

富士田 誠之

大阪大学大学院基礎工学研究科  
准教授

共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶の融合による  
テラヘルツ集積基盤技術の創成

## § 1. 研究成果の概要

本研究は、デバイス・材料・回路・システムの研究者が結集して、量子エレクトロニクスデバイスと微細構造フォトニック材料、高周波回路、通信システム技術とを融合させることで、電波と光波の間の未開拓の周波数を有するテラヘルツ電磁波を利活用可能にする集積デバイスシステムの学理を創成することをねらいとしている。単体の電子デバイスとして最も高い 1 THz を超える周波数でテラヘルツ波を発生可能な量子薄膜ナノ構造を有する小型電子デバイス共鳴トンネルダイオードに着目し、通信速度の限界を追究する。その物理限界を超えるため、共鳴トンネルダイオードと極低損失な集積プラットフォームとなる人工材料フォトニック結晶を融合した集積デバイスを創成する。その結果、本研究以前には無線通信の実施例がないような高い周波数帯を開拓し、0.3 THz から 2 THz にわたる従来にない広大な周波数帯域を利用した 100 Gbit/s を超え、Tbit/s に迫る超高速無線通信に向けた新たな集積基盤技術を開発し、テラヘルツ波を用いた情報伝送などのデモンストレーションを行うことを目標とする。

今年度は前年度までに引き続き、テラヘルツフォトニック結晶および、共鳴トンネルダイオード、それぞれの基盤技術に関する研究を推進するとともに、両者の融合とそれらのテラヘルツ通信応用への展開を目指した。

フォトニック結晶導波路の低損失性を活用するためには、共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶導波路との結合効率を向上させる必要があるが、テラヘルツ帯で動作する共鳴トンネルダイオードの大きさは、フォトニック結晶導波路のスケールと比べて桁違いに小さいため、両者の高効率な結合は挑戦的課題といえる。本研究では、前年度までにフォトニック結晶導波路中に八木-宇田アンテナのような金属パターンを形成した共鳴トンネルダイオードチップを埋め込む構造を考案することで、50%を上回る高効率結合を実現した。しかしながら、通信応用等を考えた場合、前述の結合構造は共振現象を利用しているため、帯域が制限されてしまうという課題があった。そこで、

広帯域動作が期待される断熱的モード変換機構を有する共鳴トンネルダイオードチップを考案し、0.3 THz 帯にて前年度までの約 10 GHz を大きく上回る 40 GHz 以上の 3 dB 帯域を実現した<sup>1)</sup>。一方、共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶の融合に関する技術を 0.3 THz 帯から 1 THz 帯へと展開するため、1 THz 帯のフォトニック結晶導波路を試作し、その動作の実証に成功した。

また、共鳴トンネルダイオードデバイスの性能向上に向けて、外部から入力されるテラヘルツ波に対する注入同期現象、特に共鳴トンネルダイオード発振器自身からの出力による自己注入同期現象に関して、前年度までに構築してきた回路モデルを拡張することで解析した。得られた実験結果はシミュレーションとよく一致し、本研究で提案しているフォトニック結晶共振器を用いた発振状態制御に関する理論の基礎となるとともに、本研究で構築してきた回路モデルの有用性を示すことに成功した<sup>2)</sup>。

さらに、前述の共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶導波路とを融合させたデバイスを中空構造を有するテラヘルツファイバを利用したテラヘルツファイバ通信の送受信器として展開し、10 Gbit/s のエラーフリー通信を実現し、非圧縮 4K 映像の伝送に成功した<sup>1)</sup>。また、フォトニック結晶導波路と一体形成した広帯域(75 GHz)高利得(20 dBi)アンテナを開発し、非圧縮 4K 映像のテラヘルツ無線伝送にも成功した<sup>3)</sup>。

#### 【代表的な原著論文】

1. Xiongbing Yu, Yasuo Hosoda, Tomoyuki Miyamoto, Katsunori Obata, Jaeyoung Kim, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma, “Terahertz fibre transmission link using resonant tunnelling diodes integrated with photonic-crystal waveguides”, *Electronics Letters*, vol. 55, no. 7, pp. 398-400, 2019.
2. Luong Duy Manh, Sebastian Diebold, Kousuke Nishio, Yousuke Nishida, Jaeyoung Kim, Toshikazu Mukai, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma, “External feedback effect in terahertz resonant tunneling diode oscillators”, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 8, no.4, pp. 455 - 464, 2018.
3. Withawat Withayachumnankul, Ryoumei Yamada, Masayuki Fujita, and Tadao Nagatsuma, “All-dielectric rod antenna array for terahertz communications”, *APL Photonics*, vol. 3, no. 5, pp. 051707-1-051707-13, 2018.

## § 2. 研究実施体制

### (1) 阪大グループ

- ① 研究代表者: 富士田 誠之 (大阪大学大学院基礎工学研究科, 准教授)
- ② 研究項目
  - ・共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶の融合に関する基盤研究
  - ・共鳴トンネルダイオードを用いた通信の開発

### (2) ロームグループ

- ① 主たる共同研究者: 金 在瑛 (ローム(株)研究開発センター, 主任研究員)
- ② 研究項目
  - ・共鳴トンネルダイオードデバイスの高度化に向けた基盤研究
  - ・0.3 THz 帯共鳴トンネルダイオードを用いた通信の開発

### (3) 東工大グループ

- ① 主たる共同研究者: 鈴木 左文 (東京工業大学工学院, 准教授)
- ② 研究項目
  - ・共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器の高性能化
  - ・0.5 THz 帯を超える超高周波共鳴トンネルダイオードを用いた通信の開発