

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6415036号  
(P6415036)

(45) 発行日 平成30年10月31日(2018.10.31)

(24) 登録日 平成30年10月12日(2018.10.12)

(51) Int.Cl.

F 1

H03B 7/08 (2006.01)  
H01Q 13/08 (2006.01)H03B 7/08  
H01Q 13/08

請求項の数 14 (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2013-231577 (P2013-231577)  
 (22) 出願日 平成25年11月7日 (2013.11.7)  
 (65) 公開番号 特開2015-91117 (P2015-91117A)  
 (43) 公開日 平成27年5月11日 (2015.5.11)  
 審査請求日 平成28年10月20日 (2016.10.20)

前置審査

(73) 特許権者 000001007  
 キヤノン株式会社  
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号  
 (74) 代理人 100126240  
 弁理士 阿部 琢磨  
 (74) 代理人 100124442  
 弁理士 黒岩 創吾  
 (72) 発明者 小山 泰史  
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤ  
 ノン株式会社内  
 審査官 石田 昌敏

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】発振器

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

テラヘルツ波を発振する発振器であって、  
 負性抵抗素子と、  
 第1の導体、第2の導体、及び誘電体、を含む共振器と、  
 前記負性抵抗素子にバイアス電圧を供給する線路と、を有し、  
 前記負性抵抗素子及び前記誘電体は、前記第1の導体と前記第2の導体との間に配置されおり、  
 前記第1の導体と前記線路とは、前記共振器の共振周波数の電界の節ではなく、前記共振器に定在する前記テラヘルツ波の電界の節で、接続しており、

10

前記負性抵抗素子は、前記第1の導体の重心からシフトした位置に配置されており、  
 前記線路は、前記第1の導体の重心と前記負性抵抗素子とを結ぶ直線と直交し且つ前記重心を通る直線から、前記負性抵抗素子に近づく又は遠ざかる位置で前記第1の導体と接続していることを特徴とする発振器。

## 【請求項 2】

自然対数の底をeとすると、  
 前記テラヘルツ波の電界の節は、前記共振器に定在する前記テラヘルツ波の電界の強度が最大電界強度の $1/e^2$ 以下となる領域であることを特徴とする請求項1に記載の発振器。

## 【請求項 3】

20

前記テラヘルツ波の周波数における前記線路は、前記負性抵抗素子の微分負性抵抗の絶対値よりインピーダンスが高いことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の発振器。

【請求項 4】

前記負性抵抗素子は、容量性リアクタンスを有し、

前記第 1 の導体と前記線路は、前記第 1 の導体の重心と前記負性抵抗素子とを結ぶ直線と直交し且つ前記重心を通る直線から前記負性抵抗素子に近づく位置で接続していることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか一項 に記載の発振器。

【請求項 5】

前記負性抵抗素子は、誘導性リアクタンスを有し、

前記第 1 の導体と前記線路は、前記第 1 の導体の重心と前記負性抵抗素子とを結ぶ直線と直交し且つ前記重心を通る直線から前記負性抵抗素子に遠ざかる位置で接続していることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか一項 に記載の発振器。

【請求項 6】

複数の前記負性抵抗素子を有することを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか一項 に記載の発振器。

【請求項 7】

複数の前記負性抵抗素子は、前記第 1 の導体の重心と前記負性抵抗素子とを結ぶ直線と直交し且つ前記重心を通る直線を軸に線対称となるように配置されていることを特徴とする請求項 6 に記載の発振器。

【請求項 8】

前記テラヘルツ波の周波数は、前記共振器の共振周波数と異なる周波数であることを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか一項 に記載の発振器。

【請求項 9】

複数の前記線路を有することを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれか一項 に記載の発振器。

【請求項 10】

複数の前記線路は、前記第 1 の導体の重心と前記負性抵抗素子とを結ぶ直線に対して対称に配置されている

ことを特徴とする請求項 9 に記載の発振器。

【請求項 11】

前記線路と電源との間に、前記負性抵抗素子と並列に接続された容量及び抵抗を有することを特徴とする請求項 1 乃至 10 のいずれか一項 に記載の発振器。

【請求項 12】

前記共振器は、パッチアンテナを含む

ことを特徴とする請求項 1 乃至 11 のいずれか一項 に記載の発振器。

【請求項 13】

前記テラヘルツ波の波長を  $\lambda_{s_c}$  とすると、前記線路の長さが  $(2m - 1) \lambda_{s_c} / 4$  (m : 自然数) であることを特徴とする請求項 1 乃至 12 のいずれか一項 に記載の発振器。

【請求項 14】

前記負性抵抗素子は、共鳴トンネルダイオードを含むことを特徴とする請求項 1 乃至 13 のいずれか一項 に記載の発振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、負性抵抗素子を用いた発振器に関し、特には、ミリ波帯からテラヘルツ波帯まで (30 GHz 以上 30 THz 以下) のうちの任意の周波数帯域を有する高周波電磁波 (本明細書では、テラヘルツ波と呼ぶ) の発振器に関する。

【背景技術】

【0002】

10

20

30

40

50

テラヘルツ波の周波数領域には、生体材料及び医薬品、電子材料等の多くの有機分子について、構造や状態に由来した吸収ピークが存在する。また、テラヘルツ波は、紙及びセラミック、樹脂、布といった材料に対して高い透過性を有する。近年、この様なテラヘルツ波の特徴を活かしたイメージング技術やセンシング技術の研究開発が行われている。例えば、X線装置に代わる安全な透視検査装置や、製造工程におけるインラインの非破壊検査装置等への応用が期待されている。

#### 【0003】

この周波数領域の電磁波を発生する電流注入型の光源として、負性抵抗素子に共振器を集積した発振器が良く知られている。特許文献1は、2重障壁型の共鳴トンネルダイオード(Resonant tunneling Diode: R T D)からなる負性抵抗素子と、スロットアンテナからなる共振器とを半導体基板上に集積したテラヘルツ波の発振器を開示している。当該発振器は、R T Dの半導体量子井戸構造内の電子のサブバンド間遷移に基づく微分負性抵抗を利用し室温でテラヘルツ波を発振する。

10

#### 【0004】

特許文献2は、R T Dとマイクロストリップ共振器とを同一基板上に集積したテラヘルツ波の発振器が開示されている。

#### 【先行技術文献】

##### 【特許文献】

##### 【0005】

【特許文献1】特開2007-124250号公報

20

【特許文献2】特開2006-101495号公報

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0006】

特許文献1に開示されているように、これらの負性抵抗素子を用いた発振器は、負性抵抗素子のバイアス電圧を調整するためのバイアス回路が必要となる。また、このバイアス回路に起因した低周波の寄生発振を抑制するための、DC以上 $f_{s_c}$ 未満の周波数領域においてバイアス回路側を低インピーダンスにする構造が必要である。ここで、 $f_{s_c}$ は発振器が発振するテラヘルツ波の周波数(発振周波数)であり、寄生発振とは、発振器の所望の発振周波数 $f_{s_c}$ とは異なる低周波側の周波数帯における寄生的な発振である。

30

#### 【0007】

一方、これらのバイアス回路及び寄生発振を抑制する構造を接続することで、共振器内における発振周波数 $f_{s_c}$ のテラヘルツ波が漏れて損失となり、発振出力が低下するという問題がある。例えば、特許文献1は、スロットアンテナの両端部にスタブ線路を配置してこのような損失を低減する方法を提案している。特許文献2に開示されたマイクロストリップ型共振器を用いた発振器においても、同様の低損失構造が望まれている。

#### 【0008】

本発明はかかる課題を鑑みてなされたものであり、テラヘルツ波の損失を低減できる発振器を提供することを目的とする。

40

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0009】

本発明の一側面として発振器は、テラヘルツ波を発振する発振器であって、負性抵抗素子と、第1の導体、第2の導体、及び誘電体、を含む共振器と、前記負性抵抗素子にバイアス電圧を供給する線路と、を有し、前記負性抵抗素子及び前記誘電体は、前記第1の導体と前記第2の導体との間に配置されており、前記第1の導体と前記線路とは、前記共振器の共振周波数の電界の節ではなく、前記共振器に定在する前記テラヘルツ波の電界の節で、接続していることを特徴とする。

#### 【発明の効果】

#### 【0010】

50

本発明の一側面としての発振器によれば、テラヘルツ波の損失を低減できる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】実施形態の発振器の構成を説明する図。

【図2】実施例1の発振器の構成を説明する図。

【図3】実施例1の発振器の共振電界を説明する図。

【図4】実施例1の発振器のアドミタンス特性を説明する図。

【図5】実施形態の発振器の変形例の構成を説明する図。

【図6】実施形態の発振器の変形例の構成を説明する図。

【発明を実施するための形態】

10

【0012】

本実施形態に係る発振器100について、図1を用いて説明する。図1(a)は本実施形態の発振器100の外観を示す斜視図であり、図1(b)はそのA-A'断面図である。

【0013】

まず、発振器100の構成について説明する。発振器100は、負性抵抗素子101、共振器としてのパッチアンテナ102、線路としてのストリップ導体1031、容量1032及び抵抗104を含む低インピーダンス回路、電源105及び配線106を含むバイアス回路、を有する。

【0014】

20

負性抵抗素子101は、電流電圧特性において、電圧の増加に伴って電流が減少する領域、すなわち負性抵抗領域が現れる素子である。負性抵抗素子101は、典型的には、共鳴トンネルダイオード(RTD)又はエサキダイオード、ガン(GUNN)ダイオード、一端子を終端したトランジスタ等の高周波素子が好適である。

【0015】

例えば、タンネットダイオード、インパットダイオード、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT: Heterojunction Bipolar Transistor)等が挙げられる。また、化合物半導体系FET(Field Effect Transistor)、高電子移動度トランジスタ(HEMT: High Electron Mobility Transistor)等を用いてもよい。

30

【0016】

更に、超伝導体を用いたジョセフソン素子の負性抵抗を用いてもよい。以下では、テラヘルツ波帯で動作する代表的な負性抵抗素子であるRTDを負性抵抗素子101に用いた場合を例にして説明を進める。

【0017】

パッチアンテナ102は、テラヘルツ波帯の共振器であり、有限な長さのマイクロストリップライン等を用いたマイクロストリップ型共振器である。パッチアンテナ102は、誘電体107と、パッチ導体(第1の導体)108と、接地導体(第2の導体)109と、を含み、パッチ導体108と接地導体109との間に誘電体107を挟んだ構造である。

40

【0018】

パッチアンテナ102の内部には、テラヘルツ波の励振源となる負性抵抗素子101が埋め込まれている。負性抵抗素子101と誘電体107は並列に配置されており、負性抵抗素子101は、パッチ導体108及び接地導体109と電気的に接続されている。線路であるストリップ導体1031とパッチ導体108とは、パッチアンテナ102に定在するテラヘルツ波の電界の節で接続している。

【0019】

ここで、誘電体107とは、導電性よりも誘電性が優位な物質で、直流電圧に対しては電気を通さない絶縁体或いは高抵抗体としてふるまう材料である。テラヘルツ波帯における具体例としては、プラスティック、セラミック、酸化シリコン、窒化シリコン等がある

50

。

## 【0020】

パッチアンテナ102は、パッチ導体108のA-A'方向の幅が、任意の共振周波数 $f_0$ のテラヘルツ波に対する半波長共振器となるように概ね設定される。パッチアンテナ102は、テラヘルツ波の励起源となる負性抵抗素子101が集積されたアクティブアンテナである。したがって、発振器100のパッチアンテナ102によって規定される発振周波数 $f_{osc}$ は、パッチアンテナ102及び負性抵抗素子101のリアクタンスを組み合わせた並列共振回路の共振周波数として決定される。

## 【0021】

具体的には、Jpn.J.App1.Phys., Vol.47, No.6 (2008)に開示されたRTD発振器の等価回路から次のように求めることができる。すなわち、負性抵抗素子(RTD)101のアドミタンス $Y_{RTD}$ とパッチアンテナ102のアドミタンス $Y_{ANT}$ とを組み合わせた並列共振回路について、

$$\text{振幅条件 } \text{Re}[Y_{RTD}] + \text{Re}[Y_{ANT}] = 0 \quad (1)$$

$$\text{位相条件 } \text{Im}[Y_{RTD}] + \text{Im}[Y_{ANT}] = 0 \quad (2)$$

の二つの条件を満たす周波数が発振周波数 $f_{osc}$ として決定される。ここで、 $\text{Re}[Y_{RTD}]$ は負性抵抗素子のアドミタンスであり負の値を有す。なお、発振周波数 $f_{osc}$ は、RTD以外の負性抵抗素子を用いた場合でも、同様の振幅条件及び位相条件を用いて求めることができる。

## 【0022】

したがって、発振器の設計によっては、発振器100の発振周波数 $f_{osc}$ は、負性抵抗素子101の $\text{Im}[Y_{RTD}]$ の効果により、主に $\text{Im}[Y_{ANT}]$ で決まるパッチアンテナ102の共振周波数 $f_0$ とは異なることがある。

## 【0023】

負性抵抗素子101のバイアス電圧を調整するためのバイアス回路は、電源105と配線106とを含む。配線106は、寄生的なインダクタンス成分を必ず伴うため、図1ではインダクタンスとして表示した。電源105は、負性抵抗素子101の駆動に必要な電流を供給し、バイアス電圧を調整する。バイアス電圧は、典型的には、負性抵抗素子101の負性抵抗領域から選択される。

## 【0024】

ストリップ導体1031は、電源105及び配線106を含むバイアス回路から負性抵抗素子101にバイアス電圧を供給する役割を持つ線路で、パッチ導体108と接続されている。

## 【0025】

抵抗104及びこれと並列に接続された容量1032は低インピーダンス回路である。これは、電源105及び配線106を含むバイアス回路に起因した比較的低周波数の共振による寄生的な発振を抑制している。

## 【0026】

抵抗104の値は、負性抵抗素子101の負性抵抗領域における負性抵抗の絶対値と等しいか、その絶対値より少し低い値が選択される。容量1032も抵抗104と同様に、マイクロ波の周波数帯において、容量1032のインピーダンスが負性抵抗素子101の負性抵抗の絶対値と等しいか、その絶対値より低くなるように設定する。容量1032は大きいほうが好ましく、本実施形態では数pF程度としている。

## 【0027】

容量1032はストリップ導体1031と直結されたデカップリング容量となっており、例えば、容量を同一基板に集積するために、パッチアンテナ102と基板とを共にしたMIM(Metal-insulator-Metal)構造を利用してよい。

## 【0028】

本実施形態の発振器100のストリップ導体1031は、パッチアンテナ102と負性抵抗素子101により規定されるテラヘルツ波帯の発振周波数 $f_{osc}$ で、パッチアンテ

10

20

30

40

50

ナ 102 に定在するテラヘルツ波の電界の節に配置される。すなわち、パッチ導体 108 とストリップ導体 1031 とは、共振器としてのパッチアンテナ 102 に定在するテラヘルツ波の電界の節で接続している。

【0029】

ここで、本明細書における「共振器に定在するテラヘルツ波の電界の節」は、共振器に定在する発振周波数  $f_{0_{sc}}$  のテラヘルツ波の電界の実質的な節となる領域のことである。具体的には、共振器に定在する発振周波数  $f_{0_{sc}}$  のテラヘルツ波の電界強度が、共振器に定在する発振周波数  $f_{0_{sc}}$  のテラヘルツ波の最大電界強度より 1 衡程度低い領域のことである。望ましくは、発振周波数  $f_{0_{sc}}$  のテラヘルツ波の電界強度が、共振器に定在する発振周波数  $f_{0_{sc}}$  のテラヘルツ波の最大電界強度の  $1/e^2$  以下 ( $e$  は自然対数の底) となる領域のことである。

10

【0030】

前述したように、本実施形態の発振器 100 のような負性抵抗素子と共振型のアンテナであるパッチアンテナを集積した発振器は、設計によっては、発振器の発振周波数  $f_{0_{sc}}$  が、共振器であるパッチアンテナの共振周波数  $f_0$  と異なることがある。これは、(2) 式における  $Im[Y_{RTD}]$  の効果である。

【0031】

具体的には、 $Im[Y_{RTD}]$  は、負性抵抗素子の容量  $C$  及びインダクタンス  $L$  と角周波数  $\omega$  の積である容量性リアクタンス  $C$  及び誘導性リアクタンス  $1/\omega L$  の成分を含む。このため、テラヘルツ波のように高い周波数の電磁波になるほど、(2) 式における  $Im[Y_{RTD}]$  の効果は顕著になる。このような発振器において、パッチアンテナの共振周波数  $f_0$  と発振周波数  $f_{0_{sc}}$  との違いが、共振器に定在するテラヘルツ波の電界の分布にも影響することを発明者は見出した。

20

【0032】

具体的には、発振周波数  $f_{0_{sc}}$  のテラヘルツ波が共振器に定在する場合の電界の分布は、共振周波数  $f_0$  のテラヘルツ波が共振器に定在する場合の電界の分布と異なる場合がある。すなわち、共振器であるパッチアンテナに定在するテラヘルツ波の電界の節に着目すると、共振周波数  $f_0$  のテラヘルツ波の電界の節はパッチアンテナの中心線上に位置する。それに対し、発振周波数  $f_{0_{sc}}$  のテラヘルツ波の電界の節は、パッチアンテナの中心線を除く別の領域に位置することがある。

30

【0033】

なお、共振器（パッチアンテナ）の中心線は、テラヘルツ波の共振方向と直交し且つ第 1 の導体としてのパッチ導体の重心を通る直線のことである。

【0034】

そのため、パッチアンテナの共振周波数である  $f_0$  のテラヘルツ波の電界の節ではなく、発振周波数  $f_{0_{sc}}$  のテラヘルツ波の電界の節に線路を配置すれば、テラヘルツ波の損失を低減することができる。

【0035】

なぜなら、このような構成にすることで、発振周波数  $f_{0_{sc}}$  において、線路 1031 及びそれに接続されたバイアス回路は、負性抵抗素子から見て高インピーダンスとなるからである。よって、発振周波数  $f_{0_{sc}}$  付近のテラヘルツ波の共振器からの漏れや外部との干渉による損失が低減されるので、発振器の高出力化及び周波数安定化が実現される。これについては、後述の実施例 1 において、より具体的な例を示して説明する。

40

【0036】

なお、本明細書における「高インピーダンス」は、典型的には、負性抵抗素子の微分負性抵抗の絶対値よりインピーダンスが高くなることである。発振周波数  $f_{0_{sc}}$  におけるインピーダンスが高ければ高いほど、線路及び線路より外側のバイアス回路からの影響が低減される。

【0037】

そこで、本実施形態の発振器 100 は、パッチ導体 108 と線路 1031 とを、共振器

50

102に定在する発振周波数  $f_{osc}$  のテラヘルツ波の電界の節で接続している。

【0038】

これによって、本実施形態の構成は、従来までのパッチアンテナ102に定在する共振周波数  $f_0$  のテラヘルツ波の電界の節に線路1031を接続した場合よりも、パッチアンテナ102のインピーダンスが高くなる。言い換えると、パッチアンテナ102のインピーダンスの逆数である  $R_e [Y_{ANT}]$  が小さくなるため、線路1031及びバイアス回路に起因したテラヘルツ波の損失が低減される。

【0039】

したがって、パッチアンテナのようなマイクロストリップ型の共振器を用いた発振器においても、共振器により規定される所望の発振周波数  $f_{osc}$  の給電構造に起因したテラヘルツ波の損失を低減できる。その結果、テラヘルツ波をより高出力で得ることができる。

【0040】

図5には、本実施形態の発振器100の変形例を示した。ここで、発振器100と同じ構成部材については説明を省略する。

【0041】

発振器300は、ストリップ導体3031を  $_{osc}/4$  線路とした構成である。ここで、  $_{osc}/4$  線路とは、ストリップ導体3031の長さが略  $_{osc}/4$  である線路のことであり、  $_{osc}$  は、パッチアンテナ302と負性抵抗素子301により規定される発振周波数  $f_{osc}$  のテラヘルツ波の波長で、以下、発振波長  $_{osc}$  と呼ぶ。

【0042】

短絡終端の  $_{osc}/4$  線路は、発振波長  $_{osc}$  においてストリップ導体3031はショートスタブして扱うことが出来るので、パッチアンテナ302から見て高インピーダンスとなる。そのため、パッチアンテナ302に定在するテラヘルツ波の電界の節で、パッチ導体308とストリップ導体3031とを接続しても、テラヘルツ波の損失は低減される。

【0043】

なお、この場合、損失のレベルは一定以下であればよいので、ストリップ導体3031の長さ  $L$  は  $_{osc}/4$  近傍であればよい。また、  $_{osc}/4$  の他、  $3_{osc}/4$  、  $5_{osc}/4$  等といった  $_{osc}/4$  の  $(2m-1)$  倍であってもよい ( $m$  : 自然数)。

【0044】

また、パッチアンテナの形状は正方形パッチに限られたものではなく、例えば矩形及び三角形等の多角形、図5(b)の発振器400のような円形、橢円形等のパッチ導体を用いた構造であっても、本発明を適用することができる。

【0045】

これらの場合も同様に、パッチ導体408と線路4031とが、パッチアンテナに定在するテラヘルツ波の電界の節で接続している構成にすることで、テラヘルツ波の損失を低減できる。パッチアンテナの幾何学的な構造で決まるパッチ導体の重心に対して、負性抵抗素子の方向に近づく又は遠ざかる位置に線路を配置してもよい。

【0046】

図5(c)には、複数の負性抵抗素子を有する発振器の一例を示した。発振器500は、2つの負性抵抗素子501a及び501bを、パッチアンテナ502に定在するテラヘルツ波の電界の共振方向について、パッチアンテナ502の中心線を軸にして線対称に配置したプッシュ・プル型の発振器の構成を開示している。

【0047】

このような場合、パッチアンテナ502に定在する発振周波数  $f_{osc}$  のテラヘルツ波の電界は、パッチアンテナ502の中心線を軸として線対称となり、発振周波数  $f_{osc}$  のテラヘルツ波の電界の節の位置はパッチアンテナ502の中心線付近に分布する。したがって、この場合は、ストリップ線路5031は、パッチアンテナ502の中心線付近に

10

20

30

40

50

配置すればよい。

【0048】

図6には、本実施形態の発振器100の別の変形例を示した。発振器600は、負性抵抗素子としてのRTD601のバイアス電圧を調整するためのバイアス回路に接続された線路として、基板630の板厚方向に伸びた貫通電極610を備えている。

【0049】

貫通電極610は、パッチアンテナ602に定在する発振周波数 $f_{osc}$ のテラヘルツ波の電界の節の位置に配置される。貫通電極610を配置する位置は、典型的には、発振周波数 $f_{osc}$ でパッチアンテナ602に定在するテラヘルツ波の電界の電界強度が最大電界強度より1桁程度低い位置が好適で、図3に示された電界分布の斜線領域内であればどこでも配置することができる。

【0050】

このように基板630の板厚方向に伸びる貫通電極610で給電する方法は、線路の構造寸法に起因するインダクタンスの抑制や、素子の小型化、素子のアレイ配置等に有効である。

【0051】

本発明は、負性抵抗素子が集積されたマイクロストリップ共振器において、負性抵抗素子のバイアス電圧を調整するバイアス回路に接続された線路を共振器に定在するテラヘルツ帯の発振周波数 $f_{osc}$ の電界の節に配置する構成を開示するものである。こうした構成により、テラヘルツ帯における所望の発振周波数 $f_{osc}$ 付近は、線路及び線路と接続されたバイアス回路が高インピーダンスとなるため、漏れによる損失が低減される。従って、マイクロストリップ型共振器を用いた発振器においても、給電構造に起因した損失が低減されるので、共振器により規定される所望のテラヘルツ帯の発振周波数 $f_{osc}$ を高出力で得ることができる。

【0052】

(実施例1)

本実施例に係る発振器200について、図2を用いて説明する。図2は、本実施例の発振器200の構成を説明する図である。発振器200は、発振周波数 $f_{osc} = 0.95$  THzを発振させるための発振器である。上述の実施形態と同じ構成で説明が重複する場合は、説明を省略する。

【0053】

本実施例では負性抵抗素子201として共鳴トンネルダイオード(RTD)を用いている。本実施例で用いたRTDは、例えば、InP基板230上のInGaAs/InAlAs、InGaAs/A1Asによる多重量子井戸構造とn-InGaAsによる電気的接点層を伴って構成される。

【0054】

多重量子井戸構造としては、例えば三重障壁構造を用いる。より具体的には、AlAs(1.3nm)/InGaAs(7.6nm)/InAlAs(2.6nm)/InGaAs(5.6nm)/AlAs(1.3nm)の半導体多層膜構造で構成する。このうち、InGaAsは井戸層、格子整合するInAlAsや非整合のAlAsは障壁層である。これらの層は意図的にキャリアドープを行わないアンドープとしておく。

【0055】

このような多重量子井戸構造は、電子濃度が $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn-InGaAsによる電気的接点層に挟まれる。こうした電気的接点層間の構造の電流電圧I(V)特性において、ピーク電流密度は $280 \text{ kA/cm}^2$ であり、約0.7Vから約0.9Vまでが負性抵抗領域となる。RTDが約 $2 \mu\text{m}$ のメサ構造の場合、ピーク電流 $10 \text{ mA}$ 、負性抵抗-20が得られる。

【0056】

パッチアンテナ202は、パッチ導体208の一辺が $60 \mu\text{m}$ の正方形パッチで、パッチ導体208と接地導体209との間には誘電体207として $3 \mu\text{m}$ 厚のBCB(ベンゾ

10

20

30

40

50

シクロブテン、ダウケミカル社製、比誘電率  $\epsilon_r = 2.4$  )を配置した。また、パッチ導体 208 と接地導体 209との間には直径  $2 \mu\text{m}$  の R T D 201 が接続され、R T D 201 は、パッチ導体 208 の重心から共振方向に  $24 \mu\text{m}$  シフトした位置に配置される。

#### 【0057】

パッチアンテナ 202 の共振周波数  $f_0$  は、負性抵抗素子 201 を除いたパッシブ構造で決まり、約  $1.5 \text{ THz}$  である。それに対し、負性抵抗素子 201 である R T D のリアクタンスを考慮すると、発振器 200 の発振周波数  $f_{osc}$  は約  $0.95 \text{ THz}$  となる。

#### 【0058】

パッチ導体 208 は幅  $5 \mu\text{m}$  、長さ  $15 \mu\text{m}$  の 2 本のストリップ導体 2031 を介して容量としての M I M 容量 2032 と接続される。M I M 容量 2032 の容量の大きさは、本実施例では  $10 \text{ pF}$  とした。M I M 容量 2032 には、ワイヤーボンディングを含む配線 206 が接続され、電源 205 により負性抵抗素子 201 のバイアス電圧が調整される。

#### 【0059】

抵抗としての抵抗体 204 は、負性抵抗素子 201 と並列に配置された並列抵抗で、M I M 容量 2032 の上部の導体（上導体）と接地導体 209 との間を 20 で接続している。抵抗体 204 には半金属であるビスマスを使用し、抵抗として 20 を得るために  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$  厚のビスマス膜をリフトオフ法で形成した。

#### 【0060】

なお、抵抗体 204 は、ニッケルクロム等の金属や導電性樹脂等を用いた線形抵抗体、又は、半導体を用いた非線形抵抗体等であってもよい。ワイヤーボンディングで形成した配線 206 の一端は、M I M 容量 2032 の上導体の適当な位置が接続され、その他端は電源 205 に接続される。

#### 【0061】

ストリップ導体 2031 は、パッチ導体 208 の重心を通るパッチアンテナ 202 の中心線から共振方向に  $20 \mu\text{m}$  シフトした位置に配置される ( $a = 20 \mu\text{m}$ )。この位置は、発振周波数  $f_{osc} = 0.95 \text{ THz}$  においてパッチアンテナ 202 に定在するテラヘルツ波の電界の節であるため、ストリップ導体 2031 が発振周波数  $f_{osc}$  でパッチアンテナ 202 内を共振する電界と干渉することはない。

#### 【0062】

本実施例による発振器 200 は、以下のように作製される。まず、InP 基板 230 上に、分子ビームエピタキシー (MBE) 法や有機金属気相エピタキシー (MOVPE) 法等によって、次の層をエピタキシャル成長する。すなわち、順に、n-InP/n-InGaAs、InGaAs/InAlAs による共鳴トンネルダイオード (RTD) をエピタキシャル成長する。InP 基板 230 として n 型の導電性基板を選択する場合は、n-InGaAs からエピタキシャル成長すればよい。

#### 【0063】

つぎに、RTD 201 を直径が  $2 \mu\text{m}$  となるような円弧形状のメサ状にエッティングを行う。エッティングには E B (電子線) リソグラフィと I C P (誘導性結合プラズマ) によるドライエッティングを用いる。ホトリソグラフィを用いてもよい。続いて、エッティングされた面に、リフトオフ法により接地導体 209 を形成する。共鳴トンネルダイオードにおける側壁の保護のためのパッシベーション膜を成膜してもよい。

#### 【0064】

さらに、スピンドル法とドライエッティングを用いて誘電体 207 である BCB による埋め込みを行い、リフトオフ法により Ti/Pd/Au のパッチ導体 208 、ストリップ導体 2031 、M I M 容量 2032 の上電極を形成する。最後に、リフトオフ法により、抵抗体 204 となる部分に Bi パターンを形成し、接地導体 209 と M I M 容量 2032 の上電極とを接続して、本実施例の発振器 200 は完成する。

#### 【0065】

発振器 200 へのバイアス電圧の供給は、パッチアンテナ 202 に定在するテラヘルツ

10

20

30

40

50

波の電界の節に配したストリップ導体 2031 を介して適宜電源 205 及び配線 206 を含むバイアス回路から行えばよい。通常は、RTD の負性抵抗領域におけるバイアス電圧を印加してバイアス電流を供給すると、発振器として動作する。

#### 【0066】

ここで、本実施例の発振器 200 において、パッチ導体 208 と線路 2031 とが、共振器 202 に定在するテラヘルツ波の電界の節で接続していることによって得られる効果について、図 3 及び図 4 を参照して説明する。

#### 【0067】

図 3 は、実施例 1 に開示した発振器 200 について、ANSYS 社の高周波シミュレータ HFSS を用いて発振周波数  $f_{osc}$  ( $= 0.95 \text{ THz}$ ) における正方形パッチアンテナであるパッチアンテナ 202 に定在するテラヘルツ波の電界の解析結果である。なお、ここでは、説明を簡略化するため、ストリップ導体 2031 を 1 つ有する構成について説明する。

#### 【0068】

図 3 の斜線領域は、定在する発振周波数  $f_{osc}$  のテラヘルツ波の電界強度が最大電界強度より 1 衡程度低い領域であり、詳細には、発振周波数  $f_{osc}$  のテラヘルツ波の電界強度が最大電界強度の  $1/e^2$  以下となる領域である。斜線領域は、パッチ導体 208 とストリップ導体 2031 とを接続するのに好適な、共振器に定在するテラヘルツ波の電界の節となる領域の典型例を示している。

#### 【0069】

ストリップ導体 2031 の構造及び寸法は、パッチアンテナ 202 に定在するテラヘルツ波の電界と干渉しないように、斜線の実質的にテラヘルツ波の電界の節となる領域の中に収まる程度の幅が好ましい。典型的には、幅が共振器長 L の  $1/5$  以下、又は発振波長  $\lambda_{osc}$  の  $1/10$  以下であることが好適である。また、この場合、ストリップ導体 2031 の長さは任意であってよい。

#### 【0070】

テラヘルツ帯で動作するアクティブアンテナは、負性抵抗素子 201 のリアクタンスによる周波数シフトが大きくなるので、図 3 のように、パッチアンテナ 202 に定在する発振周波数  $f_{osc}$  のテラヘルツ波の電界は必ずしも対称な分布にはならない。

#### 【0071】

例えば、正方形パッチアンテナであるパッチアンテナ 202 の場合、発振周波数  $f_{osc}$  のテラヘルツ波の電界の節は、パッチアンテナ 202 の中心線、言い換えると、図 3 における  $a = 0$  の軸以外の領域に分布する場合も生じる。特に負性抵抗素子 201 が容量性リアクタンスの場合、電界分布は、共振方向 (x 方向) においてパッチアンテナ 202 の中心線 ( $a = 0$ ) から負性抵抗素子 201 が配置された側へ偏る。その場合は、ストリップ導体 2031 をパッチアンテナ 202 の中心線より負性抵抗素子 201 に近い位置に配置すればよい。

#### 【0072】

誘導性リアクタンスによる電界分布の偏りに対応するためには、パッチアンテナ 202 の中心線より負性抵抗素子 201 から遠ざかる位置にストリップ導体 2031 を配置すればよい。

#### 【0073】

ここで、図 3 の  $a$  は、パッチアンテナの非放射端への中心線からの距離であり、ストリップ導体 2031 等の線路をパッチアンテナ 202 へ接続する位置を示すパラメータである。

#### 【0074】

図 4 は、実施例 1 に開示した RTD を集積した発振器 200 のアドミタンス特性の解析結果である。図 4 (a) は、RTD 201 のアドミタンスの実部  $Re[Y_{RTD}]$  とパッチアンテナ 202 のアドミタンスの実部  $Re[Y_{ANT}]$  とをプロットしたグラフである。また、図 4 (b) は、RTD 201 のアドミタンスの虚部  $Im[Y_{RTD}]$  とパッチア

10

20

30

40

50

ンテナ 202 のアドミタンスの虚部  $Im[Y_{ANT}]$  とをプロットしたグラフである。

【0075】

各グラフには、発振周波数  $f_{osc}$  のテラヘルツ波の電界の節 ( $a = 20 \mu m$ ) にストリップ導体 2031 を備えた発振器と、従来のパッチアンテナの共振周波数  $f_0$  の電界の節 ( $a = 0 \mu m$ ) にストリップ導体 2031 を配置した発振器について示した。

【0076】

図 4 (b) から、パッチアンテナ 202 のみの構造で決まる共振周波数  $f_0$  は  $f_0 = 1.5 \text{ THz}$  であり、(2) 式を満たす発振周波数  $f_{osc}$  は  $f_{osc} = 0.95 \text{ THz}$  である。図 4 (a) から、発振周波数  $f_{osc}$  における  $Re[Y_{ANT}]$  が従来の素子 ( $a = 0 \mu m$ ) は  $9 \text{ mS}$  であるのに対し、本実施例で開示した発振周波数  $f_{osc}$  のテラヘルツ波の電界の節にストリップ導体 2031 を配置した素子 ( $a = 20 \mu m$ ) は  $4 \text{ mS}$  となる。

【0077】

これは、本実施例の負性抵抗素子 201 は、発振周波数  $f_{osc}$  付近の周波数帯において高インピーダンスとなるため、パッチアンテナ 202 内のテラヘルツ波の電界がストリップ導体 2031 を介して漏れるのが抑制されたためと考えることができる。

【0078】

このように、発振器 200 は、テラヘルツ波帯における所望の発振周波数  $f_{osc}$  付近の周波数では、負性抵抗素子 201 から見てパッチアンテナ 202 より外、すなわち線路 2031 及びそれと接続されたバイアス回路は高インピーダンスな構造とみなせる。このため、発振周波数  $f_{osc}$  付近の周波数のテラヘルツ波が、パッチアンテナ 202 から漏れることによって生じる損失が低減されるので、発振出力の低下の抑制につながる。

【0079】

このような構成であれば、パッチアンテナの構造及びストリップ導体の大きさと配置を任意に設計し、テラヘルツ波の発振周波数  $f_{osc}$  における損失を最小化した構成にすることで発振器 200 の高出力化が実現される。

【0080】

本実施例では、RTD として、InP 基板上に成長した InGaAs / InAlAs 及び InGaAs / AlAs からなる 3 重障壁共鳴トンネルダイオードについて説明してきた。しかし、これらの構造に限られることなく、他の構造及び材料の組み合わせであっても本発明の半導体素子を提供できる。例えば、2 重障壁量子井戸構造を有する共鳴トンネルダイオードや、4 重以上の多重障壁量子井戸を有する共鳴トンネルダイオードを用いてもよい。

【0081】

また、その材料としては、以下の組み合わせのそれぞれを用いてもよい。

- GaAs 基板上に形成した GaAs / AlGaAs / 及び GaAs / AlAs, InGaAs / GaAs / AlAs
- InP 基板上に形成した InGaAs / AlGaAs Sb
- InAs 基板上に形成した InAs / AlAs Sb 及び InAs / AlSb
- Si 基板上に形成した SiGe / SiGe

上述の構造と材料は、所望の周波数等に応じて適宜選定すればよい。

【0082】

以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されず、その要旨の範囲内で種々の変形及び変更が可能である。

【0083】

例えば、上述の実施形態及び実施例では、テラヘルツ波を空間中に放射する構成としていたが、それ以外にも、テラヘルツ波を高周波の信号として発生するように構成させることもできる。

【0084】

また、上述の実施形態及び実施例では、パッチ導体を第 1 の導体、接地導体を第 2 の導

10

20

30

40

50

体として、パッチ導体と線路とを接続していたが、接地導体を第1の導体、パッチ導体を第2の導体として、接地導体と線路とを接続する構成にしてもよい。この場合も、接地導体と線路とが、共振器に定在するテラヘルツ波の電界の節で接続する構成にすることで、テラヘルツ波の損失を低減できる。

#### 【0085】

更に、上述の実施形態及び実施例では、キャリアが電子である場合を想定して説明をしているが、これに限定されるものではなく、正孔（ホール）を用いたものであってもよい。

#### 【0086】

また、基板や誘電体の材料は用途に応じて選定すれば良く、シリコン、ガリウムヒ素、インジウムヒ素、ガリウムリン等の半導体、又は、ガラス、セラミック、テフロン（登録商標）やポリエチレンテレフタラート等の樹脂を用いることができる。

#### 【符号の説明】

#### 【0087】

101 負性抵抗素子

102 共振器

107 誘電体

108 パッチ導体（第1の導体）

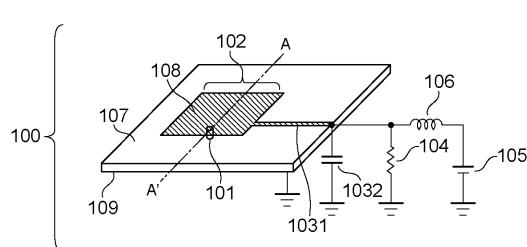
109 接地導体（第2の導体）

1031 線路

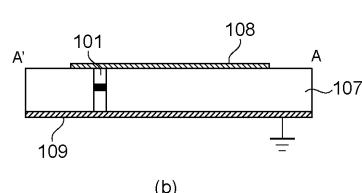
10

20

【図1】

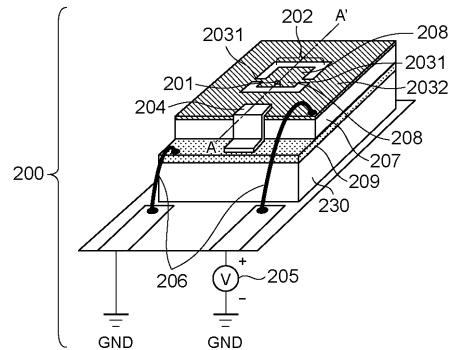


(a)

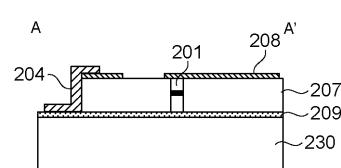


(b)

【図2】

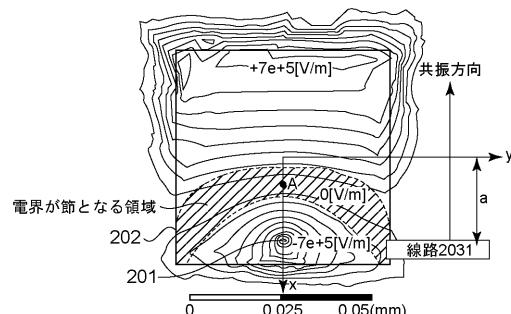


(a)

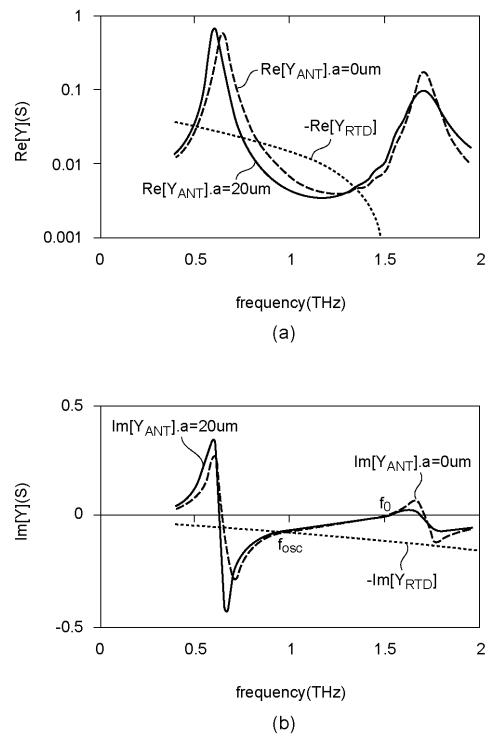


(b)

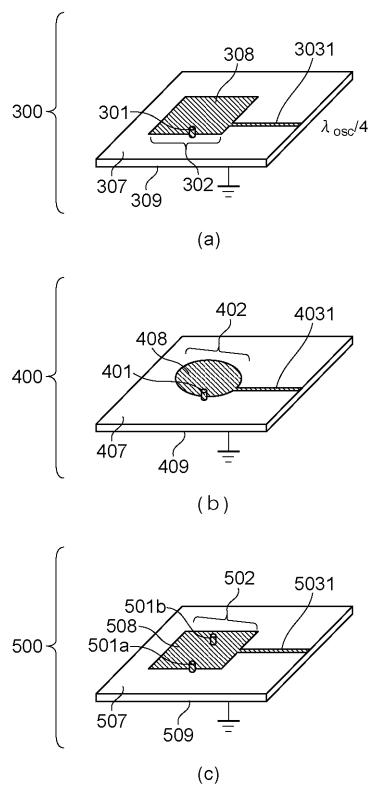
【図3】



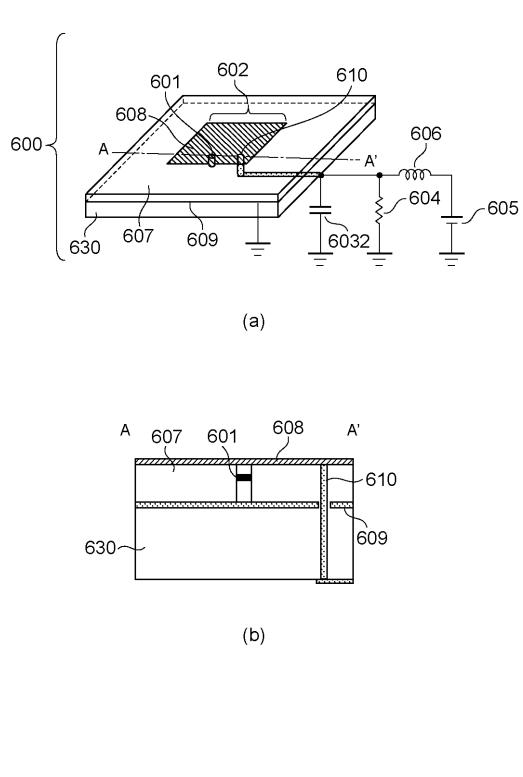
【図4】



【図5】



【図6】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2010-252299(JP,A)  
特開2008-011490(JP,A)  
特開2013-168928(JP,A)  
特開2002-184599(JP,A)  
特開2009-049692(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H03B 7/00 - 9/10  
H01Q 13/00 - 13/28  
H01Q 1/00 - 1/10