

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5590879号
(P5590879)

(45) 発行日 平成26年9月17日(2014.9.17)

(24) 登録日 平成26年8月8日(2014.8.8)

(51) Int.Cl.

F I

H O 1 S 5/026 (2006.01)

H O 1 S 5/026 6 1 0

H O 1 S 5/343 (2006.01)

H O 1 S 5/343

請求項の数 7 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2009-295444 (P2009-295444)
(22) 出願日 平成21年12月25日(2009.12.25)
(65) 公開番号 特開2011-135007 (P2011-135007A)
(43) 公開日 平成23年7月7日(2011.7.7)
審査請求日 平成24年12月19日(2012.12.19)

(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
(72) 発明者 関口 亮太
東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤ
ノン株式会社内

審査官 杉山 輝和

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 発生素子及び半導体素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

テラヘルツ波を発生させるための発生素子であって、
基板と、

前記基板の上部に設けられ、サブバンド間でのキャリアの遷移により前記テラヘルツ波を発生させる多重量子井戸層を含む活性層と、

前記活性層の上部に設けられる第1の電気接点層と、

前記基板の上部に設けられ、バンド間でのキャリアの遷移により光を発生させる発光層と、

前記基板の上部に設けられ、前記活性層の下部に設けられる第2の電気接点層と、を備え、

前記発光層が、該発光層で発生した光を、前記活性層又は前記第2の電気接点層に照射可能な位置に配置されていることを特徴とする発生素子。

【請求項2】

前記発光層が、前記活性層又は前記第2の電気接点層に含まれている層におけるバンドギャップエネルギーよりも大きいエネルギーの光を発生可能に構成されていることを特徴とする請求項1に記載の発生素子。

【請求項3】

前記発光層は、該発光層で発生した光を前記第2の電気接点層を介して前記活性層に照射可能な位置に配置されていることを特徴とする請求項2に記載の発生素子。

10

20

【請求項 4】

前記第 1 の電気接点層の上部に設けられ、該第 1 の電気接点層にキャリアを注入するための電極を備え、

前記第 1 の電気接点層に注入されたキャリアを前記第 2 の電気接点層から抽出されるように構成されることを特徴とする請求項 2 又は 3 に記載の発生素子。

【請求項 5】

前記基板の上部に設けられ、前記活性層から発生したテラヘルツ波を共振させる共振部を備え、

前記共振されたテラヘルツ波を放射するように構成されることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の発生素子。

10

【請求項 6】

前記発光層が、p 型半導体と n 型半導体との互いに接する界面で発光可能に構成されることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の発生素子。

【請求項 7】

基板と、

前記基板の上部に設けられ、サブバンド間でキャリアの遷移によりテラヘルツ波を発生させる多重量子井戸層と、

前記多重量子井戸層の上部に設けられる第 1 の電気接点層と、

前記基板の上部に設けられ、前記多重量子井戸層の下部に設けられる第 2 の電気接点層と、

20

前記基板の上部に設けられ、バンド間でのキャリアの遷移により光を発生させる発光層と、を備え、

前記発光層が、該発光層で発生した光を前記多重量子井戸層又は前記第 2 の電気接点層に照射可能な位置に配置され、且つ前記多重量子井戸層又は前記第 2 の電気接点層に含まれている層におけるバンドギャップエネルギーよりも大きいエネルギーの光を発生可能に構成されることを特徴とする半導体素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、テラヘルツ波を発振させるための発振素子に関する。

30

【背景技術】

【0002】

テラヘルツ波（本明細書では 30 GHz 以上 30 THz 以下の周波数の電磁波である。）を発振させる発振素子の活性層には、主に、量子カスケードレーザと、共鳴トンネルダイオード（Resonant tunneling Diode：RTD、以下 RTD と記す。）とが用いられる。これらは、半導体量子井戸構造における電子のサブバンド間遷移に基づく電磁波発振を実現させるものである。

【0003】

特に、2 重障壁型の RTD を活性層として用いた発振素子は、室温で 1 THz 近傍の周波数領域のテラヘルツ波を発振できるとして期待されている。ここで、2 重障壁型の RTD は、InP 基板上にエピタキシャル成長された InGaAs 量子井戸層と InAlAs トンネル障壁層とから構成されている。RTD は、電圧 電流（V - I）特性に現れる微分負性抵抗の範囲において、誘導放出により電磁波を発振する。

40

【0004】

ここで、上述した発振素子を通信技術やイメージング技術の分野で応用するためには、小型であるとともに、発振するテラヘルツ波の周波数を変調可能な構成にすることが求められる。

【0005】

上記微分負性抵抗において、駆動電圧を変化させることにより、発振するテラヘルツ波の周波数を変化させる発振素子が、非特許文献 1 に開示されている。このとき、中心周波

50

数が470GHzで、周波数の可変幅が18GHzである。ここで、上記駆動電圧は、もちろんRTDへの電流注入として機能しており、周波数を変化させるために電圧を変えると、発振するテラヘルツ波のパワーも変化してしまうなど、制御性の観点から改善が求められる。

【0006】

そこで、外部からRTDに照射する光の強度を変化させ、RTDの微分負性抵抗及び寄生要素を変化させることにより、発振するテラヘルツ波の周波数を変化させる発振素子が、特許文献1に開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

10

【0007】

【特許文献1】特開平8-125215号公報

【非特許文献】

【0008】

【非特許文献1】ELECTRONICS LETTERS Vol. 41 No. 15
872

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

ここで、特許文献1で開示された構成では、外部から光を照射するために、光入射用の窓構造を設ける必要がある。この窓構造は活性層の上部に設ける電極に穴をあけることで構成される。この窓構造により、電極と電極下部の層との接触面積が小さくなるため、上記寄生要素の1つである直列抵抗が増大する。このとき、RC時定数が大きくなり、カットオフ周波数の上限が低下するため、発振するテラヘルツ波の周波数帯域が狭くなってしまう。

20

【0010】

本発明の目的は、発振するテラヘルツ波の周波数を制御性良く、広帯域において変化可能な発振素子の提供である。

【課題を解決するための手段】

【0011】

30

本発明に係るテラヘルツ波を発生させるための発生素子は、テラヘルツ波を発生させるための発生素子であって、基板と、前記基板の上部に設けられ、サブバンド間でのキャリアの遷移により前記テラヘルツ波を発生させる多重量子井戸層を含む活性層と、前記活性層の上部に設けられる第1の電気接点層と、前記基板の上部に設けられ、バンド間でのキャリアの遷移により光を発生させる発光層と、前記基板の上部に設けられ、前記活性層の下部に設けられる第2の電気接点層と、を備え、前記発光層が、該発光層で発生した光を、前記活性層又は前記第2の電気接点層に照射可能な位置に配置されていることを特徴とする。

【発明の効果】

【0013】

40

上述のように、本発明に係る発振素子は、基板の上部に発光層を設ける。また、発光層はバンド間でのキャリアの遷移により光を発生させる。そして、発光層は、発光層で発生した光を、活性層に照射可能な位置に配置される。これにより、発振するテラヘルツ波の周波数を制御性良く、広帯域において変化可能な発振素子を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】本発明の実施例1を説明するための模式図である。

【図2】本発明の実施例1を説明するための模式図である。

【図3】本発明の実施例1に係る半導体素子のバンド構造を説明するためのグラフである。

【図４】本発明の実施例２を説明するための模式図である。

【図５】本発明の実施例１の変形例を説明するための模式図である。

【図６】本発明の実施例１の変形例を説明するための模式図である。

【図７】本発明の実施例２を説明するための模式図である。

【図８】本発明の実施例３を説明するための模式図である。

【図９】本発明の実施例４を説明するための模式図である。

【発明を実施するための形態】

【００１５】

本実施形態に係るテラヘルツ波を発振させるための発振素子について、図１を用いて説明する。

10

【００１６】

本実施形態に係る発振素子１００は、基板１２０の上部に設けられ、サブバンド間でのキャリアの遷移によりテラヘルツ波を発生させる活性層１０１を備える。ここで、活性層１０１は、発生するテラヘルツ波に対して利得を持つ媒質（利得媒質）であれば何でも良い。例えば、活性層１０１は、サブバンド間でキャリアを遷移するように構成された多重量子井戸層（Multi Quantum Well、以下、MQW層と呼ぶ。）であることが好ましく、後述するように共鳴トンネル構造が好適に用いられる。

【００１７】

次に、発振素子１００は、活性層１０１の上部に設けられる第１の電気接点層１０２を備える。また、基板１２０の上部に設けられ、活性層１０１の下部に設けられる第２の電気接点層１０３を備える。第１及び第２の電気接点層１０２、１０３は、不純物をドーピングした半導体が好適に用いられる。

20

【００１８】

また、発振素子１００は、基板１２０の上部に設けられ、バンド間でのキャリアの遷移により光を発生させる発光層１０４を備える。ここで、発光層１０４は、p型半導体１２５とn型半導体１２４との互いに接する界面（pn接合）で発光可能に構成されることが好ましい。

【００１９】

そして、上記発光層１０４が、発光層１０４で発生した光を、活性層１０１に照射可能な位置に配置される。これにより、発振するテラヘルツ波の周波数を制御性良く、広帯域において変化可能な発振素子を提供することができる。

30

【００２０】

ここで、上記発光層１０４は、以下のように構成することが好ましい。まず、発光層１０４は、第２の電気接点層１０３を構成する材料のバンドギャップエネルギー（あるいはバンド間のエネルギー）よりも大きいエネルギーの光を発生可能に構成される。すなわち、発光層１０４は、第２の電気接点層１０３を構成する材料のバンドギャップエネルギーを E_g 、発光層１０４を構成する材料のバンドギャップエネルギーを h とすると、 $h > E_g$ となるように構成されることが好ましい。そして、発光層１０４は、発光層１０４で発生した光を、第２の電気接点層１０３を介して活性層１０１に照射可能な位置に配置される。すなわち、第２の電気接点層１０３と活性層１０１との間の領域に、発光層１０４で発した光を結合させることが好ましい。これにより、発光層１０４で発した光を第２の電気接点層１０３に比較的吸収されることなく、活性層１０１に照射することができる。また、発光層１０４は、活性層１０１の下部に設けることが好ましい。これにより、発光層１０４で発した光を活性層１０１に照射する際、活性層１０１に対して比較的均一に照射することができる。以上の構成の詳細については、図１（a）や図５（a）などにより後述する。

40

【００２１】

また、上記発光層１０４は、図６（c）で後述するように、基板１２０の上部に設けられ、活性層１０１と並列に配置されても良い。

【００２２】

50

なお、第1の電気接点層102に注入されたキャリアを、第2の電気接点層103から抽出されるように構成されることが好ましい。すなわち、コレクタ側である第2の電気接点層103に、発光層104で発生した光を照射する構成が好ましい。

【0023】

ここで、発振素子101は、基板120の上部に設けられ、活性層101から発生したテラヘルツ波を共振させる共振部212を備えることが好ましい。なお、共振部212は、パッチアンテナであるが、スロットアンテナで構成しても良い。この場合、共振部212は、共振されたテラヘルツ波を放射するように構成されており、アンテナの機能も有する。

【0024】

(その他の実施形態)

上記実施形態の発振素子は、半導体素子100を論理回路に適用することも可能である。例えば、本実施形態に係る半導体素子100を、ヘテロバイポーラトランジスタのベースに接続することで、デジタル論理回路として適用することができる。この場合はもちろん、上記実施形態のようにテラヘルツ波などの電磁波を発振させる必要はない。

【0025】

まず、半導体素子100は、基板120上に配置されたMQW層101、第1電気接点層102、第2電気接点層103、発光層104とから構成される。MQW層101は、サブバンド間遷移が生じる多重量子井戸構造であり、共鳴トンネル構造が好適に用いられる。このとき、半導体素子100は共鳴トンネルダイオード素子として動作する。また、第1電気接点層102、MQW層101、第2電気接点層103は、この順に積層される。

【0026】

また、少なくとも第2電気接点層103は、バンドギャップエネルギーが E_g の材料で構成されている。発光層104は、化合物半導体のpn接合を含み、バンド間遷移に伴ってエネルギー h の光を発生する。

【0027】

ここで、光のエネルギー h は、前述のバンドギャップエネルギー E_g 以上の大きさであることが、本実施形態に係る半導体素子の特徴の1つである。また、発光層104で発生した光の一部が、電気接点層102、103、及びMQW層101の一部に結合・吸収されるような位置に発光層104は配置されている。

【0028】

この結果、光吸収により生成した電子・正孔対の影響で電界分布が変化し、付近のバンド構造が変化する。故に、MQW層101におけるサブバンド構造が変化することになる。この量子閉じ込めシュタルク(QCSE)効果は、MQW層101におけるサブバンド間遷移の特性を変化させ、半導体素子(例えば共鳴トンネルダイオード素子)のキャリアの振動周波数を変化させる。すなわち、半導体素子は、発光層104で発生する光の強度を変化させることで、素子のキャリアの振動周波数を調整することが可能な構成となっている。

【実施例】

【0029】

(実施例1：共鳴トンネルダイオード)

実施例1の構成について、図1を用いて説明する。本実施例では、サブバンド間遷移が生じるMQW層101として共鳴トンネル構造を用いた。すなわち、第1電気接点層102、MQW層101、第2電気接点層103を含む半導体積層構造により、共鳴トンネルダイオードRTD130(Resonant Tunneling Diode)が構成されている。ここで、第1電気接点層102はMQW層101に電子(本実施例におけるキャリア)を注入する為の層であり、第2電気接点層103はMQW層101から電子を抽出する為の層である。また、第1電気接点層102及び第2電気接点層103は、バンドギャップが E_g の材料で構成される。

【0030】

MQW層101は、トンネル障壁層と量子井戸層とが交互に積層された半導体ヘテロ構造からなる3重障壁型の共鳴トンネル構造である。MQW層101は、第1トンネル障壁層111と、第1量子井戸層114と、第2トンネル障壁層112と、第2量子井戸層115と、第3トンネル障壁層113がこの順に積層された共鳴トンネル構造層105を含み構成される。本実施例では、以下のような膜構成の3重障壁量子井戸構造層105を用いている。

第一障壁層	AlAs	1.3nm
第一量子井戸層	InGaAs	7.6nm
第二障壁層	InAlAs	2.6nm
第二量子井戸層	InGaAs	5.6nm
第三障壁層	AlAs	1.3nm

10

ここで、第一量子井戸層114、第二障壁層112、第二量子井戸層115は面方位(100)のInPに格子整合したInGaAs/InAlAsである。また、第一障壁層111、第三障壁層113は、InPに格子整合していないAlAsで、臨界薄膜よりは薄く、エネルギーの高い障壁となっている。

【0031】

また、MQW101は、ノンドープInGaAsからなる第1スペーサ層118及び第2スペーサ層119を含み構成され、第1スペーサ層118、共鳴トンネル構造層105、第2スペーサ層119の順に積層されている。

20

第1電気接点層102及び第2電気接点層103は、 $n + \text{InGaAs}$ から構成される。第1電気接点層102には第1コンタクト層116及び第1オーミック電極121が接続され、第2電気接点層103には第2コンタクト層117及び第2オーミック電極122が接続されている。ここで、第1コンタクト層116及び第2コンタクト層117は、 $n + \text{InGaAs}$ から構成され、第1オーミック電極、第2オーミック電極はTi/Pd/Auから構成される。半導体素子100は、第1オーミック電極121と第2オーミック電極122を介して電源123に接続され、駆動用のバイアス電圧が供給される。これらの構成により、半導体素子100はサブバンド間遷移である共鳴トンネル効果により図2(b)に示すような微分負性抵抗が電流-電圧特性に現れる。

【0032】

30

発光層104は、バンド間遷移に伴いエネルギー $h\nu$ の光Aを発生する層であり、本実施例では、直接遷移型の化合物半導体のpn接合を用いている。発光層104は、 n 型半導体層124、 p 型半導体層125、 p コンタクト層126より構成され、この順に積層されている。 n 型半導体層124は、第2コンタクト層117を介して、第2オーミック電極122に接続されている。また、 p コンタクト層126は、 p 型オーミック電極127に接続されている。

n 型半導体層124は、 pn 接合に電子を注入する層であり、本実施例では、ドーピングされた $n - \text{InGaAs}$ (厚さ500nm、ドーパント: Si、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)を用いた。また、 p 型半導体層125は pn 接合に正孔(ホール)を注入する層であり、本実施例では、ドーピングされた $p - \text{InGaAs}$ (厚さ500nm、ドーパント: Zn、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)を用いた。本実施例で用いた発光層104では、InGaAsのバンド間遷移に伴い波長1.65 μm の光Aが発生される。 p 型半導体層125は、高濃度にドーピングされたInGaAs(厚さ500nm、ドーパント: Zn、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)からなる p コンタクト層126を介して、 p 型オーミック電極127に接続される。 p 型オーミック電極127はTi/Pd/Auからなる。第2オーミック電極122と p 型オーミック電極127は電源128に接続されており、発光層104にバイアス電圧を印加して、発生する光の強度を調整可能な構成となっている。電源123と電源128は調整部129に接続され、調整部129により、半導体素子100の動作条件を好適に調整可能な構成となっている。

40

【0033】

50

ここで、発光層 104 は、発生した光が電気接点層 102、103、及び MQW 層 101 に結合・吸収されて、サブバンド遷移特性を調整出来るように、電気接点層 102、103、及び MQW 層 101 近傍に配置されていることが望ましい。より効果的にこれを生じさせるために、第 2 電気接点層 103、及び前記第 2 接点層 103 と前記 MQW 層 101 との間の領域において光 A が吸収されるような位置に配置されることが望ましい。つまり、基板の板厚方向に対して第 1 電気接点層 102、MQW 層 101、第 2 電気接点層 103、発光層 104 の順に配置されることが望ましい。

【0034】

次に、本実施例 1 に係る半導体素子の動作について説明する。

【0035】

本実施例において MQW 層 101 として用いた共鳴トンネルダイオード (RTD) は、特許文献 1 や、Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 6, 2008, pp. 4375 - 4384 などに開示されているように、図 2 (a) に示した等価回路で記述される。ここで、図 2 (b) において、Rcont、Ccont はオーミック電極とコンタクト層の接触抵抗成分、接触容量成分であり、Rpost は RTD に直列に接続されるメサ構造に起因する抵抗成分を表している。また、Ract は RTD の微分負性抵抗 (< 0) である。また、Cact は RTD の容量成分であり、Lact は RTD のインダクタンス成分であり、トンネリング時間及び空乏層の走行時間を考慮した RTD における電子の遅延時間を示している。この RTD 内部の直列抵抗や静電容量から見積もられる RC 時定数により、RTD から外部に取り出すことの出来る電子の振動周波数の上限が決定される。ここで、半導体素子 100 は、従来の光入射用の窓構造を無くした構成をとっている。このため、周波数の上限を決める大きな要因の 1 つである Rcont を十分に小さくすることが出来るため、テラヘルツ帯の動作を得ることが可能な構成となっている。

【0036】

発光層 104 で発生した光は、電気接点層 102、103、及び MQW 101 に結合・吸収されて電子・正孔対が生成される。この際、第 2 電気接点層 103 が MQW 101 から電子を抽出するようにバイアスされていると第 2 電気接点層 103 と MQW 101 との間に空乏領域が生じるが、この領域において電子・正孔対が生成されやすい。電子・正孔対の影響により、共鳴トンネル構造 105 の電界分布が変化する。結果、RTD の容量成分 Cact が変化する。また、共鳴トンネル構造層 105 の電界分布変化に伴う QCSE 効果によって、MQW 101 におけるサブバンド構造が変化するので微分負性抵抗 Ract も変化する。

【0037】

図 3 には、本実施例で用いた膜構成において、発光層 104 で発生した光の吸収に伴う共鳴トンネル構造 105 内のバンド構造変化のシミュレーション結果の一例を示した。横軸は膜厚方向の距離であり、縦軸はエネルギーである。ここで、Voff とは、電源 123 及び電源 128 より第 1 オーミック電極 121、第 2 オーミック電極 122、p 型オーミック電極 127 に 0 V、0.7 V、0.7 V の駆動バイアス電圧を印加した状態である。また、Von とは、電源 123 及び電源 129 より第 1 オーミック電極 121、第 2 オーミック電極 122、p 型オーミック電極 127 に 0 V、0.7 V、1.4 V の駆動バイアス電圧を印加した状態である。Von の状態において、光吸収に伴う電子・正孔対密度増加分は $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ を仮定した。発光層 104 へのバイアス電圧の ON/OFF で、MQW 層 101 のサブバンド構造が変化する。その結果、図 2 (b) に示したように、半導体素子 100 の電流・電圧特性は、発光層 104 へのバイアス電圧の ON/OFF により変化することになる。ここで、Von は、発光層 104 が発光するように電源 128 からのバイアス電圧を ON した状態であり、Voff は、発光層 104 が発光しないように電源 128 からのバイアス電圧を OFF した状態である。図 2 (b) のように、Von の時は、Voff の時に比べて、微分負性抵抗の領域が全体的により低電圧側にシフトし、ピーク点 A は点 A' に、バレイは点 B は点 B' にシフトし、微分負性抵抗 Ract は

10

20

30

40

50

減少する。また、調整部 129 を介して、電源 128 からのバイアス電圧により光 A の強度を調整すれば、V on と V off の間の所望の条件に調整することが可能である。

【0038】

このように、本実施例に係る半導体素子は、同一基板上に配置した発光層からの光の強度を調整して、多重量子井戸構造のサブバンド間遷移の特性、キャリアの振動周波数をテラヘルツ帯において調整することが可能である。以上本実施例により、テラヘルツ帯で動作可能で、周波数可変及び周波数変調が制御性良く実現可能で、高速応答性に優れ、小型で、且つ、室温動作可能な、電流注入型の半導体素子が実現される。

【0039】

なお、本実施例で説明した発光層のその他の例として、以下のような構成も考えられる。図 5 に開示した半導体素子 150 は、第 2 電気接点層 103 と発光層 104 の間にバリア層 151 を挿入して、生成した電子・正孔対が発光層側に流入することを防止した構成をとっている。ここで、バリア層 151 は 50 nm 厚のノンドープの InAlAs であり、バンド構造は図 5 (b) に示したようになる。この場合、n 型半導体層 124 は、n 型コンタクト層 152 及び n 型オーミック電極 153 を介して電源 128 に接続されている。

【0040】

また、図 6 (a) 及び図 6 (b) に開示した半導体素子 160 のように、n 型半導体層 164 として InGaAsP (厚さ 200 nm、波長 1.3 μm) を、p 型半導体層 125 として InP (厚さ 500 nm、ドーパント: Zn、 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) の pn 接合を用いる構成であってもよい。また給電方法として、p 型半導体基板 162 を用いて基板裏面から裏面 p 型オーミック電極 161 を介して発光層 104 に給電する構成であっても良い。また、図 6 (c) の半導体素子 170 のように、発光層 104 の配置として、MQW 層 101 の横方向に端面発光型発光部 171 を配置する構成であっても良い。第 2 電気接点 103 及び前記第 2 電気接点層 103 と前記 MQW 層 101 との間の領域に光が結合・吸収されるような位置に配置されることが好適である。本構成は、半導体結晶の埋め込み再成長技術を用いて作製される。

【0041】

本実施例では、MQW 層として、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半導体素子を提供することができる。例えば、MQW 層として、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、量子カスケードレーザでよく知られるようなカスケード接続された多重量子井戸構造などを用いても良い。また材料系としては、GaAs 基板上に形成した GaAs / AlGaAs /、GaAs / AlAs、InGaAs / GaAs / AlAs、InP 基板上の、InGaAs / AlGaAs Sb、InAs 基板上の InAs / AlAs Sb、InAs / AlSb や、Si 基板上に形成した SiGe / SiGe 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。なお、本実施例では、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、本発明はこれに限定されるものではなく、正孔 (ホール) を用いたのもであっても良い。また、基板の材料は用途に応じて選定すればよく、シリコン基板、ガリウムヒ素基板、インジウムヒ素基板、ガリウムリン基板などの半導体基板や、ガラス基板、セラミック基板、樹脂基板などを用いても良い。

【0042】

(実施例 2 ; テラヘルツ電磁波発生素子)

実施例 2 では、実施例 1 の半導体素子を活性層として用いたテラヘルツ電磁波発生素子について説明する。図 4 (a) と (b) は、電磁波共振器としてパッチアンテナ構造を用いたテラヘルツ電磁波発生素子の模式図である。図 7 (a) は電磁波共振器としてマイクロストリップパッチアンテナ構造を、図 7 (b) は、スロットアンテナ構造を用いたテラ

10

20

30

40

50

ヘルツ電磁波発生素子の模式図である。

【0043】

本実施例では、電磁波利得を持つ活性層となるRTD211に、実施例1で説明した共鳴トンネルダイオードを含む構成を用いている、また、MQW層201は、実施例1で説明したMQW層101と同じ膜構成を含む。従って、実施例1と同様にRTD211を含むテラヘルツ電磁波発生素子200の電流 電圧特性は、共鳴トンネル現象により図2 (b) に示したような微分負性抵抗が現れる。

【0044】

パッチアンテナ212は、RTD211、上電極層221、GND電極層222、誘電体層215から構成され、上電極層221とGND電極層222に挟まれた領域にある誘電体層215内において電磁波が共振する。パッチアンテナ型の共振器は、テラヘルツ電磁波をより効率よく空間に取り出すことが可能で、アレイ化や高出力化に有利な共振器構造である。この共振器構造では、誘電体層215の誘電率と厚さ、パッチアンテナ212の辺の長さ、RTD211の大きさや位置などの構造が共振周波数を決める上で重要なファクタとなる。本実施例で用いたパッチアンテナ212は、上電極層221の一部分であり、200 μm \times 200 μm の正方形パターンである。また、アンテナ中心からA' A方向に40 μm ずらした位置にRTD211が配置されている。RTD211は、上電極層221とGND電極層222とで上下から挟まれており、素子の駆動に必要なバイアス電圧が印加可能な構成となっている。RTD211は、第1コンタクト層216、第1電気接点層202、MQW層201、第2電気接点層203、第2コンタクト層217の順に積層されており、直径が約2 μm のメサ構造となっている。上電極層221は、パッチアンテナ212と、給電ライン218から構成され、給電ライン218を介して、RTD電極223からRTD211の駆動に必要なバイアス電圧が供給される。上電極層221は、真空蒸着したTi / Pd / Au層 (20 nm / 20 nm / 200 nm) をリフトオフすることで形成される。ここで、Ti / Pd / Au層は高濃度にドーピングされたInGaAsの低抵抗コンタクトのオーミック電極として知られている。誘電体層207には、高周波電磁波に対して低損失材料として知られるBCB (ベンゾシクロブテン) を用いた。誘電体層215のBCB膜厚は3 μm であり、スピンコート法とドライエッチング法を用いて形成される。絶縁層207は、GND電極222とp型の半導体基板を絶縁する為の層であり、窒化シリコンをプラズマCVDして、RIEすることで形成した。GND電極層222は共振器内の接地電極であり、真空蒸着法で形成したTi / Pd / Au / Ti層 (20 nm / 20 nm / 200 nm / 20 nm) を用いる。

【0045】

発光層204は、バンド間遷移に伴いエネルギー h の光Aを発生する層であり、実施例1で開示した化合物半導体のpn接合を用いた。具体的には、発光層204は、n型半導体層224、p型半導体層225より構成され、この順に積層されている。n型半導体層224は、第2コンタクト層217を介して、GND電極層222に接続されている。また、p型半導体層225は、p型半導体基板220を介して、p型オーミック電極261に接続されており、基板220の裏面から発光層204にバイアス電圧を印加する構成となっている。電源223と電源228は調整部229に接続されており、調整部229により本実施例のテラヘルツ電磁波発生素子200は、発生する電磁波の周波数を好適に調整可能な構成となっている。

【0046】

本実施例に係るテラヘルツ電磁波発生素子200は、図2 (a) に示した等価回路に、共振器の構造によって決まる負荷抵抗、容量成分、インダクタンス成分を接続した共振回路のLCの共振周波数によって基本発振が決定される。電磁波発生素子200は、実施例1にて説明したように、電源228からのバイアス電圧のon / offに応じて、RTD211からは少なくとも2種類の微分負性抵抗Rac t及び容量成分Cac tが得られる。この結果、同じパッチアンテナ型共振器でも全体の共振回路の共振周波数が変化することになり、図4 (c) に示したように発生するテラヘルツ電磁波の周波数変化が生じる。

10

20

30

40

50

また、電源 2 2 8 からのバイアス電圧により光の強度を調整すれば、発振周波数を好適な条件に調整することも可能である。また、電源 2 2 8 からのバイアス電圧を変調して、発光層 2 0 4 からの光 A の強度を変調すれば、テラヘルツ波電磁波発生素子 2 0 0 の発振周波数を変調することも可能となる。また、テラヘルツ電磁波発生素子 2 0 0 を同一基板上に複数個アレイ状に配置すれば、1 チップで複数の周波数のテラヘルツ電磁波を発生可能なテラヘルツ電磁波発生デバイスが実現される。

【 0 0 4 7 】

電磁波共振器構造のその他の例として、図 7 (a) に示したマイクロストリップ型パッチアンテナ構造の共振器を用いたテラヘルツ電磁波発生素子 3 0 0 であっても良い。マイクロストリップパッチアンテナ 3 0 2 は、主に電磁波共振部と電磁波放射部の役割を果たすパッチ部と、主に電磁波共振部の役割を果たすマイクロストリップラインより構成される。誘電体層 2 1 5 の材料と厚さ、パッチ部の辺の長さ、マイクロストリップラインの長さ、R T D 2 1 1 の大きさと位置などが基本発振周波数を決める上で重要なファクタとなる。本実施例の場合は、 $L \times L / 2$ の長方形パターンのパッチ部と、パッチ部の短辺の中心から線幅 $8 \mu\text{m}$ のマイクロストリップラインが伸びており、R T D 2 1 1 の上で T 字に交差するような配置となっている。ここで、 $L = 280 \mu\text{m}$ であり、R T D 2 1 1 はマイクロストリップラインの共振する電磁波の腹になる部分に配置されている。マイクロストリップラインは、給電ライン 2 1 8 を介して、電源 2 2 3 に接続される。パッチアンテナ型と同様に、R T D 2 1 1 は $2 \mu\text{m}$ のメサ構造であり、上電極層 2 2 1 と G N D 電極層 2 2 2 に上下から挟まれており、駆動に必要なバイアス電圧が印加可能な構成となっている。

【 0 0 4 8 】

また、図 7 (b) に開示したようなスロットアンテナ構造の共振器を用いたテラヘルツ電磁波発生素子 6 3 0 であっても良い。スロットアンテナは電磁波発生素子を高周波化する上で好適な構造である。ここで、発生素子 6 3 0 は、I n P 基板 6 3 6 上に、電極 T i / P d / A u 層 6 3 1 と 6 3 2 とが、S i O₂ 絶縁層 6 3 3 を介して積層された構造となっている。電極 6 3 1 及び電極 6 3 2 の一部が除去された窓領域 6 3 4 がスロットアンテナ型共振器となっており、窓領域の長さが発振周波数を決めるファクタとなっている。本実施例では、スロットアンテナ 6 3 7 の窓幅は $30 \mu\text{m}$ とし、一辺 $2.3 \mu\text{m}$ のメサ 6 3 5 を配置した。メサ 6 3 5 はポスト状に形成された R T D 2 1 1 である。電極 T i / P d / A u 層 6 3 1 や 6 3 2 はオーミック電極であり、電源 2 2 3 を介して調整部 2 2 9 に接続されている。また、電源 2 2 8 を介して発光層 (不図示) にバイアス可能で、所望の周波数に応じてバイアスが選択される。

【 0 0 4 9 】

また、電磁波共振器として Q 値の高い素子壁面や裏面も電極で覆った 3 次元構造の空洞導波管を採用しても、テラヘルツ電磁波発生素子を提供することも出来る。また、電磁波共振器に表面プラズモン導波路構造の共振器を用いれば、より高出力化に有利な構成を提供することが出来る。外部光入射用の窓構造が不要な本発明では、このように自在に電磁波共振器を選択することが可能である。なお、これらの構造は既存の半導体プロセスを用いて作製することが出来る。

【 0 0 5 0 】

このように、本実施例のテラヘルツ電磁波発生素子は、同一基板の上に配置した発光層からの光の強度を調整して、多重量子井戸構造のサブバンド間遷移の特性を調整することで、発生するテラヘルツ電磁波の周波数が可変となる。周波数可変及び周波数変調が制御性良く実現可能で、高速応答性に優れ、小型な、電流注入型のテラヘルツ電磁波発生素子を実現される。ただし、本発明は上記構成に限定されるものでないことは言うまでもない。

【 0 0 5 1 】

(実施例 3 : 検査装置)

実施例 3 について、図 8 を用いて説明する。

【 0 0 5 2 】

ここで本実施例は、実施例 2 のテラヘルツ電磁波発生素子を用いた物体の検査装置である。

【 0 0 5 3 】

図 8 (a) に示すように、本実施例の検査装置は、例えば上記の実施例の周波数可変が可能な電磁波発生素子 7 0 a ~ 7 0 d を並べて配置し、 $f_1 \sim f_8$ までの複数の発振周波数の電磁波を発生させる。ここで周波数 $f_1 \sim f_8$ は、電磁波発生素子に応力信号を入力したり、スイッチを用いてバイアス電圧の極性を変化させるなどして、周波数を変化させたり、変調したりすることが出来る。また、それぞれの電磁波は放物面鏡 7 4 で平行ビームとして伝播し、検体となる対象物体 7 2 に照射され、透過光がレンズ 7 3 で集光され検出器 7 1 a ~ 7 1 d で受信される。ここで、本実施例では透過配置にしているが、反射配置で検査しても良い。

10

【 0 0 5 4 】

例えば、記憶装置に、予め検出器で受信すべき強弱の組み合わせパターンを記憶させておく。また、検査物質が $f_1 \sim f_8$ までの周波数のうち、いずれか 1 つまたは複数の特定の吸収スペクトルを有していたとする。このとき、検査物質の吸収スペクトルと、記憶させておいたパターンと比較することにより、検査したい物質が対象物体 7 2 中に含まれているか否かを判別することができる。

【 0 0 5 5 】

図 8 (b) は、検査物質の指紋スペクトルの例である。周波数 f_1 、 f_6 、 f_7 に吸収ピークを持つために、予め本物質の吸収パターンを記憶しておいて、 f_1 、 f_6 、 f_7 で検出器出力が弱く、その他の周波数における検出器出力が大きいという情報を照合すれば、本物質が含まれると判定することができる。

20

【 0 0 5 6 】

本実施例の検査装置は、例えば、空港での危険物・禁止物質検査、郵便・貨物等の物流品検査、工場における工業製品の検査等に利用することができる。この際、1つの検査装置でさらに多くの周波数での検査が可能となるため、より多くの種類の検査物質を検査することが可能となる。

【 0 0 5 7 】

(実施例 4 : ヘテロダイン検出器)

実施例 4 について、図 9 を用いて説明する。

30

【 0 0 5 8 】

本実施例は、例えば実施例 2 で説明した共鳴トンネルダイオードを備えた電磁波発生素子を局部発振器として用いたヘテロダイン検出器を提供する。

【 0 0 5 9 】

図 9 は、本実施例の検出器の模式図である。図 9 (a) は局部発振器としてスロットアンテナ型の電磁波共振器を用いた例である。また、図 9 (b) は局部発振器としてマイクロストリップ型の電磁波共振器を用いた例である。

【 0 0 6 0 】

本実施例の検出器は局部発振器 (L O)、ミキサー (M i x e r)、I F 検出部、アンテナ (A n t e n n a)、L O - p o r t、R F p o r t、I F - p o r t などから構成される。ここで、局部発振器 (L O) としては上記実施例の電磁波発振器が用いられる。また、ミキサーは R F パワーを効率よく I F パワーに変換するデバイスであり、ショットキーダイオード、超伝導 S I S ミキサー、ホットエレクトロンボロメータ、H B T / H E M T ミキサーなどが用いられる。また、I F 検出部はミキシングで生成した中間周波数 (I F) 出力を検出する役割を果たし、アンテナ (A n t e n n a) は検出したい電磁波を受信する役割を果たす。また、L O - p o r t、R F p o r t は、それぞれ局発波、信号波のミキサー (M i x e r) への入力ポートを表しており、I F - p o r t は中間周波数 (I F) の I F 検出部への入力ポートを表している。ここで、特に図示はしていないが、アンテナ (A n t e n n a)、ミキサー (M i x e r)、局部発振器 (L O 1 又は L O 2) の間に高周波フィルターや R F 増幅器等を配置すればより高感度な検出器が実現さ

40

50

れる。

【 0 0 6 1 】

まず、図 9 (a) を用いて、本実施例の検出器について詳細に説明する。検出器 7 0 0 は、局部発振器 (L O 1) にスロットアンテナ 6 3 7 を有する電磁波発生素子 6 3 0 を用いたものである。電磁波発生素子 6 3 0 は、調整部 2 2 9 及び電源 2 2 8 により、発光層からの光の強度を調整して発生するテラヘルツ電磁波の周波数を変化及び変調することが可能である。従って、電磁波発生素子を局部発振器 (L O 1) にとして用いれば、1つの局部発振器から広い帯域幅の周波数を検出器に入力することが可能となる (例えば f_{L1} から f_{L2})。また、検出器 7 0 0 において、スロットアンテナ型共振器構造 6 3 7 は電磁波 (f_{S1} から f_{S2}) の受信のアンテナとしての役割も果たしている。受信した電磁波と、電磁波発生素子 6 3 0 からの発振出力は、RF port 及び LO port からミキサー (Mixer) に入力され、周波数混合により差周波成分である中間周波数 (IF) が生成される。生成された中間周波数 (IF) は IF - port を介して IF 検出部にて検出される。

10

【 0 0 6 2 】

検出器の動作について説明する。例えば、電源 2 2 3 から RTD 駆動用のバイアスが電磁波発生素子 6 3 0 に入力された場合は、局部発振器 (L O 1) から周波数 f_{L1} が発振される。このとき、検出器 7 0 0 はアンテナにて周波数 f_{S1} ($= | f_{L1} + f_{IF} |$) の信号波 1 を受信し、ミキサー (Mixer) から出力される中間周波数 f_{IF} を IF 検出部にて検出することで信号波 1 が検出される。また、電源 2 2 8 から光変調用のバイアスが電磁波発生素子 6 3 0 に入力された場合は、局部発振器 (L O 1) はから周波数 f_{L2} が発振される。このとき、検出器 7 0 0 はアンテナにて周波数 f_{S2} ($= | f_{L2} + f_{IF} |$) の信号波 2 を受信し、ミキサー (Mixer) から出力される中間周波数 f_{IF} を IF 検出部にて検出することで信号波 2 が検出される。

20

【 0 0 6 3 】

また、図 9 (b) のように、局部発振器として共鳴トンネルダイオードとマイクロストリップ型共振器とを備えた電磁波発生素子 8 3 0 を用いた例でも同様の検出を行なうことが可能である。ここで、検出器 8 0 7 の局部発振器 L O 2 は、RTD 8 0 1、マイクロストリップライン 8 0 2、 $\pi/4$ スタブ 8 0 3、局発波出力部 8 0 6、基板 8 0 5 などから構成され、一般的な MMIC 技術で作製される。

30

【 0 0 6 4 】

いずれの構成においても、発光層からの光強度を調整してに局部発振器 L O 2 から周波数 f_{L1} から f_{L2} まで連続可変すれば、 f_{S1} から f_{S2} までの電磁波をヘテロダイン検出することが可能である。

【 0 0 6 5 】

このように、共鳴トンネルダイオードを用いた発振器をヘテロダインミキシングにおける局部発振器として用いれば、1つの検出器で広い帯域幅のテラヘルツ電磁波の検出が可能な検出器が実現される。

【 0 0 6 6 】

また、本実施例の検出器により、1つの検出器で複数の周波数帯のテラヘルツ電磁波を検出することが可能であるため、検出器の小型化や高密度化が容易に達成される。さらに、本実施例の検出器をアレイ状に複数配置すれば、複数の周波数の高周波電磁波を高感度で検出可能な小型の検出器が実現される。

40

【 符号の説明 】

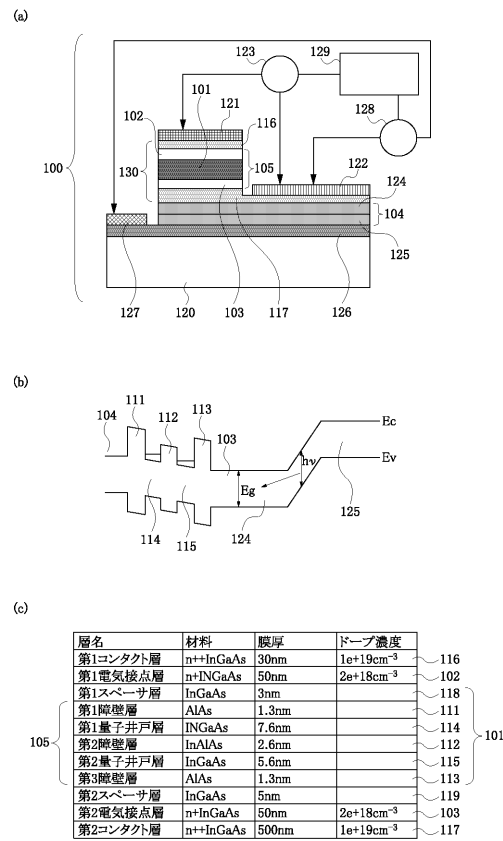
【 0 0 6 7 】

- 1 0 0 発振素子
- 1 0 1 活性層
- 1 0 2 第 1 の電気接点層
- 1 0 3 第 2 の電気接点層
- 1 0 4 発光層

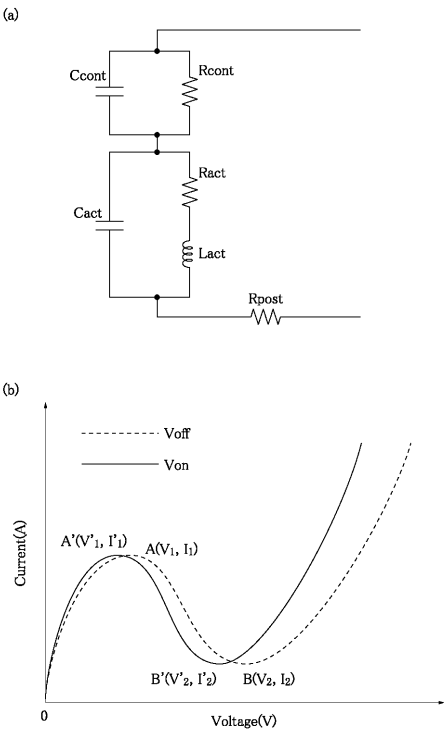
50

- 1 2 0 基板
- 1 2 5 p 型半 導 体
- 1 2 4 n 型半 導 体

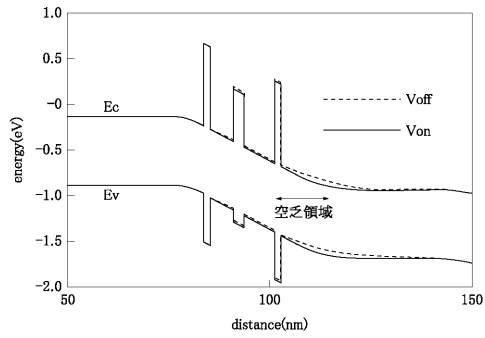
【 図 1 】



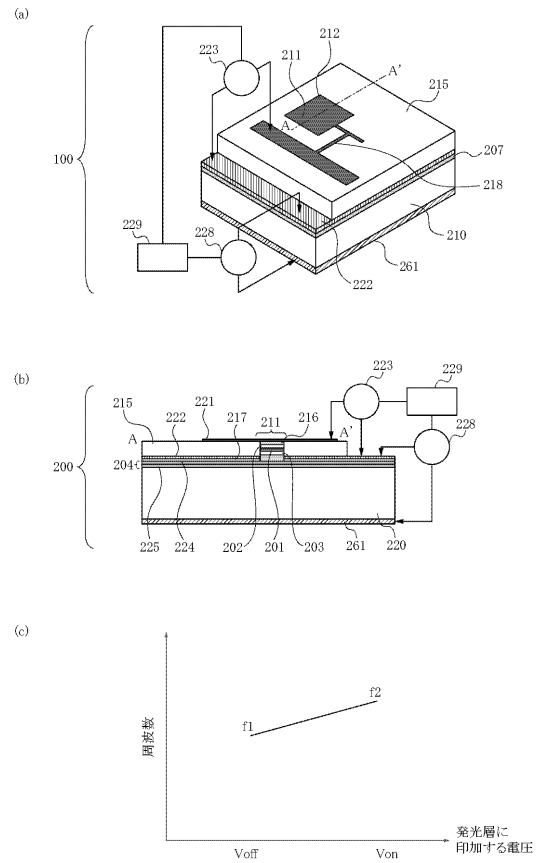
【 図 2 】



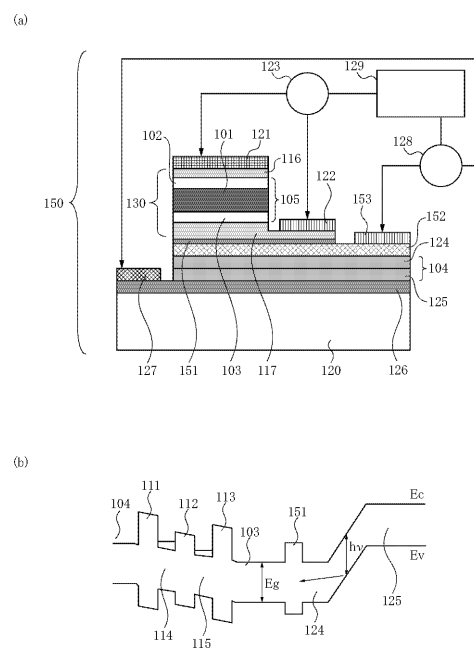
【図 3】



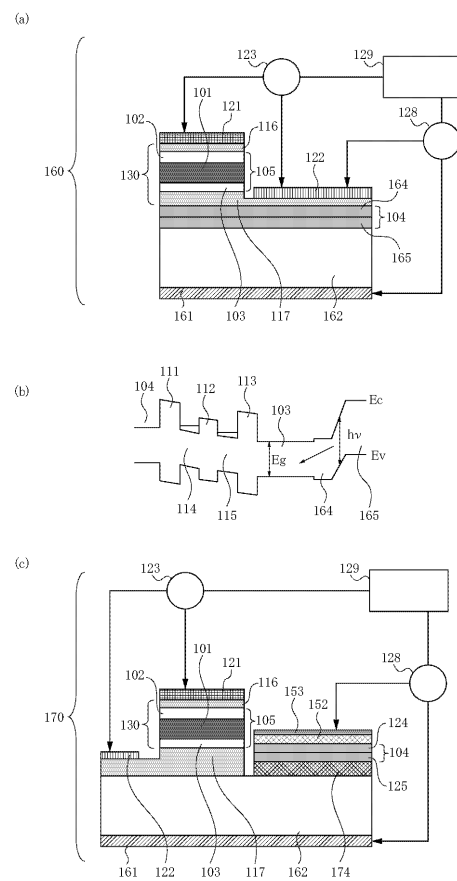
【図 4】



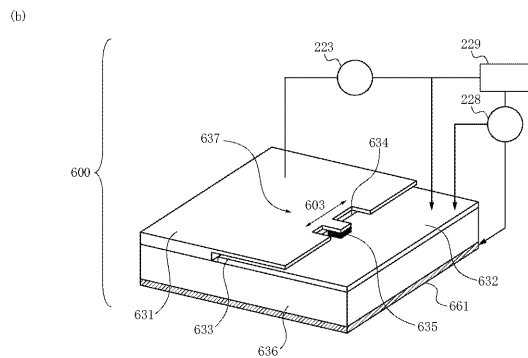
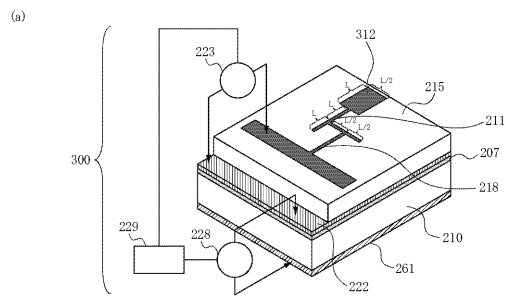
【図 5】



【図 6】

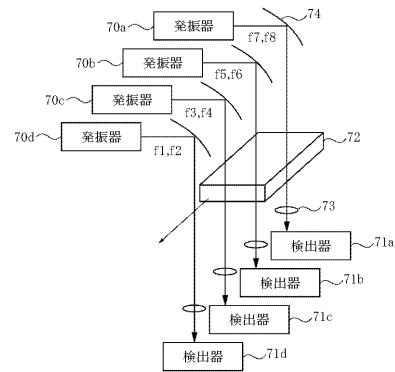


【図 7】

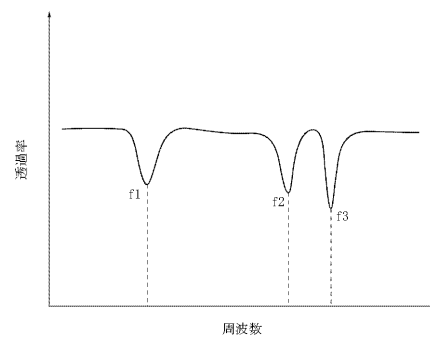


【図 8】

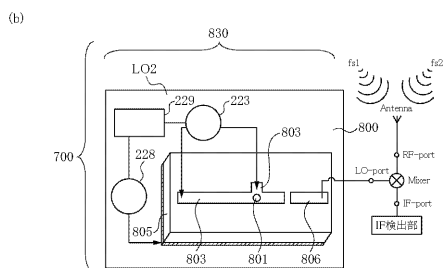
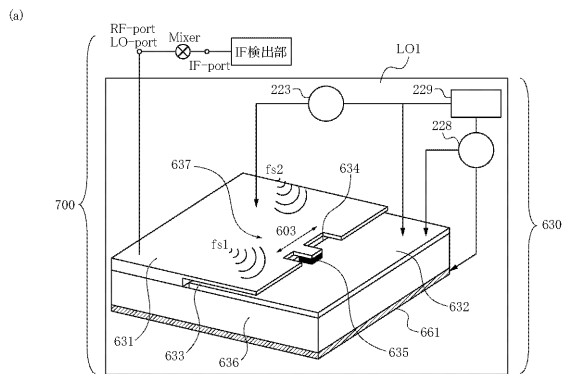
(a)



(b)



【図 9】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平 0 8 - 1 2 5 2 1 5 (J P , A)
特開 2 0 0 8 - 0 5 3 5 1 9 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)
H 0 1 S 5 / 0 0 - 5 / 5 0