

氏 名 ハシ ケツ
潘 杰

学位の種類 博士 (工学)

学位記番号 富理工博甲第 82 号

学位授与年月日 平成 27 年 3 月 24 日

専攻名 ナノ新機能物質科学専攻

学位授与の要件 富山大学学位規則第 3 条第 3 項該当

学位論文題目 共鳴トンネル集積回路の高調波に着目した THz 信号生成／処理技術の研究

論文審査委員
(主査) 小野 行徳
岡田 裕之
小川 晃一
森 雅之
前澤 宏一

論文要旨

最近、テラヘルツ波技術は様々な応用分野で注目されている。これには、例えば、無線通信、医療、安全システム、生命工学等が含まれる。これらの応用を実現するためには、コンパクトでコヒーレントな **solid state** 信号源が非常に重要である。共鳴トンネルダイオード (**RTD**) はこれを実現するための有望なデバイスの一つである。**RTD** の持つ(微分)負性抵抗は超高周波発振器の基盤となる。すでに **1THz** 以上の基本波発振が報告されており、さらにこの負性抵抗が **2THz** 以上の周波数まで持続することも明らかにされている。

RTD 素子の一つの重要な特徴はその強い非線形性である。本論文では、この非線形性に着目し、そこから生まれる高調波を利用したデバイスの研究を行った。本論文の内容は大きく二つに分けられる。一つは非線形伝送線路を用いた **THz** 信号の生成・処理であり、もう一つは **RTD** の非線形性を利用した **THz** 信号検知技術である。いずれの技術も **RTD** の強い非線形性に伴う高調波信号の振る舞いに着目している。

RTD を周期的に配置した非線形伝送線路 (**Nonlinear Transmission Line, NLTL**) は、アクティブな **NLTL** であり、信号の生成、処理と共に、信号増幅の機能を持つ。その増幅性能に着目して **THz** 帯域のアクティブな伝送線路の設計とシミュレーションを行った。結果より、広い周波数範囲で反射を抑えてゲインを確保することが可能であることが分かった。さらに、この伝送線路の低周波での安定性確保とゲインの両立を目指して、右手/左手系複合伝送線路構造の導入を提案し、シミュレーションによりその効果を検討した。次に、これらの伝送線路の増幅特性を確認するためのデバイス試作を行った。まず、小信号動作における、分布増幅器としての特性について議論した。その後、大信号動作における高調波生成の可能性について述べた。

上記アクティブ伝送線路のもう一つの必要な応用として、高調波発振器の研究を行った。この発振器は共鳴トンネルアクティブ伝送線路の両端を終端したものであり、信号は終端で全反射する。この時、線路の増幅特性により、定在波の半波長が線路の長さの整数分の一と一致したとき、発振が生じる。この発振器の特性をシミュレーションにより調べた。結果より、安定した基本波発振と共に強い **9** 次の高調波の生成が観測された。この高調波が利用できれば、安定な **THz** 発振器の実現が期待できる。ここでは、この高調波生成の原理、回路の安定性について検討した。結果として、高調波は、高周波のパスバンドにおける周波数ロッキングに起因するものであることを見出した。さらにこの高調波の効率的な取り出し方法について検討し、シミュレーションにより、その効果を調べた。

RTD 発振器は **THz** 帯の信号源として大きな期待が寄せられているが、その応用は

信号源だけではない。ディテクターも有望な応用分野である。THz 帯域では、信号の増幅が難しく、ディテクターには高感度なものが望まれている。そこで、発振器の立ち上がり特性を利用した超再生検波方式の THz ディテクターに関する検討を行った。この方式は、RTD の負性抵抗によるゲインと優れた高周波特性により、THz 信号の検知を高感度で行うことが期待できる。本論文では、RTD 発振器を応用した超再生検波回路を、発振周波数より非常に高い高調波信号の検波に用いるという新しい提案を行った。まず、シミュレーションによる 50GHz まで検波性能の予測を行うと共に、試作によりその効果を検討した。その結果、基本波入力に対して、感度の高い信号検知が行えることを確認した。

さらに、より高い周波数(100 GHz) 検波の可能性を検討し、本回路が動作することを見出した。このことは、THz 帯域のディテクターとして、本方式が有望であることを示している。

以上、本論文では、RTD の超高速性と強い非線形性から生じる高調波特性に着目し、その THz 帯域での信号生成、処理、検波技術への応用の可能性について検討した。本論文で提案した新しい回路構成は比較的low周波数の回路と THz 波を結びつけるものであり、今後の THz 波技術において有望なものである。

学位申請者: 潘 杰 (Jie PAN)

平成 26 年 10 月 27 日申請

博士学位論文審査結果の要旨

平成27年 2月10日

富山大学大学院理工学教育部長 殿

博士学位論文審査の結果の要旨について、下記のとおり報告します。

審査委員

主 査 小野行徳 印

記

1. 学位申請者： 潘 杰
2. 論文題目：
共鳴トンネル集積回路の高調波に着目したTHz信号生成／処理技術の研究
3. 審査結果要旨：

当学位論文審査委員会は申請論文「共鳴トンネル集積回路の高調波に着目したTHz信号生成／処理技術の研究」を詳細に査読し、また、平成27年2月10日（火）に学位論文公聴会を開催し、その発表及び質疑応答を含めた審査を行った。以下に審査結果の要旨を記す。

最近、テラヘルツ(THz)波技術は様々な応用分野で注目されている。これには、例えば、無線通信、医療、安全システム、生命工学等が含まれる。これらの応用を実現するためには、コンパクトでコヒーレントなsolid state信号源の実現が非常に重要である。共鳴トンネルダイオード(RTD)はこのための有望なデバイスの一つである。RTDの持つ(微分)負性抵抗はTHz帯発振器の基盤となる。すでに1THz以上の基本波発振が報告されており、さらにこの負性抵抗が2THz以上の周波数まで持続することも明らかにされている。RTD素子の重要な特徴の一つにその強い非線形性があり、本論文はこの点に着目し、そこから生まれる高調波を利用したデバイスの研究を行ったものである。本論文の内容は大きく3つに分けられる。第一は非線形伝送線路を用いたTHz信号の生成であり、第二はアクティブ伝送線路における信号伝送と高調波信号生成、第三はRTDの非線形性を利用したTHz信号検知技術である。いずれの技術もRTDの強い非線形性に伴う高調波信号の振る舞いに着目している。

本論文は6章からなっている。第1章の序論においては、THz波の応用と共鳴トンネル素子の現状について概観し、本論文の目的とその構成が述べられている。

第2章では、本論文の基盤の一つであるRTD-pairを装荷したアクティブ伝送線路について述べている。RTDを直列に接続し、その接続点に信号を入力するRTD-pairはRTDで問題となるバイアス不安定性を緩和するものである。これを装荷した伝送線路は、負の損失、つまり、ゲインを持つ伝送線路となる。ここでは、安定した信号増幅が得られる条件について検討し、右手/左手系複合伝送線路の利用を提案した。回路シミュレーションにより、この提案の可能性を調べ、非常に広い周波数範囲でゲインが得られることが示されている。

第3章では、第2章の結果を受けて、アクティブ伝送線路を実際に試作し、その評価を行った結果について述べている。本研究の対象とする高周波領域では、その信号波長が素子寸法のオーダーとなり、信号線やプローブパット等に寄生する成分が無視できなくなる。そのために、数値計算だけではなく、実際にデバイスを作製し、その高速動作を実証することは、本研究では特に重要となる。本章では、右手/左手系複合伝送線路ではなく、そのための基礎として、RTD-pairを装荷したアクティブ伝送線路の試作と測定結果について述べられている。線路の寄生抵抗による損失や、スプリアス発振のため、信号増幅は実証できなかったが、大信号動作による高調波の生成や、この構造を用いた発振器など、新しい可能性が見出された。

第4章では、第3章で見出した新しい可能性であるRTD装荷アクティブ伝送線路発振器について述べている。この発振器は共鳴トンネルアクティブ伝送線路の両端を終端したものであり、信号は終端で全反射する。この時、線路の増幅特性により、定在波の半波長が線路の長さの整数分の一と一致したとき、発振が生じる。申請者は、この発振器の特性をシミュレーションにより調べ、安定した基本波発振と共に強い9次の高調波が生成されることを見出した。この高調波が利用できれば、安定なTHz発振器の実現が期待できる。ここでは、この高調波生成の原理、回路の安定性について検討した。結果として、この高調波は高周波のパスバンドにおける周波数ロックに起因するものであることを見出した。さらにこの高調波の効率的な取り出し方法について検討し、シミュレーションにより、その効果を調べた。

第5章では、RTD発振器の特徴を利用した超再生検波方式のディテクタについて述べている。RTD発振器はTHz帯の信号源として大きな期待が寄せられているが、その応用は信号源だけではない。ディテクタも有望な応用分野である。THz帯域では、信号の増幅が難しく、ディテクタには高感度なものが望まれている。申請者はこの点に着目し、発振器の立ち上がり特性を利用した超再生検波方式のTHzディテクターに関する検討を行った。この方式は、RTDの負性抵抗によるゲインと優れた高周波特性により、THz信号の検知を高感度で行うことが期待できる。本論文では、RTD発振器を応用した超再生検波回路を、発振周波数より非常に高い高調波信号の検波に用いるという新しい提案を行っている。まず、シミュレーションによるその動作可能性を示し、その後、試作によりその効果を実証した。さらに、より高い周波数(100 GHz以上)の動作実証を目指し、そのための回路構成を示した。

第6章は、各章の成果の総括と結論である。

以上、本論文は、RTDの超高速性と強い非線形性から生じる高調波特性に着目し、そのTHz帯域での信号生成、処理、検波技術への応用の可能性について検討したものである。本論文で提案した新しい回路構成は比較的低周波数の回路とTHz波を結びつけるものであり、今後のTHz波技術において有望と考えられる。これらの結果より、本審査委員会は、博士(工学)の学位を授与するに十分な内容をもつものと認めた。