

(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.

H01S 3/13 (2006.01)
H01S 3/23 (2006.01)

F 1

H01S 3/13
H01S 3/23

請求項の数 14 (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2010-1421 (P2010-1421)
 (22) 出願日 平成22年1月6日 (2010.1.6)
 (65) 公開番号 特開2010-186990 (P2010-186990A)
 (43) 公開日 平成22年8月26日 (2010.8.26)
 審査請求日 平成24年11月15日 (2012.11.15)
 (31) 優先権主張番号 特願2009-5771 (P2009-5771)
 (32) 優先日 平成21年1月14日 (2009.1.14)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(出願人による申告) 平成20年度 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「極端紫外線(EUV)露光システムの基盤技術開発」に関する委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(73) 特許権者 300073919
 ギガフォトン株式会社
 栃木県小山市大字横倉新田400番地
 (74) 代理人 100110777
 弁理士 宇都宮 正明
 (74) 代理人 100100413
 弁理士 渡部 溫
 (74) 代理人 100110858
 弁理士 柳瀬 瞳
 (72) 発明者 クリストフ ノバック
 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
 (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。

10

【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の点が、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の点が、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

20

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(CO₂)を含有するCO₂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の点から出力するプリアンプと、

前記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、前記プ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、前記プ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ー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、60 nm～45 nm の微細加工、さらには 32 nm 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 13 nm 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、ドライバー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 100 W を超える出力が要求されており、例えば、炭酸ガス（CO₂）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ーレーザ光を出力する CO₂ 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ーレーザ光としてはパルスレーザ光が使われるので、ドライバー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 CO₂ レーザ光を発生するレーザ発振器と、短パルス CO₂ レーザ光を増幅するレーザ光増幅器とを含んでいく。

【0006】

レーザ光増幅器は、二酸化炭素（CO₂）、窒素（N₂）、ヘリウム（He）、さらに、必要に応じて、水素（H₂）、一酸化炭素（CO）、キセノン（Xe）等を含有する CO₂ 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ーレーザ装置の 50

小型化が可能である。

【0008】

図26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。

【0009】

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27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ために、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27に点線で示すように、レーザ光が出力されなくなることがあった。

10

【0010】

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EUV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、EUV光が発生しないことが起り、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、EUV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。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

30

【0011】

【特許文献1】米国特許第5386431号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

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、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を提供することである。

40

【課題を解決するための手段】

【0013】

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、レーザ媒体内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。

【0014】

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

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】

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。

【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。

【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。

【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

10

20

30

40

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。

10

【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EUV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EUV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EUV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】

20

【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(CO₂)、窒素(N₂)、ヘリウム(He)、さらに、必要に応じて、水素(H₂)、一酸化炭素(CO)、キセノン(Xe)等を含有するCO₂レーザガスが用いられる。

30

【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。

40

【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

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からは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からはずれたときでも、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。

【0029】

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34における入射ビームの位置が基準光路40に対して誤差を有する場合でも、第2の点35における出射ビームの位置は基準光路40に対して略同一の誤差しか有さない。即ち、第1の点34における1mmの位置誤差は、第2の点35においても1mmの位置誤差しか生じさせない。

【0030】

また、第1の点34における入射ビームの角度が基準光路40に対して誤差を有する場合でも、第2の点35における出射ビームの角度は基準光路40に対して略同一の誤差しか有さない。例えば、10パスで30m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40に対して1mRadの誤差を有する場合を想定すると、出射位置は基準光路40に対して約30mm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40上の第2の点35を必ず通り、出射角度が基準光路40に対して1mRadだけの誤差を有する出射ビームが出力される。

【0031】

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30におけるレーザ光の光路が、設計された基準光路40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。

【0032】

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34と第2の点35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34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35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。

【0033】

レーザ光増幅器において、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。

【0034】

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37及び38の間に増幅領域30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34と第2の点35とが互いに共役であり、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に転写される光学システムが設けられていればよい。

【0035】

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22a及び23a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37a及び第2群の折返しミラー38a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(SF₆)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(CO₂)、窒素(N₂)、ヘリウム(He)、さらに、必要に応じて、水素(H₂)、一酸化炭素(CO)、キセノン(Xe)等を含有するCO₂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 = 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、HRミラープリズム43の反射面44に、45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、45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46を透過し、増幅領域30を通過して増幅され、さらに他端の第2のウインドウ47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31を通過する。

【 0 0 4 3 】

吸収体31を通過したレーザ光は、凹面HRミラー37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31を通過し、第2のウインドウ47を透過して増幅領域30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46を透過して、HRミラープリズム43の他方の反射面45に到達して、45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）34と入射ビーム転写像位置（第2の点）35とは、互いに共役の関係にあるので、反射面44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、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。

【 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22b及び23bが、レーザ媒体が充填された放電管25を挟むように配置されている。高周波（RF）電源24bが高周波電圧を電極22bと電極23bとの間に印加すると、電極22b及び23b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22bと電極23b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、HRミラープリズム43によって反射されて第1のウインドウ46を介して放電管25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47を透過して凹面HRミラー37によって反射され、第2のウインドウ47を介して再び放電管25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46を透過してHRミラープリズム43に入射し、HRミラープリズム43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25内のレーザ媒体は、レーザガス循環ポンプ26によって循環され、熱交換器27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22b及び23bの各々が、スパイラル形状を有している。これにより、電極22bと電極23b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10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10に示すように、レーザ媒体が充填されたチャンバ21c内に、1対の電極22c及び23cが配置されている。高周波（RF）電源が高周波電圧を電極22cと電極23cとの間に印加すると、電極22c及び23c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 22c と電極 23cとの間に放電領域が形成される。

【0050】

これにより、レーザ媒体が励起されて、HRミラーブリズム43によって反射されて第1のウインドウ46を介してチャンバ21c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47を透過して凹面HRミラー37によって反射され、第2のウインドウ47を介して再びチャンバ21c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46を透過してHRミラーブリズム43に入射し、HRミラーブリズム43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21c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28によって循環され、熱交換器29によって冷却される。10

【0051】

図11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11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25を複数の放電管（図11においては、2つの放電管25a及び25b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11においては、2つの増幅領域30a及び30b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25a及び25bの直径を、放電管25a及び25bを通過するレーザ光の径に合わせることにより、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31は、放電管25aと放電管25bとの間に配置することができる。20

【0052】

この場合においても、シードレーザ光（入射ビーム）がHRミラーブリズム43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を凹面HRミラー37の曲率半径Rと略同じにすることにより（ $D = R = 2f$ ）、入射ビーム位置（第1の点）34における入射ビームの像を、HRミラーブリズム43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。

【0053】

図11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HR（高反射）ミラーブリズム43の反射面44に、シードレーザ光が45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、45度よりも僅かに大きな反射角で反射されて、放電管25aの第1のウインドウ46aを透過し、増幅領域30aを通過して増幅され、さらに第2のウインドウ47a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31を通過する。さらに、可飽和吸収体31を通過したレーザ光は、放電管25bの第1のウインドウ46bを透過し、増幅領域30bを通過して増幅され、さらに第2のウインドウ47bを透過する。30

【0054】

第2のウインドウ47bを透過したレーザ光は、凹面HRミラー37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30bを通過することにより増幅される。増幅領域30bを通過したレーザ光は、再び可飽和吸収体31を通過した後に、増幅領域30aを通過することにより増幅され、HRミラーブリズム43の他方の反射面45に到達して、45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

【0055】

ここで、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とは、互いに共役の関係にあるので、反射面44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、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。

【0056】

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 3 1 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。

【 0 0 5 7 】

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 1 2 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、CO₂ 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 3 0 が形成される。また、増幅領域 3 0 を挟んで配置される折返しミラー 3 7 及び 3 8 は、いずれも凹面 H R ミラーである。

【 0 0 5 8 】

シードレーザ光（入射ビーム）は、入射ウインドウ 3 3 を斜めに透過して、増幅領域 3 0 を通過して増幅される。シードレーザ光は、折返しミラー 3 7 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 3 0 において増幅される。次いで、折返しミラー 3 7 と対向配置された折返しミラー 3 8 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 3 0 において増幅され、出射ウインドウ 3 6 を透過して出力される。

【 0 0 5 9 】

図 1 2 に示す折返しミラー 3 7 及び 3 8 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 3 3 の近傍に設定された入射ビーム位置（第 1 の点）3 4 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 3 6 の近傍に設定された入射ビーム転写像位置（第 2 の点）3 5 に転写され、入射ビーム転写像が結像する。

【 0 0 6 0 】

図 1 3 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 M 1 及び M 2 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 M 1 の主点と合成レンズ系の前側主点との間の距離 Z H は、次式（2）で表される。

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

$$Z H = f_1 \cdot t / (f_1 + f_2 - t) \quad \dots \quad (2)$$

ここで、f 1 は前側レンズ M 1 の焦点距離、f 2 は後側レンズ M 2 の焦点距離、t は前側レンズ M 1 と後側レンズ M 2 との間の距離である。

【 0 0 6 1 】

物体の位置と前側レンズ M 1 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。

$$M = (Z H + t - F) / F \quad \dots \quad (3)$$

【 0 0 6 2 】

そこで、図 1 3 に示すように、図 1 2 に示す折返しミラー 3 7 及び 3 8 を、集光能力を有する2つの薄いレンズ M 1 及び M 2 で表した光学システムを想定する。図 1 3 において、レンズ M 1 とレンズ M 2 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）3 4 と前側レンズ M 1 との間の距離 L_i を L と等しくし、入射ビーム位置（第 1 の点）3 4 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）3 5 と後側レンズ M 2 との間の距離 L_o 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 M 1 及び M 2 が、同じ焦点距離 f = R / 2 を有するものとする。

【 0 0 6 3 】

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。

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

$$Z H = f \cdot L / (2f - L) \quad \dots \quad (5)$$

$$M = 1 = (Z H + L - F) / F \quad \dots \quad (6)$$

【 0 0 6 4 】

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CO₂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CO₂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_1 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。

【0071】

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と重なるようになることができる。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Loは、 $L/2$ となる。10

【0072】

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。

【0073】

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。

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

【0074】

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

【0075】

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。

【0076】

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。40

【0077】

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。10

【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CO₂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20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）。30

【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。40

【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M₁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、50

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。

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

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

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

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1000mm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11000mmとなり、曲率半径 $R (= 2f)$ が約22000mm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CO₂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が異なる。

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、出射ウインドウ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。

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

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

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

【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CO₂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、両者の正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】

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として、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HR₁)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M₁との間の距離L_i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250

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。

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

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

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

【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, \dots, 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 7200mm 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挿角、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)。

【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 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ーレーザ装置として用いられる。このドライバーレーザ装置は、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ー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ーレーザ装置は、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ー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ーレーザ装置は、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

—光学系 5 5 及び 5 7 と、メインアンプ 6 0 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 5 9 に出力する。軸外放物面ミラー 5 9 は、増幅されたレーザ光を E U V チャンバー 7 0 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 7 1 と一致する。

【 0 1 2 0 】

マスター オシレータ 5 1 は、シードレーザ光として、例えば、繰り返し周波数 1 0 0 k Hz、及び、パルス時間幅約 2 0 n s で、低次の空間横モードを有する炭酸ガス (C O₂) 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 5 2 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 2 0 の入射ウインドウに入射する。10

【 0 1 2 1 】

プリアンプ 2 0 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述べた通り、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 2 0 は、入射ビームの光路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の転写像を、出射ビームの光路上の第 2 の点 3 5 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

【 0 1 2 2 】

プリアンプ 2 0 から出力されたレーザ光は、H R ミラー 5 3 及び 5 4 によって光路を変更され、リレー光学系 5 5 に入射する。リレー光学系 5 5 は、レーザ光がメインアンプ 6 0 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 6 0 における直角プリズム 6 1 の第 1 の反射面に 4 5 度よりも僅かに大きな入射角でレーザ光を入射させる。

【 0 1 2 3 】

メインアンプ 6 0 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 6 1 の反射面は高反射面となっていて、プリアンプ 2 0 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 6 0 の増幅領域 6 5 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 6 5 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 H R ミラー 6 4 に入射して反射され、増幅領域 6 5 に再度入射して増幅され、直角プリズム 6 1 の第 2 の反射面に 4 5 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 6 0 から出力される。30

【 0 1 2 4 】

メインアンプ 6 0 において、直角プリズム 6 1 の第 1 の反射面に入射ビーム位置（第 1 の点）6 2 が定められており、直角プリズム 6 1 の第 2 の反射面に入射ビーム転写像位置（第 2 の点）6 3 が定められている。メインアンプ 6 0 の光学システムは、第 1 の点 6 2 におけるシードレーザ光の像を第 2 の点 6 3 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 6 0 における入射ビームの光軸変動は、拡大されること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 2 0 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

【 0 1 2 5 】

メインアンプ 6 0 によって増幅されたレーザ光は、リレー光学系 5 7 に入射する。リレー光学系 5 7 は、レーザ光を軸外放物面ミラー 5 9 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 5 7 を通過したレーザ光は、H R ミラー 5 8 によって高反射率で反射されて、軸外放物面ミラー 5 9 に入射する。軸外放物面ミラー 5 9 によって反射されたレーザ光は、ウインドウ 7 4 を介して E U V 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EUV集光ミラー72が、発生したプラズマから放射されるEUV光を中間集光点(IF)73に集光する。中間集光点73に集光されたEUV光は、露光機に供給される。

【0126】

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、EUV光のエネルギー安定性が向上する。

10

【0127】

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。

【0128】

(実施形態4)

図24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EUV光源装置の構成を示す図である。図24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、HR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、EUVチャンバ70内のプラズマ発光点71と一致する。

20

【0129】

第4の実施形態に係るドライバレーザ装置は、図23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

【0130】

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20kにおいては、入射ウインドウの近傍に位置する第1の点34k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35kに結像させるよう、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らない。

40

【0131】

図24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20k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20kの第2の点35k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20k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等に示した第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ならない。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 6 0 によって増幅されたレーザ光は、リレー光学系 5 7 に入射する。

【 0 1 3 9 】

第 5 の実施形態に係るドライバレーザ装置は、図 2 4 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 2 5 に示すように、空間フィルタ 5 2 とプリアンプ 2 0 との間に挿入されたリレー光学系 8 0 は、空間フィルタ 5 2 のピンホール 8 1 におけるレーザ光の像を、プリアンプ 2 0 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。

【 0 1 4 0 】

次に、多段化されたプリアンプ 2 0 と多段化されたメインアンプ 6 0 との間に挿入されたリレー光学系 5 6 は、プリアンプ 2 0 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 6 0 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

【 0 1 4 1 】

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 】

【 0 1 4 2 】

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

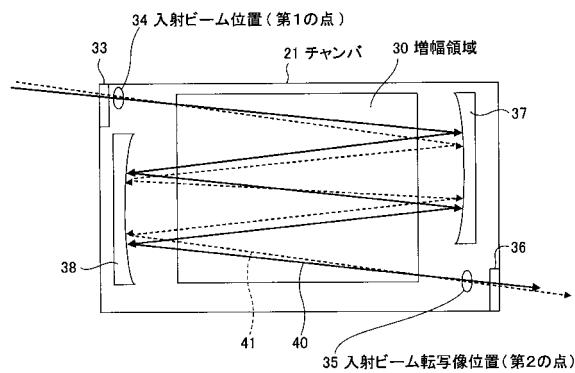
【 符号の説明 】

【 0 1 4 3 】

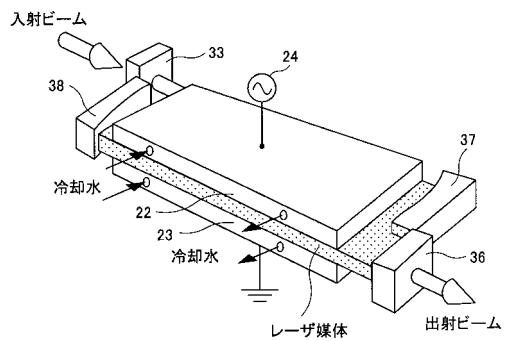
2 0 . . . プリアンプ、 2 1 、 2 1 c . . . チャンバ、 2 2 、 2 3 . . . 平板電極、 2 2 a 、 2 3 a . . . 円筒電極、 2 2 b 、 2 2 c 、 2 3 b 、 2 3 c . . . 電極、 2 4 、 2 4 a 、 2 4 b . . . 高周波電源、 2 5 、 2 5 a 、 2 5 b . . . 放電管、 2 6 . . . レーザガス循環ポンプ、 2 7 、 2 9 . . . 熱交換器、 2 8 . . . クロスフローファン、 3 0 、 3 0 a 、 3 0 b . . . 増幅領域、 3 1 . . . 可飽和吸収体、 3 3 . . . 入射ウインドウ、 3 4 、 6 2 . . . 入射ビーム位置（第 1 の点）、 3 5 、 6 3 . . . 入射ビーム転写像位置（第 2 の点）、 3 6 . . . 出射ウインドウ、 3 7 、 3 7 a 、 3 8 、 3 8 a . . . 折返しミラー（凹面 HR ミラー）、 3 9 . . . 第 3 の点、 4 0 . . . 基準光路、 4 1 . . . 光路、 4 2 . . . 平面 HR ミラー、 4 3 . . . HR ミラープリズム、 4 4 、 4 5 . . . 反射面、 4 6 . . . 第 1 のウインドウ、 4 7 . . . 第 2 のウインドウ、 5 1 . . . マスター オシレータ、 5 2 . . . 空間フィルタ、 5 3 、 5 4 、 5 8 . . . HR ミラー、 5 5 、 5 6 、 5 7 、 6 6 、 8 0 . . . リレー光学系、 5 9 . . . 軸外放物面ミラー、 6 0 . . . メインアンプ、 6 1 . . . 直角プリズム、 6 4 . . . 凹面 HR ミラー、 6 5 . . . 増幅領域、 7 0 . . . EUV チャンバ、 7 1 . . . プラズマ発光点、 7 2 . . . EUV 集光ミラー、 7 3 . . . 中間集光点（ IF ）、 7 4 . . . ウインドウ、 8 1 . . . ピンホール

30

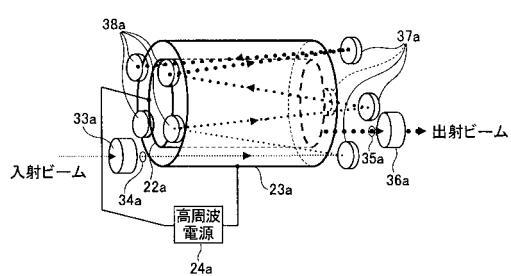
【図1】



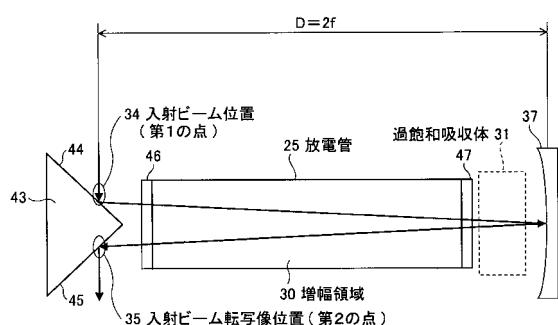
【図2】



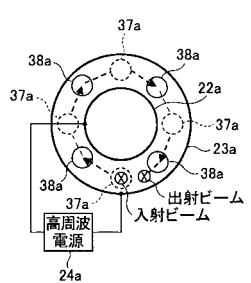
【図3】



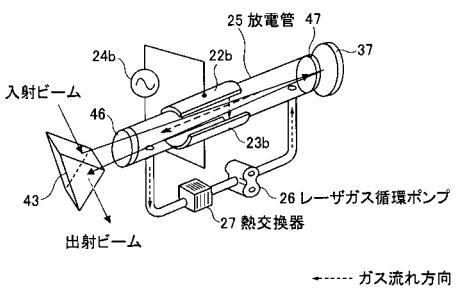
【図5】



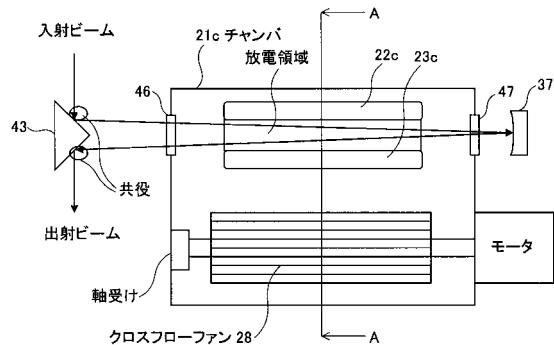
【図4】



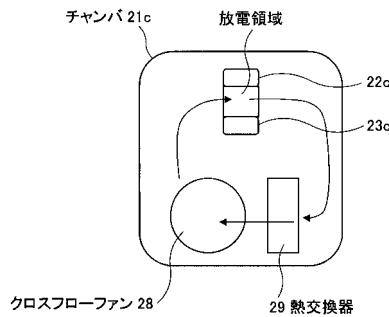
【図6】



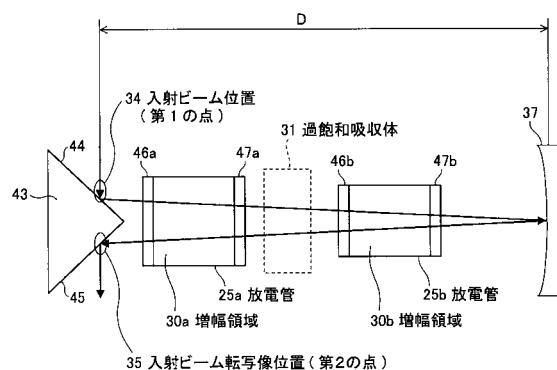
【図9】



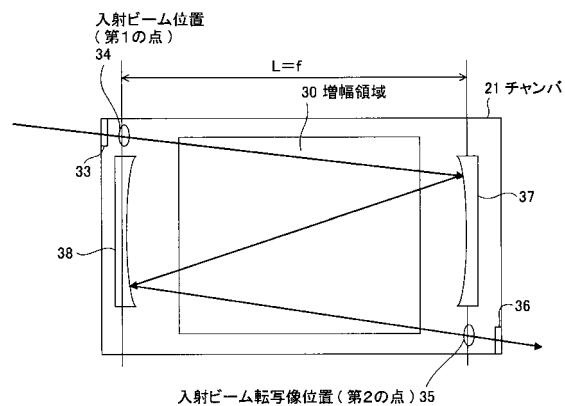
【図10】



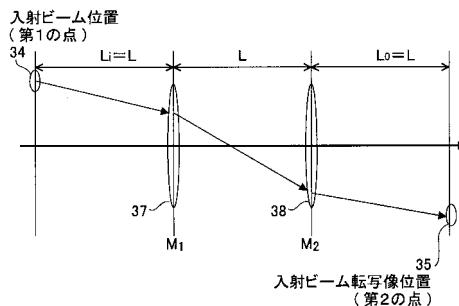
【図11】



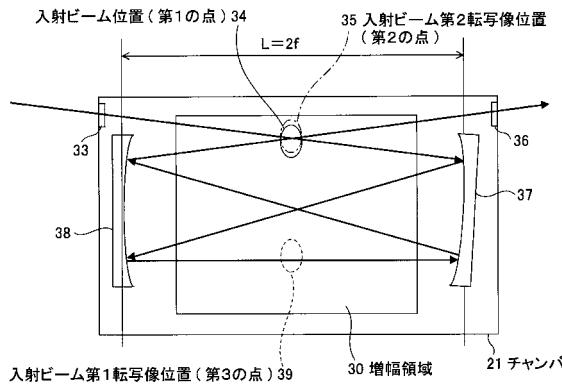
【図12】



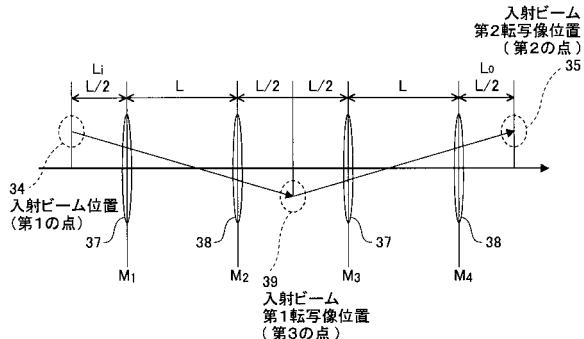
【図13】



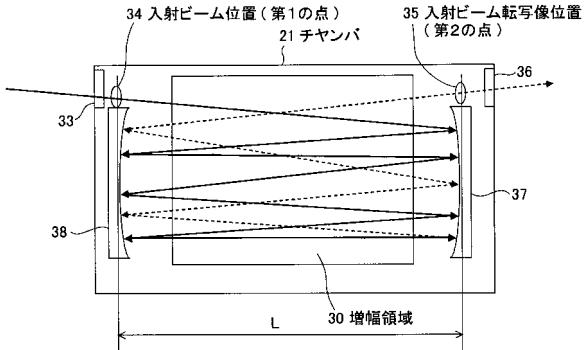
【図14】



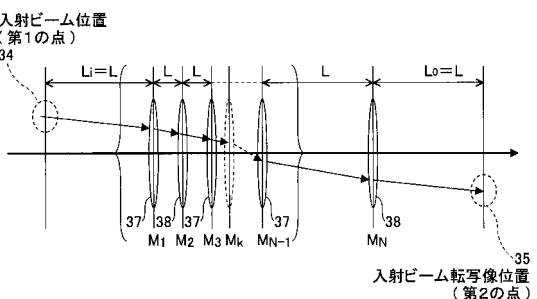
【図15】



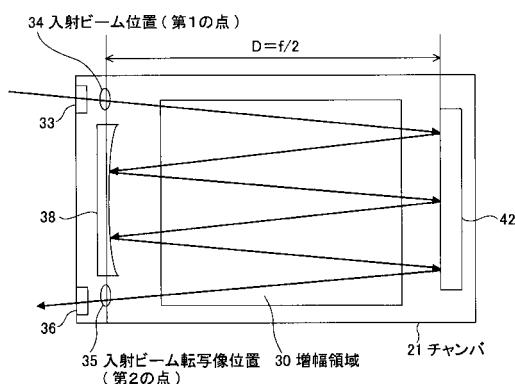
【図16】



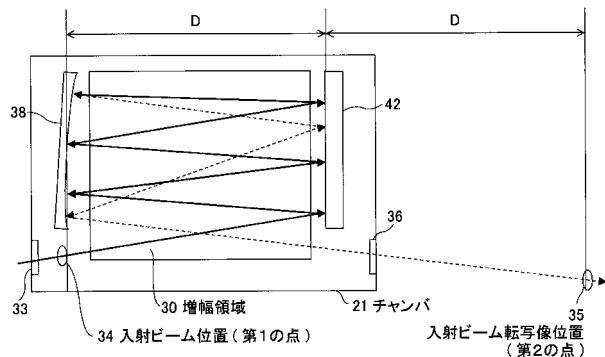
【図17】



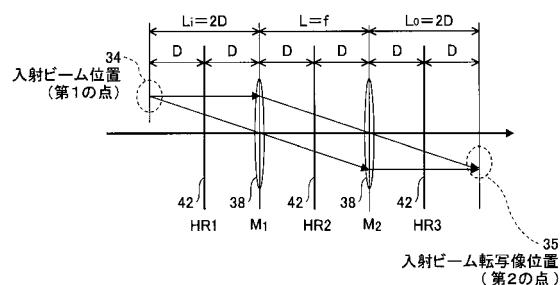
【図18】



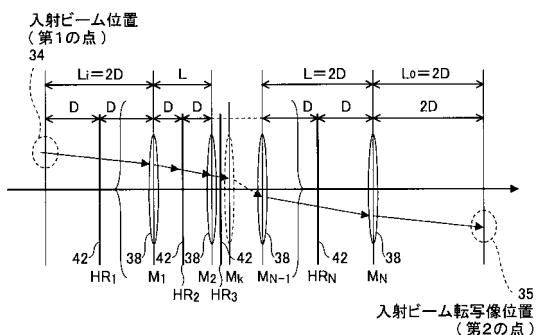
【図20】



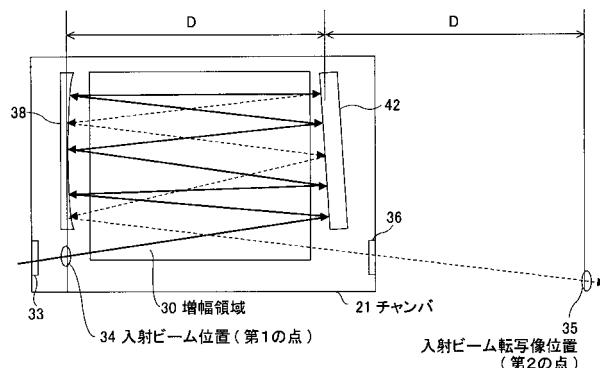
【図19】



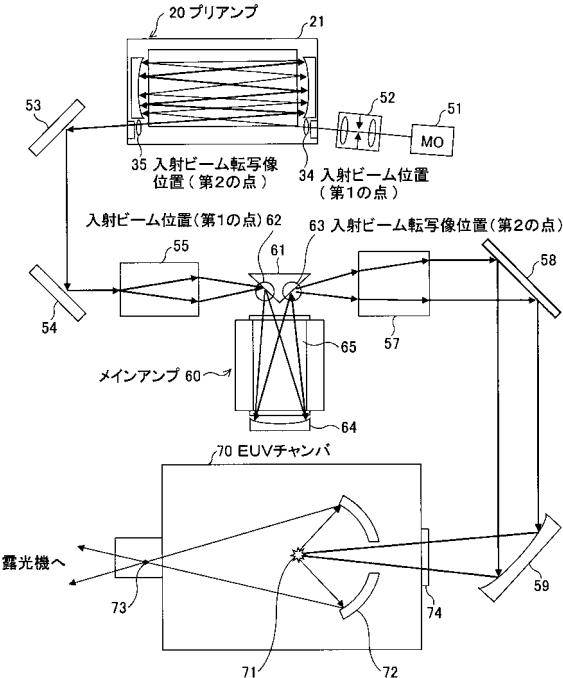
【図21】



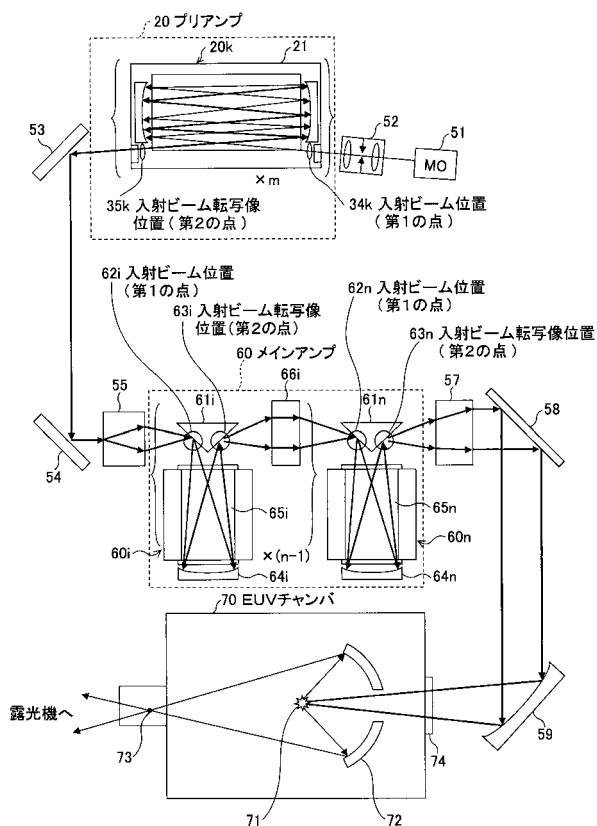
【図22】



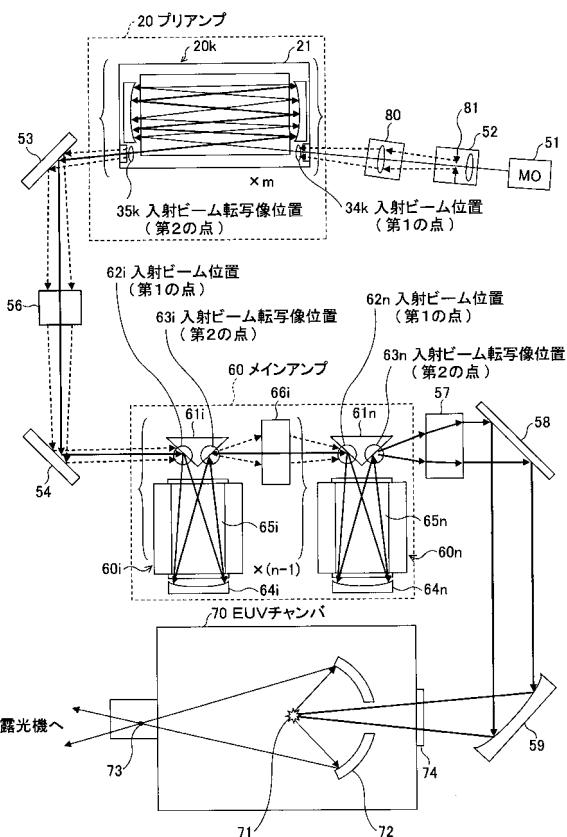
【 図 2 3 】



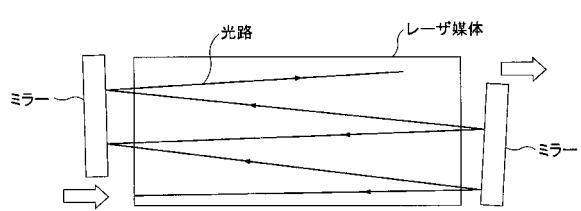
【図24】



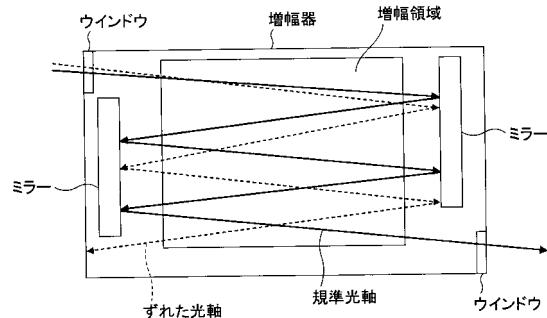
【 図 25 】



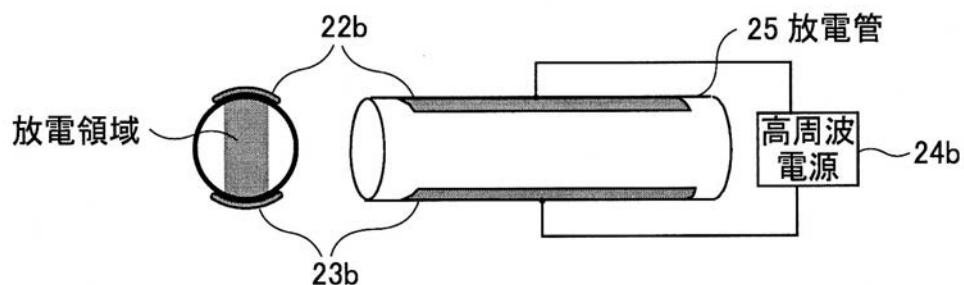
【図26】



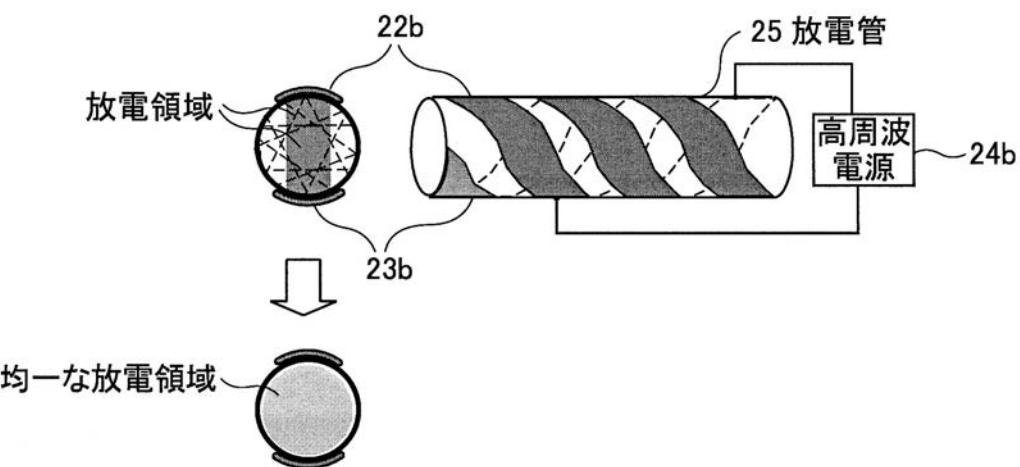
【図27】



【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)

H01S 3/00 - 3/30