

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4843506号
(P4843506)

(45) 発行日 平成23年12月21日(2011.12.21)

(24) 登録日 平成23年10月14日(2011.10.14)

(51) Int. Cl.		F I	
GO2F	1/37	(2006.01)	GO2F 1/37
HO1S	3/108	(2006.01)	HO1S 3/108
HO1S	5/062	(2006.01)	HO1S 5/062
HO1S	3/109	(2006.01)	HO1S 3/109

請求項の数 12 (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願2006-553023 (P2006-553023)	(73) 特許権者	00004226 日本電信電話株式会社 東京都千代田区大手町二丁目3番1号
(86) (22) 出願日	平成18年1月17日 (2006.1.17)	(73) 特許権者	591230295 NTTエレクトロニクス株式会社 神奈川県横浜市神奈川区新浦島町一丁目1番地32
(86) 国際出願番号	PCT/JP2006/300551	(74) 代理人	100077481 弁理士 谷 義一
(87) 国際公開番号	W02006/075760	(74) 代理人	100088915 弁理士 阿部 和夫
(87) 国際公開日	平成18年7月20日 (2006.7.20)	(72) 発明者	曲 克明 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
審査請求日	平成19年7月17日 (2007.7.17)		
(31) 優先権主張番号	特願2005-9693 (P2005-9693)		
(32) 優先日	平成17年1月17日 (2005.1.17)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 変調機能付光源装置とその駆動方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

周期的に非線形定数が変調された構造を有する非線形光学材料からなる光導波路を有し、前記光導波路に波長の異なる第1及び第2の半導体レーザ光源からの励起光を合波して入射することによって発生する差周波を、又は和周波を出力する光源装置若しくは第2の半導体レーザ光源からの第2高調波を出力する光源装置であって、

前記第2の半導体レーザ光源は、半導体レーザとFBGと半導体レーザを変調する手段から構成され、前記FBGの反射帯域は、前記半導体レーザの素子長で決まる共振波長間隔よりも狭く、かつ前記半導体レーザと前記FBGとの間隔で決まる共振波長間隔よりも広く、

前記第2の半導体レーザ光源への電流変調振幅の下限が閾値以下であり、出射波長が非線形光学材料の擬似位相整合帯域の短波側波長となるように設定し、上限が電流-光出力特性において生じる最初のキंकを与える電流値より低い電流値であることを特徴とする変調機能付光源装置。

【請求項2】

請求項1に記載の変調機能付光源装置であって、

前記FBGの出力にアイソレータを接続する

ことを特徴とする変調機能付光源装置。

【請求項3】

請求項1又は2に記載の変調機能付光源装置であって、

10

20

前記 F B G に温度制御手段を付加すること
ことを特徴とする変調機能付光源装置。

【請求項 4】

周期的に非線形定数が変調された構造を有する非線形光学材料からなる光導波路を有し、
前記光導波路に波長の異なる第 1 及び第 2 の半導体レーザ光源からの励起光を合波して
入射することによって発生する差周波を、又は和周波を出力する光源装置若しくは第 1 の
半導体レーザ光源からの第 2 高調波を出力する光源装置であって、

前記第 1 の半導体レーザ光源は、回折格子を内蔵し、半導体レーザから出射される出力
光を変調する手段を含み、

第 1 の半導体レーザ光源に対する電流変調振幅の下限は閾値以下で、閾値直後の出射波
長が、非線形光学材料の擬似位相整合帯域の短波長側となるよう設定し、

前記電流変調振幅の上限は、非線形光学材料の擬似位相整合帯域のピーク波長より短波
長側で、かつ閾値直後の出射波長より長波側波長となる電流値である

ことを特徴とする変調機能付光源装置。

【請求項 5】

請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の変調機能付光源装置であって、

前記第 1 及び第 2 の半導体レーザ光源は、半導体レーザから出射される出力光を変調す
る手段を含み、相互に同期している

ことを特徴とする変調機能付光源装置。

【請求項 6】

請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の変調機能付光源装置であって、

前記非線形光学結晶は、

LiNbO_3 、 LiTaO_3 、 $\text{LiNb}(x)\text{Ta}(1-x)\text{O}_3$ ($0 < x < 1$) のいずれか、
あるいはそれらの組み合わせであり、又はこれらに Mg、Zn からなる群から選ばれた少
なくとも一種を添加物として含有している

ことを特徴とする変調機能付光源装置。

【請求項 7】

請求項 1 乃至 6 のいずれかに記載の変調機能付光源を蛍光顕微鏡装置に組み込んだこと
を特徴とする変調機能付光源装置。

【請求項 8】

第 1 の半導体レーザと、第 2 の半導体レーザと、周期的に非線形定数が変調された構造
を有する非線形光学材料からなる光導波路とを備えた光源装置を用いた光変調方法であっ
て、

前記第 2 の半導体レーザから変調された光を出射するステップと、

前記出射するステップにおいて変調された光を、前記第 2 の半導体レーザの素子長で決
まる共振波長間隔よりも狭く、かつ前記半導体レーザと前記 F B G との間隔で決まる共振
波長間隔よりも広い反射帯域を有する F B G に入射するステップと、

前記第 1 の半導体レーザから出射された光と、前記 F B G から出射された光とを合波し
て前記光導波路に入射するステップと、

前記光導波路から、前記第 1 及び第 2 の半導体レーザから光の差周波を、又は和周波を
出射するステップと、

前記第 2 の半導体レーザ光源への電流振幅変調の下限を、閾値以下であり出射波長が非
線形光学材料の擬似位相整合帯域の短波側波長となるように設定するステップと、

前記電流振幅変調の上限を電流 - 光出力特性において生じる最初のキックを与える電流
値より低い電流値であるように設定するステップと

を備えたことを特徴とする方法。

【請求項 9】

請求項 8 に記載の光変調方法であって、

前記 F B G から出射された光をアイソレータに入射するステップを更に備え、前記光導
波路に入射するステップは、前記第 1 の半導体レーザから出射された光と、前記アイソレ

10

20

30

40

50

ータから出射された光とを合波するステップを備えたことを特徴とする方法。

【請求項 10】

請求項 8 又は 9 に記載の光変調方法であって、
前記 F B G の温度を一定の範囲内に制御するステップを更に備えたことを特徴とする方法。

【請求項 11】

回折格子を内蔵する第 1 の半導体レーザと、第 2 の半導体レーザと、周期的に非線形定数に変調された構造を有する非線形光学材料からなる光導波路とを備えた和周波を出力する光変調方法であって、

前記第 1 の半導体レーザから変調された光を出射するステップと、
前記第 1 の半導体レーザから出射された光と、前記第 2 の半導体レーザから出射された光とを合波して、前記光導波路に入射するステップと、

前記光導波路から、前記第 1 及び第 2 の半導体レーザから光の差周波、又は和周波を出射するステップと、

前記第 1 の半導体レーザ光源に対する電流振幅変調の下限を、閾値以下であり出射波長が非線形光学材料の擬似位相整合帯域の短波側波長となるように設定するステップと、

前記電流振幅変調の上限を出射波長が非線形光学材料の擬似位相整合帯域のピーク波長より短波長側で、かつ閾値直後の出射波長より長波長側波長となるように設定するステップとを備えたことを特徴とする方法。

【請求項 12】

請求項 8 乃至 11 のいずれかに記載の光変調方法であって、
前記第 2 の半導体レーザの光の変調に同期して、前記第 1 の半導体レーザの光を変調するステップを更に備えたことを特徴とする方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、非線形光学媒質中で生じる第 2 高調波発生、差周波発生、和周波発生効果を用いる可視、中赤外又は赤外光源に関し、より詳細には、発生する光の強度を変化させることが可能である変調機能付光源装置に関する。

【背景技術】

【0002】

現在、レーザ技術は、目覚ましい進歩を遂げているが、あらゆる波長領域において発振が得られているわけではない。そのため、非線形光学効果を利用した波長変換技術は、レーザ発振が容易でない波長域のコヒーレント光を得るために重要な技術である。

【0003】

非線形光学効果のうち、2 次非線形光学効果を利用して擬似位相整合による第 2 高調波、和周波、差周波を発生する波長変換素子の応用が期待されている（特許文献 1 参照）。

【0004】

図 1 に、従来の擬似位相整合型の波長変換素子の構成を示す。半導体レーザ光源からの励起光 A（波長 λ_1 ）と、別の半導体レーザ光源からの励起光 B（波長 λ_2 ）とを、合波器 11 によって合波し、分極反転構造を有する非線形導波路 12 に入射する。導波路 12 において、励起光 A は、波長 λ_3 を持った差周波光 C へと変換され、励起光 B と共に導波路 12 から出射される。差周波光 C と励起光 B は、分波器 13 により分離される。

【0005】

例えば励起光 B を波長 $\lambda_1 = 1.06 \mu\text{m}$ とし、波長 $\lambda_2 = 1.55 \mu\text{m}$ の励起光 A を入力した場合は、波長 $\lambda_3 = 3.35 \mu\text{m}$ の波長変換光 C を差周波発生によって得ることができる。

【0006】

このような波長変換素子の中赤外のレーザ光源として利用することにより、中赤外光を利用した高感度のガスセンサーなどを実現できる。

【 0 0 0 7 】

図 1 における別の実施態様によれば、比較的大きな強度の励起光 A と、励起光 B とを合波器 1 1 によって合波し、分極反転構造を有する非線形導波路 1 2 に入射する。導波路 1 2 において、励起光 A と励起光 B の波長変換光 C が生成されて導波路 1 2 から出射される。例えば励起光 A を波長 $\lambda_1 = 1.06 \mu\text{m}$ とし、励起光 B を波長 $\lambda_2 = 1.32 \mu\text{m}$ とした場合は、波長 $\lambda_3 = 0.59 \mu\text{m}$ の黄色の可視光である波長変換光 C を和周波発生によって得ることができる。

【 0 0 0 8 】

和周波発生による波長変換素子を用いた黄色可視光源は、従来の Na ランプの D 線光源にかわり、屈折率測定用の光源として利用することができる。また、和周波発生による波長変換素子を用いた黄色可視光源は、蛍光顕微鏡などの可視光を使った光学機器の高感度化に著しい効果がある。

10

【 0 0 0 9 】

このような黄色可視光源においては、励起光としてファイバブラッググレーティング (F B G : Fiber Bragg Grating) を用いた外部共振器を用いて波長を安定化した $1.06 \mu\text{m}$ 半導体レーザと、発振波長が $1.32 \mu\text{m}$ である D F B (Distributed Feedback) レーザと、W D M カップラ等の合波手段と、モジュール化された波長変換素子とが、筐体の実装されている。ここで、励起光として用いる光源としては、D B R (Distributed Bragg Reflector) レーザ、D F B レーザ等の単一モード発振している光源であることが望ましい。単一モード発振していない場合においては、F B G を用いた外部共振器の付加によって波長を安定化した光源を用いることが望ましい。

20

【 0 0 1 0 】

F B G は、光ファイバのコア部分にブラッグ回折格子を形成したもので、特定の波長の光のみを反射する特性をもつ光ファイバ型装置である。F B G の性質として、低損失、光ファイバとの結合特性が良好であること、及び優れた反射特性から、反射光フィルタの他に、波長制御素子、光センサ素子、分散補償素子としても広く利用されている。

【 0 0 1 1 】

D F B レーザは、レーザーチップの内部に周期的な形状を作りこんで回折格子として作用させ、特定の波長の光のみを反射させることによって光を活性領域に閉じ込め、レーザー光を発振させる半導体レーザである。回折格子のないファブリーペロー型半導体レーザと比較してレーザー光の波長の単色性が優れており、数キロメートル以上の光信号の伝送に適している。

30

【 0 0 1 2 】

図 2 に、波長 $0.53 \mu\text{m}$ の緑色光を第 2 高調波発生によって得るための擬似位相整合条件を示す。非線形光学材料としてニオブ酸リチウムを用い、分極反転周期を $6.76 \mu\text{m}$ とし、長さ 10mm の波長変換素子を用いた場合の擬似位相整合曲線を計算した図である。励起光の波長を横軸にとり、得られる第 2 高調波の光強度を規格化して縦軸にとったものを示してある。図 2 によると、擬似位相整合の帯域は、 0.2nm 以下であることがわかる。したがって、 $1.06 \mu\text{m}$ 半導体レーザの発振波長は、 0.2nm のスペクトル幅以内で安定化されている必要がある。安定した波長変換光の光出力を得るには、波長安定化は、可視光を得るために用いる波長変換素子の擬似位相整合帯域幅が狭いため、必須の要件である。

40

【 0 0 1 3 】

このような条件の下で生じた波長変換光 C は、励起光である半導体レーザの特徴をそのまま引き継いでコヒーレントな特性を有しており、可視光源として屈折率測定の高感度化のほか、蛍光顕微鏡による蛍光タンパク観察の高感度化に効果がある。但し、その測定感度を向上するために消光比を高く取る必要があり、O N / O F F 変調機能を持たせることが重要である。

【 0 0 1 4 】

しかしながら、これまで、O N / O F F 変調は、可視光源としての半導体レーザ単体で

50

、又は固体レーザにA O変調器を外部に接続して行われてきた。すなわち、ON/OFF変調機能は、非線形光学形材料からなる光導波路と、2つの半導体レーザ光源とを用いて差周波又は和周波を発生する光源において、まだ実現されていなかった。

【0015】

図3に、外部にFBGを接続した1.06 μ m帯半導体レーザの電流-光出力特性を示す。このFBGを接続した半導体レーザは、通常、FBGによる反射帯域を2nm程度に取っており、その範囲内で複数の波長が発振する、マルチモード化された状態にある。光出力を電流で微分したものを微分効率と呼ぶが、この場合、破線で示している微分効率特性に不連続な箇所が複数存在し、電流-光出力特性に細かい不連続点が生じている。このような不連続点がある場合、半導体レーザに対して光出力安定化制御(APC)を行うのは大変難しい。そのため、一般的には、外部にFBGを備えた外部共振器型の半導体レーザは、変調をかけて使用されることはなかった。

10

【0016】

図11Aに、1.32 μ m帯DFBレーザによる電流-光出力特性を示す。1.32 μ m帯DFBレーザの電流を制御すると、図11Aの電流-光出力特性に基づいて波長変換光の出力がON/OFFされ、変調機能付光源装置に変換機能を持たすことができる。

【0017】

ここで用いた1.32 μ m帯DFBレーザは、 $I_{th} = 10$ mA程度であり、光出力を大きくするために動作電流を I_{th} の30倍程度とした場合にも、安定的に単一波長で動作する。図11Aに、微分効率を破線で示している。閾値を除き、微分効率特性に不連続な箇所は表れず、発振波長のモジュール跳びも生じない。しかしながら、1.32 μ m帯DFBレーザの動作電流を300 mAまで用いると、素子内の温度が上昇し、単一波長ではあるが、発振波長は0.8 nm程度動く。0.8 nmという発振波長の変動幅は、先に述べた擬似位相整合の帯域の4倍以上広い。また、擬似位相整合帯域を外れた分は、波長変換光に寄与しない。よって、実質的には、動作電流が300 mAの1/4程度の80 mA程度までしか流すことができず、得られる光出力も1/4程度に減少する。つまり、波長変換光の出力強度が同様に1/4程度に減少することを意味する。このことから、単に1.32 μ m帯DFBレーザにおいて変調を行うだけでは、実用的な波長変換光の出力強度を得ることはできなかった。

20

【0018】

【特許文献1】特開2003-140214号公報

【発明の開示】

【0019】

本発明は、このような問題に鑑みてなされたもので、その目的とするところは、擬似位相整合型の波長変換素子を備え、差周波又は和周波を射出する光源装置に対して、実用的な光強度を確保しながら変調を行うための、光変調方法及び変調機能付光源装置を提供することである。

30

【0020】

本発明の変調機能付光源装置の一態様は、周期的に非線形定数が変調された構造を有する非線形光学材料からなる光導波路を有し、光導波路に波長の異なる第1及び第2の半導体レーザ光源からの励起光を合波して入射することによって発生する差周波を、又は和周波を出力する光源装置若しくは第2の半導体レーザ光源からの第2高調波を出力する光源装置であって、第2の半導体レーザ光源は、半導体レーザとFBGと半導体レーザを変調する手段から構成され、FBGの反射帯域は、半導体レーザの素子長で決まる共振波長間隔よりも狭く、かつ半導体レーザとFBGとの間隔で決まる共振波長間隔よりも広く、第2の半導体レーザ光源への電流変調振幅の下限が閾値以下であり、出射波長が非線形光学材料の擬似位相整合帯域の短波側波長となるように設定し、上限が電流-光出力特性において生じる最初のキルクを与える電流値より低い電流値である。

40

【0022】

また、前記変調機能付光源装置の他の態様では、FBGの出力にアイソレータを接続す

50

ることができる。

【0023】

また、前記変調機能付光源装置の他の態様では、FBGに温度制御手段を付加することができる。

【0024】

また、周期的に非線形定数が変調された構造を有する非線形光学材料からなる光導波路を有し、光導波路に波長の異なる第1及び第2の半導体レーザー光源からの励起光を合波して入射することによって発生する差周波を、又は和周波を出力する光源装置若しくは第1の半導体レーザー光源からの第2高調波を出力する光源装置の一態様では、第1の半導体レーザー光源は、回折格子を内蔵し、半導体レーザーから出射される出力光を変調する手段を含み、第1の半導体レーザー光源に対する電流変調振幅の下限は閾値以下で、閾値直後の出射波長が、非線形光学材料の擬似位相整合帯域の短波長側となるよう設定し、電流変調振幅の上限は、非線形光学材料の擬似位相整合帯域のピーク波長より短波長側で、かつ閾値直後の出射波長より長波側波長となる電流値とすることができる。

10

【0025】

また、前記変調機能付光源装置の他の態様では、第1の半導体レーザー光源は、半導体レーザーから出射される出力光を変調する手段を含み、相互に同期することができる。

【0026】

また、前記変調機能付光源装置の他の態様では、非線形光学結晶は、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 、 $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ ($0 < x < 1$)のいずれか、あるいはそれらの組み合わせであり、又はこれらにMg、Znからなる群から選ばれた少なくとも一種を添加物として含有することができる。

20

【0027】

また、他の態様では、前記変調機能付光源装置を蛍光顕微鏡装置に組み込むことができる。

【0028】

また、本発明の光変調方法の一態様は、第1の半導体レーザーと、第2の半導体レーザーと、周期的に非線形定数が変調された構造を有する非線形光学材料からなる光導波路とを備えた光源装置を用いた光変調方法であって、第2の半導体レーザーから変調された光を出射するステップと、出射するステップにおいて変調された光を、第2の半導体レーザーの素子長で決まる共振波長間隔よりも狭く、かつ半導体レーザーとFBGとの間隔で決まる共振波長間隔よりも広い反射帯域を有するFBGに入射するステップと、第1の半導体レーザーから出射された光と、FBGから出射された光とを合波して光導波路に入射するステップと、光導波路から、第1及び第2の半導体レーザーから光の差周波を、又は和周波を出射するステップと、第2の半導体レーザー光源への電流振幅変調の下限を、閾値以下であり出射波長が非線形光学材料の擬似位相整合帯域の短波側波長となるように設定するステップと、電流振幅変調の上限を電流-光出力特性において生じる最初のキックを与える電流値より低い電流値であるように設定するステップとを備える。

30

【0029】

また、前記光変調方法の他の態様では、FBGから出射された光をアイソレータに入射するステップを更に備え、光導波路に入射するステップは、第1の半導体レーザーから出射された光と、アイソレータから出射された光とを合波するステップを備えることができる。

40

【0030】

また、前記光変調方法の他の態様では、FBGの温度を一定の範囲内に制御するステップを更に備えることができる。

【0032】

また、回折格子を内蔵する第1の半導体レーザーと、第2の半導体レーザーと、周期的に非線形定数が変調された構造を有する非線形光学材料からなる光導波路とを備えた和周波を出力する光源装置の一態様では、第1の半導体レーザーから変調された光を出射するステッ

50

プと、第1の半導体レーザから出射された光と、第2の半導体レーザから出射された光とを合波して、光導波路に入射するステップと、光導波路から、第1及び第2の半導体レーザから光の差周波、又は和周波を出射するステップと、第1の半導体レーザ光源に対する電流振幅変調の下限を、閾値以下であり出射波長が非線形光学材料の擬似位相整合帯域の短波側波長となるように設定するステップと、電流振幅変調の上限を出射波長が非線形光学材料の擬似位相整合帯域のピーク波長より短波長側で、かつ閾値直後の出射波長より長波長側波長となるように設定するステップとを備えることができる。

【0033】

また、前記光変調方法の他の態様では、第2の半導体レーザの光の変調に同期して、第1の半導体レーザの光を変調するステップを更に備えることができる。

10

【0034】

本発明によれば、実用的な光強度を有する変調機能付光源装置を作製することができ、可視光を用いた屈折率測定の高感度化のほか、蛍光顕微鏡による蛍光タンパク観察の高感度化が可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0035】

【図1】本発明の波長変換の原理を説明する図である。

【図2】波長0.53 μm の緑色光を第2高調波発生によって得るための擬似位相整合曲線を示す図である。

【図3】従来の1.064 μm 帯レーザの直接変調を説明する図である。

20

【図4】波長変換素子の作製工程を示す図である。

【図5】波長変換素子モジュールを示す図である。

【図6】本発明の変調機能付光源装置の構成を示す図である。

【図7A】実施例1の1.064 μm 帯レーザの直接変調を説明する図である。

【図7B】実施例1の1.064 μm 帯レーザの中心波長のレーザ駆動電流依存性を示す図である。

【図8A】実施例2の1.064 μm 帯レーザの直接変調を説明する図である。

【図8B】実施例2の1.064 μm 帯レーザの中心波長のレーザ駆動電流依存性を示す図である。

【図9】実施例3の変調機能付光源装置の構成を示す図である。

30

【図10】実施例4の変調機能付光源装置の構成を示す図である。

【図11A】1.32 μm 帯DFBレーザの直接変調を説明する図である。

【図11B】1.32 μm 帯DFBレーザの中心波長のレーザ駆動電流依存性を示す図である。

【図12】本発明の変調機能付光源装置を蛍光顕微鏡装置に組み込んだ構成を示す図である。

【図13】本発明の変調機能付光源装置の駆動方法を説明するフローチャートである。

【図14】実施例5の1.064 μm 帯レーザのI-L特性を示す図である。

【図15】実施例5の1.064 μm 帯レーザの中心波長のレーザ駆動電流依存性を示す図である。

40

【図16】本発明の出力光強度が一定になるようにFBG付レーザの駆動電流にフィードバックをかけた変調機能付光源装置の構成を示す図である。

【図17】レーザを10 から40 で変化する恒温槽中で動作させた時のレーザ出力強度の時間変化を示す図である。

【図18】本発明の変調機能付光源装置の駆動方法を説明するフローチャートである。

【発明を実施するための最良の形態】

【0036】

本発明者らは、実用的な光強度を有する波長変換型光源装置に変調機能を付加する手法について鋭意検討した結果、励起光源として1.32 μm 帯DFBレーザ、又は狭帯域なFBGによって単一に波長を安定化した1.06 μm 半導体レーザの駆動電流を変調する

50

ことにより、実用的な変調機能付光源装置が実現できることを見出した。また、 $1.06\ \mu\text{m}$ 半導体レーザとの特定の駆動方法と、 $1.32\ \mu\text{m}$ 帯DFBレーザの駆動電流を同期変調することによっても、実用的な変調機能付光源装置が実現できることも見出した。

【0037】

以下、図面を参照しながら本発明の実施の形態について実施例を用いて詳細に説明する。但し、波長の組み合わせや変換波長、半導体レーザの種類などは、これらの例になんら限定されるものではない。

【0038】

(実施例1)

実施例1においては、非線光学形材料として LiNbO_3 を用いた波長変換素子モジュールを作製し、FBGを備えて波長を安定化した $1.064\ \mu\text{m}$ 半導体レーザと、 $1.32\ \mu\text{m}$ 帯波長可変レーザを励起光源として用いることによって波長変換光を出力する変調機能付光源装置を作製する。

10

【0039】

図4に、波長変換素子の作製工程を示す。実施例1では、直接接合基板を用いたリッジ導波路構造を用いて波長変換素子の作製を行う。すなわち、第1の基板としてあらかじめ周期分極反転構造が作製されているZカットZn添加 LiNbO_3 基板51と、第2の基板としてZカットMg添加 LiNbO_3 基板52とを接合して波長変換素子を作製する。基板は、いずれも両面が光学研磨されてある3インチウエハであり、基板厚は $300\ \mu\text{m}$ である。リッジ導波路は、光の伝播方向に垂直な2方向(2次元)に光閉じ込めが存在する、光損失の小さい光導波路である。

20

【0040】

用意した第1の基板51、及び第2の基板52の表面を通常の酸洗浄あるいはアルカリ洗浄によって親水性にした後、この2つの基板を清浄雰囲気中で重ね合わせる。重ね合わせた第1の基板51と、第2の基板52とを電気炉にいれ、 500°C で3時間熱処理することにより拡散接合を行う。接着された基板はボイドフリーであり、室温に戻したときにおいてもクラックなどは発生しない。

【0041】

次に、研磨盤の平坦度が管理された研磨装置を用いて、接着された基板の第1の基板51の厚さが $6\ \mu\text{m}$ になるまで研磨加工を施す。研磨加工の後に、ポリッシング加工を行うことにより、鏡面の研磨表面を得ることができる。

30

【0042】

研磨された薄膜基板をダイシングソーにセットし、粒子径が $4\ \mu\text{m}$ 以下のダイヤモンドブレードを用いた精密加工によって導波路幅 $10\ \mu\text{m}$ のリッジ導波路を作製する。

【0043】

作製された単一モード化されたリッジ導波路を、基板から短冊状に切りだし、導波路端面を光学研磨することによって長さ $60\ \text{mm}$ の波長変換素子を作製する。

【0044】

このほか第2の基板52として LiTaO_3 基板を用いた場合のほか、ノンドープ LiNbO_3 基板を第1の基板とし、 LiTaO_3 基板を第2の基板として用いた場合にも、同様の波長変換素子を作製することができる。また、基板厚としては $500\ \mu\text{m}$ の基板のほか、 $200\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \text{mm}$ 以下の基板厚を用いることができる。

40

【0045】

図5に、波長変換モジュールを示す。波長変換モジュールは、合波した励起光を入射すると、非線形光学効果によって差周波光又は和周波光の波長変換光を出射する装置である。偏波保持型単一モード光ファイバ64を、作製した波長変換素子61に融着接続する。波長変換素子61をキャリア62に接着し、温度調節用のペルチェ素子67を内蔵したパッケージ66内に実装する。フィルタ65を介し、レンズ63を用いて入力ファイバと光学的に結合することによって、波長変換モジュールを作製する。

【0046】

50

図6に、作製した波長変換モジュールを用いた変調機能付光源装置を示す。まず、波長変換素子モジュール75の入力側ファイバと、1.06/1.32 μ m WDMカップラ74の出力ファイバとを融着接続する。次に、WDMカップラ74の1.06 μ m入力ファイバ70aにFBG73を融着接続し、FBG73と1.064 μ m帯半導体レーザ71とを融着接続する。ここで、FBG73は、1.064 μ m帯半導体レーザ71の外部に位置する。さらに、WDMカップラ74の1.32 μ m入力ファイバ70bに1.32 μ m DFBレーザ72の出力ファイバを融着接続する。1.064 μ m帯半導体レーザ71には、温度制御装置76とパルス駆動電源77とを結線路80a、80bを介して接続し、1.32 μ m帯DFBレーザ72には、温度制御装置78とDC駆動電源79とを結線路80c、80dを介して接続することによって変調機能付光源装置は完成する。1.064 μ m帯半導体レーザ71と1.32 μ m帯DFBレーザ72とは、それぞれ温度制御装置76と78とによって温度を一定に保たれる。また1.064 μ m帯半導体レーザ71は、パルス駆動電源77により制御され、1.32 μ m帯DFBレーザ72は、DC駆動電源79によって制御される。ここで、FBG73は、反射率20%、1.064 μ m帯半導体レーザ71の素子長1.2mmで決まる共振波長間隔0.12nmよりも狭い反射帯域0.1nmを有する。

【0047】

FBG73を備えて波長を安定化した1.064 μ m半導体レーザ71は、原理的には単一波長で動作するが、電流の増加とともに発熱による長波長側への波長シフトが生じる。1.064 μ m半導体レーザ71から出射された出力光の波長が、FBGの反射帯域を過ぎてしまうと、反射帯域に生じた別のモードへのモード跳びが起こる。モード跳びの起きる電流値においては、光出力の不連続となるキックが生じる(図7A)。しかし、FBG73を備えて波長を安定化した1.064 μ m半導体レーザ71から出射される出力光は、光出力のキックが生じる位置以外では連続で滑らかな微分効率特性を有する。よって、キック位置においてノイズが発生するが、出力光6mWが得られ、ピーク-ピーク間で10%以下のノイズを許容する条件の下、0.59 μ mの波長変換光に10Mb/sでのON/OFF変調を行うことができた。

【0048】

なお、FBGの設置位置として、1.064 μ m帯半導体レーザから1~2mの範囲で検討を行ったが、いずれの場合においても同様な特性結果が得られた。

【0049】

実施例1では、FBGの反射帯域が0.1nmのものを使用したが、20pm、10pm以下のものを使用することもできる。

【0050】

(実施例2)

実施例2では、実施例1と同じ構成の変調機能付光源装置を用いる。ここでは、パルス駆動電源77の駆動条件を限定して用いる。

【0051】

図8Bに、そのときの電流-光出力特性を示す。実施例2においても実施例1同様、FBG73を備えて波長を安定化した1.064 μ m半導体レーザ71から出射される出力光は、光出力のキックが生じる位置以外では連続で滑らかな微分効率特性を有する。

【0052】

まず、1.064 μ m帯半導体レーザ71を温度制御することにより、電流-光出力特性における最初のキック電流値がほぼ最大となるように設定する。このとき電流変調範囲の下限は閾値以下であり、上限が電流-光出力特性において生じる最初のキックを与える電流値より僅かに低い電流値に設定する。これによって、変調機能付光源装置の光出力も減少するが、その間、単一波長でキックフリーなモード跳びのないレーザ特性を実現できる。これによりピーク-ピーク間で2%以下の低ノイズを許容する条件下で、0.59 μ mの波長変換光に10Mb/sでのON/OFF変調を行うことができた。

【0053】

(実施例3)

図9に、FBG73の直後にアイソレータ81を備えた変調機能付光源装置を示す。波長変換素子モジュール75の入力側ファイバと、1.06/1.32 μ m WDMカップラ74の出力ファイバとを融着接続する。次に、WDMカップラ74の1.06 μ m入力ファイバ70aにアイソレータ81を融着する。さらに、アイソレータ81にFBG73を融着接続し、FBG73と1.064 μ m帯半導体レーザ71とを融着接続する。ここで、FBG73は、1.064 μ m帯半導体レーザ71の外部に位置する。さらに、WDMカップラ74の1.32 μ m入力ファイバ70bに1.32 μ m DFBレーザ72の出力ファイバを融着接続する。1.064 μ m帯半導体レーザ71には、温度制御装置76とパルス駆動電源77とを結線路80a、80bを介して接続し、1.32 μ m帯DFBレーザ72には、温度制御装置78とDC駆動電源79とを結線路80c、80dを介して接続することによって変調機能付光源装置は完成する。実施例1及び2の構成においては、使用環境温度等の変化によって装置の状態が変化することにより、反射戻り光の影響が変化し、1.064 μ m帯半導体レーザの動作が不安定となる。そこで、FBG73の直後にアイソレータ81を用いることで、1.064 μ m帯半導体レーザの動作を時間的にも安定に使用することができる。

【0054】

(実施例4)

図10に、FBG73に温度制御機能91を付加した変調機能付光源装置を示す。波長変換素子モジュール75の入力側ファイバと、1.06/1.32 μ m WDMカップラ74の出力ファイバとを融着接続する。次に、WDMカップラ74の1.06 μ m入力ファイバ70aにアイソレータ81を融着する。さらに、アイソレータ81にFBG73を融着接続し、FBG73と1.064 μ m帯半導体レーザ71とを融着接続する。また、FBG73に結線路90を融着し、結線路90により、FBG73と温度制御装置91とを接続する。ここで、FBG73は、1.064 μ m帯半導体レーザ71の外部に位置する。さらに、WDMカップラ74の1.32 μ m入力ファイバ70bに1.32 μ m DFBレーザ72の出力ファイバを融着接続する。1.064 μ m帯半導体レーザ71には、温度制御装置76とパルス駆動電源77とを結線路80a、80bを介して接続し、1.32 μ m帯DFBレーザ72には、温度制御装置78とDC駆動電源79とを結線路80c、80dを介して接続することによって変調機能付光源装置は完成する。実施例1、2及び3の構成においては、使用環境温度が安定していることを前提とし、FBG73に関して温度制御をしない場合について述べてきた。しかし、1日の間に使用環境温度が大きく変化するような場所での使用も考えられる。そのような場合には、励起光の発振波長が変化し、それにより変換光の波長も変化することが問題となる。そこで、FBG73に温度制御機能91を付加する。これにより、変調機能付光源装置は、使用環境温度が10から45まで変化したとしても、その特性は全く変化することなく使用することができる。実施例4では、アイソレータ81を用いた例を示したが、仕様によってはアイソレータ81のない構成で使用できることは言うまでもない。

【0055】

なお、1.32 μ m帯DFBレーザモジュールにおいては、アイソレータが内蔵されたものが通常となっている。

【0056】

(実施例5)

実施例5では、実施例1と同じ構成の変調機能付光源装置を用い、図6の1.064 μ m帯半導体レーザ71のFBG側端面の反射率を1%以下にした時の変調動作を示す。1.064 μ m帯半導体レーザ71のFBG側端面の反射率が1%以上残留していると、1.064 μ m帯半導体レーザ71の両側端面とFBG73の3つの反射が存在することになり、複合共振器が構成される。このような複合共振器が存在すると、レーザ波長及びレーザ強度が不安定となり、電流-光出力特性でキックが発生する。このような不安定動作を避けるために、1.064 μ m帯半導体レーザ71のFBG側端面の反射率を1%以下

10

20

30

40

50

にし、 $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザ71のFBG73と接続されていない側の端面とFBG73とで共振器を構成したレーザを実現した。この時、FBG73の反射率は15%で、また、その反射スペクトラムの半値全幅は20 pmで、 $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザ71から約1 mの場所に設置した。この $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザ71とFBG73とから成るレーザでは、縦モード間隔は、約100 MHzとなり、FBG73の半値全幅より十分狭い。したがって、縦モードはマルチモードで発振し、外部からの戻り光が存在しても安定した発振が可能となる。なお、FBG73の反射率は、5%以上である事が好ましいが、その一方、高すぎると出力低下を起こしたり、図7Aのようにキック位置で大きな出力変動が生じる。

【0057】

この $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザ71のFBG側端面の反射率を1%以下にした時の、FBG73からの出力される波長1064 nmのレーザ光の電流 - 光出力特性を図14に示す。また、レーザ光の中心波長のレーザ駆動電流依存性を図15に示す。上述のように、 $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザ71の反射率を1%以下に下げた場合、FBG73から出力されるレーザ光は、光出力の1%以上も変化するような大きなキックが無く、安定に100 MHz間隔でマルチモード発振する。また、電流の増加に伴い半値幅の増加が見られるが、中心波長は測定分解能である10 pm以下でしか変化しない。

【0058】

このFBG側端面の反射率を1%以下にした $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザ71と1320 nmDFBレーザ72とを組み合わせ、これらの光源から出射されるレーザ光を合波すると、和周波発生により、 $0.59\ \mu\text{m}$ の波長変換光が得られる。さらに、 $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザ71をパルス駆動電源77を用いて変調することにより、 $0.59\ \mu\text{m}$ の波長変換光を10 Mb/sでのON/OFF変調を十階調で変調することができる。

【0059】

なお実施例5では、FBG73の後段にアイソレータは必ずしも必要ではなく、また、1064 nmのレーザに限らず、980 nm、940 nmなど、他の波長のレーザでも同様な特性が得られる。

【0060】

(実施例6)

図16に、本発明の出力光強度が一定になるようにFBG付レーザの駆動電流にフィードバックをかけた変調機能付光源装置の構成を示す。この実施例6は、実施例1の構成に、ビームサンプラ1201、フォトディテクタ1202、比較器1203、パルス駆動電源1205をさらに備えている。ビームサンプラ1201は、波長変換素子モジュール75から出力されるレーザ光の光路に設置され、波長変換素子モジュール75及びフォトディテクタ1202と光学的に接続されている。フォトディテクタ1202は、検出した光強度を電気信号に変換し、その電気信号を比較器1203に送信することができるように比較器1203に電氣的に接続されている。この比較器1203は、パルス駆動電源1205とも接続され、パルス駆動電源1205は、 $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザ71とさらに接続されている。

【0061】

この構成により、出力光強度が一定になるように、その出力強度の一部をビームサンプラ1201で分岐し、フォトディテクタ1202で検出し、その強度が一定になるようにFBG付レーザの駆動電流にフィードバックをかけることができる。ビームサンプラ1201の反射率は、1%から10%程度である。また、比較器1203は、フォトディテクタ1202からの光強度に関する電気信号と外部からの電気入力信号1204とを比較し、両者が予め設定された関係を維持するようにパルス駆動電源1205を制御することができる。

【0062】

図17に、実施例6のレーザを10 から40 で変化する恒温槽中で動作させた時の、レーザ出力強度の時間変化を示す。なお、ここでは、開始時のレーザ出力で規格化した

10

20

30

40

50

値を示している。上述の実施例 6 の構成をとることにより、装置の環境温度が 10 から 40 に変化しても、出力光の強度変化が $\pm 1\%$ という良好な結果を得ることができる。

【0063】

(実施例 7)

実施例 7 においては、実施例 1、2、3、4、5 又は 6 の構成において、 $1.32\ \mu\text{m}$ 帯 DFB レーザの駆動電源として、変調機能を有する駆動電源を備えた装置を用いる。つまり、ここでは、 $1.32\ \mu\text{m}$ 帯 DFB レーザの電流を制御することにより、変調機能付光源装置に変換機能を持たしている。

【0064】

そこで、 $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザに高出力型の $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザを用い、動作電流を増加して出力を倍程度の $80\ \text{mW}$ まで出し、 $1.32\ \mu\text{m}$ 帯 DFB レーザの電流を閾値以下から $80\ \text{mA}$ まで ON/OFF することにより変調を行う。その結果図 11A に示すように、 $0.58\ \mu\text{m}$ の波長変換光の強度を $1/2$ 程度の減少に止め、ピーク - ピーク間で 2% 以下のノイズを許容する条件の下、 $0.58\ \mu\text{m}$ の波長変換光に $10\ \text{Mb/s}$ での ON/OFF 変調を行うことができる。

【0065】

なお、FBG を備えて波長安定化した $1.064\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザと $1.32\ \mu\text{m}$ 帯 DFB レーザの両方を閾値以下での ON/OFF 変調をする場合に、同期をとって変調することで変調光の ON/OFF 比を $70\ \text{dB}$ から $100\ \text{dB}$ に改善することができる。

【0066】

以上において、非線形光学材料として LiNbO_3 を用いた場合について説明を行ったが、 LiTaO_3 や $\text{LiNb}(x)\text{Ta}(1-x)\text{O}_3$ ($0 < x < 1$) を用いた場合も同様の効果が得られる。さらにこれら 3 種を組み合わせたものや、Mg、Zn からなる群から選ばれた少なくとも一種を添加物として含有しているものを非線形光学材料として用いても、同様の効果が得られる。

【0067】

図 12 に、変換機能付光源装置を蛍光顕微鏡装置に組み込んだ構成を示す。組み込んだ変換機能付光源装置は、実施例 1 と同じ装置を用いる。蛍光顕微鏡装置は、波長変換素子モジュール 75 から波長変換光が出射され、このレーザ光はダイクロイックミラー 1013 で反射し、対物レンズ 1014 を介して集光され、スポット状のレーザ光となって細胞 1016 に照射される。細胞 1016 は、蛍光色素によって染色されており、細胞 1016 の蛍光色素は、波長変換光によって励起されて蛍光を発する。細胞 1016 から発した蛍光は、対物レンズ 1014、ダイクロイックミラー 1013、及びプリズム 1012 を介して高感度カメラ 1011 に入射される。高感度カメラ 1011 は、入射した蛍光を電気信号に変換し、画像表示部は、高感度カメラ 1011 から入力された各電気信号をもとに蛍光画像を生成し、表示出力する。蛍光顕微鏡装置に組み込み、他のタンパク質の遺伝子に融合させて細胞に導入させた蛍光タンパク (GFP) の観察に用いると、生きた細胞において特定の構造体、あるいは機能分子を高感度に蛍光ラベルすることができる。

【0068】

また、同じ構成において波長を安定化した $0.94\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザを用いた場合には、 $1.32\ \mu\text{m}$ 帯 DFB レーザとの組み合わせで、 $543\ \text{nm}$ の波長変換光を実現させることができる。

【0069】

その他、図 8A、8B 又は図 11A、11B に示した特性を有する光源の励起レーザを、図に示した ON 状態を最大値として十段階に ON レベルを設定することができる。この場合、ピーク - ピーク間で光強度の減少 5% 以下の許容条件の下、 $0.58\ \mu\text{m}$ の波長変換光に $10\ \text{Mb/s}$ での ON/OFF 十階調変調を行なうことができる。

【0070】

以上の実施例では、和周波、差周波発生の場合を述べたが、半導体レーザ光源として第 1 の半導体レーザ光源のみ、若しくは第 2 の半導体レーザ光源のみを用いた第 2 高調波発

10

20

30

40

50

生の変調光源の場合にも適用できる。

【0071】

図13に、変調機能付光源装置を用いた光変調方法を説明するフローチャートを示す。ここで説明する光変調方法は、上記の実施例全てを包含する方法である。そのため、各実施形態における光変調方法としては、必ずしもこれら全てのステップを含んでいる必要はない。

【0072】

ステップ1101において、第2の半導体レーザから変調された光を出射する。ステップ1102において、ステップ1101において変調された光を、第2の半導体レーザの素子長で決まる共振波長間隔よりも狭い反射帯域を有するFBGに入射する。ステップ1103にておい、FBGから出射された光をアイソレータに入射する。ステップ1104において、第1の半導体レーザから出射された光と、FBG若しくはアイソレータから出射された光を合波して光導波路に入射する。ステップ1105において、光導波路から第1及び第2の半導体レーザからの光の差周波、又は和周波を出射する。ステップ1106において、FBGの温度を一定の範囲内に制御する。ステップ1107において、第2の半導体レーザ光源への電流振幅変調の下限を、閾値以下であり出射波長が非線形光学材料の擬似位相整合帯域の短波側波長となるように設定し、電流振幅変調の上限を電流-光出力特性において生じる最初のキंकを与える電流値より低い電流値であるように設定する。ステップ1108において、第1の半導体レーザ光源に対する電流振幅変調の下限を、閾値以下であり出射波長が非線形光学材料の擬似位相整合帯域の短波側波長となるように設定し、電流振幅変調の上限を出射波長が非線形光学材料の擬似位相整合帯域の長波側波長となるように設定する。

10

20

【0073】

但し、各実施形態における光変調方法が、ステップ1103、1106～1108の各々を備えるか否かは任意である。また、ステップ1106～1108の各々の挿入位置は任意であって、その順序を変えることができる。

【0074】

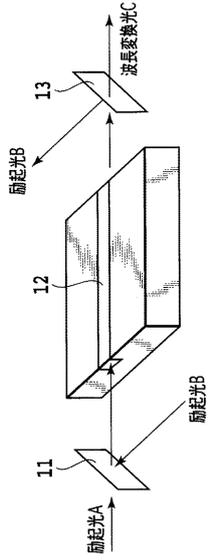
図18は、実施例6に対応する変調機能付光源装置を用いた光源変調方法を説明するフローチャートを示す。図13のステップの最下段に、フォトディテクタの受光信号と設定値とを比較し、ステップ1107にフィードバックするステップが加わる。

30

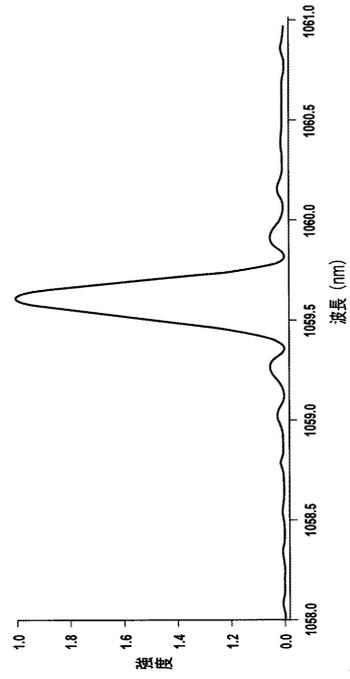
【0075】

以上、 $0.58\ \mu\text{m}$ の変換光を発生する変調機能付光源装置について説明を行ってきたが、第1の半導体レーザ光源に $1.307\ \mu\text{m}$ 帯DFBレーザを用い、第2の半導体レーザ光源にFBGを備えて波長安定化した $0.976\ \mu\text{m}$ 帯半導体レーザを用いた、 $0.56\ \mu\text{m}$ の波長変換光を発生する変調機能付光源装置についても、同等に実用的な光強度を有する変調機能が得られる。

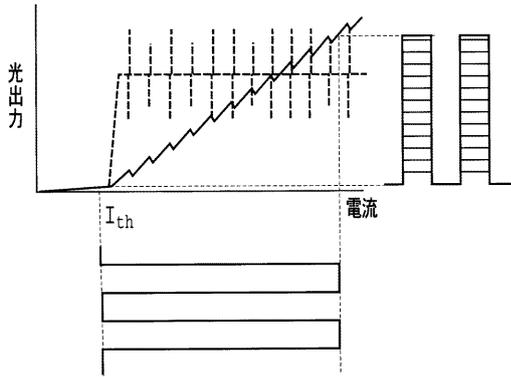
【図1】



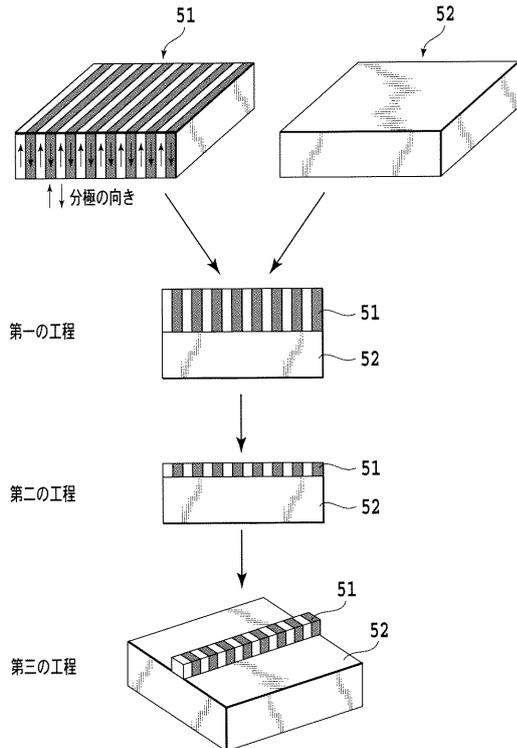
【図2】



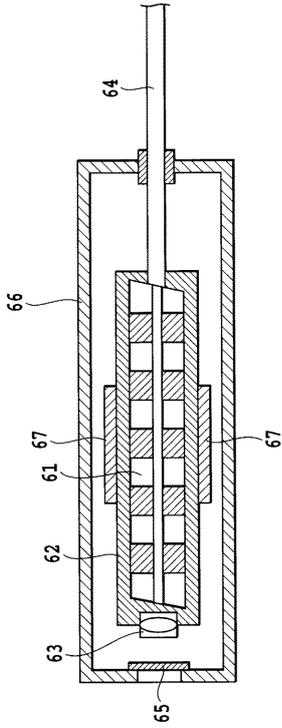
【図3】



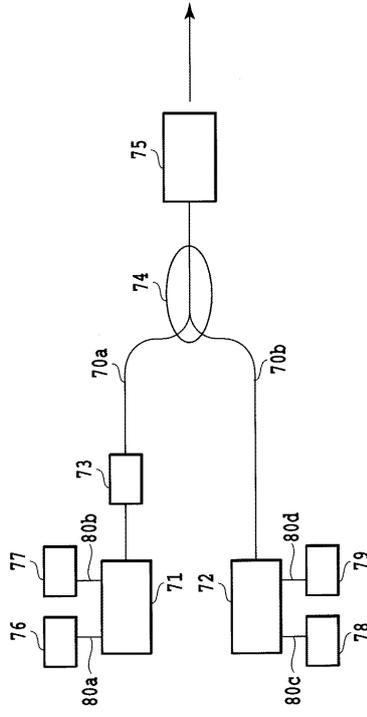
【図4】



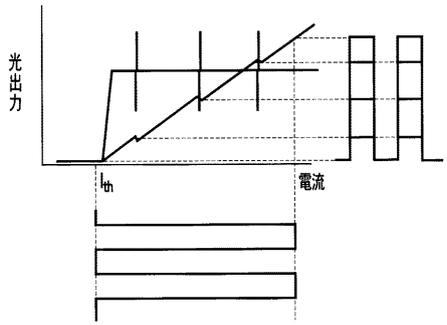
【図5】



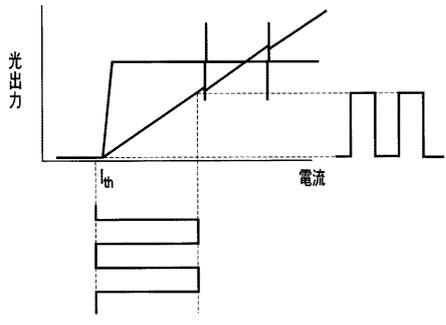
【図6】



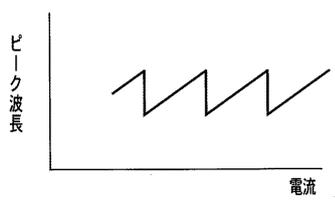
【図7A】



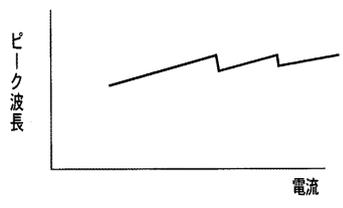
【図8A】



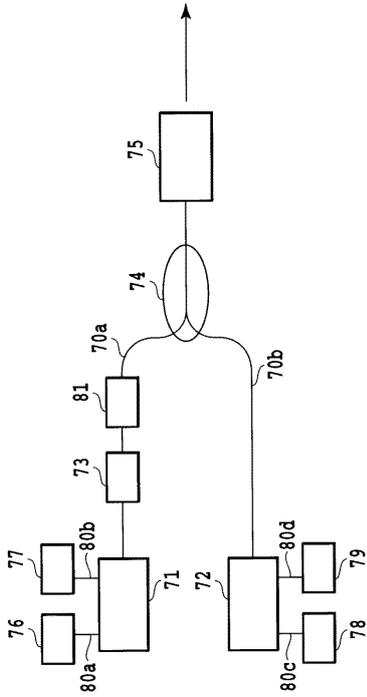
【図7B】



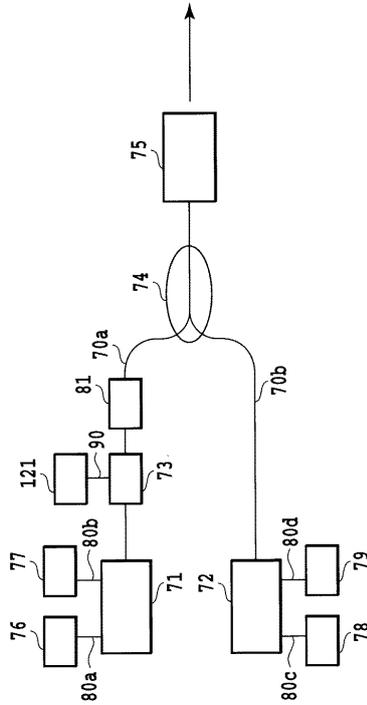
【図8B】



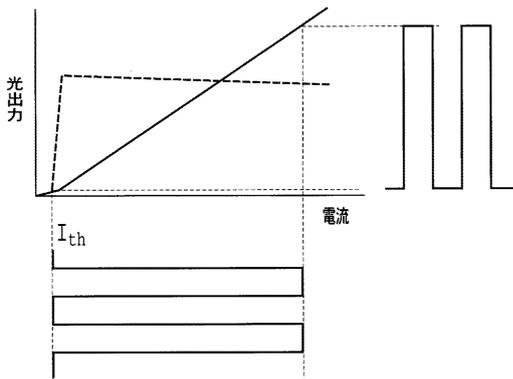
【図9】



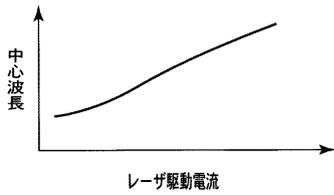
【図10】



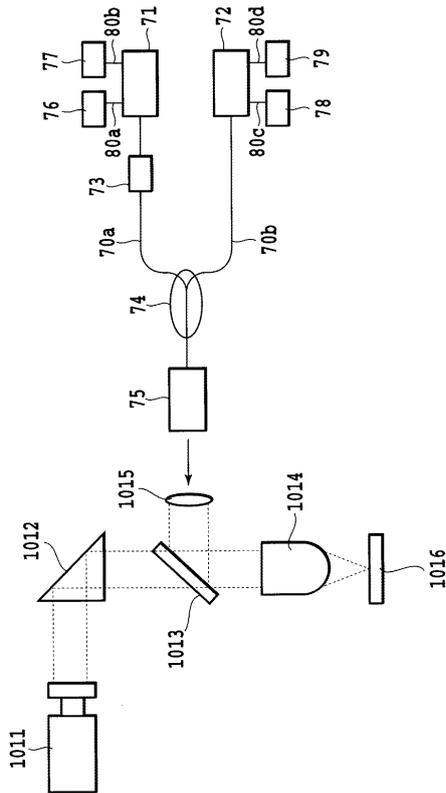
【図11A】



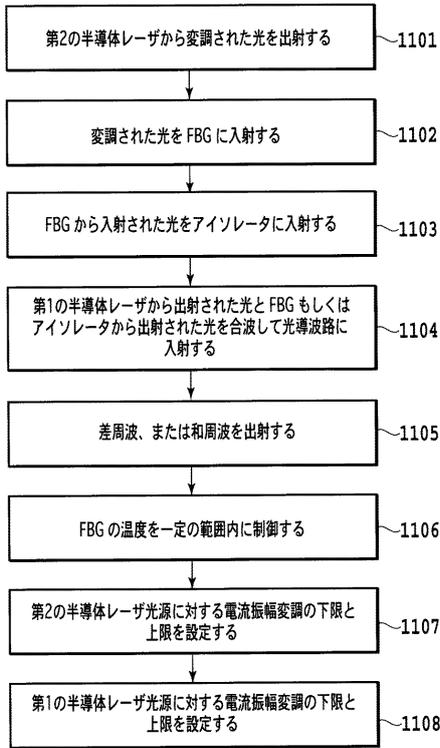
【図11B】



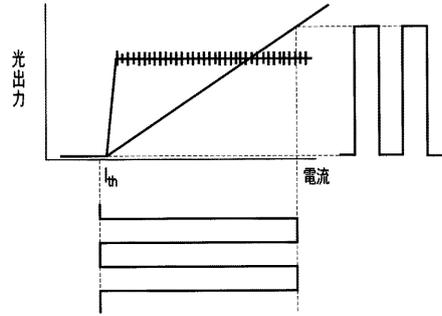
【図12】



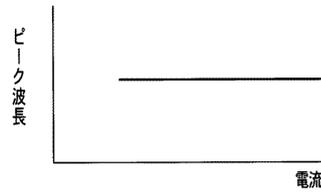
【図13】



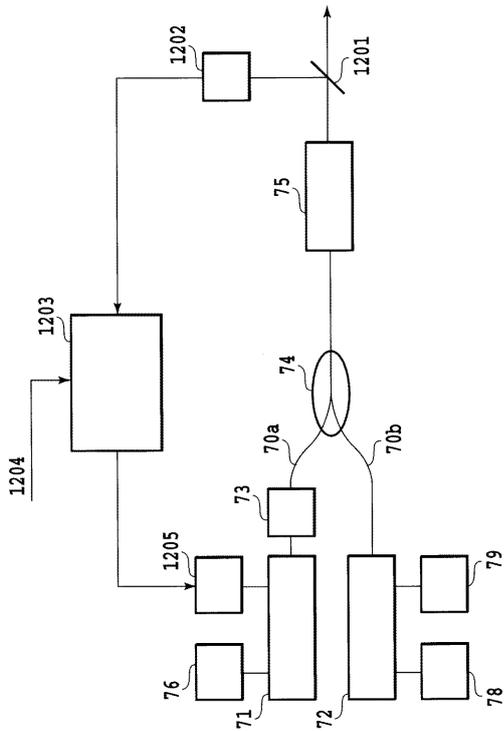
【図14】



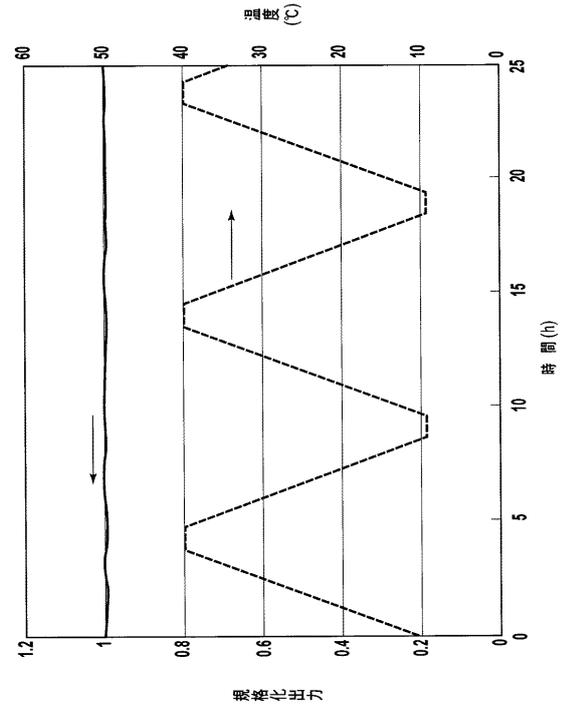
【図15】



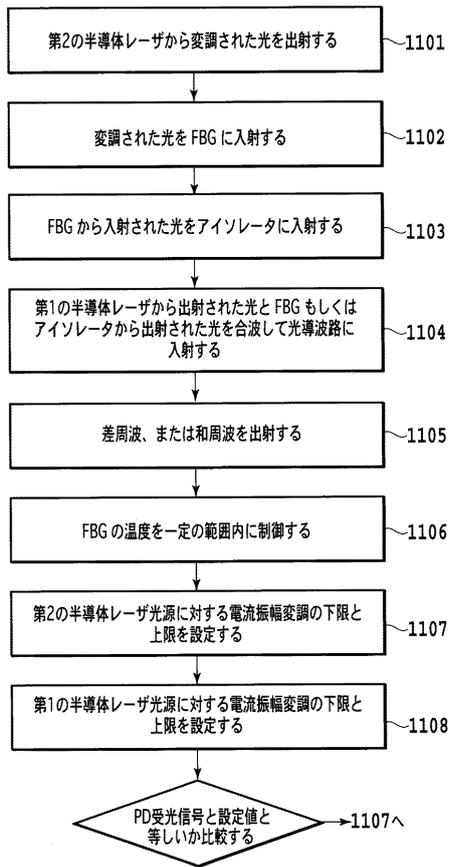
【図16】



【図17】



【図18】



フロントページの続き

- (72)発明者 柳川 勉
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 西田 好毅
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 馬渡 宏泰
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 忠永 修
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 遊部 雅生
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 鈴木 博之
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 宮澤 弘
東京都渋谷区道玄坂1丁目12番1号 NTTエレクトロニクス株式会社内
- (72)発明者 湯本 潤司
東京都渋谷区道玄坂1丁目12番1号 NTTエレクトロニクス株式会社内

審査官 河原 正

- (56)参考文献 特開平10-206917(JP,A)
特開2003-307759(JP,A)
特開2004-070338(JP,A)
特開2003-188455(JP,A)
国際公開第04/025363(WO,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/37
H01S 3/108
H01S 3/109
H01S 5/062