

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 (121807004)

Development of integration technologies for terahertz wireless communications
with ultralow power consumption

研究代表者

富士田 誠之 大阪大学
Masayuki Fujita Osaka University

研究分担者

永妻 忠夫[†] 大西 大^{††} 向井 俊和^{††} 鶴田 一魁^{†,††}
Tadao Nagatsuma[†] Dai Ohnishi^{††} Toshikazu Mukai^{††} Kazuisao Tsuruda^{††}
[†]大阪大学 ^{††}ローム株式会社
[†]Osaka University ^{††}ROHM Co. Ltd.

研究期間 平成 24 年度～平成 26 年度

概要

電波と光波の境界領域の周波数を有するテラヘルツ波を用いた超高速無線通信は、臨場感あふれる映像を無線にて遅延なくやりとりすることを可能にするなど、社会にパラダイムシフトをもたらす革新的技術である。本研究開発では、極低消費電力なテラヘルツ波無線通信の実現に向けて、微細構造テラヘルツ波結晶とテラヘルツ波の送受信が可能な小型電子デバイス共鳴トンネルダイオードに着目した。テラヘルツ波デバイス集積の基盤として有望なテラヘルツ波結晶の極低損失性を実証し、共鳴トンネルダイオードを用いた無線通信の世界最高速度を更新した。そして、テラヘルツ波結晶と共鳴トンネルダイオードとを集積化した送受信デバイスを開発することで、テラヘルツ波集積回路の基盤技術の開拓を進めた。

1. まえがき

電波と光の境界領域の周波数(0.1-10 THz)を有する電磁波、テラヘルツ波の高周波広帯域性を活かした超高速無線通信などの応用研究が近年、注目を集めている。現状、テラヘルツ波応用システムを構成するには、光源、検出器、導波管、レンズといった様々な個別備品の組み合わせが必要であり、システム的大幅な小型化と低消費電力化を図るためには、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。ここで、マイクロ波集積回路で使われる平面金属線路は、周波数がテラヘルツ帯まで高くなると、金属による損失の影響が顕著になるという問題があり、新たな集積回路基盤技術の開発が必要である。

以上の背景を基に本研究開発では、テラヘルツ波集積回路の基盤技術として、誘電体の微細構造からなるフォトニック結晶に着目し、それをテラヘルツ波へと展開したテラヘルツ波結晶に基づく集積基盤技術を開発することを目的とした。一方、無線通信を行うには、テラヘルツ波の送信・受信といったアクティブ機能が必須である。そこで、量子効果を有する小型電子デバイスである共鳴トンネルダイオード(RTD: Resonant Tunneling Diode)をテラヘルツ波集積回路のキーデバイスとして着目し、その高速通信の可能性を追究した。そして、テラヘルツ波結晶へ RTD をハイブリッド集積化したテラヘルツ波送受信デバイスの実現を目指した。

2. 研究開発内容及び成果

テラヘルツ波結晶の基本構造としては、半導体薄膜に 2 次元周期の孔を形成したフォトニック結晶スラブを採用した。この構造では、面内の電磁モードを禁止するフォトニックバンドギャップ効果と上下方向の全反射効果で、平面構造にも関わらず、3 次元的なモード制御が可能であるため、低損失なテラヘルツ波の閉じこめが期待できる。本研究では、半導体材料として、テラヘルツ帯で高い屈折率を有し、材料吸収の小さい高抵抗シリコンを用いた。厚さ 200 μm シリコン基板に周期 240 μm の円孔三角格子を形成することで、0.3 THz 帯にフォトニックバンドギャップが発現する設計を得た。この周期構造中に

孔を埋めた線欠陥を導入することで伝送路が形成される。電磁界シミュレーションによって、シリコンの抵抗率が 10000 Ωcm 以上では、伝搬損失が 0.1 dB/cm 以下になるという重要な設計指針が得られた。

以上の設計を基に、フォトリソグラフィ、プラズマエッチングといったマイクロマシンの加工技術により、図 1 に示すようなテラヘルツ波結晶を作製した。作製したテラヘルツ波結晶をテラヘルツ波分光システムで評価したところ、フォトニックバンドギャップの周波数帯に関して、理論と実験が一致し、確かに 0.3 THz 帯のフォトニックバンドギャップ効果が得られることを示した。そして、約 20000 Ωcm の抵抗率を有するシリコン基板を用い、伝搬長の異なる試料を作製することで、伝搬損失を詳細に評価した。測定された最小伝搬損失の値は、典型的な平面金属線路の値である 4-25 dB/cm よりも 1-2 桁低い 0.1 dB/cm 以下であり、光領域を含むあらゆるフォトニック結晶導波路として、過去最高の低損失性が示された。さらに、その低損失性の有効性をテラヘルツ波通信で示すため、図 1 に示すような長さ 50 cm、28 回の曲げを有する試料を作製し、Gbps 級の通信実験を行った。その結果、非圧縮ハイビジョン映像の伝送に適した 1.5 Gbps の通信に成功し、同図に示すようにエラーフリー映像伝送にも成功した。また、最終的な目標となる送受信デバイスの基本要素であるテラヘルツ波結晶伝送路と一括形成可能な自由空間入出力カプラと、周波数に関する信号処理を可能とする波長サイズの長さの小型合分波器の開発にも成功し、それぞれにおいて、1.5 Gbps のエラーフリー通信に成功した。

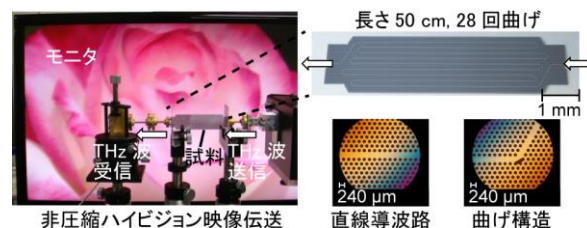


図 1 作製したテラヘルツ波結晶と通信実験の様子

RTD のテラヘルツ波通信応用に関して、本研究開発以前の最高速度は 1.5 Gbps であった。本研究では、RTD の通信デバイスとしての速度追求のため、RTD を 0.3 THz 帯の検出器として動作させ、別途構築したフォトミキシング法によるテラヘルツ波送信器と組み合わせて、伝送実験を行い、デバイスの改良を進めた。その結果、RTD に集積化されるアンテナの周波数特性および、RTD の変復調データ信号のやりとりを用いるベースバンド実装回路の帯域が、通信速度の制限要因であることを明らかにした。その結果を受けて、図 2 に示すようなダイポールアンテナおよび超半球レンズを有する RTD モジュールを作製した。測定されたアンテナの動作帯域は 67 GHz であり、目標とした 20 Gbps 級の通信に向けて、十分な帯域を有するアンテナが実現できた。作製した RTD モジュールを受信器としてオンオフ変調による無線通信実験を行ったところ、17 Gbps において、映像がリアルタイムにエラー無く伝送できるビットエラーレート 10^{-11} 以下の通信を実現し、20 Gbps まで明確な通信アイパターンを観察した。また、高品質な通信の実現を示す 4K 非圧縮映像のリアルタイム伝送にも成功した。

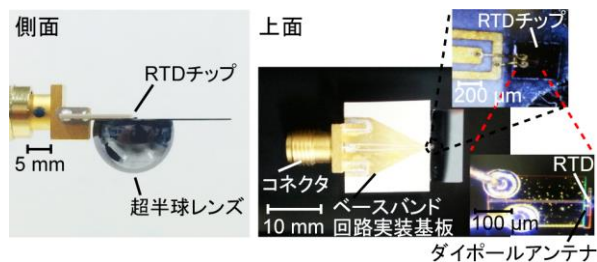


図 2 作製した RTD モジュール

目標となるテラヘルツ波結晶送受信デバイスの実現に向けて、テラヘルツ波結晶導波路と RTD 受信器をハイブリッド集積化した通信モジュールを作製した。その結果、理論と一致するようなテラヘルツ波結晶伝送路の周波数特性を反映した受信特性が得られ、3 Gbps のエラーフリー通信に成功した。そして、図 3 に示すようなテラヘルツ波結晶伝送路、カプラ、合分波器と RTD を集積化したテラヘルツ波結晶送受信集積デバイスを作製し、その基本動作を確認することに成功した。

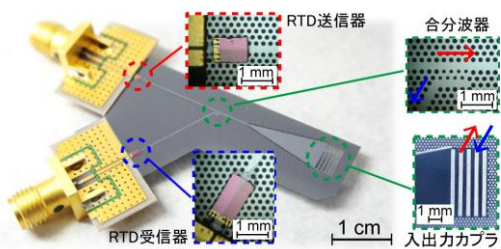


図 3 作製したテラヘルツ波結晶送受信デバイス

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

今後、テラヘルツ波結晶に関して、分散特性と通信速度の関係性を明らかにし、RTD の送信器としての動作速度の追求を行うとともに、テラヘルツ波結晶と RTD の結合効率の詳細な評価を行い、テラヘルツ波結晶の低損失性が十分に活かせる高効率接続を実現することが課題である。

また、テラヘルツ技術は高速無線通信だけにとどまらず、分光技術や画像処理技術と組み合わせることで分析、検査、イメージング、検出等への応用が可能であり、非常に広い分野から期待をされている技術である。本研究開発を進展させることは、送受信チップに留まらず、様々なテラヘルツ波集積回路の実現につながり、電子部品が LSI 化されたのと同様に、テラヘルツ波機器一般の大幅な小型化と省電力化が期待される。

加えて、テラヘルツ波結晶はシリコンフォトニクス技術やマイクロマシン技術との整合性も良いため、それらと関連する光と電子や機械、さらにその周辺分野であるバイオ、化学なども融合した新たな学際分野へと発展することも期待できる。

4. むすび

0.3 THz 帯にて、テラヘルツ波結晶伝送路の低損失性を示すとともに、合分波器とカプラといった機能デバイスをテラヘルツ波結晶を基盤として微小化し、1.5 Gbps の通信を行った。一方、RTD に関しては、通信速度の制限要因がアンテナとデータ信号の実装回路であることをシミュレーションと実験から明らかにして、広帯域なダイポールアンテナと実装回路を開発し、受信器として、20 Gbps 級の通信を達成した。さらに、テラヘルツ波結晶と RTD をハイブリッド集積化させ、基礎的な送受信動作を確認することで、テラヘルツ集積回路の基盤技術に関する研究開発を遂行した。

【誌上発表リスト】

- [1] K. Tsuruda, T. Ishigaki, A. Suminokura, R. Kakimi, M. Fujita and T. Nagatsuma, "Ultralow-loss photonic-crystal waveguides for gigabit terahertz-wave communications", IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics Vol. 2013 No. Tu2-1 pp. 9-12 (2013 年 10 月 29 日)
- [2] R. Kakimi, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida and T. Nagatsuma, "Capture of a terahertz wave in a photonic-crystal slab", Nature Photonics Vol. 8 No. 8 pp. 657-663 (2014 年 7 月 20 日)
- [3] A. Suminokura, K. Tsuruda, T. Mukai, M. Fujita and T. Nagatsuma, "Integration of resonant tunneling diode with terahertz photonic-crystal waveguide and its application to gigabit terahertz-wave communications", International Topical Meeting on Microwave Photonics Vol. 2014 No. ThB-3 pp. 419-422 (2014 年 10 月 23 日)

【申請特許リスト】

- [1] 富士田誠之、永妻忠夫、石垣司、大西大、宮井英次、テラヘルツ波コネクタおよびテラヘルツ波集積回路、日本国、2013 年 3 月 4 日
- [2] 富士田誠之、永妻忠夫、大西大、宮井英次、方向性結合器および分合波デバイス、日本国、2014 年 2 月 27 日
- [3] 富士田誠之、永妻忠夫、鶴田一魁、大西大、テラヘルツ波デバイス、およびテラヘルツ波集積回路、日本国出願、2014 年 3 月 12 日

【受賞リスト】

- [1] Ai Kaku, Takeshi Shiode, Tsukasa Ishigaki, Toshikazu Mukai, Kazuisao Tsuruda, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma, APMP Best Student Paper Award, 2013 年 4 月 23 日
- [2] Kazuisao Tsuruda, 2013 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics Best Student Paper Award First Place, 2013 年 10 月 31 日
- [3] Masahiro Yata, IEEE Photonics Society Japan Chapter Young Scientist Award at MWP/APMP 2014, 2014 年 10 月 23 日

【報道掲載リスト】

- [1] "大阪大学 テラヘルツ波での無線データ伝送を小型半導体素子で実現する技術"、日経エレクトロニクス、2013 年 3 月 18 日
- [2] "永妻研究室 (基礎工学研究科) NE ジャパン・ワイヤレステクノロジーアワード 2013 優秀賞 受賞"、大阪大学 News Letter、2013 年 9 月