

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5474576号  
(P5474576)

(45) 発行日 平成26年4月16日 (2014. 4. 16)

(24) 登録日 平成26年2月14日 (2014. 2. 14)

(51) Int. Cl.		F I
HO 1 S 3/13	(2006. 01)	HO 1 S 3/13
HO 1 S 3/23	(2006. 01)	HO 1 S 3/23

請求項の数 14 (全 30 頁)

(21) 出願番号	特願2010-1421 (P2010-1421)	(73) 特許権者	300073919
(22) 出願日	平成22年1月6日 (2010. 1. 6)		ギガフォトン株式会社
(65) 公開番号	特開2010-186990 (P2010-186990A)		栃木県小山市大字横倉新田400番地
(43) 公開日	平成22年8月26日 (2010. 8. 26)	(74) 代理人	100110777
審査請求日	平成24年11月15日 (2012. 11. 15)		弁理士 宇都宮 正明
(31) 優先権主張番号	特願2009-5771 (P2009-5771)	(74) 代理人	100100413
(32) 優先日	平成21年1月14日 (2009. 1. 14)		弁理士 渡部 温
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(74) 代理人	100110858
			弁理士 柳瀬 睦肇
(出願人による申告) 平成20年度 独立行政法人新エ		(72) 発明者	クリストフ ノバック
ネルギー・産業技術総合開発機構「極端紫外線 (EUV)			栃木県小山市横倉新田400 株式会社小
露光システムの基盤技術開発」に関する委託研究、産			松製作所 研究本部内
業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願		(72) 発明者	守屋 正人
			栃木県小山市横倉新田400 株式会社小
			松製作所 研究本部内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザ光増幅器及びそれを用いたレーザ装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

レーザ媒体を収納する容器と、

前記レーザ媒体中で放電を行うことにより前記レーザ媒体中にレーザ光の増幅領域を形成する1対の電極と、

互いに共役な第1の点と第2の点との間の光路中に前記増幅領域が配置され、前記第1の点に入射するレーザ光が前記増幅領域中を少なくとも2回通過しながら増幅されて前記第2の点に転写されるように、レーザ光が入射する前記第1の点とレーザ光が出力される前記第2の点との間の光路を形成する光学システムと、  
を具備するレーザ光増幅器。

【請求項2】

前記容器に、レーザ光が入射する第1のウインドウとレーザ光が出力される第2のウインドウとが設けられており、レーザ光が入射する前記第1の点、前記第1のウインドウの近傍に位置し、レーザ光が出力される前記第2の点、前記第2のウインドウの近傍に位置する、請求項1記載のレーザ光増幅器。

【請求項3】

前記容器が、レーザ媒体を収納するチャンバを含み、前記1対の電極が、前記チャンバ内のレーザ媒体を挟むように配置され、高周波電圧が印加されて前記レーザ媒体中で放電を行うことにより前記レーザ媒体を励起してレーザ光を増幅する1対の平板電極を含み、前記レーザ光増幅器が、スラブ型レーザ光増幅器を構成する、請求項1又は2記載のレー

ザ光増幅器。

【請求項 4】

前記光学システムが、平面ミラーと凹面ミラーとの組合せ、2つの凹面ミラーの組合せ、凹面ミラーと凸面ミラーとの組合せの内の1つを含む、請求項1～3のいずれか1項記載のレーザ光増幅器。

【請求項 5】

前記光学システムが、前記第1の点に入射するレーザ光の転写像を、前記第1の点と前記第2の点との間の光路中で少なくとも1回結像させた後、前記第2の点において再び結像させる、請求項1～4のいずれか1項記載のレーザ光増幅器。

【請求項 6】

前記第1の点と前記第2の点との間の光路中に配置された可飽和吸収体をさらに具備する、請求項1～5のいずれか1項記載のレーザ光増幅器。

【請求項 7】

前記容器が、レーザ光の光路が形成された放電管を含み、前記1対の電極が、高周波電圧が印加されて前記放電管の光路に流れるレーザ媒体中で放電を行うことにより前記レーザ媒体を励起してレーザ光を増幅し、前記レーザ光増幅器が、高速軸流型レーザ光増幅器を構成する、請求項1又は2記載のレーザ光増幅器。

【請求項 8】

前記光学システムの転写倍率が略1である、請求項1～7のいずれか1項記載のレーザ光増幅器。

【請求項 9】

前記レーザ媒体が、二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )を含有する $\text{CO}_2$ レーザガスを含む、請求項1～8のいずれか1項記載のレーザ光増幅器。

【請求項 10】

パルスレーザ光を発生するマスターオシレータと、

請求項1～9のいずれか1項記載のレーザ光増幅器を含み、前記マスターオシレータから前記レーザ光増幅器の前記第1の点に入射するパルスレーザ光を増幅して、増幅されたパルスレーザ光を前記レーザ光増幅器の前記第2の点から出力するブリアンプと、

前記ブリアンプから出力されるパルスレーザ光のサイズ及び広がり角度を調節する第1のリレー光学系と、

少なくとも1つのレーザ光増幅器を含み、前記ブリアンプから前記第1のリレー光学系を介して供給されるパルスレーザ光を増幅するメインアンプと、

前記メインアンプから出力されるパルスレーザ光をコリメートして、平行光を出力する第2のリレー光学系と、  
を具備するレーザ装置。

【請求項 11】

前記メインアンプが、

レーザ媒体を収納する容器と、

前記レーザ媒体中で放電を行うことにより前記レーザ媒体中にレーザ光の増幅領域を形成する1対の電極と、

互いに共役な第3の点と第4の点との間の光路中に前記増幅領域が配置され、前記第3の点に入射するレーザ光が前記増幅領域中を少なくとも2回通過しながら増幅されて前記第4の点に転写されるように、レーザ光が入射する前記第3の点とレーザ光が出力される前記第4の点との間の光路を形成する光学システムと、  
を有するレーザ光増幅器を含む、請求項10記載のレーザ装置。

【請求項 12】

前記第1のリレー光学系が、前記ブリアンプに含まれている前記レーザ光増幅器の前記第2の点から出力されるパルスレーザ光を、前記メインアンプに含まれている前記レーザ光増幅器の前記第3の点に転写する、請求項11記載のレーザ装置。

【請求項 13】

10

20

30

40

50

前記プリアンプが、直列接続された複数のレーザ光増幅器を含む、請求項 10 ~ 12 のいずれか 1 項記載のレーザ装置。

【請求項 14】

前記メインアンプが、直列接続された複数のレーザ光増幅器を含む、請求項 10 ~ 13 のいずれか 1 項記載のレーザ装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、シードレーザ光を増幅するレーザ光増幅器、及び、そのようなレーザ光増幅器を用いたレーザ装置に関し、特に、極端紫外（EUV）光源装置においてターゲット物質にレーザ光を照射してターゲット物質をプラズマ化するドライバレーザ装置に関する。

10

【背景技術】

【0002】

近年、半導体プロセスの微細化に伴って光リソグラフィにおける微細化が急速に進展しており、次世代においては、60nm ~ 45nmの微細加工、さらには32nm以下の微細加工が要求されるようになる。そのため、例えば、波長13nm程度のEUV光を発生するEUV光源と縮小投影反射光学系（reduced projection reflective optics）とを組み合わせた露光装置の開発が期待されている。

【0003】

EUV光源として、ターゲットにレーザ光を照射することによって生成されるプラズマを用いたLPP（laser produced plasma：レーザ生成プラズマ）光源（以下において、「LPP式EUV光源装置」ともいう）がある。LPP式EUV光源装置は、真空チャンバ内に供給されたターゲット物質、例えば、スズ（Sn）に、ドライバレーザ光を照射することにより、ターゲット物質を励起してプラズマを生成する。生成されたプラズマからは、EUV光を含む様々な波長成分が放射されるので、その内の所望のEUV成分が、集光ミラー（EUV集光ミラー）を用いて選択的に反射集光され、EUV光を利用する露光機等の機器に出力される。

20

【0004】

EUV光源には100Wを超える出力が要求されており、例えば、炭酸ガス（CO<sub>2</sub>）レーザ装置とスズ（Sn）ターゲットを用いて比較的高効率にEUV光を発生するEUV光源であっても、産業用途に用いるためには、プラズマ生成用のドライバレーザ光を出力するCO<sub>2</sub>レーザ装置の高効率化が要求される。

30

【0005】

プラズマ生成用のドライバレーザ光としてはパルスレーザ光が使われるので、ドライバレーザ装置として用いられる発振増幅型レーザは、例えば、短パルスCO<sub>2</sub>レーザ光を発生するレーザ発振器と、短パルスCO<sub>2</sub>レーザ光を増幅するレーザ光増幅器とを含んでいる。

【0006】

レーザ光増幅器は、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）、窒素（N<sub>2</sub>）、ヘリウム（He）、さらに、必要に応じて、水素（H<sub>2</sub>）、一酸化炭素（CO）、キセノン（Xe）等を含有するCO<sub>2</sub>レーザガスを放電によって励起する放電装置を有している。レーザ発振器によって発生されたシードレーザ光は、レーザ光増幅器において、所望のエネルギーを有するレーザ光に増幅される。増幅されたレーザ光は、レーザ集光光学系によって集光されて、錫（Sn）やキセノン（Xe）等のターゲット物質に照射される。

40

【0007】

特許文献1には、マルチパス増幅を行う再生増幅器レーザアレイが開示されている。図26は、特許文献1に開示されたレーザ光増幅器を示す図である。図26に示すレーザ光増幅器は、入射したシードレーザ光がレーザ媒体中を複数回往復するようにしたマルチパス方式を採用するため、レーザ媒体のエネルギーを効率よく利用して大きな増幅率を達成することができる。したがって、このレーザ光増幅器を組み込んだドライバレーザ装置の

50

小型化が可能である。

【 0 0 0 8 】

図 2 6 に示すマルチパス増幅型レーザ光増幅器においては、増幅効率を高めるために、放電領域内におけるシードレーザ光の光路を長くすることが必要となる。そこで、シードレーザ光をリアミラーとフロントミラーとにより多数回反射して、放電領域内におけるレーザ光の光路を長くするように光学システムが構成される。

【 0 0 0 9 】

しかしながら、従来のマルチパス増幅型レーザ光増幅器においては光路長が十 m にも及ぶため、図 2 7 に示すように、入射位置におけるシードレーザ光の光軸が基準の光軸に対して僅かにずれたとしても、シードレーザ光が反射及び増幅される間に光軸の誤差（所望の光軸とずれた光軸との差）が増大する。その結果、増幅後のレーザ光の光軸が大きくずれることによって、レーザ光の増幅が効率良く行われないうえに、増幅後の出力が低下していた。光軸がさらに大きくずれた場合には、図 2 7 に点線で示すように、レーザ光が出力ウインドウから外れてレーザ光増幅器から出力されなくなることがあった。

【 0 0 1 0 】

したがって、以下の理由で、マルチパス増幅型レーザ光増幅器を用いたレーザ装置の構成は極めて難しかった。（１）レーザ光増幅器をシードレーザ光の光路中に適正に配置することが困難である。（２）配置されたレーザ光増幅器に正しくシードレーザ光を導くことが困難である。（３）レーザ装置全体の光学的アライメントを正確に行うことが困難である。また、レーザ装置の構成を適正に行ったとしても、僅かな入射位置又は入射角度のずれにより、レーザ光増幅器内の光路が基準の光路と大きくずれてしまう。そのため、放電領域におけるエネルギー利用効率が低下したり、増幅状態が不安定になっていた。その結果、増幅後のレーザ光の集光点の位置精度及び集光性能が悪化していた。さらに、マルチパス増幅型レーザ光増幅器を E U V 光源装置のドライバレーザ装置において使用した場合には、以下の問題点が発生していた。即ち、ドライバレーザ光の集光点の位置が大きくずれた場合には、ターゲット物質にレーザ光を照射できずに、E U V 光が発生しないことが起こり、たとえターゲット物質にレーザ光を照射できたとしても、E U V 光のエネルギー及びエネルギーの安定性が低下していた。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 1 1 】

【 特許文献 1 】 米国特許第 5 3 8 6 4 3 1 号明細書

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 1 2 】

そこで、本発明の目的は、光軸の安定性が高いレーザ光増幅器を提供することである。本発明のさらなる目的は、光軸の安定性が高いレーザ光増幅器を組み込んでアライメントを容易にすると共に、安定した増幅パルスレーザ光を出力するレーザ装置、特に、E U V 光源装置においてターゲット物質にレーザ光を照射してターゲット物質をプラズマ化するドライバレーザ装置を提供することである。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 3 】

上記課題を解決するため、本発明の 1 つの観点によるレーザ光増幅器は、レーザ媒体を収納する容器と、レーザ媒体中で放電を行うことによりレーザ媒体中にレーザ光の増幅領域を形成する 1 対の電極と、互いに共役な第 1 の点と第 2 の点との間の光路中に増幅領域が配置され、上記第 1 の点に入射するレーザ光が増幅領域中を少なくとも 2 回通過しながら増幅されて上記第 2 の点に転写されるように、レーザ光が入射する上記第 1 の点とレーザ光が出力される上記第 2 の点との間の光路を形成する光学システムとを具備する。

【 0 0 1 4 】

また、本発明の 1 つの観点によるレーザ装置は、パルスレーザ光を発生するマスターオ

10

20

30

40

50

シレータと、本発明に係るレーザ光増幅器を含み、マスターオシレータからレーザ光増幅器の上記第1の点に入射するパルスレーザ光を増幅して、増幅されたパルスレーザ光をレーザ光増幅器の上記第2の点から出力するプリアンプと、プリアンプから出力されるパルスレーザ光のサイズ及び広がり角度を調節する第1のリレー光学系と、少なくとも1つのレーザ光増幅器を含み、プリアンプから第1のリレー光学系を介して供給されるパルスレーザ光を増幅するメインアンプと、メインアンプから出力されるパルスレーザ光をコリメートして、平行光を出力する第2のリレー光学系とを具備する。

#### 【発明の効果】

##### 【0015】

10

本発明に係るレーザ光増幅器においては、互いに共役な第1の点と第2の点との間の光路中に増幅領域が配置され、第1の点に入射するレーザ光が増幅領域中を少なくとも2回通過しながら増幅されて第2の点に転写されるように、レーザ光が入射する第1の点とレーザ光が出力される第2の点との間の光路が形成される。したがって、第1の点に入射するレーザ光の像が第2の点に転写されて転写像が結像されるので、光軸の安定性が高いレーザ光増幅器を提供することができる。

##### 【0016】

また、レーザ光増幅器において、光軸の誤差が大きく拡大することなく、入射位置における基準光路に対するレーザ光の位置及び入射角度の誤差が出射位置においてもほぼ同様となるので、レーザ装置全体において、基準光路に対する光軸の誤差が抑制され、エネルギー利用効率が低下しない。レーザ光増幅器と他の光学系との光学的調整を行う場合にも、第1の点と第2の点を光軸の基準として使用することによって、光学的調整を簡単かつ正確に行うことができる。したがって、本発明に係るレーザ装置から出力される高い光強度の増幅パルスレーザ光をLPP式EUV光源装置のプラズマ発光点に集光することにより、高い効率でEUV光を発生させ、かつ、EUV光のエネルギーの安定性を向上させることができる。

20

#### 【図面の簡単な説明】

##### 【0017】

【図1】本発明の第1の実施形態に係るレーザ光増幅器の構成を示す図である。

【図2】図1に示すレーザ光増幅器のチャンバ内部の構造を示す斜視図である。

30

【図3】第1の実施形態の変形例に係るレーザ光増幅器のチャンバ内部の構造を示す斜視図である。

【図4】図3に示すレーザ光増幅器の動作を説明するための正面図である。

【図5】本発明の第2の実施形態に係るレーザ光増幅器の構成を示す図である。

【図6】本発明の第2の実施形態が適用される高速軸流型レーザ光増幅器の構造を示す斜視図である。

【図7】図6に示す高速軸流型レーザ光増幅器の電極を示す図である。

【図8】図6に示す高速軸流型レーザ光増幅器の電極の変形例を示す図である。

【図9】本発明の第2の実施形態が適用される3軸直交型レーザ光増幅器の構造を示す側面図である。

40

【図10】図9に示す3軸直交型レーザ光増幅器のA-A断面を示す断面図である。

【図11】第2の実施形態の変形例に係るレーザ光増幅器の構成を示す図である。

【図12】第1の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。

【図13】光学システムにおいて反射光学素子を透過光学素子に置き換えて第1の実施例に係るレーザ光増幅器の動作を説明するための図である。

【図14】第2の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。

【図15】光学システムにおいて反射光学素子を透過光学素子に置き換えて第2の実施例に係るレーザ光増幅器の動作を説明するための図である。

【図16】第3の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。

【図17】光学システムにおいて反射光学素子を透過光学素子に置き換えて第3の実施例

50

に係るレーザ光増幅器の動作を説明するための図である。

【図 18】第 4 の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。

【図 19】光学システムにおいて反射光学素子を透過光学素子に置き換えて透過光学素子を直列に展開することにより第 4 の実施例に係るレーザ光増幅器の動作を説明するための図である。

【図 20】第 5 の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。

【図 21】光学システムにおいて反射光学素子を透過光学素子に置き換えて透過光学素子を直列に展開することにより第 5 の実施例に係るレーザ光増幅器の動作を説明するための図である。

【図 22】第 6 の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。

【図 23】本発明の第 3 の実施形態に係るドライバレーザ装置を用いた E U V 光源装置の構成を示す図である。

【図 24】本発明の第 4 の実施形態に係るドライバレーザ装置を用いた E U V 光源装置の構成を示す図である。

【図 25】本発明の第 5 の実施形態に係るドライバレーザ装置を用いた E U V 光源装置の構成を示す図である。

【図 26】従来のマルチパス増幅型レーザ光増幅器を示す図である。

【図 27】従来のマルチパス増幅型レーザ光増幅器における問題を説明するための図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、本発明の実施形態について、図面を参照しながら詳しく説明する。なお、同一の構成要素には同一の参照符号を付して、説明を省略する。

(実施形態 1)

図 1 は、本発明の第 1 の実施形態に係るレーザ光増幅器の構成を示す図であり、本発明の原理を分かりやすく説明するために、本発明をスラブ型レーザ光増幅器に適用した場合を示している。

【0019】

図 1 に示すように、第 1 の実施形態に係るレーザ光増幅器は、レーザ媒体を収納する容器であるチャンバ 21 と、レーザ媒体中で放電を行うことによりレーザ媒体中にレーザ光の増幅領域 30 を形成する 1 対の電極と、増幅領域 30 を挟んで対向設置された 1 対の折返しミラー 37 及び 38 を含む光学システムとを有しており、マルチパス増幅を行う。チャンバ 21 には、レーザ光が入射する入射ウインドウ 33 とレーザ光が出力される出射ウインドウ 36 とが設けられている。レーザ媒体としては、例えば、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ )、窒素 ( $\text{N}_2$ )、ヘリウム ( $\text{He}$ )、さらに、必要に応じて、水素 ( $\text{H}_2$ )、一酸化炭素 ( $\text{CO}$ )、キセノン ( $\text{Xe}$ ) 等を含む  $\text{CO}_2$  レーザガスが用いられる。

【0020】

図 2 は、図 1 に示すレーザ光増幅器のチャンバ内部の構造を示す斜視図である。図 2 に示すように、1 対の平板電極 22 及び 23 が、チャンバ内に封入されたレーザ媒体を挟むように配置されている。高周波 (RF) 電源 24 が高周波電圧を平板電極 22 と平板電極 23 との間に印加すると、平板電極 22 及び 23 が高周波電界を発生してレーザ媒体中で高周波放電を行う。これにより、レーザ媒体が励起されて、入射ウインドウ 33 を介してチャンバ内に入射するシードレーザ光 (入射ビーム) が増幅される。シードレーザ光は、増幅されながら折返しミラー 37 及び 38 によって反射されて、出射ウインドウ 36 からチャンバの外部に出射ビームとして出力される。

【0021】

ここで、レーザ光の増幅領域は、平板電極 22 と平板電極 23 との間に挟まれた放電領域である。平板電極 22 と平板電極 23 との間に高周波電圧を印加することにより、チャンバ 21 内に充填されたレーザ媒体の中で平板電極 22 と平板電極 23 との間に挟まれた部分が励起され、スラブ型の放電領域が形成される。平板電極 22 と平板電極 23 との間

10

20

30

40

50

のギャップは0.5mm~2mm程度であり、放電領域の断面は薄型の長方形の形状を有している。平板電極22及び23とレーザ媒体を冷却するために、平板電極22及び23には冷却水が供給される。

【0022】

再び図1を参照すると、折返しミラー37及び38は、集光能力を有しレーザ光を高反射する凹面HR（高反射）ミラーであり、増幅領域30を挟んで互いに対向するように配置される。例えば、折返しミラー37及び38は、反射面の中心と曲率中心とを結ぶ線が互いに平行な状態で、図1における上下方向に僅かにずれて配置される。これにより、入射ビームが折返しミラー38の脇を通過して折返しミラー37に入射し、出射ビームが折返しミラー37の脇を通過して出力される。

10

【0023】

レーザ光増幅器に入射するシードレーザ光は、図1において実線で示す基準光路40に沿って、入射ウインドウ33を透過してチャンバ21内に入射し、入射ビーム位置34を通過する。入射ビーム位置34は、予め定められた光路上の第1の点である。入射ビーム位置（第1の点）34を通過したシードレーザ光は、増幅領域30を通過して増幅され、折返しミラー37に入射して高反射率で反射され、再び増幅領域30を通過して増幅され、対向配置された折返しミラー38によって高反射率で反射される。

【0024】

折返しミラー38によって反射されたレーザ光は、再び増幅領域30を通過して増幅され、再度折返しミラー37によって反射され、増幅領域30を通過して増幅され、折返しミラー38によって反射され、出射ウインドウ36を透過してレーザ光増幅器から出力される。その際に、第1の点34における入射ビームの像が、基準光路40が折返しミラー37の脇を通過する付近に予め定められた第2の点35に転写されて、入射ビーム転写像が結像される。

20

【0025】

このように、折返しミラー37及び38を含む光学システムは、互いに共役な第1の点34と第2の点35との間の光路中に増幅領域30が配置され、第1の点34に入射するレーザ光が増幅領域30中を少なくとも2回通過しながら増幅されて第2の点35に転写されるように、レーザ光が入射する第1の点34とレーザ光が出力される第2の点35との間の光路を形成する。ここで、レーザ光が入射する第1の点34は、入射ウインドウ33の近傍に位置し、レーザ光が出力される第2の点35は、出射ウインドウ36の近傍に位置することが望ましい。

30

【0026】

第1の点34の位置に物体を置いたと仮定した場合に、第1の点34と第2の点35は、折返しミラー37及び38で構成される光学システムの物点と像点に相当し、折返しミラー37及び38の集光能力と空間配置関係とに基づいて定められる。第1の点34と第2の点の位置を予め定めることにより、これに対応するように、折返しミラー37及び38の曲率半径R及び配置を決定することができる。

【0027】

図1において、点線で示す光路41は、レーザ光増幅器に入射するシードレーザ光の光軸（位置及び／又は進行方向）が基準光路40からずれた場合の光路である。上記のように第1の点34と第2の点35が定められた光学システムを用いる場合には、シードレーザ光の光軸が基準光路40からずれたときでも、第1の点34における入射ビームの像が第2の点35に転写される関係から、入射ビームと第1の点34との位置関係が、出射ビームと第2の点35との位置関係において再現されるので、増幅レーザ光の光軸が基準光路40と大きく乖離することはない。

40

【0028】

このように、本実施形態に係るレーザ光増幅器においては、入射ビームの光軸が基準光路40に対して多少の誤差を有していても、出射ビームの光軸は、基準光路40に対して入射位置における誤差と同等の誤差しか持たない。そのため、光軸の安定性が向上する上

50

、増幅効率にも大きな変動が無く、シードレーザ光を安定に増幅することができる。その結果、集光点の位置及び集光形状が安定する。

【 0 0 2 9 】

特に、入射ビーム転写像の転写倍率は、略 1 であることが望ましい。転写倍率が 1 であれば、第 1 の点 3 4 における入射ビームの位置が基準光路 4 0 に対して誤差を有する場合でも、第 2 の点 3 5 における出射ビームの位置は基準光路 4 0 に対して略同一の誤差しか有さない。即ち、第 1 の点 3 4 における 1 mm の位置誤差は、第 2 の点 3 5 においても 1 mm の位置誤差しか生じさせない。

【 0 0 3 0 】

また、第 1 の点 3 4 における入射ビームの角度が基準光路 4 0 に対して誤差を有する場合でも、第 2 の点 3 5 における出射ビームの角度は基準光路 4 0 に対して略同一の誤差しか有さない。例えば、10 パスで 30 m の光路長を有するレーザ光増幅器において、入射位置が基準位置で入射角のみ基準光路 4 0 に対して 1 m R a d の誤差を有する場合を想定すると、出射位置は基準光路 4 0 に対して約 30 mm の位置誤差を有することになる。これに対して、本実施形態に係るレーザ光増幅器においては、出射ビームが基準光路 4 0 上の第 2 の点 3 5 を必ず通り、出射角度が基準光路 4 0 に対して 1 m R a d だけの誤差を有する出射ビームが出力される。

【 0 0 3 1 】

このように、本実施形態に係るレーザ光増幅器は、光軸の安定化に大きな効果を奏する。また、増幅領域 3 0 におけるレーザ光の光路が、設計された基準光路 4 0 と大きなずれを生じないので、レーザ媒体に蓄えられたエネルギーの利用効率も低下しない。

【 0 0 3 2 】

さらに、光軸上の上流あるいは下流に他の光学要素を接続する場合にも、第 1 の点 3 4 と第 2 の点 3 5 を基準として光学的接続を行えば、レーザ装置全体の光軸安定を図ることができる。例えば、マスターオシレータによって生成されるシードレーザ光をレーザ光増幅器の入射ビームとして入射する場合には、シードレーザ光の光軸が第 1 の点 3 4 を通過するようにマスターオシレータとレーザ光増幅器との間の位置関係及び角度関係を調整することにより、レーザ光増幅器から出力されるレーザ光のアライメントが容易に調整できる。また、レーザ光増幅器から出力されるレーザ光をリレーするリレー光学系を設置する場合には、第 2 の点 3 5 を通過する光軸を有するレーザ光がリレー光学系に入射するようにレーザ光増幅器とリレー光学系との間の位置関係及び角度関係を調整することにより、レーザ装置全体の光軸安定を得ることができる。

【 0 0 3 3 】

レーザ光増幅器において、第 1 の点 3 4 と第 2 の点 3 5 とは、物点と像点の関係にあって互いに共役なので、レーザ光増幅器の入力と出力とを入れ替えて使用しても、転写倍率が 1 であれば光学的に等価である。

【 0 0 3 4 】

本実施形態においては、説明を簡単にするために、1 対の折り返しミラー 3 7 及び 3 8 の間に増幅領域 3 0 が配置される構成を説明したが、本発明はこの構成に限定されることなく、第 1 の点 3 4 と第 2 の点 3 5 とが互いに共役であり、第 1 の点 3 4 に入射するレーザ光が増幅領域 3 0 中を少なくとも 2 回通過しながら増幅されて第 2 の点 3 5 に転写される光学システムが設けられていればよい。

【 0 0 3 5 】

図 3 は、第 1 の実施形態の変形例に係るレーザ光増幅器のチャンバ内部の構造を示す斜視図であり、本発明を同軸スラブ型レーザ光増幅器に適用した場合を示している。

図 3 に示すように、第 1 の実施形態の変形例に係るレーザ光増幅器は、レーザ媒体が封入されたチャンバ内に、レーザ媒体中で放電を行うことによりレーザ媒体中にレーザ光の増幅領域を形成する 1 対の円筒電極 2 2 a 及び 2 3 a と、増幅領域を挟んで対向設置された第 1 群の折返しミラー 3 7 a 及び第 2 群の折返しミラー 3 8 a を含む光学システムとを有しており、マルチパス増幅を行う。チャンバには、レーザ光が入射する入射ウインドウ

10

20

30

40

50

３３aとレーザ光が出力される出射ウインドウ３６aとが設けられている。

【００３６】

図４は、図３に示すレーザ光増幅器の動作を説明するための正面図である。図４に示すように、１対の円筒電極２２a及び２３aが、同軸状に配置されている。高周波（RF）電源２４aが高周波電圧を円筒電極２２aと円筒電極２３aとの間に印加すると、円筒電極２２a及び２３aが高周波電界を発生してレーザ媒体中で高周波放電を行う。これにより、レーザ媒体が励起されて、入射ウインドウ３３aに入射するシードレーザ光（入射ビーム）が増幅される。シードレーザ光は、増幅されながら折返しミラー３７a及び３８aによって順次反射されて、出射ウインドウ３６aからチャンバの外部に出射ビームとして出力される。

10

【００３７】

第１の実施形態の変形例においても、折返しミラー３７a及び３８aを含む光学システムは、互いに共役な第１の点３４aと第２の点３５aとの間の光路中に増幅領域が配置され、第１の点３４aに入射するレーザ光が増幅領域中を少なくとも２回通過しながら増幅されて第２の点３５aに転写されるように、レーザ光が入射する第１の点３４aとレーザ光が出力される第２の点３５aとの間の光路を形成する。ここで、レーザ光が入射する第１の点３４aは、入射ウインドウ３３aの近傍に位置し、レーザ光が出力される第２の点３５aは、出射ウインドウ３６aの近傍に位置することが望ましい。

【００３８】

（実施形態２）

20

図５は、本発明の第２の実施形態に係るレーザ光増幅器の構成を示す図であり、本発明をダブルパス増幅型レーザ光増幅器に適用した場合を示している。

図５に示すように、第２の実施形態に係るレーザ光増幅器は、レーザ媒体を収納する放電管２５と、レーザ媒体中で放電を行うことによりレーザ媒体中にレーザ光の増幅領域３０を形成する１対の電極と、増幅領域３０を挟んで対向設置された凹面HRミラー３７及びHRミラープリズム４３を含む光学システムと、自励発振や寄生発振を抑制する６フッ化硫黄（SF<sub>6</sub>）ガスセル等の可飽和吸収体３１とを含んでいる。

【００３９】

HRミラープリズム４３の反射面４４及び４５には、レーザ光を高反射する膜がコートされている。放電管２５には、レーザ光が入射する第１のウインドウ４６とレーザ光が出力される第２のウインドウ４７とが設けられている。レーザ媒体としては、例えば、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）、窒素（N<sub>2</sub>）、ヘリウム（He）、さらに、必要に応じて、水素（H<sub>2</sub>）、一酸化炭素（CO）、キセノン（Xe）等を含むCO<sub>2</sub>レーザガスが用いられる。

30

【００４０】

このレーザ光増幅器は、レーザ光に増幅領域３０を１往復させることにより、レーザ光を増幅する。そのようなダブルパス増幅型レーザ光増幅器においては、増幅領域３０を挟んで、集光能力を有する凹面HRミラー３７と、入射ビーム及び出射ビームを反射するためのHRミラープリズム４３とが対向配置されている。このように、凹面HRミラー３７とHRミラープリズム４３とを対向配置させることによって、互いに共役な入射ビーム位置（第１の点）３４と入射ビーム転写像位置（第２の点）３５とを定めることができる。

40

【００４１】

即ち、図５に示したダブルパス増幅型レーザ光増幅器において、入射ビームがHRミラープリズム４３の一方の反射面４４に入射する入射ビーム位置３４と凹面HRミラー３７との間の距離Dを、この凹面HRミラー３７の曲率半径R（焦点距離 $f = R / 2$ ）と略同じにすることにより（ $D \approx R = 2f$ ）、入射ビーム位置（第１の点）３４における入射ビームの像を、出射ビームの光路上において、HRミラープリズム４３の他方の反射面４５上の入射ビーム転写像位置（第２の点）３５に転写して、転写像を結像させることができる。ここで、第１の点３４と第２の点３５とは、物点と像点の関係にあって互いに共役な関係となっている。

50

## 【 0 0 4 2 】

図 5 において、シードレーザ光が、H Rミラープリズム 4 3 の反射面 4 4 に、4 5 度よりも僅かに大きな入射角で入射する。そして、シードレーザ光は、4 5 度よりも僅かに大きな反射角で反射されて、第 1 のウインドウ 4 6 を透過し、増幅領域 3 0 を通過して増幅され、さらに他端の第 2 のウインドウ 4 7 を透過して、自励発振や寄生発振を抑制する可飽和吸収体 3 1 を通過する。

## 【 0 0 4 3 】

吸収体 3 1 を通過したレーザ光は、凹面 H Rミラー 3 7 に 0 度よりも僅かに大きな入射角で入射し、0 度よりも僅かに大きな反射角で反射されて、再び可飽和吸収体 3 1 を通過し、第 2 のウインドウ 4 7 を透過して増幅領域 3 0 を通過することにより、さらに増幅される。そして、増幅されたレーザ光は、再び第 1 のウインドウ 4 6 を透過して、H Rミラープリズム 4 3 の他方の反射面 4 5 に到達して、4 5 度よりも僅かに大きな反射角で反射され、増幅レーザ光として出力される。

10

## 【 0 0 4 4 】

ここで、入射ビーム位置（第 1 の点）3 4 と入射ビーム転写像位置（第 2 の点）3 5 とは、互いに共役の関係にあるので、反射面 4 4 上の入射ビーム位置（第 1 の点）3 4 における入射ビームの像を、反射面 4 5 上の入射ビーム転写像位置（第 2 の点）3 5 に転写して、転写像を結像させることができる。

## 【 0 0 4 5 】

ダブルパス増幅は、高速軸流型レーザ光増幅器や 3 軸直交型レーザ光増幅器に適用することができる。第 2 の実施形態に係るレーザ光増幅器は、増幅断面が狭い形状（円形、正方形、アスペクト比が小さい長方形）を有する増幅器、例えば、管状の増幅器において利用できるという利点がある。

20

## 【 0 0 4 6 】

図 6 は、本発明の第 2 の実施形態が適用される高速軸流型レーザ光増幅器の構造を示す斜視図であり、図 7 は、図 6 に示す高速軸流型レーザ光増幅器の電極を示す図である。図 6 及び図 7 に示すように、1 対の電極 2 2 b 及び 2 3 b が、レーザ媒体が充填された放電管 2 5 を挟むように配置されている。高周波（R F）電源 2 4 b が高周波電圧を電極 2 2 b と電極 2 3 b との間に印加すると、電極 2 2 b 及び 2 3 b が高周波電界を発生してレーザ媒体中で高周波放電を行い、電極 2 2 b と電極 2 3 b との間に放電領域が形成される。

30

## 【 0 0 4 7 】

これにより、レーザ媒体が励起されて、H Rミラープリズム 4 3 によって反射されて第 1 のウインドウ 4 6 を介して放電管 2 5 内に入射するシードレーザ光（入射ビーム）が増幅される。さらに、シードレーザ光は、第 2 のウインドウ 4 7 を透過して凹面 H Rミラー 3 7 によって反射され、第 2 のウインドウ 4 7 を介して再び放電管 2 5 内に入射して増幅される。増幅されたレーザ光は、第 1 のウインドウ 4 6 を透過して H Rミラープリズム 4 3 に入射し、H Rミラープリズム 4 3 によって反射されて出射ビームとして出力される。放電管 2 5 内のレーザ媒体は、レーザガス循環ポンプ 2 6 によって循環され、熱交換器 2 7 によって冷却される。

## 【 0 0 4 8 】

図 8 は、図 6 に示す高速軸流型レーザ光増幅器の電極の変形例を示す図である。図 8 においては、電極 2 2 b 及び 2 3 b の各々が、スパイラル形状を有している。これにより、電極 2 2 b と電極 2 3 b との間に形成される放電領域が均一化され、レーザ光の均一な増幅が可能となる。

40

## 【 0 0 4 9 】

図 9 は、本発明の第 2 の実施形態が適用される 3 軸直交型レーザ光増幅器の構造を示す側面図であり、図 1 0 は、図 9 に示す 3 軸直交型レーザ光増幅器の A - A 断面を示す断面図である。図 9 及び図 1 0 に示すように、レーザ媒体が充填されたチャンバ 2 1 c 内に、1 対の電極 2 2 c 及び 2 3 c が配置されている。高周波（R F）電源が高周波電圧を電極 2 2 c と電極 2 3 c との間に印加すると、電極 2 2 c 及び 2 3 c が高周波電界を発生して

50

レーザ媒体中で高周波放電を行い、電極 2 2 c と電極 2 3 c との間に放電領域が形成される。

【 0 0 5 0 】

これにより、レーザ媒体が励起されて、H Rミラープリズム 4 3 によって反射されて第 1 のウインドウ 4 6 を介してチャンバ 2 1 c 内に入射するシードレーザ光（入射ビーム）が増幅される。さらに、シードレーザ光は、第 2 のウインドウ 4 7 を透過して凹面 H Rミラー 3 7 によって反射され、第 2 のウインドウ 4 7 を介して再びチャンバ 2 1 c 内に入射して増幅される。増幅されたレーザ光は、第 1 のウインドウ 4 6 を透過して H Rミラープリズム 4 3 に入射し、H Rミラープリズム 4 3 によって反射されて出射ビームとして出力される。チャンバ 2 1 c 内のレーザ媒体は、モータによって駆動されるクロスフローファン 2 8 によって循環され、熱交換器 2 9 によって冷却される。

10

【 0 0 5 1 】

図 1 1 は、第 2 の実施形態の変形例に係るレーザ光増幅器の構成を示す図である。図 1 1 に示すレーザ光増幅器が図 5 に示すレーザ光増幅器と異なる点は、図 5 に示す放電管 2 5 を複数の放電管（図 1 1 においては、2 つの放電管 2 5 a 及び 2 5 b を示す）に分割することにより、レーザ光が、複数の増幅領域（図 1 1 においては、2 つの増幅領域 3 0 a 及び 3 0 b を示す）を直列に縦断しながら増幅されるようにしたことである。放電管 2 5 a 及び 2 5 b の直径を、放電管 2 5 a 及び 2 5 b を通過するレーザ光の径に合わせることで、レーザ光を効率よく増幅することができる。また、自励発振や寄生発振を抑制する可飽和吸収体 3 1 は、放電管 2 5 a と放電管 2 5 b との間に配置することができる。

20

【 0 0 5 2 】

この場合においても、シードレーザ光（入射ビーム）が H Rミラープリズム 4 3 に入射する入射ビーム位置 3 4 と凹面 H Rミラー 3 7 との間の距離 D を凹面 H Rミラー 3 7 の曲率半径 R と略同じにすることにより（ $D \approx R = 2 f$ ）、入射ビーム位置（第 1 の点）3 4 における入射ビームの像を、H Rミラープリズム 4 3 の反射面 4 5 上の入射ビーム転写像位置（第 2 の点）3 5 に転写して、転写像を結像させることができる。ここで、第 1 の点 3 4 と第 2 の点 3 5 とは、物点と像点の関係にあって互いに共役な関係となっている。

【 0 0 5 3 】

図 1 1 において、シードレーザ光を高反射率で反射する膜がコートされた H R（高反射）ミラープリズム 4 3 の反射面 4 4 に、シードレーザ光が 4 5 度よりも僅かに大きな入射角で入射する。そして、シードレーザ光は、4 5 度よりも僅かに大きな反射角で反射されて、放電管 2 5 a の第 1 のウインドウ 4 6 a を透過し、増幅領域 3 0 a を通過して増幅され、さらに第 2 のウインドウ 4 7 a を透過して、自励発振や寄生発振を抑制する可飽和吸収体 3 1 を通過する。さらに、可飽和吸収体 3 1 を通過したレーザ光は、放電管 2 5 b の第 1 のウインドウ 4 6 b を透過し、増幅領域 3 0 b を通過して増幅され、さらに第 2 のウインドウ 4 7 b を透過する。

30

【 0 0 5 4 】

第 2 のウインドウ 4 7 b を透過したレーザ光は、凹面 H Rミラー 3 7 に 0 度よりも僅かに大きな入射角で入射し、0 度よりも僅かに大きな反射角で反射されて、再び増幅領域 3 0 b を通過することにより増幅される。増幅領域 3 0 b を通過したレーザ光は、再び可飽和吸収体 3 1 を通過した後に、増幅領域 3 0 a を通過することにより増幅され、H Rミラープリズム 4 3 の他方の反射面 4 5 に到達して、4 5 度よりも僅かに大きな反射角で反射され、増幅レーザ光として出力される。

40

【 0 0 5 5 】

ここで、入射ビーム位置（第 1 の点）3 4 と入射ビーム転写像位置（第 2 の点）3 5 とは、互いに共役の関係にあるので、反射面 4 4 上の入射ビーム位置（第 1 の点）3 4 における入射ビームの像を、反射面 4 5 上の入射ビーム転写像位置（第 2 の点）3 5 に転写して、転写像を結像させることができる。

【 0 0 5 6 】

第 2 の実施形態の変形例のメリットは、放電管を複数に分割することにより、可飽和吸

50

収体 31 を複数の放電管の間に設置できるので、寄生発振や自励発振を抑制しながら、シードレーザ光を高い効率で増幅できることである。

【0057】

以下に、本発明の実施形態をさらに具体化した幾つかの実施例について説明する。

<実施例 1>

図 12 は、第 1 の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。このレーザ光増幅器においては、2 つの広い平板電極に高周波電圧が印加され、CO<sub>2</sub>レーザガス中で高周波放電が行われることにより、増幅領域 30 が形成される。また、増幅領域 30 を挟んで配置される折返しミラー 37 及び 38 は、いずれも凹面 HR ミラーである。

【0058】

シードレーザ光（入射ビーム）は、入射ウインドウ 33 を斜めに透過して、増幅領域 30 を通過して増幅される。シードレーザ光は、折返しミラー 37 に 0 度よりも大きな入射角で入射して高反射率で反射され、再び増幅領域 30 において増幅される。次いで、折返しミラー 37 と対向配置された折返しミラー 38 に 0 度よりも大きな入射角で入射して高反射率で反射され、さらに増幅領域 30 において増幅され、出射ウインドウ 36 を透過して出力される。

【0059】

図 12 に示す折返しミラー 37 及び 38 によって構成される光学システムにおいても、入射ウインドウ 33 の近傍に設定された入射ビーム位置（第 1 の点）34 におけるレーザ光の像が、出射ビームの光路上において出射ウインドウ 36 の近傍に設定された入射ビーム転写像位置（第 2 の点）35 に転写され、入射ビーム転写像が結像する。

【0060】

図 13 は、光学システムにおいて反射光学素子を透過光学素子に置き換えて第 1 の実施例に係るレーザ光増幅器の動作を説明するための図である。

一般に、2 つの薄いレンズ M1 及び M2 によって構成される合成レンズ系の合成焦点距離 F は、次式（1）で表され、前側レンズ M1 の主点と合成レンズ系の前側主点との間の距離 ZH は、次式（2）で表される。

$$F = f_1 \cdot f_2 / (f_1 + f_2 - t) \quad \cdots (1)$$

$$ZH = f_1 \cdot t / (f_1 + f_2 - t) \quad \cdots (2)$$

ここで、f<sub>1</sub> は前側レンズ M1 の焦点距離、f<sub>2</sub> は後側レンズ M2 の焦点距離、t は前側レンズ M1 と後側レンズ M2 との間の距離である。

【0061】

物体の位置と前側レンズ M1 との間の距離がレンズ間距離 t に等しい場合を想定すると、この合成レンズ系による物体の転写像の倍率 M は、次式（3）で表される。

$$M = (ZH + t - F) / F \quad \cdots (3)$$

【0062】

そこで、図 13 に示すように、図 12 に示す折返しミラー 37 及び 38 を、集光能力を有する 2 つの薄いレンズ M1 及び M2 で表した光学システムを想定する。図 13 において、レンズ M1 とレンズ M2 との間の距離 t = L とし、物体の位置に相当する入射ビーム位置（第 1 の点）34 と前側レンズ M1 との間の距離 L<sub>i</sub> を L と等しくし、入射ビーム位置（第 1 の点）34 における入射ビームの像の転写像が形成される入射ビーム転写像位置（第 2 の点）35 と後側レンズ M2 との間の距離 L<sub>o</sub> を L と等しくして、倍率 M = 1 で像を転写するものとする。さらに、レンズ M1 及び M2 が、同じ焦点距離 f = R / 2 を有するものとする。

【0063】

これらの関係を上記の式に代入すると、次式（4）～（6）が得られる。

$$F = f^2 / (2f - L) \quad \cdots (4)$$

$$ZH = f \cdot L / (2f - L) \quad \cdots (5)$$

$$M = 1 = (ZH + L - F) / F \quad \cdots (6)$$

【0064】

10

20

30

40

50

式(4)～(6)から、 $f = R / 2 = L$ が求められる。即ち、曲率半径  $R = 2L$  の2つの球面凹面HRミラーを距離  $L$  だけ離して対向させることにより、入射ビーム位置(第1の点)34における入射ビームの像が、出射ビーム光路上の入射ビーム転写像位置(第2の点)35に1:1で転写されることになる。ここで、第1の点34と第2の点35とは、共役の関係にある。

#### 【0065】

第1の実施例は、スラブ型CO<sub>2</sub>レーザ装置に適用することができる。出射ビーム光路上の入射ビームの転写像は入射ビームと同程度しか変動しないので、第1の実施例に係るレーザ光増幅器は、入射ビームの光軸が多少ずれても入射ビームを安定に増幅することができ、かつ出射ビームの光軸の安定性が向上する。

10

#### 【0066】

##### <実施例2>

図14は、第2の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。第2の実施例は、図12に示すのと同様なスラブ型CO<sub>2</sub>レーザ光増幅器に適用される。第2の実施例に係るレーザ光増幅器は、増幅領域30を挟んで配置される折返しミラーによって構成される光学システムを用いてレーザ光が5パス増幅されるように構成されている。第2の実施例は、第1の点34における入射ビームの像を折返し光路の途中にある第3の点39に転写して第1の転写像を結像させ、第1の転写像をさらに出射ビームの光路上の第2の点35に転写して第2の転写像を結像させることに特徴がある。しかしながら、第2の実施例も、第1の点34における入射ビームの像を出射レーザ光の光路上の第2の点35に転写することにより光軸を安定化させる点において、実質的に第1の実施形態の技術的思想に属する。

20

#### 【0067】

第2の実施例に係るレーザ光増幅器は、入射ビームの光路上の入射ビーム位置(第1の点)34における入射ビームの像を、折返し光路の途中にある入射ビーム第1転写像位置(第3の点)39に転写して第1の転写像を結像させ、さらに第3の点39における第1の転写像を、出射ビームの光路上の入射ビーム第2転写像位置(第2の点)35に転写して第2の転写像を結像させる。特に、このレーザ光増幅器の光学システムは、入射ビーム位置(第1の点)34と入射ビーム第2転写像位置(第2の点)35とが略一致するように構成されている。このような光学システムを用いることによって、レーザ装置全体の光学システムを構成することが容易になる。

30

#### 【0068】

このレーザ光増幅器においては、1対の折返しミラー37及び38が、増幅領域30を挟んで対向するように、距離  $L$  の間隔で配置されている。折返しミラー37及び38の各々は、曲率半径  $R$  を有する凹面HRミラーであって、図14に示すように、折返しミラー37は、図中下端が折り返しミラー38に近付くように傾いて配置されている。

#### 【0069】

マスターオシレータから供給されるシードレーザ光(入射ビーム)が、レーザ光増幅器の入射ウインドウ33を斜めに透過し、増幅領域30中を通過する間に増幅される(第1パス)。入射ビームの光路上において折返しミラー37及び38間の距離  $L$  を2等分する点を、光学システムにおける入射ビーム位置(第1の点)とする。入射ビームの光路上における第1の点34と折返しミラー37との間の距離  $L_i$  は、 $L/2$  となる。

40

#### 【0070】

第1の点34を通過して増幅されたレーザ光は、折返しミラー37に0度よりも大きな入射角で入射して、図中斜め左下方向に反射され、再び増幅領域30を通過してさらに増幅される(第2パス)。さらに、レーザ光は、図中左側の折返しミラー38に0度よりも大きな入射角で入射して、図中略水平に増幅領域30を通過して増幅される(第3パス)。ここで、光学システムの構成を調整することにより、折返しミラー37及び38の中間に位置する第3の点39に、第1の点34における入射ビームの像を転写して、第1の転写像を結像させることができる。ここで、第1の点34と第2の点35とは、物点と像点

50

の関係にあって互いに共役な関係となっている。

【 0 0 7 1 】

さらに、レーザ光は、右側の折返しミラー 37 によって図中左上方向に反射されて増幅領域 30 を通過して増幅され（第 4 パス）、左側の折返しミラー 38 によって図中右上方向に反射されて増幅領域 30 を通過して増幅され（第 5 パス）、出射ウインドウ 36 を透過して出射ビームとして出力される。このとき、折返しミラー 37 及び 38 によって構成される光学システムは、第 3 の点 39 における第 1 の転写像を、折返しミラー 38 から出射ウインドウ 36 に向かうレーザ光の光路中において折返しミラー 37 及び 38 の中間に位置する第 2 の点 35 に転写して、入射ビームの第 2 の転写像を結像させる。なお、入射ビーム第 2 転写像位置（第 2 の点）35 は、入射ビーム位置（第 1 の点）34 と重なるようにすることができる。出射ビームの光路上において折返しミラー 38 と第 2 の点 35 との間の距離  $L_o$  は、 $L/2$  となる。

10

【 0 0 7 2 】

図 15 は、光学システムにおいて反射光学素子を透過光学素子に置き換えて第 2 の実施例に係るレーザ光増幅器の動作を説明するための図である。この光学システムは、図 5 及び図 12 に示す光学システムとは異なり、式（1）に、 $f_1 = f_2 = L/2$ 、 $t = L$  を代入すると合成焦点距離は無限大となるので、式（1）～（3）を適用することはできない。このような光学システムは、一般的にアフォーカル系と呼ばれる。

【 0 0 7 3 】

レンズ M1 及びレンズ M2 の焦点距離をそれぞれ  $f_1$  と  $f_2$  として、レンズ M1 及び M2 を  $(f_1 + f_2)$  の間隔で配置した場合に、物体の位置がレンズ M1 の上流でレンズ M1 から距離  $f_1$  の位置とすると、物体の転写像位置は、レンズ M2 の下流でレンズ M2 から距離  $f_2$  の位置となる。

20

アフォーカル系の場合の倍率 M は、次式（7）で表される。

$$M = f_1 / f_2 \quad \cdots (7)$$

【 0 0 7 4 】

第 2 の実施例におけるように  $f_1 = f_2$  の場合には、倍率 M は 1 となる。ここで、レンズ M1 ～ M4 の焦点距離を同じ焦点距離  $f$  として、隣接する 2 つのレンズ間の距離を  $L$  とすると、 $L = 2f$  の関係を満たせば、図 15 に示すような光学システムとなる。ここで、凹面ミラー 37 及び 38 の曲率半径を  $R$  とすると、 $L = R$  の関係を満たすことによって本光学システムを実現できる。

30

【 0 0 7 5 】

図 15 を参照すると、シードレーザ光（入射ビーム）は、入射ビームの光路上にある入射ビーム位置（第 1 の点）34 を通過してレンズ M1 に入射する。入射ビーム位置（第 1 の点）34 は、レンズ M1 の上流でレンズ M1 から  $L_i = L/2$  の距離にある。レンズ M1 は、図 14 における右側の折返しミラー 37 と同じ集光能力を有し、レンズ M2 は、図 14 における左側の折返しミラー 38 と同じ集光能力を有する。レンズ M1 とレンズ M2 との間隔は  $L$  である。レンズ M1 及び M2 を透過したレーザ光は、レンズ M2 の下流でレンズ M2 から  $L/2$  の距離にある第 3 の点 39 に第 1 の転写像を結像する。

【 0 0 7 6 】

40

さらに、第 3 の点 39 の下流で第 3 の点 39 から  $L/2$  の距離の位置に、レンズ M3 が設けられ、さらに、レンズ M3 の下流でレンズ M3 から  $L$  の距離の位置に、レンズ M4 が設けられている。レンズ M3 は、図 14 における右側の折返しミラー 37 と同じ集光能力を有し、レンズ M4 は、図 14 における左側の折返しミラー 38 と同じ集光能力を有する。これにより、第 3 の点 39 における第 1 の転写像から放出されるレーザ光は、レンズ M3 及びレンズ M4 を透過した後に、レンズ M4 から  $L_o = L/2$  の距離にある第 2 の点 35 において第 2 の転写像を結像する。

【 0 0 7 7 】

第 2 の実施例においては、入射ビームの像を 2 回転写しているが、本発明はこの実施例に限定されることなく、入射ビームの像を複数回転写して、入射ビームの光路上の第 1 の

50

点における入射ビームの像が出射ビームの光路上の第2の点に転写され、入射ビームの転写像が結像されればよい。

【0078】

第2の実施例によれば、出射ビームの光路上の第2の点における入射ビームの転写像が入射ビームと同程度しか変動しないので、出射ビームの安定性が向上する。さらに、増幅効率を高く維持できるので、レーザ光増幅器の出力が安定する。

【0079】

また、第2の実施例に係るレーザ光増幅器においては、入射ビームの光路上の第1の点と出射ビーム光路上の第2の点が一致することから、アフォーカル系の光学システムを採用しているので、入射ビームの光品位特性（ビームサイズ、ビーム広がり角等）を維持した状態で出射ビームが出力される。その結果、多数のレーザ光増幅器を直列に接続して大きな増幅率でレーザ光を増幅するレーザ装置を構成する場合に、接続される光学素子間のアライメントが極めて容易になるという利点を有する。

【0080】

<実施例3>

図16は、第3の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。第3の実施例においては、図12及び図14に示すのと同様なスラブ型CO<sub>2</sub>レーザ光増幅器が想定されている。第3の実施例に係るレーザ光増幅器は、各々が曲率半径Rを有する2つの折返しミラーを、増幅領域30を挟んで対向配置して形成される光学システムにより、増幅領域においてシードレーザ光（入射ビーム）をマルチパスでジグザグに通過させている。このように長い光路における増幅を行うことによって、増幅効率を向上させ、しかも、入射ビームのエネルギーを大きく増幅して出力することができる。入射ビーム位置（第1の点）34における入射ビームの像が、出射ビームの光路上における第2の点35に転写され、入射ビームの転写像が結像される。

【0081】

図16に示すように、入射ウインドウ33を介して光学システムに斜めに入射したシードレーザ光（入射ビーム）は、第1の点34を通過し、増幅領域30を通過して増幅される（第1パス）。そして、レーザ光は、図中右側の折返しミラー37に0度よりも大きな入射角で入射して左側下方に反射され、増幅領域30を通過して増幅される（第2パス）。さらに、レーザ光は、図中左側の折返しミラー38に0度よりも大きな入射角で入射して右側下方に反射され、増幅領域30を通過して増幅される（第3パス）。レーザ光は、第4パスから第6パスまで、折返しミラーに0度よりも大きな入射角で入射して斜め下方に反射され、増幅領域30を通過して増幅されることを繰り返す。その後、レーザ光は、凹面のために入射位置における反射面が上を向いている左側の折返しミラー38によって略水平方向に反射され、増幅領域30を通過して増幅される（第7パス）。

【0082】

図16において点線で示すように、レーザ光は、第8パスから第11パスまで、折返しミラーに0度よりも大きな入射角で入射して斜め上方向に反射され、増幅領域30を通過して増幅されることを繰り返す。レーザ光は、第11パスにおいて、出射ウインドウ36を透過して出射ビームとして出力される。第11パスにおける入射ビーム転写像位置（第2の点）35には、入射ウインドウ33の近傍に位置する第1の点34における入射ビームの像が転写され、入射ビームの転写像が結像される。ここで、第1の点34と第2の点35とは、物点と像点の関係にあって互いに共役な関係となっている。

【0083】

図17は、光学システムにおいて反射光学素子を透過光学素子に置き換えて第3の実施例に係るレーザ光増幅器の動作を説明するための図である。

両端に凹面ミラーを配してマルチパス増幅を行う光学システムは、同じ焦点距離  $f = R/2$  を有する複数のレンズが間隔  $L$  で並んだ合成レンズ系において、最初のレンズ  $M_1$  から上流側に距離  $L_i = L$  だけ離れた位置（第1の点34）における入射ビームの像を、最後のレンズ  $M_N$  から下流側に距離  $L_o = L$  だけ離れた位置（第2の点35）に転写して、

転写像を結像させるように、複数のレンズを直列に配置した場合と等価である。

【0084】

ここで、 $(k+1)$  個のレンズ  $(M_1, M_2, \dots, M_{k+1})$  の焦点距離が全て同一の焦点距離  $f$  であると仮定する。そして、 $(k+1)$  個のレンズの合成焦点距離  $F_{k+1}$  と、 $k$  個のレンズ  $(M_1, M_2, \dots, M_k)$  を含む合成レンズ系の前側主点と  $(k+1)$  個のレンズ  $(M_1, M_2, \dots, M_{k+1})$  を含む合成レンズ系の前側主点との間の距離  $ZH_{k+1}$  と、 $(k+1)$  個のレンズの倍率  $M$  とは、式 (1) ~ (3) に基づいて、次式 (8) ~ (10) で表される。

$$F_{k+1} = F_k \cdot f / (F_k + f - L) \quad \dots (8)$$

$$ZH_{k+1} = F_k \cdot L / (F_k + f - L) \quad \dots (9)$$

$$M = (ZH_{k+1} + L - F_{k+1}) / F_{k+1} \quad \dots (10)$$

10

【0085】

$k=0$  の場合 ( $M_1$  のみの場合) には、合成焦点距離の初期値  $F_1 = f$  である。式 (8) ~ (10) を用いて、 $F_1$  から  $F_N$  までを逐次計算することにより、 $N$  個のレンズ  $(M_1, M_2, \dots, M_N)$  を含む合成レンズ系の焦点距離  $F_N$  と前側主点位置  $ZH_N$  を求め、さらに、倍率  $M$  が約 1 を満たすような各レンズの焦点距離  $f$  を求めることができる。

【0086】

例えば、1 対の折返しミラー間の距離  $L$  を 1000 mm とし、11 パス増幅を行う場合を仮定すると、式 (8) ~ (10) に基づいて、折返しミラーの焦点距離  $f$  が約 1100 mm となり、曲率半径  $R (= 2f)$  が約 2200 mm となる。

20

【0087】

第 3 の実施例においては、レーザ光が、増幅領域 30 をジグザグに上から下の方向に斜めに通過した後に、今度は増幅領域 30 をジグザグに下から上の方向に斜めに通過するような光学システムを採用することにより、11 パスという多数のパスを有するマルチパス増幅により高い増幅効率を実現し、かつ、入射ビーム位置 (第 1 の点) 34 における入射レーザ光の像を出射ビームの光路上の第 2 の点 35 に転写して、安定なビーム軌跡を実現することができる。

【0088】

< 実施例 4 >

図 18 は、第 4 の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。第 4 の実施例においては、図 12、図 14 及び図 16 に示すのと同様なスラブ型  $CO_2$  レーザ光増幅器が想定されている。第 4 の実施例に係るレーザ光増幅器は、第 3 の実施例に係るレーザ光増幅器に対して、2 つの折返しミラーの内の一方を平面 HR ミラーとして 6 パス増幅を行うようにした点異なる。

30

【0089】

図 18 に示すように、シードレーザ光 (入射ビーム) は、斜めに入射ウインドウ 33 を透過し、入射ビーム位置 (第 1 の点) 34 を通過して、2 つの折返しミラー 42 及び 38 によって構成される光学システムに入射する。この光学システムは、平面 HR ミラーである折返しミラー 42 と凹面 HR ミラーである折返しミラー 38 とが、距離  $D$  をおいて略平行に対向配置されたものである。

40

【0090】

レーザ光増幅器に入射したシードレーザ光 (入射ビーム) は、増幅領域 30 を通過して増幅され (第 1 パス)、折返しミラー 42 に 0 度よりも大きな入射角で入射して斜め下方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅され (第 2 パス)、折返しミラー 38 に 0 度よりも大きな入射角で入射して斜め下方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅される (第 3 パス)。

【0091】

さらに、レーザ光は、折返しミラー 42 に 0 度よりも大きな入射角で入射して斜め下方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅され (第 4 パス)、折返しミラー 38 に 0 度よりも大きな入射角で入射して斜め下方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅され

50

(第5パス)、折返しミラー42によって斜め下方向に反射され、増幅領域30を通過して増幅され(第6パス)、入射ビーム転写像位置(第2の点)35を通過し、出射ウィンドウ36を介して出射ビームとして出力される。

【0092】

第4の実施例においては、折返しミラー38と折返しミラー42との間の距離をDとし、両者が平行に対向するように設けられる。また、入射ビームの光路上において折返しミラー38の脇を通過する位置を入射ビーム位置(第1の点)34とし、出射ビームの光路上において折返しミラー38の反対側の脇を通過する位置を入射ビーム転写像位置(第2の点)35とする。そして、第1の点34における入射ビームの像を第2の点35に転写して転写像を結像させるように、光学システムが構成される。ここで、第1の点34と第2の点35とは、物点と像点の関係にあって互いに共役な関係となっている。

10

【0093】

図19は、光学システムにおいて反射光学素子を透過光学素子に置き換えて透過光学素子を直列に展開することにより第4の実施例に係るレーザ光増幅器の動作を説明するための図である。図19において、折返しミラー42を表す平面透明板HR1、HR2、HR3は集光能力を有さないもので、この光学システムは、実質的に図13に示したものと同じ構成になる。ここで、集光能力を有する折返しミラー38に対応する2つのレンズM1及びM2の間の距離Lが2Dであり、第1の点34がレンズM1の上流側においてレンズM1から $L_i = 2D$ の距離にあり、第1の点34におけるレーザ光の像の転写像がレンズM2の下流側においてレンズM2から $L_o = 2D$ の距離にある第2の点35に結像するという位置関係がある。

20

【0094】

レンズM1及びM2の合成焦点距離F、主点間距離ZH、及び、倍率Mは、式(4)～(6)においてLを2Dに置き換えた次式(11)～(13)を用いて求めることができる。

$$F = f^2 / (2f - 2D) \quad \cdots (11)$$

$$ZH = f \cdot 2D / (2f - 2D) \quad \cdots (12)$$

$$M = 1 = (ZH + 2D - F) / F \quad \cdots (13)$$

【0095】

ここで、折返しミラー38の焦点距離fについては、式(11)～(13)から、倍率 $M = 1$ を満たすためには $D = f / 2$ ( $L = f$ )となる。折返しミラー38の曲率半径をRとすると、曲率半径 $R = 2f = 4D$ となる。

30

【0096】

第4の実施例に係るレーザ光増幅器は、レーザ光増幅器に対する入射ビームの光軸が多少ずれても、出射ビームの位置及び角度は入射ビームの位置及び角度と同程度しか変動しないので、増幅効率が変動しにくく、安定にレーザ光を増幅することができる。また、光軸の安定性が向上し、他の光学装置と組み合わせる場合にアライメントが容易である。さらに、第4の実施例に係るレーザ光増幅器の特徴のひとつは、入射ビームと出射ビームとが折返しミラー38の両脇を通過するので、レーザ光増幅器の一側面でレーザ光を入射及び出射できることである。

40

【0097】

<実施例5>

図20は、第5の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。本実施例においては、図12、図14、図16及び図18に示すのと同様なスラブ型CO<sub>2</sub>レーザ光増幅器が想定されている。第5の実施例に係るレーザ光増幅器は、第4の実施例に係るレーザ光増幅器に対して、2つの折返しミラーを平行に対向させる替わりに、両者の主面が僅かな角度をなすように配置してパス数を増やしたこと、及び、レーザ光増幅器のチャンバの外の出射ビーム光路上に入射ビーム転写像位置(第2の点)35を定めたことが異なる。

【0098】

50

図 20 においてチャンバ 21 の左下部分に設けられた入射ウインドウ 33 を斜め上方に透過したシードレーザ光（入射ビーム）は、第 1 の点 34 を通過した後、距離  $D$  をもって対向配置された折返しミラー 42 と折返しミラー 38 とによって構成された光学システムに入射する。なお、集光能力を有する折返しミラー 38 によってレーザ光が反射されてから次にレーザ光が折返しミラー 38 に入射するまでの光路上の距離  $L$  は  $2D$  となる。

【0099】

折返しミラー 42 と折返しミラー 38 とは、平行に対向するのではなく、わずかに角度をもって設置されている。図 20 において、折返しミラー 38 は、図中上端が折返しミラー 42 に近付くように傾いて配置されている。このように、折返しミラー 42 と折返しミラー 38 とが互いにわずかに傾いて配置されたことにより、パス数の多いマルチパス増幅を実現することができる。

10

【0100】

また、入射ビーム光路上で折返しミラー 38 の脇を通過する位置を入射ビーム位置（第 1 の点）34 とし、出射ビーム光路上で出射ビームが最後に折返しミラー 38 によって反射される位置から距離  $2D$  だけ下流側の位置を入射ビーム転写像位置（第 2 の点）35 とし、第 1 の点 34 における入射ビームの像の転写像を第 2 の点 35 に結像させるように、光学システムが構成される。第 2 の点は、出射ウインドウ 36 から出力された出射ビームの光路上にある。

【0101】

図 20 を参照すると、レーザ光増幅器に入射するシードレーザ光（入射ビーム）は、斜め下方から入射ウインドウ 33 を透過し、第 1 の点 34 を通過して、光学システムに入射する。シードレーザ光は、増幅領域 30 を通過して増幅され（第 1 パス）、折返しミラー 42 に 0 度よりも大きな入射角で入射して斜め上方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅され（第 2 パス）、折返しミラー 38 に 0 度よりも大きな入射角で入射して斜め上方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅される（第 3 パス）。

20

【0102】

さらに、増幅されたレーザ光は、折返しミラー 42 によって斜め上方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅され（第 4 パス）、折返しミラー 38 に 0 度よりも大きな入射角で入射して斜め上方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅され（第 5 パス）、折返しミラー 42 に 0 度よりも大きな入射角で入射して斜め上方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅され（第 6 パス）、折返しミラー 38 に入射する。折返しミラー 38 の反射面は凹面であり、主面が折返しミラー 42 に対して僅かに下方に傾いているので、反射面が下方に傾いている。このため、折返しミラー 38 に入射したレーザ光は、図 20 において点線で示すように、斜め下方向に反射される。

30

【0103】

斜め下方向に反射されたシードレーザ光は、増幅領域 30 を通過して増幅され（第 7 パス）、折返しミラー 42 に 0 度よりも大きな入射角で入射して斜め下方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅され（第 8 パス）、折返しミラー 38 に 0 度よりも大きな入射角で入射して斜め下方向に反射され、増幅領域 30 を通過して増幅される（第 9 パス）。増幅されたレーザ光は、出射ウインドウ 36 を透過して出射ビームとして出力される。出射ビームの光路上において、折返しミラー 38 から距離  $2D$  だけ下流側の位置に、第 1 の点 34 における入射ビームの像が転写される入射ビーム転写像位置（第 2 の点）35 が定められている。ここで、第 1 の点 34 と第 2 の点 35 とは、物点と像点の関係にあって互いに共役な関係となっている。

40

【0104】

図 21 は、光学システムにおいて反射光学素子を透過光学素子に置き換えて透過光学素子を直列に展開することにより第 5 の実施例に係るレーザ光増幅器の動作を説明するための図である。入射ビーム位置（第 1 の点）34 と折返しミラー 42（平面透明板  $HR_1$ ）との間の距離を  $D$  とすることにより、入射ビーム位置（第 1 の点）34 と最初のレンズ  $M_1$  との間の距離  $L_1$  が  $L = 2D$  となり、最後のレンズ  $M_N$  と入射ビーム転写像位置（第 2

50

の点) 35 との間の距離  $L_0$  が  $L = 2D$  となる。

【0105】

折返しミラー38と折返しミラー42との間の距離  $D$  を用いる場合には、 $k$  個のミラー（レンズ）の合成焦点距離  $F_k$ 、主点間距離  $ZH_k$ 、倍率  $M$  は、式(8)～(10)において  $L$  を  $2D$  に置き換えた次式(14)～(16)により求めることができる。

$$F_{k+1} = F_k \cdot f / (F_k + f - 2D) \quad \cdots (14)$$

$$ZH_{k+1} = F_k \cdot 2D / (F_k + f - 2D) \quad \cdots (15)$$

$$M = (ZH_{k+1} + 2D - F_{k+1}) / F_{k+1} \quad \cdots (16)$$

【0106】

$k = 0$  の場合には、合成焦点距離の初期値  $F_1 = f$  である。式(14)～(16)を用いて、 $F_1$  から  $F_N$  までを逐次計算することにより、 $N$  個のレンズ ( $M_1$ 、 $M_2$ 、 $\cdots$ 、 $M_N$ ) の合成焦点距離  $F_N$  と前側主点位置  $ZH_N$  とを求めて、倍率  $M$  が約1を満たすような各レンズの焦点距離  $f$  を求めることができる。例えば、 $D = 600 \text{ mm}$  で、9パス増幅する場合には、曲率半径  $R$  が約  $7200 \text{ mm}$  となる。

【0107】

第5の実施例のメリットは、増幅領域に多数のパスを通すことにより、レーザ媒体のエネルギーをより有効に活用して、高出力のレーザ光を得ること、及び、レーザ光増幅器の光軸が安定することである。

【0108】

<実施例6>

図22は、第6の実施例に係るレーザ光増幅器を上から見た平面断面図である。なお、第6の実施例に係るレーザ光増幅器の光学システムは、実質的に図21に示されたものと同一であるので、ここでは省略する。第6の実施例に係るレーザ光増幅器は、図20に示された第5の実施例に係るスラブ型レーザ光増幅器と略同じ構成を有するもので、一方の折返しミラー38をレーザ光増幅器の長手方向に対して略直交するように配置し、他方の折返しミラー42を折返しミラー38に対して所定の角度をもって対向配置したマルチパス増幅式レーザ光増幅器である。この型式のレーザ光増幅器においては、各折返しミラーの集光能力や長さ、2つの折返しミラーの挟角、及び、シードレーザ光の入射角度等を調整することにより、パス数を適宜に変化させることができる。図22に示す第6の実施例においては、パス数を11にしている。

【0109】

このレーザ光増幅器においては、レーザ光増幅器に供給されたシードレーザ光は、距離  $D$  をもって対向配置された折返しミラー42と折返しミラー38とによって構成された光学システムに入射する。折返しミラー38は、増幅器の長手方向に対して直交するように配置され、折返しミラー42は、図中上端が折返しミラー38に近付くように傾いて配置されている。

【0110】

レーザ光増幅器に入射するシードレーザ光（入射ビーム）は、左下方から入射ウィンドウ33を透過し、第1の点34を通過して、光学システムに入射する。シードレーザ光は、増幅領域30を通過して増幅され（第1パス）、折返しミラー42に0度よりも大きな入射角で入射して斜め上方向に反射され、増幅領域30を通過して増幅され（第2パス）、折返しミラー38に0度よりも大きな入射角で入射して斜め上方向に反射され、増幅領域30を通過して増幅される（第3パス）。

【0111】

さらに、レーザ光は、折返しミラー42に入射して斜め上方向に反射され、増幅領域30を通過して増幅され（第4パス）、折返しミラー38に入射して斜め上方向に反射され、増幅領域30を通過して増幅され（第5パス）、折返しミラー42に入射して斜め上方向に反射され、増幅領域30を通過して増幅され（第6パス）、折返しミラー38に入射して反射される。折返しミラー38によって反射されたレーザ光は、増幅領域30を通過して増幅され（第7パス）、折返しミラー42に入射する。折返しミラー38と折返しミ

10

20

30

40

50

ラー４２とは相対的に傾いているので、折返しミラー４２に入射するレーザ光の入射角は徐々に減少する。このため、折返しミラー４２に入射したレーザ光は、図２２において点線で示すように、折返しミラー４２によって斜め下方向に反射される。

【０１１２】

折返しミラー４２によって斜め下方向に反射されたレーザ光は、増幅領域３０を通過して増幅され（第８パス）、折返しミラー３８に入射して斜め下方向に反射され、増幅領域３０を通過して増幅される（第９パス）。さらに、レーザ光は、折返しミラー４２に入射して斜め下方向に反射され、増幅領域３０を通過して増幅され（第１０パス）、折返しミラー３８に入射して斜め下方向に反射され、増幅領域３０を通過して増幅され（第１１パス）、出射ウインドウ３６を透過して出射ビームとして出力される。

10

【０１１３】

出射ビームの光路上において、出射ビームが最後に反射された折返しミラー３８から距離 $2D=L$ だけ下流側の位置に、入射ビーム位置（第１の点）３４における入射ビームの像を転写して転写像を結像させる入射ビーム転写位置（第２の点）３５が定められている。光学システムの働きにより、第１の点３４におけるレーザ光の像が第２の点３５に転写されて、転写像が結像する。ここで、第１の点３４と第２の点３５とは、物点と像点の関係にあって互いに共役な関係となっている。

【０１１４】

光学システムの合成焦点距離 $F_N$ 、前側主点間距離 $ZH_N$ 、倍率 $M$ は、式（１４）～（１６）により求めることができる。例えば、 $D=1800\text{ mm}$ で、１１パス増幅する場合には、曲率半径 $R$ が約 $30000\text{ mm}$ となる。

20

【０１１５】

第６の実施例のメリットは、第５の実施例におけるものと同じであるが、さらに、位置姿勢の調整が難しい折返しミラー３８を固定して、調整の容易な折返しミラー４２の調整により光路の調整を行うため、レーザ光増幅器の設計及びアライメントがより簡単になることがある。

【０１１６】

以上の実施例においては、増幅領域においてレーザ光をマルチパス増幅するための光学システムとして、２つの凹面ミラーの組合せ、または、平面ミラーと凹面ミラーとの組合せを用いたが、本発明はこれらの実施例に限定されることなく、集光能力をもった光学素子を含む光学システムであれば何でも用いることができる。例えば、凹面ミラーと凸面ミラーとの組合せ、又は、凸レンズと平面ミラーとの組合せを用いてもよい。

30

【０１１７】

（レーザ装置）

次に、本発明の幾つかの実施形態に係るレーザ装置について説明する。本発明の実施形態に係るレーザ装置は、ＬＰＰ式ＥＵＶ光源装置において、ターゲット物質にレーザ光を照射してターゲット物質をプラズマ化するドライバレーザ装置として用いられる。このドライバレーザ装置は、本発明の第１又は第２の実施形態に係るレーザ光増幅器を用いて高い増幅率で効率よくシードレーザ光を増幅し、増幅されたレーザ光をプラズマ発光点に集光することにより、高い効率でＥＵＶ光を発生させることができる。

40

【０１１８】

（実施形態３）

図２３は、本発明の第３の実施形態に係るドライバレーザ装置を用いたＥＵＶ光源装置の構成を示す図である。第３の実施形態に係るドライバレーザ装置は、プリアンプにスラブ型のレーザ光増幅器を使用し、メインアンプに高速軸流型のレーザ光増幅器を使用して、ＥＵＶ光源装置のドライバレーザ光を供給するものである。

【０１１９】

第３の実施形態に係るドライバレーザ装置は、シードレーザ光を発生するマスターオシレータ（ＭＯ）５１と、シードレーザ光の空間横モードを空間的にフィルタリングする空間フィルタ５２と、プリアンプ２０と、ＨＲ（高反射）ミラー５３、５４、５８と、リレ

50

ー光学系 55 及び 57 と、メインアンプ 60 とを含んでいる。このドライバレーザ装置は、シードレーザ光を必要な光強度まで増幅して、増幅されたレーザ光を軸外放物面ミラー 59 に出力する。軸外放物面ミラー 59 は、増幅されたレーザ光を EUV チャンバ 70 内のターゲット上に集光する。ここで、増幅されたレーザ光の集光点は、プラズマ発光点 71 と一致する。

#### 【0120】

マスターオシレータ 51 は、シードレーザ光として、例えば、繰り返し周波数 100 kHz、及び、パルス時間幅約 20 ns で、低次の空間横モードを有する炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) パルスレーザ光を出力する。このシードレーザ光が空間フィルタ 52 を通過することにより、空間横モードの高次モードがカットされ、空間横モードがシングルモードとなったシードレーザ光が、プリアンプ 20 の入射ウインドウに入射する。

10

#### 【0121】

プリアンプ 20 は、第 1 の実施形態に係るスラブ型レーザ光増幅器で構成されている。第 1 の実施形態において既に詳しく説明した通り、シードレーザ光は、スラブ型レーザ光増幅器に入射し、増幅領域を挟んで対向配置された 2 つの折返しミラーの間で多重反射することにより効率よくマルチパス増幅され、増幅されたレーザ光として出力される。プリアンプ 20 は、入射ビームの光路上の入射ビーム位置 (第 1 の点) 34 における入射ビームの像の転写像を、出射ビームの光路上の第 2 の点 35 に結像させる。したがって、入射ビームの光路が基準光路に対して多少の誤差があっても、出射ビームの光路の基準光路に対する誤差が、入射ビームの基準光路に対する誤差と略同等となるので、レーザ光の光軸は極めて安定している。

20

#### 【0122】

プリアンプ 20 から出力されたレーザ光は、HRミラー 53 及び 54 によって光路を変更され、リレー光学系 55 に入射する。リレー光学系 55 は、レーザ光がメインアンプ 60 の増幅領域を効率よく通過するように、レーザ光のサイズ及び広がり角度を調整して、メインアンプ 60 における直角プリズム 61 の第 1 の反射面に 45 度よりも僅かに大きな入射角でレーザ光を入射させる。

#### 【0123】

メインアンプ 60 は、第 2 の実施形態に係る高速軸流型レーザ光増幅器で構成されている。直角プリズム 61 の反射面は高反射面となっていて、プリアンプ 20 により増幅されたレーザ光は第 1 の反射面で反射されて、メインアンプ 60 の増幅領域 65 にシードレーザ光として入射する。シードレーザ光は、増幅領域 65 を通過して増幅され、入射角度が 0 度よりも僅かに大きな入射角で凹面 HRミラー 64 に入射して反射され、増幅領域 65 に再度入射して増幅され、直角プリズム 61 の第 2 の反射面に 45 度よりも僅かに大きな入射角度で入射して反射され、メインアンプ 60 から出力される。

30

#### 【0124】

メインアンプ 60 において、直角プリズム 61 の第 1 の反射面に入射ビーム位置 (第 1 の点) 62 が定められており、直角プリズム 61 の第 2 の反射面に入射ビーム転写像位置 (第 2 の点) 63 が定められている。メインアンプ 60 の光学システムは、第 1 の点 62 におけるシードレーザ光の像を第 2 の点 63 に転写して転写像を結像させるように構成されている。したがって、メインアンプ 60 における入射ビームの光軸変動は、拡大されることがなく出射ビームの光軸変動に伝達されるので、レーザ光の光軸変動を十分抑制することができる。さらに、ダブルパス増幅を行うことにより、メインアンプ 20 におけるレーザ光の増幅効率を向上させることができる。

40

#### 【0125】

メインアンプ 60 によって増幅されたレーザ光は、リレー光学系 57 に入射する。リレー光学系 57 は、レーザ光を軸外放物面ミラー 59 で集光できるように、レーザ光の大きさを調整し、レーザ光の波面を平面波に変換する。リレー光学系 57 を通過したレーザ光は、HRミラー 58 によって高反射率で反射されて、軸外放物面ミラー 59 に入射する。軸外放物面ミラー 59 によって反射されたレーザ光は、ウインドウ 74 を介して EUV チ

50

チャンバ 70 内に導入され、プラズマ発光点 71 におけるターゲットに集光されて、プラズマが発生する。回転楕円体の形状の反射面を有する E U V 集光ミラー 72 が、発生したプラズマから放射される E U V 光を中間集光点 ( I F ) 73 に集光する。中間集光点 73 に集光された E U V 光は、露光機に供給される。

【 0 1 2 6 】

第 3 の実施形態によれば、ドライバレーザ装置内の光路長が非常に長いにもかかわらず、プリアンプ 20 及びメインアンプ 60 における光軸が安定しているため、ドライバレーザ装置全体のアライメント調整が容易であり、また、出力されるレーザ光の光軸が極めて安定している。その結果、レーザ光の集光点の位置及び形状が安定するので、E U V 光のエネルギー安定性が向上する。

10

【 0 1 2 7 】

第 3 の実施形態においては、メインアンプ 60 において、管型の形状を有する高速軸流型レーザ光増幅器を用いたが、これに限定されることなく、楕円型、長円型、長方形型等の形状を有する高速軸流型レーザ光増幅器、3 軸直交型レーザ光増幅器、又は、スラブ型レーザ光増幅器等を用いることもできる。さらに、プリアンプ 20 においても、高速軸流型レーザ光増幅器等を用いることができる。

【 0 1 2 8 】

( 実施形態 4 )

図 2 4 は、本発明の第 4 の実施形態に係るドライバレーザ装置を用いた E U V 光源装置の構成を示す図である。図 2 4 に示すように、第 4 の実施形態に係るドライバレーザ装置は、シードレーザ光を出射するマスターオシレータ 51 と、シードレーザ光の空間横モードを空間的にフィルタリングする空間フィルタ 52 と、レーザ光増幅器を m 段に多段化して構成されるプリアンプ 20 と、H R ミラー 53、54、58 と、リレー光学系 55 及び 57 と、レーザ光増幅器を n 段に多段化して構成されるメインアンプ 60 とを含んでいる。ここで、m、n は、2 以上の自然数である。このドライバレーザ装置は、シードレーザ光を必要な光強度まで増幅して、増幅されたレーザ光を軸外放物面ミラー 59 に出力する。軸外放物面ミラー 59 は、増幅されたレーザ光をターゲット上に集光する。増幅されたレーザ光の集光点は、E U V チャンバ 70 内のプラズマ発光点 71 と一致する。

20

【 0 1 2 9 】

第 4 の実施形態に係るドライバレーザ装置は、図 2 3 に示した第 3 の実施形態に係るドライバレーザ装置において、プリアンプ 20 を構成するスラブ型レーザ光増幅器を多段化すると共に、メインアンプ 60 を構成する高速軸流型レーザ光増幅器を多段化したものである。その他の要素には差異がないので、以下においては、レーザ光増幅器の多段化について説明する。

30

【 0 1 3 0 】

第 4 の実施形態に係るドライバレーザ装置におけるプリアンプ 20 は、第 1 の実施形態に係るスラブ型レーザ光増幅器を m 段直列に接続したものである。個々のスラブ型レーザ光増幅器 20 k においては、入射ウインドウの近傍に位置する第 1 の点 34 k における入射ビームの像の転写像を、出射ウインドウの近傍に位置する第 2 の点 35 k に結像させるように、光学システムが構成されている。このため、入射ビームの光路が基準光路から多少ずれても、出射ビームの光路の基準光路に対する誤差は、入射ビーム位置における光路の誤差程度にしかない。

40

【 0 1 3 1 】

図 2 4 においては、ドライバレーザ装置のプリアンプ 20 において、m 段のレーザ光増幅器を直列に接続した場合を示したが、必要に応じて、前段のレーザ光増幅器 20 k と次段のレーザ光増幅器 20 ( k + 1 ) との間にリレー光学系を配置してもよい。そして、このリレー光学系は、前段のレーザ光増幅器 20 k の第 2 の点 35 k における出射ビームの像を、次段のレーザ光増幅器 20 ( k + 1 ) の第 1 の点 34 ( k + 1 ) に転写して、転写像を結像させる。このように、レーザ光増幅器 20 k の出射レーザ光の光軸が次段のレーザ光増幅器 20 ( k + 1 ) の第 1 の点 34 ( k + 1 ) を通るように光軸を調整することに

50

よりレーザ光増幅器を多段化すれば、光軸のずれを抑制しながらプリアンプの増幅率を増大することができる。

【0132】

第4の実施形態に係るドライバレーザ装置におけるメインアンプ60は、図5等にした第2の実施形態に係る高速軸流型レーザ光増幅器をn段直列に接続したものである。個々の管型レーザ光増幅器60iは、直角プリズム61iの第1の反射面に設定される第1の点62iにおける入射ビームの像の転写像を、直角プリズム61iの第2の反射面における第2の点63iに結像させるように構成されている。このため、入射ビームの光路が基準光路から多少ずれても、入射ビーム転写像位置(第2の点)63iにおける出射ビームの光路のずれは、入射ビーム位置(第1の点)62iにおける光路の誤差の程度にしか

10

【0133】

リレー光学系55は、HRミラー54によって反射されたレーザ光を調節して、第1のレーザ光増幅器の第1の点に入射させる。それ以降は、各レーザ光増幅器60iにおいて、第1の点62iにおける入射ビームの像が第2の点63iに転写されて、転写像が結像する。レーザ光増幅器60iの第2の点63iにおける出射レーザ光の像を、リレー光学系66iを介して、次段のレーザ光増幅器60(i+1)の第1の点62(i+1)に転写するように光軸を調整することによりレーザ光増幅器を多段化すれば、光軸のずれを抑制しながら、メインアンプの増幅率を増大してメインアンプを高出力化することができる。

20

【0134】

第4の実施形態によれば、レーザ光増幅器を直列接続して多段化するのでドライバレーザ装置内の光路長が極めて長大であるにもかかわらず、プリアンプ20及びメインアンプ60における光軸が安定しているため、ドライバレーザ装置全体のアライメント調整が容易であり、また、出力されるレーザ光の光軸が極めて安定している。その結果、レーザ光の集光点の位置及び形状が安定するので、EUV光のエネルギー安定性が向上する。

【0135】

第4の実施形態においては、メインアンプ60として管型の形状を有する高速軸流型レーザ光増幅器を用いたが、これに限定されることなく、楕円型、長円型、長方形型等の形状を有する高速軸流型レーザ光増幅器、3軸直交型レーザ光増幅器、又は、スラブ型レーザ光増幅器等を用いることができる。さらに、プリアンプ20においても、高速軸流型レーザ光増幅器等を用いることができる。

30

【0136】

(実施形態5)

図25は、本発明の第5の実施形態に係るドライバレーザ装置を用いたEUV光源装置の構成を示す図である。図25に示すように、第5の実施形態に係るドライバレーザ装置は、マスターオシレータ51と、空間フィルタ52と、リレー光学系80と、レーザ光増幅器をm段に多段化して構成されたプリアンプ20と、HRミラー53、54、58と、リレー光学系56及び57と、レーザ光増幅器をn段に多段化して構成されたメインアンプ60とを含んでいる。

40

【0137】

マスターオシレータ51から出力されたシードレーザ光のシングルモードが、ピンホール81が形成された空間フィルタ52によってフィルタリングされ、空間フィルタ52のピンホール81におけるレーザ光の像が、リレー光学系80によってプリアンプ20の初段レーザ光増幅器の第1の点に転写され、転写像が結像される。プリアンプ20の動作は、図24に示す第4の実施形態におけるのと同じである。

【0138】

プリアンプ20の終段レーザ光増幅器の第2の点におけるレーザ光の像は、リレー光学系56によって、メインアンプ60の初段レーザ光増幅器の第1の点に転写される。メインアンプ60の動作は、図24に示す第4の実施形態におけるのと同じである。メインア

50

ンプ 60 によって増幅されたレーザ光は、リレー光学系 57 に入射する。

【0139】

第 5 の実施形態に係るドライバレーザ装置は、図 24 に示す第 4 の実施形態に係るドライバレーザ装置に対して、随所にリレー光学系を挿入して転写光学系を形成している点が相違する。図 25 に示すように、空間フィルタ 52 とプリアンプ 20 との間に挿入されたリレー光学系 80 は、空間フィルタ 52 のピンホール 81 におけるレーザ光の像を、プリアンプ 20 の初段レーザ光増幅器の第 1 の点に転写して、転写像を結像させる。

【0140】

次に、多段化されたプリアンプ 20 と多段化されたメインアンプ 60 との間に挿入されたリレー光学系 56 は、プリアンプ 20 の終段レーザ光増幅器の第 2 の点におけるレーザ光の像を、メインアンプ 60 の初段レーザ光増幅器の直角プリズムの反射面に設定された第 1 の点に転写して、転写像を結像させる。

10

【0141】

第 5 の実施形態によれば、リレー光学系を追加したことにより、プリアンプ及びメインアンプの第 1 の点に確実にレーザ光を入射させることができるので、プリアンプ及びメインアンプの増幅効率の変動が抑制されて、レーザ装置全体として安定な増幅が可能である。

【産業上の利用可能性】

【0142】

本発明は、シードレーザ光を増幅するレーザ光増幅器、及び、そのようなレーザ光増幅器を用いたレーザ装置において利用することができる。

20

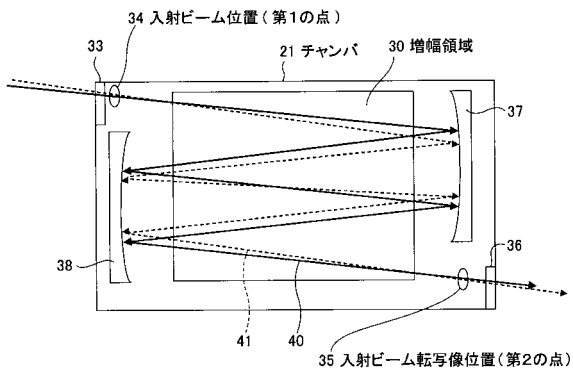
【符号の説明】

【0143】

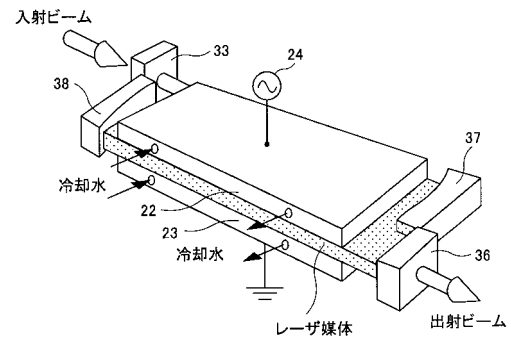
20・・・プリアンプ、21、21c・・・チャンバ、22、23・・・平板電極、22a、23a・・・円筒電極、22b、22c、23b、23c・・・電極、24、24a、24b・・・高周波電源、25、25a、25b・・・放電管、26・・・レーザガス循環ポンプ、27、29・・・熱交換器、28・・・クロスフローファン、30、30a、30b・・・増幅領域、31・・・可飽和吸収体、33・・・入射ウインドウ、34、62・・・入射ビーム位置（第 1 の点）、35、63・・・入射ビーム転写像位置（第 2 の点）、36・・・出射ウインドウ、37、37a、38、38a・・・折返しミラー（凹面 HR ミラー）、39・・・第 3 の点、40・・・基準光路、41・・・光路、42・・・平面 HR ミラー、43・・・HR ミラープリズム、44、45・・・反射面、46・・・第 1 のウインドウ、47・・・第 2 のウインドウ、51・・・マスターオシレータ、52・・・空間フィルタ、53、54、58・・・HR ミラー、55、56、57、66、80・・・リレー光学系、59・・・軸外放物面ミラー、60・・・メインアンプ、61・・・直角プリズム、64・・・凹面 HR ミラー、65・・・増幅領域、70・・・EUV チャンバ、71・・・プラズマ発光点、72・・・EUV 集光ミラー、73・・・中間集光点（IF）、74・・・ウインドウ、81・・・ピンホール

30

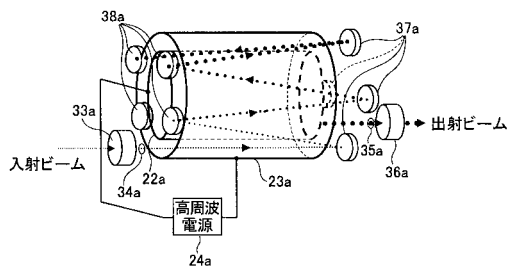
【図 1】



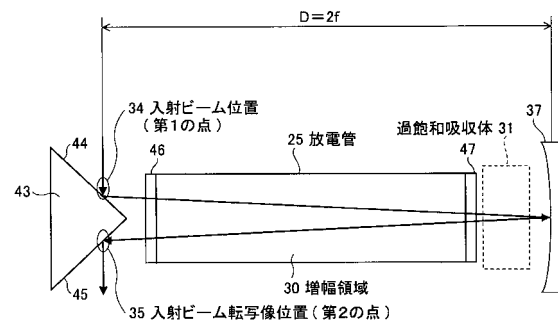
【図 2】



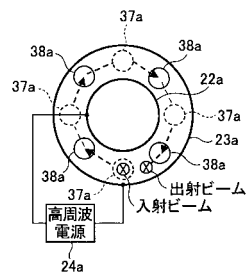
【図 3】



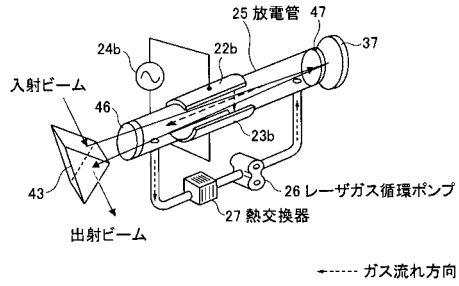
【図 5】



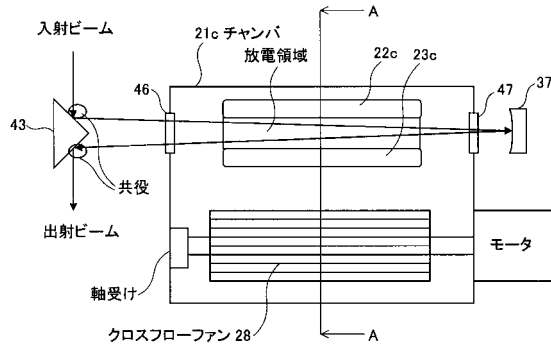
【図 4】



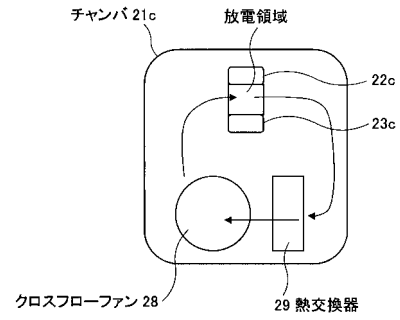
【図 6】



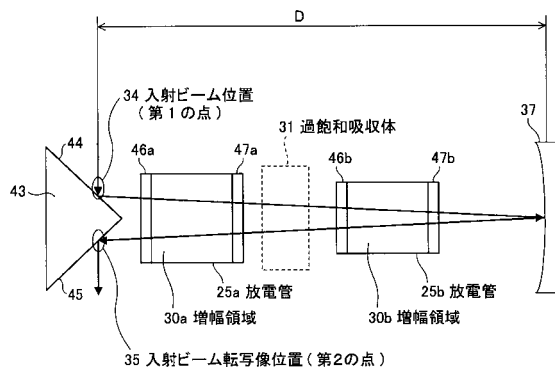
【図 9】



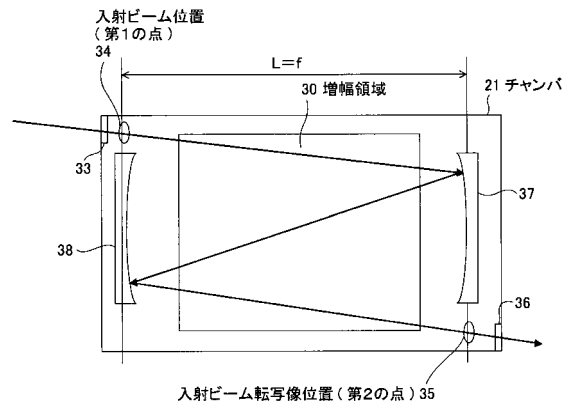
【図 10】



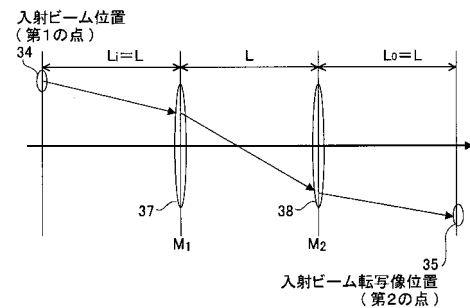
【図 11】



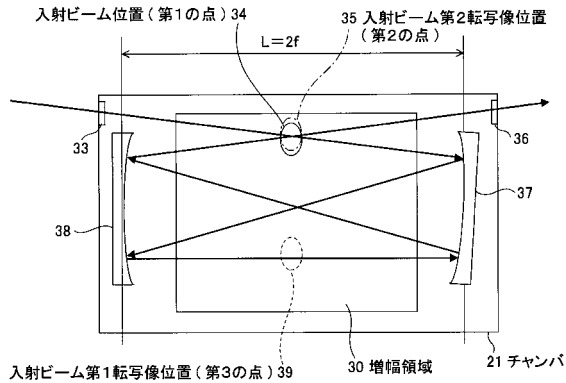
【図 12】



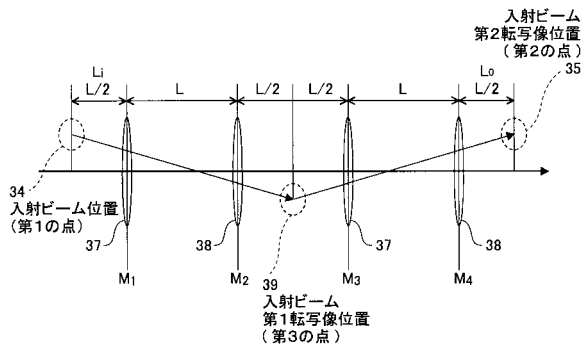
【図 13】



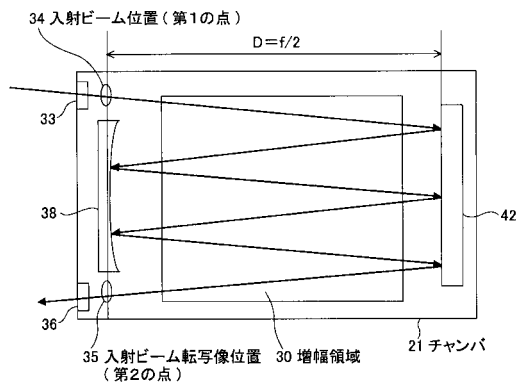
【 図 1 4 】



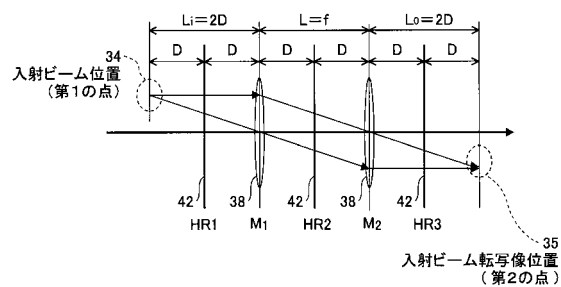
【 図 1 5 】



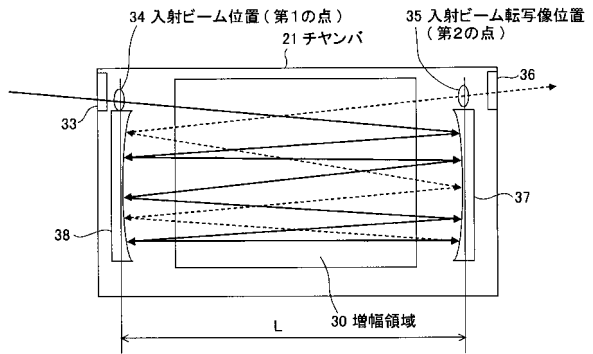
【 図 1 8 】



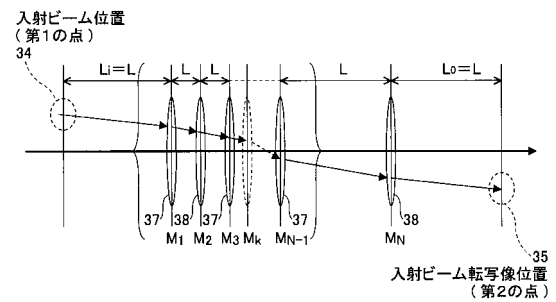
【 図 1 9 】



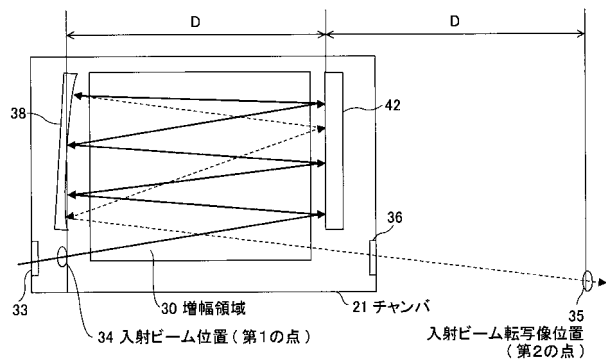
【 図 1 6 】



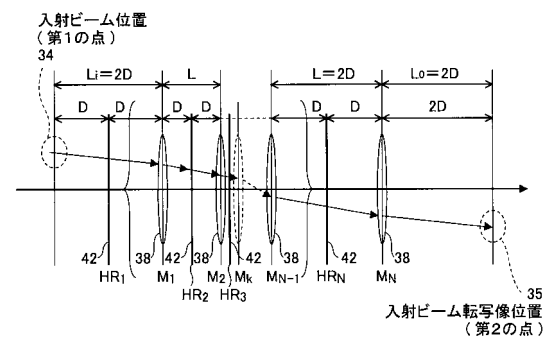
【 図 1 7 】



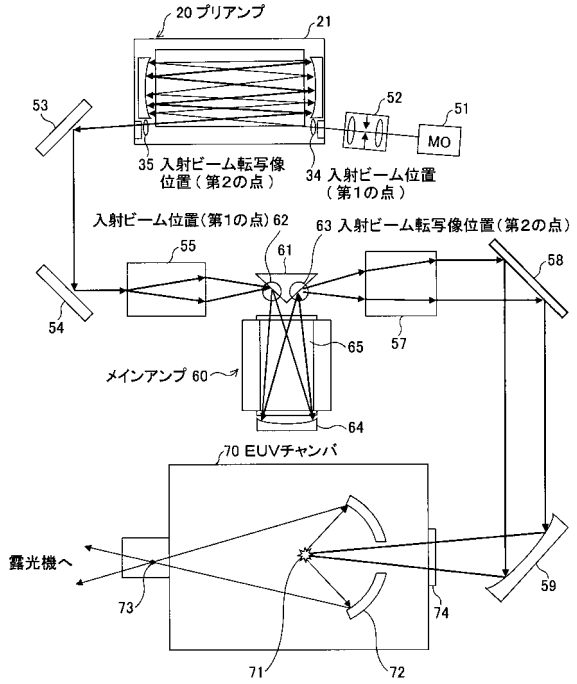
【 図 2 0 】



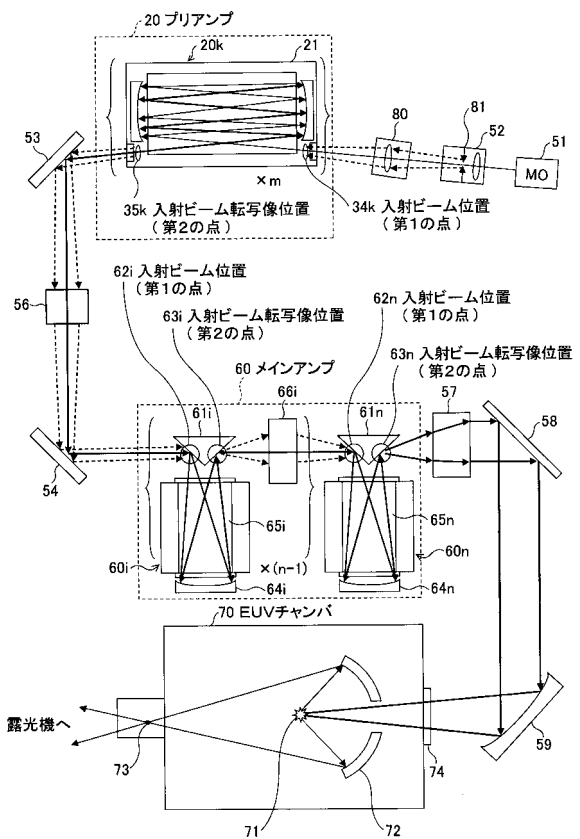
【 図 2 1 】



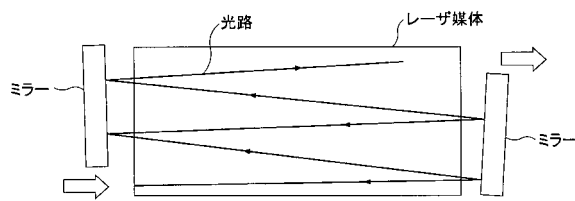
【 図 2 3 】



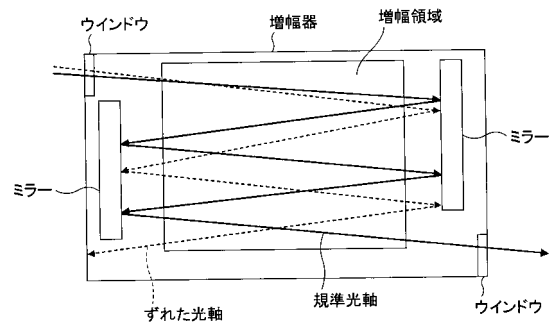
【 図 2 5 】



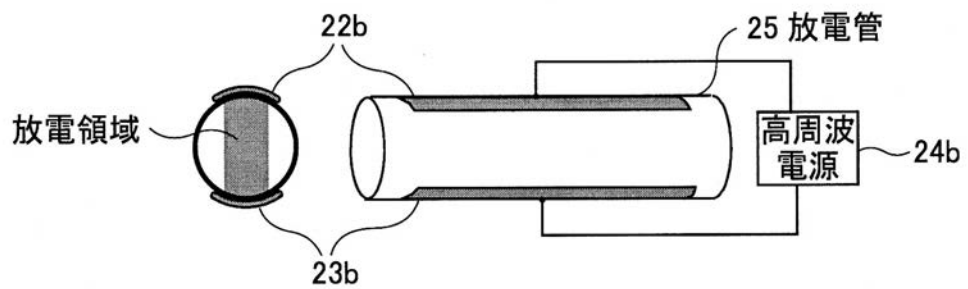
【図 26】



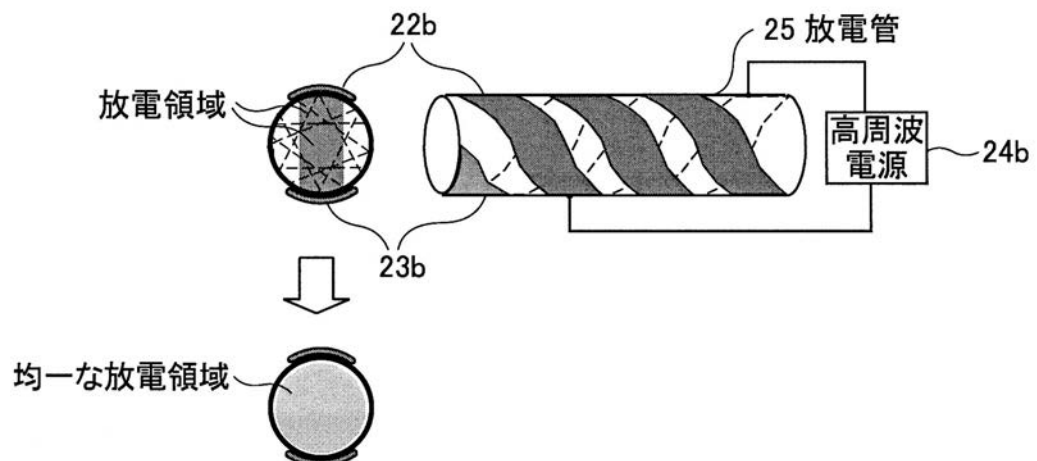
【図 27】



【図 7】



【図 8】



---

フロントページの続き

(72)発明者 若林 理

神奈川県平塚市万田１２００ ギガフォトン株式会社 平塚事業所内

審査官 古田 敦浩

(56)参考文献 米国特許出願公開第２００２／０１６７９７４（ＵＳ，Ａ１）

特開２００１－００７４２１（ＪＰ，Ａ）

特開２００８－０２８３１６（ＪＰ，Ａ）

特開２００８－０８５２９２（ＪＰ，Ａ）

特表２０００－５０６３１９（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)

H 0 1 S      3 / 0 0      -      3 / 3 0