重(OAM 多重)を組み合わせることで究極的な大容量化に発展させる。これら多重通信用のデバイスの開発も行っていく。現在、テラヘルツ帯の無線通信開発には企業の積極的な参入は少ない。これはミリ波帯の開発が直近の課題であり、ミリ波でも十分に大容量

との認識があるからだと考えられる。しかしながら、データトラフィックは現在も加速的に増加しているため、今後、さらなる大容量化が求められることはほぼ間違いない。そのため、ミリ波通信では不可能な 100Gbps 超、1Tbps に届くような伝送容量を達成することで、テラヘルツ帯の真の有効性を示し、開発の参入障壁を下げるような試みを行っていく。また、デバイスが従来の MMIC と違い、比較的単純であることもアピールすることで種々の研究機関や企業の参入を促す。今回開発したラジアルラインスロットアンテナ集積 RTD 発振器はコンパクトなデバイスでチップだけでの通信が可能である。現在、テラヘルツ帯の通信ではレンズ等の大きなコンポーネントを使うのがほぼ当たり前になっているため、開発したデバイスを SCOPE の成果発表や大学の行事、および、学会や研究会において積極的に展示していくことにより公知を広めていく。また、RTD デバイスは現在複数のプロジェクトが国内外で進められており、通信に限らず様々な応用への可能性を探り、テラヘルツ帯のエレクトロニクスによる開拓を進めていく。

4. むすび

RTD 発振器では、数十 GHz の帯域を得ると共に、ミリワット級の出力を得た。さらに 40Gbps を超える高速通信を達成した。HEMT 受信器では、13A/W の高感度を達成し、また、それを用いた無線通信も行った。コンパクトなオンチップアンテナである RLSA を集積し、レンズ不要の姿勢無依存通信を実現した。

【誌上発表リスト】

- [1] K. Kasagi, N. Oshima, S. Suzuki, and M. Asada, "Power Combination in 1 THz Resonant-Tunneling-Diode Oscillators Integrated with Patch Antennas," *IEICE Trans. Electron.* Vol. E98-C, No. 12, pp. 1131-1133, 1 Dec. 2015.
- [2] N. Oshima, K. Hashimoto, S. Suzuki, and M. Asada, "Wireless data transmission of 34 Gbit/s at a 500-GHz range using resonant-tunneling-diode terahertz oscillator" *Electron. Lett.*, vol. 52, no. 22, pp. 1897-1898, Oct. 2016.
- [3] S. Suzuki, T. Nukariya, Y. Ueda, T. Otsuka, and M. Asada, "High Current Responsivity and Wide Modulation Bandwidth Terahertz Detector Using High-Electron-Mobility Transistor for Wireless Communication" *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, vol. 37, no. 7, pp. 658-667, Jul. 2016.

【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、国際 PCT 出願、2014 年 7 月 1 日

【受賞リスト】

- [1] 浅田雅洋、鈴木左文、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 9 日

【報道掲載リスト】

- [1] “テクノトレンド 未利用の電波ミリ波 ウエアラブルで高速通信”、日経産業新聞、2014 年 12 月 26 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.pe.titech.ac.jp/SuzukiLab/index.html>