

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5337848号
(P5337848)

(45) 発行日 平成25年11月6日 (2013. 11. 6)

(24) 登録日 平成25年8月9日 (2013. 8. 9)

(51) Int. Cl. F I
HO 1 S 3/134 (2006. 01) HO 1 S 3/134
HO 1 S 3/23 (2006. 01) HO 1 S 3/23

請求項の数 3 (全 39 頁)

(21) 出願番号	特願2011-155782 (P2011-155782)	(73) 特許権者	000001236
(22) 出願日	平成23年7月14日 (2011. 7. 14)		株式会社小松製作所
(62) 分割の表示	特願2005-177192 (P2005-177192)		東京都港区赤坂二丁目3番6号
原出願日	平成17年6月17日 (2005. 6. 17)	(73) 特許権者	000102212
(65) 公開番号	特開2011-233918 (P2011-233918A)		ウシオ電機株式会社
(43) 公開日	平成23年11月17日 (2011. 11. 17)		東京都千代田区大手町二丁目6番1号
審査請求日	平成23年8月1日 (2011. 8. 1)	(74) 代理人	110000383
(31) 優先権主張番号	特願2004-198920 (P2004-198920)		特許業務法人 エビス国際特許事務所
(32) 優先日	平成16年7月6日 (2004. 7. 6)	(74) 代理人	100139103
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		弁理士 小山 卓志
		(74) 代理人	100097777
			弁理士 荏澤 弘
		(74) 代理人	100088041
			弁理士 阿部 龍吉

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高出力ガスレーザー装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

フロント側ミラーと狭帯域化モジュールとを含む発振段共振器、
 前記発振段共振器中に配置されレーザーガスが封入された発振段レーザーチャンバー、
 及び

前記発振段レーザーチャンバー内のレーザーガスを励起する発振段励起部、
 を含む発振段レーザーと、

リア側ミラーと出力側ミラーとを含む増幅段共振器、
 前記増幅段共振器中に配置されレーザーガスが封入された増幅段レーザーチャンバー、
 前記増幅段レーザーチャンバー内のレーザーガスを励起する増幅段励起部、
 及び

前記増幅段レーザーチャンバーと前記出力側ミラーの間に介在させ、前記出力側ミラー側のレーザービームの径あるいは幅を広げるビーム拡大光学系、
 を含む増幅段レーザーと、

前記増幅段レーザーチャンバーと前記出力側ミラーの間に介在させた前記ビーム拡大光学系を制御するコントローラと、

を備える高出力ガスレーザー装置。

【請求項 2】

前記ビーム拡大光学系は、1個又は複数個のウェッジ基板から構成されたウェッジ基板式ビーム拡大光学系を含む

__請求項 1 に記載の高出力ガスレーザ装置。

【請求項 3】

前記出力側ミラーは、反射防止コーティング及び部分反射ミラーコーティングの少なくとも 1 つを有する

__請求項 1 に記載の高出力ガスレーザ装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、高出力ガスレーザ装置に関し、特に、共振器を備えた高出力ガスレーザ発振器や高出力ガスレーザ増幅器に関するものである。

【背景技術】

【0002】

半導体集積回路の微細化、高集積化につれて、半導体露光装置においては解像力の向上が要請されている。このため、露光用光源から放出される光の短波長化が進められており、露光用光源には、従来の水銀ランプに代わってガスレーザ装置が用いられている。現在の露光用ガスレーザ装置としては、波長 248 nm の紫外線を放出する KrF エキシマレーザ装置、並びに、波長 193 nm の紫外線を放出する ArF エキシマレーザ装置が用いられている。次世代の露光技術として、露光用レンズとウエハ間を液体で満たして、屈折率を変えることによって、露光光源の見かけの波長を短波長化する液浸技術を ArF エキシマレーザ露光に適用しようとしている。液体の屈折率が略 1.44 の ArF エキシマレーザ液浸では、134 nm の波長になる。また、次々世代の露光用光源として、波長 157 nm の紫外線を放出するフッ素分子 (F_2) レーザ装置が有力であり、 F_2 レーザ液浸露光が採用される可能性もある。液体の屈折率が略 1.36 となる F_2 レーザ液浸では 115 nm の波長になると言われている。

【0003】

ところで、多くの半導体露光装置の光学系には、投影光学系が採用されている。投影光学系では、異なる屈折率を有するレンズ等の光学素子が組み合わされ色収差補正が行われる。現在、露光用光源であるレーザ波長の 248 nm ~ 115 nm の波長域では、投影光学系のレンズ材料として使用に適する光学材料は、合成石英と CaF_2 以外にはない。各波長での光透過率の高いものを使うため、KrF エキシマレーザの投影レンズとしては、合成石英のみで構成された全屈折タイプの単色レンズが採用され、ArF エキシマレーザの投影レンズとしては、合成石英と CaF_2 で構成された全屈折タイプの部分色消しレンズが採用されている。

【0004】

ところが、KrF エキシマレーザ、ArF エキシマレーザの自然発振幅は約 350 ~ 400 pm と広いために、これらの投影レンズを使用すると色収差が発生して、解像力が低下する。そこで、色収差が無視できるまでに、上記ガスレーザ装置から放出されるレーザ光のスペクトル線幅を狭帯域化する必要がある。このため、レーザ装置には狭帯域化素子（エタロンやグレーティング等）を有する狭帯域化モジュールがレーザ共振器内に設けられ、スペクトル線幅の狭帯域化が実現されている。

【0005】

さて、液浸露光では、高 NA（開口数）化によりレンズの透過率が低下するため、一定露光量を得るために、光源であるレーザ装置の高出力化が必要とされている。また、露光装置の高スループット化のためにも、レーザ装置の高出力化が必要とされている。スペクトル線幅を狭帯域化した上で高出力を得るための方法として、2 ステージレーザシステムがある。2 ステージレーザシステムは、狭帯域化したレーザ光を出力するための発振段レーザ（OSC レーザ）と、その狭帯域化されたレーザビーム（これをシード光（seed 光）と呼ぶ。）を増幅するための増幅段レーザ（AMP レーザ）から構成される。図 1 に

10

20

30

40

50

、露光用２ステージレーザ装置の基本構成の概略を示す（詳細は後記する。）。

【０００６】

２ステージレーザシステムの方式として、増幅手段の違いにより、ＭＯＰＯ方式とＭＯＰＡ方式の２種類が知られている。ＭＯＰＯは、Master Oscillator, Power Oscillatorの略で、インジェクションロック方式とも呼ばれる。これは増幅用チャンバーに共振器が配置されている場合である。ＭＯＰＡは、Master Oscillator, Power Amplifier の略であり、増幅用チャンバには共振器が配置されていない場合である。図１は、ＭＯＰＯ方式である。増幅段レーザ６０は入力側ミラー（リア側ミラー）１と出力側ミラー（フロント側ミラー）２とからなるファブリーペロー型共振器を備えており、その間にレーザガスが充填されたチャンバー３が配置されている。さらには、チャンバー３内のレーザガスを励起して利得（ゲイン）領域を形成する放電電極４、５等を備えて構成される。また、発振段レーザ５０は、典型的には例えば拡大プリズムとグレーティング（回折格子）によって構成されてなる狭帯域化モジュール５１内の光学素子が兼ねるリア側ミラーとフロントミラー５２とで構成されるレーザ共振器内にレーザガスが充填されたチャンバー５３を備え、チャンバー５３内のレーザガスを励起して利得領域を形成する放電電極５４、５５等を備えて構成される。なお、放電領域は紙面内で手前と奥側に対向配置してある。

10

【０００７】

発振段レーザ５０では、数 mJ/cm^2 の平均エネルギー密度のレーザビームであるが、増幅段レーザ６０では、レーザエネルギーが増幅されるので、数 $10\text{mJ}/\text{cm}^2$ の平均エネルギー密度のレーザビームとなる。また、レーザビーム内にはエネルギー密度は均一ではなく、一般的に中央部が高く、ビームの裾野は低く分布している。このため、ピークエネルギー密度は、上記平均エネルギー密度の数倍になる。

20

【０００８】

また、２ステージレーザシステムの増幅段レーザに限らず、炭酸ガスレーザ装置等の高出力ガスレーザ装置のレーザ共振器においても、ピークエネルギー密度が高い。

【０００９】

一般に、レーザ共振器は、レーザ光を出射するフロントミラーと、高反射率を持ったリアミラーから構成される。出力ミラーは、片面に数１０％の反射率のＰＲ膜（部分反射ミラーコーティング）、もう片方の面にＡＲ膜（反射防止コーティング）が付けられている。リアミラーは、ＨＲ膜（高反射率（全反射）ミラーコーティング）が付けられている。増幅段レーザの場合のリア側ミラーは、９０％程度の高反射率のＰＲ膜が付いている。出力されるレーザ光は、出力側ミラーに到達したレーザ光の一部のみが出力されるため、共振器内部のレーザエネルギーは、外部に出力されるエネルギーよりも数倍高くなる。

30

【００１０】

このため、共振器内部におけるレーザ光のエネルギー密度が非常に高くなるので、共振器を構成する出力（側）ミラーとリア（側）ミラーに、高密度の光子が照射されることによりミラー表面が損傷してしまうという問題点があった。また、高エネルギー密度のビームが透過するため、その表面及び内部における光の吸収が大きくなり発熱する。この熱応力によって光学素子内部に歪みが発生するという問題点があった。

【００１１】

ところで、本出願人等は、ＰＣＴ／ＪＰ２００４／００５４９０において、空間コピーレンズを低くした半導体露光装置用に適した高出力の２ステージレーザ装置を提案した。この２ステージレーザ装置は、発振段レーザと増幅段レーザとからなる露光用２ステージレーザ装置であって、増幅段レーザは入力側ミラーと出力側ミラーとからなるファブリーペローエタロン型共振器を備え、その共振器は安定共振器を構成しているもの、あるいは、発振段レーザで発振され増幅段レーザに入力されるレーザ光の光軸と、増幅段レーザの共振器の光軸とが角度をなすように設定されているもの、又は、増幅段レーザの共振器のリア側ミラー及び出力側ミラーの反射面が平面で、リア側ミラー及び出力側ミラーの法線が、発振段レーザで発振され増幅段レーザに入力されるレーザ光の光軸に対して角度をなすように、かつ、相互に角度をなすように設定され、発振段レーザで発振されたレーザ光が

40

50

両方のミラー間の距離がより長い側から共振器内に入力されるものであった。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

以上のような半導体露光装置用のKrFエキシマレーザ装置、ArFエキシマレーザ装置、フッ素分子(F_2)レーザ装置に限らず、炭酸ガスレーザ装置等の高出力ガスレーザ装置においては、レーザ発振器のみからなる場合にはレーザ発振器において、また、2ステージレーザ装置においてはレーザ増幅器において、共振器内部におけるレーザ光のエネルギー密度が非常に高くなるため、共振器を構成するリア側ミラー及び出力側ミラーの耐久性が悪くなる。この問題を解決するために、PCT/JP2004/005490で提案したように、これらのミラーの使用部分を共振器の光軸方向に対して略垂直方向に定期的に移動させるようにすることもできるが、可動部品を必要とし、また、その移動を制御する手段を必要とする。

10

【0013】

本発明はこのような現状に鑑みてなされたものであり、その目的は、共振器を備えた高出力ガスレーザ発振器や高出力ガスレーザ増幅器において、共振器を構成する出力側ミラー及びリア側ミラーでの表面損傷及び歪みが発生しないように照射するピークエネルギー密度を減少させ、また、このとき、レーザの中心波長が変化したとしてもレーザ出力が減少しないようにすることである。

20

【課題を解決するための手段】

【0014】

本発明の高出力ガスレーザ装置は、リア側ミラーと出力側ミラーとからなる共振器と、該共振器中に配置されレーザガスが封入されたレーザチャンバーと、前記レーザチャンバー内のレーザガスを励起する励起手段とを備えたガスレーザ装置において、

前記レーザチャンバーと前記リア側ミラーの間、及び、前記レーザチャンバーと前記出力側ミラーの間の少なくとも一方に、ミラー側のレーザビームの径あるいは幅を広げるビーム拡大光学系を介在させたことを特徴とするものである。

【0015】

この場合に、レーザ発振器を構成するようにしてもよく、また、レーザ増幅器を構成するようにしてもよい。例示としては、2ステージレーザ装置の増幅段レーザに用いることができる。

30

【0016】

以上において、ビーム拡大光学系は、1個又は複数の三角プリズムから構成されたビームエキスパンダープリズム系から構成することができる。

【0017】

この場合に、レーザチャンバーとは反対側のビームエキスパンダープリズム系を構成する三角プリズムの最も外側の平面に高反射率ミラーコーティング又は部分反射ミラーコーティングを施すことにより、リア側ミラー又は出力側ミラーをビームエキスパンダープリズム系と一体に構成することができる。

【0018】

40

本発明の別の高出力ガスレーザ装置は、リア側ミラーと出力側ミラーとからなる共振器と、該共振器中に配置されレーザガスが封入されたレーザチャンバーと、前記レーザチャンバー内のレーザガスを励起するために対向して配置された電極とを備えたガスレーザ装置において、

前記出力側電極端と前記出力側ミラーの間、及び、前記リア側電極端と前記リア側ミラーの間の少なくとも一方に、レーザの中心波長が変化してもレーザ出力エネルギーの変化量が無視できる程度に小さくでき、かつ、前記ミラー表面におけるレーザビームの径あるいは幅を拡大させるビーム拡大光学系を介在させたことを特徴とするものである。

【0019】

この場合に、例えば、2ステージレーザ装置の増幅段レーザに用いることができる。

50

【0020】

そして、そのビーム拡大光学系は、出力側電極端と出力側ミラーの間、及び、リア側電極端とリア側ミラーの間の両方に配置され、それぞれのビーム拡大光学系の構成が同じで、対向して配置された両電極の光軸方向の中心線を含む断面内で、左右上下が対称になるように配置されていることが望ましい。

【0021】

また、そのビーム拡大光学系は、1個又は複数個のウェッジ基板から構成されたウェッジ基板式ビーム拡大光学系からなっている、1個又は複数個の三角プリズムから構成されたビームエキスパンダープリズム系からなっているもよい。

【0022】

ウェッジ基板式ビーム拡大光学系の場合、そのビーム拡大光学系を構成するウェッジ基板の少なくとも1個をレーザチャンバーのウィンドー部材として配置してもよい。

【0023】

また、ビーム拡大光学系を構成するウェッジ基板の全てがレーザチャンバー内部に配置され、その中出力側ミラー側又はリア側ミラー側にあるウェッジ基板をレーザチャンバーのウィンドー部材として配置するようにしてもよい。

【0024】

また、ビーム拡大光学系を構成するウェッジ基板又は三角プリズムに入る入射角度を、出力側ミラー又はリア側ミラーで反射して戻ってきた光の光路が、ウェッジ基板又は三角プリズムに入射する前の光のレーザ光軸上に重なるように制御可能に構成してもよい。

【0025】

また、ビーム拡大光学系に入射し、出力側ミラー又はリア側ミラーで反射して戻ってきた光の光路が、ビーム拡大光学系に入射する前の光のレーザ光軸上に重なるように、出力側ミラー又はリア側ミラーのあおり角を制御可能に構成してもよい。

【0026】

以上の本発明の高出力ガスレーザ装置は、特に紫外線を発振又は増幅するものに適用するのに好適なものである。

【発明の効果】

【0027】

本発明の高出力ガスレーザ装置によると、レーザチャンバーとリア側ミラーの間、及び、レーザチャンバーと出力側ミラーの間の少なくとも一方に、ミラー側のレーザビームの径あるいは幅を広げるビーム拡大光学系を介在させるか、出力側電極端と出力側ミラーの間、及び、リア側電極端とリア側ミラーの間の少なくとも一方に、レーザの中心波長が変化してもレーザ出力エネルギーの変化量が無視できる程度に小さくでき、かつ、ミラー表面におけるレーザビームの径あるいは幅を拡大させるビーム拡大光学系を介在させたので、レーザ発振器又はレーザ増幅器の共振器用光学素子に入射する単位面積当たりのレーザ光のエネルギー（エネルギー密度）を低減させてその光学素子の表面損傷が発生しないようにすることにより耐久性を向上させ、長寿命化を実現することができる。また、共振器のミラーを構成する光学素子に入射するレーザエネルギー密度を低減させてその光学素子に歪みが発生しないようにすることができる。また、このとき、レーザの中心波長が変化したとしてもレーザ出力が減少しないようにすることができる。

【図面の簡単な説明】

【0028】

【図1】本発明を適用する露光用2ステージレーザ装置の基本構成の概略を示す図である。

【図2】図1のような基本構成を備えた露光用2ステージレーザ装置の1つの構成例の全体構成図である。

【図3】図1、図2の構成の増幅段レーザの1例の概要と本発明の原理を示す図である。

【図4】図1のような配置の露光用2ステージレーザ装置に用いられる本発明による増幅段レーザの1実施例の要部を示す図である。

10

20

30

40

50

【図 5】本発明による別の実施例の増幅段レーザの要部を示す図である。

【図 6】本発明によるさらに別の実施例の増幅段レーザの要部を示す図である。

【図 7】図 6 の増幅段レーザの変形例の要部を示す図である。

【図 8】図 7 の増幅段レーザの変形例の要部を示す図である。

【図 9】図 5 や図 8 の実施例に用いるフロント側ミラーと兼用したビームエキスパンダープリズム系に用いる三角プリズムの数値例を説明するための図である。

【図 10】図 5 の実施例の変形例の要部を示す図である。

【図 11】増幅段レーザの共振器内の面で光の干渉が発生した場合のスペクトルの形状の悪化と出力変動の原理図である。

【図 12】ビームエキスパンダープリズム系を使用した場合の出力の波長依存性を示す図である。

10

【図 13】三角プリズムにおいて波長によりビーム光路がずれる様子を示す図である。

【図 14】共振器の両側に三角プリズムを一方を他方に対して左右上下反転させて配置することにより出力の波長依存性が発生しないようにする方法を説明するための図である。

【図 15】ウェッジ基板を用いたビーム拡大光学系の作用を説明するための図である。

【図 16】ウェッジ基板を用いたビーム拡大光学系におけるレーザ光路の入射角、頂角、偏角の関係を示す図である。

【図 17】ウェッジ基板の偏角の頂角依存性を示す図である。

【図 18】ウェッジ基板の拡大率の頂角依存性を示す図である。

【図 19】ウェッジ基板と三角プリズムの拡大倍率の入射角依存性を示す図である。

20

【図 20】ウェッジ基板と三角プリズムの偏角の入射角依存性を示す図である。

【図 21】波長が変化したらそれに合わせてビーム拡大光学系へのビーム入射角を変えてビーム光路がずれないように制御する方法を説明するための図である。

【図 22】出力の波長依存性が発生しないようにする実施例の増幅段レーザの要部を示す図である。

【図 23】出力側のみに三角プリズム式ビーム拡大光学系を配置したときと、リア側にも 180° 回転対称な三角プリズム式ビーム拡大光学系を配置したときの出力の波長依存性を示す図である。

【図 24】出力の波長依存性が発生しないようにする別の実施例の増幅段レーザの要部を示す図である。

30

【図 25】各ビーム拡大光学系中に 2 枚のウェッジ基板を使用して構成した図 24 と同様の実施例の増幅段レーザの要部を示す図である。

【図 26】2 枚のウェッジ基板を用いたビーム拡大光学系出射後のレーザ光軸を入射前のレーザ光軸と平行にする原理を説明するための図である。

【図 27】ウェッジ基板を使用したウェッジ基板式ビーム拡大光学系と三角プリズムを使用した三角プリズム式ビーム拡大光学系の出力の波長依存性を示す図である。

【図 28】出力側とリア側に相互に 180° 回転対称なウェッジ基板式ビーム拡大光学系を配置したときの出力の波長依存性を示す図である。

【図 29】ウェッジ基板式ビーム拡大光学系中の一方のウェッジ基板をウィンドー部材として兼用させる実施例の増幅段レーザの要部を示す図である。

40

【図 30】ウェッジ基板式ビーム拡大光学系を全てチャンバー内部に入れて他方のウェッジ基板をウィンドー部材として兼用させる実施例の増幅段レーザの要部を示す図である。

【図 31】ビーム拡大光学系の入射角を制御して波長により角度ずれ自身が発生しないようにする方式の実施例の増幅段レーザの要部を示す図である。

【図 32】共振器を構成するミラーのあおりを制御して波長により角度ずれ自身が発生しないようにする方式の実施例の増幅段レーザの要部を示す図である。

【図 33】図 31、図 32 の方式における制御のメインルーチンを示す制御フローチャートである。

【図 34】ビーム拡大光学系の光学素子の入射角をレーザ出力を計測して制御する場合のサブルーチンの 1 例を示すフローチャートである。

50

【図 3 5】共振器を構成するミラーのあおり角をレーザ出力を計測して制御する場合のサブルーチンの 1 例を示すフローチャートである。

【図 3 6】ビーム拡大光学系の光学素子の入射角をスペクトルを計測して制御する場合のサブルーチンの 1 例を示すフローチャートである。

【図 3 7】共振器を構成するミラーのあおり角をスペクトルを計測して制御する場合のサブルーチンの 1 例を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0029】

以下に、本発明の高出力ガスレーザ装置を、露光用 2 ステージレーザ装置の増幅段レーザを例にとって説明する。ただし、本発明の高出力ガスレーザ装置は、増幅段レーザを含
10 まないエキシマレーザ装置や炭酸ガスレーザ装置等にも適用できることは、その原理から明らかである。

【0030】

本発明を適用する露光用 2 ステージレーザ装置の基本構成の概略を図 1 に示す。この露光用 2 ステージレーザ装置は、M O P O (Master Oscillator, Power Oscillator) システムであり、発振段レーザ (M O : Master Oscillator) 5 0 と、発振段レーザ 5 0 で発振された s e e d 光を入力して増幅してレーザ光を出力する増幅段レーザ (P O : Power Os
cillator) 6 0 とからなる。そして、増幅段レーザ 6 0 は入力側ミラー (リア側ミラー)
1 と出力側ミラー (フロント側ミラー) 2 とからなるファブリペローエタロン型共振器を
20 備えており、その間にレーザガスが充填されたチャンバー 3 が配置されている。さらには、チャンバー 3 内のレーザガスを励起して利得領域を形成する放電電極 4、5、チャンバー 3 の光軸延長上両端に設置されたウィンドー部材 1 7 等を備えている。

【0031】

また、発振段レーザ 5 0 は、典型的には、例えば拡大プリズムとグレーティング (回折格子) によって構成されてなる狭帯域化モジュール 5 1 内の光学素子が兼ねるリア側ミラーとフロントミラー 5 2 とで構成されるレーザ共振器内にレーザガスが充填されたチャン
バー 5 3 を備え、チャンバー 5 3 内のレーザガスを励起して利得領域を形成する放電電極
5 4、5 5、チャンバー 5 3 の光軸延長上両端に設置されたウィンドー部材 5 7 等を備えて構成される。

【0032】

また、発振段レーザ 5 0 と増幅段レーザ 6 0 の間には、必須のものではないが、発振段レーザ 5 0 から増幅段レーザ 6 0 へ入力 (入射) する s e e d 光のビーム断面積を縮小したり、発振段レーザ 5 0 からの s e e d 光の発散角を変換する変換光学系 7 0 (図 2) が配置されて構成される。

【0033】

ここで、この高出力レーザシステムにおいては、増幅段レーザ 6 0 の入力側ミラー 1 と出力側ミラー 2 とからなる共振器を安定共振器で構成するか、発振段レーザ 5 0 で発振され増幅段レーザ 6 0 に入力されるレーザ光 (s e e d 光) の光軸と、増幅段レーザ 6 0 のリア側ミラー 1 とフロント側ミラー 2 とからなる共振器の光軸とが角度をなすように設定するか、又は、増幅段レーザ 6 0 の共振器のリア側ミラー 1 及び出力側ミラー 2 の反射面
40 を平面とし、リア側ミラー 1 及び出力側ミラー 2 の法線が発振段レーザ 5 0 で発振され増幅段レーザ 6 0 に入力されるレーザ光 (s e e d 光) の光軸に対して角度をなすように、かつ、相互に角度をなすように設定し、発振段レーザ 5 0 で発振されたレーザ光 (s e e d 光) を両方のミラー 1、2 間の距離がより長い側から共振器内に入力することにより、発振段レーザと同等の空間コヒーレンスの低コヒーレンス化を達成するものである (P C T / J P 2 0 0 4 / 0 0 5 4 9 0)。

【0034】

次に、以上のような基本構成を備えた露光用 2 ステージレーザ装置の 1 つの構成例を図 2 の全体構成図を参照にして説明する。

【0035】

10

20

30

40

50

このMOPPOシステムがフッ素分子(F_2)レーザ装置のとき、発振段レーザ50、増幅段レーザ60共にそれぞれのチャンバー53、3は、フッ素(F_2)ガスと、ヘリウム(He)やネオン(Ne)等からなるバッファーガスとからなるレーザガスが充填される。このMOPPOシステムがKrFエキシマレーザ装置のときには、発振段レーザ50、増幅段レーザ60共にそれぞれのチャンバー53、3は、クリプトン(Kr)ガス、フッ素(F_2)ガスと、ヘリウム(He)やネオン(Ne)等からなるバッファーガスとからなるレーザガスが充填され、このMOPPOシステムがArFエキシマレーザ装置のときには、発振段レーザ50、増幅段レーザ60共にそれぞれのチャンバー53、3は、アルゴン(Ar)ガス、フッ素(F_2)ガスと、ヘリウム(He)やネオン(Ne)等からなるバッファーガスとからなるレーザガスが充填される。発振段レーザ50、増幅段レーザ60共に、レーザチャンバー53、3は内部にそれぞれ一対の放電電極54と55、4と5からなる放電部を有している。これら放電部は紙面と平行方向に上下に設置されている一対のカソード電極55、5、アノード電極54、4からなる。これらの一対の電極54と55、4と5にそれぞれ電源56、16から高電圧パルスが印加されることにより、これら電極間で放電が発生する。

10

【0036】

発振段レーザ50と増幅段レーザ60共にチャンバー53、3内に設置された一対の電極54と55、4と5の光軸延長上両端に、CaF₂等のレーザ発振光に対して透過性がある材料によって作られたウィンドー部材57、17がそれぞれ設置されている。ここでは、両ウィンドー部材57、17のチャンバー53、3内とは反対側の露出面は互いに平行に、そして、レーザ光に対して反射損失を低減するためにブリュースタ角で設置されている。また、レーザ光のP偏光成分が水平方向になるよう、ウィンドー部材57、17は設置されている。

20

【0037】

また、図2には図示されていないクロスフローファンがチャンバー53、3内に設置されており、レーザガスをチャンバー53、3内で循環させ、放電部にレーザガスを送り込んでいる。また、発振段レーザ50、増幅段レーザ60共に、チャンバー53、3へF₂ガス、バッファーガスを供給するF₂ガス供給系、バッファーガス供給系、及び、チャンバー53、3内のレーザガスを排気するガス排気系が本装置に備わっている。図2では、これらをまとめて、ガス供給排気用制御バルブ58、及び、ガス供給排気用制御バルブ18として図示してある。なお、KrFレーザ装置、ArFレーザ装置の場合は、各々Krガス供給系、Arガス供給系も備える。チャンバー53、3内ガス圧力はそれぞれ圧力センサーP1、P2によってモニタされ、それらガス圧力情報はユーティリティコントローラ81へ送られる。そして、ユーティリティコントローラ81がガス供給配給制御バルブ58、18を制御し、発振段チャンバー53並びに増幅段チャンバー3内ガス組成、ガス圧力がそれぞれ制御される。

30

【0038】

レーザ出力はガス温度によって変化する。そのために、ガス温調制御が行われている。ガス温度は、それぞれのチャンバー53、3に設置された温度センサーT1、T2によってモニタされ、それら温度信号はユーティリティコントローラ81へ送られる。そして、ユーティリティコントローラ81は、それぞれ冷却水流量制御バルブ59、19によって冷却水流量を制御する。その結果、チャンバー53、3内のそれぞれ熱交換器34、44の排熱量がそれぞれ制御され、そして温度が制御される。

40

【0039】

発振段レーザ50は、拡大プリズムとグレーティング(回折格子)によって構成された狭帯域化モジュール(LNM)51を有し、この狭帯域化モジュール51内の光学素子とフロントミラー52とでレーザ共振器を構成している。又は、図示していないが、拡大プリズム、グレーティングの代わりに、エタロンと全反射ミラーを用いた狭帯域化モジュールを用いてもよい。

【0040】

50

発振段レーザ５０、増幅段レーザ６０から放出されたレーザ光の一部は、図示されていないビームスプリッタによって分岐され、それぞれモニタモジュール３５、４５に導光される。モニタモジュール３５、４５はそれぞれ発振段レーザ５０、増幅段レーザ６０の出力、線幅そして中心波長等のレーザ光特性をモニタする。図２では、発振段レーザ５０と増幅段レーザ６０の両方にモニタモジュール３５、４５が設置されているが、どちらか一方のみの設置でもよい。

【００４１】

モニタモジュール３５、４５からの中心波長の信号は、波長コントローラ８２に送られる。そして、波長コントローラ８２は、ドライバ８３により狭帯域化モジュール５１内の光学素子を駆動させて波長を選択して、発振段レーザ５０の中心波長が所望の波長になるよう波長制御する。なお、上記した波長制御を、増幅段レーザ６０から放出されるレーザ光の一部が導光されるモニタモジュール４５からの波長情報に基き、発振段レーザ５０から放出されるレーザ光の波長が所定の波長となるように、波長コントローラ８２からドライバ８３に指令を出して行うことも可能である。

【００４２】

モニタモジュール３５、４５からのレーザ出力信号は、エネルギーコントローラ８４へ送られる。そして、同期コントローラ８５を経由し、印加電圧が制御され、発振段レーザ５０、増幅段レーザ６０のエネルギーが所望の値になるよう制御される。モニタモジュール４５の出力信号を図の（１）のようにエネルギーコントローラ８４に送ってもよいが、（１）の代りに、露光装置１００側に図示されていない出力モニタを設け、そこでの出力を（２）のようにエネルギーコントローラ８４に送ってもよい。

【００４３】

発振段レーザ５０からのレーザ光（seed光）はモニタモジュール３５を通過した後、反射ミラー等を含むビームステアリングユニット８６を通過し、変換光学系７０を通過した後、増幅段レーザ６０へ導かれ、注入される。変換光学系７０は所定の発散角で発振段レーザ光（seed光）が増幅段レーザ６０へ注入されるよう、発振段レーザ５０の発散角を所定の値に制御する前記のような機構を有している。このMOP方式では、小入力でも増幅できるように、増幅段レーザ６０には、入力側ミラー（リア側ミラー）１と出力側ミラー（フロント側ミラー）２とで構成された上記のような共振器が採用される。入力側ミラー１を通過したレーザ光が図２の矢印のように反射して放電部を有効に通過し、レーザ光のパワーが増大する。そして、出力側ミラー２よりレーザが出射される。

【００４４】

発振段レーザ５０、増幅段レーザ６０の各々一対の放電電極５４と５５、４と５には、それぞれ、充電器３１／スイッチ３２／MPC（磁気パルス圧縮回路）３３によって構成された電源５６、そして、充電器４１／スイッチ４２／MPC（磁気パルス圧縮回路）４３によって構成された電源１６より、高電圧パルスが印加され、上記電極５４と５５、４と５間で放電が生じる。この放電により、それぞれレーザチャンバー５３、３内に充填されたレーザガスが励起される。

【００４５】

それぞれの電源５６、１６において、充電器３１、４１によりコンデンサが充電される。コンデンサに充電されたエネルギーは、スイッチ３２、４２がON状態になると、電圧パルスとして磁気パルス圧縮回路３３、４３に転送され、パルス圧縮され、上記した一対の電極５４と５５、４と５に印加される。図示を省略したが、電源５６、１６は昇圧トランスをさらに備え、電圧パルスを昇圧する場合もある。

【００４６】

スイッチ３２、４２のON、OFFは、同期コントローラ８５からの動作指令（トリガ信号）によってなされる。

【００４７】

同期コントローラ８５は、発振段レーザ５０から放出されるレーザ光が増幅段レーザ６０に注入されるタイミングで、増幅段レーザ６０において放電が発生するように、充電器３

10

20

30

40

50

1 / スイッチ 3 2 / M P C (磁気パルス圧縮回路) 3 3 によって構成された電源 5 6、そして、充電器 4 1 / スイッチ 4 2 / M P C (磁気パルス圧縮回路) 4 3 によって構成された電源 1 6 にトリガ信号を送出する。発振段レーザ 5 0、増幅段レーザ 6 0 の放電のタイミングがずれると、発振段レーザ 5 0 から放出されるレーザ光は効率良く増幅されない。同期コントローラ 8 5 は、それぞれ放電検出器 3 6、4 6 からの発振段レーザ 5 0 及び増幅段レーザ 6 0 の放電開始の情報、そして、エネルギーコントローラ 8 4 からのレーザ出力情報を得、発振段レーザ 5 0 の電源 5 6 に送出手信号と増幅段レーザ 6 0 の電源 1 6 に送出手信号との間の遅延時間を設定する。

【 0 0 4 8 】

ユーティリティコントローラ 8 1、エネルギーコントローラ 8 4、そして、波長コントローラ 8 2 はメインコントローラ 8 0 と接続されている。また、メインコントローラ 8 0 は露光装置 1 0 0 と接続している。メインコントローラ 8 0 は露光装置 1 0 0 から指令に従い、各コントローラ 8 1、8 4、8 2 に制御分担を振り分け、その指令によって各コントローラ 8 1、8 4、8 2 は分担する制御を行う。

【 0 0 4 9 】

また、発振段レーザ 5 0 から放出されたレーザ光は、増幅段レーザ 6 0 の放電領域を通過するように、ミラー 2 枚からなるビームステアリングユニット 8 6 によってアライメントされる。ビームステアリングユニット 8 6 を構成する 2 枚のミラーは、ドライバ 8 7 により駆動されて角度制御され、発振段レーザ 5 0 から放出されるレーザ光の進行方向を制御する。

【 0 0 5 0 】

このビームステアリングユニット 8 6 の具体的な制御は、次のようになる。例えば、発振段レーザ 5 0 から放出されたレーザ光の進行方向が、増幅段レーザ 6 0 の放電領域を通過するようにアライメントされていないとする。その場合、発振段レーザ 5 0 から放出されたレーザ光の一部若しくは全てが、例えば増幅段レーザ 6 0 の放電電極 4、5 によって遮光されたり、所望でない方向に反射されたりして、増幅段レーザ 6 0 からレーザ光が放出されなかったり、レーザパワーが所望の値より小さくなる。そこで、増幅段レーザ 6 0 から放出されるレーザ光の出力をモニタモジュール 4 5 でモニタしながら、この出力が最大となるようにビームステアリングユニット 8 6 を制御する。すなわち、図 2 においては、モニタモジュール 4 5 でモニタされた結果が波長コントローラ 8 2 に送られる。波長コントローラ 8 2 は、モニタモジュール 4 5 から受け取ったレーザビームの出力結果に基づき、その出力が最大となるようにドライバ 8 7 に指令して、ビームステアリングユニット 8 6 を駆動制御して、発振段レーザ 5 0 から放出されるレーザ光の進行方向を制御する。

【 0 0 5 1 】

例えばこのような構成の露光用 2 ステージレーザ装置において、本発明に基づいて、リア側ミラー 1 とフロント側ミラー 2 とからなる共振器内部におけるレーザ光のエネルギーが非常に高くなる増幅段レーザ 6 0 の、チャンバ 3 とリア側ミラー 1 との間、及び、チャンバ 3 とフロント側ミラー 2 の間に、それぞれビーム拡大光学系を介在させて、チャンバ 3 側からリア側ミラー 1 及びフロント側ミラー 2 に入射するレーザビームの径を拡大させ、その結果、それぞれのミラー 1、2 に入射する単位面積当たりのレーザ光のエネルギーを減らすようにすることにより、リア側ミラー 1 及びフロント側ミラー 2 の耐久性を向上させるようにするのが、本発明の原理である。もちろん、前記したように、増幅段レーザを含まないエキシマレーザ装置や炭酸ガスレーザ装置等の高出力ガスレーザ装置においては、発振段レーザを同様に構成することにより、発振段レーザのリア側ミラーとフロント側ミラーの耐久性を同様の原理で向上させることができる。

【 0 0 5 2 】

図 3 にこのような構成の増幅段レーザ 6 0 の 1 例の概要を示す。図 3 は、図 1 のような配置の露光用 2 ステージレーザ装置の増幅段レーザ 6 0 の構成のみを示す上面図であり、一対の放電電極 4 と 5 が紙面に垂直方向に配置されていて、放電領域 2 2 は紙面に対し垂直に生じており、そのため、レーザ利得領域は放電領域 2 2 と略等しくなっている。以後

、レーザ利得領域も符号 22 で示す。レーザチャンバー 3 の両端に設けられたウィンドー部材 17、17 とリア側ミラー 1 及びフロント側ミラー 2 との間にそれぞれビーム拡大光学系 61、61' が配置され、レーザチャンバー 3 内のレーザ利得領域 22 を通過したレーザビームの少なくとも 1 次元方向の幅を広げて、フロント側ミラー 2 及びレーザ利得領域 22 を挟んで反対側に位置するリア側ミラー 1 にレーザ光 (seed 光) を入射させる。

【0053】

このような配置の結果、増幅段レーザ 60 からの出力レーザ光は、ビーム拡大光学系 61、61' 挿入前と挿入後で強度が同じ場合、挿入後のレーザビームの径は拡大率分大きくなり、またその拡大率が A の場合、共振器のミラー 1、2 に照射されるレーザ光のエネルギー密度は約 $1/A$ となり、ミラー 1、2 へのエネルギー密度負荷が低減する。したがって、リア側ミラー 1 及びフロント側ミラー 2 の耐久性が向上する。

【0054】

ここで、ビーム拡大光学系 61、61' としては、焦点距離の異なる 2 群のレンズ系を共焦点で配置してなるレンズ系や、後記の例のような拡大プリズムで構成することもできる。

【0055】

また、レーザチャンバー 3 の両端に設けられたウィンドー部材 17、17 は、図 3 ではレーザ光に対して垂直に取り付けられているが、その取り付け角度は特に限定されず、図 4 等の実施例のように、プリユースタ角やその他の角度で取り付けのようにしてもよい。

【0056】

図 4 に、図 1 のような配置の露光用 2 ステージレーザ装置に用いられる増幅段レーザ 60 の 1 実施例の要部を示す図であり、その (a) は上面図であり、一对の放電電極 4 と 5 が紙面に垂直方向に配置されていて、放電領域 22 は紙面に対し垂直に生じている。その (b) は、図 4 (a) の A-A' 断面を矢印方向から観察することにより、フロント側ミラー 2 をリア側ミラー 1 位置から見たときの図である。

【0057】

この実施例は、発振段レーザ 50 で発振された seed 光 23 の光軸と増幅段レーザ 60 のリア側ミラー 1 とフロント側ミラー 2 とからなる共振器の光軸とが角度をなすように設定されている場合の例の 1 つであり、一对の放電電極 4、5 間の放電方向に対して垂直な方向から seed 光 23 を増幅段レーザ 60 へ注入する自由度が高いので、この放電方向に対して垂直な方向から seed 光 23 を入射させる実施例である。しかし、seed 光 23 の注入は、この垂直な方向に限ったものではなく、どの方向 (角度) から増幅段レーザ 60 の光軸に対して注入するようにしてもよい。

【0058】

この実施例において、リア側ミラー 1 のチャンバー 3 側の seed 光 23 が入射する位置より光軸側に高反射率 (全反射) ミラーコーティング 8 が施してあり、フロント側ミラー 2 のチャンバー 3 側には部分反射ミラーコーティング 10 が、また、その反対側には反射防止コーティング 9 が施してある。なお、フロント側ミラー 2 の部分反射ミラーコーティング 10 は、チャンバー側でなく、レーザ光出力側に設けてもよい。なお、以下の実施例では、高反射率 (全反射) ミラーコーティング 8、反射防止コーティング 9、部分反射ミラーコーティング 10 の図示は省くが、この実施例と同様である。

【0059】

なお、フロント側ミラー 2 は、部分反射ミラーコーティング 10、反射防止コーティング 9 が施されていない透明基板で構成してもよい。例えば、発振段レーザが自然発振している場合において、レーザ光の波長が ArF エキシマレーザ光の波長 193 nm の場合、透明基板 (螢石 (CaF_2)) の表面反射率は 4 % 程度であり、基板表面の表裏の反射を用いると約 8 % の反射率を持つ波長 193 nm 用出力側ミラー (フロント側ミラー) 2 を、コーティングなしで実現することが可能である。ただし、発振段レーザが狭帯域レーザの場合、上記フロントミラー 2 の基板表面の表裏の反射によって光が干渉し、増幅される

10

20

30

40

50

レーザ光のスペクトルが分裂する。このような場合は露光装置用レーザとしては使用することはできない。この原理に関しては、後述する（図 11）。

【 0 0 6 0 】

上記のようなフロント側ミラー 2 の部分反射ミラーコーティング 10、反射防止コーティング 9 には破壊閾値があり、これを上回るレーザ光が部分反射ミラーコーティング 10 と反射防止コーティング 9 に照射されると、これらのコーティングが破壊されてしまう。また、フロント側ミラー 2 に上記のようなコーティングが施されれないで構成されていても、レーザ光のエネルギー密度が高い場合は、その透明基板表面及びその内部の破壊が生じる。本実施例は、フロント側ミラー 2 への照射エネルギー密度を低減する実施例であり、レーザチャンバー 3 とフロント側ミラー 2 の間に、1 個以上の三角プリズム 6 2、6 3 から構成され、三角プリズム 6 2 の斜面にレーザチャンバー 3 側から斜めに入射し、反対側の面から略直角に射出して 1 次元方向にビーム径が拡大されて射出し、そのビーム径が拡大されたビームが別の三角プリズム 6 3 の斜面に斜めに入射し、反対側の面から略直角に射出して 1 次元方向にさらにビーム径が拡大されて射出するビーム拡大光学系（ビームエキスパンダープリズム系）6 1' が配置されて構成されている。そのため、フロント側ミラー 2 に照射されるレーザ光のエネルギー密度は、ビーム拡大光学系（ビームエキスパンダープリズム系）6 1' が設置されていない場合と比較して低減し、フロント側ミラー 2 のさらなる長寿命化、また、高出力レーザ発振が可能となる。

【 0 0 6 1 】

図 4（b）は、図 4（a）においてリア側ミラー 1 位置からフロント側ミラー 2 側を見たときの図であり、放電電極 4、5、放電領域 22、フロント側ミラー 2、そして、フロント側ミラー 2 から射出する出力レーザビームの断面の関係を図示してある。ビーム拡大光学系（ビームエキスパンダープリズム系）6 1' が共振器内に設定されていない場合は、破線 a で囲まれた大きさになり、ビーム断面の大きさは放電領域 22 断面と同等又はそれ以下の大きさになるが、ビーム拡大光学系（ビームエキスパンダープリズム系）6 1' を設けた場合は、破線 b で囲まれた大きさになり、出力レーザ光はその拡大率の分拡大される。

【 0 0 6 2 】

なお、反射防止コーティングと部分反射コーティングの紫外線レーザ光に対する耐性を比較すると、反射防止膜コートの方がコーティングの層数が少ないために、耐久性は高い。したがって、増幅段レーザ 60 でのレーザ出力の低下を防ぐために、ビームエキスパンダープリズム系 6 1' を構成する三角プリズム 6 2、6 3 のレーザ光透過面に反射防止コーティングを施してもよい。また、増幅段レーザ 60 での出力低下が問題にならないレベルであれば、そのようなコーティングを省いてもよい。

【 0 0 6 3 】

なお、発振段レーザ 50 が狭帯域レーザの場合は、各プリズム 6 2、6 3 の各面は、フロント側ミラー 2 及びリア側ミラー 1 の反射面との間で多重干渉を起こさないような角度に設置するようにすることが望ましい。この理由に関しては後述する（図 11）。

【 0 0 6 4 】

また、図 4 では、ビームエキスパンダープリズム系 6 1' が放電方向（図 4（a）面方向）に対して垂直方向に拡大するように設置されているので、出力レーザ光の断面は図 4（b）の横方向に拡大されている。この場合、レーザビームが狭い方向の一方向のみのビームを拡大して、レーザビームを正方形に近い形状にすることが可能となるので、大きなフロント側ミラー 2 は必要とせず、コストメリットは大きくなる。さらに、ウィンドー部材 17 をブリースタ角で設置して、ウィンドー部材 17 に対して P 偏光成分と拡大プリズムの斜面の P 偏光成分が一致するように配置することにより、プリズム増幅段レーザの効率も高くなる。また、原理的には、縦方向のみ、又は、縦横共に出力レーザ光の断面を拡大するようにすることも可能である。また、球面レンズ、円筒レンズを三角プリズムの代りに用いて、又は、三角プリズムと組み合わせて用いることにより、出力レーザ光の断面を自由に縦横拡大するようにすることも可能である。

【 0 0 6 5 】

図 5 に、図 1 のような配置の露光用 2 ステージレーザ装置に用いられる増幅段レーザ 6 0 の別の実施例の上面図を示す。この実施例は、図 4 の実施例におけるフロント側ミラー 2 の機能をビームエキスパンダープリズム系 6 1 ' の最も外側の三角プリズム、図 4、図 5 では 2 個で構成するので三角プリズム 6 3 の射出側の面に部分反射ミラーコーティング 1 0 を直接施して兼ね備えさせ、フロント側ミラー 2 を省いた例である。このような構成により、共振器の構成部品であるフロント側ミラーを省くことが可能となり、レーザ装置のコスト低減が可能となる。

【 0 0 6 6 】

この例の場合も、反射防止コーティングと部分反射コーティングの紫外線レーザ光に対する耐性を比較すると、反射防止膜コートの方がコーティングの層数が少ないために、耐久性は高い。したがって、増幅段レーザ 6 0 でのレーザ出力の低下を防ぐために、ビームエキスパンダープリズム系 6 1 ' を構成する三角プリズム 6 2、6 3 の部分反射ミラーコーティング 1 0 を施した面以外のレーザ光透過面には、反射防止コーティングを施してもよい。また、増幅段レーザ 6 0 での出力低下が問題にならないレベルであれば、そのようなコーティングを省いてもよい。

【 0 0 6 7 】

また、発振段レーザ 5 0 が狭帯域レーザの場合は、各プリズム 6 2、6 3 の部分反射ミラーコーティング 1 0 を施した面以外の各面は、リア側ミラー 1 の反射面及びその部分反射ミラーコーティング 1 0 を施した面との間で多重干渉を起こさないような角度に設置するようにすることが望ましい。この理由に関しては後述する（図 1 1 ）。

【 0 0 6 8 】

図 6 に、図 1 のような配置の露光用 2 ステージレーザ装置に用いられる増幅段レーザ 6 0 のさらに別の実施例の上面図を示す。この実施例は、図 4 の実施例において、さらに、リア側ミラー 1 への照射エネルギー密度も低減させるために、ビームエキスパンダープリズム系 6 1 ' と同様の構成のビームエキスパンダープリズム系 6 1 をレーザチャンバー 3 とリア側ミラー 1 の間に配置し、リア側ミラー 1 に照射されるレーザ光のエネルギー密度を、ビームエキスパンダープリズム系 6 1 が設置されていない場合と比較して低減し、リア側ミラー 1 のさらなる長寿命化、また、高出力レーザ発振が可能となるようにしたものである。

【 0 0 6 9 】

この場合も、反射防止コーティングと部分反射コーティングの紫外線レーザ光に対する耐性を比較すると、反射防止膜コートの方がコーティングの層数が少ないために、耐久性は高い。したがって、増幅段レーザ 6 0 でのレーザ出力の低下を防ぐために、ビームエキスパンダープリズム系 6 1、6 1 ' を構成する三角プリズム 6 2、6 3 のレーザ光透過面には、反射防止コーティングを施してもよい。また、増幅段レーザ 6 0 での出力低下が問題にならないレベルであれば、そのようなコーティングを省いてもよい。また、発振段レーザ 5 0 が狭帯域レーザの場合は、各プリズム 6 2、6 3 の各面は、フロント側ミラー 2 及びリア側ミラー 1 の反射面との間で多重干渉を起こさないような角度に設置するようにすることが望ましい。この理由に関しては後述する（図 1 1 ）。

【 0 0 7 0 】

図 7 に、図 6 の増幅段レーザ 6 0 の変形例を示す。この実施例においは、リア側ミラー 1 の機能をビームエキスパンダープリズム系 6 1 の最も外側の三角プリズム、図 6 では 2 個で構成するので三角プリズム 6 3 の s e e d 光 2 3 入射側の面の、s e e d 光 2 3 が入射する位置より光軸側に高反射率（全反射）ミラーコーティング 8 を直接施して兼ね備えさせ、リア側ミラー 1 を省いた例である。このような構成により、共振器の構成部品であるリア側ミラーを省くことが可能となり、レーザ装置のコスト低減が可能となる。

【 0 0 7 1 】

この場合も、反射防止コーティングと部分反射コーティングの紫外線レーザ光に対する耐性を比較すると、反射防止膜コートの方がコーティングの層数が少ないために、耐久性

10

20

30

40

50

は高い。したがって、増幅段レーザ60でのレーザ出力の低下を防ぐために、ビームエキスパンダープリズム系61、61'を構成する三角プリズム62、63のレーザ光透過面には、反射防止コーティングを施してもよい。また、増幅段レーザ60での出力低下が問題にならないレベルであれば、そのようなコーティングを省いてもよい。また、発振段レーザ50が狭帯域レーザの場合は、各プリズム62、63の各面は、フロント側ミラー2及びリア側ミラー1の反射面との間で多重干渉を起こさないような角度に設置するようにすることが望ましい。この理由に関しては後述する(図11)。

【0072】

図8に、図7の増幅段レーザ60の変形例を示す。この実施例においては、フロント側ミラー2の機能も、図5の実施例と同様に、ビームエキスパンダープリズム系61'の最も外側の三角プリズム、図7では2個で構成するので三角プリズム63の射出側の面に部分反射ミラーコーティング10を直接施して兼ね備えさせ、フロント側ミラー2を省いた例である。このような構成により、共振器の構成部品であるリア側ミラー、フロント側ミラーを省くことが可能となり、搭載光学部品の削減及びレーザ装置のコスト低減が可能となる。

【0073】

図9に、図5や図8の実施例に用いるフロント側ミラーと兼用したビームエキスパンダープリズム系61'に用いる三角プリズム62、63の数値例を示す。それぞれの三角プリズム62、63、63'は螢石(CaF_2)で構成され、波長 193.4 nm のArFエキシマレーザ光に適用されるものとする。この波長における CaF_2 の屈折率は、1.50196である。例えば、図9(a)は、1個の三角プリズム62でビームエキスパンダープリズム系61'を構成する場合で、三角プリズム62の射出側の面に部分反射ミラーコーティング10を直接施してビームエキスパンダープリズム系61'を構成し、部分反射ミラーコーティング10を透過して出力されるレーザ光を偏向して三角プリズム62に入射するレーザ光と平行にするために、三角プリズム62の出力側に同様の構成の三角プリズム63'を頂角が反対側に向くように配置している。ここで、三角プリズム62と63'頂角をそれぞれ θ_1 と θ_2 とすると、 $\theta_1 = 38.1^\circ$ 、 $\theta_2 = 40.0^\circ$ とし、三角プリズム62の斜面の入射角度 α を 67.9° とすることにより、三角プリズム62の部分反射面10の光の射出角度は 0° となり、増幅段レーザ60のフロント側ミラー2としての機能を果たす。ここでのビーム拡大率は2.09倍となる。そして、三角プリズム63'の斜面への入射角度は、 66.0° とて、三角プリズム62と三角プリズム63'を頂角が反対側に向くように配置している。三角プリズム63'の倍率は1.95倍となる。合計すると4.07倍となる。この方式のメリットは、1個のプリズム(三角プリズム62)によりフロントミラーを構成することによって、透過する面数が一か所となり、増幅段レーザ60の共振器内の損失を小さくできることと、2個のプリズム間の光の干渉を防ぐことができること。さらに、もう1個のプリズム63'により、ビームの射出方向を同じ方向に補正することができ、かつ、ビームを拡大することができたため、増幅段レーザ60後の光学素子への損傷を防ぐことができることである。

【0074】

図9(b)は、2個の多少異なる三角プリズム62、63でビームエキスパンダープリズム系61'を構成する場合で、三角プリズム62と三角プリズム63を頂角が反対側に向くように配置し、最も外側の三角プリズム63の射出側の面に部分反射ミラーコーティング10を直接施してビームエキスパンダープリズム系61'を構成している。ここで、三角プリズム62と63の頂角をそれぞれ θ_1 と θ_2 とすると、 $\theta_1 = 40.0^\circ$ 、 $\theta_2 = 38.1^\circ$ とし、三角プリズム62の斜面の入射角度を 66.0° とすることにより、三角プリズム62の部分反射面10の光の射出角度は 3.79° となる。ここでのビーム拡大率は1.95倍となる。そして、三角プリズム63の斜面への入射角度は、 67.9° として、三角プリズム62と三角プリズム63を頂角が反対側に向くように配置すると、このプリズムの部分反射コート面10の射出角度は 0° となり、出力側ミラーとしての機能を果たす。三角プリズム63の倍率は2.09倍となる。合計すると4.07倍とな

る。この実施例のメリットは、拡大率を約4倍にすることができるため、エネルギー密度が従来の場合の1/4以下となるので、部分反射コーティングの耐久性が図9(a)の実施例に比べて延びることである。この実施例では、三角プリズム62と63の垂直面が光軸に対して一致しないように設計している。この理由は、発振段レーザ50が狭帯域レーザの場合、上記2つの垂直面で光が干渉し、増幅されるレーザ光のスペクトルが分裂するためである。この実施例では、三角プリズム62及び63の頂角の多少異なるものを採用することによって、光の干渉を防いでいる。また、三角プリズム62の斜面と射出面と三角プリズム63の斜面には、反射防止コーティングを施すことにより、増幅段レーザ60の発振効率を高くすることができる。増幅段レーザ60の出力低下が問題にならないレベルであれば、一部又は上記全ての面において反射防止コーティングを施さなくてもよい。

10

【0075】

また、図9(b)において、入射角度がブリュースタ角に近いプリズムを使用することにより、さらに効率の高い増幅段レーザ60の共振器を構成することができる。三角プリズム62と63の頂角をそれぞれ $1 = 29.00^\circ$ 、 $2 = 31.63^\circ$ とし、三角プリズム62の斜面の入射角度をブリュースタ角の 56.30° とすることにより、三角プリズム62の部分反射面10から光の射出角度は -0.122° となる。ここでのビーム拡大率は1.49倍となる。そして、三角プリズム63の斜面への入射角度は、 51.94° として、三角プリズム62と三角プリズム63を頂角が反対側に向くように配置すると、このプリズムの部分反射コート面10の射出角度は 0° となり、出力側ミラーとしての機能を果たす。三角プリズム63の倍率は1.38倍となる。合計すると2.06倍となる。この実施例では、三角プリズム62と63の垂直面が光軸に対して一致しないように設計する。この理由は、発振段レーザ50が狭帯域レーザの場合、上記2つの垂直面で光が干渉し、増幅されるレーザ光のスペクトルが分裂するためである。この実施例では、三角プリズム62及び63の頂角の多少異なるものを採用することによって、光の干渉を防いでいる。さらに、この実施例のメリットは、三角プリズム62及び63の斜面の入射角度は略ブリュースタの角度なので、コーティングを施さなくても反射ロスはほとんどなく、増幅段レーザ60の発振効率は高い状態で維持することができる。

20

【0076】

図10に、入力側ミラー1の裏面からseed光23を注入した場合における増幅段レーザ60の共振器の上面図を示す。この実施例において、一对の放電電極4と5が紙面に垂直方向に配置されていて、放電領域22は紙面に対し垂直に生じている。図5の実施例に対して異なっている点は、入力側ミラー1の表面には、例えば反射率約90%の高い反射率の部分反射ミラーコーティング101が施されている。seed光23は入力側ミラー1の裏面から入力され、部分反射ミラーコーティング101によって10%透過し、ブリュースタ角で配置されたリア側ウインドー部材17を透過し、放電電極4及び5で形成される放電領域22を透過し、光増幅される。そして、フロント側ウインドー部材17を透過して、三角プリズム62を透過して、ビームが拡大され、三角プリズム63の斜面から入射し、垂直面に施された部分反射ミラーコーティング10によって一部透過し、レーザ出力光として出力され、残りの光は反射され、再び三角プリズム63及び62を透過して、フロント側ウインドー部材17に入射する。フロント側ウインドー部材17を透過した光は、レーザの放電領域22を透過することにより光が増幅される。リア側ウインドー部材17を透過した光は、再び入力側ミラー1の部分反射ミラーコーティング101により90%反射されて、再びレーザチャンバー3に戻される。このようにして、seed光23を増幅段レーザ60の共振器に注入することにより、MOP動作が可能となる。この実施例では、ビーム拡大光学系をフロント側のビーム拡大光学系61'として設置した場合の例を示したが、これに限定されることなく、図6の実施例と同様、リア側にビーム拡大光学系61を配置してもよい。これにより、入力側ミラー1の部分反射ミラーコーティング101の耐久性を向上させることができる。

30

40

【0077】

図11に、増幅段レーザ60の共振器内の面で光の干渉が発生した場合のスペクトルの

50

形状の悪化と出力変動の原理図を示す。図 11 (a) は、図 10 の実施例に対して、出力側ミラー 2 として、コーティングを施していない CaF_2 の平行平面基板を出力側ミラー 2 とした場合の増幅段レーザ 60 の例である。この場合の出力側ミラー 2 の反射率は光の干渉のため、波長依存性を示す。図 11 (b) には、この出力側ミラー 2 の反射率の波長依存性を細線で示す。例として、厚さ d の CaF_2 平行平面基板の反射率は、波長に対して周期的に 0 ~ 約 18 % の間で変化する。この周期フリースペクトラルレンジ (FSR) は、基板の厚み d と基板の屈折率 n と波長 λ とから計算することができる。すなわち、 $\text{FSR} = \lambda^2 / (2 n d)$ 。ここで、波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 、基板厚み $d = 14 \text{ mm}$ 、 CaF_2 の屈折率 $n = 1.50196$ とすると、フリースペクトラルレンジは 0.89 pm となる。図 11 (b) の破線と太実線は、それぞれ、出力側ミラー 2 の表面に部分反射ミラーコーティング 10 を施した場合のスペクトルプロファイルと、ノーコート平行平面基板の場合のスペクトルプロファイルを示す。出力側ミラー 2 がノーコート平行基板の場合 (太実線) は、スペクトルプロファイルが分裂した形となる。この原因を以下に説明する。

【 0078 】

出力側ミラー 2 の反射率が 0 になると、この増幅段レーザ 60 は単に seed 光 23 を増幅するのみの機能となり、1 パスの MOPA の出力となる。この場合、単なる増幅としての機能となるので、レーザ出力は低下する。一方、出力側ミラー 2 の反射率が増加するにつれて、 seed 光 23 が増幅段レーザ 60 において光共振して出力する MPO 動作となり、増幅段レーザ 60 の出力は増加する。このように、波長によって、MOPA 動作と MPO 動作が起きるため、スペクトル形状は大きく変化し、レーザ出力も大きく変動する。この例では、出力ミラー 2 の両面で光の干渉をした場合を示したが、例えば、三角プリズム 62 及び 63 の垂直面が増幅段レーザ 60 の光共振器の光軸と一致すると、同様な光の干渉が発生するため、光共振器との光軸を外す必要がある。

【 0079 】

ところで、以上のように 1 個以上の三角プリズム 62、63 から構成され、一方の斜面に斜めに入射させ、他方の面から略直角に射出させるビームエキスパンダープリズム系 61、61' を、レーザチャンバー 3 と出力側ミラー 2 の間、及び、レーザチャンバー 3 とリア側ミラー 1 の間に配置してレーザビームの径を拡大することによって、ミラー 1、2 に照射されるエネルギー密度を損傷閾値以下に落とす場合、波長によりプリズムの屈折率が変化するため、図 4 の場合と例にとると、レーザチャンバー 3 側から進行してくる光が出力側ミラー 2 の部分反射ミラーコーティング 10 へ入射する角度が波長により相違することになってしまう。したがって、その入射角度がある波長では垂直であったとしても、他の波長へ変更すると、部分反射ミラーコーティング 10 への入射角度が垂直ではなくなるため、部分反射ミラーコーティング 10 で反射した光は入射光軸とは相違する軸に沿ってレーザチャンバー 3 方向へ戻る。その反射光がプリズム 62、63 内部を透過すると、軸ずれは一層大きくなって放電領域 22 内へ戻る率も低下し、レーザ出力が減少してしまうという問題点がある。図 12 に、ビームエキスパンダープリズム系 (ビーム拡大光学系) 61' を使用した場合の出力の波長依存性を示す。中心波長が 100 pm 変化すると、出力が半減することが分かる。また、三角プリズム 62、63 の垂直面では、ビームサイズの拡大率が小さいため、照射エネルギー密度が高く、この表面が損傷してしまうという問題点があることも分かった。

【 0080 】

以下、本発明の別のビーム拡大光学系による出力の波長依存性を減少させる構成の原理と実施例について説明する。また、三角プリズムの垂直面の損傷リスクを減らすために、その面における照射エネルギー密度を下げる実施例についても説明する。

【 0081 】

前記したように、ガスレーザ装置は、レーザ媒質 (レーザガス) を励起する電極や電源、レーザ媒質となる数種類のガス、光を増幅させるための共振器からなる。一般的に、電極が配置されているレーザチャンバーの両端に共振器となるミラーを配置する。レーザ媒質となるガス (ArF エキシマレーザの場合は、 F_2 ガス、Ar ガス、希釈ガスとして N

10

20

30

40

50

e や H e ガス) をチャンバー内に封入して、その中に対向して取り付けられた放電電極間に高電界を印加し、そこで放電させる。放電によってガスは励起され、レーザ媒質 (A r F エキシマレーザの場合は、 A r F⁺ エキシマ分子) が生成される。放電電極は細長い形状をしているため、利得 (ゲイン) 領域はその電極長手方向に長い形状をしている。一般的に、幅は数 m m、高さは数 ~ 十数 m m、長さは数百 m m のサイズである。レーザ媒質から自然放出された光は、この細長いゲイン領域を数 ~ 十数回往復して増幅されることによって、レーザ発振する。光を往復させるために、両端に共振器であるミラーが配置されている。このミラーによって、同一軸上を光が往復してレーザ出力される。このレーザ光が増幅されるために、光が往復する同一軸上をレーザ光軸と呼び、ゲイン分布を発生させる電極の長手方向の軸上にある。

10

【 0 0 8 2 】

光学素子において、素子内部を通過する光の波長によってその屈折率が変化する。例えば、 A r F エキシマレーザや F₂ レーザでは、光学素子として C a F₂ を用いるが、 C a F₂ の屈折率 n () は、

$$n () = 1.7865829 - 1.949727 \times 10^{-3} + 2.4708935 \times 10^{-6} \lambda^2$$

で表せることが知られている。

【 0 0 8 3 】

このように、レーザ光の波長が変化すると、それに応じて光学素子の屈折率も変化する。図 1 3 に、三角プリズム P r において、波長によりビーム光路がずれる様子を示す。図 1 3 の中央のレーザ光路 b をレーザ光軸とする。いま、このレーザ光軸上から光が三角プリズム P r に入射した後、ミラー M i で反射して戻ってくる場合を想定する。この図では、 λ_0 の波長に対してビーム拡大光学系が設計されており、 λ_0 の波長に対しては、反射光のビーム光路は、入射光の光路と同一のレーザ光軸上に戻ってくる。このような設計のとき、 λ_0 より短波長の光 ($\lambda_0 - d$) が、光路 b からプリズム P r に入射すると、プリズム P r の屈折率が $n (\lambda_0 - d) > n (\lambda_0)$ となるので、図中の a の光路上に返ってくる。レーザ媒質のゲイン領域 (電極の長手方向) は、 b のレーザ光軸上にあるため、反射光がレーザ光軸 b から外れると、その光は増幅されず、減衰して出力が低下することになる。そのため、 a の光路上に戻る波長 $\lambda_0 - d$ の光は、減衰する。同様に、 λ_0 より長波長の光 ($\lambda_0 + d$) が、光路 b からプリズム P r に入射すると、プリズム P r の屈折率が $n (\lambda_0 + d) < n (\lambda_0)$ となるので、図中の c の光路上に返ってくる。この場合も、レーザ光軸 b から外れているため、波長 $\lambda_0 + d$ は、減衰する。

20

30

【 0 0 8 4 】

この出射角のずれ量は、プリズム P r の頂角の大きさに依存する。頂角が小さいと、角度ずれ量は小さく、頂角が大きいと、角度ずれ量も大きい。

【 0 0 8 5 】

上述の通り、レーザ光は、通常、数 ~ 十数回共振器内を往復してレーザ媒質内で誘導放出により光が増幅されて出力される。そのため、レーザ光として取り出すためには、途中でレーザ媒質のあるゲイン領域から外れてはならない。レーザゲイン領域には、電極幅分の幅があるから、その幅からレーザ光路が外れなければよいが、図 1 3 のように大きな角度ずれが発生すると、共振器内部を光が往復する回数の増加と共にゲイン領域から外れてしまう。これが、以上のような一方の斜面に斜めに入射させ、他方の面から略直角に射出させる三角プリズム 6 2、6 3 からなるビームエキスパンダープリズム系 6 1、6 1' を用いたときに、出力の波長依存性が発生する原因である。

40

【 0 0 8 6 】

出力の波長依存性が発生しないようにするためには、上述の角度ずれを補正すればよい。そこで、図 1 4 に示すように、共振器の反対側にその角度ずれを補正するものを配置してやればよい。その方法としては、図 1 3 のミラー M i を出力側とすると、出力側に配置した三角プリズム P r とミラー M i の構成をそのまま、左右上下反転させてリア側に配置する方法がある。同じ構成・形状、同じ材質、同じ入射角なので、角度ずれの大きさは同じある。かつ、反転しているので、角度ずれの方向が逆転する。結果として、リア側から

50

反射して戻ってきた光の光路は、レーザ光軸 b と平行になっている。ゲイン領域内をビームが通過する位置は若干ずれるが、角度ずれが補正されるため、補正前に比べてゲイン領域から光が外れ難くなる。

【0087】

もう1つの方法として、ウェッジ基板をビーム拡大光学系の素子として使用すると、ビーム拡大光学系を光が通過することによる角度ずれを小さくすることができる。図15に、ウェッジ基板 W_e を用いた場合のビーム拡大光学系の様子を示す。これは、三角プリズム P_r の頂角を小さくし、両斜面に斜めに入射させる場合に相当する。ウェッジ角としては数～十数°であり、そのため、反射して戻ってきた光の角度ずれ量は小さい。ウェッジ角が0°のときは、角度ずれは0°になり、入射光軸上に戻ってくる。ただし、ウェッジ角が小さいと、必要なビーム拡大率が得られ難くなるため、ビーム入射角を三角プリズムの場合に比べて大きくする必要がある。

10

【0088】

図16に、ビーム拡大光学系におけるレーザ光路の入射角、頂角、偏角の関係を示す。図示するように、レーザ光がレーザ光軸上からウェッジ基板 W_e に入射角 θ_1 で入射すると、ウェッジ基板 W_e の屈折率 $n(\quad)$ の値に依存して図示するような角度 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 で屈折してウェッジ基板 W_e から出射される。ウェッジ基板 W_e から出射されるビームの方向は、ウェッジ基板 W_e に入射する前のレーザ光軸とは角度 θ だけずれている。

【0089】

いま、ウェッジ基板 W_e の頂角（ウェッジ角）を α 、光学素子の屈折率を $n(\quad)$ 、ウェッジ基板 W_e が置かれている雰囲気ガスの屈折率を n' （空気の場合は、 $n' = 1$ 、一般的にパージガスとして使用される窒素ガスの場合は、 $n' = 1.00032178$ ）、レーザの中心波長を λ_0 とすると、

20

$$n' \sin \theta_1 = n(\quad) \sin \theta_2 \quad \cdots (1)$$

$$n(\quad) \sin \theta_3 = n' \sin \theta_4 \quad \cdots (2)$$

$$\theta_3 = \theta_2 - \alpha \quad \cdots (3)$$

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 + \theta_3 - \theta_4 \quad \cdots (4)$$

の関係式で書き表すことができる。ここでの(1)、(2)式はスネルの法則に基づくものである。

【0090】

30

いま、波長 λ_0 の場合に、ビーム拡大光学系に入射するレーザ光軸とミラー M_i とがなす角度は、 $90 - \theta$ となる。

【0091】

また、このとき、ビーム拡大率 M （上記では A を使用したが、ここでは M を使用する。）は、

$$M = (\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4) / (\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3) \quad \cdots (5)$$

の式で書き表すことができる。

【0092】

レーザ波長が λ_0 であれば、ミラー M_i で反射したレーザ光は、ビーム拡大光学系に入射する前のレーザ光軸上に戻される。しかし、レーザ波長が λ' に変化した場合は、前述したように、ウェッジ基板 W_e の屈折率が波長依存性を持つため、その出射角が変化する。ウェッジ基板 W_e から出射されるビームの方向が、ウェッジ基板 W_e に入射する前のレーザ光軸と角度 θ' になるとすると、ミラー M_i への入射角は垂直ではなくなり、 $90 - \theta'$ になる。このため、ミラー M_i で反射した光はレーザ光軸から外れ、図示するように、ウェッジ基板 W_e への入射光軸と偏角 θ' で出射される。このとき、ミラー M_i で反射してビーム拡大光学系に再入射するときの角度を、図示するように、 θ'_1 、 θ'_2 、 θ'_3 、 θ'_4 とすると、

40

$$n' \sin \theta'_1 = n(\quad) \sin \theta'_2 \quad \cdots (6)$$

$$n(\quad) \sin \theta'_3 = n' \sin \theta'_4 \quad \cdots (7)$$

$$\theta'_3 = \theta'_2 - \alpha \quad \cdots (8)$$

50

$$\begin{aligned} 2' &= 3' + \dots (9) \\ &= 1' - 1 \dots (10) \end{aligned}$$

の関係式で書き表すことができる。以上の関係式を用いて、偏角の頂角依存性を計算すると、図17に示す結果となる。ここでは、中心波長 $\lambda_0 = 193.368 \text{ nm}$ 、入射角 $\theta_1 = 52.35^\circ$ 、頂角 α の条件でミラーMiで反射したレーザー光が入射光軸上に戻るよう配置したとき、波長を $\lambda = 193 \text{ nm}$ 及び $\lambda = 193.7 \text{ nm}$ に変化させた場合に偏角 θ がどうなるかを計算している。なお、図中に示された直角プリズムは、図13の三角プリズムPrの場合を示している。

【0093】

この結果、波長がずれた場合、頂角 α が小さくなるに従って、偏角 θ が小さくなっていくことが分かる。頂角 $\alpha = 0^\circ$ のとき、偏角 θ は 0° になる。入射角が 52.35° のときに、直角プリズムPrになるための頂角の値は、 $\alpha = \alpha_2$ であるから、 $\alpha = 31.82^\circ$ になる。このときの偏角 θ は 0.035° 程度あるが、頂角を 5° 以下にすることによって、偏角を 0.01° 以下に減少させることができる。

【0094】

同条件のモデルにおいて、拡大率を計算した結果を図18に示す。頂角を小さくすると偏角が小さくなるが、図18に示すように、拡大率も小さくなることが分かる。そのため、同じ拡大率にするために、頂角を小さくする場合には、入射角を大きくする必要がある。なお、拡大率の頂角依存性には、レーザー波長の影響が小さいことも分かる(図18では、3つの波長 $\lambda_0 = 193.368 \text{ nm}$ 、 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 及び $\lambda = 193.7 \text{ nm}$ の曲線が重なっている。)

【0095】

図19には、拡大倍率Mの入射角 θ_1 依存性を示す。図中には、直角プリズム(各入射角に対して、直角プリズムになるように、各頂角も $\alpha = \alpha_2$ として各々計算した。)と、小頂角の代表として頂角 $\alpha = 4.45^\circ$ の場合について示している。前述と同じ入射角 $\theta_1 = 52.35^\circ$ の場合、直角プリズムでは、拡大率Mは1.37倍になる。頂角を小さくしたときに、この倍率を同じ倍率にするために、例えば、頂角を 4.45° にする場合には、入射角を 67.1° にしてやればよい。ここで、頂角を 4.45° で計算しているが、頂角が 4.45° よりさらに小さくした場合には、必要な入射角は 67.1° 以上になるし、頂角が 4.45° より大きくてもよい場合では、入射角は 67.1° 以下にできる。

【0096】

ここで、入射角を大きくしているが、偏角は入射角を大きくすることによって多少大きくなる。図20には、偏角 θ の入射角 θ_1 依存性を示す。図19と同様に、直角プリズムの場合と頂角 4.45° の場合について図示してある。波長は、 $\lambda = 193.0 \text{ nm}$ と $\lambda = 193.7 \text{ nm}$ の場合について、それぞれ示す。偏角は、入射角が大きくなると大きくなるが、頂角が小さい場合は、その影響は小さく、ほとんど変化しない。そのため、入射角を大きくしたとしても、頂角を小さくすることによる偏角の減少効果の方が大きくなる。図20で示すように、拡大倍率1.37倍のとき、直角プリズムの場合の偏角は 0.036° に対して、頂角 4.45° の場合は 0.01° と小さくなる。ここでは、ウェッジ基板Weの代表として、頂角(ウェッジ角) 4.45° の場合について示したが、異なる頂角であっても、直角プリズムの頂角より小さければ、その効果は同じであり、同拡大率において、偏角を小さく、つまり、出力の波長依存性を小さくすることができる。

【0097】

また他の方法として、波長が変化したら、それに合わせてビーム拡大光学系へのビーム入射角を変えて、ビーム光路がずれないように制御する方法がある。図21にその方法を示す。図21(a)が、波長が d だけ長波長に変化したときの制御で、図21(b)が、波長が d だけ短波長に変化したときの制御である。波長 λ_0 に対して設計されている三角プリズム式ビーム拡大光学系(図13)において、波長が $\lambda_0 + d$ に変化したとする。この場合、図21(a)中に実線で表した光路に沿って角度がずれる。そのときのブ

10

20

30

40

50

リズムPr内での角度ずれを とする。この角度変化 がなくなるように、入射角を 変化させてやれば、点線で表した光路上に変化する。入射角を変化させるために、プリズムPrの位置を回転させてやる。このときの回転の中心は、ビームの入射点とする。波長が $\lambda_0 - d$ の短波長に変化した場合（図21（b））も同様で、今度は逆方向にプリズムPrを だけ回転させてやれば、角度ずれを補正して、レーザ光軸b上に戻してやること
10

【0098】

また、波長が変化したら、それに合わせて、出力側ミラーMiあるいはリア側ミラーMiの
10
の位置を回転させてやる。このときの回転の中心は、ビームの入射点とする。波長が $\lambda_0 - d$ の短波長に変化した場合（図21（b））も同様で、今度は逆方向にプリズムPrを だけ回転させてやれば、角度ずれを補正して、レーザ光軸b上に戻してやること
10

【0099】

次に、以上のような出力の波長依存性が発生しないようにする方法を利用した実施例を
以下に説明する。

【0100】

図22（a）、（b）に、図6、図7に対応する実施例であって、図14の方法を利用
した実施例の上面図を示す。この実施例は、チャンバー3の両端のリア側と出力側ビーム
20
拡大光学系（BEX）61、61'に三角プリズム式ビーム拡大光学系を配置した実施例
である。前記したように、出力の波長依存性を無視できる程度に小さくするため、リア側
ビーム拡大光学系61の三角プリズム62、63の組の配置を出力側ビーム拡大光学系6
1'の三角プリズム62、63の組の配置に対して上下左右反転させている。このような
配置により、波長が変化しても、出力側ビーム拡大光学系61'を通過した後に変化した
ビームのレーザ光軸からの角度ずれは、リア側ビーム拡大光学系61を透過することによ
ってなくす（相殺する）ことができる。これによって、出力の波長依存性が緩和される。
なお、図22（a）、（b）のそれ以外の構成部品は以上の説明から明らかであるので説
明は省く。

【0101】

図23には、出力側のみに三角プリズム式ビーム拡大光学系61'を配置したときと、
30
リア側にも180°回転対称な三角プリズム式ビーム拡大光学系61を配置したときの、
出力の波長依存性を示す。これで、例えば、 $\pm 100 \text{ pm}$ 波長が変化した場合、片側ビ
ーム拡大光学系配置では出力が半減してしまうが、両側ビーム拡大光学系配置では、出力は
数%の減少ですむことが分かる。この程度の出力減少であれば、放電電極4と5への印加
電圧やチャンバー3のガス圧力を増加させることで、一定出力に制御することが可能とな
る。

【0102】

図22（b）は、出力側のビーム拡大光学系61'の2個目（外側）の三角プリズム6
3の垂直面に部分反射ミラーコーティング10を成膜して、出力側ミラーの代わりにして
いる。また、リア側のビーム拡大光学系61の2個目（外側）三角プリズム63の垂直面
40
には、90%付近の反射率を持つ部分反射ミラーコーティング10を成膜して、リア側ミ
ラーの代わりにしている。部分反射ミラーコーティング10に照射するレーザ光の単位面
積当たりのピークエネルギー（照射ピークフルエンス； mJ/cm^2 ）が損傷閾値及び歪み
の閾値を超えないように、ビーム拡大光学系61、61'の拡大率を設定している。この
場合、ビーム拡大光学系の拡大率は、出力側及びリア側のビーム拡大光学系61、61'
で同じなので、どちらか照射フルエンスの高い方の拡大率に合わせている。ここで、使用
する部分反射ミラーコーティング10、反射防止コーティング9は、 MgF_2 、 GdF_3 、 LaF_3 、 Al_2O_3 、 AlF_3 といった薄膜を多層又は単層に成膜して製作される。
成膜方法としては、抵抗加熱蒸着法、電子ビーム法（EB）、イオンビームスパッタリン
グ法（IBS）等がある。
50

【 0 1 0 3 】

なお、この方式は、三角プリズム式のビーム拡大光学系 6 1、6 1' 以外でも有効であり、ウェッジ基板式のビーム拡大光学系でも使用できる。

【 0 1 0 4 】

次に、図 2 4 に、図 4、図 6 に対応する実施例であって、図 1 6 のウェッジ基板を使用した方法を利用した実施例 (a) と図 1 6 と図 1 4 を組み合わせた実施例 (b) の上面図を示す。

【 0 1 0 5 】

ウェッジ基板 9 2 を使用することにより、出力の波長依存性を小さくすることができる。図 2 4 (a) は、レーザチャンバー 3 とフロント側ミラー 2 の間に、1 個のウェッジ基板 9 2 からなるビーム拡大光学系 9 1' を配置した場合であり、図 2 4 (b) は、レーザチャンバー 3 とリア側ミラー 1 の間にも 1 個のウェッジ基板 9 2 からなるビーム拡大光学系 9 1 を配置した両側ビーム拡大光学系配置の場合である。図 2 4 (b) の場合、リア側ビーム拡大光学系 9 1 のウェッジ基板 9 2 の配置を出力側ビーム拡大光学系 9 1' のウェッジ基板 9 2 の配置に対して上下左右反転させている。片側にウェッジ基板を使用したビーム拡大光学系 9 1' を配置するだけ (図 (a)) でも出力の波長依存性は小さくできるが、両側にウェッジ基板を使用したビーム拡大光学系 9 1、9 1' を配置することによって、さらに出力の波長依存性を小さくすることが可能である。この構成では、ウェッジ基板が 1 枚なので、構造がシンプルで、ビーム拡大光学系 9 1、9 1' を挿入することによる共振器長の増加も小さくできるメリットがある (共振器長が増加すると、レーザ出力が減少することは知られている。)。しかし、図 2 4 (a)、(b) に図示するように、出力側ミラー 2 から出力されるレーザ光は、レーザチャンバー 3 内のレーザ光軸から図 1 6 における偏角 θ だけ傾いている。このため、この偏角を補正するために、出力側ミラー 2 の後に補正用の光学系が必要になるというデメリットがある。

【 0 1 0 6 】

図 2 5 (a)、(b) は、各ビーム拡大光学系 9 1、9 1' 中に 2 枚のウェッジ基板 9 2、9 3 を使用して構成した図 2 4 (a)、(b) に対応する実施例である。それぞれのビーム拡大光学系 9 1、9 1' 中の 2 枚のウェッジ基板 9 2、9 3 は同一のものであり、2 枚目のウェッジ基板 9 3 は 1 枚目のウェッジ基板 9 2 に対して上下反転させて「ハ」の字型に配置して、ビーム入射角が同一になるように配置している。このように配置することによって、ビーム拡大光学系 9 1、9 1' 出射後のレーザ光軸をビーム拡大光学系 9 1、9 1' 入射前のレーザ光軸と平行にする (偏角 $= 0^\circ$) ことができる。この原理を図 2 6 を用いて説明する。図 2 6 は、2 枚のウェッジ基板 9 2、9 3 にレーザ光が入射した場合のレーザ光路を示している。2 個目のウェッジ基板 9 3 上のビーム光路の角度は、図示するように、 θ_5 、 θ_6 、 θ_7 、 θ_8 とし、1 個目のウェッジ基板 9 2 からの出射光のビーム偏角を θ_1 、2 個目のウェッジ基板 9 3 からの出射光のビーム偏角を θ_2 とすると、

$$\theta_1 = \theta_1 - \theta_2 + \theta_3 - \theta_4 \quad \cdots (11)$$

$$\theta_2 = \theta_1 - \theta_5 + \theta_6 - \theta_7 + \theta_8 \quad \cdots (12)$$

となる。いま、2 個目のウェッジ基板 9 3 は 1 個目のウェッジ基板 9 2 と形状が同じで、上下反転させて入射角を同じ ($\theta_5 = \theta_1$) という条件にすると、

$$\theta_5 = \theta_1 \quad \cdots (13)$$

$$\theta_6 = \theta_2 \quad \cdots (14)$$

$$\theta_7 = \theta_3 \quad \cdots (15)$$

$$\theta_8 = \theta_4 \quad \cdots (16)$$

$$\theta_1 = \theta_2 \quad \cdots (17)$$

が成り立つ。これらの (1 3) ~ (1 7) 式を (1 2) 式に代入してやると、

$$\theta_2 = 0 \quad \cdots (18)$$

となる。つまり、上述の条件にすれば、偏角を 0 にして、出射されるレーザ光の光軸をチャンバー 3 内のレーザ光軸と平行にすることができる。

【0107】

ビーム拡大光学系91、91'中にウェッジ基板92、93を2個使用することの他のメリットとして、1枚で得られる拡大率を2倍にすることができるということがあげられる。また、波長分散の方向が2枚で逆向きなので、分散の影響を弱める配置である。ただし、枚数が増加すると、共振器長が増加して出力が減少する可能性もあることから、このビーム拡大光学系91、91'は小さく作ることが必要である。

【0108】

図24、図25のようなビーム拡大系91、91'により、出力側ミラー2の反射防止コーティング9及び部分反射ミラーコーティング10に照射されるピークフルエンスを損傷閾値以下に低減させることができる上、波長の角度分散の小さい構成であることから、出力の波長依存性を無視することができる。

10

【0109】

図27は、ウェッジ基板を使用したウェッジ基板式ビーム拡大光学系と三角プリズムを使用した三角プリズム式ビーム拡大光学系の出力の波長依存性を示す図であり、ビーム拡大光学系は両者共出力側のみに配置した場合であり、ビーム拡大光学系による拡大率は両者共1.87倍である。三角プリズム式の場合、入射角が52.35°、頂角が31.82°である。ウェッジ基板式の場合は、入射角が67.1°、ウェッジ角が4.45°である。ウェッジ基板式の方が拡大率をかせぐために入射角が大きくなっている。図27より、同じ拡大率であっても、ウェッジ基板式の方が出力の波長依存性が小さいことが分かる。この場合、例えば、±100pm波長が変化した場合、片側にビーム拡大光学系を配置する場合では、出力が半減してしまうが、両側にビーム拡大光学系を配置する場合は、出力は数%の減少ですむことが分かる。

20

【0110】

また、図25(b)は、このウェッジ基板式ビーム拡大光学系91をリア側にも、フロント側のビーム拡大光学系91'に対して上下左右反転して配置した場合の例を示す。この系では、両側ビーム拡大光学系とウェッジ基板式を組み合わせることによって、さらに出力の波長依存性を小さくすることができる。この方式では、リア側ミラー1の高反射率の部分反射ミラーコーティング10に照射するピークフルエンスが損傷閾値以上である場合にも、照射ピークフルエンスを拡大率分だけ減少させることが可能であるため、有効である。この配置の場合の、出力の波長依存性を図28に示す。図28より分かるように、193nm~193.7nmの範囲で波長依存性がなくなっている。この方式は、波長を大きく変化させる場合に有効であることが分かる。

30

【0111】

このウェッジ基板92、93の入射角は、そのP偏光反射率が0になるブリュースタ角(ArFレーザ波長193.368nmの場合は、56.34°、F₂レーザ波長157.63nmの場合は57.32°)よりも大きくなることが多い。この場合は、その入射角においてP偏光反射率が無視できる程度にする反射防止膜を表面に付けることが必要である。例えば、ビーム拡大率2.0倍のビーム拡大光学系を設計した場合、入射角68.7°、ウェッジ角4.4°となる。また、ウェッジ基板裏面の入射角は60.0°となる。60.0°の入射角のP偏光反射率は0.2%なので、この面は反射防止膜を付ける必要はないが、第1面は68.7°であるので、反射防止膜を付ける必要がある。

40

【0112】

また、ビーム拡大光学系の設計においては、ビーム拡大光学系自身が損傷を受けないようにする必要がある。前述の三角プリズム式ビーム拡大光学系61、61'の場合は、その三角プリズムの垂直面のビーム照射エリアが斜面のそれより小さくなり、照射ピークフルエンスが高くなる。特に拡大率の低い第1プリズム62の垂直面の照射ピークフルエンスが高いため、三角プリズム式では、レーザ出力エネルギーが高い場合、そこが損傷を受ける可能性がある。しかし、このウェッジ基板式の場合は、三角プリズム式と比べて、垂直面に相当する部分がウェッジ基板の斜面で光を受けているので、照射エリアが大きく、照射フルエンスを小さくすることが可能である。ビーム拡大光学系の設計においては、拡大

50

率と共に、各ビーム拡大光学系の三角プリズム又はウェッジ基板の表面が損傷閾値以下になるように設計する必要がある。

【0113】

次に、ウェッジ基板式ビーム拡大光学系91、91'中の一方向のウェッジ基板92をチャンバー3の端部のウィンドー部材として兼用させる実施例を説明する。図29(a)、(b)は図25(a)、(b)に対応する実施例であり、図29(a)は、出力側のみビーム拡大光学系91'を配置する場合、図29(b)は、リア側にもビーム拡大光学系91を配置する場合である。何れも、ウェッジ基板式ビーム拡大光学系91、91'の一方向のウェッジ基板92をウィンドー部材として使用してチャンバーウィンドー兼ウェッジ基板94とした例を示す。この方式では、実質チャンバー3のウィンドー部材17に使用してきた素子を1枚又は2枚減らすことができるため、光学素子における光の損失を1枚又は2枚分なくすことができ、また、光学素子1枚又は2枚分のコストを低下させることができる。また、共振器長も素子1枚又は2枚分短くすることができるため、出力が増加するメリットもある。

10

【0114】

図30(a)、(b)は図29(a)、(b)に対応する実施例であり、図30(a)は、出力側のみビーム拡大光学系91'を配置する場合、図30(b)は、リア側にもビーム拡大光学系91を配置する場合である。この実施例は、ウェッジ基板式ビーム拡大光学系91、91'を全てチャンバー3内部に入れて、他方のウェッジ基板93をチャンバーウィンドー兼ウェッジ基板94として使用する場合の例である。このようにすることによって、外見上シンプルな構造にすることができる。また、ウェッジ基板式ビーム拡大光学系91、91'の素材として使用できる CaF_2 は、レーザ照射によってその表面のF原子が脱離する。そのため、 F_2 ガス雰囲気中に曝しておくことによって、抜けたF原子の部分が補填され、損傷され難くなることが知られている(非特許文献1)。このため、ビーム拡大光学系91、91'をチャンバー3内部に入れることによって、ビーム拡大光学系91、91'自身の損傷閾値を向上させることができるというメリットがある。

20

【0115】

以上の他に、出力の波長依存性を低減してレーザビームの径を拡大する構成として、負パワーと正パワーのシリンドリカルレンズあるいは回転対称レンズを相互に焦点が合うように配置して(望遠系となるように配置して)、ビーム径を拡大する方法がある。負パワーのレンズでビーム径又は幅を拡大し、負パワーのレンズの後に置かれた正パワーのレンズによって平行光に戻している。この配置では、波長は角度分散しないので、出力の波長依存性はない。ただし、レーザ光軸に対して垂直にレンズを配置した場合、レンズにおける照射フルエンスが高く、レンズ自身が損傷を受ける可能性もある。照射フルエンスを減少させるために、負パワーのレンズの代わりに凹面鏡を傾けて配置してもよいが、その場合には収差が大きくなるデメリットが生じる。

30

【0116】

次に、図21の波長変化に応じてビーム拡大光学系へのビーム入射角を制御することで光路がずれないようにする実施例を説明する。

【0117】

40

図31は、ビーム拡大光学系の入射角を制御して波長により角度ずれ自身が発生しないようにする方式の例である。この図31では、三角プリズム式ビーム拡大光学系61'を用いるものとしているが、ウェッジ基板式ビーム拡大光学系を用いる場合も同様に適用でき有効である。この制御を可能にするため、ビーム拡大光学系61'を構成する光学素子62、63は回転できる機構を設ける(図31では三角プリズム62、63を支持する回転ステージ111、112を設けている。)。メインコントローラ105で、波長の変化を感知したら、回転ステージコントローラ106に信号を送って、波長変化に相当する角度分三角プリズム62、63を回転させてやり、入射角を制御する。モニタモジュール107を出力側ミラー2の出力側に配置して、その中のエネルギーセンサー又はスペクトロメータ108で出力レーザ光のエネルギー又はスペクトルを計測して、出力光の最大透過波長

50

が目的の波長 になるように、入射角を微調整するフィードバック制御をしている。

【 0 1 1 8 】

このようにして、波長が変化したとしても、光軸を調整することにより、常にレーザビームはゲイン領域のあるレーザ光軸上を通過するようにして、出力低下を防ぐことができる。

【 0 1 1 9 】

図 3 2 は、共振器を構成するミラーのあおり（角度）を制御して波長により角度ずれ自身が発生しないようにする方式の例である。この図 3 2 では、三角プリズム式ビーム拡大光学系 6 1 ' を用いるものとしているが、ウェッジ基板式ビーム拡大光学系を用いる場合も同様に適用でき有効である。この制御を可能にするため、出力側ミラー 2 にはあおり制御機構 1 1 0 を設ける。メインコントローラ 1 0 5 で、波長の変化を感知したら、出力側ミラーコントローラ 1 0 9 に信号を送って、あおり制御機構 1 1 0 を介して波長変化に相当するあおり量を制御する。モニタモジュール 1 0 7 を出力側ミラー 2 の出力側に配置して、その中のエネルギーセンサー又はスペクトロメータ 1 0 8 で出力レーザ光のエネルギー又はスペクトルを計測して、出力光の最大透過波長が目的の波長 になるように、あおり量を微調整するフィードバック制御をしている。

【 0 1 2 0 】

このようにして、波長が変化したとしても、光軸を調整することにより、常にレーザビームはゲイン領域のあるレーザ光軸上を通過するようにして、出力低下を防ぐことができる。

【 0 1 2 1 】

なお、図 3 2 では、出力側ミラー 2 のあおり角度を制御する方式をとっているが、リア側ミラー 1 のあおり角度を制御しても同様の効果が得られる。

【 0 1 2 2 】

以下、図 3 1、図 3 2 の方式における制御を説明する。図 3 3 には、その制御フローチャートのメインルーチンを示す。ステップ S T 1 で、露光装置 1 0 0（図 2）から、中心波長を にする指令をレーザ装置が受信したら、発振段レーザ 5 0 のシード光の中心波長を にするサブルーチン S T 2 を実施する。図示しないが、波長変化の方法としては、狭帯域化モジュール 5 1 内の拡大プリズムの入射角やグレーティング（回折格子）の入射角、又は、フロントミラー 5 2 のあおり角を変化させる方法がある。この後、増幅段レーザ 6 0 の最大透過波長を に合わせるサブルーチン S T 3 を実施する。

【 0 1 2 3 】

図 3 4 ~ 図 3 7 にこれらサブルーチン S T 3 の例を示す。以下、順に説明する。

【 0 1 2 4 】

図 3 4 は、ビーム拡大光学系 6 1 ' の光学素子（三角プリズム 6 2、6 3）の入射角を制御する場合のサブルーチンを示す。まず、ステップ S T 1 1 で、メインコントローラ 1 0 5 で波長 に対応する回転角 を計算する。 の値は、光学素子 6 2、6 3 の材料における屈折率の波長依存性の式とスネルの式とから求めることができる。そして、ビーム拡大光学系の回転ステージ 1 1 1、1 1 2 に角度 の値を指令する。次に、ステップ S T 1 2 で、この指令値に従って回転ステージ 1 1 1、1 1 2 を 制御する。次に、レーザ出力が最大になるように角度 を微調整する。まず、ステップ S T 1 3 で、パラメータ N を 0 にする。次に、ステップ S T 1 4 で、モニタモジュール 1 0 7 でレーザ出力を計測し、パラメータ E の値を計測値 E 1 とする。ここで、パラメータ E は、微調整前のエネルギー値を意味する。次に、ステップ S T 1 5 で、回転ステージ 1 1 1、1 1 2 を微量 $k \cdot d$ 回転させる。係数 k の値は、予め最適値を設定しておく。k の値がマイナスの場合は、逆方向に回転することとする。次に、ステップ S T 1 6 で、モニタモジュール 1 0 7 でレーザ出力を再計測し、パラメータ E ' の値を計測値 E 2 とする。ここで、パラメータ E ' は、微調整後のエネルギー値を意味する。次に、ステップ S T 1 7 で、 $E' > E$ かどうかを判定する。 $E' > E$ の場合は、微調整によってレーザ出力が増加する方向であるので、ステップ S T 1 8 で、パラメータ E の値を E ' にして、ステップ S T 1 5 に戻って再度回転ステ

ージ 1 1 1、1 1 2 を微量 $k \cdot d$ 回転させるルーチンを行う。ステップ S T 1 7 で、 $E' < E$ と判定される場合は、エネルギーが減少したことを意味するので、既に出力ピークの位置にあったか、制御方向が逆であったことを示す。ここで、ステップ S T 1 9 で、パラメータ N を判定する。N の値は、 $E' < E$ となった回数を示している。N = 0 の場合、つまり、初めて調整後にエネルギーが減少したときである。この場合は、位置を元の状態に戻さなくてはならないので、ステップ S T 2 0 で、回転方向を逆にするため k の符号を反転させる ($k = k \times (-1)$)。そして、パラメータ N の値を 1 にして、パラメータ E の値を E' にする。そして、ステップ S T 1 5 に戻って再度回転ステージ 1 1 1、1 1 2 を微量 $k \cdot d$ 回転させるルーチンを行う。N = 1 の場合は、以前に、調整の方向を逆転させた履歴があることを意味する。元々微調整する前の段階で、出力ピークの位置にあった場合、1 回微調整することで出力が減少し、そのため、調整方向を反転して、ピークに向かって調整していき、さらにピークを通りすぎたことによって、出力が 2 回目の減少を示したときを意味する。又は、最初の微調整の方向が逆で、出力が減少したため、調整方向を反転して、ピークに向かって調整していき、さらにピークを通りすぎたことによって、出力が 2 回目の減少を示したときを意味する。何れの場合も、ピークを 1 調整分オーバーした位置にあることになるため、最後に、ステップ S T 2 1 で、調整の方向を逆転 ($k = k \times (-1)$) させ、ステップ S T 2 2 で、回転ステージ 1 1 1、1 1 2 を $k \cdot d$ 回転させる。この位置でエネルギーピークになっている。

【 0 1 2 5 】

図 3 5 は、共振器を構成するミラーのあおり角を制御する場合のサブルーチンを示す。まず、ステップ S T 3 1 で、メインコントローラ 1 0 5 で、波長 に対応するあおり量 x を計算する。 x の値は、光学素子 6 2、6 3 の材料における屈折率の波長依存性の式とスネルの式とから、ミラー（この場合は、出力側ミラー 2）の垂直方向とレーザ光のミラーへの進行方向の角度差 を計算し、その角度 分のあおり量 x を計算する。そして、出力側ミラーあおり調整機構 1 1 0 にあおり量 x の値を指令する。次に、ステップ S T 3 2 で、この指令値に従って出力側ミラー 2 のあおり量を x 制御する。次に、レーザ出力が最大になるようにあおり量 x を微調整する。まず、ステップ S T 3 3 で、パラメータ N を 0 にする。次に、ステップ S T 3 4 で、モニタモジュール 1 0 7 でレーザ出力を計測し、パラメータ E の値を計測値 E_1 とする。ここで、パラメータ E は、微調整前のエネルギー値を意味する。ステップ S T 3 5 で、あおり制御機構 1 1 0 を微量 $k \cdot d x$ 回転させる。係数 k の値は、予め最適値を設定しておく。k の値がマイナスの場合は、逆方向に回転することとする。次に、ステップ S T 3 6 で、モニタモジュール 1 0 7 でレーザ出力を再計測し、パラメータ E' の値を計測値 E_2 とする。ここで、パラメータ E' は、微調整後のエネルギー値を意味する。次に、ステップ S T 3 7 で、 $E' > E$ かどうかを判定する。 $E' > E$ の場合は、微調整によってレーザ出力が増加する方向であるので、ステップ S T 3 8 で、パラメータ E の値を E' にして、ステップ S T 3 5 に戻って再度あおり調整機構 1 1 0 を微量 $k \cdot d x$ 回転させるルーチンを行う。ステップ S T 3 7 で、 $E' < E$ と判定される場合は、エネルギーが減少したことを意味するので、既に出力ピークの位置にあったか、制御方向が逆であったことを示す。ここで、ステップ S T 3 9 で、パラメータ N を判定する。N の値は、 $E' < E$ となった回数を示している。N = 0 の場合、つまり、初めて調整後にエネルギーが減少したときである。この場合は、位置を元の状態に戻さなくてはならないので、ステップ S T 4 0 で、回転方向を逆にするため k の符号を反転させる ($k = k \times (-1)$)。そして、パラメータ N の値を 1 にして、パラメータ E の値を E' にする。そして、ステップ S T 3 5 に戻ってあおり調整機構 1 1 0 を微量 $k \cdot d x$ 回転させるルーチンを行う。N = 1 の場合は、以前に、調整の方向を逆転させた履歴があることを意味する。元々微調整する前の段階で、出力ピークの位置にあった場合、1 回微調整することで出力が減少し、そのため、調整方向を反転して、ピークに向かって調整していき、さらにピークを通りすぎたことによって、出力が 2 回目の減少を示したときを意味する。又は、最初の微調整の方向が逆で、出力が減少したため、調整方向を反転して、ピークに向かって調整していき、さらにピークを通りすぎたことによって、出力が 2 回目の減少を示した

ときを意味する。何れの場合も、ピークを1調整分オーバーした位置にあることになるため、最後に、ステップST41で、調整の方向を逆転($k = k \times (-1)$)させ、ステップST42で、あおり調整機構110を $k \cdot d \times$ 回転させる。この位置でエネルギーピークになっている。

【0126】

なお、以上では、出力側ミラー2のあおり角度を制御する場合を説明したが、リア側ミラー1のあおり角度を制御しても同様の効果が得られる。

【0127】

図36は、ビーム拡大光学系61'の光学素子(三角プリズム62、63)の入射角をスペクトルを計測して制御する場合のサブルーチンである。まず、ステップST51で、メインコントローラ105で波長に対応する回転角を計算する。この値は、光学素子62、63の材料における屈折率の波長依存性の式とスネルの式とから求めることができる。そして、ビーム拡大光学系の回転ステージ111、112に角度の値を指令する。次に、ステップST52で、この指令値に従って回転ステージ111、112を制御する。次に、最大透過波長がになるように、モニタモジュール107でスペクトルを計測して、微調整するルーチンに入る。ステップST53で、スペクトル計測するために、発振段レーザ50の注入光(see d光)を遮断する。遮断する方法としては、光路上にシャッターを設け、これを閉じてやればよい。その後、増幅段レーザ60単体でレーザ発振させる。このときの出力光のスペクトル波形を、ステップST54で、増幅段レーザ60の光路の出射側にあるモニタモジュール107で計測する。計測した中心波長を1とする。次に、ステップST55で、ターゲットの波長との差 $d = 1 -$ を計算する。次に、ステップST56で、 d が許容値以内かどうかを判定する。許容値は、予め最適値を決めておく。許容値以内であれば、ステップST57で、発振段レーザ50の注入光を導入してやり、サブルーチンは終了する。ステップST56で、 d が許容値オーバーであれば、微調整を実施する。そのために、ステップST58で、回転ステージ111、112を $k \cdot d$ 回転させる。係数 k の値は、予め最適値を設定しておく。 k の値がマイナスの場合は、逆方向に回転することとする。次に、ステップST59で、再度スペクトルを計測する。このときの中心波長を2とする。そして、ステップST60で、ターゲットの波長との差 $d' = 2 -$ を計算する。 d' は、微調整後のターゲットとの差であり、 d は微調整前のターゲットとの差である。次に、ステップST61で、 $d' < d$ かどうかを判定する。 $d' > d$ の場合は、制御することによって、逆にターゲットとの差が開いたことを示すので、制御方向が逆である。そのため、ステップST62で、調整の方向を逆転($k = k \times (-1)$)させ、 d の値を d' として、ステップST58に戻って再度回転ステージ111、112を $k \cdot d$ 回転させるルーチンを行う。ステップST61で、 $d' < d$ の場合は、制御によってターゲットに近づいたことを示す。ステップST63で、 d' が許容値以内かどうかを判定する。ここで、許容値以内に入っていれば、ステップST57で、発振段レーザ50の注入光を導入してやり、サブルーチンは終了する。ステップST63で、許容値に入っていなければ、調整が足りないことを意味するので、ステップST64で、 d の値を d' として、ステップST58に戻って再度回転ステージ111、112を $k \cdot d$ 回転させるルーチンを行う。

【0128】

図37は、共振器を構成するミラーのあおり角をスペクトルを計測して制御する場合のサブルーチンを示す。まず、ステップST71で、メインコントローラ105で、波長に対応するあおり量 x を計算する。 x の値は、光学素子62、63の材料における屈折率の波長依存性の式とスネルの式とから、ミラー(この場合は、出力側ミラー2)の垂直方向とレーザ光のミラーへの進行方向の角度差を計算し、その角度分のあおり量 x を計算する。そして、そして、出力側ミラーあおり調整機構110にあおり量 x の値を指令する。次に、ステップST72で、この指令値に従って出力側ミラー2のあおり量を x 制御する。次に、最大透過波長がになるように、モニタモジュール107でスペクトルを計測して、微調整するルーチンに入る。ステップST73で、スペクトル計測するために、

発振段レーザ 50 の注入光 (seed 光) を遮断する。遮断する方法としては、光路上にシャッターを設け、これを閉じてやればよい。その後、増幅段レーザ 60 単体でレーザ発振させる。このときの出力光のスペクトル波形を、ステップ S T 7 4 で、増幅段レーザ 60 の光路の出射側にあるモニタモジュール 107 で計測する。計測した中心波長を λ_1 とする。次に、ステップ S T 7 5 で、ターゲットの波長 λ_t との差 $d = \lambda_1 - \lambda_t$ を計算する。次に、ステップ S T 7 6 で、 d が許容値以内かどうかを判定する。許容値は、予め最適値を決めておく。許容値以内であれば、ステップ S T 7 7 で、発振段レーザ 50 の注入光を導入してやり、サブルーチンは終了する。ステップ S T 7 6 で、 d が許容値オーバーであれば、微調整を実施する。そのために、ステップ S T 7 8 で、あおり制御機構 110 を微量 $k \cdot d$ 回転させる。係数 k の値は、係数 k の値は、予め最適値を設定しておく。10 k の値がマイナスの場合は、逆方向に回転することとする。次に、ステップ S T 7 9 で、再度スペクトルを計測する。このときの中心波長を λ_2 とする。そして、ステップ S T 8 0 で、ターゲットの波長 λ_t との差 $d' = \lambda_2 - \lambda_t$ を計算する。 d' は、微調整後のターゲットとの差であり、 d は微調整前のターゲットとの差である。次に、ステップ S T 8 1 で、 $d' < d$ かどうかを判定する。 $d' > d$ の場合は、制御することによって、逆にターゲットとの差が開いたことを示すので、制御方向が逆である。そのため、ステップ S T 8 2 で、調整の方向を逆転 ($k = k \times (-1)$) させ、 d の値を d' として、ステップ S T 7 8 に戻ってあおり調整機構 110 を $k \cdot d$ 回転させるさせるルーチンを行う。ステップ S T 8 1 で、 $d' < d$ の場合は、制御によってターゲットに近づいたことを示す。ステップ S T 8 3 で、 d' が許容値以内かどうかを判定する。こ20 こで、許容値以内に入っていれば、ステップ S T 7 7 で、発振段レーザ 50 の注入光を導入してやり、サブルーチンは終了する。ステップ S T 8 3 で、許容値に入っていなければ、調整が足りないことを意味するので、ステップ S T 8 4 で、 d の値を d' として、ステップ S T 7 8 に戻って再度あおり制御機構 110 を $k \cdot d$ 回転させるルーチンを行う。

【0129】

なお、以上では、出力側ミラー 2 のあおり角度を制御する場合を説明したが、リア側ミラー 1 のあおり角度を制御しても同様の効果が得られる。

【0130】

以上、本発明の高出力ガスレーザ装置を露光用 2 ステージレーザ装置の増幅段レーザを例にとって説明したが、その他の多段ステージのガスレーザ装置の増幅段レーザや、増幅段レーザを用いないで発振段レーザのみからなるガスレーザ装置に本発明の原理を適用して、その共振器を構成する少なくとも 1 枚のミラーとレーザガスチャンバーとの間に、ミラー側のビームの径あるいは幅を広げるビーム拡大光学系を介在させるようにすることにより、共振器のミラーを構成する光学素子に入射するレーザエネルギー密度を低減させてその光学素子の表面損傷が発生しないようにすることにより耐久性を向上させ、長寿命化を実現することができる。また、共振器のミラーを構成する光学素子に入射するレーザエネルギー密度を低減させてその光学素子に歪みが発生しないようにすることができる。また、このとき、レーザの中心波長が変化したとしてもレーザ出力が減少しないようにすることができる。30 40

【0131】

以上、本発明の高出力ガスレーザ装置をその原理と実施例の説明に基づいて説明してきたが、本発明はこれら実施例に限定されず種々の変形が可能である。

【符号の説明】

【0132】

P 1、P 2 ... 圧力センサー

T 1、T 2 ... 温度センサー

P r ... 三角プリズム

M i ... ミラー

W e ... ウェッジ基板

10

20

30

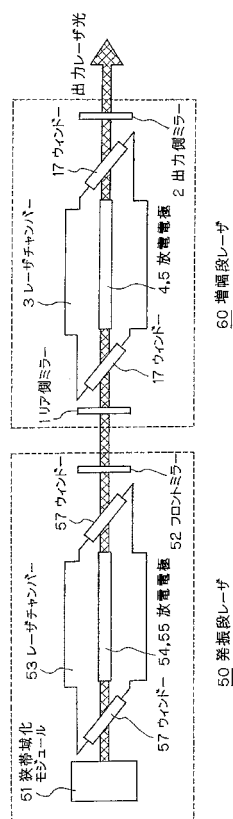
40

50

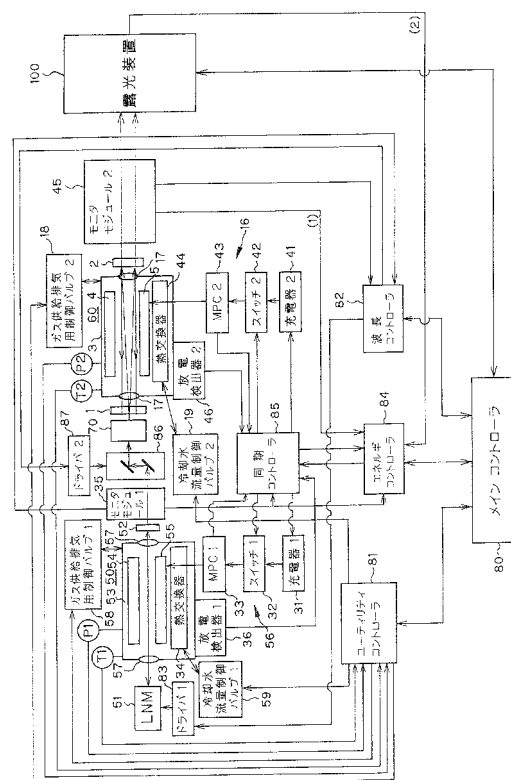
1 ...入力側ミラー（リア側ミラー）	
2 ...出力側ミラー（フロント側ミラー）	
3 ...レーザチャンバー	
4、5 ...放電電極	
4、5 4 ...アノード電極	
5、5 5 ...カソード電極	
8 ...高反射率（全反射）ミラーコーティング	
9 ...反射防止コーティング	
1 0 ...部分反射ミラーコーティング	
1 6、5 6 ...電源	10
1 7、5 7 ...ウィンドー部材	
1 8 ...ガス供給排気用制御バルブ	
1 9、5 9 ...冷却水流量制御バルブ	
2 2 ...放電領域（レーザ利得領域）	
2 3 ... s e e d 光	
3 1 ...充電器	
3 2 ...スイッチ	
3 3 ...M P C（磁気パルス圧縮回路）	
3 4、4 4 ...熱交換器	
3 5、4 5 ...モニターモジュール	20
3 6、4 6 ...放電検出器	
4 1 ...充電器	
4 2 ...スイッチ	
4 3 ...M P C（磁気パルス圧縮回路）	
5 0 ...発振段レーザ	
5 1 ...狭帯域化モジュール	
5 2 ...フロントミラー	
5 3 ...レーザチャンバー	
5 4、5 5 ...放電電極	
5 8 ...ガス供給排気用制御バルブ	30
6 0 ...増幅段レーザ	
6 1、6 1' ...ビーム拡大光学系（ビームエキスパンダープリズム系）	
6 2、6 3、6 3' ...三角プリズム	
7 0 ...変換光学系	
8 0 ...メインコントローラ	
8 1 ...ユーティリティコントローラ	
8 2 ...波長コントローラ	
8 3 ...ドライバ	
8 4 ...エネルギーコントローラ	
8 5 ...同期コントローラ	40
8 6 ...ビームステアリングユニット	
8 7 ...ドライバ	
9 1、9 1' ...ビーム拡大光学系（ウェッジ基板式ビーム拡大光学系）	
9 2、9 3 ...ウェッジ基板	
9 4 ...チャンバーウィンドー兼ウェッジ基板	
1 0 0 ...露光装置	
1 0 1 ...部分反射ミラーコーティング	
1 0 5 ...メインコントローラ	
1 0 6 ...回転ステージコントローラ	
1 0 7 ...モニタモジュール	50

- 108 ... エネルギーセンサー又はスペクトロメータ
 109 ... 出力側ミラーコントローラ
 110 ... あおり制御機構
 111、112 ... 回転ステージ

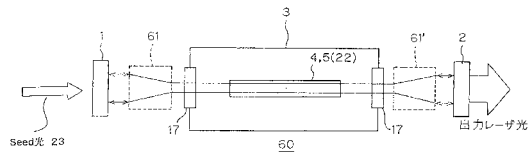
【図1】



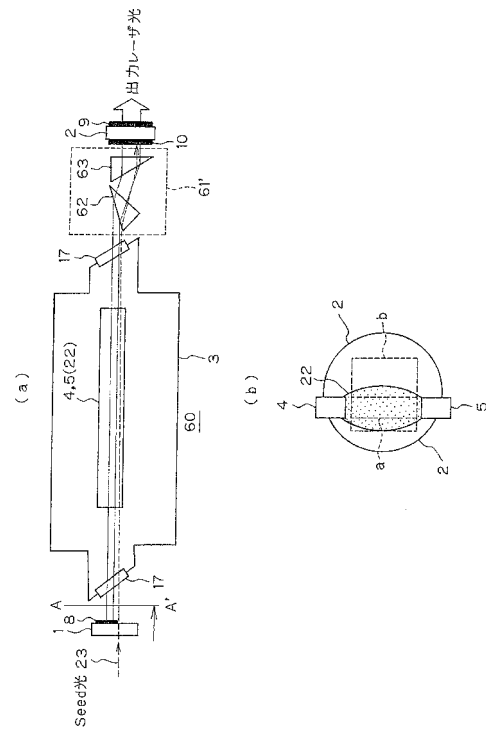
【図2】



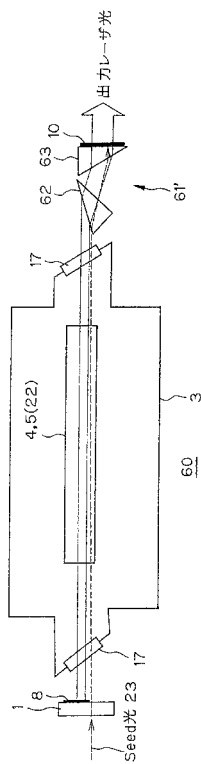
【図 3】



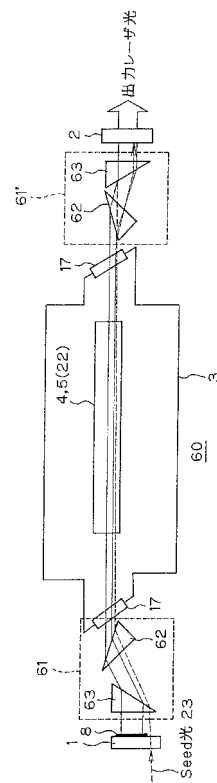
【図 4】



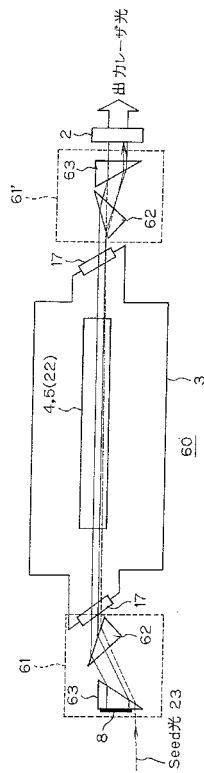
【図 5】



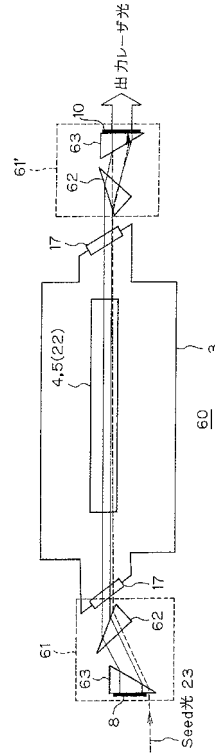
【図 6】



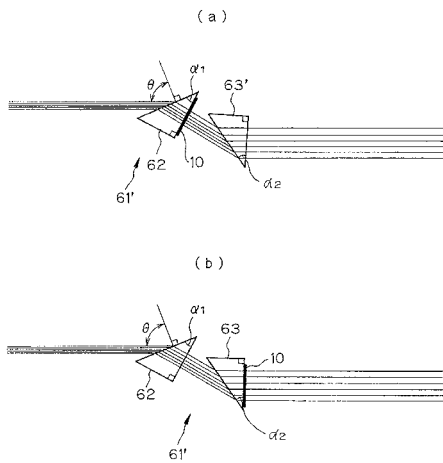
【図 7】



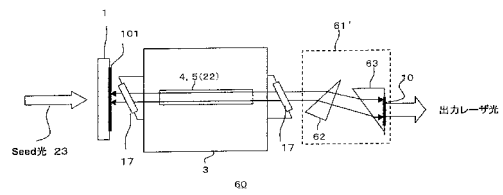
【図 8】



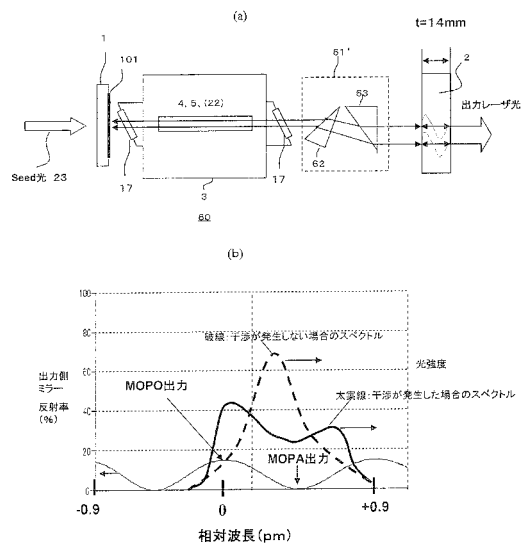
【図 9】



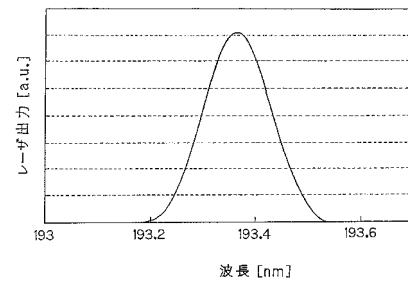
【図 10】



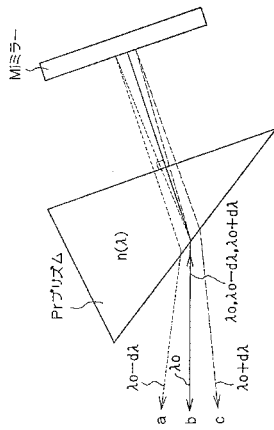
【図 1 1】



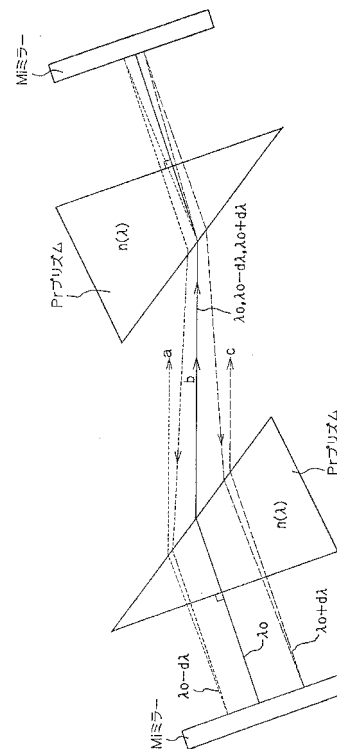
【図 1 2】



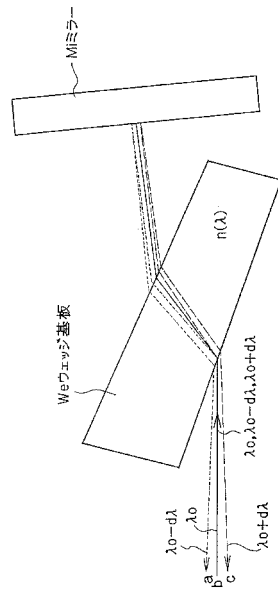
【図 1 3】



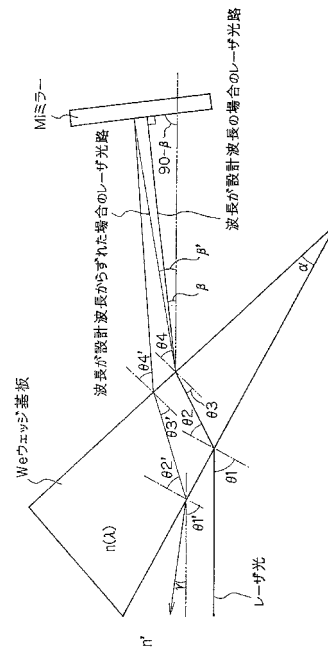
【図 1 4】



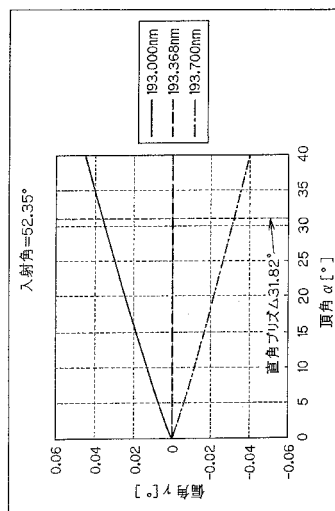
【図15】



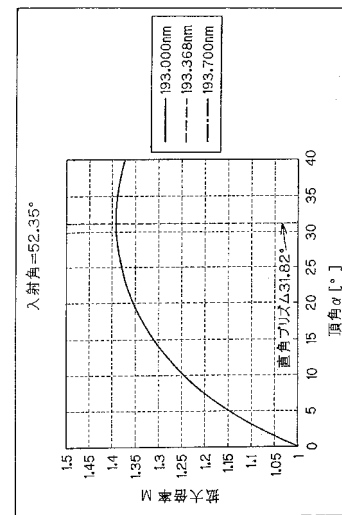
【図16】



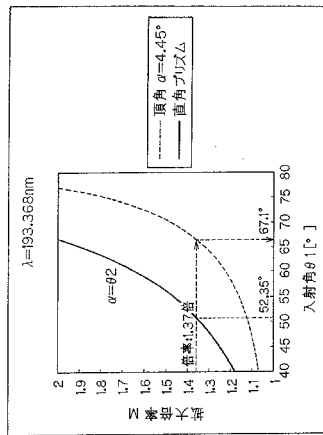
【図17】



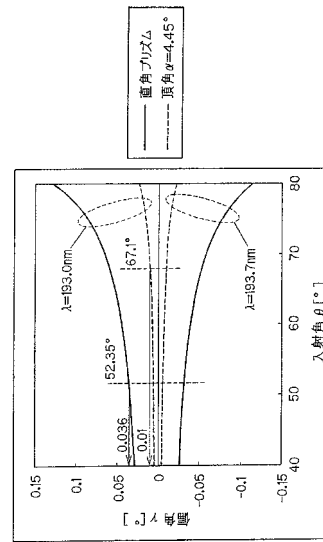
【図18】



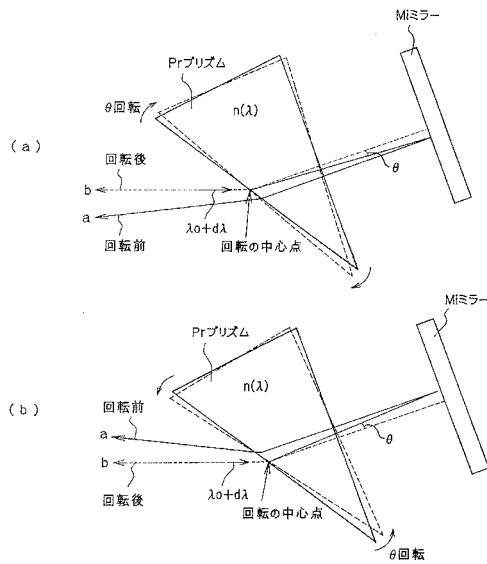
【図19】



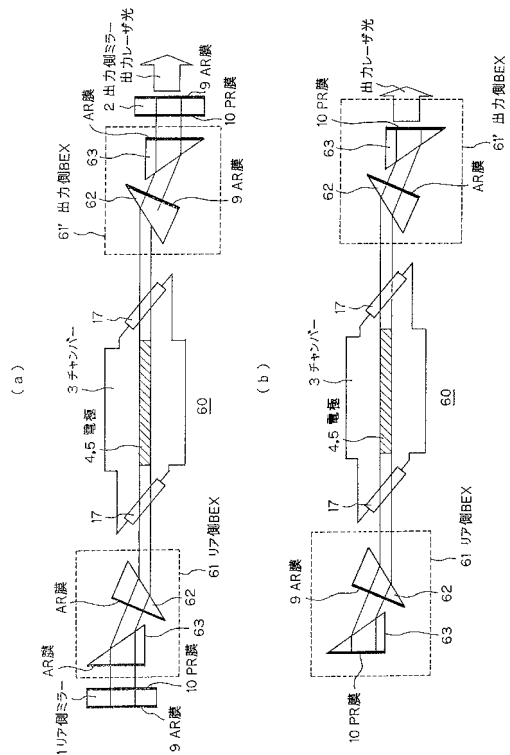
【図20】



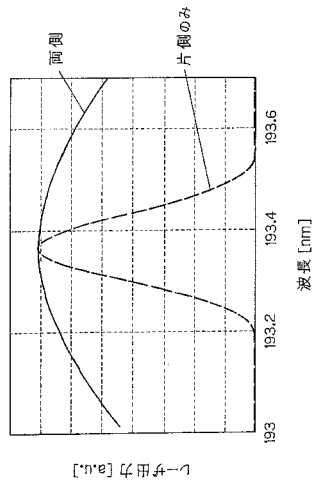
【図21】



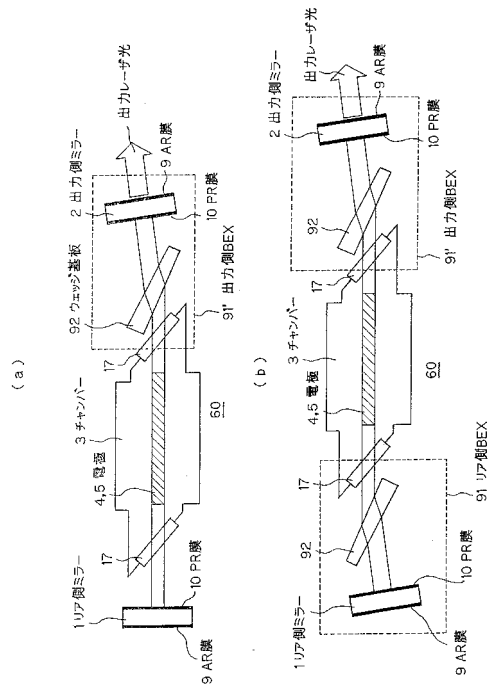
【図22】



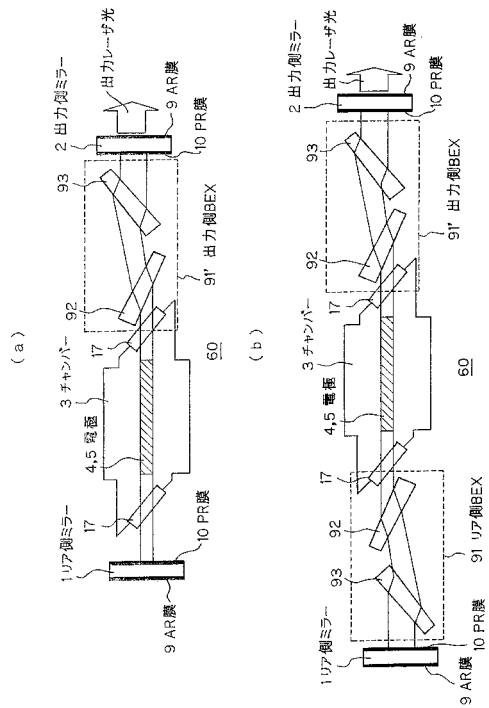
【図 23】



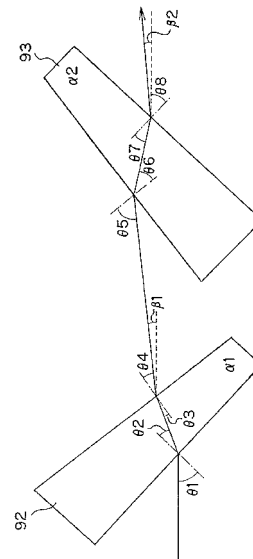
【図 24】



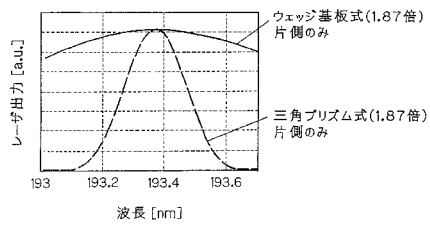
【図 25】



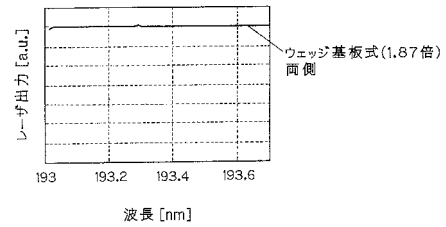
【図 26】



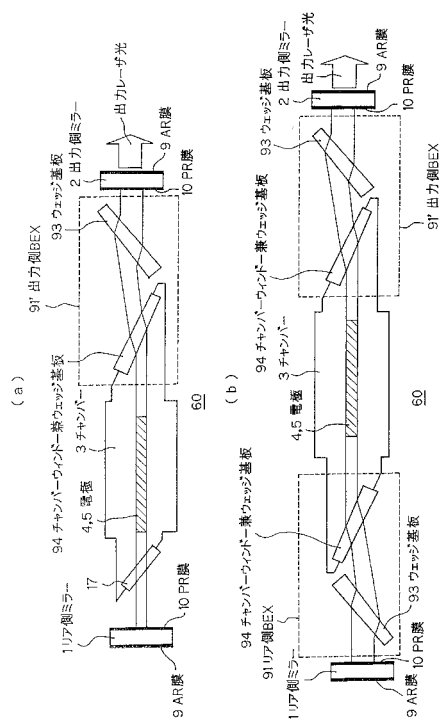
【 図 2 7 】



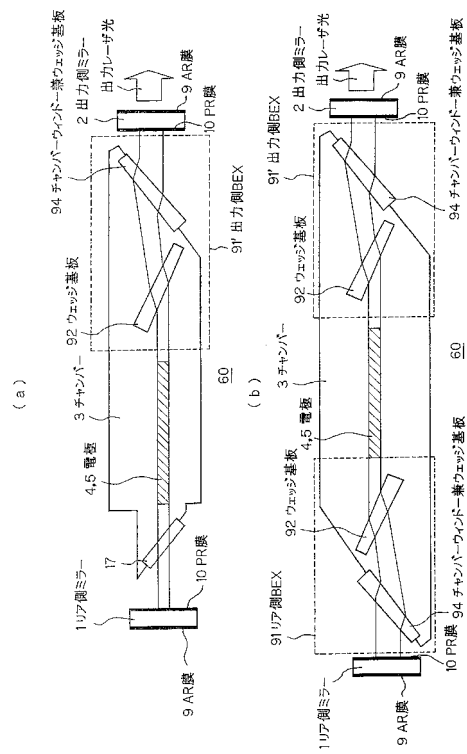
【圖 28】



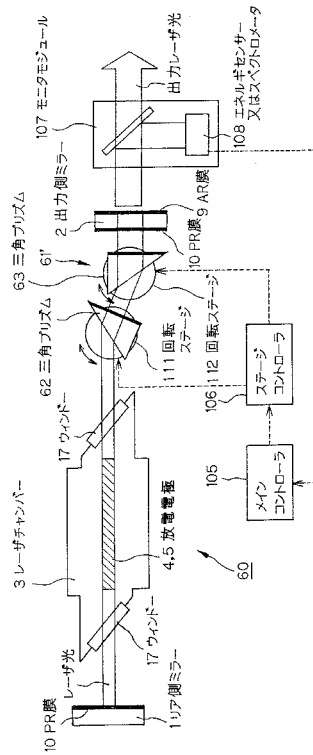
【圖 29】



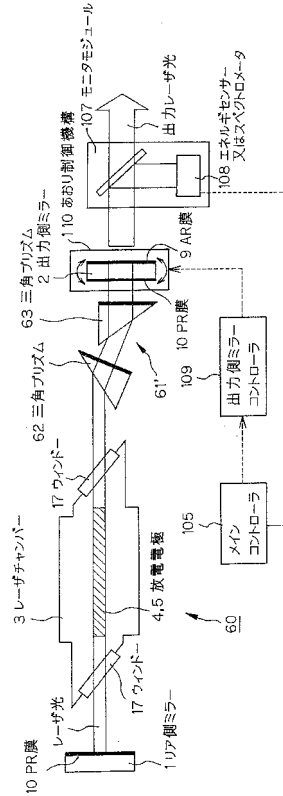
【 図 3 0 】



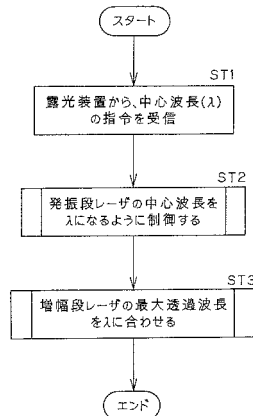
【 図 3 1 】



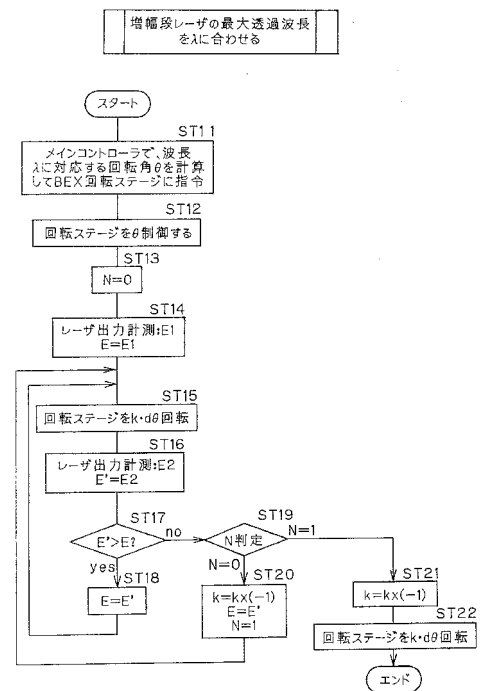
【 図 3 2 】



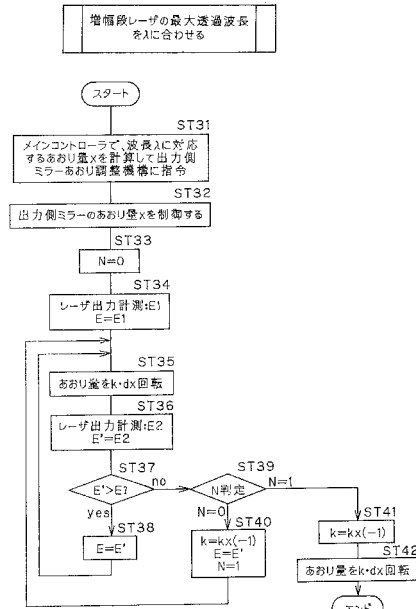
【 図 3 3 】



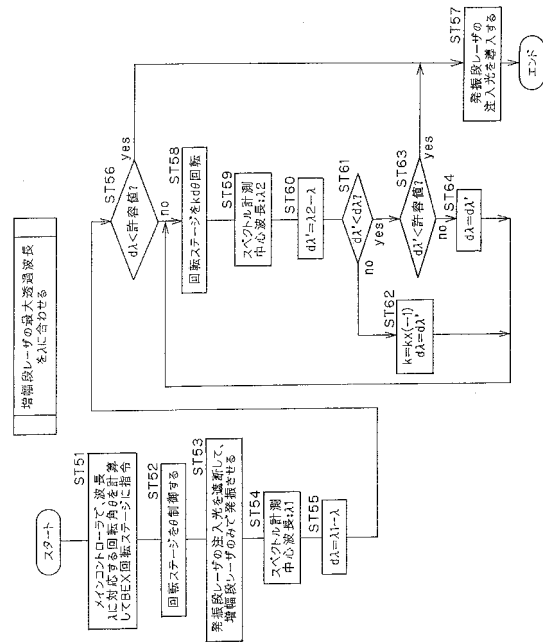
【 図 3 4 】



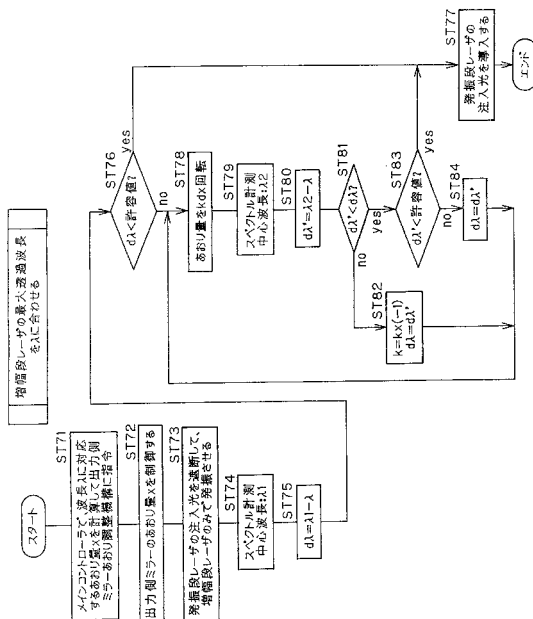
【図 35】



【図 36】



【図 37】



フロントページの続き

- (74)代理人 100092495
弁理士 蛭川 昌信
- (74)代理人 100095120
弁理士 内田 亘彦
- (74)代理人 100095980
弁理士 菅井 英雄
- (74)代理人 100094787
弁理士 青木 健二
- (74)代理人 100091971
弁理士 米澤 明
- (72)発明者 有我 達也
神奈川県平塚市万田 1 2 0 0 株式会社小松製作所内
- (72)発明者 熊崎 貴仁
神奈川県平塚市万田 1 2 0 0 株式会社小松製作所内
- (72)発明者 若林 理
神奈川県平塚市万田 1 2 0 0 株式会社小松製作所内
- (72)発明者 中池 孝昇
栃木県小山市横倉新田 4 0 0 株式会社小松製作所内
- (72)発明者 永井 伸治
栃木県小山市横倉新田 4 0 0 株式会社小松製作所内

審査官 杉山 輝和

- (56)参考文献 特開 2 0 0 3 - 1 9 8 0 2 0 (J P , A)
特開平 1 1 - 3 3 0 5 9 2 (J P , A)
特開平 0 4 - 3 0 1 6 1 3 (J P , A)
特開 2 0 0 1 - 2 9 1 9 2 1 (J P , A)
特開 2 0 0 1 - 2 9 8 2 3 4 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H 0 1 S 3 / 1 3 4
H 0 1 S 3 / 2 3