

共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ無線技術の現状と展望

Recent Progress and Future Prospects of Terahertz Communications

Using Resonant Tunneling Diodes

大阪大学大学院基礎工学研究科 ○永妻忠夫、富士田誠之

ローム株式会社フォトニクス研究開発センター* 向井俊和*、鶴田一魁*、大西 大*

○Tadao Nagatsuma, Masayuki Fujita, Toshikazu Mukai*, Kazuisao Tsuruda*, Dai Onishi*

iPad を始めとする携帯型のタブレット端末が急速に普及し、大容量の情報を無線でダウンロードしたり、端末間でギガバイト級の膨大なデータを無線転送するようなシーンが増えてきた。現在、光ファイバーによる家庭用ブロードバンド接続サービス (FTTH : Fiber to the home) は、毎秒 1 ギガビットの速度に達しているが、無線 LAN をはじめとする無線通信の実効速度はこれよりも一桁近く遅く、無線通信の高速化に対するニーズは留まるところを知らない。無線の高速化がこのまま進んだ場合、2020 年頃には数 10Gbit/s から 100Gbit/s に達するという予測もある。

高速無線を実現する手段として、近年、100GHz を超えるキャリア周波数の利用に関心が集まっている[1, 2]。特に 275GHz を超える電波については、国際的な周波数割当の議論が始まったばかりであり、仮に数 10GHz もの帯域を利用することができれば、単純な強度変調方式で数 10Gbit/s もの伝送速度を実現できる。このような背景の中、半導体電子デバイス的高速化が着実に進んでおり、発振器を例にとってみると、化合物半導体トランジスタのみならずシリコン CMOS トランジスタでも 300GHz を超える発振器 IC が報告されている[3]。このほかに、テラヘルツ帯で動作する半導体発振素子として注目されているものに、共鳴トンネルダイオード (Resonant Tunneling Diode: RTD、図 1) がある。

図 2 の直流電流電圧特性に示すように負性抵抗領域を有するため、その領域に電圧バイアスすること (同図 A) で発振器として用いることができる。浅田ら[4, 5]は、アンテナを含めたデバイス構造の最適化を図り、620GHz で 610 μ W、1.3THz で 10 μ W

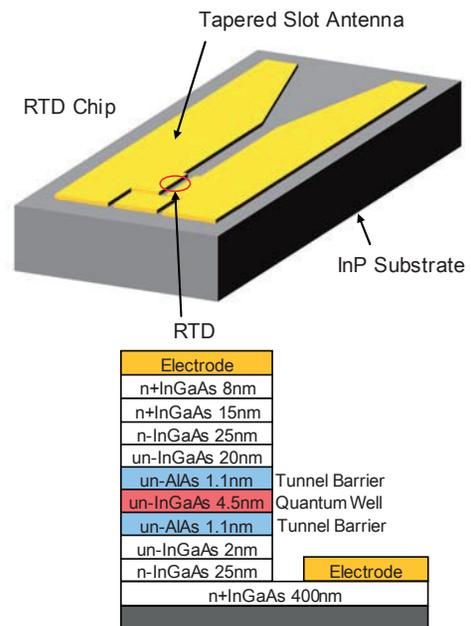


図 1. 共鳴トンネルダイオードの構造.

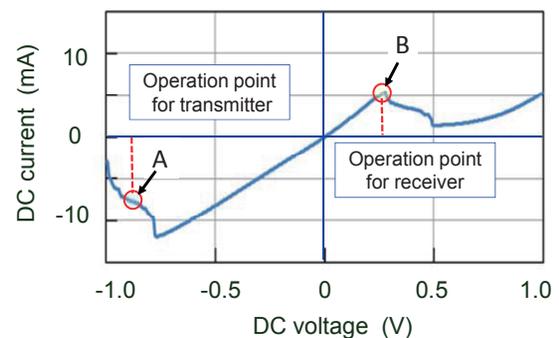


図 2. 動作点. A:送信器, B:受信器.

の出力を達成している。この値は、単一方向キャリアフォトダイオードに代表される光電変換素子を用いてフォトミキシングにより発生したテラヘルツ波の出力[1]と同等以上のレベルである。一方、RTD の強い非線形性を利用して、バイアス点を負性抵抗領域に入る直前（同図 B）に設定することで、超高感度な検出器としても動作させることができる。

図3は、図1のテーパースロットアンテナ集積の RTD にギガビット級の変復調を行わせるために同軸コネクタを有する基板に実装したものである[6]。同基板モジュール2台準備し、図4のように対向させることで、無線通信の実験を行った[7, 8]。RTD の発振周波数は300GHz である。送信器の DC バイアスポイントを変えて、1.5Gbit/s でビットエラーレート(BER)を測定したところ、図5に示すように、エラーフリー(BER10^{-11})となるための最適なバイアスポイントが送信器側に存在することが明らかになった。これは負性抵抗領域の幅と RTD に与える変調信号の大きさに依存する。またその時のアイダイアグラムを図6に示す。エラーフリー動作が達成できた最大の伝送速度は、2.5Gbit/s であった。

より高い周波数の RTD 発振器を利用した伝送実験としては、540GHz で 3Gbit/s まで伝送実験を行った(ただし BER= 3×10^{-5})という報告がある[9]。発振器のバイアスをダイナミックに変えてギガビット級の動作を行う場合、図5で明らかなように印加する電圧信号にオーバーシュートやリングングが生じると、最適な動作マージンが狭くなるため、実装等にも注意が必要である。

RTD 検出器のみを用い、別に準備した送信器と組み合わせで伝送実験を行ったところ、5.5Gbit/s までのエラーフリー動作を確認した。また、RTD 検出器に関して、さらなる感度の向上を目的として、球面レンズを付けたモジュールを開発した(図7)[10]。

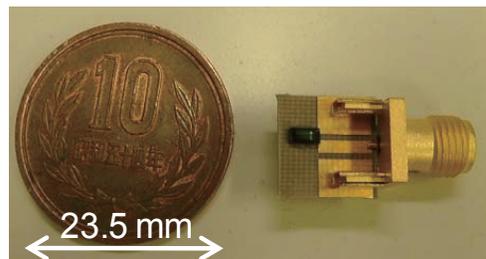


図3. RTD トランシーバモジュール.

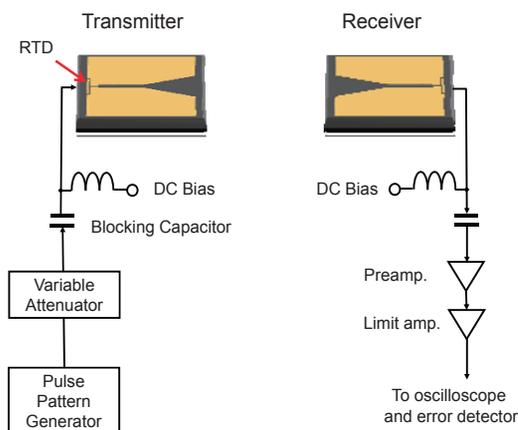


図4. RTD トランシーバを用いた無線実験.

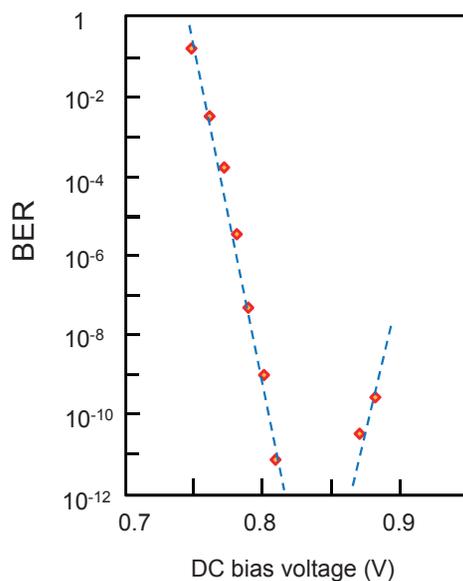


図5. BER の送信器 DC バイアス依存性.

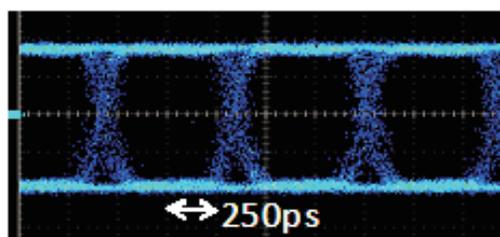


図6. 1.5Gbit/s 伝送時のアイダイアグラム.

現状では、無線通信も含め、テラヘルツ波システムのほとんどは、バルクの個別部品を用いた大型・立体構造のものである。今後、システムとして大幅な小型化と低消費電力化を図るには、デバイスを集積化した「テラヘルツ波集積回路」の実現が不可欠である。我々は平成24年度より、総務省戦略的情報通信研究開発制度(SCOPE)において、共鳴トンネルダイオードを用いた極低消費電力テラヘルツ波無線通信に向けた集積回路基盤技術の研究開発を推進している。以下では、その計画と進捗について紹介する。

無線通信モジュールとしては、まず、テラヘルツ波の送信・受信機能をもったアクティブ素子が必須である。前述してきたようにRTDは小型の電子素子であり、発振・周波数通倍・周波数混合・検出といった機能を有する複数の電子素子で構成する場合[11]や、周波数がテラヘルツ波相当に異なる二つのレーザ光を高速のフォトダイオードで混合し、その差周波を取り出すというフォトミキシング技術を用いたもの[12]と比べて、その大きさ、消費電力を1/100以下に小さくできる。さらにバイアス電圧を変化させるだけで、一つの素子で発振素子と検出素子の両方の役割を果たすことができるため、RTDはテラヘルツ波集積回路の構成要素として最適である。

次に、回路内配線・分波・アンテナといったパッシブ機能を持ち、アクティブ素子を集積化可能なテラヘルツ波集積回路のプラットフォーム技術の開拓が必要である。テラヘルツ波は光波と電波の中間周波数帯であるため、光波領域と電波領域、双方の技術の利用が考えられる。しかし、レンズやミラーなどの光学部品は、大型かつ立体構造であり、集積化には向かない。また、電波領域で使われる中空金属導波管は、微細な立体構造となり、テラヘルツ波帯では作製も困難となる。さらに、金属伝送線路は、テラヘルツ波帯では金属の吸収の影響が大きくなるため、導波損失が大きくなる。

そこで、我々は、テラヘルツ波集積回路のプラットフォーム技術として、光波領域での進展が著しい2次元フォトニッ

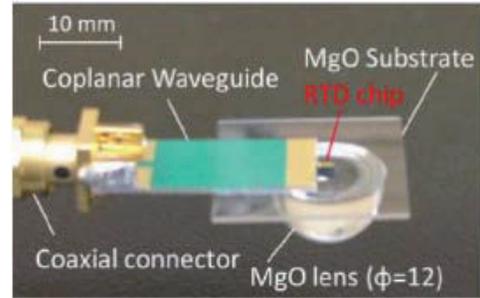


図7. レンズを付加したRTDモジュール.

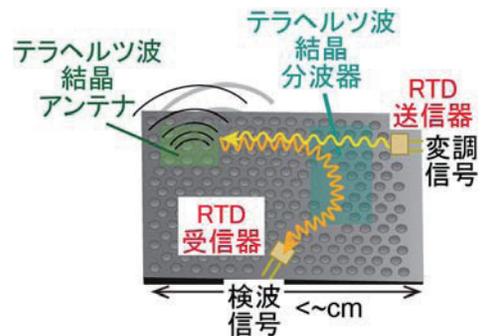
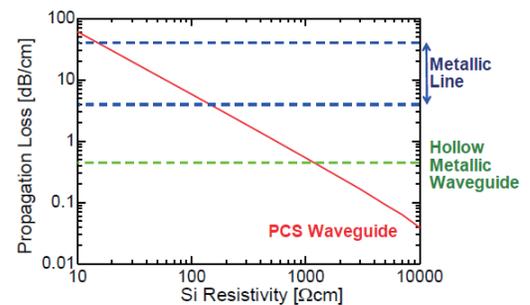


図8. テラヘルツ波結晶送受信集積チップのイメージ.



Propagation loss < 0.2 dB/cm with 3000 $\Omega \cdot \text{cm}$

図9. テラヘルツ波結晶伝送路(PCS Waveguide)の伝送線路の損失(理論計算).

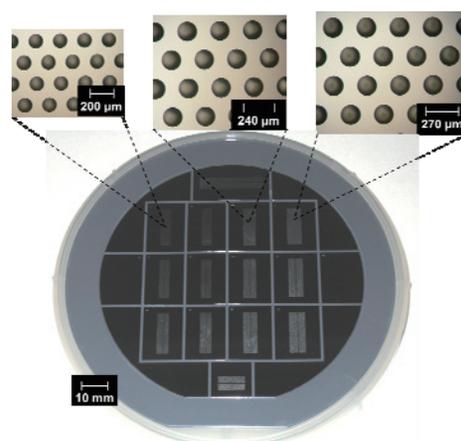


図10. 試作したテラヘルツ波結晶.

ク結晶スラブ[13]に着目し、それをテラヘルツ波領域へと展開した「テラヘルツ波結晶」集積回路の基礎基盤技術を研究開発することを、共鳴トンネルダイオード自身の高性能化に加え、SCOPE のテーマとしている。ここで、2次元フォトニック結晶スラブ（テラヘルツ波結晶）とは、波長オーダーの大きさの2次元周期構造を有する誘電体板であり、その設計により、電磁モードが存在できないフォトニックバンドギャップ効果が現れ、テラヘルツ波が制御できる。さらに意図的に周期構造を乱すことで、フォトニックバンドギャップ内に導波モードや共振モードを導入し、波長サイズ以下の微小領域での低損失な伝送路や共振器などを実現することも可能で、テラヘルツ波集積回路に有望である。このテラヘルツ波結晶に共鳴トンネルダイオードをハイブリッド集積化することで、図8のようなテラヘルツ波結晶送受信集積チップの実現を目指している。テラヘルツ波結晶の材料として、高抵抗シリコンを用いることで、既存の金属伝送線路や導波管と比べて、2桁以上小さい伝搬損失が理論的に予想される（図9）、微小電気機械システム(MEMS)の作製技術の利用も可能である。実際、図10のように良好な形状のテラヘルツ波結晶の作製に成功している[14, 15]。

参考文献

- [1] T. Kleine-Ostmann and T. Nagatsuma, "A review on terahertz communications research, J. Infrared Milli. Terhz. Waves, vol. 32, no. 2, pp. 143-171, 2011.
- [2] H.-J. Song and T. Nagatsuma, "Present and future of terahertz communications", IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, vol. 1, no. 1, pp. 256-264, 2011.
- [3] T. Nagatsuma, "Terahertz technologies: present and future", IEICE Electronics Express, vol. 8, no. 14, pp. 1127-1142, 2011.
- [4] M. Asada, and S. Suzuki, "Terahertz oscillators using electron devices -an approach with resonant tunneling diodes", IEICE Electronics Express, vol. 8, no. 14, pp. 1110-1126, 2011.
- [5] M. Asada and S. Suzuki, "Room-temperature terahertz oscillators using resonant tunneling diodes with reduced delay times", Tech. Dig. Intern. Workshop on Frontiers in THz Technologies (FTT2012), WeP.2, Nara, 2012.
- [6] T. Mukai, M. Kawamura, T. Takada, and T. Nagatsuma, "1.5-Gbps wireless transmission using resonant tunneling diodes at 300 GHz," Tech. Dig. Optical Terahertz Science and Technology 2011 Meeting, MF42, Santa Barbara, 2011.
- [7] T. Shiode, T. Mukai, M. Kawamura, and T. Nagatsuma, "Giga-bit wireless communication at 300 GHz using resonant tunneling diode detector", Proc. Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2011), WE6A-01, pp. 1122-1125, Melbourne, 2011.
- [8] T. Shiode, M. Kawamura, T. Mukai, and T. Nagatsuma, "Resonant-tunneling diode transceiver for 300 GHz-Band Wireless Link," Tech. Dig., Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP2012), WC-1, Kyoto, 2012.
- [9] 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 tunneling diodes”, *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 10, pp. 582–583, 2012.

[10] A. Kaku, T. Shiode, T. Ishigaki, T. Mukai, K. Tsuruda, M. Fujita, and T. Nagatsuma, submitted to Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP2013).

[11] C. Jastrow, S. Priebe, B. Spitschan, J. Hartmann, M. Jacob, T. Kurner, T. Schrader, and T. Kleine-Ostmann, “Wireless digital data transmission at 300 GHz,” *Electron. Lett.*, vol. 46, no.9, pp. 661–663, 2010.

[12] H. -J. Song, K. Ajito, Y. Muramoto, A. Wakatsuki, T. Nagatsuma and N. Kukutsu, “24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications,” *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 15, pp. 953–954, 2012.

[13] S. Noda, M. Fujita, T. Asano, “Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities”, *Nature Photon.*, vol. 1, no. 8, pp.449–458, 2007.

[14] T. Ishigaki, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida and T. Nagatsuma, “Photonic-crystal slab for terahertz-wave integrated circuits”, *Tech. Dig. IEEE Photon. Conf.*, ThJ3, Burlingame, 2012.

[15] R. Kakimi, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida and T. Nagatsuma, “Trapping a terahertz wave in a photonic-crystal slab”, *Tech. Dig. IEEE Photonics Conf.*, WQ5, Burlingame, 2012.