

令和元年6月19日現在

機関番号：52605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18095

研究課題名(和文) 半導体共鳴トンネルダイオードを用いたテラヘルツ送信器の設計理論の確立

研究課題名(英文) Study for a design method of terahertz transmitters using semiconductor resonant tunneling diodes

研究代表者

浅川 澄人 (ASAKAWA, Kiyoto)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・助教

研究者番号：80751792

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、テラヘルツ帯の電波を利用した超高速無線通信の実現を目指して、小型テラヘルツ送信器として期待されている共鳴トンネルダイオード(RTD)と広帯域アンテナを一体集積したテラヘルツ送信器を高出力化することを目的に研究を行なった。具体的には、高出力化のために金属配線と薄膜抵抗という簡易構造でテラヘルツ送信器間を接続したアレイ化テラヘルツ送信器を提案し、金属配線構造を変化させた時の発振周波数や放射電波の強さなどの理論解析を行った。結果として、金属配線構造や配線長を変化させることで高出力化を実現できることがわかった。また電源電圧により電波の放射出力量を制御できることも明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

共鳴トンネルダイオード(RTD)と広帯域アンテナを集積一体化したテラヘルツ送信器では、ピーク出力の大きい電波を放射することが理論解析により明らかとなっているが、本研究により、このテラヘルツ送信器をアレイ化することで高出力化できることが明らかとなった。この成果は、長距離の無線通信が困難なテラヘルツ波であってもメートルオーダーの通信が可能であることを示唆している。これにより機器間無線通信の高速化が見込まれ、データセンター内のラック間/ボード間の配線レス化やVR/MR機器無線化など、有線通信の多くが無線通信へ置き換えることが可能となり、情報通信機器の利便性が飛躍的に向上できると期待される。

研究成果の概要(英文)：A terahertz transmitter with high-power and small-size by using resonant tunneling diodes (RTDs) and wideband antennas was proposed for high-speed wireless communications. The transmitter consists of that were two oscillators using a resonant tunneling diode integrated with a wideband antenna, and there are metal strip lines and a thin-film resistor between oscillators as a coupler. First, The coupler was analyzed with the electromagnetic simulator for identifying an equivalent circuit model of the coupler. Second, And arrayed terahertz transmitter was calculated with non-linear large-signal analysis for the evaluation of oscillating frequency, radiation power, phase mode between oscillators. As a result, phase modes occur odd- and even-mode depending on the length of metal lines and bias voltage.

研究分野：電子デバイス・電子機器

キーワード：テラヘルツ無線通信 共鳴トンネルダイオード 広帯域アンテナ 集積一体化 アレイ化

1. 研究開始当初の背景

近年、情報通信技術の発達により、スマートフォンなどの小型無線通信端末が急激に増加しており、無通信の大容量化・高速化のニーズが高まっている。このニーズに応えるためにはより広い周波数帯域が必要となる。しかし周波数帯域とその用途は電波法により定められており、既存の周波数帯域内ではさらなる広帯域化を図ることは不可能に近い。そのため現在、周波数帯域の利用効率向上、既存周波数帯域のなかでも時間的・空間的に利用されていない周波数帯域の利用、非常に広い周波数帯域を有する高周波帯の無線通信利用、が研究・開発されている。特に近年、実用化・開発されている無線通信技術は、OFDM や MIMO といった周波数帯域の利用効率向上と、ミリ波を含む 10GHz 以上の高周波帯域の非常に広い周波数帯域を用いた大容量・高速無線通信が開発されている。このような現状の中、ミリ波よりもさらに広い周波数帯域を有するテラヘルツ帯無線通信の実現は、次世代以降の無線通信技術には必須である。またテラヘルツ帯は電波法の規定がなく、広い周波数帯域が必要な ASK や OOK といった簡易で低消費電力な通信方式が利用可能である。また非常に広い周波数帯域を有していることから簡易な通信方式でも通信速度 100Gbit/sec を超える無線通信が実現可能と期待されている。

しかしテラヘルツ帯は、非常に周波数が高いため、線路損失が大きな問題となる。そのためテラヘルツ帯デバイスは発振器やアンテナなどを集積一体化することが必須となる。応募者はこれまで、化合物半導体共鳴トンネルダイオード (RTD) と、広帯域アンテナを集積一体化したテラヘルツ送信器に着目し、設計理論構築を行ってきた。RTD は量子効果の 1 つであるトンネル効果を利用しており、室温下で直流電源のみでテラヘルツ発振可能な半導体デバイスである。またテラヘルツ帯の非常に広い周波数帯域を効果的に利用するためにアンテナには広帯域アンテナである自己補対ボウタイアンテナを採用している。

2. 研究の目的

近年、小型無線通信端末が急増しており、無線通信の大容量化・高速化のニーズが高まっている。しかしそのための周波数資源は逼迫化しており、その解決のためには、周波数利用効率の向上、潜在的な周波数資源の発掘、新規周波数資源の開拓が必要不可欠である。特に近年の無線通信技術は高周波化が図られており、より高周波な周波数資源の開拓は次々世代以降の無線通信技術を支えることにつながる。本研究は、現在、唯一利用・開拓されていない新規周波数資源であるテラヘルツ帯の大容量高速無線通信応用を目指し、研究代表者がこれまで提案・理論解析してきた半導体テラヘルツ送信器に関して、試作・評価を行い、提案テラヘルツ送信器の設計理論の確立、無線通信応用のための実現条件を工学的に明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で対象とするのは、ナノメートルオーダーで異種の化合物半導体が積層されている共鳴トンネルダイオード (RTD) と広帯域アンテナの 1 つである自己補対ボウタイアンテナを集積一体化したテラヘルツ送信器である。この送信器は、ピーク出力の大きい電波を放射することが理論解析により明らかになっている。この特性により空間での減衰が大きいため長距離伝送が困難なテラヘルツ波であっても、ピーク出力が大きいため、メートルオーダーの無線通信が期待できる。本研究では、この実証実験のためのデバイス作製を行う。そのために RTD 単体デバイス評価用マスク設計 / プロセス開発、テラヘルツ送信器用マスク設計 / プロセス開発を実施する。

また、提案送信器は理論解析により電波出力が小さいという課題があることがわかっている。そこで、この送信器を平面状に複数並べ (アレイ化) 各送信器から放射される電磁波を空間合成することで高出力化する手法に着目した。また効率的に空間合成するために、発振周波数と位相を同位相で同期する必要があり、そのために低ドーピング半導体を薄膜抵抗として、送信器間を接続するアレイ化テラヘルツ送信器を提案した。このアレイ化送信器に対して、等価回路モデルを導出し、回路解析により性能予測を行ったところ、発振周波数を同期することができ、位相も同位相で同期できることが明らかになっている。しかしこの構造では 3 素子以上のアレイ化が困難であり、さらなる高出力化が見込めないという課題があった。

そこで本研究では、まず新たな結合構造を提案した。図 1 に提案した結合構造により構成したアレイ化テラヘルツ送信器を示す。結合構造は金属配線と薄膜抵抗により構成されており、金属配線により送信器間が接続され、その間にシャント構造を有し、そこに薄膜抵抗を配している。またシャント構造部には電源からの給電線も接続されている。3 素子以上のアレイ化を行う場合には、Osc. 2 の右側に結

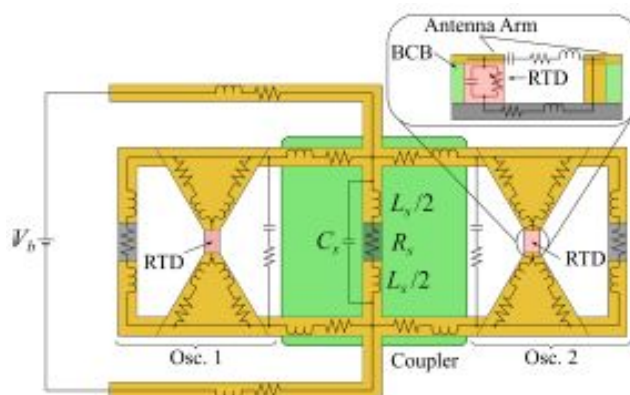


図 1 . 提案するアレイ化テラヘルツ送信器

合構造を介して $0_{sc.3}$ を配置することで実現できる。

提案したアレイ化テラヘルツ送信器の性能予測するために、結合構造の等価回路を明らかにする必要がある。そこで、電磁界シミュレータにより、結合構造のみに対して、100GHz~3THz まで電磁界解析を行い、Sパラメータを抽出した。抽出したSパラメータをインピーダンスに変換し、結合構造より等価回路を仮定し、パラメータフィッティングを行った。

等価回路が同定されたら、結合構造の等価回路、RTDの等価回路、自己補対ボウタイアンテナの等価回路を適切に組み合わせ、提案するアレイ化テラヘルツ送信2器の等価回路モデルを構築する。そして、構築した等価回路モデルの非線形時間領域大信号解析を行い、発振周波数や同期するかの確認、同期した際にはその位相などを評価し、構造パラメータの決定を行う。構造パラメータが決定したのち、デバイス作製を行う。

4. 研究成果

実証実験に関しては、RTD単体デバイスの作製プロセス確立まで到達した。特に層間絶縁膜の成膜およびドライエッチングのプロセス揺らぎが非常に大きかったが、本研究により安定して成膜/エッチングが可能な条件を見出すことができた。またRTD基板に関しては、共同研究先に作製を依頼していたが、RTDの電流電圧特性として特徴的な微分負性抵抗領域を再現性よく観測できるようなデバイス作製ができなかった。しかし、その原因としてナノメートルオーダーで積層している異種の化合物半導体の膜厚が基板面内で不均一となっていることを明らかにした。その点は共同研究先へフィードバックしており、今後より精度のよい基板が作製された暁には、速やかにRTD単体デバイスの評価、およびテラヘルツ送信器の実証実験が実行できると考えられる。

アレイ化テラヘルツ送信器に関しては、結合構造の等価回路同定の結果として、図1の結合構造内に描かれた等価回路が同定された。また結合構造の配線長を変化させた場合の等価回路も同様に同定した。

この同定した結合構造等価回路とRTD/自己補対ボウタイアンテナの等価回路を組み合わせたアレイ化テラヘルツ送信器の等価回路を過渡応答解析した。結果の一例を図2に示す。(a)は電源電圧 $V_b=3.8\text{V}$ とした時の横軸時間、縦軸RTD両端電圧の解析結果である。 0_{sc1} 、 0_{sc2} の発振波形は完全に一致しており、発振周波数が同期され、位相も同相同期していることがわかる。(b)は電源電圧 $V_b=4.42\text{V}$ とした時の横軸時間、縦軸RTD両端電圧の解析結果である。こちらは 0_{sc1} 、 0_{sc2} が周波数は同期しているが、位相は逆相で同期していることがわかる。この解析結果より、(a)のように同相同期している場合は、放射電磁波も同様に同相同期するため、効率的に放射電磁波を空間合成することが可能となり、高出力化が見込める。しかし、(b)のように逆相同期となってしまうと、放射電磁波は打ち消しあい、出力がほとんど出ないことを意味している。言い換えると、電源電圧により、アレイ化テラヘルツ送信器全体の放射出力を制御できることになる。本研究では同相での同期

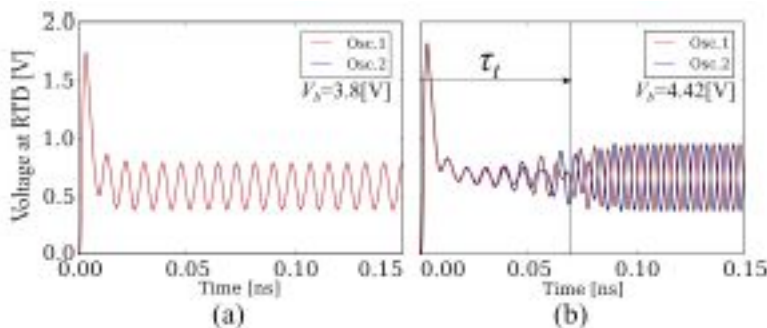


図2. 過渡応答解析により得られた時間波形

であることが望ましいため、電源電圧と同相同期の関係を評価した。その結果を図3に示す。横軸は電源電圧、縦軸は図2に示されている $0_{sc.1}$ 、 $0_{sc.2}$ の発振が逆相になるまでの時間である。結果として、電源電圧が3.6Vから4.3Vの領域では同相で同期することがわかった。

まとめると、ピーク出力が大きい電波放射が可能なテラヘルツ送信器が実現可能なことが示唆され、実証実験においても、評価デバイス作製は目前であると考えている。今後はこれらをさらに進め、ピーク出力が大きい、高出力テラヘルツ送信器の実証を目指していく。

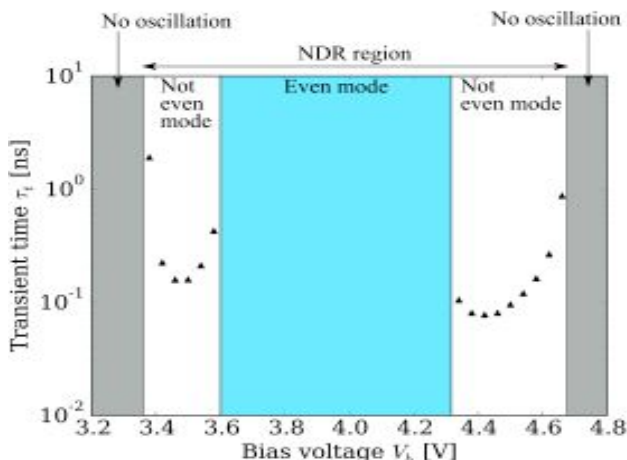


図3. 電源電圧と同相同期の関係

5 . 主な発表論文等
(研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- [1] M.Fukuoka, K.Asakawa, M.Suhara, “ Analysis of Phase Mode Variation Due to Bias Voltage in Arrayed Oscillators Using Resonant Tunneling Diodes Integrated with Bow-Tie Antennas, ” 2018 Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), pp.2461-2466, Aug. 2018. (doi: 10.23919/PIERS.2018.8597876)

[学会発表] (計 2 件)

- [1] 福岡政大, 浅川澄人, 須原道彦, “ ボウタイアンテナ集積共鳴トンネルダイオードを用いたアレイ化発振器のバイアス電圧による位相モード変化の解析, ” 2018 年電子情報通信学会総合大会, C-10-5, 東京, 2018 年 3 月 .
- [2] M.Fukuoka, K.Asakawa, M.Suhara, “ Analysis of Phase Mode Variation Due to Bias Voltage in Arrayed Oscillators using Resonant Tunneling Diodes, ” Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2018, Toyama, Japan, 4th Aug. 2018.

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

研究代表者氏名 : 浅川 澄人
ローマ字氏名 : KIYOTO ASAKAWA
所属研究機関名 : 東京都立産業技術高等専門学校
部局名 : ものづくり工学科
職名 : 助教
研究者番号 : 8 0 7 5 1 7 9 2

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。