(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第5196750号
(P5196750)

(45)発行日　平成25年5月15日(2013.5.15)　(24)登録日　平成25年2月15日(2013.2.15)

(51)Int.Cl.		F I		
H01L 21/329	(2006.01)	H01L	29/88	F
H01L 29/88	(2006.01)	H01S	1/02	
H01S 1/02	(2006.01)	H01L	29/66	T
H01L 29/66	(2006.01)	H01L	29/06	601W
H01L 29/06	(2006.01)			

請求項の数 10　(全 15 頁)

(21)出願番号　特願2006-229083(P2006-229083)
(22)出願日　平成18年8月25日(2006.8.25)
(65)公開番号　特開2008-53519(P2008-53519A)
(43)公開日　平成20年3月6日(2008.3.6)
審査請求日　平成21年8月25日(2009.8.25)

(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　尾内　敏彦
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　小川　将之

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】
電磁波を発振するための発振素子であって、
基板と、
前記基板上に設けられる共鳴トンネルダイオードと、を備え、
前記共鳴トンネルダイオードは、
前記基板の格子定数とは異なる格子定数を有し、且つ臨界膜厚よりも薄い膜厚を有する２つ以上の量子井戸層と、
前記２つ以上の量子井戸層をそれぞれ隔てる複数の障壁層と、を有し、
前記複数の障壁層のうち２つの前記量子井戸層に挟まれる障壁層は、２つの前記量子井戸層のサブバンド間においてキャリアがフォトンアシストトンネル可能である様に構成され、
２つの前記量子井戸層に挟まれる障壁層とこの障壁層を挟む２つの前記量子井戸層の歪みは、２つの前記量子井戸層に挟まれていない複数の障壁層の歪みによって補償されていることを特徴とする発振素子。
【請求項２】
前記基板はInP基板であり、前記井戸層はIn組成が60%以上100%以下のInGaAsないしInAsであって、前記障壁層はIn組成が0%以上50%以下のInAlAsないしAlAs若しくはAlAsSbを少なくとも２層含むことを特徴とする請求項1記載の発振素子。
【請求項３】

前記基板はInAs基板であり、InAsSb井戸層とInAlAs若しくはAlAsSb障壁層を少なくとも含む、
あるいは、前記基板はGaSb基板であり、InAsSb若しくはInGaSb井戸層とInAlAs若しくはAlAsSb障壁層を少なくとも含む、
あるいは、前記基板はGaN基板であり、InGaN井戸層とAlGaN障壁層を少なくとも含むことを特徴とする請求項１記載の発振素子。
【請求項４】
前記電磁波は30GHz以上30THz以下の周波数領域の少なくとも一部を含むことを特徴とする請求項1から３のいずれか１項に記載の発振素子。
【請求項５】
前記共鳴トンネルダイオードから発生された電磁波を共振させるための共振器を備え、
前記共振器は、伝送路とアンテナとを含み構成、あるいはストライプ状の表面プラズモン伝送路と前記伝送路の端部における反射面とで構成されることを特徴とする請求項１から４のいずれか１項に記載の発振素子。
【請求項６】
前記ストライプ状の表面プラズモン伝送路の伝播定数を前記電磁波の伝播方向に沿って周期的に変化させ、ブラッグ反射を利用することによって前記電磁波が定在波となること特徴とする請求項５に記載の発振素子。
【請求項７】
２つの前記量子井戸層に挟まれる障壁層は、２つの前記量子井戸層に挟まれていない複数の障壁層の歪みと同方向の歪みを有することを特徴とする請求項１から６のいずれか１項に記載の発振素子。
【請求項８】
２つの前記量子井戸層に挟まれる障壁層は、歪みを有さないことを特徴とする請求項１から６のいずれか１項に記載の発振素子。
【請求項９】
テラヘルツ波を発振するための発振素子であって、
基板と、
前記基板の上に設けられる共鳴トンネルダイオードと、を備え、
前記共鳴トンネルダイオードは、
前記基板の格子定数と異なる格子定数を有し、臨界膜厚よりも薄い膜厚を有する第１の障壁層と、
前記第１の障壁層と接し、前記基板の格子定数と異なる格子定数を有し、臨界膜厚よりも薄い膜厚を有する第１の量子井戸層と、
前記第１の量子井戸層と接し、臨界膜厚よりも薄い膜厚を有し且つ該第１の量子井戸層のサブバンドにおけるキャリアがフォトンアシストトンネル可能である様に構成される第２の障壁層と、
前記第２の障壁層と接し、該第２の障壁層を介して前記第１の量子井戸層と反対側に設けられ、前記基板の格子定数と異なる格子定数を有し、臨界膜厚よりも薄い膜厚を有する第２の量子井戸層と、
前記第２の量子井戸層と接し、前記基板の格子定数と異なる格子定数を有し、臨界膜厚よりも薄い膜厚を有する第３の障壁層と、を有し、
前記第２の障壁層と前記第１及び第２の量子井戸層とが有する歪量を、前記第１及び第３の障壁層が有する歪量で補償するように構成されることを特徴とする発振素子。
【請求項１０】
前記第２の障壁層が、前記基板の格子定数と整合する格子定数を有することを特徴とする請求項９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、電流注入型の電磁波の発振素子に関する。特には、ミリ波帯からテラヘルツ帯（30GHz乃至30THz）までの周波数領域における電流注入型の発振素子に関する。更に詳細には、共鳴トンネルダイオード構造を有する電流注入型の発振素子に関する。

【背景技術】

【０００２】

近年、ミリ波帯からテラヘルツ帯（30GHz乃至30THz）までの周波数領域の少なくとも一部の周波数を有する電磁波（以後、単にテラヘルツ波とも呼ぶ）を用いた非破壊なセンシング技術が開発されてきている。そして、この周波数帯の電磁波の応用分野として、X線に代わる安全な透視検査装置としてイメージングを行う技術、物質内部の吸収スペクトルや複素誘電率を求めて結合状態などの物性を調べる分光技術が開発されている。更には、生体分子の解析技術、キャリア濃度や移動度を評価する技術などが開発されている。

【０００３】

他方、テラヘルツ波発生手段としては、フェムト秒レーザを光伝導素子に照射してパルスを発生させるものや、ナノ秒レーザを非線形結晶に照射して特定周波数を発生させるパラメトリック発振手段などがある。しかし、いずれも光励起であり、小型化や低消費電力化には限界がある。

【０００４】

そこで、テラヘルツ波の領域で動作する電流注入型の素子として、量子カスケードレーザや、共鳴トンネルダイオードを用いた構造などが検討されている。特に、後者の共鳴トンネルダイオード型は、1THz近傍で室温動作するものとして期待されている（非特許文献1参照）。こうした共鳴トンネルダイオード型は、典型的には、InP基板上に格子整合系でエピタキシャル成長されたInGaAs/InAlAsから成る量子井戸により構成される。若しくは、障壁層を薄くして電流密度を向上させるためにAlAsを用いる構成が検討されている。これの電圧－電流（V-I）特性及び発振特性としては、図12に示す様に、負性抵抗を示し、この負性抵抗を示す領域の近傍で発振するのが観測される。

【０００５】

しかしながら、これは、活性層における負性抵抗による利得や、注入できる電流密度によって発振出力が制限されており、高出力化を図るためには活性層構造や共振器の構造を改善する必要がある。すなわち、図12において、ピーク電流密度が大きく、負性抵抗領域における傾き（負性コンダクタンス；Negative Differential Conductance）が大きいことが望ましい。

【０００６】

この様に電流密度を向上させて負性抵抗領域における傾きを大きくする構造としては、InGaAs井戸層のIn組成を増加させた歪み系（圧縮歪み）を用いることで、電流密度を向上することが開示されている（特許文献1参照）。

【非特許文献１】Ｊａｐａｎｅｓｅ Ｊｏｕｒｎａｌ ｏｆ Ａｐｐｌｉｅｄ Ｐｈｙｓｉｃｓ，ｖｏｌ．44，2005，ｐｐ．7809－7815

【特許文献１】特開2004－200286号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【０００７】

ところで、発振素子において、共振器を構成する伝送路の伝搬損失を下げるためには活性層の厚さが厚いことが望ましい。そこで、3重障壁構造にして利得や電流密度を下げることなく活性層を厚くする方法も考えられる。

【０００８】

しかしながら、特許文献1で示す歪み井戸構造を用いて3重障壁構造にすることで、発振素子としての発振出力などの特性を向上させようとすると、歪み構造を用いるために臨界膜厚が存在し、或る程度以上は厚くすることができない。そこで、共鳴トンネルダイオード構造で共振器損失を低減し、かつ電流密度及び利得を向上させて発振出力を大きくすることが容易ではなかった。

【課題を解決するための手段】
【０００９】
上記課題に鑑み、本発明の発振素子は、電磁波の利得を有する利得媒質と、前記電磁波を前記利得媒質へ閉じ込めるための共振器と、前記利得媒質へキャリアを注入する手段とを備える。前記利得媒質は、2つ以上の量子井戸層と各量子井戸層を隔てる複数の障壁層から構成されて、前記2つ以上の量子井戸層のサブバンド間でキャリアの遷移がフォトンアシストトンネルを経て生起して利得が発生する共鳴トンネルダイオードに基づく構成である。前記量子井戸層はいずれも、結晶を構成する基板の格子定数とは異なる格子定数を持ち且つ臨界膜厚よりも薄い膜厚で歪を有するものから成る。更に、前記複数の障壁層は、前記量子井戸層とは反対方向の歪を有し前記基板とは異なる格子定数を持つ層を少なくとも1つ含む。前記電磁波は、典型的には、30GHzから30THzの周波数領域の少なくとも一部を含む。
【００１０】
また、上記課題に鑑み、本発明のセンシング装置は、上記発振素子を発振源として用いて、30GHzから30THzの周波数領域の一部の電磁波の検体に対する相互作用を検査することを特徴とする。また、本発明のイメージング装置は、上記発振素子を発振源として用いて、30GHzから30THzの周波数領域の一部の電磁波の検体に対する相互作用を2次元的に検査して画像データを取得することを特徴とする。本発明の発振素子を用いれば、背景技術で述べたテラヘルツ領域のセンシング装置やイメージング装置において、小型、低消費電力のシステムを実現することができる。
【発明の効果】
【００１１】
本発明によれば、利得媒質が、適当に選択された組成で互いに反対方向の歪を持つ量子井戸層と障壁層を含むので、井戸層と障壁層の禁止帯幅や膜厚を比較的柔軟に設定できて、活性層の注入電流密度を向上させ発振の出力パワーを向上させることができる。また、利得媒質活性層を比較的厚くできるので、伝搬損失を低減できて、電磁波の発生効率を高く、しきい値電流密度を小さくすることができる。
【発明を実施するための最良の形態】
【００１２】
以下に、本発明による発振素子の実施形態について説明する。これは、利得を大きくすべく歪格子を用いると活性層の厚さに限界が生じ、共振器を構成する上で薄いために電磁波の閉じ込めが弱く、伝搬損失が大きくなって発振特性が向上できないという課題を解決するものである。本発明の発振素子の典型的な実施形態では、3重障壁量子井戸構造において、1つ1つの量子井戸は臨界膜厚以下で構成し、その量子井戸を隔てるための障壁層には、量子井戸で蓄積した歪に対して、基板の格子定数を境に逆方向の歪を与える。このことで、量子井戸構造全体の歪量を0に近づけて多層構成を可能にする。すなわち、井戸層で、基板より格子定数の大きい結晶を用いれば、歪緩和しない領域では圧縮歪が加わるが、これを打ち消すために、障壁層では逆に格子定数の小さい結晶を用いて伸張歪とすればよい。
【００１３】
例えば、InP基板上のInGaAs/InAlAs量子井戸では、井戸層となるInGaAsのIn組成を53%以上にした場合にバンドギャップが小さくなるため伝導キャリアが集まりやすく、すなわち電流密度が向上して利得が増大する。しかし、同時に歪（圧縮歪）が大きくなって、厚さによっては歪により結晶性が劣化する。2層以上にすると、井戸層の厚さに限界があり設計の自由度が低下する。そこで、障壁層にAlAs、或いはIn組成が50%以下、より望ましくは30%以下のInAlAsを用いて、反対方向の歪（伸長歪）を与えて補償させれば、3重障壁構造の共鳴トンネルダイオード構造が可能となる。
【００１４】
この場合、2重障壁構造に比べると、典型的には厚さを2倍以上にできるため、ストライプ状の伝送路にした場合でも伝搬損失を下げることができる。よって、発振閾値の低減、出

射パワーの増大を図ることができる。

【００１５】

発振器の共振器構造としては、高周波発振器でよく知られた伝送路とアンテナを用いた構成や、レーザ発振器でよく知られたストライプ状の構成などを好適に用いることができる。共鳴トンネルダイオード型の場合は利得帯域が広いために、単一周波数に制限する構成を付加することが望ましい。例えば、上記のうち前者のタイプであれば、パッチアンテナの形状で制御することができる。後者のタイプであれば、周期的な溝などを形成した分布反射／分布帰還型の共振器構成を採ることができる。

【００１６】

図面を用いて更に詳しく実施形態を説明する。図1(a)、(b)は本発明に係るTHz発振素子の実施形態の構造を説明する図である。図1(a)は構成を示す斜視図、図1(b)は活性層のエネルギーバンドダイアグラムを示す図である。

【００１７】

この実施形態では、図1に示す様に、InP基板2上に、n-InGaAsエミッタ層7、アンドープのAlAs/InGaAsからなる3重障壁量子井戸活性層8、10、12、n-InGaAsコレクタ層13からなるポスト4が直径4μm程度で形成されている。そして、その周囲はBCB（商品名）3によって埋め込まれ、その表面には伝送路16とアンテナ5が形成されている。素子のバイアス電圧は、電極パッド6とInP基板2の裏側に形成した電極1との間に印加される。

【００１８】

3重障壁量子井戸活性層のエネルギーバンドダイアグラムは図1(b)に示した様になっている。そして、井戸層となるInGaAsの伝導帯9、11は、エミッタ7及びコレクタ13のn-InGaAsの伝導帯よりも低くなる様に、井戸層のIn組成を変化させている。この様な構成にすることで、エミッタ7となる左側のInGaAsからコレクタ13となる右側のInGaAsに流れる最大の伝導キャリア数を増加させることができる。これにより、負性抵抗領域の傾きを大きく、すなわち利得を増大させることができる。

【００１９】

その設計例について以下に述べる。活性層を構成するInAlAsやInGaAsは、III族元素のIn、Al、Gaの組成比によって、図2の様に、格子定数とエネルギー準位が関係付けられている。InPと格子整合する組成は、それぞれ、InGaAsでIn：53%、InAlAsでIn：52%であることが知られている。図2の符号20の矢印に沿って、井戸層となるInGaAsのIn組成を増大すれば、禁止帯幅が小さくなりその伝導帯を下げることができる。この図において、各化合物半導体間を結ぶ線を直線にしているが、これは模擬的に書かれた図であって、実際の3元混晶の格子定数と禁止帯幅の関係は弓なりに下に凸の曲線で結ばれる。

【００２０】

ここで、本実施形態における3重障壁多重量子井戸構造のそれぞれの層の厚さは、エミッタ7側からAlAs 1.4nm／InGaAs 7.8nm／AlAs 1.4nm／InGaAs 5.6nm／AlAs 1.4nmとした。井戸層におけるIn組成を変化させたときに、電流－電圧特性の数値解析を行い、負性抵抗が現れる直前のピーク電流密度を求めたグラフを図3に示す。この様に、井戸層のIn組成を53%から増加させると、図3の様にピーク電流密度が増大して、概ね60%以上の組成にすればピーク電流密度が2倍以上増大する効果がある。

【００２１】

例えば、井戸層を70%のIn組成にすることで電流密度はおよそ320kA/cm^{2}と、格子整合系（In：53%）に比べおよそ5倍近く増大することが分かる。そのときのデバイスとしてのV-I特性及び利得特性のシミュレーション結果を図4に示す。0.2V程度でピークを示して、上記の最大ピーク電流に達したのちに、負性抵抗を示している。この負性抵抗領域で、最大利得として、0.25Vのときにおよそ1250cm^{-1}を示すことが分かる。これらの計算には、「Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 40, p.5251, 2001」にある3重障壁共鳴トンネルダイオードの理論式を用いた。

【００２２】

すなわち、エミッタ7側を左として、井戸層のキャリアの占有確率を左側、右側でρ_L、ρ

$_R$、エネルギー準位をE_L、E_R、2つの井戸層間のキャリアの遷移確率をρ_{LR}（左→右）、ρ_{RL}（右→左）とする。そして、3つの障壁層におけるトンネル遷移エネルギーを左から順にそれぞれ、T_L、T_C、T_Rとしたときに、密度行列方程式が以下の式1の様に立てられる。

【００２３】

【数１】

$$\frac{\partial \rho_L}{\partial t} = \frac{Tc}{i\hbar}(\rho_{RL} - \rho_{LR}) + \frac{T_L}{\hbar}(\rho_{L0} - \rho_L)$$

$$\frac{\partial \rho_R}{\partial t} = \frac{Tc}{i\hbar}(\rho_{LR} - \rho_{RL}) + \frac{T_R}{\hbar}(\rho_{R0} - \rho_R)$$

$$\frac{\partial \rho_{RL}}{\partial t} = \frac{Tc}{i\hbar}(\rho_L - \rho_R) - \frac{\Gamma}{\hbar}\rho_{RL} - \frac{1}{i\hbar}(E_R - E_L)\rho_{RL} - \frac{e}{i\hbar}\left\{\frac{V_{dc}}{\alpha} + V_{QW}\cos(\omega t + \Phi)\right\}\rho_{RL}$$

$$\rho_{LR} = \rho^*_{LR}$$

【００２４】

ここで、Γは共鳴トンネルエネルギーの広がり（準位の幅）、V_{dc}はバイアス電圧（そのうち1/αは井戸層間の電圧降下分）、V_{QW}は活性層を励振する交流電圧を表している。また、ρ_{Lo}はエミッタ7におけるE_Lと同じエネルギーからフェルミエネルギーまでを積算した占有確率（2次元キャリア密度）を表している。同様に、ρ_{Ro}はコレクタ13におけるE_Rと同じエネルギーからフェルミエネルギーまでを積算した占有確率（2次元キャリア密度）を表している。

【００２５】

V-I特性や利得については、上式においてT_C=2.5meV、Γ＝15meV（=T_L/2+ T_R/2）と仮定して数値計算により求めた。

【００２６】

この様に、井戸層のIn組成を増大させれば利得の増大に結びついているが、一方で、格子ミスマッチ量は、In組成が70%のものでは1.16%の圧縮歪がかかっている。この圧縮歪による臨界膜厚の大きさのIn組成依存性の概算結果を図5に示す。これは、臨界膜厚をhc、格子ミスマッチ量f[＝(格子定数の差／基板の格子定数)]としたときに、次の計算式2の報告(Applied
Physics Letters, vol.47, p.322, 1985)より算出したものである。ここではb＝0.4nm（転移距離）、ν=1/3（ポアソン比）と置いた。

【００２７】

【数２】

$$hc \cong \left(\frac{b}{f}\right)\left[\frac{1}{4\pi(1+\nu)}\right]\left[\ln\left(\frac{hc}{b}\right)+1\right]$$

【００２８】

In組成が70%のときには臨界膜厚は8nmくらいであり、格子緩和しない状態でエピタキシャル成長をした場合には、上記の様な2つの井戸を単純に積層することができない。本実施形態の様に障壁層としてAlAsを用いた場合には、逆に-3.58%の伸張歪があるため、臨界膜厚は緩和される傾向にある。ちなみに、障壁層に用いたAlAsは、その臨界膜厚である1.8nmよりも薄くしている。しかしながら、結晶品質を良好に保つためには臨界膜厚よりも十分に余裕をもって設計することが必要である。そこで、中央の障壁層10もAlAs伸張歪障壁層とすることで、2つのIn組成70%のInGaAs層による圧縮歪を抑えて2つの井戸の積層を可

能にしている。これに対して、従来の格子整合系のInAlAs（In：52%）障壁層を用いた場合には、臨界膜厚に近いために結晶品質が劣化し、設計の自由度がなく、井戸層のIn組成をあまり大きくできない。従って、図3に示す様にピーク電流密度を増加できず、よって、利得の向上があまり望めなかった。

【００２９】

ここで示した設計値は一例であり、井戸の圧縮歪を補償する伸張歪の層を障壁層に用いれば同様に設計ができる。例えば、図2を参照すれば、矢印で示した組成の基板を用いた場合に、以下の様な組み合わせが可能である。

【００３０】

すなわち、

GaAs基板：InGaAs井戸層／AlAsP若しくはGaAsP障壁層。

InP基板：InGaAs井戸層／InAlAs若しくはAlAsSb障壁層。ここでは、基板はInP基板であり、例えば、井戸層はIn組成が60%以上100%以下のInGaAsないしInAsであって、障壁層はIn組成が0%以上50%以下のInAlAsないしAlAs若しくはAlAsSbを少なくとも2層含む。

InAs基板：InAsSb井戸層／InAlAs若しくはAlAsSb障壁層。ここでは、基板はInAs基板であり、InAsSb井戸層とInAlAs若しくはAlAsSb障壁層を少なくとも含む。

GaSb基板：InAsSb若しくはInGaSb井戸層／InAlAs若しくはAlAsSb障壁層。ここでは、基板はGaSb基板であって、InAsSb若しくはInGaSb井戸層とInAlAs若しくはAlAsSb障壁層を少なくとも含む。

【００３１】

上記組み合わせにおいて、AlAsSb障壁層を用いる設計では、障壁層の壁を高くできて設計の自由度が上げられると共に、キャリアの移動度を大きくできて利得をより増大できる。

【００３２】

更に、窒化物系ではGaN／InGaN／AlGaN多重量子井戸でも同様な設計が可能である。このNを導入した場合には、キャリアの移動度を大きくできて利得をより増大できる。

【００３３】

InP基板上のInAlAs障壁層を用いる場合には、In組成を50%以下にすれば伸張歪が発生すると考えられるが、50%の近くでは歪が小さいので障壁層の厚さを大きくしなくてはならず、電流密度が下がってしまう。そこで、障壁層の厚さの自由度から、In組成を概ね30%以下にすれば伸張歪が増大して、障壁層の厚さを小さくできて、InGaAsの歪を補償するために望ましいと考えられる。

【００３４】

上記実施形態の構成をとることによって、利得媒質の活性層が、適当に選択された組成で互いに反対方向の歪を持つ量子井戸層と障壁層を含むので、井戸層と障壁層の禁止帯幅や膜厚を比較的柔軟に設定できる。よって、活性層の注入電流密度ないし利得を向上させられて、レーザ発振の出力パワーを向上させることができる。また、活性層を比較的厚くできるので、伝搬損失を低減できて、テラヘルツ波の発生効率が高く、発振しきい値を低くできる。このことで省電力化が行え、更に、レーザ発振を維持するための冷却手段が簡易化され、好ましくは不要となる効果がある。

【実施例】

【００３５】

以下、更に具体的な実施例のデバイス構成を述べる。ただし、サイズや材料などは記載されるものに限定するものではない。

【００３６】

（第1の実施例）

本発明による第1の実施例は、上記実施形態で説明した図1の構造を有する。本実施例では、3層のAlAs障壁層（厚さ1.4nm）8、10、12を用い、井戸層は、厚さ7.8nmの$In_{0.7}Ga_{0.3}As$ 9、厚さ5.6nmの$In_{0.7}Ga_{0.3}As$ 11から成るものである。ここでは、以下の様に多重量子井戸の全体の歪量が1%以下になる様に設計している。

【００３７】

すなわち、多重量子井戸の全体の歪量εは、次の式3で表される（Applied Physics Letters, vol.87, 192113, 2005参照）。

【００３８】

【数３】

$$\varepsilon = \frac{[(\text{井戸層ミスマッチ量}) \times (\text{井戸層の全厚}) + (\text{障壁層ミスマッチ量}) \times (\text{障壁層の全厚})]}{\text{多重井戸全厚}}$$

【００３９】

従って、本実施例では、AlAsの障壁層（ミスマッチ：-3.56%、厚さ：1.4nm×3層）、$In_{0.7}Ga_{0.3}As$の井戸層（ミスマッチ：1.16%、厚さ：7.8nm＋5.6nm）を用いるため、全体の歪量としては0.03%と計算される。こうして、歪量が小さく安定で格子欠陥の発生しない、結晶品質の高いものが得られる。

【００４０】

この半導体ヘテロ構造のエピタキシャル成長にはMBE法を用いている。そして、活性層部分となる3重障壁量子井戸層8、10、12、エミッタ層7、コレクタ層13、及びそれらと電極を繋ぐためのコンタクト層は、4μmΦとなるポスト4を形成する。これは、EB露光と、ICP（induced coupled plasma）によるドライエッチングで$SiCl_4$とArの混合ガスを用いて作製できる。エッチング後のInP基板表面には、マイクロストリップ線路16を形成するためにグランドプレーンとなる電極Cr/Au15を形成する。誘電体層3は、BCB（商品名：ダウケミカル社）をスピンコートして加熱焼成した後に、CF_4及びO_2の混合ガスによるRIEドライエッチングで平坦化して、ポスト4の頭出しを行う。最表面のアンテナ5、電極6、伝送路16などはTi/Auでリフトオフにより一括形成する。

【００４１】

本実施例では、利得媒体であるポスト4において図4のV-I特性を持つので、0.25V近傍で発振条件を満たす様にアンテナ5や伝送路16を設計する。DCバイアスを与える電極パッド6は、その引き出し線が共振器上で節の点、すなわち発振時に共振したときに振幅ゼロの節にあたる点に接触する様に設計し、更に、電源まわりの影響がなくなる様にローパスフィルター17を設ける。

【００４２】

ここでは、設計例として、0.68THz近傍で発振が可能な様に、BCB3の厚さを3μm、伝送路幅を5μmとする。更に、共振器となる伝送路16の長さを220μm、パッチアンテナ5のサイズを、伝送路16と平行な方向に140μm、垂直な方向に280μmとなる様に形成する。位相調整のためにスタブを適宜付加して最適化を行なう。この設計値については、0.68THzが2次高調波として発振する様に設計されたものである。基本波が1THzになる様に設計することも可能である。しかし、本実施例の様にパッチアンテナを用いる構造では、アンテナサイズが小さくなって外部への取り出し効率が低減する可能性があるために、この様な構成とした。

【００４３】

本実施例の発振素子に、室温で、1kHz、デューティ10%のバイアス電圧0.25Vを印加することでレーザ発振が得られる。

【００４４】

（第2の実施例）

本発明による第2の実施例は、中央の障壁層を格子整合系の$In_{0.52}Al_{0.48}As$にしたものである。そのバンド構造図を図6に示す。61は格子整合系のInGaAsエミッタ層、62と66はそれぞれAlAs障壁層（厚さ1.4nm）、63は$In_{0.64}Ga_{0.36}As$の歪格子で厚さ7.8nmの井戸層、65は$In_{0.64}Ga_{0.36}As$の歪格子で厚さ5.6nmの井戸層である。中央の障壁層64は、すでに述べた様に格子整合系の厚さ2.7nm
のInAlAsである。

【００４５】

この様に格子整合系のInAlAsを用いた場合には、井戸層のIn組成とピーク電流密度の関係は図7の様に計算される。図3と比べると、同じIn組成でもピーク電流密度が下がる。すなわち、利得も下がる傾向にある。また、歪補償についても、量子井戸全体として行うためには、井戸層のIn組成を70%より小さくすることが望ましい。上記式3より、全体の歪量を0に近づけるにはIn組成64%が望ましく、このときには全体の歪量がほぼ0になる。この様に設計した場合の素子特性の計算結果を図8に示す。0.18Vにおいてピーク電流密度は約200kA/cm^2、0.22Vにおいて最大利得860cm^{-1}が得られることが分かる。

【００４６】

第1の実施例に比べて利得は低下するものの、従来の歪量子井戸を用いない構造に比べれば電流密度が3倍以上になるので特性は改善される。また、InGaAsとAlAsの界面では、Inの偏析で急峻な界面をエピタキシャル成長によって制御することが難しいため、作製容易性や歩留まりの点で本実施例を選択することがある。レーザ発振のための構造としては、第1の実施例と同様にすることができる。

【００４７】

（第3の実施例）

本発明による第3の実施例は、これまでの実施例の様なアンテナを用いたタイプでなく、通常のレーザ共振器で用いられている図9の様なストライプ構造に本発明を適用したものである。図9において、92は活性層を含む半導体層である。これは、第1の実施例の3重障壁の量子井戸層を、厚さ53nmのn-InGaAsエミッタ層とコレクタ層（うち障壁層の接する3nmはノンドープとした）、及び厚さ100nmのn^+-InGaAsコンタクト層でサンドイッチしたものである。キャリア注入を司るエミッタ、コレクタ層はSiドーピングによる電子濃度を1×10^{18}
cm^{-3}としてある。一方、コンタクト層は、1×10^{19} cm^{-3}とハイドープにして電極とのコンタクト抵抗を低減する様にしている。更に、この結果、半導体層92の部分の厚さは約324nmとなっている。

【００４８】

電極93、91はTi/Pd/Au（50nm／100nm／300nm）で構成している。活性層92は、半導体エピ層を転写することで、成長に用いたInP基板を除去した構造となっている。InP基板を除去するにあたっては、予めコンタクト層表面に形成した電極の最表面がAuであるため、ホールド基板として用いたSi基板90の表面に別途形成したTi/Au電極とAu-Auの圧着ボンディングを行ってから、ウエットエッチングにて行っている。Au-Auボンディングの条件としては、例えば、100℃乃至400℃の範囲で加熱を行いながら数Mpaの圧力を印加し、場合によっては超音波を付加することで行う。InP基板は塩酸で溶け、コンタクト層となるInGaAsは殆ど溶けないために、選択的にエピ層だけを残すことができる。

【００４９】

ストライプ構造94はInP基板除去後に幅が10μmとなる様に、フォトリソグラフィーと硫酸系（$H_2SO_4+H_2O_2+H_2O$の混合液）のエッチャントで形成したものである。更に、単一周波数発振とするために、ピッチ11μmの凹凸形状を電極93の様に形成して、分布帰還(DFB)レーザとして1THzで発振する様に作製する。ここで、94のストライプ型伝送路は、上下がAuの2重表面プラズモン導波路を構成して低損失導波路（伝搬損失）となる様に設計する。そのため、有限要素法を用いて計算した導波路損失は、1THzで約470cm^{-1}、等価屈折率は約13．5と見積もられた。上記の回折格子ピッチは、1THzの波長300μmから、Λ＝300μm／2／13．5　11μmより求めた。また、端面でのミラー損失は、1mm共振器長の両端面で2乃至10cm^{-1}と見積もられるため、共振器全体の損失は500cm^{-1}以下となる。本実施例による活性層を用いれば、1250cm^{-1}の利得を持つために十分発振が可能である。

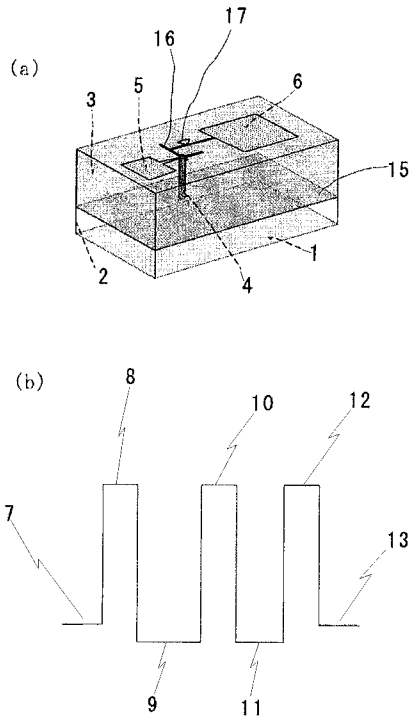
【００５０】

上記の如く、本実施例では、ストライプ状の表面プラズモン伝送路の伝播定数を電磁波の伝播方向に沿って周期的に変化させ、ブラッグ反射を利用することによって電磁波が定在波となる様にしている。しかし、共振器は、単純に、ストライプ状の表面プラズモン伝送路と伝送路の端部における反射面で形成することもできる。

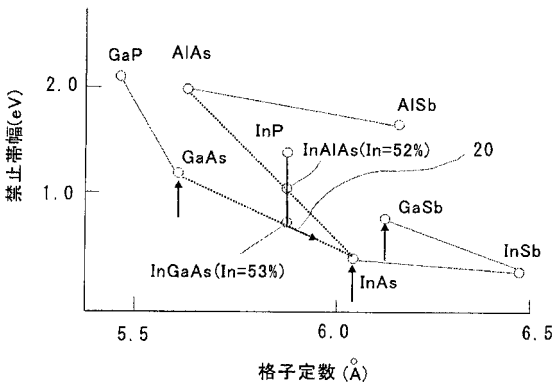
【００５１】
この様なレーザ発振する素子を用いてテラヘルツ帯での物体のセンシングを行う装置のブロック図を、図10に示す。発振素子、伝送媒体、検出器の順に構成しており、これらが一体化して集積デバイスを構成しても良い。伝送媒体としては空間、ファイバ、マイクロストリップ線路などの伝送路が用いられる。この伝送媒体中に検査したい検体を置くことで、テラヘルツ電磁波との相互作用について検出器で調べることになる。検出器としてはショットキーバリアダイオードやボロメータなどが適用できる。
【００５２】
また、検体に対する指紋スペクトルの有無を調べるために、複数周波数の本発明の発振素子を用意して、各周波数に対する損失のパターンから、予め取得したデータベースを元に検体を同定することができる。
【００５３】
（第4の実施例）
本発明による第4の実施例は、図11に示した様に、本発明による発振素子を同一基板上に集積化させ、テラヘルツ出力を向上させた上で、物体の透過／反射イメージングを行うものである。
【００５４】
第1の実施例の様なアンテナ84を有する発振素子が8つ同一基板81上にアレイ化され、誘電体83上の共通電極89と基板上電極82にバイアス電圧を印加すれば680GHzで発振する様になっている。アレイは、発振波長である約500μｍよりも短いピッチで並んでいれば発振周波数の引き込みが起こり、単素子に比べて出力を10倍程度に大きくすることができる。
【００５５】
この様な共鳴トンネルダイオードを用いた発振素子80を発振源とし、レンズ85、87及び2次元アレイ化された熱検出器88を用いて、物体86のテラヘルツイメージングを行うことができる。例えば、紙やプラティックでできた箱や袋の中に危険な物体等がある場合に、透視してイメージングを行うことで、これをチェックすることができる。同様にして、レンズや検出器の配置を換えれば反射イメージング装置とすることもできる。この様に、本実施例のイメージング装置は、本発明の発振素子を発振源として用いて、電磁波の検体に対する相互作用を2次元的に検査して画像データを取得している。
【００５６】
レンズとしては、透過率の高いポリエチレンやポリオレフィン、テフロン（商品名）などを主成分とする樹脂材料で構成することができる。以上の様に本発明による発振素子を用いて、非常にコンパクトで消費電力の小さい透視／反射イメージング装置を実現することができる。
【図面の簡単な説明】
【００５７】
【図１】本発明による発振素子の実施形態ないし実施例の斜視図及び活性層構造を示す図。
【図２】混晶半導体について説明する図。
【図３】第1の実施例のIn組成とピーク電流密度の関係の計算例を示す図。
【図４】第1の実施例のV-I特性及び利得特性の計算例を示す図。
【図５】InP基板上のInGaAs臨界膜厚の計算例を示す図。
【図６】第2の実施例の活性層構造を示す図。
【図７】第2の実施例のIn組成とピーク電流密度の計算例を示す図。
【図８】第2の実施例のV-I特性及び利得特性の計算例を示す図。
【図９】第3の実施例の発振素子の斜視図。
【図１０】第3の実施例のセンシング装置のブロック図。
【図１１】第4の実施例のアレイ発振素子及びイメージング装置を示す図。
【図１２】共鳴トンネルダイオード型発振素子の特性を示す図。
【符号の説明】

【００５８】
1、6、82、89、91、93…キャリア注入手段（電極）
2、81、90…基板
3、83…誘電体
4、92…利得媒質（ポスト、活性領域）
5、84…共振器（アンテナ）
8、10、12、62、64、66…障壁層
9、11、63、65…井戸層（伝導帯）
16…共振器（伝送路）
94…共振器（ストライプ伝送路）
80…発振素子
86…検査物体（検体）
88…検出器

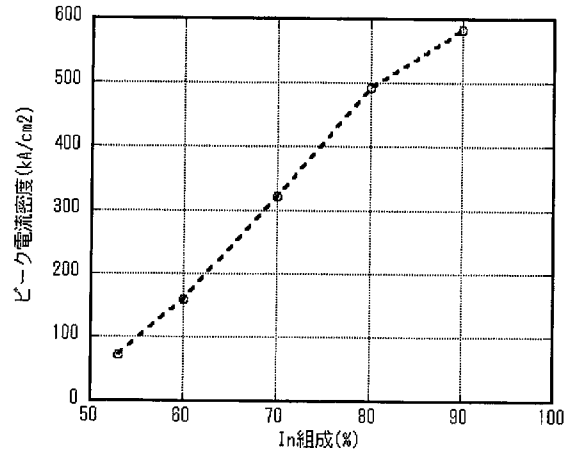
【図１】



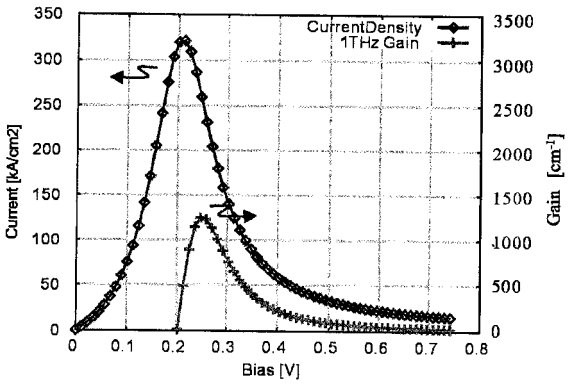
【図２】



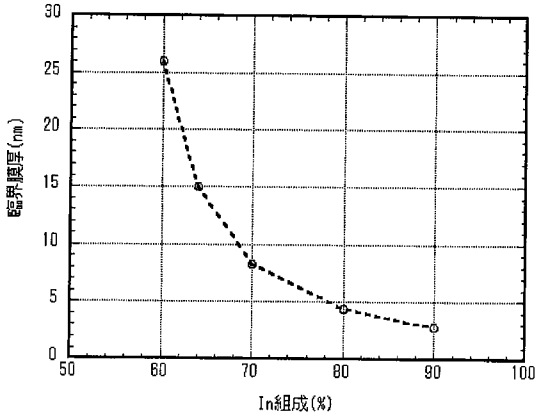
【図３】


ピーク電流密度(kA/cm2)
In組成(%)

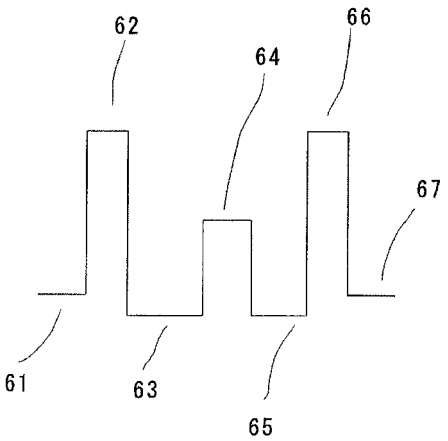
【図４】


CurrentDensity
1THz Gain
Current [kA/cm2]
Gain [cm-1]
Bias [V]

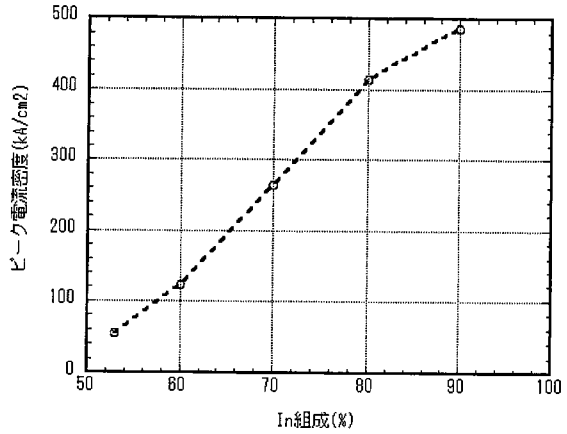
【図５】


臨界膜厚(nm)
In組成(%)

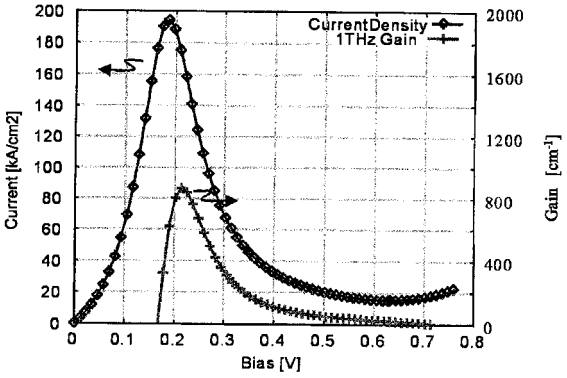
【図６】


61
62
63
64
65
66
67

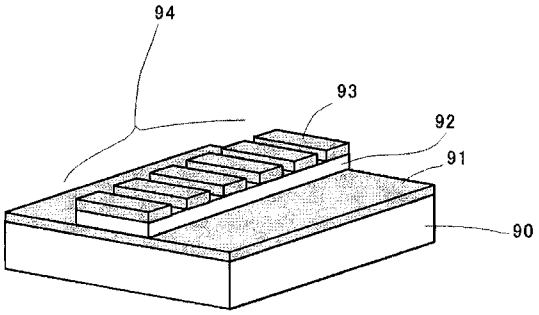
【図７】


ピーク電流密度(kA/cm2)
500
400
300
200
100
0
50
60
70
80
90
100
In組成(%)

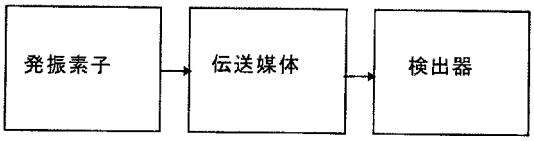
【図８】


CurrentDensity
1THz Gain
Current [kA/cm2]
Gain [cm-1]
Bias [V]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
2000
1600
1200
800
400
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8

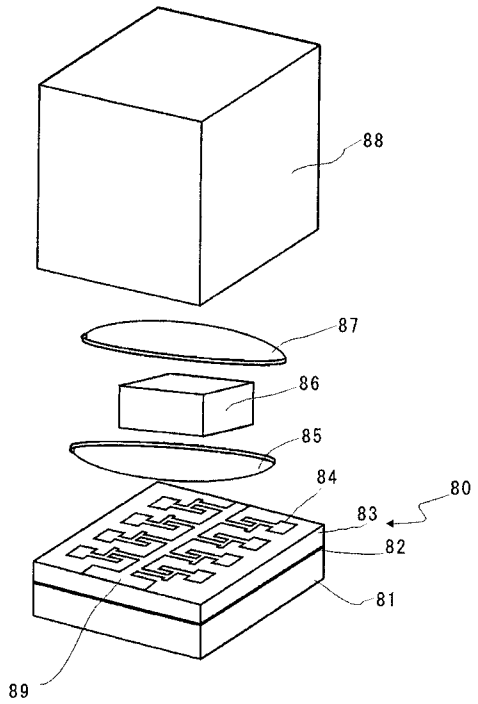
【図９】


94
93
92
91
90

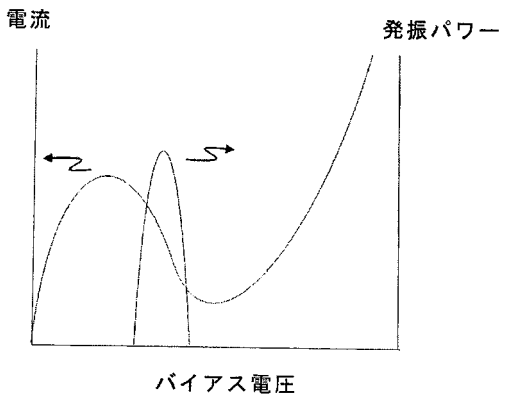
【図１０】


発振素子
伝送媒体
検出器

【図１１】



【図１２】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開昭６３－１５３８６７（ＪＰ，Ａ）
特開平１０－２７０７５６（ＪＰ，Ａ）
特表２００３－５１３４７６（ＪＰ，Ａ）
特開平０９－２８９３５３（ＪＰ，Ａ）
特開２００４－２９６６３５（ＪＰ，Ａ）
特開２００６－１０１４９５（ＪＰ，Ａ）
特開２００１－２９１９２９（ＪＰ，Ａ）
M.Asada, Density-Matrix Modeling of Terahertz Photon-Assisted Tunneling and Optical Gain in Resonant Tunnneling Stractures, Japanese Journal of Applied Physics, ２００１年９月, vol.40, no.9A, pp.5251-5256

(58)調査した分野(Int.Cl., ＤＢ名)
Ｈ０１Ｌ ２９／０６
Ｈ０１Ｌ ２９／６６
Ｈ０１Ｌ ２９／８８
Ｈ０１Ｌ ２１／３２９
Ｈ０１Ｓ １／０２