

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「素材・デバイス・システム融合による
革新的ナノエレクトロニクスの創成」
研究課題「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」

研究終了報告書

研究期間 2015年10月～2021年3月
(新型コロナウイルス感染症の影響を受け2021年9月まで延長)

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)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

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た。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 (RTD: Resonant Tunneling Diode) に着目し、通信速度の限界を追究した。その物理限界を超えるため、RTD 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の創成を目指した。本研究以前には無線通信の実施例がない高い周波数帯を開拓することで、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デモンストレーションを行うことを目標とした。

RTD デバイス設計の基盤技術として、独自の回路モデルを構築した。インピーダンス整合回路を有する従来よりも高出力な 0.3 THz 帯デバイスを開発し、RTD を送信器および受信器として用いた通信システムとして過去最高となる 9 Gbit/s のエラーフリー無線通信に成功し、非圧縮 4K 映像伝送に成功した。さらに、高電流密度ウエハおよび広帯域変調回路を有する RTD 送信器の利用で 0.65 THz 帯において 25 Gbit/s の無線通信を実現した。一方、RTD を発振器として動作させる場合、外部から到達し、RTD にて検出されるテラヘルツ波とその発振周波数が近い場合には RTD の発振状態が外部からのテラヘルツ波と同期し、その発振出力が検出動作に援用され、感度が増強するという同期検波現象を見出した。この同期検波を利用した RTD 受信器によって、電子デバイスを送受信器として用いたエラーフリーの無線通信として過去最高となる 30 Gbit/s の通信速度を達成した。そして、RTD 受信器による非圧縮 8K 映像の無線伝送に成功した。

RTD を用いたテラヘルツ集積システムのプラットフォームとして、シリコンフォトニック結晶に着目し、従来の金属線路よりも 2 桁以上低損失な 0.1 dB/cm 以下の伝搬損失を有するテラヘルツ導波路を実現した。フォトニック結晶の低損失性を反映した 10,000 以上の高い Q 値を有する共振器の作製に成功し、高感度センシング応用の可能性を示した。テラヘルツ波の波長と比べて 1/100 以下の大きさの微小な RTD とフォトニック結晶導波路との高効率結合が課題であったが、断熱的モード変換機構の開発で最大約 90% の結合効率を実現した。以上の成果を踏まえ、RTD 発振器とフォトニック結晶共振器を結合させることで発振状態の制御の可能性を示した。周波数多重方式による大容量通信の実現に向けて、フォトニック結晶による合分波器を開発し、多チャンネル化の可能性を示した。通信応用において課題となる動作帯域の向上に関して、トポロジカル構造やアングラッド構造などの利用を提案し、1 チャンネルあたり 24 Gbit/s を超える通信速度が得られた。応用上重要であるフォトニック結晶への入出力インターフェースに関して、テーパ構造、有効媒質による平面レンズ、近接場結合といった機構を開発し、テラヘルツファイバ通信および無線通信のデモンストレーションに成功した。

未踏の 1 THz 帯無線通信の実現に向けて、周波数通倍技術による送信器とショットキーバリアダイオード受信器を用いた通信システムを構築し、1 THz 帯フォトニック結晶導波路を伝送路とした通信に成功した。一方、無線通信の実現には送信器の高出力化が必要であることが明らかになった。RTD 発振器の飛躍的な高出力化を可能とする空洞共振器構造を考案し、1 THz 帯でミリワット級の出力が可能であるという理論結果と 0.5 THz 帯での発振動作を得た。そして、将来の超広帯域通信への可能性を切り拓くため、RTD の高周波動作を追求し、外部遅延時間の低減と導体損失の低減をはかることで単体の電子デバイスとして過去最高の 2 THz に迫る 1.98 THz の発振を得た。

新型コロナウイルス感染症の影響を受け 6 ヶ月間研究期間を延長し、RTD デバイスの多チャンネル化に向けた研究と高出力化に関する研究を実施した。

以上の RTD の超高周波デバイスとしてのポテンシャルの追究とフォトニック結晶のテラヘルツ集積プラットフォームとしての有用性を示す研究を通じて、テラヘルツ集積工学といった分野を切り拓き、今後の 6G 無線通信技術とその波及効果が切り拓くであろう様々なテラヘルツ波の利活用に向けた基盤技術を創成することができた。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 単体の電子デバイスにおける最高発振周波数の達成

概要:

共鳴トンネルダイオード発振器の量子薄膜構造の最適化による遅延時間の低減と導体損失の低減により、発振周波数の高周波化に成功し、単体の電子デバイスとして過去最高の 1.98 THz の発振を実現した。本研究成果は電子デバイスの新たな可能性を切り拓く成果であり、応用物理学に関する論文誌 *Applied Physics Express* 誌に掲載され、同誌の創刊 10 周年記念論文 10 選に選ばれた。

2. 共鳴トンネルダイオード発振器の同期検波現象の発見

概要:

共鳴トンネルダイオードの動作電圧を微分負性コンダクタンス領域内に設定した場合、発振器として動作するが、通常、検出器としての動作は不安定になってしまう。本研究では、外部から共鳴トンネルダイオードに到達するテラヘルツ波に共鳴トンネルダイオードの発振状態が同期し、その発振出力が検出動作に援用され、検波強度が 1 万倍増強されることを見出した。これはテラヘルツ分野を含む高周波エレクトロニクスの発展に寄与する成果といえ、英科学誌 *Scientific Reports* 誌および、*Phys.org* や *Science Daily* などの海外科学ニュースサイトに掲載された。

3. 共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶導波路の高効率結合の実現

概要:

テラヘルツ帯で動作する電子デバイス、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である。本研究では、断熱的モード変換機構を共鳴トンネルダイオードデバイスに導入することで最大 90% という高い効率結合を達成した。これは、電磁波科学に関する顕著な成果であり、関連の国際学会 *PIERS2018* にて、*Best Student Paper Awards* を受賞した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 共鳴トンネルダイオードによる非圧縮スーパーハイビジョン映像の無線伝送の実現

概要:

本研究で開発した共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ無線通信システムを構築し、非圧縮 4K スーパーハイビジョン映像の無線伝送のデモンストレーションに成功した。これは実用的に高い品質での超高速無線通信が小型電子デバイスで実現できることを意味し、新たな無線通信の応用の可能性を切り拓く成果である。本成果は、エレクトロニクスに関する論文誌 *Electronics Letters* に掲載され、*Editor* に注目の論文として、紹介された。加えて、前述の同期検波現象を利用した共鳴トンネルダイオード受信器によって、非圧縮フル解像度 8K スーパーハイビジョン映像の無線伝送に世界で初めて成功した。これは *Beyond5G* から 6G への実現に向けた研究開発の動きを加速することが期待されるテラヘルツ波の有用性を示す成果であり、2021 年 2 月 1 日にプレスリリースを行った。

2. テラヘルツ高 Q 値微小共振器の実現

概要:

本研究で開発したフォトニック結晶を用い、10,000 を超える Q 値を有する波長サイズのテラヘルツ共振器を実現した。本共振器を屈折率テラヘルツセンシングに適用した場合の感度をメタマテリアルや金属共振回路を用いた先行研究と比較したところ、最も高い感度が見積もられ、共鳴トンネルダイオードと融合することでテラヘルツセンシングシステムの大幅な小型化と応用展開が期待できる成果である。本成果は、テラヘルツ分野に関する論文誌 *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* に招待論文として掲載された。

3. テラヘルツファイバ通信の実現

概要:

テラヘルツ波の応用として、高速無線通信応用が期待されているが、比較的長い距離を伝送させるためには大型のアンテナが必要である。本研究では、テラヘルツ通信の新たな展開に向けて、中空構造を有する低損失な誘電体ファイバに着目した。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小型デバイスによって、テラヘルツファイバへの高効率な入出力を実現し、テラヘルツファイバによる高速通信に成功した。これは、高度情報化が進む機器内、機器間や車両内における高速通信の応用を切り拓く可能性のある成果であり、英論文誌 *Electronics Letters* 誌の Editor によって、“light at the end of the fiber” というタイトルで紹介された。

4. 小型テラヘルツ合分波器の開発

概要:

テラヘルツ波を用いた超大容量通信の実現に向けて、複数のチャネルを用いた情報伝送を可能とする信号多重化技術が必要であり、テラヘルツ信号を合成・分離する合分波器の開発が求められている。本研究では、フォトニック結晶技術を発展させ、誘電体としてのシリコンに着目し、テラヘルツ波のトンネリング現象を利用することで、4 チャネル合分波器の開発に成功した。本デバイスの大きさは、約 4 cm² と極めて小型であり、テラヘルツ波を用いた超大容量通信の各種応用展開を切り拓く成果であるといえ、米国光学会のフラグシップ誌 *Optica* 誌や *Optics & Photonics News*, *Semiconductor Engineering* などの海外科学技術ニュースサイトに掲載された。

※コロナ延長時の成果

<代表的な論文>

1. T. Maekawa, H. Kanaya, S. Suzuki and M. Asada, “Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss”, *Applied Physics Express*, 9, 024101, 2016.

概要:

共鳴トンネルダイオードの2重障壁の井戸層厚を薄膜化することによって井戸の滞在時間を低減することに加え、共鳴トンネルダイオードとアンテナ電極を接続する部分にエアブリッジ構造を導入することによって、アンテナの導体損失を大幅に低減し、室温において、1.92 THz の基本波発振を実現し、単体の電子デバイスとして過去最高の発振周波数を得た。本成果は共鳴トンネルダイオードの高周波特性を顕著に示す成果として、多くの文献に引用され、*Applied Physics Express* 誌の Spotlight2016 に選ばれ、2018年には同誌の創刊10周年記念論文10選に選出された。

2. S. Diebold, K. Nishio, Y. Nishida, J. Kim, K. Tsuruda, T. Mukai, M. Fujita and T. Nagatsuma, “High-speed error-free wireless data transmission using a terahertz resonant tunnelling diode transmitter and receiver”, *Electronics Letters*, 52, 1999-2001, 2016.

概要:

電波と光波の間の周波数を有するテラヘルツ波を用いた高速無線通信の可能性が期待されている。本研究では、独自の回路設計に基づく共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ波送信器および受信器を開発することで 9 Gbit/s という高速無線通信をエラーフリーな高品質な条件で実現し、小型電子デバイスによるリアルタイム非圧縮4K映像伝送に初めて成功した。本論文は、テラヘルツ波の応用可能性を切り拓く成果として、英論文誌 *Electronics Letters* 誌の Editor によって、“TERAH TV”というタイトルで紹介された。

3. Y. Nishida, N. Nishigami, S. Diebold, J. Kim, M. Fujita and T. Nagatsuma, “Terahertz coherent receiver using a single resonant tunnelling diode”, Scientific Reports, 9, 18125, 2019.

概要:

テラヘルツ波の応用として、超高速無線通信、高分解能センシングなどが期待されているが、その発生、検出技術が未熟であるという課題があり、各種応用を切り拓くためには検出感度の大幅な向上が必要である。本研究で新たに見出した共鳴トンネルダイオードの同期検波現象を活用することで、テラヘルツ波の検出感度を従来の直接検波方式と比較して、1 万倍向上させることに成功し、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、世界最高速の無線通信を実現した。これは、テラヘルツ波を利活用した Beyond 5G 超高速無線通信や分光分析、非破壊検査、計測、セキュリティ応用、高分解能レーダなどの実用化を加速する社会・経済に波及する成果であるといえ、2019年12月2日にプレスリリースを行った。

4. D. Headland, W. Withayachumnankul, M. Fujita, and T. Nagatsuma, “Gratingless integrated tunneling multiplexer for terahertz waves”, Optica, 8, 621-629, 2021.

概要:

抵抗率の高いシリコンはテラヘルツ波の吸収が極めて小さく、微細加工が可能な理想的な誘電体であり、屈折率が高くテラヘルツ波を強く閉じ込めることが可能なため、シリコンを利用することでデバイスサイズの微小化が可能となる。シリコン配線中を伝搬するテラヘルツ波が空隙をまたいで別の構造に移り移るといったテラヘルツ波のトンネリング現象の周波数依存性と空隙の大きさの関係を利用した設計を巧みに行うことで、テラヘルツ波の経路を分ける 4 チャネルの合分波器の実現し、各チャネルにおいて、12ギガビット毎秒以上、すなわち、合計48ギガビット毎秒以上の通信実験に成功した。これは、テラヘルツ波を用いた超大容量通信の各種応用展開を切り拓く成果であるといえ、2021年4月28日にプレスリリースを行った。

※コロナ延長時の成果

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「阪大」グループ

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)

研究項目

- ・研究全体の統括
- ・共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶の融合
- ・テラヘルツ通信の開発

② 「ローム」グループ

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)

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
- ・0.3 THz 帯共鳴トンネルダイオードの高性能化
- ・テラヘルツ通信の開発

③ 「東工大」グループ

主たる共同研究者: 鈴木 左文 (東京工業大学工学院 准教授)

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
- ・1 THz 帯共鳴トンネルダイオードの高性能化
- ・テラヘルツ通信の開発

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

JST の戦略的創造研究推進事業における国際共同研究の実施に係る海外研究者の招へい支援を利用し、豪アデレード大学の **Withawat Withayachumnankul** 准教授を招へいした後、無線通信システム応用に向けたデバイス開発を一層加速するために研究参加者に加わって頂いた。加えて、新たなテラヘルツ応用システムとデモンストレーションの検討と実施に向けて、パイオニア株式会社の研究者にも研究参加者として加わって頂いた。また、テラヘルツ波を利用した非破壊検査装置の実用化を目指すアイレック技建株式会社との共同研究もはじまった。また、新型コロナウイルス感染症の影響下にも関わらず、RTD に関する国内の産業界の認知度の高まりを反映して、様々な企業との共同研究が開始されることになった。さらに、シンガポール南洋理工大学の **Ranjan Singh** 准教授とテラヘルツトポロジカル構造に関する共同研究を推進することで共著論文が *Nature Photonics* 誌に掲載され、仏リール大学 **Guillaume Ducournau** 教授との連携につながるとともに、独デュイスブルグエッセン大学の **Nils Weimann** 教授のグループと RTD 発振器に関する共同研究を行い、論文出版に至った。また、2018 年 11 月に京都で開催されたマイクロ波に関する大規模な国際学会 *Asia Pacific Microwave Conference (APMC) 2018* にて、研究代表者が **Organizer** を務め、本 CREST 研究に関連するテラヘルツ波発生デバイスとその応用に関する国際ワークショップ「*Recent Progress of Terahertz Sources for Advanced Applications*」を欧米からの研究者を招待し、開催するなど、国内外の研究者とのネットワーク形成を進めた。また、主たる共同研究者の鈴木が 2018 年 6 月から 2020 年 5 月まで、研究代表者の富士田が 2020 年 6 月から電子情報通信学会テラヘルツ応用システム特別研究専門委員会の委員長を務めたが、電子情報通信学会総合大会 2021 およびソサエティ大会 2021 にて、企画セッション「*Beyond5G に向けたテラヘルツ研究の最前線*」および「*Beyond 5G、6G に向けたデバイス・材料技術とその応用*」を開催するなど、オンラインを活用することで新型コロナウイルス感染症の影響下にも関わらず、テラヘルツ関連研究に関する国内ネットワークの形成を進めることができた。