

機関番号：13201

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360155

研究課題名（和文）共鳴トンネルアクティブ伝送線路とそれを用いた THz 信号生成・処理技術

研究課題名（英文）Active Transmission Lines Loaded with Resonant Tunneling Diodes and Their Application to THz Signal Generation and Processing

研究代表者

前澤 宏一（MAEZAWA, KOICHI）

富山大学・大学院理工学研究部（工学）・教授

研究者番号：90301217

研究成果の概要（和文）：共鳴トンネル素子を装荷した伝送線路における THz 帯域増幅器の可能性について検討した。共鳴トンネルダイオードは直列ペア構成とし、その接続点を信号線に接続することにより、広い線形範囲を得た。この構造の安定性について検討し、右手/左手系複合伝送線路構造の利用を提案した。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を示した。さらに、これらのアクティブ伝送線路を用いて高性能な高調波発振器が得られる可能性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This paper proposes a traveling wave amplifier based on transmission lines (TLs) periodically loaded with resonant tunneling diode (RTD) pairs. This TL can be regarded as a “lossy” TL with a negative loss because of the negative differential resistance of the RTD. This means that the TL can amplify signals while the signal travels along the line. One of the most important points to be investigated to realize this amplifier is the stability of the circuit. We discuss stability of the TLs periodically loaded with RTDs, and show that they can be stabilized by using composite right/left handed (CRLH) TL configuration. It is demonstrated using circuit simulation that this amplifier can have a gain for wide frequency range. In addition to this, we have demonstrated the possibilities of the high order harmonic oscillator using this type of active transmission lines.

交付決定額

(金額単位：円)

|         | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|---------|------------|-----------|------------|
| 2008 年度 | 6,400,000  | 1,920,000 | 8,320,000  |
| 2009 年度 | 5,000,000  | 1,500,000 | 6,500,000  |
| 2010 年度 | 2,700,000  | 810,000   | 3,510,000  |
| 年度      |            |           |            |
| 年度      |            |           |            |
| 総計      | 14,100,000 | 4,230,000 | 18,330,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：共鳴トンネル, 分布定数線路, THz, 増幅器, 発振器

## 1. 研究開始当初の背景

RTD は THz を超える高速性を持つ高周波デバイスであり、最近 THz 領域の信号源としての可能性が注目を集めている。例えば、RTD を用いた発振器はコンパクトで、低消

費電力な THz 信号源として期待されている。しかし、共鳴トンネル素子にはその微分負性抵抗にともなう スプリアス発振やバイアス不安定性という大きな問題があり、これまでその力が十分発揮されてきたとはいえ

ない。こうした状況において我々は独自のアプローチにより RTD の応用に取り組んできた。本研究はこれまでの研究をベースに THz 領域の信号生成・処理技術を開拓しようと言うものである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、共鳴トンネル素子(RTD)を分布定数化したアクティブな非線形伝送線路と、それを用いた THz 信号生成・処理技術の可能性を開拓することにある。

本研究では RTD を配置した非線形伝送線路に着目する。非線形伝送線路はダイオードなどの非線形素子を分布定数化して配置したもので、超短パルス生成などで興味をもたれている。しかし、従来使われてきた非線形素子はショットキーダイオードや pn 接合ダイオードであり、パワーを付加できる能動素子ではない。ここでターゲットとする 100GHz を超える周波数領域では信号の増幅が容易ではなく、このことが応用上ネックとなる。そこで、我々は、非線形素子として、負性抵抗特性をもつ RTD を用いることにより、この問題に挑戦する。負性抵抗特性は増幅機能の基盤 であり、これをうまく使うことにより、THz アンプを初めとして、従来にない超高周波で動作する機能デバイスの可能性が生じる。例えば、超短パルス生成や THz 信号生成器、ミキサ、サンプラー、さらには非線形性から生じるカオス的振る舞いを利用した信号生成・処理回路などへの展開が期待できる。また、本研究では最近注目を集めつつあるメタマテリアル にも着目し、RTD を配置した左手/右手系複合伝送線路の研究にも着手する。これは、上記の可能性をさらに大きく広げるものである。

## 3. 研究の方法

本研究では共鳴トンネル素子を分布定数的に配置した非線形伝送線路を対象に、理論、実験の両面から研究を進めた。ここでは特に RTD ペアを用いた分布定数線路(図 1)について検討した。これは単に通常の RTD を GND と信号線の間接続するだけでは外部バイアス回路に起因するスプリアス発振などの不安定性が予想されるためである。図 1 の線路では、バイアス端子が信号端子と分離されるため、グラウンドとの間に大きな容量を持たせて安定化することができる。したがって、負性抵抗部分にバイアスしてもスプリアス発振が生じず、安定した測定が可能になる。

まずは、理論検討・シミュレーションにより、動作原理の確認、素子パラメータ設計を行い、これを試作により確認してゆく。さらに、これらを基盤に非線形性から生じるカオス信号生成・処理回路や、メタマテリアルへ展開していく。

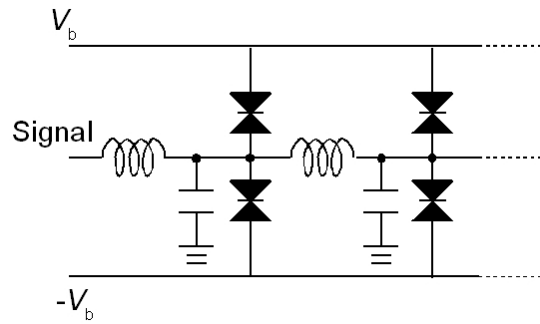


図 1 RTD ペアを装荷したアクティブ伝送線路

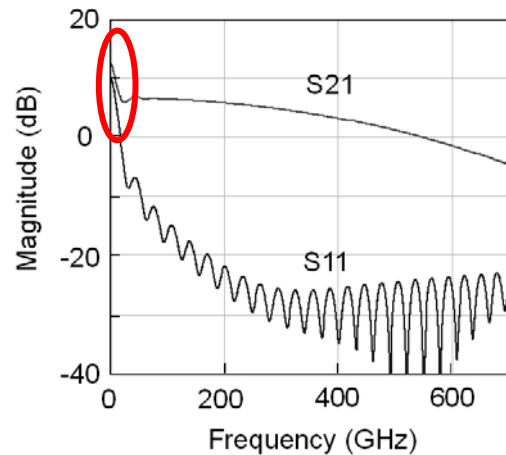


図 2 RTD ペアを装荷したアクティブ伝送線路のゲイン、反射特性の計算例。

## 4. 研究成果

(1) RTD ペア装荷伝送線路における THz 信号増幅の可能性についての検討

まず、RTD ペア装荷伝送線路増幅器の 100GHz を超える周波数での動作の可能性を明らかにするためにシミュレーションによる検討を進めた。

対象回路は図 1 に示すものである。この回路は 2 端子素子のみからなり、また、入力ポート、出力ポートに対して対称である。したがって、S-パラメータも対称であり、

$$S_{11} = S_{22}$$

$$S_{21} = S_{12}$$

となる。このため、本回路は、信号源インピーダンス、負荷インピーダンスによらない絶対安定の条件を満たすことは出来ない。そこで、信号源と負荷のインピーダンスを標準的な 50 Ω と仮定し、そのときの系の安定性を検討することとした。もし、入出力ポートにおける反射を十分小さく、かつ、利得を持たせることが可能なら、この回路は増幅器とし

て働くことになる。このためには、入出力ポートのインピーダンス整合が必要である。しかし、信号線と GND の間にコンダクタンスのある系では  $50 \Omega$  への完全なインピーダンス整合は不可能である。そのため、インピーダンス不整合を出来るだけ小さくするために、単位長さあたりのコンダクタンスの絶対値を小さく設定することとした。このとき、十分なゲインを持つためには線路長をそれだけ長くする必要がある。この方針で回路パラメータを検討し、シミュレーションを行った。結果の例を図 2 に示す。この図は面積  $2\mu\text{m}^2$  の RTD からなる RTD ペアを 40 個配置した線路の  $|S_{11}|$  と  $|S_{21}|$  を示したものである。バイアス電圧は  $0.6\text{V}$  としたため、一つの RTD ペアあたりの負性コンダクタンスは十分小さい。このとき、 $50\text{GHz}$  から  $300\text{GHz}$  の広い周波数範囲において、反射係数を  $-10\text{dB}$  以下の小さな値に抑えつつ、ゲインを得ることが出来た。遮断周波数は、単位セルの大きさに依存しており、これを微細化することにより、 $1\text{THz}$  を越える増幅も可能である。

## (2) RTD ペア装荷伝送線路の安定性と右手/左手複合伝送線路の採用

前節で示したように、RTD ペアを装荷した伝送線路は超広帯域な増幅器として使用できる可能性がある。しかし、そのためには、バイアス不安定性と自励発振という二つの重要な問題を解決する必要がある。

バイアス不安定性の問題とは、RTD の NDR 領域が直列抵抗成分によって不安定化し、DC 的にバイアス不可能となる問題である。これは、微分負性抵抗の絶対値に対して直列抵抗が大きいきき生じる。この回路において、入出力ポートが  $50 \Omega$  で終端されているとすると、低周波極限では、すべての RTD ペアの負性抵抗を並列接続した負性抵抗素子と、 $50/2 \Omega$  の抵抗が直列に接続されているとみなすことが出来る。したがって、安定して負性抵抗部分にバイアスするためには、すべての RTD ペアの負性コンダクタンスの絶対値の総和が  $40 \text{ mS}$  ( $= 2/50\text{S}$ ) より小さい必要がある。このため、線路の電圧利得は最大でも  $8 \text{ dB}$  となる。 $I-V$  特性の非線形性を考慮すれば、電圧利得はさらに小さく抑える必要がある。

一方、 $S_{11}$  と  $S_{21}$  の積の絶対値が 1 を越えると線路は発振を始める可能性がある。これは、レーザー発振のアナロジーとして理解できる。高周波側でこの条件を満たす場合は、線路に意識的に抵抗を設け、小さな損失を付加することで発振を回避するのは容易である。一方低周波側でこの条件を満たす場合は発振を防ぐのは難しい。例えば、図 2 の  $10\text{GHz}$  以下の低周波領域は、上記の条件を満たしており、線路は発振する可能性がある。

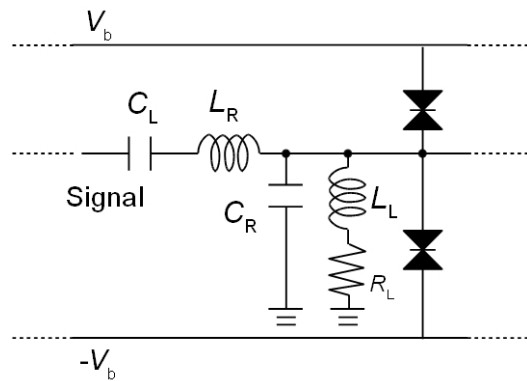


図 3 RTD ペアを装荷した右手/左手系複合(CRLH)伝送線路構造

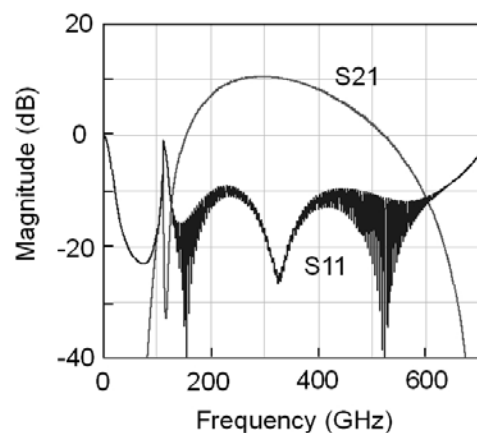


図 4 RTD ペアを装荷した右手/左手系複合(CRLH)伝送線路構造におけるゲイン、反射特性のシミュレーション結果の例

この問題点を解決するため、ここでは右手/左手系複合(CRLH)伝送線路構造の導入を検討した。CRLH 伝送線路は、通常と異なる分散特性を持つ伝送線路であり、最近、マイクロ波/ミリ波の受動素子の研究者により精力的に研究されている。CRLH 伝送線路においては、従来の伝送線路と異なり、分散特性には二つの分枝が生じる。その一つは、通常の分散特性であり(右手系)、もう一つは負の群速度を持つ左手系の分散特性である。しかし、ここでは、分散特性そのものではなく、二つの分枝を持つことに注目した。左手系の分枝はローパスフィルタ的な分枝であり、低周波領域で信号を伝える。そこで、この分枝に意識的に損失を付加し、低周波の安定性を改善することを考えた。図 3 に単位セルの回路図を示す。左手系分枝を作るインダクタに直列に抵抗を挿入することにより損失を

導入した。これにより、低周波での利得を抑え、発振を抑制することが可能になると考えられる。

図4に図3に示した回路におけるシミュレーション結果の例を示す。単位セル数は160個である。図からわかるように、10 dBのS21と-10dBのS11が広い周波数範囲にわたって得られた。また、低周波領域では、左手系分枝の損失により利得がなくなっており、低周波のスプリング発振を抑えられることが分かる。図5は300 GHzの正弦波を入力したときの、入出力信号の波形である。信号の増幅が明瞭に示されている。

### (3) 伝送線路試作技術の検討

次に、共鳴トンネル素子の作製プロセスの再検討を行った。これまで用いてきた、ウェットエッチングによるエアブリッジ配線プロセスでは、良好な特性を持つ共鳴トンネルダイオードを歩留まり良く作成することが困難であったためである。

従来のウェットエッチングによるエミッタ引き出し電極のエアブリッジ配線にかえて、絶縁膜によるサイドウォール構造を導入した(図6)。この結果、従来プロセスでは、30-40%程度であった素子歩留まりが90%以上に改善した。

次にこのRTDプロセスを用いて、基本的なRTD装荷伝送線路の試作を行った。しかし、この試作中、共鳴トンネルダイオードのエミッタ構造の作製工程において異常エッチングが生じ、ダイオード特性が得られないという問題が起こった。この問題は、単体の共鳴トンネルダイオード試作では生じておらず、その原因を詳しく検討した。その結果、エッチング中に配線金属を通して異常電流が流れ、これがエッチングを促進していることが明らかになった。現在、この問題を解決した新しいマスクパターンで試作を行っているところである。

### (4) アクティブ伝送線路発振器の検討

さらに、RTD装荷アクティブ伝送線路を用いた発振器についても検討した。これは、共鳴トンネル素子を装荷し、増幅作用を持たせた伝送線路において、その両端をショートすることにより発振を得ようというものである。この回路において、共鳴トンネル素子を装荷する位置を変えることにより、発振信号の高調波成分の割合が変化することを見出した。特に、構造によっては、かなり次数の高い高調波が得られる可能性があることが分かった。図7は九次の高調波が強く現れている例である。これは、高調波発振器として、THz波生成への応用に有望である。

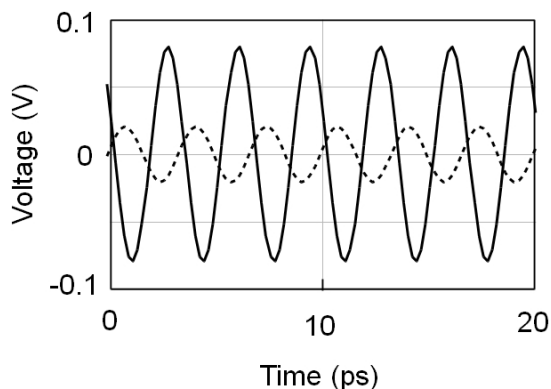


図5 RTDペアを装荷した右手/左手系複合(CRLH)伝送線路構造における入力信号(点線)、出力信号(実線)波形のシミュレーション結果の例

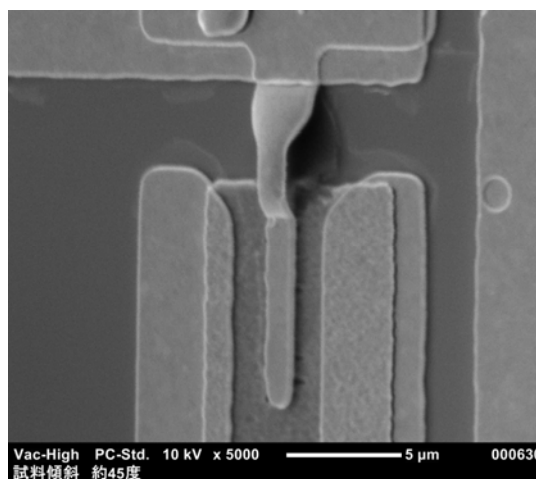


図6 新プロセスによるRTDのSEM写真

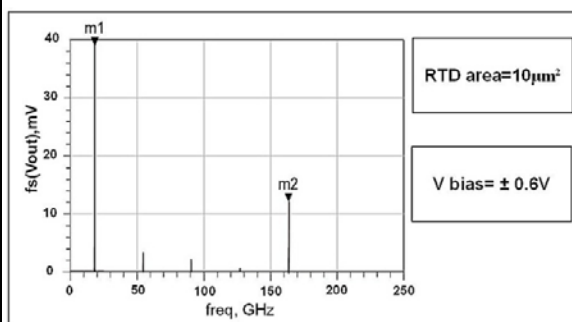


図7 アクティブ伝送線路の両端を接地した発振器の発振スペクトルの例

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① K. Maezawa, T. Ohe, K. Kasahara, and M. Mori, “A Third order harmonic oscillator based on coupled resonant tunneling diode pair oscillators,” IEICE Transactions Electronics, Vol. E93-C, No. 8, (2010) pp.1290-1294.
- ② 前澤宏一、共鳴トンネルダイオードを生かす新しい集積化技術、応用物理 79、(2010) 239-242
- ③ K. Maezawa, N. Kamegai, S. Kishimoto, T. Mizutani, and K. Akamatsu, “Improved Bias Stability of the Resonant Tunneling Diode Pair Oscillators Integrated on an AlN Ceramic Substrate,” Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 04C084.
- ④ K. Maezawa, T. Sakamoto, K. Kasahara, M. Mori, “Possibility of Terahertz Amplification by Active Transmission Lines Loaded with Resonant Tunneling Diode Pairs,” Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 124503.

[学会発表] (計 11 件)

- ① K. Maezawa, K. Kasahara, M. Mori, “A Traveling Wave Amplifier Based on Composite Right/Left Handed (CRLH) Transmission Lines Periodically Loaded with Resonant Tunneling Diode Pairs,” 22nd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2010), Takamatsu, Japan, May 31-Jun. 4 (2010)
- ② K. Maezawa, S. Shibata, K. Takaoka and M. Mori, “High Speed Circuits Based on Resonant Tunneling Diodes and Their Application to Analog Digital Converters,” 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC'10) Toyama, Japan, Sep. 22-26 (2010)
- ③ K. Maezawa, T. Ohe, K. Kasahara, M. Mori, “A third harmonic oscillator using coupled RTD pair oscillators,” Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2009) Nagano, Japan, Aug. 26-28 (2009).
- ④ K. Kasahara, T. Ohe, M. Mori, K. Maezawa, “RF small signal characterization of active transmission lines loaded by InGaAs/AlAs resonant tunneling diodes,” International Conference on

Solid State Devices and Materials (SSDM2009), Sendai, Japan, Oct. 7-9 (2009).

- ⑤ K. Maezawa, N. Kamegai, S. Kishimoto, T. Mizutani and K. Akamatsu, “Improved Bias Stability of the RTD-Pair Oscillators Integrated on an AlN Ceramic Substrate,” International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008), 2008 年 9 月 24 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

前澤 宏一 (MAEZAWA KOICHI)  
富山大学・大学院理工学研究部・教授  
研究者番号：90301217

### (2) 研究分担者

森 雅之 (MORI MASAYUKI)  
富山大学・大学院理工学研究部・助教  
研究者番号：90303213  
(2008 年度)

### (3) 連携研究者

森 雅之 (MORI MASAYUKI)  
富山大学・大学院理工学研究部・准教授  
研究者番号：90303213  
(2009-2010 年度)