

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7574052号
(P7574052)

(45)発行日 令和6年10月28日(2024.10.28)

(24)登録日 令和6年10月18日(2024.10.18)

(51)国際特許分類

F I

H 0 3 B 7/14 (2006.01) H 0 3 B 7/14

H 0 3 B 7/08 (2006.01) H 0 3 B 7/08

請求項の数 12 (全17頁)

| | | | |
|----------|-----------------------------|----------|-------------------|
| (21)出願番号 | 特願2020-181147(P2020-181147) | (73)特許権者 | 000001007 |
| (22)出願日 | 令和2年10月29日(2020.10.29) | | キャノン株式会社 |
| (65)公開番号 | 特開2022-71982(P2022-71982A) | | 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 |
| (43)公開日 | 令和4年5月17日(2022.5.17) | (74)代理人 | 100126240 |
| 審査請求日 | 令和5年10月16日(2023.10.16) | | 弁理士 阿部 琢磨 |
| | | (74)代理人 | 100223941 |
| | | | 弁理士 高橋 佳子 |
| | | (74)代理人 | 100159695 |
| | | | 弁理士 中辻 七朗 |
| | | (74)代理人 | 100172476 |
| | | | 弁理士 富田 一史 |
| | | (74)代理人 | 100126974 |
| | | | 弁理士 大朋 靖尚 |
| | | (72)発明者 | 吉岡 利文 |
| | | | 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 |
| | | | 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、
第1の半導体層と、第2の半導体層と、前記第1の半導体層と前記第2の半導体層との間に設けられた活性層と、を有する負性抵抗素子と、
第1の導体と、第2の導体と、前記第1の導体と前記第2の導体との間に設けられた誘電体と、を有する共振器とを有し、
前記負性抵抗素子は、前記第1の導体と前記第2の導体との間に設けられており、
前記負性抵抗素子と前記誘電体との間に、層が設けられており、
前記層は、前記第1の半導体層または前記第2の半導体層の抵抗率よりも高い抵抗率を有する層であり、
前記第1の半導体層と、前記活性層と、前記第2の半導体層は、第1の方向で積層されており、
前記第1の方向と直交する第2の方向において、前記層は、1nm以上500nm以下の膜厚を有することを特徴とする発振器。

【請求項2】

前記層は、アモルファス層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】

テラヘルツ波を発振する発振器であって、
第1の半導体層と、第2の半導体層と、前記第1の半導体層と前記第2の半導体層との

間に設けられた活性層と、を有する負性抵抗素子と、

第1の導体と、第2の導体と、前記第1の導体と前記第2の導体との間に設けられた誘電体と、を有する共振器とを有し、

前記負性抵抗素子は、前記第1の導体と前記第2の導体との間に設けられており、

前記負性抵抗素子と前記誘電体との間に、層が設けられており、

前記層は、アモルファス層であり、

前記第1の半導体層と、前記活性層と、前記第2の半導体層は、第1の方向で積層されており、

前記第1の方向と直交する第2の方向において、前記層は、1 nm以上500 nm以下の膜厚を有することを特徴とする発振器。

10

【請求項4】

前記層は、前記第1の半導体層または前記第2の半導体層の抵抗率よりも高い抵抗率を有することを特徴とする請求項3に記載の発振器。

【請求項5】

前記層は、前記負性抵抗素子を構成する元素を有することを特徴とする請求項1から4のいずれか1項に記載の発振器。

【請求項6】

前記負性抵抗素子は、前記誘電体で囲まれていることを特徴とする請求項1から5のいずれか1項に記載の発振器。

【請求項7】

前記負性抵抗素子は、メサ構造を有し、前記層は、前記メサ構造の側壁に設けられていることを特徴とする請求項1から6のいずれか1項に記載の発振器。

20

【請求項8】

前記第2の方向において、前記層は、5 nm以上200 nm以下の膜厚を有することを特徴とする請求項1から7のいずれか1項に記載の発振器。

【請求項9】

前記層は、前記第1の半導体層と前記誘電体との間、または、前記第2の半導体層と前記誘電体との間に設けられている第1の層と、前記活性層と前記誘電体との間に設けられている第2の層と、を有することを特徴とする請求項1から8のいずれか1項に記載の発振器。

30

【請求項10】

前記層は、前記負性抵抗素子を構成する元素を有することを特徴とする請求項1から9のいずれか1項に記載の発振器。

【請求項11】

前記元素は、In、Ga、As、Pのいずれかであることを特徴とする請求項10に記載の発振器。

【請求項12】

前記共振器は、パッチアンテナを有するマイクロストリップ共振器であることを特徴とする請求項1から11のいずれか1項に記載の発振器。

【発明の詳細な説明】

40

【技術分野】

【0001】

本発明は、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】

テラヘルツ波の帯域には、生体材料・医薬品・電子材料など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・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

50

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などへの応用が期待されている。

【0003】

この周波数帯域の電磁波を発生する電流注入型の発振器として、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。

【0004】

特許文献1には共鳴トンネルダイオード(RTD: Resonant Tunneling Diode)である負性抵抗素子と、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。

10

【0005】

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電源と配線とを含むバイアス回路に起因した寄生発振を生じることが知られている。寄生発振は、所望の周波数とは異なる低周波側の周波数帯における寄生的な発振のことを指し、所望の周波数における発振出力を低下させる。

【0006】

特許文献1は、寄生的発振を抑制する構成を提案する。図9に、特許文献1の構成を示す。

【0007】

図9(a)は、発振器1100の外観を示す斜視図、図9(b)はその断面図である。発振器1100は、パッチアンテナ1102を有し、2つの導体1108と1109で負性抵抗素子1101と誘電体1107を挟むように構成されたマイクロストリップ共振器である。共振周波数は、 f_{osc} である。

20

【0008】

負性抵抗素子1101のバイアス電圧を調整するためのバイアス回路は、電源1105と配線1106で構成される。配線1106は寄生的なインダクタンス成分を必ず伴うため、インダクタンスとして表示している。ストリップ導体2031は、バイアス回路から負性抵抗素子1101にバイアスを供給する。抵抗1104と、抵抗1104と並列接続された容量2032は、低インピーダンス回路である。これらは、電源1105や配線1106などのバイアス回路に起因した比較的低周波数である f_{sp1} ($f_{sp1} < f_{osc}$ 、典型的にはDCから10GHzの周波数帯)の寄生的な発振を抑制する。

30

【0009】

また、図9には、パッチアンテナ1102の中に、負性抵抗素子1101と並列に配置された抵抗素子1110が設けられている。ストリップ導体2031のインダクタンスとパッチアンテナ1102のキャパシタンスは、周波数 f_{sp2} ($f_{sp2} < f_{osc}$)のLC共振を形成する。周波数 f_{sp2} は、ストリップ導体1031の長さやパッチアンテナ1102の面積で決まり、典型的には10~500GHzの範囲である。抵抗素子1110は、発振周波数 f_{osc} の電界の実質的な節に配置されている。これにより、所望の発振周波数 f_{osc} 付近は高インピーダンス、寄生発振の周波数 f_{sp2} ($f_{sp2} < f_{osc}$)付近は低インピーダンスとなることで、配線構造による寄生発振を抑制することができる。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【文献】特開2014-199965号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

ところで、一般に交流電流を用いた系では、基本の周波数に対して、電源や電子機器に起因する基本波の整数倍の周波数である高調波が発生することが知られている。

50

【 0 0 1 2 】

負性抵抗素子を用いた発振器でも同様に、所望の発振周波数 f_{osc} の整数倍の周波数成分である高調波が発生する場合が多く、高調波の発生により所望の周波数 f_{osc} の発振出力を低下させるという問題がある。

【 0 0 1 3 】

前述の特許文献 1 では、所望の周波数 f_{osc} よりも高い高調波の発振 f_{hr} ($f_{hr} > f_{osc}$) については考慮されてなく、不要な高調波を抑制できないという課題があった。

【 0 0 1 4 】

本発明の目的は、パッチアンテナなどのマイクロストリップ共振器において、所望の発振周波数よりも高い不要な周波数の発振を抑制し、所望のテラヘルツ帯の発振周波数で安定して発振動作可能な発振器を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 5 】

本発明に係る発振器は、テラヘルツ波を発振する発振器であって、第 1 の半導体層と、第 2 の半導体層と、前記第 1 の半導体層と前記第 2 の半導体層との間に設けられた活性層と、を有する負性抵抗素子と、第 1 の導体と、第 2 の導体と、前記第 1 の導体と前記第 2 の導体との間に設けられた誘電体と、を有する共振器とを有し、前記負性抵抗素子は、前記第 1 の導体と前記第 2 の導体との間に設けられており、前記負性抵抗素子と前記誘電体との間に、層が設けられており、前記層は、前記第 1 の半導体層または前記第 2 の半導体層の抵抗率よりも高い抵抗率を有する層である。

【 0 0 1 6 】

また、本発明に係る発振器は、テラヘルツ波を発振する発振器であって、第 1 の半導体層と、第 2 の半導体層と、前記第 1 の半導体層と前記第 2 の半導体層との間に設けられた活性層と、を有する負性抵抗素子と、第 1 の導体と、第 2 の導体と、前記第 1 の導体と前記第 2 の導体との間に設けられた誘電体と、を有する共振器とを有し、前記負性抵抗素子は、前記第 1 の導体と前記第 2 の導体との間に設けられており、前記負性抵抗素子と前記誘電体との間に、層が設けられており、前記層は、アモルファス層である。

【発明の効果】

【 0 0 1 7 】

本発明によれば、パッチアンテナなどのマイクロストリップ共振器において、所望の発振周波数よりも高い不要な周波数の発振を抑制し、所望のテラヘルツ帯の発振周波数で安定して発振動作可能な発振器を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 8 】

【図 1】本発明に係る発振器の第 1 の実施形態の構成を説明する図

【図 2】本発明に係る発振器の第 2 の実施形態の構成を説明する図

【図 3】本発明に係る発振器の第 3 の実施形態の構成を説明する図

【図 4】本発明に係る発振器の第 4 の実施形態の構成を説明する図

【図 5】本発明に係る発振器の第 5 の実施形態の構成を説明する図

【図 6】本発明に係る発振器の第 6 の実施形態の構成を説明する図

【図 7】実施例 1 の発振器 200 の構成を説明する図

【図 8】実施例 2 の発振器 300 の構成を説明する図

【図 9】特許文献 1 の構成を説明する図

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 9 】

(第 1 の実施形態)

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 は本発明に係る第 1 の実施形態の発振器 100 を示す概略図であり、(a) は外観を示す斜視図、(b) はその A - A' 断面図である。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 0 】

本発明の発振器 1 0 0 は、導体 1 0 8（第 1 の導体）、導体 1 0 9（第 2 の導体）で負性抵抗素子 1 0 1 と誘電体 1 0 7 を挟むように構成されたマイクロストリップ共振器である。負性抵抗素子 1 0 1 は導体 1 0 8（第 1 の導体）と導体 1 0 9（第 2 の導体）との間に設けられている。

【 0 0 2 1 】

負性抵抗素子 1 0 1 の構造は、平面視において台形、長方形、円形などを形成するメサ構造となっている。図 1（a）に示すように、ここでは断面形状が円形のメサ構造を示している。負性抵抗素子 1 0 1 は、ドーピング等による低抵抗半導体層 1 0 2 a および 1 0 2 b と、利得を有した活性層 1 0 3 により構成されている。すなわち、負性抵抗素子 1 0 1 は、低抵抗半導体層 1 0 2 a（第 1 の半導体層）と、活性層 1 0 3 と、低抵抗半導体層 1 0 2 b（第 2 の半導体層）とが、第 1 の方向で積層されている。

10

【 0 0 2 2 】

負性抵抗素子 1 0 1 の側壁には、低抵抗半導体層（ドーピング層）1 0 2 a および 1 0 2 b よりも高い抵抗率を有する層 1 1 0 が設けられている。本実施形態では層 1 1 0 は、ドーピング層 1 0 2 a の側壁である 1 1 0 a と、ドーピング層 1 0 2 b の側壁である 1 1 0 b と、活性層 1 0 3 の側壁である 1 1 0 c に分かれている。

【 0 0 2 3 】

層 1 1 0 a、1 1 0 b、1 1 0 c は、ドーピング層 1 0 2 a および 1 0 2 b よりも高い抵抗率を有する。具体的には、層 1 1 0 a、1 1 0 b、1 1 0 c の抵抗率は、ドーピング層の抵抗率の 1 0 倍以上 1 0 0 0 0 倍以下である。例えば、1 0 0 倍以上 1 0 0 0 倍以下である。

20

【 0 0 2 4 】

層 1 1 0 a、1 1 0 b、1 1 0 c は、負性抵抗素子 1 0 1 をメサ形状に形成後、処理プロセスを施すことによってアモルファス状態の層が形成されたアモルファス層 1 1 0 a、1 1 0 b、1 1 0 c である。

【 0 0 2 5 】

ここで、アモルファスとは、明確な結晶性を有しない状態をいうが、一部に非常に微細な結晶が存在していてもよい。具体的には、X 線回折スペクトル（X R D）や T E M 観察による電子線回折測定において、結晶性を示す回折ピークが存在しない場合である。また、存在していてもピークがわずかである場合である。さらに、ハローピークが存在する場合はアモルファスであるとする。

30

【 0 0 2 6 】

活性層 1 0 3 を含む負性抵抗素子 1 0 1 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、すなわち負の抵抗をもつ領域が現れる素子である。負性抵抗素子 1 0 1 は、典型的には、共鳴トンネルダイオード（R T D）やエサキダイオード、ガンダイオード、一端子を終端したトランジスタなどの高周波素子が好適である。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（H B T）、化合物半導体系電 F E T、高電子移動度トランジスタ（H E M T）などを用いても良い。また、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良い。

40

【 0 0 2 7 】

以下では、テラヘルツ帯で動作する代表的な負性抵抗素子である R T D を負性抵抗素子 1 0 1 に用いた場合を例にして説明を進める。

【 0 0 2 8 】

パッチアンテナ 1 0 4 は、テラヘルツ帯の共振器であり、有限な長さのマイクロストリップラインなど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 1 0 4 は、導体 1 0 8 と 1 0 9 の二導体で負性抵抗素子 1 0 1 と誘電体 1 0 7 を挟むように構成される。導体 1 0 8 はパッチアンテナ 1 0 4 の上側の導体であり、導体 1 0 9 はパッチアンテナ 1 0 4 の接地導体である。

【 0 0 2 9 】

50

ここで、誘電体とは、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。典型的には抵抗率が $1 \text{ k } \Omega$ 以上の材料が好適である。具体例としては、プラスチック、セラミック、酸化シリコン、窒化シリコン、酸窒化シリコンなどがある。

【0030】

パッチアンテナ104は、導体108のA-A'方向の幅が $\lambda/2$ 共振器となるように設定される。パッチアンテナ104は、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。従って、発振器100のパッチアンテナ104によって規定される発振周波数 f_{osc} は、パッチアンテナ104と負性抵抗素子101のリアクタンスを組み合わせた全並列共振回路の共振周波数として決定される。具体的には、Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 6 (2008)の開示によると、RTDのアドミタンス (Y_{RTD}) とアンテナのアドミタンス (Y_{ANT}) を組み合わせ以下の条件を満たす周波数が、発振周波数 f_{osc} となる。式(1)は、振幅条件であり、式(2)は位相条件である。

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

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

【0031】

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。

【0032】

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から構成される。配線は、寄生的なインダクタンス成分を必ず伴うため、図1上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。ストリップ導体1031は、電源105、配線106から負性抵抗素子101にバイアスを供給する役割を持つ。

【0033】

抵抗112と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や配線106などのバイアス回路に起因した比較的低周波数の寄生的な発振を抑制している。

【0034】

ところで、高周波電流が導体を流れるときは、表皮効果により導体の表面ほど電流が多く流れることが知られており、周波数が高いほど電流が表面に集中する。

【0035】

ここで、導体の表面を流れる電流の $1/e$ になる深さ: d を表皮深さと呼び、電気抵抗率: ρ 、透磁率: μ 、角周波数: ω とした場合、 d は、式(3)で与えられる。

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (3)$$

【0036】

表皮深さ d は、周波数 f が高いほど小さくなり、周波数 f が低いほど、より表面近傍のみを電流が通過する。

【0037】

表皮深さ d の減少は電流の通過する面積の減少となるため、周波数が高いほど実効的な抵抗値が上昇する。テラヘルツ帯域での表皮深さのおよその値として、例えば、抵抗率 $3 \times 10^{-7} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ の低抵抗半導体層を高周波電流が流れる場合の表皮深さは、1 THz では約 260 nm 程度に対し、2 THz では約 160 nm 程度である。

【0038】

テラヘルツ波を発振するメサ形状の負性抵抗素子101の駆動においても、表皮効果により周波数が高いほどメサの表面近傍をより多くの電流が流れ、実効的な抵抗値が高くなる。

【0039】

本実施形態に係る発振器100は、前述の通り、ドーピング層102aおよび102b

10

20

30

40

50

の側壁には、アモルファス層 110a および 110b が形成されている。この構成により、負性抵抗素子 101 の発振回路では、ドーピング層 102a および 102b とアモルファス層 110a および 110b の合成抵抗による損失が発生する。そして、表皮効果により周波数が高いほど電流はメサの表面近傍を通過するため、表面側に形成されたアモルファス層 110a および 110b の影響を大きく受けて実効的な抵抗値が高くなって損失が大きくなる。これによって発振器 100 の発振周波数 f_{osc} に対して、高い周波数である 2 次高調波、3 次高調波は、アモルファス層 110 の影響をより大きく受けて損失が大きくなるため、不要な高調波の発振を抑制することが可能になる。アモルファス層 110a および 110b により、パッチアンテナ 104 の内部で、負性抵抗素子 101 の側壁という非常に近い位置で効果的な損失を与えることができる。

10

【0040】

アモルファス層 110a および 110b の抵抗率は、発振器 100 の発振周波数 f_{osc} の損失が少なく、2 次、3 次高調波に対して効果的な損失となるように、必要な発振周波数 f_{osc} の値や負性抵抗素子 101 の構造などに応じて適宜、設定できる。アモルファス層 110a および 110b を構成する成分は、主としてドーピング層 102a および 102b を構成する元素、およびアモルファス化に要する工程の元素などから構成される。例えば、InGaAs, InAlAs, n-InGaAs, Si, O, N, C, F などが挙げられる。

【0041】

アモルファス層 110a および 110b の厚みは、必要な発振周波数 f_{osc} や負性抵抗素子 101 の構造などによって適宜、設定されるが、概ね 1nm 以上 500nm 以下の範囲が適当である。より適当な数値としては、5nm 以上 200nm 以下の範囲である。ここで、厚さ（膜厚）とは、負性抵抗素子 101 を構成する層が積層されている方向（第 1 の方向）と直交する方向（第 2 の方向）の厚さ（膜厚）である。

20

【0042】

また、前述の通り、活性層 103 の側壁には、アモルファス層 110c が形成されている。活性層 103 の側壁のアモルファス層 110c を構成する成分は、主として活性層 103 を構成する成分、およびアモルファス化に要する工程の成分などから構成される。例えば、キャリアドープを行わないアンドープの AlAs, InGaAs, InAlAs, および、O, N, C, F などが挙げられる。アモルファス層 110c の厚みは、必要な発振周波数 f_{osc} や負性抵抗素子 101 の構造などによって適宜、設定されるが、概ね 1nm 以上 500nm 以下の範囲が適当である。より適当な数値としては、5nm 以上 200nm 以下の範囲である。

30

【0043】

活性層 103 の側壁のアモルファス層 110c の抵抗率は、ドーピング層 102a および 102b よりも高く、アンドープの半導体である活性層 103 に対しては、アモルファス化により低インピーダンス化している。このため、活性層 103 の容量の漏れ電流が増加し、誘電正接 (\tan) が大きくなる。ここで、誘電体に交流電界を加えると電力の損失（誘電損）が発生し、誘電損は周波数と誘電正接 (\tan) に比例することが知られている。このため、発振器 100 の発振周波数 f_{osc} に対して、高い周波数である 2 次高調波、3 次高調波は誘電損がより大きくなり、不要な高調波の発振を抑制する効果がある。

40

【0044】

（第 2 の実施形態）

図 2 は本発明の第 2 の実施形態に係る発振器 100 を示す概略図であり、(a) は外観を示す斜視図、(b) はその A - A' 断面図である。

【0045】

図 2 において、負性抵抗素子 101 は、低抵抗半導体層（ドーピング層）102a および 102b と活性層 103 を有する。なお、第 1 の実施形態と同じ構造については説明を省略する。

50

【 0 0 4 6 】

負性抵抗素子 1 0 1 の側壁には、層 1 1 0 が形成されている。第 2 の実施形態における層 1 1 0 は、負性抵抗素子 1 0 1 をメサ形状に形成後、所望の抵抗率を有する抵抗膜を成膜したものである。抵抗膜の構成成分と成膜方法としては、Al, Ti, C などの低抵抗材料に Si, O, N, F, P, S などを反応させて所望の抵抗率になるように CVD 法やスパッタ法、蒸着法などを用いて形成することができる。たとえば、層 1 1 0 としては、酸化アルミニウム、酸化チタン、炭化ケイ素、窒化ケイ素、窒化チタン、窒化アルミなどの窒化物、さらには硫黄系化合物やフッ素系化合物などの化合物が挙げられる。

【 0 0 4 7 】

この構成により、ドーピング層 1 0 2 a および 1 0 2 b と層 1 1 0 の合成抵抗による損失が発生する。表皮効果により周波数が高いほど電流はメサの表面近傍を流れるため、表面側に形成された層 1 1 0 の影響を大きく受けて、高抵抗化して損失が大きくなる。これによって発振器 1 0 0 の発振周波数 f_{osc} に対して、高い周波数である 2 次高調波、3 次高調波は、アモルファス層 1 1 0 による損失が大きくなるため、不要な高調波の発振を抑制することが可能になる。

10

【 0 0 4 8 】

(第 3 の実施形態)

図 3 は本発明の第 3 の実施形態に係る発振器 1 0 0 を示す概略図であり、負性抵抗素子 1 0 1 の周辺を示す概略断面図 (図 1 (b) に相当する図) である。なお、第 1 の実施形態と同じ構造については説明を省略する。

20

【 0 0 4 9 】

図 3 において、負性抵抗素子 1 0 1 の低抵抗半導体層 (ドーピング層) 1 0 2 a および 1 0 2 b の側壁に層 (アモルファス層) 1 1 0 a および 1 1 0 b が形成されている。アモルファス層 1 1 0 a および 1 1 0 b はドーピング層 1 0 2 a および 1 0 2 b よりも高い抵抗率を有する。この構成においても、前述したように発振器 1 0 0 の発振周波数 f_{osc} に対して、高い周波数である 2 次高調波、3 次高調波の損失が大きくなるため、不要な高調波の発振を抑制できる。

【 0 0 5 0 】

ここで、ドーピング層 1 0 2 a と側壁のアモルファス層 1 1 0 a、およびドーピング層 1 0 2 b と側壁のアモルファス層 1 1 0 b を合わせた形態で活性層 1 0 3 との電流経路が形成される。このため、ドーピング層 1 0 2 a と側壁のアモルファス層 1 1 0 a、およびドーピング層 1 0 2 b と側壁のアモルファス層 1 1 0 b の少なくとも一部が活性層 1 0 3 と電氣的に接続されていればよい。したがって、活性層 1 0 3 の側壁の端部と、アモルファス層 1 1 0 a および 1 1 0 b の端部の位置は任意の形状に出来る。

30

【 0 0 5 1 】

(第 4 の実施形態)

図 4 (a) は本発明の第 4 の実施形態に係る発振器 1 0 0 を示す概略図であり、負性抵抗素子 1 0 1 の周辺を示す概略断面図 (図 1 (b) に相当する図) である。なお、第 1 の実施形態と同じ構造については説明を省略する。

【 0 0 5 2 】

40

図 4 (a) において、負性抵抗素子 1 0 1 のドーピング層 1 0 2 a および 1 0 2 b の側壁にアモルファス層 1 1 0 a および 1 1 0 b が形成されている。アモルファス層 1 1 0 a および 1 1 0 b の側壁より活性層 1 0 3 の側壁がメサ構造の中心側に近くなっている。図 4 (b) は、平面図であり、活性層 1 0 3 の外縁が、アモルファス層 1 1 0 a および 1 1 0 b の外縁よりも、メサ構造の中心側に配されるように構成されている。

【 0 0 5 3 】

この構成のように、アモルファス層 1 1 0 a および 1 1 0 b の位置と活性層 1 0 3 の位置は任意に設定可能である。図 4 とは逆に、アモルファス層 1 1 0 a および 1 1 0 b の外縁が、活性層 1 0 3 の外縁よりも、メサ構造の中心側に位置するように構成されていても構わない。

50

【 0 0 5 4 】

(第 5 の実施形態)

図 5 は本発明の第 5 の実施形態に係る発振器 1 0 0 を示す概略図であり、負性抵抗素子 1 0 1 の周辺を示す概略断面図 (図 1 (b) に相当する図) である。なお、第 1 の実施形態と同じ構造については説明を省略する。

【 0 0 5 5 】

図 5 において、負性抵抗素子 1 0 1 の活性層 1 0 3 の側壁にアモルファス層 1 1 0 c が形成されている。アモルファス層 1 1 0 c の抵抗率はドーピング層 1 0 2 a および 1 0 2 b よりも高く、活性層 1 0 3 に対しては、低インピーダンスである。

【 0 0 5 6 】

このため前述の通り、活性層 1 0 3 の容量の漏れ電流が増加し、誘電正接 (\tan) が大きくなる。これによって、発振器 1 0 0 の発振周波数 f_{osc} に対して、高い周波数である 2 次高調波、3 次高調波の誘電損が大きくなるため、不要な高調波の発振を抑制する効果がある。

【 0 0 5 7 】

なお、活性層 1 0 3 とアモルファス層 1 1 0 c は繋がっているため、アモルファス層 1 1 0 c の外縁の位置と、活性層 1 0 3 と電氣的に接続されているドーピング層 1 0 2 a および 1 0 2 b の外縁の位置は任意の形状に出来る。

【 0 0 5 8 】

(第 6 の実施形態)

図 6 (a) は本発明の第 6 の実施形態に係る発振器 1 0 0 を示す概略図であり、負性抵抗素子 1 0 1 の周辺を示す概略断面図 (図 1 (b) に相当する図) である。なお、第 1 の実施形態と同じ構造については説明を省略する。

【 0 0 5 9 】

図 6 (a) において、負性抵抗素子 1 0 1 の活性層 1 0 3 の側壁にアモルファス層 1 1 0 c が形成されている。図 6 (b) に示す平面図では、ドーピング層 1 0 2 a および 1 0 2 b の外縁が、アモルファス層 1 1 0 c の外縁よりも、メサ構造の中心側に配されるように構成されている。

【 0 0 6 0 】

このように、アモルファス層 1 1 0 c の外縁とドーピング層 1 0 2 a および 1 0 2 b の外縁の位置は任意に設定可能である。そのため、平面視において、アモルファス層 1 1 0 c の外縁が、ドーピング層 1 0 2 a および 1 0 2 b の外縁よりも、メサ構造の中心側に配されるように構成されていてもよい。

【 実施例 1 】

【 0 0 6 1 】

本実施例に係る発振器 2 0 0 について、図 7 を用いて説明する。

【 0 0 6 2 】

発振器 2 0 0 は、発振周波数 $f_{osc} = 0.95 \text{ THz}$ を発振させるための発振器である。本実施例では負性抵抗素子 2 0 1 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 2 3 0 上に、活性層 2 0 3 として、 $\text{InGaAs} / \text{InAlAs}$ 、 $\text{InGaAs} / \text{AlAs}$ による多重量子井戸構造を構成する。また、活性層 2 0 3 は、ドーピング層 2 0 2 a および 2 0 2 b として、 $n - \text{InGaAs}$ による電氣的接点層を伴って負性抵抗素子 1 0 1 として構成される。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、 $\text{AlAs} (1.3 \text{ nm}) / \text{InGaAs} (7.6 \text{ nm}) / \text{InAlAs} (2.6 \text{ nm}) / \text{InGaAs} (5.6 \text{ nm}) / \text{AlAs} (1.3 \text{ nm})$ 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。この様な多重量子井戸構造で構成される活性層 2 0 3 は、電子濃度が $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の $n - \text{InGaAs}$ のドーピング層 2 0 2 a および 2 0 2 b の電氣的接点層に挟まれて、負性抵抗素子 1 0 1 を構成す

10

20

30

40

50

る。

【0063】

こうした電氣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 kA/cm^2 であり、約 0.7 V から約 0.9 V までが負性抵抗領域となる。 RTD が約 $2\text{ }\mu\text{m}$ のメサ構造の場合、ピーク電流 10 mA 、負性抵抗 -20 が得られる。

【0064】

パッチアンテナ204は、導体208の一辺が $60\text{ }\mu\text{m}$ の正方形パッチで、導体208と接地側の導体209の間には誘電体207として $3\text{ }\mu\text{m}$ 厚のBCB(ベンゾシクロブテン、ダウケミカル社製、 $\epsilon_r = 2.4$)を配置した。導体208と209の間には直径 $2\text{ }\mu\text{m}$ の RTD 201が接続され、 RTD 201は、導体208の中心から共振方向に $24\text{ }\mu\text{m}$ シフトした位置に配置される。パッチアンテナ204の単独の共振周波数は、約 1.5 THz であるが、負性抵抗素子201である RTD 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 THz となる。

10

【0065】

導体208は幅 $5\text{ }\mu\text{m}$ ・長さ $15\text{ }\mu\text{m}$ の2本のストリップ導体2031を介してMIM容量2032と接続される。MIM容量2032の容量の大きさは本実施例では 10 pF とした。MIM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。

【0066】

負性抵抗素子201は、ドーピング層202aおよび202bと活性層203を有し、ドーピング層202aおよび202bの側壁には、アモルファス層210aおよび210b、活性層203の側壁にはアモルファス層210cが形成されている。

20

【0067】

本実施例における活性層203(RTD)は $2\text{ }\mu\text{m}$ のメサ構造で形成し、その周囲にアモルファス層210a、210b、210cをいずれも 140 nm の厚さで形成した。また、負性抵抗素子201のメサの高さを 200 nm とした。

【0068】

ドーピング層202aおよび202bの抵抗率は約 $3 \times 10^{-7}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ に対して、アモルファス層の210aおよび210bの抵抗率は結晶性の劣化とドーパントの減少により導電性が減少し、抵抗率としては2~3桁の増加と見積もられる。

30

【0069】

ドーピング層202a、202bとアモルファス層210a、210bによる合成抵抗は、前述の通り、表皮効果により周波数の増加に伴って増加する。このような構成で、発振周波数 $f_{osc} = 0.95\text{ THz}$ では 0.1 以下なのに対して、2次高調波(1.9 THz)で2~4、3次高調波(2.85 THz)では、30~50と見積もられる。

【0070】

さらに、負性抵抗素子201では、活性層203の側壁のアモルファス層210cによって誘電損が増加する。側壁にアモルファス層210を有する場合の誘電正接($\tan\delta$)は、インピーダンスアナライザを用いてのミリ波帯での測定結果から、アモルファス層210cが存在しない時の5倍程度と見積もっている。この構成により、発振周波数 $f_{osc} = 0.95\text{ THz}$ に対して、2次高調波(1.9 THz)、3次高調波の損失が大きくなり、2次、3次高調波の不要な発振を抑制することができる。

40

【0071】

本実施例による発振器200は、以下のように作製される。

【0072】

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)法などによって、次の層をエピタキシャル成長する。すなわち、順に、 $n\text{-InP}/n\text{-InGaAs}$ 、 $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ 、 $n\text{-InP}/n\text{-InGaAs}$ 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、 $n\text{-InGaAs}$ からエピタ

50

キシャル成長すればよい。

【0073】

つぎに、共鳴トンネルダイオード201を直径が2.28 μm となるような円弧形状のメサ状にエッチングを行う。エッチングにはEB（電子線）リソグラフィとICP（誘導性結合プラズマ）によるドライエッチングを用いる。フォトリソグラフィを用いてもよい。

【0074】

続いて、メサ状の共鳴トンネルダイオード201の側壁のアモルファス化処理を行う。アモルファス化処理は、 O_2 プラズマを用いて、共鳴トンネルダイオード201の側壁の表面側から140 nmの厚さまでアモルファス化を行い、共鳴トンネルダイオード201の直径が2 μm となるように実施した。

【0075】

O_2 プラズマ以外にも、 N_2 プラズマやArプラズマなどのドライプロセスを用いることもできる。

【0076】

また、アモルファス化でなく、抵抗膜となる膜を成膜することもできる。その場合は、共鳴トンネルダイオード201の直径は2 μm でメサ状に形成した後に、抵抗膜を成膜する。

【0077】

抵抗膜の構成成分と成膜方法としては、Al, Ti, Cなどの低抵抗材料にSi, O, N, F, P, Sなどを反応させて所望の抵抗率になるようにCVD法やスパッタ法、蒸着法などを用いて形成することができる。

【0078】

続いて、エッチングされた面に、リフトオフ法により接地導体209を形成する。

【0079】

なお、前述のアモルファス化処理の前に接地導体209を形成することもできる。また、共鳴トンネルダイオードおよび側壁のアモルファス層の保護のためのパッシベーションを成膜してもよい。さらに、スピコート法とドライエッチ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の導体208、ストリップ導体2031、MIM容量2032の上電極を形成する。

【0080】

最後に、リフトオフ法により、抵抗体213となる部分にBiパターンを形成し、接地導体とMIMの上電極を接続して本実施例の発振器200は完成する。

【0081】

発振器200への電力の供給は、発振器200の中央部に配したストリップ導体2031を介して適宜、電源205、配線206から行えばよく、通常は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。

【実施例2】

【0082】

本実施例に係る発振器300について、図8を用いて説明する。

【0083】

図8(a)は発振器300の斜視図であり、図8(b)は、発振器300のA-A'断面図である。

【0084】

実施例2では、パッチアンテナ304内に抵抗素子314を配置した例を示す。抵抗素子314は、パッチアンテナ304内を定在する高周波電界の節の位置に負性抵抗素子301と並列に配置された並列抵抗として配置されている。

【0085】

抵抗素子314は、導体308と接地導体309の間を20 μm となるように接続している。抵抗素子314により、特許文献1に開示されている通り、配線構造に起因した寄生発振を抑制できる。

10

20

30

40

50

【0086】

また、実施例2は、実施例1に対して発振周波数 f_{osc} を変更した例でもある。発振器300は、発振周波数 $f_{osc} = 0.60\text{ THz}$ を発振させるための発振器であり、負性抵抗素子301として実施例1と同じ共鳴トンネルダイオード(RTD)を、共振器としてパッチアンテナ304を使用した。

【0087】

共鳴トンネルダイオード(RTD)の径は $3\mu\text{m}$ で形成し、その周囲にアモルファス層310を 200 nm の厚さで形成した。また、負性抵抗素子301のメサの高さを 200 nm とした。その他、実施例1と同じ構造については説明を省略する。

【0088】

パッチアンテナ304は一辺(L)が $150\mu\text{m}$ の正方形パッチであり、導体308は幅 $5\mu\text{m}$ ・長さ $38\mu\text{m}$ の1本のマイクロストリップライン3031を介して電源(不図示)と接続される。導体308と導体309の間には誘電体307として $3\mu\text{m}$ 厚のBCBを配置した。導体308と309の間には直径 $3\mu\text{m}$ の負性抵抗素子301であるRTDが接続され、負性抵抗素子301は、導体308の中心から共振方向に $60\mu\text{m}$ シフトした位置に配置される。パッチアンテナ304の単独の共振周波数は、約 0.8 THz であるが、負性抵抗素子301のリアクタンスを考慮すると、発振周波数 f_{osc} は約 0.60 THz となる。

【0089】

このような構成で、ドーピング層302a、302bとアモルファス層310a、310bによる合成抵抗は、発振周波数 $f_{osc} = 0.6\text{ THz}$ では 0.1 以下なのに対して、2次高調波(1.2 THz)で $3\sim 6$ と見積もられる。さらに、3次高調波(1.8 THz)では、 $20\sim 30$ と見積もられる。

【0090】

また、側壁にアモルファス層310cを有する場合の誘電正接(\tan)は、実施例1と同様に、アモルファス層310cが存在しない時の5倍程度と見積もっている。この構成により、発振周波数 $f_{osc} = 0.6\text{ THz}$ に対して、2次、3次高調波の損失が大きくなり不要な発振を抑制できる。

【0091】

実施例2の構成により、発振周波数 $f_{osc} = 0.6\text{ THz}$ に対して、2次、3次高調波と、配線構造に起因した低周波の寄生発振の両方を抑制でき、所望の発振周波数での安定した発振が可能になる。

【0092】

(変形例)

上記では、RTDとして、InP基板上に成長したInGaAs/InAlAs、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、これらの構造や材料系に限られることなく、他の構造や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することができる。

【0093】

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良い。また材料系としては、GaAs基板上に形成したGaAs/AlGaAs/、GaAs/AlAs、または、InGaAs/GaAs/AlAsであっても良い。また、InP基板上に形成したInGaAs/AlGaAsSbであってもよい。また、InAs基板上に形成したInAs/AlAsSb、InAs/AlSbであってもよい。また、Si基板上に形成したSiGe/SiGeであっても良い。

【0094】

更に、それらの少なくとも一部の組み合わせであっても良い。これら構造と材料は、所望の周波数などに応じて適宜選定すれば良い。

【0095】

10

20

30

40

50

本明細書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良い。

【 0 0 9 6 】

また、基板や誘電体の材料は用途に応じて選定すればよく、シリコン、ガリウムヒ素、インジウムヒ素、ガリウムリンなどの半導体や、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レートなどの樹脂を用いても良い。

【 0 0 9 7 】

さらに、上記で説明した実施形態および実施例は相互に置換・組み合わせ等が可能である。

【 符号の説明 】

10

【 0 0 9 8 】

- 1 0 0 発振器
- 1 0 1 負性抵抗素子
- 1 0 2 低抵抗半導体層
- 1 0 3 活性層
- 1 0 4 パッチアンテナ
- 1 0 5 電源
- 1 0 6 配線
- 1 0 7 誘電体
- 1 0 8、1 0 9 導体
- 1 1 0 アモルファス層
- 1 1 2 抵抗
- 1 0 3 1 ストリップ導体
- 1 0 3 2 容量

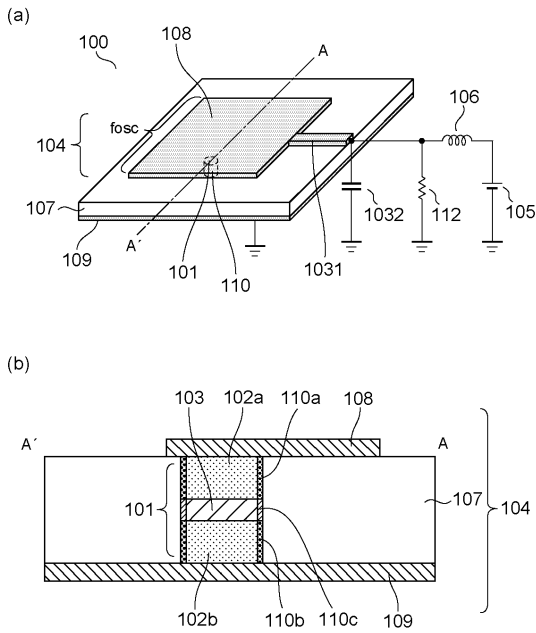
20

30

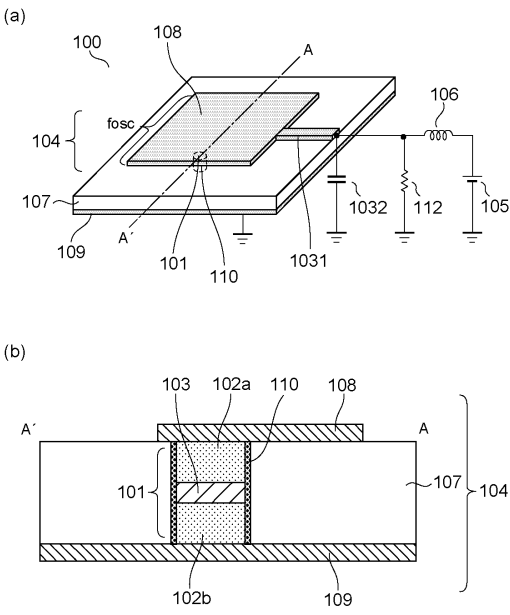
40

50

【図面】
【図 1】



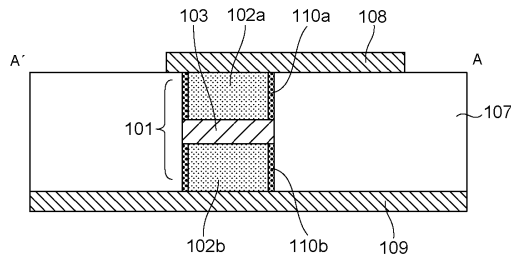
【図 2】



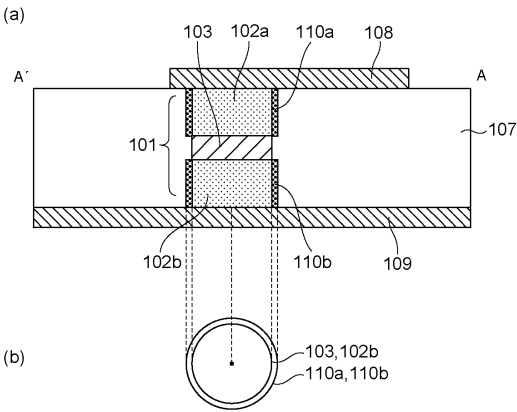
10

20

【図 3】



【図 4】

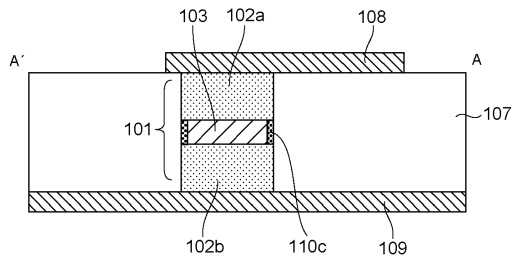


30

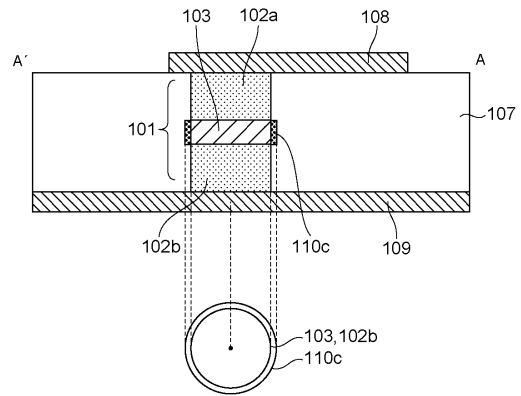
40

50

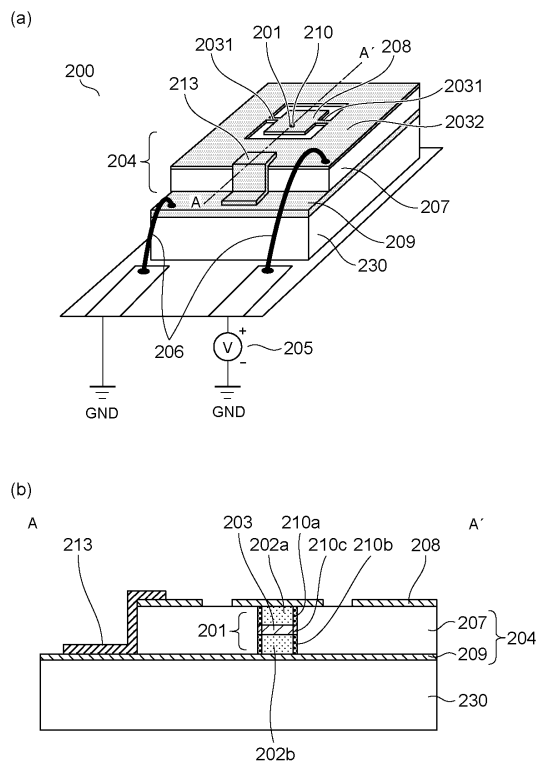
【 図 5 】



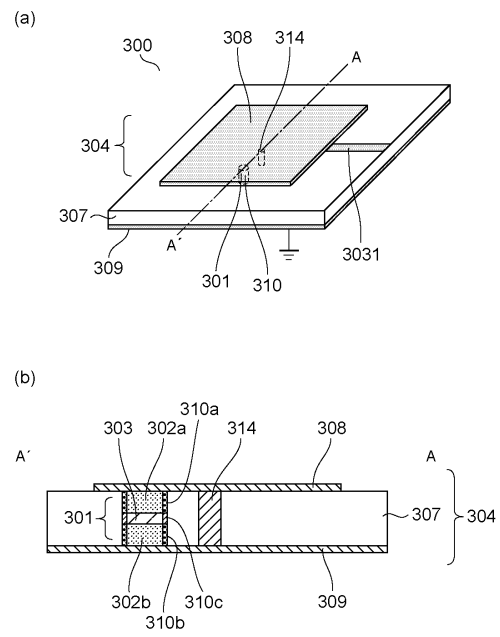
【 図 6 】



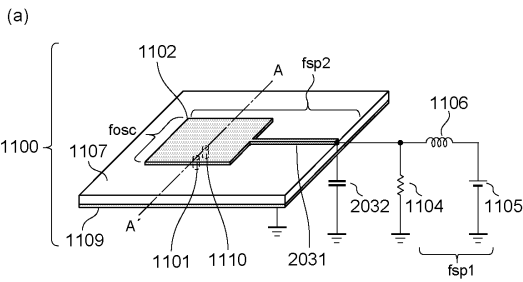
【 圖 7 】



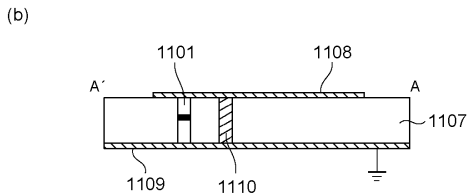
【 図 8 】



【図 9】



10



20

30

40

50

フロントページの続き

キヤノン株式会社内

(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 東 昌秋

(56)参考文献 特開2020-57739(JP,A)

特開2010-233031(JP,A)

国際公開第2008/011442(WO,A2)

特開2011-135006(JP,A)

特開2009-152547(JP,A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

H03B 7/00-7/14