

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5809643号  
(P5809643)

(45) 発行日 平成27年11月11日(2015.11.11)

(24) 登録日 平成27年9月18日(2015.9.18)

(51) Int.Cl. F I  
G O 2 F 1/37 (2006.01) G O 2 F 1/37

請求項の数 12 (全 28 頁)

|               |                              |           |                     |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------------|
| (21) 出願番号     | 特願2012-547914 (P2012-547914) | (73) 特許権者 | 505127721           |
| (86) (22) 出願日 | 平成23年12月8日(2011.12.8)        |           | 公立大学法人大阪府立大学        |
| (86) 国際出願番号   | PCT/JP2011/078485            |           | 大阪府堺市中区学園町1番1号      |
| (87) 国際公開番号   | W02012/077769                | (73) 特許権者 | 000002130           |
| (87) 国際公開日    | 平成24年6月14日(2012.6.14)        |           | 住友電気工業株式会社          |
| 審査請求日         | 平成26年8月29日(2014.8.29)        |           | 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号 |
| (31) 優先権主張番号  | 特願2010-275013 (P2010-275013) | (74) 代理人  | 100088155           |
| (32) 優先日      | 平成22年12月9日(2010.12.9)        |           | 弁理士 長谷川 芳樹          |
| (33) 優先権主張国   | 日本国(JP)                      | (74) 代理人  | 100113435           |
|               |                              |           | 弁理士 黒木 義樹           |
|               |                              | (74) 代理人  | 100136722           |
|               |                              |           | 弁理士 ▲高▼木 邦夫         |
|               |                              | (74) 代理人  | 100183667           |
|               |                              |           | 弁理士 鄭 聖暉            |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光発生装置および光発生方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

入射光を増強して出力する共振器構造と、  
 前記入射光を前記共振器構造に入力する入力部と、  
 を備え、  
 前記入射光は、異なる偏光状態および異なる周波数を有する第1入射光および第2入射光であり、  
 前記入力部は、前記共振器構造における主面に垂直の方向から傾斜した角度で、前記第1入射光および前記第2入射光を入力し、  
 前記共振器構造は、前記第1入射光の周波数と前記第2入射光の周波数との差分に相当する周波数を有する光を出力する、  
 を備えることを特徴とする光発生装置。

【請求項2】

前記第1入射光がs偏光状態であり且つ前記第2入射光がp偏光状態である、または前記第1入射光がp偏光状態であり且つ前記第2入射光がs偏光状態である、  
 ことを特徴とする請求項1に記載の光発生装置。

【請求項3】

前記s偏光状態の入射光の周波数は、前記入力部の当該傾斜角度に応じたs偏光の共振周波数であり、

前記p偏光状態の入射光の周波数は、前記入力部の当該傾斜角度に応じたp偏光の共振

10

20

周波数である、

ことを特徴とする請求項 2 に記載の光発生装置。

【請求項 4】

前記共振器構造の温度を調節することにより、前記 s 偏光の共振周波数および前記 p 偏光の共振周波数を制御する温度調節部を更に備える、

ことを特徴とする請求項 3 に記載の光発生装置。

【請求項 5】

前記共振器構造は、GaAs 層からなる欠陥層と、GaAs 層および AlAs 層の積層からなる反射鏡を備えた単純共振器構造である、

ことを特徴とする請求項 1～4 の何れか 1 項に記載の光発生装置。

10

【請求項 6】

前記共振器構造は、GaAs 層からなる活性層および AlAs 層からなる非活性層の積層からなるフォトニック結晶と、GaAs 層および AlAs 層の積層からなる反射鏡を備えた複合フォトニック結晶構造である、

ことを特徴とする請求項 1～4 の何れか 1 項に記載の光発生装置。

【請求項 7】

前記反射鏡における前記 GaAs 層および前記 AlAs 層の膜厚が異なる、

ことを特徴とする請求項 6 に記載の光発生装置。

【請求項 8】

前記フォトニック結晶における前記 GaAs 層および前記 AlAs 層の有効膜厚の比は、前記 GaAs 層：前記 AlAs 層 = 1 : 1 であり、前記反射鏡における前記 GaAs 層および前記 AlAs 層の有効膜厚の比は、前記 GaAs 層：前記 AlAs 層 = 1 : 4 であり、前記フォトニック結晶と前記反射鏡で有効膜厚の比が異なることを特徴とする請求項 7 に記載の光発生装置。

20

【請求項 9】

前記共振器構造は、GaAs 層からなる活性層および AlAs 層からなる非活性層の積層からなるフォトニック結晶を備えた単純フォトニック結晶構造である、

ことを特徴とする請求項 1～4 の何れか 1 項に記載の光発生装置。

【請求項 10】

前記共振器構造は、前記入力部が前記傾斜した角度で前記第 1 入射光および前記第 2 入射光を入力したことにより、構造的複屈折が引き起こされ、その結果として異なる値を有するようになった前記 s 偏光の共振周波数および前記 p 偏光の共振周波数の差分に相当する周波数を有する光を出力する、

ことを特徴とする請求項 3 に記載の光発生装置。

30

【請求項 11】

入射光を増強して出力する共振器構造と、前記入射光を前記共振器構造に入力する入力部と、を備える光発生装置において、

前記入射光は、異なる偏光状態および異なる周波数を有する第 1 入射光および第 2 入射光であり、

前記入力部が、前記共振器構造における主面に垂直の方向から傾斜した角度で、前記第 1 入射光および前記第 2 入射光を入力するステップと、

40

前記共振器構造が、前記第 1 入射光の周波数と前記第 2 入射光の周波数との差分に相当する周波数を有する光を出力するステップと、

を備えることを特徴とする光発生方法。

【請求項 12】

前記第 1 入射光が s 偏光状態であり且つ前記第 2 入射光が p 偏光状態であり、または前記第 1 入射光が p 偏光状態であり且つ前記第 2 入射光が s 偏光状態であり、

前記 s 偏光状態の入射光の周波数は、前記入力部の当該傾斜角度に応じた s 偏光の共振周波数であり、

前記 p 偏光状態の入射光の周波数は、前記入力部の当該傾斜角度に応じた p 偏光の共振

50

周波数であり、

前記光発生装置は温度調節部を更に備え、

前記温度調節部が、前記共振器構造の温度を調節することにより、前記 s 偏光の共振周波数および前記 p 偏光の共振周波数を制御するステップを更に備える、

ことを特徴とする請求項 11 に記載の光発生方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光発生装置および光発生方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

近年、所望の周波数を有する光に対する研究として、特にテラヘルツ領域の光源の研究が盛んに行われている。テラヘルツ波は、分光技術を利用した多岐にわたる物性値測定や、当該テラヘルツ波の特性を生かしたイメージング技術に適用されることが考えられ、その応用分野は工業、医療、農業、バイオ、セキュリティなど、非常に広範囲に広がっている。その為、テラヘルツ波を発生させるための技術の向上に大いに注目が集まっている。例えば、非線形光学結晶を用いたテラヘルツ波の発生法として、複屈折を利用したもの（例えば、下記の非特許文献 1 を参照）、擬似位相整合によるもの（例えば、下記の非特許文献 2 を参照）、二重共振器を利用したもの（例えば、下記の非特許文献 3 を参照）、パラメトリック発振によるものなど、様々な方法が試みられている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献 1】 W. Shi and Y.J. Ding, Appl. Phys. Lett. 84, 2004, Number 10

【非特許文献 2】 K. L. Vodopyanov and M.N. Fejer et al., Appl. Phys. Lett. 89, 14119, 2006

【非特許文献 3】 Kitada et al., Appl. Phys. Lett. 95, 111106, 2009

【非特許文献 4】 Christoph Walther, et al. "Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6 THz, " Appl. Phys. Lett. 91, 131122, 2007

【非特許文献 5】 F. Hindle et al., C. R. Physique 9, 262-275, 2008

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかし、上記の非特許文献 1～3 で例示した従来の技術は、ポンプ光源に  $\text{GW}/\text{cm}^2$  オーダーの強い強度のレーザ光を用いる技術であったり、線幅を小さくしにくいパルス光を用いる技術であったり、原理的に素子が大きくなってしまいう技術であったり、光発生効率の低かったりする場合が多く、所望の周波数を有する光の発生法として現実的なものとは言えない。

【0005】

前述したように、上記の非特許文献 1～3 で例示した従来の技術は、全てポンプ光源にパルス光を用いた技術で、連続光源として評価したものはない。連続光は、パルス光より周波数領域のスペクトル分解能が優れている。そのため連続光の光源が市場で求められているものの、周波数可変領域、発生強度、小型化などの市場の要求を満たすものは少ない。連続光源には、カスケードレーザ（例えば、上記の非特許文献 4 を参照）やフォトミキシング技術（例えば、上記の非特許文献 5 を参照）が知られているが、THz 周波数帯の、特に指紋スペクトル検出に必要とされている 0.5～3.0 THz においては、前者は低温動作、後者は出力のオーダーが 100 nW 以下である。また、後者は周波数が高くなるにつれて出力が低下し、2 THz 以上では 1 nW 以下の出力となってしまう。なお、後者は入射光強度を上げることで発生強度を上げることが出来るが、入射光強度が一定以上高くなると、電極部分の熱破壊が生じるため、入射光強度を上げることによる出力強度向

10

20

30

40

50

上には上限が存在する。

【0006】

そこで、本発明は上記に鑑みてなされたもので、所望の周波数を有する光を効率良く発生させることが可能な光発生装置および光発生方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記課題を解決するために、本発明の光発生装置は、入射光を増強して出力する共振器構造と、前記入射光を前記共振器構造に入力する入力部と、を備え、前記入射光は、異なる偏光状態および異なる周波数を有する第1入射光および第2入射光であり、前記入力部は、前記共振器構造における主面に垂直の方向から傾斜した角度で、前記第1入射光および前記第2入射光を入力し、前記共振器構造は、前記第1入射光の周波数と前記第2入射光の周波数との差分に相当する周波数を有する光を出力する、を備えることを特徴とする。

10

【0008】

上記課題を解決するために、本発明の光発生方法は、入射光を増強して出力する共振器構造と、前記入射光を前記共振器構造に入力する入力部と、を備える光発生装置において、前記入射光は、異なる偏光状態および異なる周波数を有する第1入射光および第2入射光であり、前記入力部が、前記共振器構造における主面に垂直の方向から傾斜した角度で、前記第1入射光および前記第2入射光を入力するステップと、前記共振器構造が、前記第1入射光の周波数と前記第2入射光の周波数との差分に相当する周波数を有する光を出力するステップと、を備えることを特徴とする。

20

【0009】

このような本発明の光発生装置および光発生方法によれば、光発生装置は共振器構造および入力部を備え、入力部が、第1入射光および第2入射光を共振器構造における主面に対して角度をつけて入力すると、共振器構造は第1入射光の周波数と第2入射光の周波数との差分に相当する周波数を有する光を出力光として出力する。ここで、2つの入射光は互いに異なる偏光状態を有し、例えば第1入射光がs偏光状態であり且つ第2入射光がp偏光状態である。または第1入射光がp偏光状態であり且つ第2入射光がs偏光状態であっても良い。また、2つの入射光は互いに異なる周波数を有し、例えばs偏光状態の入射光の周波数は、入力部の当該傾斜角度に応じたs偏光の共振周波数と一致し、且つp偏光状態の入射光の周波数は、入力部の当該傾斜角度に応じたp偏光の共振周波数と一致することが好ましい。なお、ここでの共振周波数とは、共振器モードを発生させる周波数のことであり、当該共振周波数は周波数の一つの値を指すことに限られることなく、共振器モードを発生させるある程度の幅をもつ周波数帯であっても良い。以上のような本発明の光発生装置および光発生方法においては、入力部が角度をつけて入射光を入力することにより、異なる偏光状態の光に対して共振器構造の共振周波数にずれが発生する。これは、周期的薄膜構造が起こす構造的複屈折のために生じる現象と捉えられ、偏光によって有効屈折率が変化することが原因と考えられる。そして、当該ずれに相当する周波数を有する光が出力光として出力される。従って、発生すべき所望の周波数に応じて入力部が入射角度を調整することにより、所望の周波数の光を発生させることができる。つまり、本発明は周波数可変の光発生装置および光発生方法である。更に、本装置および方法によれば、光発生効率向上され、且つ装置全体の小型化が達成される。

30

40

【0010】

また、本発明においては、前記共振器構造の温度を調節することにより、前記s偏光の共振周波数および前記p偏光の共振周波数を制御する温度調節部を更に備えても良い。

【0011】

この発明によれば、共振器構造の温度を調節することにより、s偏光の共振周波数およびp偏光の共振周波数を制御し、これにより両方の共振周波数のうち何れか一方が一定となるように制御することができる。また、温度調節は比較的容易な制御手法といえるので、装置構成の利便性を向上させることができる。

50

## 【0012】

また、本発明において、前記共振器構造は、GaAs層からなる欠陥層と、GaAs層およびAlAs層の積層からなる反射鏡を備えた単純共振器構造であっても良い。

## 【0013】

また、本発明において、前記共振器構造は、GaAs層からなる活性層およびAlAs層からなる非活性層の積層からなるフォトニック結晶と、GaAs層およびAlAs層の積層からなる反射鏡を備えた複合フォトニック結晶構造であっても良い。

## 【0014】

また、本発明において、前記共振器構造は、GaAs層からなる活性層およびAlAs層からなる非活性層の積層からなるフォトニック結晶を備えた単純フォトニック結晶構造

10

## 【0015】

これらの発明によれば、本発明における共振器構造を構成するための具体的手法が提示される。

## 【0016】

また、本発明において、複合フォトニック結晶構造の反射鏡におけるGaAs層およびAlAs層の膜厚が異なっても良い。ここで、例えば、フォトニック結晶におけるGaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比は、GaAs層：AlAs層＝1：1であり、反射鏡におけるGaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比は、GaAs層：AlAs層＝1：4であるようにして、フォトニック結晶と反射鏡で有効膜厚の比が異なっても良い。

20

## 【0017】

これらの発明によれば、光発生効率の向上され、且つ装置全体の更なる小型化が達成される。

## 【0018】

また、本発明において、前記共振器構造は、前記入力部が前記傾斜した角度で前記第1入射光および前記第2入射光を入力したことにより、構造的複屈折が引き起こされ、その結果として異なる値を有するようになった前記s偏光の共振周波数および前記p偏光の共振周波数の差分に相当する周波数を有する光を出力しても良い。

## 【発明の効果】

## 【0019】

本発明によれば、所望の周波数を有する光を効率良く発生させることが可能な光発生装置および光発生方法を提供することができる。

30

## 【図面の簡単な説明】

## 【0020】

【図1】テラヘルツ光発生装置1の構成概要図である。

【図2】レーザ発振部10、11が角度をつけて第1入射光および第2入射光を共振器構造12に入力する様子をイメージしている図である。

【図3】レーザ発振部10、11が角度をつけてs偏光状態の第1入射光およびp偏光状態の第2入射光を共振器構造12に入力すると、共振器モードの発生する周波数にずれが発生することを説明するための図である。

40

【図4】レーザ発振部10、11が角度をつけてs偏光状態の第1入射光およびp偏光状態の第2入射光を共振器構造12に入力すると、共振器モードの発生する周波数にずれが発生することを説明するための図である。

【図5】温度調節により、ずれた共振周波数に変化が発生する様子を示す図である。

【図6】構成例1において共振器構造12として採用された単純共振器121の概念図である。

【図7】テラヘルツ光発生装置1を用いて所望のテラヘルツ領域の出力光を発生させる手順を示すフローチャートである。

【図8】構成例1において、入射角度θと発生させたい光の周波数の関係を示す図である。

。

50

【図 9】構成例 1 において、入射角度  $\theta$  と温度の関係を示す図である。

【図 10】構成例 1 において、入射角度  $\theta$  と変換効率の関係を示す図である。

【図 11】構成例 2 において共振器構造 1 2 として採用された複合フォトニック結晶構造 1 2 2 の概念図である。

【図 12】構成例 2 において、入射角度  $\theta$  と発生させたい光の周波数の関係を示す図である。

【図 13】構成例 2 において、入射角度  $\theta$  と温度の関係を示す図である。

【図 14】構成例 2 において、入射角度  $\theta$  と変換効率の関係を示す図である。

【図 15】構成例 3 において共振器構造 1 2 として採用された単純フォトニック結晶 1 2 3 の概念図である。

【図 16】構成例 3 において、入射角度  $\theta$  と発生させたい光の周波数の関係を示す図である。

【図 17】構成例 3 において、入射角度  $\theta$  と温度の関係を示す図である。

【図 18】構成例 3 において、入射角度  $\theta$  と変換効率の関係を示す図である。

【図 19】第 2 実施形態の複合フォトニック結晶構造 1 2 4 の概念図である。

【図 20】GaAs 層および AlAs 層の有効膜厚の比率を異ならせることで、p 偏光の透過ピークと s 偏光の透過ピークの周波数差  $\Delta\omega$  を変えることができることを説明するための図である。

【図 21】第 1 実施形態の構成例 2 の場合 (A) と第 2 実施形態の場合 (B) とで、透過率スペクトルの違いを説明するための図である。

【図 22】第 2 実施形態において、低角度入射時 (A) と高角度入射時 (B) の動作を示した図である。

【図 23】第 2 実施形態において、入射角度  $\theta$  と発生させたい光の周波数の関係を示す図である。

【図 24】第 2 実施形態において、入射角度  $\theta$  と温度の関係を示す図である。

【図 25】第 2 実施形態において、入射角度  $\theta$  と変換効率の関係を示す図である。

【図 26】第 1 実施形態の構成例 2 における変換効率と、第 2 実施形態のそれを比較して示すための図である。

【図 27】第 1 実施形態の構成例 2 における半値幅と、第 2 実施形態のそれを比較して示すための図である。

【図 28】図 27 の半値幅比較を log スケールで表示した図である。

【図 29】第 2 実施形態と、他の技術との性能比較を示すための図である。

【図 30】図 1 における光学系を、ファイバを用いた光学系として構成できることを説明するための図である。

【図 31】図 1 における光学系を、偏光ビームスプリッタを用いた光学系として構成できることを説明するための図である。

【発明を実施するための形態】

【0021】

以下、添付図面を参照して本発明にかかる光発生装置および光発生方法の好適な実施形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0022】

[第 1 実施形態]

(テラヘルツ光発生装置 1 の全体構成)

まず、本発明の第 1 実施形態に係るテラヘルツ光発生装置 1 (特許請求の範囲における「光発生装置」に相当) の構成について、図 1 を参照しながら説明する。図 1 は、テラヘルツ光発生装置 1 の構成概要図である。図 1 に示すように、テラヘルツ光発生装置 1 は、レーザ発振部 10、11 (特許請求の範囲における「入力部」に相当)、共振器構造 12、および温度調節器 13 (特許請求の範囲における「温度調節部」に相当) を主に備えて構成される。レーザ発振部 10、11 は、入射光をミラー 14 やレンズ 15 を介して共振

10

20

30

40

50

器構造 12 に入力するものである。共振器構造 12 は、レーザ発振部 10, 11 より入力した入射光を増強して出力光として出力するものである。

#### 【0023】

レーザ発振部 10, 11 が共振器構造 12 に入射する入射光は、第 1 入射光および第 2 入射光の二つの入射光である。2つの入射光は互いに異なる偏光状態を有し、例えば第 1 入射光が s 偏光状態であり且つ第 2 入射光が p 偏光状態であっても良く、または第 1 入射光が p 偏光状態であり且つ第 2 入射光が s 偏光状態であっても良い。なお、第 1 実施形態では、第 1 入射光が s 偏光状態であり、且つ第 2 入射光が p 偏光状態であることとし、レーザ発振部 10 が s 偏光状態の第 1 入射光を共振器構造 12 に入射し、且つレーザ発振部 11 が p 偏光状態の第 2 入射光を共振器構造 12 に入射することとする。

10

#### 【0024】

レーザ発振部 10, 11 は、共振器構造 12 における主面に垂直の方向から傾斜した角度で、第 1 入射光および第 2 入射光を共振器構造 12 に入力する。図 2 には、レーザ発振部 10, 11 が角度をつけて第 1 入射光および第 2 入射光を共振器構造 12 に入力する様子がイメージされている。レーザ発振部 10, 11 は、共振器構造 12 における主面 12a に垂直の方向である方向 D1 に対して角度  $\theta$  だけ傾斜した方向である方向 D2 で、第 1 入射光および第 2 入射光を入力する。第 1 実施形態において、レーザ発振部 10, 11 は、第 1 入射光および第 2 入射光を等角度で傾斜して入射させるとともに、当該傾斜角度  $\theta$  は  $0^\circ \sim 90^\circ$  の範囲において調整される。

#### 【0025】

20

レーザ発振部 10, 11 が角度をつけて s 偏光状態の第 1 入射光および p 偏光状態の第 2 入射光を共振器構造 12 に入力すると、共振器モードの発生する周波数（以下、「共振周波数」ともいう。共振周波数は周波数の一つの値を指すことに限られることなく、共振器モードを発生させるある程度の幅をもつ周波数帯であっても良い。）にずれが発生する。図 3、4 にはこれが波長に対する透過率としてイメージされている。図 3 には、レーザ発振部 10, 11 が共振器構造 12 における主面 12a に垂直に s 偏光状態の第 1 入射光および p 偏光状態の第 2 入射光を入力した場合が、グラフ G1 および G2 で表示されている。s 偏光状態の第 1 入射光のグラフ G1 における共振周波数は波長 H1（例えば 1064 nm）に相当する周波数であり、p 偏光状態の第 2 入射光のグラフ G2 における共振周波数は波長 H2（例えば 1064 nm）に相当する周波数である。また、図 4 には、レーザ発振部 10, 11 が共振器構造 12 における主面 12a に  $15^\circ$  だけ角度をつけて s 偏光状態の第 1 入射光および p 偏光状態の第 2 入射光を入力した場合が、グラフ G3 および G4 でそれぞれ表示されている。s 偏光状態の第 1 入射光のグラフ G3 における共振周波数は波長 H3 に相当する周波数であり、p 偏光状態の第 2 入射光のグラフ G4 における共振周波数は波長 H4 に相当する周波数である。図 3 に示されるように、垂直入射の場合は、s 偏光と p 偏光との間に共振周波数のずれは生じない。つまり、波長 H1 と波長 H2 は一致している。したがって、図 3 においてはグラフ G1 および G2 が重なって表示されている。一方、 $15^\circ$  傾斜して入射した場合には、共振周波数のずれが発生しており、図 4 においては、当該ずれが符号 Z1 で表示されている。また、図 4 において、グラフ G3 はグラフ G1 からシフトされ、共振周波数の波長が波長 H1 から波長 H3 にシフトされたことを表し、グラフ G4 はグラフ G2 からシフトされ、共振周波数の波長が波長 H2 から波長 H4 にシフトされたことを表す。なお、図 3、4 は後述の構成例 3 において、共振器構造 12 として単純フォトリソニック結晶 123 を採用し、入射角度  $\theta$  をそれぞれ  $0^\circ$ 、 $15^\circ$  とした場合である。また、後述するが、第 1 実施形態のテラヘルツ光発生装置 1 の出力光は、後述の温度調節を施さない場合には、図 4 に示したずれ Z1 に相当する周波数を有する。

30

40

#### 【0026】

レーザ発振部 10, 11 により共振器構造 12 に入力される 2つの入射光は、互いに異なる周波数を有する。例えば、s 偏光状態の第 1 入射光の周波数は、レーザ発振部 10 の傾斜角度  $\theta$  に応じた s 偏光の共振周波数と一致し、p 偏光状態の第 2 入射光の周波数は、

50

レーザ発振部 11 の傾斜角度  $\theta$  に応じた p 偏光の共振周波数と一致する。具体的に、図 4 の例において  $15^\circ$  傾斜して入射した場合に、s 偏光に対しては波長 H3 でその透過率がピークとなっており、s 偏光状態の第 1 入射光は波長 H3 に相当する周波数を有する。また、p 偏光に対しては波長 H4 でその透過率がピークとなっており、p 偏光状態の第 2 入射光は波長 H4 に相当する周波数を有する。なお、後述の構成例 1～3 のそれぞれの場合において  $15^\circ$  傾斜して入射した場合に、構成例 1 の単純共振器の場合は波長 H4 が  $1060.85\text{ nm}$  であり、構成例 2 の複合フォトニック結晶の場合は波長 H4 が  $1060.4\text{ nm}$  であり、構成例 3 の単純フォトニック結晶の場合は波長 H4 が  $1060.15\text{ nm}$  であった。しかし、実際には装置設計の便宜を図り、後述するような温度調節を行い、s 偏光状態の第 1 入射光が図 5 に示す波長 H5 に相当する周波数を有するように、且つ p 偏光状態の第 2 入射光が図 5 に示す波長 H6（例えば  $1064\text{ nm}$ ）に相当する周波数を有するように制御する。図 5 は、図 4 のような状況において、温度調節により共振周波数に変化が発生する様子を示す図である。s 偏光状態の第 1 入射光の周波数を  $\nu_1$ （波長 H5 に相当する周波数）とし、p 偏光状態の第 2 入射光の周波数を  $\nu_2$ （波長 H6 に相当する周波数）とした場合に、出力光の周波数はその差分の  $|\nu_1 - \nu_2|$  である。

#### 【0027】

ここで、温度調節器 13 について詳細に説明する。入射角度  $\theta$  を大きくすると、共振器モードの周波数が高周波数側に移動してしまう。これを表したのが上述の図 3 および図 4 である。そこで、温度調節器 13 が、移動してしまった共振周波数を元の共振周波数に戻すため、共振器構造 12 に温度調節を施して屈折率を制御する。これにより、s 偏光状態の第 1 入射光の共振周波数および p 偏光状態の第 2 入射光の共振周波数を制御し、両方の共振周波数のうち何れか一方が一定となるように制御される。第 1 実施形態においては、p 偏光状態の第 2 入射光の共振周波数が、入射角度がゼロの状態（垂直入射の状態）の共振周波数に戻って一定となるように制御される。図 5 にはそれが矢印でイメージされており、温度調節を施した後に、s 偏光状態の第 1 入射光の共振周波数は波長 H3 から波長 H5 に変化されている。また、p 偏光状態の第 2 入射光の共振周波数（波長 H4 に相当する周波数）は温度調節により波長 H6 に変化されている。なお、波長 H6 は、垂直入射時の共振周波数（波長 H1 および H2 に相当する周波数、図 3、4 参照）と一致またはその近傍の波長である。そして、このような温度調節後は、図 5 にて符号 Z2 で表示される波長の差分に相当する周波数の差分が、第 1 実施形態のテラヘルツ光発生装置 1 の出力光の周波数となる。なお、上述した通り、温度調節を施さない場合には、図 4、5 にて符号 Z1 で表示される波長の差分に相当する周波数の差分が、第 1 実施形態のテラヘルツ光発生装置 1 の出力光の周波数となる。

#### 【0028】

このときの温度調節の範囲は、例えば  $220\text{ K} \sim 390\text{ K}$  の範囲である。なお、温度調節の範囲は、使用する共振器構造によって、つまり共振器構造の膜数、膜厚、材料によって変化する。なお、屈折率の温度依存性を下記の式（1）および（2）に示す。式（1）は共振器構造 12 が GaAs からなる部分を含む場合に、当該部分における屈折率の温度依存性を示す。また、式（2）は共振器構造 12 が AlAs からなる部分を含む場合に、当該部分における屈折率の温度依存性を示す。なお、式（1）および（2）において、n は屈折率を示し、T は共振器構造 12 の温度を示す。

#### 【数 1】

$$\left(\frac{dn}{dT}\right)_{\text{GaAs}} = 2.67 \times 10^{-4} [1/K] \quad \cdots (1)$$

#### 【数 2】

$$\left(\frac{dn}{dT}\right)_{\text{AlAs}} = 1.43 \times 10^{-4} [1/K] \quad \cdots (2)$$

10

20

30

40

50

## 【0029】

なお、下記の参考文献1は、温度調節により周波数制御を行う技術に関する参考文献である。

<参考文献1> J. Talghader and J. S. Smith, Appl. Phys. Lett. 66, 335, 1995

## 【0030】

図1に戻り、共振器構造12は、上記の $\nu_1$ の周波数を有するs偏光状態の第1入射光をシグナル光として、且つ上記の $\nu_2$ の周波数を有するp偏光状態の第2入射光をポンプ光としてレーザ発振部10、11よりそれぞれ入力し、両入射光の周波数の差分、つまり $|\nu_1 - \nu_2|$ に相当する周波数を有する出力光をアイドラー光として出力する。つまり、共振器構造12は、レーザ発振部10、11が上記傾斜した角度 $\theta$ でs偏光状態の第1入射光をシグナル光として、且つp偏光状態の第2入射光をポンプ光として入力したことにより、構造的複屈折が引き起こされ、その結果として異なる値を有するようになったs偏光の共振周波数およびp偏光の共振周波数の差分に相当する周波数を有する光を出力する。第1実施形態では、下記の構成例1～3により、共振器構造12がテラヘルツ領域の光をアイドラー光として出力することとなる。

## 【0031】

以下、複数種類の共振器構造12を利用した第1実施形態のテラヘルツ光発生装置1の構成例について説明する。

## 【0032】

(構成例1)

最初の構成例は、共振器構造12として単純共振器を採用した場合である。図6は、この場合の単純共振器121の概念図である。図6に示されるように、単純共振器121は、GaAs層からなる欠陥層と、GaAs層およびAlAs層の積層からなる反射鏡(DBR: Distributed BraggReflector)を備えた構造を有する。

## 【0033】

単純共振器121におけるパラメータをまとめると以下の通りである。

1. DBRにおけるGaAs層について、

膜厚: 99.09 nm

層数: 17層

屈折率: 3.588 (波長: 1064 nm)

2. DBRにおけるAlAs層について、

膜厚: 65.73 nm

層数: 17層

屈折率: 2.989 (波長: 1064 nm)

3. 欠陥層のGaAs層について、

膜厚: 2391.7 nm

層数: 1層

屈折率: 3.588 (波長: 1064 nm)

4. DBRにおける周期数: 前後それぞれ17周期ずつ、合計34周期

5. 合計結晶長: 7995.24 nm

## 【0034】

このような構造の単純共振器121を備えたテラヘルツ光発生装置1を用いて所望のテラヘルツ領域の出力光を発生させる手順を図7のフローチャートに示す。最初に、用途に応じて発生させたいテラヘルツ波の周波数を決定する(ステップS1)。次に、共振器構造12の種類を決定する(ステップS2)。本構成例においては単純共振器121が決定されたとする。

## 【0035】

次に、発生させたいテラヘルツ波の周波数に応じて、s偏光状態の第1入射光(シグナル光)およびp偏光状態の第2入射光(ポンプ光)の入射角度 $\theta$ を決定する(ステップS3)。入射角度 $\theta$ は発生させたい光の周波数によって決定されるものであり、図8は単純

共振器 1 2 1 が共振器構造 1 2 として決定された場合に、入射角度  $\theta$  と発生させたい光の周波数の関係を示す。図 8 に示されるように、例えば 0.31 THz の光を発生させたい場合には、入射角度  $\theta$  を 65° と決定することができる。

#### 【0036】

図 7 に戻り、次の手順として、ポンプ光の周波数および強度、シグナル光の周波数および強度、そして単純共振器 1 2 1 の温度を決定する（ステップ S 4）。上記例のように、例えば 0.31 THz の光を発生させたい場合に、ポンプ光の周波数を約 281.95 THz（波長：1064 nm）として一定に保ち、その強度は 1 MW/cm<sup>2</sup> と決定する。なお、変換効率を考慮すると、できれば高い強度の方が望ましい。また、シグナル光の周波数は 281.95 THz－差周波（発生させたい光の周波数）で決定することが出来るため、約 281.64 THz と決定する。シグナル光の強度については、ポンプ光の強度と同程度か、それ以下の強度とする。また、単純共振器 1 2 1 の温度は、図 9 に示されるように、例えば 0.31 THz の光を発生させるために入射角度  $\theta$  を 65° と決定した場合に、絶対温度として 340 K と決定することができる。温度調節によりポンプ光の周波数が上記の約 281.95 THz（波長：1064 nm）として一定に保たれる。

10

#### 【0037】

以上により、所望の 0.31 THz の光が発生される。図 10 は、このときの変換効率を示す。図 10 に示されるように、入射角度  $\theta$  を 65° とし、且つ 340 K で単純共振器 1 2 1 を温度調節した場合に、そのときの変換効率は 2.1 e - 006 % である。他の周波数範囲での結果を参酌すると、入射角度  $\theta$  を大きくするにつれ、変換効率は高くなり、65° 付近で変換効率の最大値が現れる。なお、図 10 では最大の変換効率が 2.1 e - 006 % と表示されているが、これは、現在のすぐ使用可能なレーザ光源の性能を考慮し、閉じ込め効果を弱めたためであり、条件を変えることにより、より高い変換効率の値を得ることができる。

20

#### 【0038】

本構成例の優れた点は、1. 素子の薄さ、2. 発生周波数が可変であること、3. 高出力の連続光源となり得ること、が一例として挙げられる。素子、つまり共振器構造 1 2 の薄さにおいては、従来知られているものと比べると 3 桁のオーダーで薄いものになっている。また、変換効率は厚さの 2 乗に比例して上昇するので、それを加味すると、本構成例の装置が比類ない性能を有した装置であることがいえる。ここで、非特許文献 3 の装置は、その構成が本構成例の装置と全く異なるため比較の対象にならないものの、共振器構造の薄さだけにおいては、本構成例と同程度のオーダーのものであると考えられる。同文献では未だ変換効率の議論に達してさえいないので、本構成例の装置との間で変換効率の比較をすることはできない。しかし、本発明者の知見では、入射光の強度や素子の厚さ等の条件を同等なものにした場合に、本構成例の方が変換効率の面で比べ物にならないほど優れていると考えられる。

30

#### 【0039】

更に、発生周波数や入射光の周波数が可変であることは、テラヘルツ波の応用に非常に有利に働く。これは非特許文献 2 の疑似位相整合や非特許文献 3 の 2 重共振器にはない性能であり、両文献の技術に比べて、本構成例の方が応用に適した装置であるといえる。

40

#### 【0040】

また、変換効率は入射光強度に比例するので、連続光より尖頭値が高いパルス光の方が変換効率の数値は高くなる。そのため、多くの研究（例えば、上記の非特許文献 1～3）でパルス光における変換効率を計算しているが、パルス光の周波数領域分解能は連続光のそれに劣るので、例えば吸収スペクトル等を得る時には精度が劣る。非線形光学効果を用いた波長変換技術で連続光のテラヘルツ発生の試みを行った文献は非常に少ないため、本明細書では、仕方なく、パルス光との比較を行う。パルス光の場合に比べて、第 1 実施形態における変換効率の数値そのものが劣るのは、仕方のないことである。

#### 【0041】

ここで、フォトミキシング（例えば、上記の非特許文献 5）における出力は周波数が高

50

くなるにつれてオーダー単位で低下するが、第1実施形態における出力は0.5-3.0 THzの周波数領域でもそれほど低下しない。また、発生するテラヘルツ光の線幅は、ポンプ光・シグナル光の線幅とほぼ同等のオーダーとなると考えられる。第1実施形態における構成例ではGHzオーダーの線幅を想定してはいるものの、現在kHzやMHzの連続光源も市販されているため、それに合わせた設計で、変換効率の更なる上昇が望める。また、現在の構成例でも、GHz以下の線幅の光源を入射させると、ほぼ同じオーダーの線幅の光が発生できる。また、共振器構造12の構造の相違（下記の構成例2や3で示すように構造そのものの違いや、成長面の差異）によっても、変換効率の値が上記示した値より高くなる場合がある。

#### 【0042】

10

（構成例2）

次の構成例は、共振器構造12として複合フォトニック結晶構造122を採用した場合である。図11は、この場合の複合フォトニック結晶構造122の概念図である。図11に示されるように、複合フォトニック結晶構造122は、GaAs層からなる活性層およびAlAs層からなる非活性層の積層からなるフォトニック結晶と、GaAs層およびAlAs層の積層からなる反射鏡（DBR）を備えた構造を有する。

#### 【0043】

複合フォトニック結晶構造122におけるパラメータをまとめると以下の通りである。

1. DBRにおけるGaAs層について、

膜厚：79.18 nm

20

層数：14層

屈折率：3.382（波長：1064 nm、温度：200 K）

2. DBRにおけるAlAs層について、

膜厚：92.49 nm

層数：14層

屈折率：2.895（波長：1064 nm、温度：200 K）

3. フォトニック結晶におけるGaAs層について、

膜厚：72.53 nm

層数：13層

屈折率：3.382（波長：1064 nm、温度：200 K）

30

4. フォトニック結晶におけるAlAs層について、

膜厚：84.72 nm

層数：12層

屈折率：2.895（波長：1064 nm、温度：200 K）

5. DBRにおける周期数：前後それぞれ14周期ずつ、合計28周期

6. 合計結晶長：6766.01 nm

#### 【0044】

このような構造の複合フォトニック結晶構造122を備えたテラヘルツ光発生装置1を用いて所望のテラヘルツ領域の出力光を発生させる手順は、図7のフローチャートに示した通りである。最初に、用途に応じて発生させたいテラヘルツ波の周波数を決定する（ステップS1）。次に、共振器構造12の種類を決定する（ステップS2）。本構成例においては複合フォトニック結晶構造122が決定されたとする。

40

#### 【0045】

次に、発生させたいテラヘルツ波の周波数に応じて、s偏光状態の第1入射光（シグナル光）およびp偏光状態の第2入射光（ポンプ光）の入射角度 $\theta$ を決定する（ステップS3）。入射角度 $\theta$ は発生させたい光の周波数によって決定されるものであり、図12は複合フォトニック結晶構造122が共振器構造として決定された場合に、入射角度 $\theta$ と発生させたい光の周波数の関係を示す。図12に示されるように、例えば1.55 THzの光を発生させたい場合には、入射角度 $\theta$ を67°と決定することができる。

#### 【0046】

50

図7に戻り、次の手順として、ポンプ光の周波数および強度、シグナル光の周波数および強度、そして複合フォトニック結晶構造122の温度を決定する(ステップS4)。上記例のように、例えば1.55THzの光を発生させたい場合に、ポンプ光の周波数を約281.95THz(波長:1064nm)として一定に保ち、その強度は1MW/cm<sup>2</sup>と決定する。なお、変換効率を考慮すると、できれば高い強度の方が望ましい。また、シグナル光の周波数は281.95THz-差周波(発生させたい光の周波数)で決定することが出来るため、約280.4THzと決定する。シグナル光の強度については、ポンプ光の強度と同程度か、それ以下の強度とする。また、複合フォトニック結晶構造122の温度は、図13に示されるように、例えば1.55THzの光を発生させるために入射角度θを67°と決定した場合に、絶対温度として380Kと決定することができる。温度調節によりポンプ光の周波数が上記の約281.95THz(波長:1064nm)として一定に保たれる。

10

**【0047】**

以上により、所望の1.55THzの光が発生される。図14は、このときの変換効率を示す。図14に示されるように、入射角度θを67°とし、且つ380Kで複合フォトニック結晶構造122を温度調節した場合に、そのときの変換効率は6e-005%である。他の周波数範囲での結果を参酌すると、入射角度θを大きくするにつれ、変換効率は高くなり、67°付近で変換効率の最大値が現れる。なお、図14では最大の変換効率が6e-005%と表示されているが、これは、現在のすぐに使用可能なレーザ光源の性能を考慮し、閉じ込め効果を弱めたためであり、条件を変えることにより、より高い変換効率の値を得ることができる。なお、本構成例の優れた点については、上記構成例1で述べたことと同様のことがいえるので、記載を省略する。

20

**【0048】**

(構成例3)

次の構成例は、共振器構造12として単純フォトニック結晶123を採用した場合である。図15は、この場合の単純フォトニック結晶123の概念図である。図15に示されるように、単純フォトニック結晶123は、GaAs層からなる活性層およびAlAs層からなる非活性層の積層からなるフォトニック結晶を備えた構造を有する。

**【0049】**

単純フォトニック結晶123におけるパラメータをまとめると以下の通りである。

30

1. フォトニック結晶におけるGaAs層について、

膜厚:74.74nm

層数:70層

屈折率:3.588(波長:1064nm)

2. フォトニック結晶におけるAlAs層について、

膜厚:87.31nm

層数:69層

屈折率:2.989(波長:1064nm)

3. 合計結晶長:11256.19nm

**【0050】**

このような構造の単純フォトニック結晶123を備えたテラヘルツ光発生装置1を用いて所望のテラヘルツ領域の出力光を発生させる手順は、図7のフローチャートに示した通りである。最初に、用途に応じて発生させたいテラヘルツ波の周波数を決定する(ステップS1)。次に、共振器構造12の種類を決定する(ステップS2)。本構成例においては単純フォトニック結晶123が決定されたとする。

40

**【0051】**

次に、発生させたいテラヘルツ波の周波数に応じて、s偏光状態の第1入射光(シグナル光)およびp偏光状態の第2入射光(ポンプ光)の入射角度θを決定する(ステップS3)。入射角度θは発生させたい光の周波数によって決定されるものであり、図16は単純フォトニック結晶123が共振器構造として決定された場合に、入射角度θと発生させ

50

たい光の周波数の関係を示す。図16に示されるように、例えば3THzの光を発生させたい場合には、入射角度 $\theta$ を85°と決定することができる。

#### 【0052】

図7に戻り、次の手順として、ポンプ光の周波数および強度、シグナル光の周波数および強度、そして単純フォトリック結晶123の温度を決定する（ステップS4）。上記例のように、例えば3THzの光を発生させたい場合に、ポンプ光の周波数を約281.95THz（波長：1064nm）として一定に保ち、その強度は1MW/cm<sup>2</sup>と決定する。なお、変換効率を考慮すると、できれば高い強度の方が望ましい。また、シグナル光の周波数は281.95THz－差周波（発生させたい光の周波数）で決定することが出来るため、約278.95THzと決定する。シグナル光の強度については、ポンプ光の強度と同程度か、それ以下の強度とする。また、単純フォトリック結晶123の温度は、図17に示されるように、例えば3THzの光を発生させるために入射角度 $\theta$ を85°と決定した場合に、絶対温度として420Kと決定することができる。温度調節によりポンプ光の周波数が上記の約281.95THz（波長：1064nm）として一定に保たれる。

10

#### 【0053】

以上により、所望の3THzの光が発生される。図18は、このときの変換効率を示す。図18に示されるように、入射角度 $\theta$ を85°とし、且つ420Kで単純フォトリック結晶123を温度調節した場合に、そのときの変換効率は3.9e-005%である。他の周波数範囲での結果を参酌すると、入射角度 $\theta$ を大きくするにつれ、変換効率は高くなり、85°付近で変換効率の最大値が現れる。なお、図18では最大の変換効率が3.9e-005%と表示されているが、これは、現在のすぐに使用可能なレーザ光源の性能を考慮し、閉じ込め効果を弱めたためであり、条件を変えることにより、より高い変換効率の値を得ることができる。なお、本構成例の優れた点については、上記構成例1で述べたことと同様のことがいえるので、記載を省略する。

20

#### 【0054】

（第1実施形態の作用および効果）

続いて、第1実施形態にかかるテラヘルツ光発生装置1の作用および効果について説明する。第1実施形態のテラヘルツ光発生装置1では、GaAs/AlAs共振器構造12を用いてテラヘルツ波を発生させている。共振器構造12に角度をつけて光を入射すると、角度が大きくなるにつれて透過率スペクトルはシフトするが、s偏光とp偏光でそのシフトする周波数の幅に差が生じてくる（図3参照）。これは、周期的薄膜構造が起こす構造的複屈折のために生じる現象と捉えられ、偏光によって有効屈折率が変化するためと考えられる。そのとき、それぞれの偏光の透過率スペクトルに合わせた2つの周波数の光を入射させることによって、共振器構造の内部で光電場が増強され、強い差周波発生（DFG：Difference Frequency Generation）を生じさせることができる。生じた差周波はテラヘルツ領域に達し、上記で述べたようにその変換効率も高い。なお、第1実施形態において入射光の強度がMW/cm<sup>2</sup>オーダーでの連続光発生であることを考慮すれば、第1実施形態による変換効率は従来の技術（特に入射光の強度がGW/cm<sup>2</sup>オーダーの場合）に比べて非常に優れているといえる。更に、入射角度 $\theta$ とともに差周波の周波数も変化するため（図8、図12、図16参照）、第1実施形態のテラヘルツ光発生装置1は周波数可変のテラヘルツ光源として活用することが可能である。

30

40

#### 【0055】

また、単純共振器121の合計結晶長が8.0μmであり、複合フォトリック結晶構造122の合計結晶長が6.9μmであり、単純フォトリック結晶123の合計結晶長が11.26μmであることからわかるように、第1実施形態のテラヘルツ光発生装置1における共振器構造12の結晶長は長くても数十μm程度である。したがって、装置全体の小型化が達成でき、第1実施形態のテラヘルツ光発生装置1は汎用性の高いテラヘルツ光源として適用されることができる。

#### 【0056】

50

また、第1実施形態では、レーザ発振部10、11が等角度で第1入射光および第2入射光を共振器構造12に入射し、温度調節器13が共振器構造12に温度調節を施している。これにより、s偏光の共振周波数およびp偏光の共振周波数が制御され、両方の共振周波数のうち何れか一方が一定となるように制御される。また、温度調節は比較的容易な制御手法といえるので、装置構成の利便性を向上させることができる。

#### 【0057】

##### [第2実施形態]

以下、本発明の第2実施形態について説明する。第2実施形態は第1実施形態の構成例2と共通点が多く、差異点としては、反射鏡におけるGaAs層およびAlAs層の膜厚が異なることである。より具体的には、第2実施形態では、反射鏡におけるGaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比が、GaAs層：AlAs層＝1：4である。これに対して、第1実施形態の構成例2では、反射鏡におけるGaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比が、GaAs層：AlAs層＝1：1である。以下、第1実施形態の構成例2との共通点についてはなるべく説明を省略し、差異点を中心に説明する。

#### 【0058】

すなわち、第1実施形態の構成例2におけるGaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比は、以下の通りである。なお、有効膜厚は、膜厚に屈折率を乗じた値である。

##### 1. DBR部分において

GaAs層の有効膜厚＝ $79.18 \times 3.382 = 267.8$

AlAs層の有効膜厚＝ $92.49 \times 2.895 = 267.8$

GaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比＝ $267.8 : 267.8 = 1 : 1$

##### 2. フォトニック結晶部分において

GaAs層の有効膜厚＝ $72.53 \times 3.382 = 245.3$

AlAs層の有効膜厚＝ $84.72 \times 2.895 = 245.3$

GaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比＝ $245.3 : 245.3 = 1 : 1$

#### 【0059】

一方で、第2実施形態では、図1の共振器構造12として第1実施形態の構成例2と同様に複合フォトニック結晶構造を採用しているが、DBR部分における膜厚が異なる。図19は、第2実施形態の複合フォトニック結晶構造124の概念図である。図19に示されるように、複合フォトニック結晶構造124は、GaAs層からなる活性層およびAlAs層からなる非活性層の積層からなるフォトニック結晶と、GaAs層およびAlAs層の積層からなる反射鏡(DBR)を備えた構造を有する。

#### 【0060】

複合フォトニック結晶構造124におけるパラメータをまとめると以下の通りである。

##### 1. DBRにおけるGaAs層について、

膜厚：31.00 nm

層数：30層

屈折率：3.382 (波長：1064 nm、温度：200 K)

##### 2. DBRにおけるAlAs層について、

膜厚：145.00 nm

層数：30層

屈折率：2.895 (波長：1064 nm、温度：200 K)

##### 3. フォトニック結晶におけるGaAs層について、

膜厚：74.50 nm

層数：45層

屈折率：3.382 (波長：1064 nm、温度：200 K)

##### 4. フォトニック結晶におけるAlAs層について、

膜厚：87.00 nm

層数：44層

屈折率：2.895 (波長：1064 nm、温度：200 K)

5. DBRにおける周期数：前後それぞれ30周期ずつ、合計60周期

6. 合計結晶長：17740.5nm

#### 【0061】

したがって、第2実施形態におけるGaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比は、以下の通りである。

1. DBR部分において

GaAs層の有効膜厚 =  $31.00 \times 3.382 = 104.8$

AlAs層の有効膜厚 =  $145.00 \times 2.895 = 419.8$

GaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比 =  $104.8 : 419.8 = 1 : 4$

2. フォトニック結晶部分において

GaAs層の有効膜厚 =  $74.50 \times 3.382 = 252.0$

AlAs層の有効膜厚 =  $87.00 \times 2.895 = 251.9$

GaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比 =  $252.0 : 251.9 = 1 : 1$

#### 【0062】

以上で示したように、第2実施形態では、フォトニック結晶部分においてはGaAs層およびAlAs層の有効膜厚が一致しているものの、DBR部分におけるGaAs層およびAlAs層の有効膜厚は比率1:4で異なる。

#### 【0063】

GaAs層の有効膜厚とAlAs層の有効膜厚を異ならせることで、つまりGaAs層およびAlAs層の有効膜厚の比率を異ならせることで、p偏光の透過ピークとs偏光の透過ピークの周波数差 $\Delta\omega$ （図4、5におけるZ1、Z2に相当）を変えることができる。図20はこれを示しており、同図（A）の横軸のXは有効膜厚の比率を示し、縦軸は $\Delta\omega$ を示す。なお、Xは以下の数式で表現される値である。

$$X = \text{AlAs層の有効膜厚} / (\text{GaAs層の有効膜厚} + \text{AlAs層の有効膜厚})$$

#### 【0064】

図20（A）で示されるように、有効膜厚の比率が1:1である $X = 0.5$ の場合（同図（B）、第1実施形態の構成例2の場合）には、大きい値（1.07THz）の差周波が得られ、有効膜厚の比率が1:4である $X = 0.8$ の場合（同図（C）、第2実施形態）には、小さい値（0.3THz）の差周波が得られる。なお、図20（B）、（C）において、グラフG7、9はs偏光の透過率スペクトルを示し、グラフG8、10はp偏光の透過率スペクトルを示す。なお、図20において、Xは有効膜厚の比を示しているが、屈折率を乗じない膜厚の比でも同じような $\Delta\omega$ の挙動を示すので、以下の説明においては、有効膜厚の比を単に膜厚比と記載する。

#### 【0065】

図21は、第1実施形態の構成例2の場合と第2実施形態の場合とで、透過率スペクトルの違いを説明するための図である。同図（A）は第1実施形態の構成例2の場合を示し、同図（B）は第2実施形態の場合を示す。どちらもフォトニック結晶（PC）は、1:1の膜厚比で構成し、 $\Delta\omega$ は最大のものを使用している。しかし、DBRにおいては、同図（A）の第1実施形態の構成例2の場合は1:1の膜厚比であり、同図（B）の第2実施形態では、例えば1:4など、一方が厚いものを使用している。なお、同図において、G11、13、15、17、19、21はs偏光の透過率スペクトルを示し、グラフG12、14、16、18、20、22はp偏光の透過率スペクトルを示す。

#### 【0066】

同図（A）に示す第1実施形態の構成例2の場合では、p偏光のPCピーク波長 $w_1$ でDBRが高反射率であり（p偏光のPCピーク波長 $w_1$ がグラフG14の凹部の中心部に対応、つまりフォトニックバンドギャップの中心部に対応）、且つs偏光のPCピーク波長 $w_2$ でもDBRが高反射率であり（s偏光のPCピーク波長 $w_2$ がグラフG13の凹部の中心部に対応、つまりフォトニックバンドギャップの中心部に対応）、p偏光およびs偏光ともに同程度の反射率をもつDBRとなっている。一方で、同図（B）に示す第2実施形態の場合では、p偏光のPCピーク波長 $w_3$ でDBRが高反射率であり（p偏光のP

10

20

30

40

50

Cピーク波長 $w_3$ がグラフG20の凹部の中心部に対応、つまりフォトニックバンドギャップの中心部に対応)、且つs偏光のPCピーク波長 $w_4$ ではDBRが低反射率であり(s偏光のPCピーク波長 $w_4$ がグラフG19の凹部の中心部に対応しない、つまりフォトニックバンドギャップの中心部に対応しない)、p偏光のみ閉じ込め効果が高いDBRとなっている。結果として、複合フォトニック結晶にすると、同図(A)の第1実施形態の構成例2の場合では、同図(A)の最下段に示すように、p偏光の半値幅 $h_1$ 、およびs偏光の半値幅 $h_2$ の差 $|h_1 - h_2|$ が大きい一方、同図(B)の第2実施形態の場合では、同図(B)の最下段に示すように、p偏光の半値幅 $h_3$ 、およびs偏光の半値幅 $h_4$ の差 $|h_3 - h_4|$ が小さい。なお、半値幅(full width at half maximum、FWHM)は、透過ピークのピーク値の0.5倍となる波長(周波数)の差を指す値である。

10

#### 【0067】

図22は、第2実施形態において、低角度入射時と高角度入射時の動作を示した図である。同図(A)は低角度入射時の場合を示し、同図(B)は高角度入射時の場合を示す。同図(A)の低角度入射においては、p、s偏光ともにPCピーク波長( $w_5$ 、 $w_6$ )がDBRの高反射部分にあるので、ともに高反射率DBRとなっている。一方、同図(B)の高角度入射においては、p偏光のPCピーク波長 $w_7$ に対するDBRは高反射率、s偏光のPCピーク波長 $w_8$ に対するDBRは低反射率となっている。第1実施形態の構成例2では、角度が大きくなるにつれて、p偏光の閉じ込め効果の減少とs偏光の閉じ込め効果の増加が生じる可能性があり、s偏光しか上手く利用できないおそれがあったが、第2実施形態では、GaAs層とAlAs層の膜厚比に調整を加えたことで、角度が大きくなっても、適切な半値幅を保つことができ、結果として、低角度においても高角度においてもちょうどいい半値幅を保つことができる。なお、同図において、G23、25、27、29、31、33はs偏光の透過率スペクトルを示し、グラフG24、26、28、30、32、34はp偏光の透過率スペクトルを示す。

20

#### 【0068】

このような構造の複合フォトニック結晶構造124を備えたテラヘルツ光発生装置1を用いて所望のテラヘルツ領域の出力光を発生させる手順は、図7のフローチャートに示した通りである。最初に、用途に応じて発生させたいテラヘルツ波の周波数を決定する(ステップS1)。次に、共振器構造12の種類を決定する(ステップS2)。本実施形態においては複合フォトニック結晶構造124が決定されたとする。

30

#### 【0069】

次に、発生させたいテラヘルツ波の周波数に応じて、s偏光状態の第1入射光(シグナル光)およびp偏光状態の第2入射光(ポンプ光)の入射角度 $\theta$ を決定する(ステップS3)。入射角度 $\theta$ は発生させたい光の周波数によって決定されるものであり、図23は複合フォトニック結晶構造124が共振器構造として決定された場合に、入射角度 $\theta$ と発生させたい光の周波数の関係を示す。図23に示されるように、例えば1.2THzの光を発生させたい場合には、入射角度 $\theta$ を40°と決定することができる。なお、第2実施形態では、入射角度が大きくなるにつれて、p偏光の透過率スペクトルとs偏光の透過率スペクトルの差( $\Delta\omega$ )が大きくなるので、その分発生周波数も大きくなる。

#### 【0070】

40

図7に戻り、次の手順として、ポンプ光の周波数および強度、シグナル光の周波数および強度、そして複合フォトニック結晶構造124の温度を決定する(ステップS4)。上記例のように、例えば1.2THzの光を発生させたい場合に、ポンプ光の周波数を約281.95THz(波長:1064nm)として一定に保ち、その強度は1MW/cm<sup>2</sup>と決定する。なお、変換効率を考慮すると、できれば高い強度の方が望ましい。また、シグナル光の周波数は281.95THz-差周波(発生させたい光の周波数)で決定することが出来るため、約280.85THzと決定する。シグナル光の強度については、ポンプ光の強度と同程度か、それ以下の強度とする。また、複合フォトニック結晶構造124の温度は、図24に示されるように、例えば1.2THzの光を発生させるために入射角度 $\theta$ を40°と決定した場合に、絶対温度として290Kと決定することができる。温

50

度調節によりポンプ光の周波数が上記の約  $281.95\text{ THz}$  (波長:  $1064\text{ nm}$ ) として一定に保たれる。なお、第2実施形態では、入射角度が大きくなるにつれて透過率スペクトルのシフトが大きくなるので、その分試料温度を変える必要がある。

#### 【0071】

以上により、所望の  $1.2\text{ THz}$  の光が発生される。図25は、このときの変換効率を示す。図25に示されるように、入射角度  $\theta$  を  $40^\circ$  とし、且つ  $290\text{ K}$  で複合フォトリック結晶構造124を温度調節した場合に、そのときの変換効率は  $1.8 \times 10^{-3}\%$  である。図14に示した第1実施形態の構成例2の結果と比較すると、2桁以上の変換効率の向上が達成されていることが分かる。図26は、第1実施形態の構成例2における変換効率と、第2実施形態のそれを比較して示すための図である。グラフG35は第1実施形態の構成例2における変換効率を示し、グラフG36は第2実施形態における変換効率を示す。全ての入射角度において、第2実施形態の変換効率が第1実施形態の構成例2のそれより高いことが分かる。なお、表示上の便宜のため、図26では  $\log$  スケールで変換効率を示している。

10

#### 【0072】

図27は、第1実施形態の構成例2における半値幅と、第2実施形態のそれを比較して示すための図である。グラフG37は第1実施形態の構成例2における  $p$  偏光の半値幅を示し、グラフG38は第1実施形態の構成例2における  $s$  偏光の半値幅を示し、グラフG39は第2実施形態における  $p$  偏光の半値幅を示し、グラフG40は第2実施形態における  $s$  偏光の半値幅を示す。グラフG39および40で示される第2実施形態の場合は、両偏光とも、理想の半値幅としている  $0.01\text{ [nm]}$  近くで、最大でも  $0.055\text{ [nm]}$  である。一方、グラフG37および38で示される第1実施形態の構成例2の場合は、 $s$  偏光の半値幅が  $0.01\text{ [nm]}$  となるのは入射角度  $70^\circ$  付近であるが、この場合の  $p$  偏光の半値幅は  $0.35\text{ [nm]}$  まで増加している。

20

#### 【0073】

図28は、図27の半値幅比較を表示の便宜上  $\log$  スケールで表示した図である。図27と対応させるために、グラフの符号を同じ数字としている。図28で示すように、第1実施形態の構成例2の場合は、入射角度が大きくなるにつれ、 $p$  偏光と  $s$  偏光の半値幅の差が大きくなっていく (グラフG37' および G38' 参照)。一方で、第2実施形態の場合は、入射角度が大きくなっても、 $p$  偏光と  $s$  偏光の半値幅の差が小さい (グラフG39' および G40' 参照)。このように、半値幅の差が一定であることにより、より高角度でも  $p$  偏光、 $s$  偏光ともに結晶内部に入射することが可能となり、テラヘルツ波発生に寄与することが出来る。更に、 $p$  偏光と  $s$  偏光の半値幅が小さいことから、結晶内部の電場増強効果が高く、変換効率の上昇が望める。

30

#### 【0074】

図29は、第2実施形態と、他の技術との性能比較を示すための図である。図29における比較対象の他の技術は、例えば  $\text{GaAs}$  疑似位相整合の場合は下記の参考文献2に記載されている技術をいう。また、例えば  $\text{GaP}$  疑似位相整合の場合は下記の参考文献3に記載されている技術をいう。なお、下記の参考文献2および3の例は、最近の論文の中でも最も変換効率の高いものの例示である。

40

<参考文献2> Joseph E. Schaar, et al. "Terahertz Sources Based on Intracavity Parametric Down-conversion in Quasi-Phase-Matched Gallium Arsenide," IEEE Journal Topics in Quantum Electronics, vol. 14, No. 2, 2008

<参考文献3> Eliot B. Petersen, et al. "Efficient parametric terahertz generation in quasi-phase-matched GaP through cavity enhanced difference-frequency generation," Appl. Phys. Lett. 98, 121119, 2011

#### 【0075】

参考文献2および3の技術と、第2実施形態を比較すると、変換効率および出力強度では第2実施形態の方が確かに劣っている。しかし、ここで注目すべき点は、参考文献2および3の技術ではパルス応答における変換効率および出力強度であり、第2実施形態では

50

連続光源における変換効率および出力強度であることである。一般的に変換効率はパルス応答の方が連続光源に比べて強くなる傾向にあるので、第2実施形態における変換効率および出力強度が参考文献2および3の技術におけるそれらに比べて、単純に劣っているとは言い難い。また、参考文献2および3の技術においては、連続光源における変換効率および出力強度が計算できない点にも注目すべきである。これに対して、第2実施形態では、市場でよりニーズが高い連続光源に対する変換効率および出力強度が計算できている。

【0076】

現在、連続光源に対する論文自体があまりないため、敢えて連続光源との比較を行うならカスケードレーザとの比較になる。しかし、下記の参考文献4に示されるように、カスケードレーザは、常温の場合、出力強度が300nW程度で、周波数を可変しているとは言い難い。つまり、第2実施形態で達成できている出力強度向上および周波数可変の効果をカスケードレーザでは期待できない。しかも、上記の非特許文献4に示されるように、最も重要と言われている0.5~3THzの領域を、カスケードレーザでは例えば10Kの低温化でしか高強度出力できないという問題点がある。これに対して、第2実施形態では、低温状態でしか動作できないといった制限はない。

<参考文献4> Mikhail A.Belkin, et al. "Room temperature terahertz quantum cascade laser source basedon intracavity difference-frequency generation," Appl. Phys. Lett. 92, 201101,2008

【0077】

また、参考文献2および3における結晶自体はどちらも6mm程度であるが、共振器をつけることで変換効率を上げているので、共振器の大きさを素子長としている。一方で、第2実施形態では、結晶自体が共振器のようなものなので、光学系が小さくなることが期待できる。

【0078】

以上、本発明の好適な実施形態について説明したが、本発明が上記実施形態に限定されないことは言うまでもない。

【0079】

例えば、上記実施形態においては、テラヘルツ領域の光の発生を一例としているが、本発明の思想はこれに限定されることなく、テラヘルツ以外の領域の光の発生にも本発明を適用することができる。

【0080】

また、上記実施形態においては、レーザ発振部10, 11が等角度で第1入射光および第2入射光を共振器構造12に入射しているが、これに限らず、第1入射光の入射角度と第2入射光の入射角度とが異なってもかまわない。入射角度を異ならせることにより、s偏光およびp偏光の共振周波数を異ならせることができ、結果的に出力光の周波数を変化させることができる。

【0081】

また、上記実施形態においては、共振器構造12の例として、単純共振器121、複合フォトニック結晶構造122、および単純フォトニック結晶123を挙げているが、これに限らず、例えば非特許文献3に記載の2重共振器も本発明の方式を当てはまること出来る構造である。

【0082】

また、上記実施形態においては、説明の便宜上、共振器構造12の材料をGaAsやAlAsに限定しているが、これに限らず、例えばZnTe-MgTe、MgSe-ZnTe、CdTe-MgTe、InGaP/GaAs、GaAs/InGaAs、GaAs/Ge、GaAs/AlGaAs等、一般に多層構造作製のため格子整合出来る材料で、反転対称性が破れた結晶構造を有する物質であれば良い。

【0083】

また、上記実施形態においては、説明の便宜上、第1入射光がs偏光状態であり、且つ第2入射光がp偏光状態であることとしているが、これに限らず、例えば、第1入射光が

p 偏光状態であり、且つ第 2 入射光が s 偏光状態であっても良い。

#### 【0084】

ここで、本実施形態における光学系について、より詳細に説明する。なお、以下の内容は第 1 実施形態および第 2 実施形態に共通する内容である。すなわち、図 1 に示したような光学系を例えば図 30 に示すようにファイバを用いた光学系として構成することもできる。この光学系では、図 1 のミラー 14 およびレンズ 15 の代わりに、偏波保持ファイバ 16 およびファイバアレイ 17 を備えて構成される。この場合の装置構成例としては、例えばレーザ発振部 10, 11 におけるレーザ光源は、TOPTICA 社の TA pro という製品を用いることができる。この場合の発生波長域は 1035~1085 nm であり、発生強度は 1000 mW であり、線幅は 0.1~1 MHz (typical line width.、, 5 μs) である。または、同製品において、1060~1083 nm の発生波長域、2000 mW の発生強度、0.1~1 MHz (typical line width.、, 5 μs) の線幅を有するものを用いても良い。更に、Nova Wave 社の製品として、発生波長域 1064 nm、発生強度 2000 mW、線幅 100 kHz 未満の製品である SF L-PM を用いても良い。また、偏波保持ファイバ 16 およびファイバアレイ 17 に対しては、1060~1080 nm 波長域のものを用い、p 偏光 s 偏光を同時伝送できる偏波保持ファイバを用いても良い。

10

#### 【0085】

また、図 1 に示したような光学系を例えば図 31 に示すように偏光ビームスプリッタを用いた光学系として構成することもできる。この光学系では、図 1 のミラー 14 の代わりに、偏光ビームスプリッタ 18 を備えて構成される。この場合の装置構成例としては、例えばレーザ発振部 10, 11 におけるレーザ光源は、上記のファイバを用いた光学系で用いたものと同じものを用いることができる。また、偏光ビームスプリッタ 18 としては、シグマ光機社の PBS-HP シリーズ、または Newport 社の 05BC15PH.9 を用いることができる。また、レンズ 15 としては、シグマ光機社の NYTL シリーズまたは NYDL シリーズを用いることができる。

20

#### 【符号の説明】

#### 【0086】

1…テラヘルツ光発生装置、10, 11…レーザ発振部、12…共振器構造、12a…共振器構造 12 における主面、13…温度調節器、14…ミラー、15…レンズ、16…偏波保持ファイバ、17…ファイバアレイ、18…偏光ビームスプリッタ、121…単純共振器、122, 124…複合フォトニック結晶構造、123…単純フォトニック結晶。

30

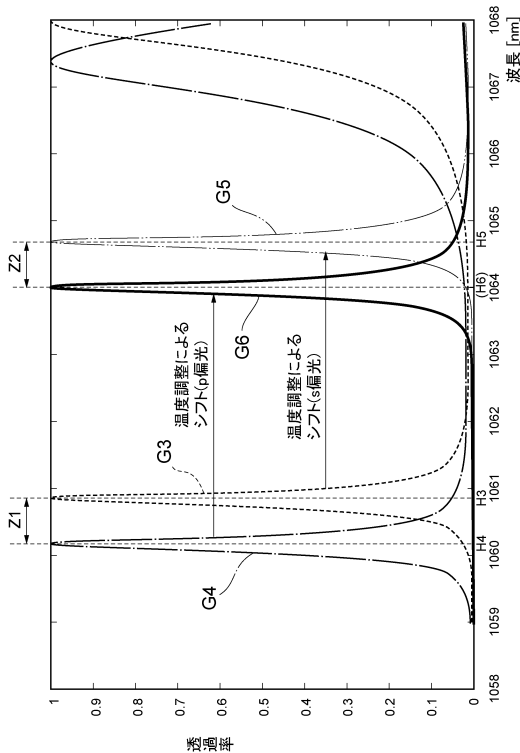
#### 【産業上の利用可能性】

#### 【0087】

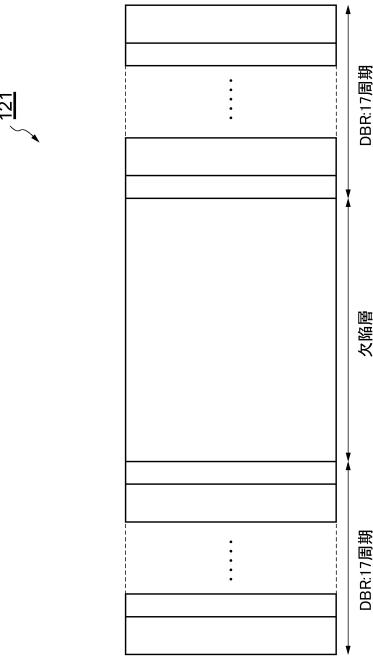
本発明は、所望の周波数を有する光を効率良く発生させることが可能な光発生装置および光発生方法を提供する。



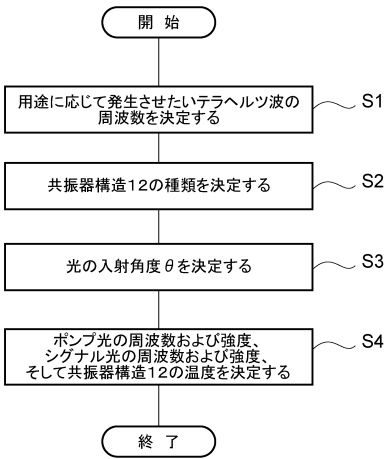
【図 5】



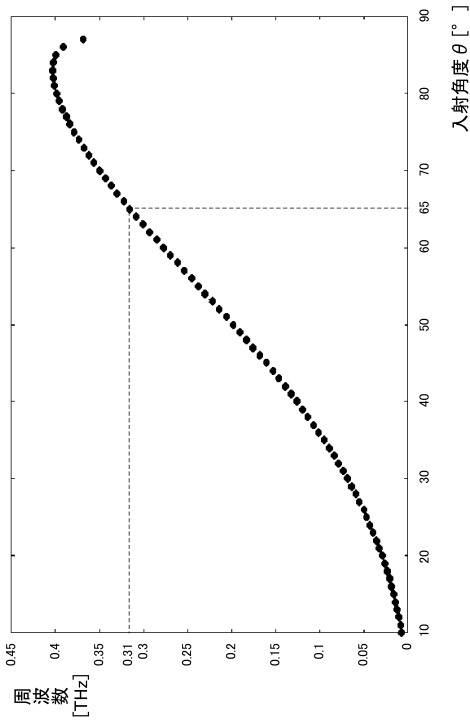
【図 6】



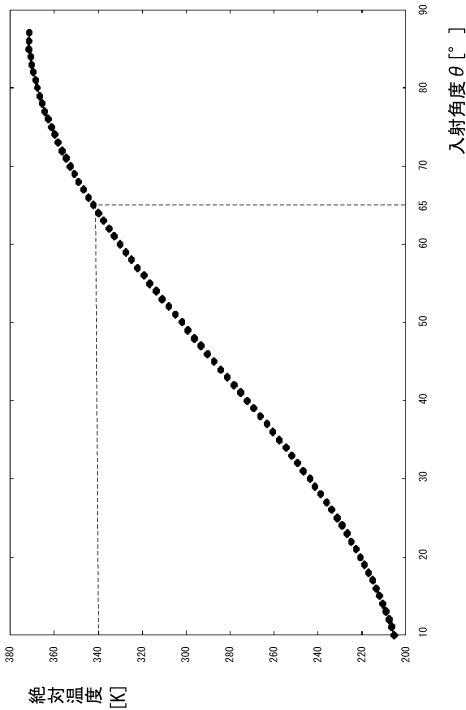
【図 7】



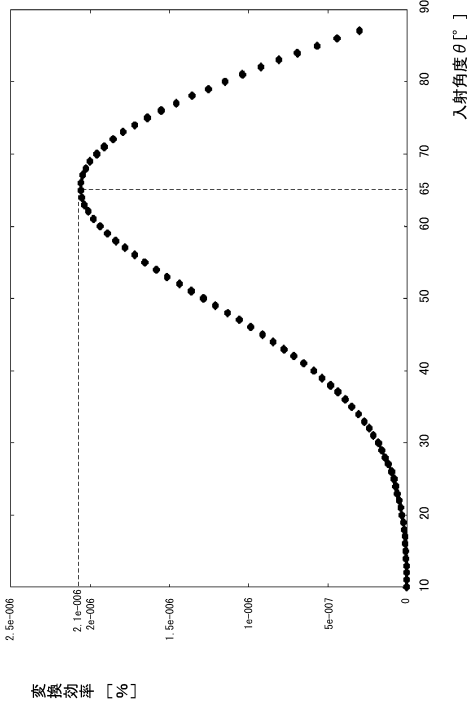
【図 8】



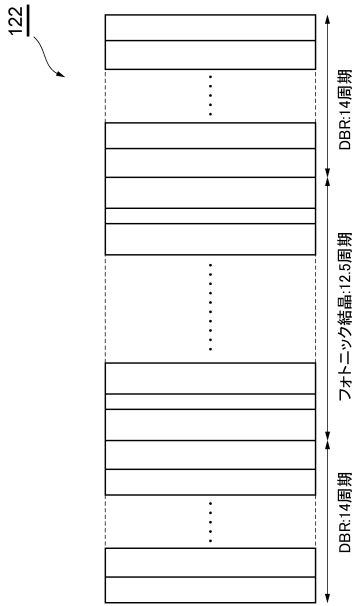
【図 9】



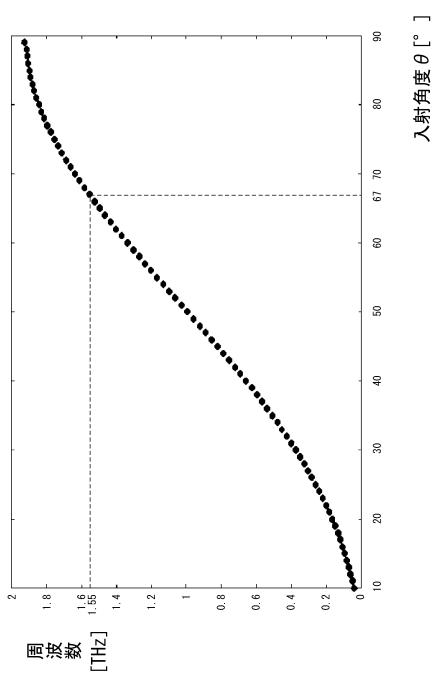
【図 10】



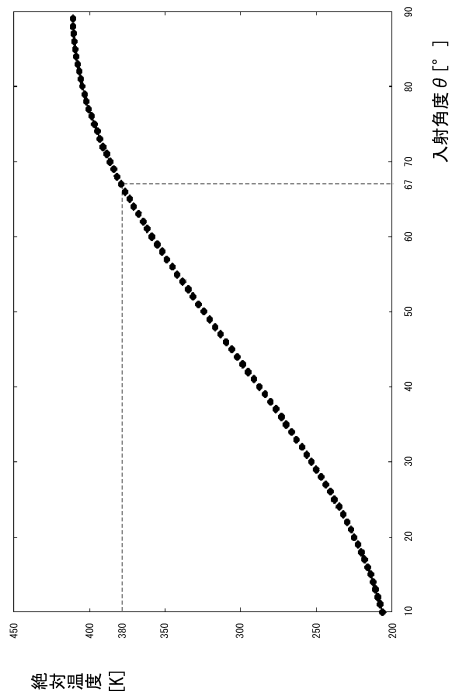
【図 11】



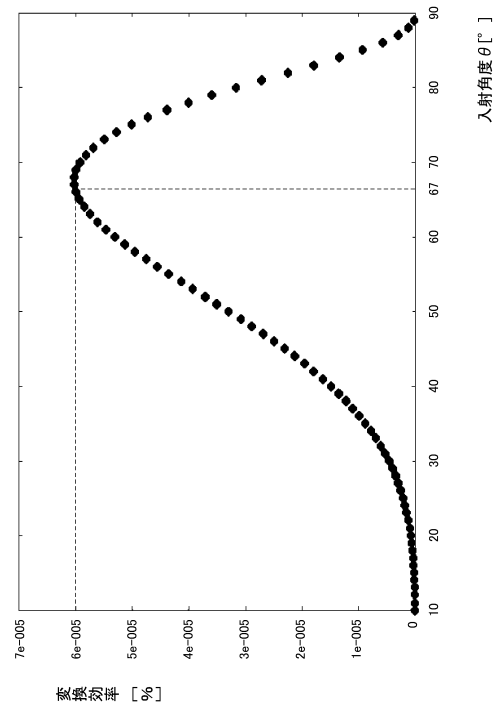
【図 12】



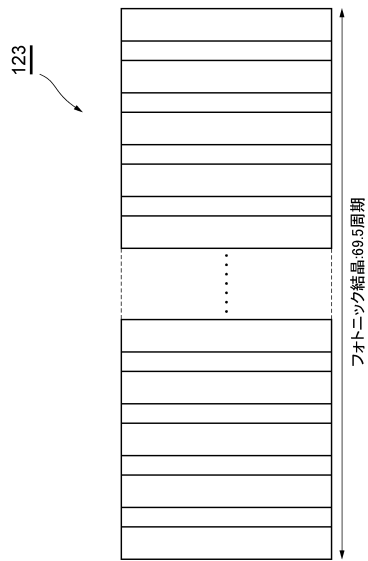
【図 1 3】



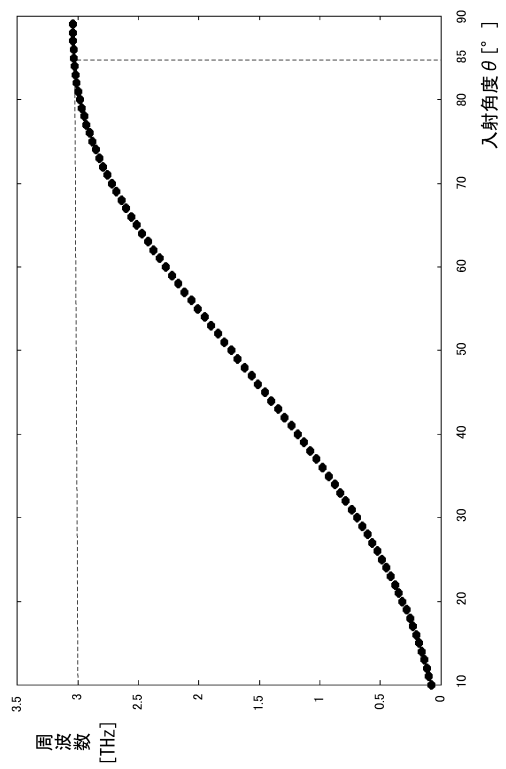
【図 1 4】



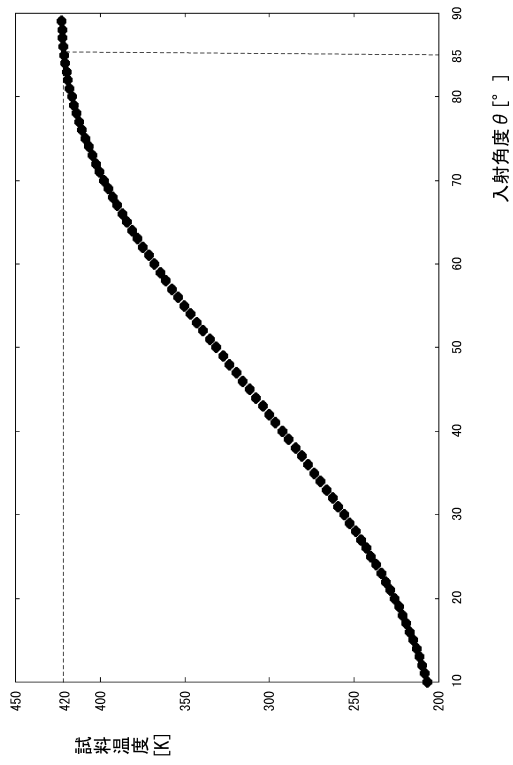
【図 1 5】



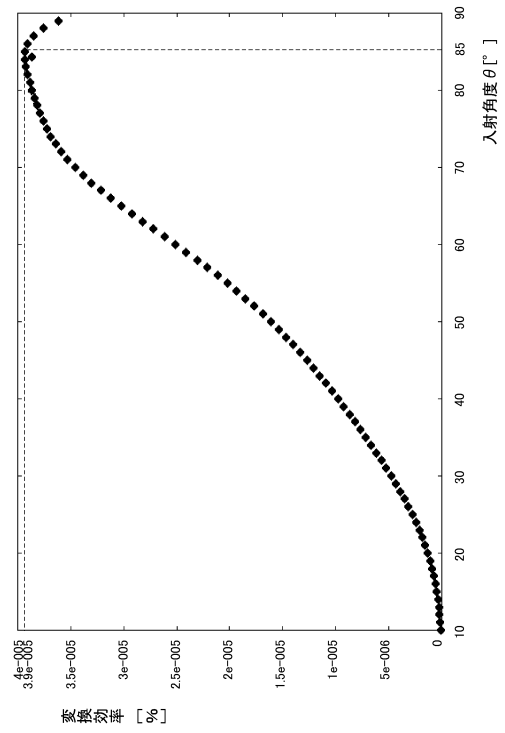
【図 1 6】



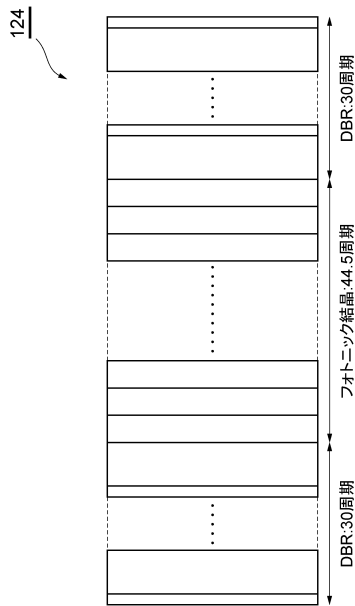
【図 17】



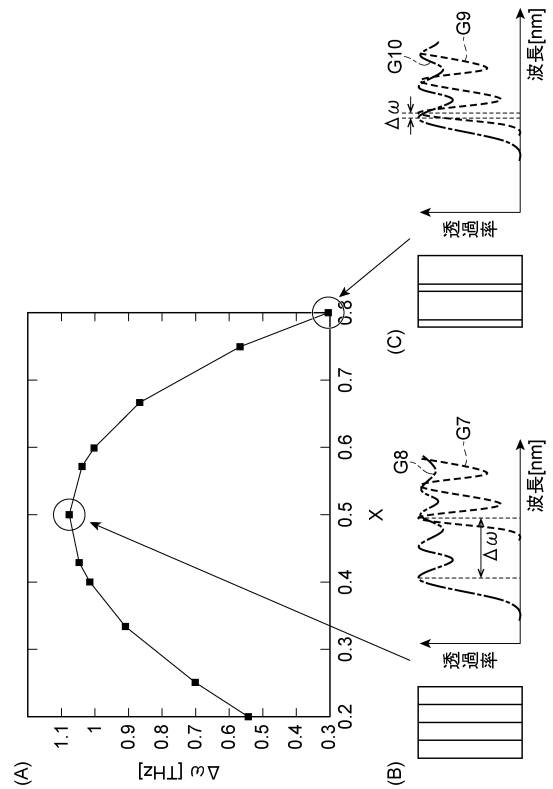
【図 18】



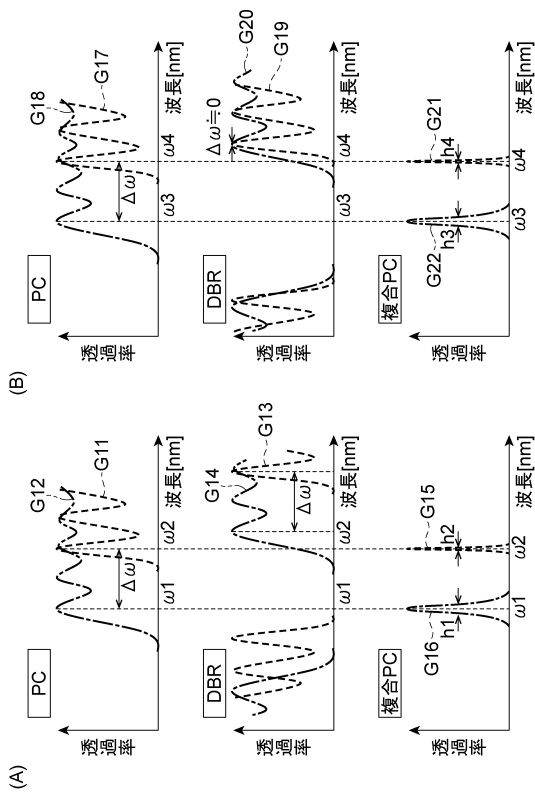
【図 19】



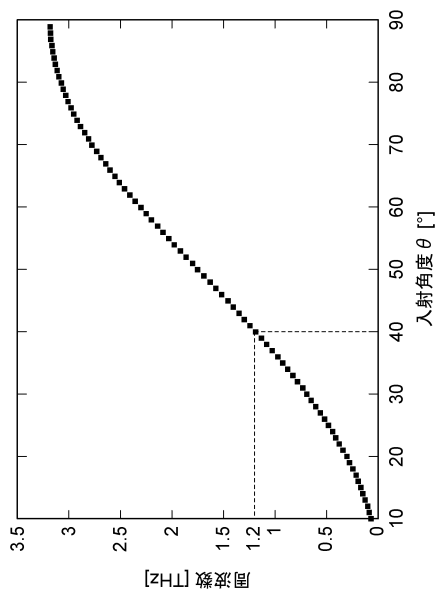
【図 20】



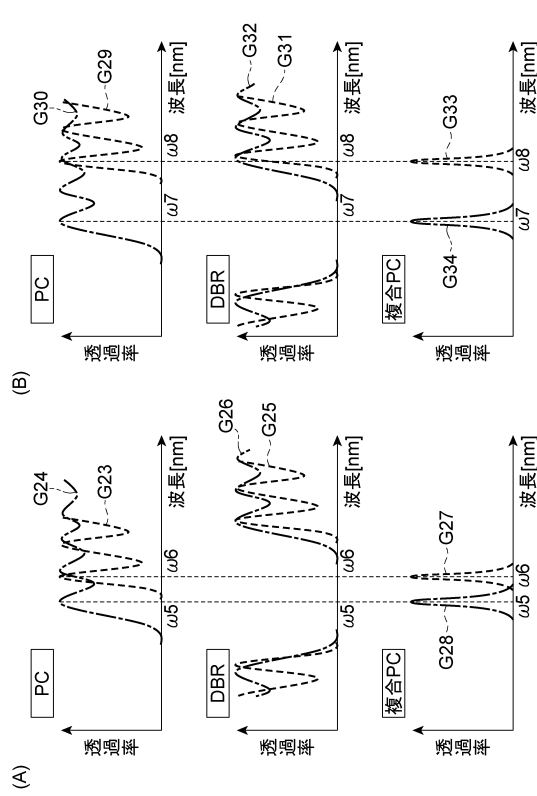
【図 2 1】



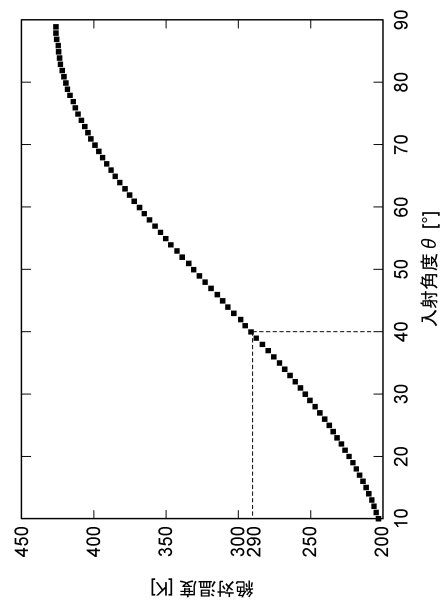
【図 2 3】



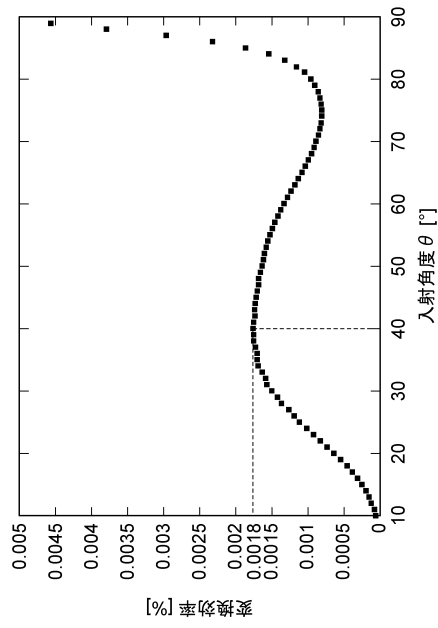
【図 2 2】



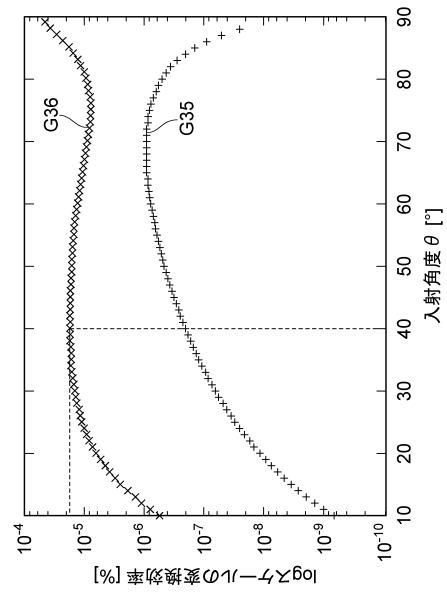
【図 2 4】



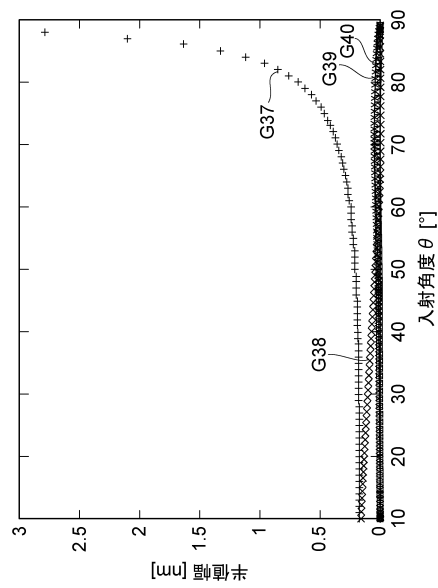
【図 2 5】



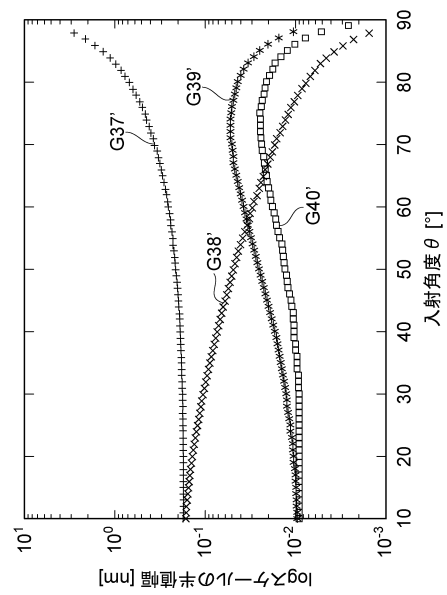
【図 2 6】



【図 2 7】



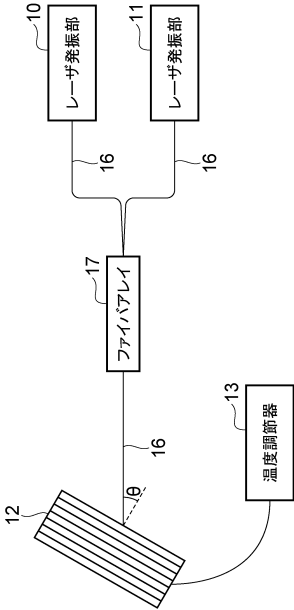
【図 2 8】



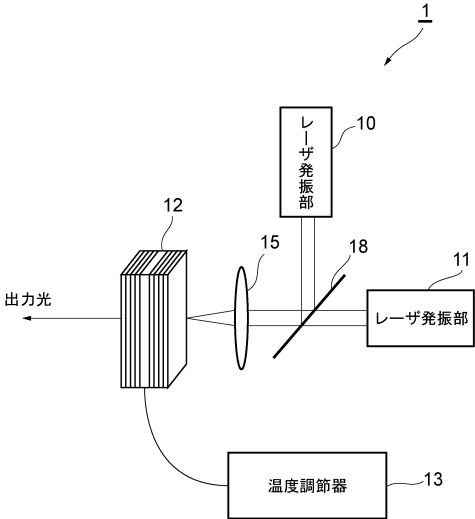
【図 29】

| 手法             | 入射強度 | 出力強度        | 変換効率                  | 周波数<br>可変領域 | 素子長                  | 備考    |
|----------------|------|-------------|-----------------------|-------------|----------------------|-------|
| 第2実施形態         | 3W   | 53 $\mu$ W  | $1.7 \times 10^{-5}$  | 0~3THz      | 18 $\mu$ m           | CW    |
| GaAs擬似<br>位相整合 | 8.5W | 1mW         | $1.2 \times 10^{-4}$  | 0.4~3.5THz  | 2m with<br>cavity    | psパルス |
| GaP擬似<br>位相整合  | 1.4W | 339 $\mu$ W | $2.43 \times 10^{-4}$ | 1.5THz      | 0.65m with<br>cavity | nsパルス |

【図 30】



【図 31】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 石原 一  
大阪府堺市中区学園町1番1号 公立大学法人大阪府立大学内
- (72)発明者 小山田 篤幸  
大阪府堺市中区学園町1番1号 公立大学法人大阪府立大学内
- (72)発明者 葛原 聡  
大阪府堺市中区学園町1番1号 公立大学法人大阪府立大学内
- (72)発明者 北口 久将  
大阪府堺市中区学園町1番1号 公立大学法人大阪府立大学内
- (72)発明者 江畑 恵司  
大阪府大阪市此花区島屋一丁目1番3号 住友電気工業株式会社大阪製作所内

審査官 山本 貴一

- (56)参考文献 特開2004-279604 (JP, A)  
特開2008-170582 (JP, A)  
特開2006-091802 (JP, A)  
特開2009-080448 (JP, A)  
国際公開第2011/001521 (WO, A1)  
KITADA, Takahiro, TANAKA, Fumiya, TAKAHASHI, Tomoya, MORITA, Ken, and ISU, Toshiro, Ga  
As/AlAs coupled multilayer cavity structures for terahertz emission devices, Applied P  
hysics Letters, 米国, 2009年 9月, Vol.95, No.11, pp.111106-1 - 111106-3

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
G02F 1/37, 1/377  
H01S 1/00-1/06, 3/106-3/109  
  
JSTPlus (JDreamIII)  
JST7580 (JDreamIII)