

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6373010号
(P6373010)

(45) 発行日 平成30年8月15日(2018.8.15)

(24) 登録日 平成30年7月27日(2018.7.27)

(51) Int.Cl.

F 1

H03B 7/08 (2006.01)
H01P 7/08 (2006.01)H03B 7/08
H01P 7/08

請求項の数 21 (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2014-18094 (P2014-18094)
 (22) 出願日 平成26年1月31日 (2014.1.31)
 (65) 公開番号 特開2014-200065 (P2014-200065A)
 (43) 公開日 平成26年10月23日 (2014.10.23)
 審査請求日 平成29年1月31日 (2017.1.31)
 (31) 優先権主張番号 特願2013-49012 (P2013-49012)
 (32) 優先日 平成25年3月12日 (2013.3.12)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(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 100086483
 弁理士 加藤 一男
 (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
 ャノン株式会社内
 (72) 発明者 関口 亮太
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ャノン株式会社内

審査官 吉田 美彦

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】発振素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板と、

前記基板上に配置されている複数の共振構造と、

前記複数の共振構造のうち、隣り合う2つの共振構造の間を接続する金属部と、を有し

、前記複数の共振構造のそれぞれは、

前記基板側から、第二の導体と、前記第二の導体に電気的に接して設けられた負性抵抗素子と、前記負性抵抗素子と電気的に接して設けられた第一の導体と、をこの順に備え、

前記金属部は、前記2つの共振構造のそれぞれの前記第一の導体と容量結合しており、

前記2つの共振構造は、発振される電磁波の波長以下又は前記波長の整数倍の距離を隔てて配置されていることを特徴とする発振素子。

【請求項 2】

前記第二の導体は接地されていることを特徴とする請求項1に記載の発振素子。

【請求項 3】

前記基板の基板面に垂直な方向において、前記金属部と前記第一の導体との間に絶縁体を有することを特徴とする請求項1又は2に記載の発振素子。

【請求項 4】

前記第一の導体は、パッチアンテナであることを特徴とする請求項1から3のいずれか一項に記載の発振素子。

10

20

【請求項 5】

前記複数の共振構造のそれぞれは、半波長共振器であることを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載の発振素子。

【請求項 6】

前記第一の導体及び前記第二の導体のそれぞれは、金属を含むことを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の発振素子。

【請求項 7】

基板と、

前記基板上に配置されている複数の共振構造と、

前記複数の共振構造のうち、隣り合う 2 つの共振構造の間を接続する金属部と、を有し 10

、前記複数の共振構造のそれぞれは、

負性抵抗素子と、

前記負性抵抗素子に電気的に接して設けられた第一の導体と、を備え、

前記金属部は、前記第一の導体と誘導結合しており、

前記 2 つの共振構造は、発振される電磁波の波長以下又は前記波長の整数倍の距離を隔てて配置されていることを特徴とする発振素子。

【請求項 8】

前記複数の共振構造のそれぞれは、四分の一波長共振器であることを特徴とする請求項 7 に記載の発振素子。 20

【請求項 9】

前記第一の導体は、金属を含むことを特徴とする請求項 7 又は 8 に記載の発振素子。

【請求項 10】

前記 2 つの共振構造は、前記波長の半分以下の距離を隔てて配置されていることを特徴とする請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載の発振素子。

【請求項 11】

前記複数の共振構造のそれぞれは、アンテナを含むことを特徴とする請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の発振素子。

【請求項 12】

前記複数の共振構造のそれぞれは、プラズモン導波路を含むことを特徴とする請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の発振素子。 30

【請求項 13】

前記複数の共振構造は、前記波長以下又は前記波長の整数倍のピッチで配置されていることを特徴とする請求項 1 から 12 のいずれか一項に記載の発振素子。

【請求項 14】

前記複数の共振構造は、前記波長の半分以下のピッチで配置されていることを特徴とする請求項 1 から 13 に記載の発振素子。

【請求項 15】

基板上に配置されている第一の素子及び第二の素子と、

前記第一の素子と前記第二の素子とを接続する金属部と、を有し、 40

前記第一の素子及び前記第二の素子のそれぞれは、前記基板側から、

第二の導体と、

前記第二の導体と電気的に接して設けられた負性抵抗素子と、

前記負性抵抗素子と電気的に接して設けられた第一の導体と、をこの順に備え、

前記金属部は、前記第一の素子の前記第一の導体及び前記第二の素子の前記第一の導体と容量結合しており、

前記第一の素子と前記第二の素子とは、発振される電磁波の波長以下、又は前記波長の整数倍の距離を隔てて配置されていることを特徴とする発振素子。

【請求項 16】

基板上に配置されている第一の素子及び第二の素子と、 50

前記第一の素子と前記第二の素子とを接続する金属部と、を有し、

前記第一の素子及び前記第二の素子のそれぞれは、

第一の導体と、

前記第一の導体と電気的に接している負性抵抗素子と、を備え、

前記金属部は、前記第一の素子の前記第一の導体及び前記第二の素子の前記第一の導体と誘導結合しており、

前記第一の素子と前記第二の素子とは、発振される電磁波の波長以下、又は前記波長の整数倍の距離を隔てて配置されていることを特徴とする発振素子。

【請求項 17】

前記第一の素子と前記第二の素子とは、前記波長の半分以下の距離を隔てて配置されていることを特徴とする請求項15又は16に記載の発振素子。 10

【請求項 18】

第三の素子を更に有し、

前記第一の素子、前記第二の素子及び前記第三の素子は、前記波長以下又は前記波長の整数倍のピッチで配置されていることを特徴とする請求項15から17のいずれか一項に記載の発振素子。

【請求項 19】

前記金属部は、電気長 又は 2 の長さの伝送線であること特徴とする請求項 1 から1 8 のいずれか一項に記載の発振素子。 20

【請求項 20】

前記負性抵抗素子は、共鳴トンネルダイオードであることを特徴とする請求項 1 から1 9 のいずれか一項に記載の発振素子。

【請求項 21】

前記電磁波は、30 GHz 以上 30 THz 以下の周波数領域の一部を含むことを特徴とする請求項 1 から2 0 のいずれか一項に記載の発振素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、アレイ型の発振素子に関する。特には、例えば、ミリ波帯からテラヘルツ帯まで (30 GHz ~ 30 THz) の周波数帯域のうちの少なくとも一部の周波数の成分を含む電磁波 (以下、テラヘルツ波とも記す) を出力するアレイ型の発振器、発振素子に関する。 30

【背景技術】

【0002】

共振器と負性抵抗素子を有する構造は、電磁波の発振素子として有用である。例えば、共鳴トンネルダイオード等の負性抵抗素子とアンテナ等を用いて、テラヘルツ波を発生させる発振素子や発振器が知られている。こうした発振素子の発振出力は、発振する電磁波の周波数の高周波化にともない、低下する傾向がみられ、例えば、100 GHz 前後では m W 級の程度の出力が得られるが、1 THz 前後では μ W 級まで出力が低下してしまう。発振出力が低下する原因の一つとして、発振周波数の高周波化に伴う負性抵抗素子の接合面積の微細化に起因するものがある。 40

【0003】

一般に、負性抵抗素子では、接合容量 C_j と、負性抵抗素子から共振器までの抵抗に相当する直列抵抗 R_s とによって R_C ローパスフィルタの機能を形成することが知られている。つまり、 R_C ローパスフィルタの機能により信号の高周波成分が遮断され、カットオフ周波数 f_c ($= (2 \times R_s C_j)^{-1}$) よりも高い周波数帯の電磁波については、発振できない構造である。そのため、発振素子により発振する周波数帯域の上限となるカットオフ周波数を、発振する電磁波の周波数帯域よりも高くする必要がある。ここで、接合容量 C_j は負性抵抗素子の接合面積に比例するため、カットオフ周波数 f_c を高める方法の一つとして接合面積を小さくする方法がある。一方で、負性抵抗素子に供給できるバイア 50

ス電源の電力も、負性抵抗素子の接合面積に比例する。ゆえに、発振周波数の高周波化にともなって、負性抵抗素子に供給できる電力も減少してしまい、発振出力が低下してしまっていた。

【0004】

電磁波応用のための十分な出力を得るために、アレイ化は有効な一手法として知られている。特許文献1は、複数の負性抵抗素子と空洞共振器の組がアレイ化された発振素子の構成例を開示している。図14に示す様に、基板2上には複数の空洞共振器3が設けられており、各空洞共振器3には、それぞれ、負性抵抗素子4が設けられている。バイアス電源からの電力供給はバイアス線路5を用いており、複数の負性抵抗素子4と電気的に接続されている。こうした発振素子では、或る負性抵抗素子が発振すると隣の負性抵抗素子に同期がかかり、同位相で発振する現象を利用して、個々の素子1から出力された電力を空間合成（電力合成）することが出来る。比較的、小型な構造でありながら、発振出力として大きな発振出力（電力）を得ることが可能となる。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2007-295350号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

20

しかしながら、特許文献1の発振素子では、隣り合う負性抵抗素子同士がバイアス線路で直接繋がっている。そのために、低周波領域で素子間アイソレーションが確保できにくく、寄生発振の抑制が容易ではない構成であった。ここでの寄生発振とは、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す。こうした寄生発振は所望の周波数における発振出力を低下させるため、典型的な負性抵抗素子を用いた発振器、発振素子において、構造に伴う寄生発振の抑制は避けることのできない課題となっている。本発明は、こうした課題について鑑みたものである。その目的は、隣り合う負性抵抗素子同士を同位相で発振させるために効果的であり、かつ所望の発振周波数より低周波側の周波数帯においてアイソレーションを与える素子間構造を備える発振素子を提供することである。

30

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の発振素子は、基板と、前記基板上に配置されている複数の共振構造と、前記複数の共振構造のうち、隣り合う2つの共振構造の間を接続する金属部と、を有し、前記複数の共振構造のそれぞれは、前記基板側から、第二の導体と、前記第二の導体に電気的に接して設けられた負性抵抗素子と、前記負性抵抗素子と電気的に接して設けられた第一の導体と、をこの順に備える。そして、前記金属部は、前記2つの共振構造のそれぞれの前記第一の導体と容量結合しており、前記2つの共振構造は、発振される電磁波の波長以下又は前記波長の整数倍の距離を隔てて配置されている。或いは、本発明の発振素子は、基板と、前記基板上に配置されている複数の共振構造と、前記複数の共振構造のうち、隣り合う2つの共振構造の間を接続する金属部と、を有し、前記複数の共振構造のそれぞれは、負性抵抗素子と、前記負性抵抗素子に電気的に接して設けられた第一の導体と、を備える。そして、前記金属部は、前記第一の導体と誘導結合しており、前記2つの共振構造は、発振される電磁波の波長以下又は前記波長の整数倍の距離を隔てて配置されている。

40

【0008】

また、本発明の発振素子は、基板上に配置されている第一の素子及び第二の素子と、前記第一の素子と前記第二の素子とを接続する金属部と、を有し、前記第一の素子及び前記第二の素子のそれぞれは、前記基板側から、第二の導体と、前記第二の導体と電気的に接して設けられた負性抵抗素子と、前記負性抵抗素子と電気的に接して設けられた第一の導体と、をこの順に備える。前記金属部は、前記第一の素子の前記第一の導体及び前記第二

50

の素子の前記第一の導体と容量結合しており、前記第一の素子と前記第二の素子とは、発振される電磁波の波長以下、又は前記波長の整数倍の距離を隔てて配置されている。或いは、本発明の発振素子は、基板上に配置されている第一の素子及び第二の素子と、前記第一の素子と前記第二の素子とを接続する金属部と、を有し、前記第一の素子及び前記第二の素子のそれぞれは、第一の導体と、前記第一の導体と電気的に接している負性抵抗素子と、を備える。前記金属部は、前記第一の素子の前記第一の導体及び前記第二の素子の前記第一の導体と誘導結合しており、前記第一の素子と前記第二の素子とは、発振される電磁波の波長以下、又は前記波長の整数倍の距離を隔てて配置されている。

【発明の効果】

【0009】

10

本発明では、テラヘルツ波等の電磁波の、負性抵抗素子を用いたアレイ型の発振器、発振素子において、電力合成による発振出力（電力）を得ると共に寄生発振を抑制することが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】第一の実施形態に発振素子の構造を示す模式図。

【図2】第一の実施形態の変形例に係るに発振素子の構造を示す模式図。

【図3】第一の実施形態の変形例に係るに発振素子の構造を示す模式図。

【図4】第二の実施形態に発振素子の構造を示す模式図。

【図5】第二の実施形態の変形例に係るに発振素子の構造を示す模式図。

20

【図6】実施例1に係る発振素子の構造を示す模式図、及び電磁界シミュレータによるアドミッタンス計算結果を示すグラフ。

【図7】素子ピッチ（d）とArray Factor (AF)の相関を説明する図。

【図8】本発明の実施例2を説明する図。

【図9】本発明の実施例2を説明する図。

【図10】本発明の発振素子の設計例を説明する図。

【図11】本発明の実施例2を説明する図。

【図12】本発明の実施例2を説明する図。

【図13】本発明の実施例2を説明する図。

【図14】従来例に係る発振素子の構造を示す模式図。

30

【発明を実施するための形態】

【0011】

本発明の発振素子は、例えば、電磁波を共振させるための共振構造を基板上に複数有し、共振構造は、負性抵抗素子と、負性抵抗素子に互いに反対側から電気的に接した第一及び第二の導体と、を備える。そして、電力合成による発振出力を得ると共に寄生発振を抑制することができる様に、第一の導体と容量結合或いは誘導結合する金属部を用いて、隣接した共振構造の間が接続されている。

【0012】

以下、本発明の原理を説明する。本発明の一実施形態では、素子間構造としては金属を選択する。アレイ型の負性抵抗発振器、発振素子では、通常、前記金属は、その長さが発振波長 λ_0 に相当する電気長 $2\lambda_0$ 程度の伝送路が選択される。これは、電磁波を発生させるための負性抵抗素子を同位相で発振させるためである。発振周波数を ω_0 とすると、 ω_0 未満の周波数帯において、前記金属部はキャパシティブ要素にもインダクティブ要素にもなり得る。さらに、共振構造、すなわち、分布定数型の共振器は、最低次の共振周波数より下の低周波領域においては、キャパシタかインダクタとして表現される。典型的な負性抵抗素子の配置に依り、パッチアンテナ、プラズモン導波路などの二導体が対向するタイプの共振器はキャパシティブ要素になり、導波管、空洞共振器などの一体の導体で形成されるタイプの共振器はインダクティブ要素になる。これらの関係から、素子間構造としての前記金属部を共振器に直接接続する際、 ω_0 未満の周波数帯において何らかの共振周波数が生じ、寄生発振を発生させてしまう恐れがあった。したがって、金属による素子間の直

40

50

接続は寄生発振防止のためには避けたほうが好ましい。アレイ型の負性抵抗発振器、発振素子において、素子間構造としての金属を活用する一つの方法は、容量結合あるいは誘導結合（あるいは磁界結合）を用いることである。これは、直接接続では難しい低周波領域における素子間アイソレーションを確保することが出来るからである。また、これらは、共振構造の低周波領域におけるリアクタンスに依って、次のように使い分けるのが好ましい。

【0013】

・（直流インピーダンス Z_0 が開放の二導体を含む半波長共振器の場合）
こうした共振器は、典型的な場合、低周波領域でキャパシタである。そこで、金属部と共振器とで共振周波数を作らないように、共振構造内の負性抵抗素子間の金属部は容量結合が好ましい。

・（直流インピーダンス Z_0 が短絡の一導体を含む四分の一波長共振器の場合）
こうした共振器は、典型的な場合、低周波領域でインダクタである。そこで、金属部と共振器とで共振周波数を作らないように、共振構造内の負性抵抗素子間の金属部は誘導結合が好ましい。

【0014】

本発明は、こうした電気回路的な検討に基づいて、テラヘルツ波（30 GHz 以上 30 THz 以下の周波数領域の一部を含む電磁波）等の電磁波を発振するアレイ型の負性抵抗発振器、発振素子を開示するものである。次のような実施形態及び実施例がある。

【0015】

（第一の実施形態）

第一の実施形態に係る発振素子について、図1を用いて説明する。図1は本実施形態の発振素子を示す模式図であり、上側の（a）が上面図、下側の（b）が断面図である。本実施形態は、簡単のために二素子のアレイ発振素子を例示するものである。通常、電力合成を目的としたアレイ型発振素子では、個別の発振素子の間隔を、発振電磁波の真空中の波長に換算した波長以下、又は波長の整数倍、より好ましくは半波長以下にする。本実施形態では、半波長以下となる様に配置している。

【0016】

第一の実施形態において、101、102は個別の発振素子である。アンテナの一部をなす第一の導体である金属層103、誘電体層108、アンテナの一部をなす第二の導体である接地金属層104で構成されたマイクロストリップ共振器の形状に依って個別の発振周波数が制御される。発振を維持するための電磁波利得は負性抵抗素子107が生成する。個別の発振素子101、102は同位相で同期して発振するため、発振周波数は Z_0 に限りなく近くなる様に設計されるべきである。そこで、半波長共振器を含む個別の発振素子の形状は、同様な形状が好ましい。負性抵抗素子107の形状や特性も同等なものを用いると好ましい。こうした個別の発振素子を互いに同位相で同期させて発振させるための素子間構造が、マイクロストリップライン105である。

【0017】

リンク構造となる金属部の伝送線であるマイクロストリップライン105は、端から端までの金属線105に沿った長さが、同期後の発振周波数 Z_0 の電気長で2 λ になるように選択すると好ましい。電気長で2 λ とは、周囲の構造における実効的な誘電率で換算される実効的な発振波長 λ と等しい長さである。2 λ を選択するのは同位相で同期させて発振させるためである。逆位相で同期させる場合は、あるいは3 λ でもよい。金属線105の長さについては、正確に2 λ ではなくても同期させることが可能である。金属線105で形成される素子間の結合の大きさにもよるが、典型的には2 λ \pm 10%程度は許容範囲である。なお、この許容範囲は、金属線105を使わないで結合させるときよりも大きい。このような電気長は、電磁界シミュレータ等で容易に確認することが出来る。

【0018】

発振素子101の発振出力は、一部、マイクロストリップライン105を通じて隣の発振素子102にほぼ同位相で入力されることになる。一方で、発振素子102の発振出力は

10

20

30

40

50

、一部、マイクロストリップライン 105 を通じて隣の発振素子 101 にほぼ同位相で入力されることになる。本実施形態のアレイ発振素子は、こうした相互注入同期現象を期すためにマイクロストリップライン 105 を導入している。

【0019】

本実施形態の金属線 105 は、共振構造の金属層 103 と容量結合していることが特徴である。これらは、金属 - 絶縁体 - 金属 (MIM) 領域 106 において、絶縁層 109 を介して容量を形成するのみで、DC 開放である。これにより、発振周波数 ω の帯域において、素子間結合の大きさは直接結合と変わらずに大きく確保することが出来る。さらに、

ω より下の低周波領域において、結合の大きさは小さくなるので素子間アイソレーションが確保できることになる。本実施形態の金属線 105 は、このような性質を有するため 10 好ましい。さらに言えば、 ω より下の低周波領域において端部開放のマイクロストリップライン 105 はキャパシティブ要素になる。それゆえ、素子 101 側の負性抵抗素子 107 から見て、金属線 105 はキャパシティブ要素であり、素子 102 側の共振構造の金属層 103 もキャパシタであるから、低周波領域において懸念している共振周波数自体、生成されることもない。したがって、低周波領域における寄生発振を抑制することが可能となる。

【0020】

本実施形態は、もちろん二素子のアレイ発振素子には限られない。例えば、図 2 のようなパッチアンテナ共振器を用いた 9 素子アレイ (201a, 201b, ..., 202a, 202b, ...; それぞれが個別の発振素子) を構成してもよい。パッチアンテナは、金属パッチ 203 と接地金属 204 の対向した二金属で構成されるため、第一の実施形態をそのまま適用することが出来る。すなわち、ストリップ 205 は、共振器の金属 203 とは容量結合している。また、それぞれのストリップ 205 の電気長は 2 付近である。したがって、全ての負性抵抗素子 207 を同相で同期することが可能となる。なお、ストリップ 205 の曲げによる損失が小さくなるよう、角にはマイクロストリップベンド 208 を配置している。以上が基板 200 上の複数素子アレイの例となるが、このように沢山の素子を並べると、合成された電力が大きくなるだけでなく、鋭い指向性 209 が得られるため好ましい。

【0021】

電力合成を目的としたアレイ型の発振素子は、個別の発振素子の間隔を、発振電磁波の真空中の波長に換算した波長以下、又は波長の整数倍、より好ましくは半波長以下にする。言い換えると、個別の発振素子を、発振電磁波の真空中の波長に換算した波長以下、又は波長の整数倍、より好ましくは半波長以下の距離を隔てて配置する。この時、各素子から発振されて遠方界で合成される電力のサイドローブレベルが下がり、指向性の鋭い発振出力を得られる。また、電力合成を目的としたアレイ型発振素子では、個別の発振素子のピッチが電磁波の波長以下又は波長の整数倍に設定されるのが良い。より好ましくは、素子のピッチを半波長以下にすれば、サイドローブレベルの抑制による指向性の鋭い合成電力が遠方界で得られる。本明細書で、発振素子の「間隔」とは、図 9 (a) の d_x などの様に、広がりのある素子の縁部間 (例えば、対向する縁部間) の距離である。また、発振素子の「ピッチ」とは、図 9 (a) の x などの様に、広がりのある素子の対応する部分間 (例えば中心部間) の距離である。

【0022】

図 7 に、本発明の実施形態の一例として、10 素子リニアアレイの素子間隔とプロードサイド側の鉛直上方における Array Factor (AF: アレイファクタ) の相関を示した。アレイファクタはアレイ配置のみで決まる指向性を表し、1 以上で自由空間中の観察方向において干渉波が強めあい、電力合成の効果があることを意味する。素子間隔 (d/λ) は、アレイ素子の間隔を真空中の波長で規格化した値である。図 7 の解析結果から、素子間隔を電磁波の波長以下又は波長の整数倍、好ましくは、素子の間隔を半波長以下に設定すれば、遠方界における電力合成の効果があることが分かる。特に、パッチアンテナなどのマイクロストリップアンテナにおいては、アンテナを真空中の波長以下のピッチで配置すると

10

20

30

40

50

サイドローブレベルが抑制される。好ましくは、素子のピッチを半波長以下にすれば、サイドローブレベルの抑制によるより指向性の鋭い合成電力が遠方界で得られる。

【0023】

同様に、図3のようなプラズモン導波路共振器を用いた9素子アレイ(301a, 301b, ..., 302a, 302b, ...; それぞれが個別の発振素子)を用いてもよい。ここで用いるプラズモン導波路は、両端が発振波長₀の半波長共振器になっており、第一の導体である金属クラッド303と第二の導体である接地金属304の対向した二金属で構成される。すなわち、第一及び第二の導体は、プラズモン導波路の一部をなす。負性抵抗素子307は、これらの間に挟まれている格好となっている。第一の実施形態を適用し、素子301aと素子301bとの間には電気長2の金属ストリップ305を配置する。ベンド308を有する金属ストリップ305は共振器の金属303と容量結合している。本実施形態では、金属を用いないで素子間を結合させる方法も併用しており、素子301aと素子302aの間は、磁界結合を利用している。単体のプラズモン導波路発振素子は、単体のパッチアンテナ発振素子より出力が大きく設計出来る反面、指向性が劣る。単体の指向性は、基板300の面と平行な方向と、垂直な方向の二方向に分割されてしまうからである。しかしながら、このように基板300上の複数素子アレイとすると、基板300に平行な指向性は素子間で相殺され、垂直な指向性のみが残り、全体として単指向性とすることが出来る。さらにいえば、基板300上において、共振方向における素子301a, 301b...を真空中の発振波長の波長以下、又は波長の整数倍、より好ましくは半波長以下の距離を隔てて配置すると、効果的な指向性309が得られ、好ましい。したがって、このように配置された基板上のプラズモン導波路素子アレイは好ましい例となる。

10

【0024】

(第二の実施形態)

第二の実施形態に係る発振素子について、図4を用いて説明する。図4は本実施形態の発振素子を示す模式図であり、上側の(a)が上面図、下側の(b)が断面図に対応する。本実施形態はやはり簡単のための二素子のアレイ発振素子を例示するものである。本実施形態でも、個別の発振素子の間隔は真空中の波長に換算して波長以下、又は波長の整数倍、より好ましくは波長の半分以下に配置されている。

【0025】

30

第二の実施形態において、401、402は個別の発振素子である。一面が開放端の金属壁404(404a, 404b)で構成された空洞共振器の形状に依って個別の発振周波数が制御され、発振を維持するための電磁波利得は負性抵抗素子407が生成する。この共振器は、開放端で電圧が腹となる四分の一波長発振器404となる。こうした個別の発振素子を互いに同位相で同期させて発振させるための素子間構造が、同軸線405である。同軸線405の信号線は接地金属404bとは絶縁体408によって隔てられている。端から端までの金属線405に沿った長さが、同期後の発振周波数₀の電気長となるように選択すると好ましい。その場合、発振素子401の発振出力は、一部、同軸線405を通じて隣の発振素子402にほぼ逆位相で入力されることになる。一方で、発振素子402の発振出力は、一部、同軸線405を通じて隣の発振素子401にほぼ逆位相で入力されることになる。本実施形態のアレイ発振素子は、こうした相互注入同期現象を期すために同軸線405を導入している。この点は、バイアス供給線を兼用する上記特許文献1の構成とは異なる部分である。

40

【0026】

本実施形態の金属線405は、共振器404aと誘導結合していることが特徴である。これらは、ループ領域406において、空洞共振器404aのTMモードとの相互インダクタンスを形成しており、DC短絡である。発振周波数₀の帯域においては、素子間結合は大きく確保することが出来る。一方、₀より下の低周波領域においては、結合の大きさは小さくなるから素子間アイソレーションが確保できることになる。本実施形態の金属線405は、このような性質を有するため好ましい。さらに言えば、₀より下の低周波

50

領域において、端部短絡の同軸線 405 はインダクティブ要素になる。それゆえ、素子 401 側の負性抵抗素子 407 から見て、線 405 はインダクティブ要素であり、素子 402 側の共振器 404a もインダクタンスであるから、低周波領域において懸念している共振周波数自体、生成されることもない。したがって、低周波領域における寄生発振を抑制することが可能となる。なお、図 4 (b) において、金属壁 404 (404a, 404b) の下側は基板になっており、金属壁は、基板を掘り込んだ形態で基板と同材料或いは異種材料で形成されている。

【0027】

本実施形態も、もちろん二素子のアレイ発振素子には限られない。例えば、図 5 のような短絡型パッチアンテナ共振器を用いた 9 素子アレイ (501a, 501b, ..., 502a, 502b, ...; それぞれが個別の発振素子) を構成してもよい。短絡型パッチアンテナは、金属パッチ 503 と接地金属 504 の対向した二金属を金属スルーホール 508 にて短絡した一体の金属で構成されている。ちょうど、共振方向の $\pi/2$ 中央部を幅方向に渡って短絡すると、疑似的には $\pi/4$ 空洞共振器となり、第二の実施形態をそのまま適用することが出来る。すなわち、金属ストリップ 505 は、共振器の金属 503 とは誘導結合している。ただし、DC 短絡でもあるため、金属ストリップ 505 のそれぞれの電気長は 付近を選択する。これは、 $\pi/2$ より下の低周波領域における端部短絡の金属ストリップ 505 を確実にインダクティブ要素にするためである。金属ストリップ 505 の結合位置は、それぞれ共振器 503 において位相 だけシフトしているため、全ての負性抵抗素子 507 を同相で同期することが可能となる。本実施形態でも、金属を用いないで素子間を結合させる方法も併用しており、素子 501a と素子 502a の間は、磁界結合を利用している。以上が基板 500 上の複数素子アレイの例となる。もちろん、9 素子以上の何個の素子でもかまわない。ここでも、効果的な指向性 509 が得られる。

【0028】

さらに具体的な発振素子について、以下の実施例において説明する。

(実施例 1)

第一の実施形態に対応するより具体的な実施例 1 を説明する。本実施例に係る発振素子のうちの二素子アレイについて、図 6 を用いて説明する。発振素子を示す上面図の 6 (a) とともに、本実施例では、図 6 (b)、(c) に示す如く電気回路計算も行っており、上述のような定性的な議論を具体的にして示している。

【0029】

本実施例は、第一の実施形態をより実際的に構成した一例を示すものである。本実施例のパッチアンテナアレイは、およそ 0.5 THz を発振させるためのものである。設計の詳細は図 6 (a) の通りであって、パッチアンテナ 603 の共振方向の長さは $150 \mu m$ とした。本実施例では正方形パッチを用いた。負性抵抗素子 607 は共振方向の中央から $40 \mu m$ だけオフセットさせて配置し、金属パッチ 603 と接地導体 604 とに電気的に接触させた。パッチ 603 と接地導体 604 の間には、テラヘルツ帯で比較的低損失な誘電体 (ベンゾシクロブテン (BCB) を厚さ $3 \mu m$ で充填した。こうした個別の発振素子 601、602 において、金属パッチ 603 と容量接続する幅 $12 \mu m$ 、全長 $440 \mu m$ のマイクロストリップライン 605 は、2 回折り曲げた形状を経て隣接した素子間に配した。マイクロストリップライン 605 と金属パッチ 603 の間の容量は $6 fF$ に設計し、MIM 領域 606 の長さは $6 \mu m$ に設計した。

【0030】

負性抵抗素子 607 としては、InP 基板に格子整合する共鳴トンネルダイオードを選択する。共鳴トンネルダイオードには限られず、エサキダイオード、ガンダイオードでもよい。共鳴トンネルダイオード 607 は、例えば、InP 基板上の InGaAs / InAlAs、InGaAs / AlAs 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。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 (1.3 nm) / InGaAs (7.6 nm) / InAlAs (2.6 nm) / InGaAs (5.6 nm) / AlAs (1.3 nm) の半導体多層膜構造

10

20

30

40

50

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 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。ダイオード607が直径 $2 \mu\text{m}$ 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。パッチ603の下部に接続された直径 $2 \mu\text{m}$ の共鳴トンネルダイオードの接合容量に伴うリアクタンスを考慮すると、発振周波数は約0.55THzとなる。

【0031】

10

このような設計パラメータを考慮し、高周波全電磁界シミュレータHFSS v12(ansoft社製)を用いてシミュレーションを実施した結果が図6(b)、(c)である。 y_{11} は、素子601の負性抵抗素子607から見た全構造のアドミッタンスである。 y_{12} は、素子601の負性抵抗素子607と素子602の負性抵抗素子607との間の相互アドミッタンスである。 y_{rtd} は上述のダイオードのアドミッタンスを指す。結合定数に比例する $-y_{12}$ は、実部が大きく、虚部がゼロ、が理想的である。

【0032】

本実施形態の二素子アレイの発振周波数 $\omega_0 = 0.55 \text{ THz}$ において、図6(b)に示す様に、 $\text{Re}[y_{12}] = -0.08 \text{ S}$ である。これは、負性コンダクタンス-0.05Sと比較しても大きな値であり、容量結合でも発振周波数帯の素子間結合が確保できていることが示されている。また、同じく図6(b)に示す様に、 $\text{Im}[y_{12}]$ の値はほぼゼロとなっていることから、マイクロストリップライン605の電気的長さはほぼ2であることがわかる。 $-y_{12}$ の偏角がそのまま電気長に相当するものと考えてもよい。

20

【0033】

$\text{Im}[y_{11} + y_{12} + y_{rtd}]$ は、二素子アレイとしての共振周波数を示すもので、ゼロの部分が共振周波数を示している。参考までに、同様の構成において金属ストリップ605と金属パッチ603が直接繋がっている場合も併せて計算した。図6(c)中、C.C.は、本実施例の容量結合を示し、D.C.は参考例の直接結合を示すものである。共鳴トンネルダイオードが発振できるのは並列共振周波数である。本実施例の容量結合(C.C.)の場合、発振できるのは ω_0 一箇所であり、参考例の直接結合(D.C.)が発振できるのは ω_0 と ω_p 二箇所存在することが分かる。すなわち、本実施例は、 ω_0 未満の周波数帯において何ら共振周波数を生じさせることなく、所望の発振周波数だけを発振させられることが分かる。もちろん、発振周波数帯において、隣り合う二素子は同位相で同期させて発振させられるだけの十分な結合を有するため、好ましい設計となる。

30

【0034】

このような設計は3素子アレイ以上においても適用することが出来る。例えば、10素子程度までは、全素子に渡って同期できるだけの結合の大きさがある。素子数が多いと、その分、合成される電力も大きいため好ましい。

【0035】

40

本実施例の発振素子は、以下の方法で製造することができる。まず、InP基板上に、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、順次複数の層をエピタキシャル成長させる。すなわち、順に、n-InP/n-InGaAs層、InGaAs/InAlAs層をエピタキシャル成長させる。その後、InP基板としてn型の導電性基板を用いるため、n-InGaAs層をエピタキシャル成長させる。また、その際に、周知のエッティング、洗浄、不純物注入、露光等の各工程を行うことで、共鳴トンネルダイオード層、電気接点層を形成している。さらに、共鳴トンネルダイオード層607を円柱のメサ状となるようにエッティングを行う。さらに、共鳴トンネルダイオード層607については、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)によるドライエッティングを用いるが、フォトリソグラフィを用いてもよい。続いて、電気接点層の表面に、リ

50

フトオフ法により Ti / Pd / Au 層から成る接地導体 604 を形成する。共振器となる部分には、スピンコート法とドライエッティングを用いて、n-InP / n-InGaAs 層を露出させるように BCB を膜厚約 3 μm に形成する。ここで、リフトオフ法により Ti / Pd / Au 層から成る金属パッチ 604 を形成すると個別の素子が出来上がる。最後に、プラズマ CVD 法を用いて個別の素子 601、602 の表面全体をシリコン酸化膜で被覆し、アルミニウム層 605 をパターニングして本発振素子は完成する。

【0036】

本実施例の共鳴トンネルダイオードへのバイアス電力の供給は、例えば、個別の発振素子 601、602 へバイアス線を接続する等をして実施するとよい。例えば、バイアステ ₁₀ e を用いるなどの方法があり、バイアス線起因の寄生発振は防止することが可能である。本実施例のアレイ型の発振素子は、電力合成による発振出力（電力）を得ると同時に寄生発振を抑制する基本構成として好都合である。

【0037】

次に、バイアス線、バイアス回路も含む、さらに具体的な発振素子については、以下の実施例において説明する。

（実施例 2）

本実施例では、第一の実施形態 1 及び実施例 1 をより実際的な構成にした発振素子 700 について、図 8～図 13 を用いて説明する。図 8 及び図 9 (a) は実施例 2 の発振素子 700 の概観図であり、図 9 (b) は実施例 2 の変形例を示す。図 10 は、図 9 (a) 及び (b) に示した構成の発振素子について電気回路計算及び構造解析を用いて算出した設計例である。図 11～図 13 は、本実施例の変形例を説明する図である。なお、実施例 1 と同じ構成部材については詳細な説明を省略する。

【0038】

発振素子 700 は、個別の発振素子 701、702 の H 面結合 (H-Plane Coupled) 二素子アレイである。図 8 のように実施例 1 のアレイアンテナを給電回路と共に基板 718 に集積した構成の発振素子であり、およそ 0.4 THz を発振させる設計となっている。本実施例においても負性抵抗素子 707a、707b として実施例 1 に開示した共鳴トンネルダイオード (RTD) を用いており、RTD のメサ構造の直径 (D_{RTD}) は 3 μm とした。

【0039】

パッチアンテナ 703a、703b は、共振方向の長さが 200 μm の正方形パッチである。負性抵抗素子 707a、707b は、共振方向の中央から 80 μm だけオフセットさせて配置し、金属パッチ 703a、703b と接地導体 704 とで挟まれることで電気的に接触している。パッチ 703a、703b と接地導体 704 との間には、誘電体 (BCB) を厚さ 3 μm で充填した。

【0040】

金属パッチ 703a、703b は幅 5 μm、長さ 50 μm のストリップ導体 710a、710b を介して並列容量である MIM 容量 711a、711b と接続される。ストリップ導体 710a、710b は、金属パッチ 703a、703b の共振方向における中心に配置され、この位置は発振周波数 (0.4 THz) においてパッチアンテナ 703a、703b に定在するテラヘルツ波の電界の節とほぼ一致する。この時、ストリップ導体 710a、710b は 0.4 THz でパッチアンテナ 703a、703b 内を共振する電界と干渉することはない。

【0041】

抵抗体 712a、712b、及びこれと並列に接続された MIM 容量 711a、711b は低インピーダンス回路であり、負性抵抗素子 707a、707b と並列に配置される。これは、電源 715a、715b 及び配線 713a、713b 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。抵抗体 712a、712b の値は、負性抵抗素子 707a、707b 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。本実施例においては、抵抗体 71

10

20

30

40

50

2 a、712 bは、MIM容量711 a、711 bの上部の導体（上導体）と接地導体704との間を10で接続している。抵抗体712 a、712 bには半金属であるビスマスを使用し、抵抗として10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。なお、抵抗体712 a、712 b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つてもよい。

【0042】

MIM容量711 a、711 bも同様に、マイクロ波の周波数帯において、MIM容量711 a、711 bのインピーダンスが負性抵抗素子707 a、707 b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される。MIM容量711 a、711 bは大きいほうが好ましく、本実施例では発振素子と同一基板に集積されたMIM（Metal-insulator-Metal）構造により20 pF程度とした。MIM容量711 a、711 bは、ワイヤーボンディングを含む配線712 a、712 bに接続される。また接地導体704はGND線714に接続される。このような構成により、電源715 a、715 bから負性抵抗素子707 a、707 bに対して、バイアス電圧の供給及び調整がそれぞれ独立に行われる。

【0043】

図9(a)に示したように、個別の発振素子701、702は、金属パッチ703 a、703 bと幅(w)が $4\mu\text{m}$ のコの字状マイクロストリップライン705により容量接続される。コの字状マイクロストリップライン705の共振電界と垂直方向の距離xとMIM領域の長さinを用いると、コの字状マイクロストリップライン705の全長は、 $2 \times (in + 50\mu\text{m}) + x$ となる。また、金属パッチ703 a、703 bとストリップライン705の間のギャップの間隔は h_{SiN} であり、本実施例では、ギャップに $0.2\mu\text{m}$ の窒化シリコン(SiNx)を充填した。また、隣接する発振素子701と702の間の距離を d_x とする。この時、本実施例の発振素子は、隣接素子間の結合強さは主にin、w、 h_{SiN} で調整することが出来る。また、隣接素子間の位相整合の度合いは長さxで、隣接素子の電力合成の度合いは d_x でそれぞれ調整することが出来る。

【0044】

また、図9(b)には、本実施例の変形例として個別の発振素子801、802をE面結合(E-Plane Coupled)した二素子アレイについても示した。なお、本素子は、発振素子801、802が共通のMIM容量811を有しており、共通電源でバイアス供給及び調整が可能な構成となっている。このような構成は、配線数の削減やレイアウト設計の自由度向上に有利である。この場合、金属パッチ803 a、803 bは、パッチの共振電界の方向に配置された幅(w)が $4\mu\text{m}$ のマイクロストリップライン805により容量接続される。マイクロストリップライン805の共振電界と平行方向の距離yとMIM領域の長さinを用いると、マイクロストリップライン805の全長は、 $2 \times in + y$ となる。E面結合の発振素子は、隣接する発振素子801、802間の距離を d_y (=y)とすると、隣接素子間の結合強さはin、w、 h_{SiN} で、位相整合の度合いは長さyで、電力合成の度合いは d_y でそれぞれ調整することが出来る。810 aはストリップ導体である。

【0045】

図10は、電気回路計算及び構造解析を用いて算出した本実施例で開示したH面結合及びE面結合二素子アレイの設計例である。図10(a)は結合の強さの度合いを示す $\text{Re}[y_{12}]$ とMIM領域の長さinの相関を示しており、inが長くなるほどMIM領域の容量が増えるので、 $\text{Re}[y_{12}]$ が減少(絶対値は増加)する。図10(b)は、2素子がevenモードで位相整合するストリップラインの長さx又はyとMIM領域の長さinの相関を示している。ここで、 $\text{Im}[y_{12}]$ の値はほぼゼロとなる。言い換えると、-y₁₂の偏角が180°となるマイクロストリップラインの長さx又はyを選択すると、2素子がevenモードで位相整合する。この時、電気長で考えると、長さxはほぼ2、長さyはほぼに相当する。MIM領域の長さinを長くして結合を強くすることで、even

10

20

30

40

50

e n モードで位相整合するマイクロストリップラインの長さ x 又は y は短くなる。従って、隣接素子間の結合が強い、すなわち $Re[y_{1,2}]$ の絶対値が大きい構成は、素子間距離 d_x 及び d_y が減少するので、電力合成に有利な設計となることが分かる。

【0046】

また、実施例 2 の変形例として、図 11 に E 面結合の 4 素子リニアアレイ、図 12 に E 面・H 面結合による 2×2 アレイ、図 13 に E 面・H 面結合による 3×3 アレイの一例を示した。これらの構成では、素子間結合のリンク構造として折り込んだストリップライン 805、905、1005 を用いている。本構成は、ストリップラインの長さ x 及び y と、素子間距離 d_x 及び d_y を独立に制御出来るため、素子間の電気長の調整と電力合成の度合いをそれぞれ独立に設計可能な構成となっている。また、図 13 の E 面・H 面結合による 3×3 アレイは、二つの負性抵抗素子 1007a1、1007a2 を配置したプッシュ・プル型の発振素子 1001a～g をアレイ配置しており、高出力化に有利な構成である。これらの図において、910a～d は個別の発振素子、910a、1010a はストリップ導体、911a、1011 は MIM 容量である。

10

【産業上の利用可能性】

【0047】

本発明に係る発振素子は、製造管理、医療画像診断、安全管理等に用いることができる要素デバイスとして応用が期待される。

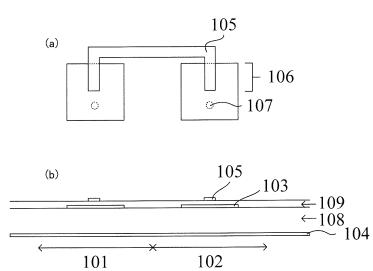
【符号の説明】

【0048】

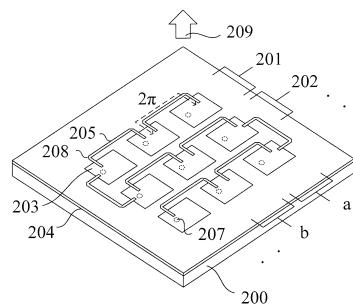
20

101、102、201、202、801a～801d、901a～901d、1001a～1001i・・・個別の発振素子、103、203・・・第一の導体、104、204・・・第二の導体、105、205、805a～805c、905a～905d、1005a～1005h・・・金属部（ストリップライン、リンク構造）、106、811、911a、1011・・・MIM 領域（MIM 容量）、107、207・・・負性抵抗素子、200・・・基板、406・・・誘導結合となる結合ループ領域、810a、810b、910a、1010a・・・ストリップ導体

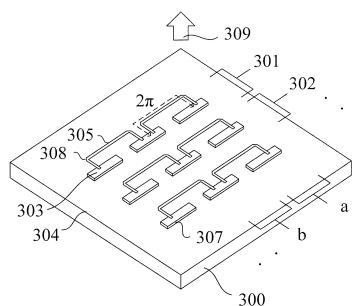
【図1】



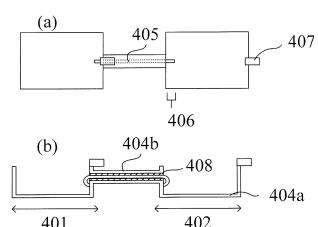
【図2】



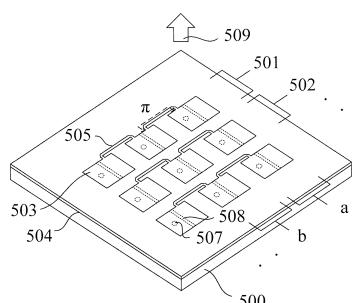
【図3】



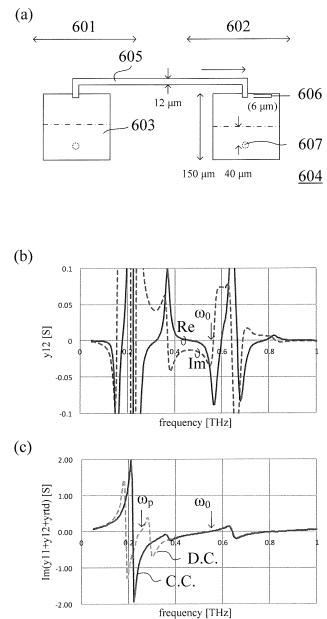
【図4】



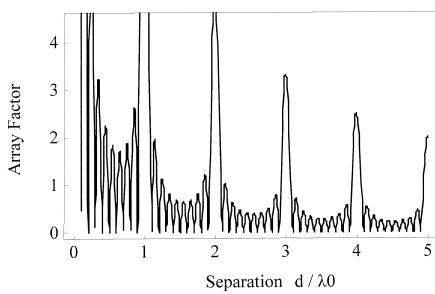
【図5】



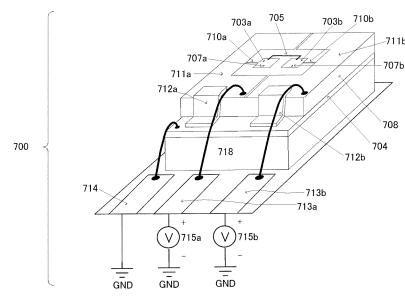
【図6】



【図7】

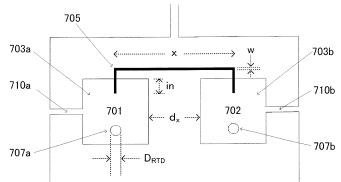


【図8】

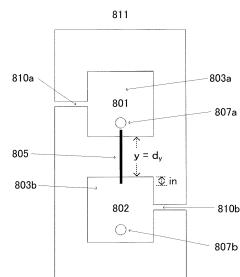


本発明の実施例2を説明する図

【図9】



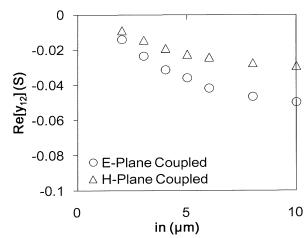
(a) 本発明の実施例2の構成を説明する図



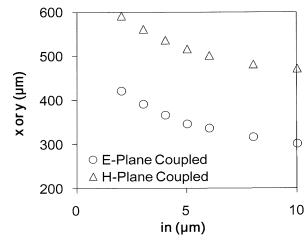
(b) 本発明の実施例2の変形例を説明する図

本発明の実施例2を説明する図

【図10】



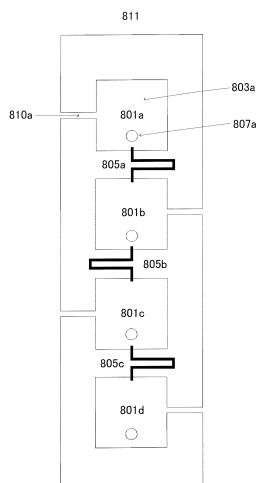
(a) Re[Y12]とMIM領域長(in)の相関



(b) ストリップライン長(x or y)とMIM領域長(in)の相関

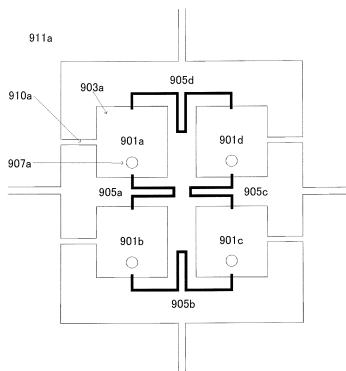
本発明の発振要素の設計例を説明する図
(w=4 μm, h_{SiN}=0.2 μm, D_{RTD}=3 μm)

【図11】



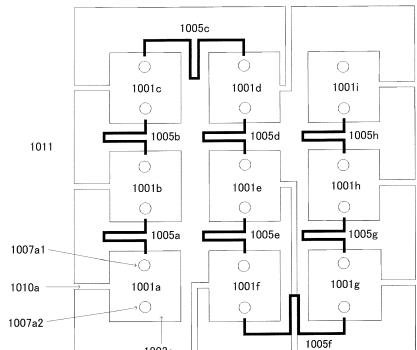
本発明の実施例2の変形例を説明する図

【図12】



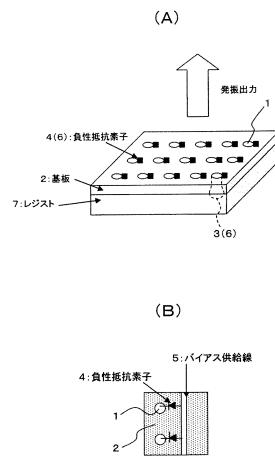
本発明の実施例2の変形例を説明する図

【図13】



本発明の実施例2の変形例を説明する図

【図14】



フロントページの続き

(56)参考文献 米国特許第06049308(US, A)
特開2008-010811(JP, A)
実開平06-073909(JP, U)
特開2011-061276(JP, A)
特開平01-147905(JP, A)
特開2008-306523(JP, A)
国際公開第2012/056600(WO, A1)
Safumi SUZUKI, Coherent Power Combination in Multi-Element Sub-THz RTD Oscillators Coupled with MIM Stub Structure, Indium Phosphide and Related Materials, 2008. IPRM 2008.
20th International Conference on, 2008年 5月25日, URL, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4703010>

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H03B 7/08
H01P 7/08