

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、前年度までに通信応用等に有利な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、それをフォトニック結晶導波路へと埋め込む構造を検討してきた。共鳴トンネルダイオードチップとフォトニック結晶導波路の上下方向のモード形状のマッチングを取ることで、最大結合効率 90 %かつ 50 GHz

の 3 dB 帯域という高効率広帯域結合を 0.3 THz 帯で実現した<sup>1)</sup>. このような断熱的モード変換機構を活用し, 変復調を可能とする共鳴トンネルダイオードミキサのフォトニック結晶導波路への集積化を進めた. また, 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設計, 試作し, その動作の実証と通信応用に成功した.

また, 共鳴トンネルダイオードデバイスの出力向上に向けて, 導体損失およびインダクタンスの低減が可能な空洞共振器型共鳴トンネルダイオード発振器を提案し, その作製に着手した. さらに, 共鳴トンネルダイオードを発振器として動作させ, 検出対象のテラヘルツ波と同期させることで発振出力が検出動作に援用されることで検出感度が飛躍的に増大する同期検波現象を見出した<sup>2)</sup>.

0.35 THz 動作の共鳴トンネルダイオードを送信器として, 前述のような同期検波方式を利用した共鳴トンネルダイオードを受信器として無線伝送したところ, 従来の直接検波方式よりも高い信号強度が得られ, 30 Gbit/s という電子デバイス送受信器を用いた誤り訂正なしのエラーフリー無線通信として, 過去最高の値が得られた<sup>2)</sup>. さらに, フォトニック結晶導波路同士を上下に近接結合させるインターフェースを開発し, 通信応用できることを示した<sup>3)</sup>.

#### 【代表的な原著論文】

1. Xiongbing Yu, Jaeyoung Kim, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma, “Efficient mode converter to deep-subwavelength region with photonic-crystal waveguide platform for terahertz applications”, *Optics Express*, vol. 27, no. 20, pp. 28707–28721, 2019.
2. Yousuke Nishida, Naoki Nishigami, Sebastian Diebold, Jaeyoung Kim, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma, “Terahertz coherent receiver using a single resonant tunnelling diode”, *Scientific Reports*, vol. 9, pp. 18125-1–18125-9, 2019.
3. Daniel Headland, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma, “Near-field out-of-plane coupling between terahertz photonic crystal waveguides”, *Optica*, vol. 6, no. 8, pp. 1002–1011, 2019.

## §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: 奥 良彰 (ローム(株)研究開発センター 統括課長)
- 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電気電子系 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