(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第4232130号
(P4232130)

(45)発行日　平成21年3月4日(2009.3.4)　(24)登録日　平成20年12月19日(2008.12.19)

(51)Int.Cl.			F I		
H01L	21/027	(2006.01)	H01L	21/30	515B
G02F	1/37	(2006.01)	H01L	21/30	516D
G03F	7/20	(2006.01)	H01L	21/30	527
H01S	3/06	(2006.01)	G02F	1/37	
H01S	3/10	(2006.01)	G03F	7/20	502

請求項の数 47　(全 50 頁)　最終頁に続く

(21)出願番号　特願平11-63256
(22)出願日　平成11年3月10日(1999.3.10)
(65)公開番号　特開2000-200747(P2000-200747A)
(43)公開日　平成12年7月18日(2000.7.18)
審査請求日　平成18年1月10日(2006.1.10)
(31)優先権主張番号　特願平10-59453
(32)優先日　平成10年3月11日(1998.3.11)
(33)優先権主張国　日本国(JP)
(31)優先権主張番号　特願平10-130580
(32)優先日　平成10年5月13日(1998.5.13)
(33)優先権主張国　日本国(JP)
(31)優先権主張番号　特願平10-227333
(32)優先日　平成10年8月11日(1998.8.11)
(33)優先権主張国　日本国(JP)

(73)特許権者　000004112
株式会社ニコン
東京都千代田区丸の内３丁目２番３号
(74)代理人　100092897
弁理士　大西　正悟
(72)発明者　大槻　朋子
東京都千代田区丸の内３丁目２番３号　株式会社ニコン内
(72)発明者　大和　壮一
東京都千代田区丸の内３丁目２番３号　株式会社ニコン内
審査官　多田　達也

最終頁に続く

(54)【発明の名称】レーザ装置並びにこのレーザ装置を用いた光照射装置および露光方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のパルス状のレーザ光を発生させるレーザ光発生部と、
前記レーザ光発生部から発生させるレーザ光の発振波長を制御する発振波長制御手段と、
前記レーザ光発生部から入射される単一波長のパルス光を複数に分岐する光分岐手段と、
前記光分岐手段から分岐されて出力される複数の分岐光をそれぞれ複数回増幅する複数のファイバー光増幅器を有する複数の光増幅器と、
前記複数の光増幅器により増幅された分岐光を非線形光学結晶を用いて波長変換する波長変換部とを備え、
前記レーザ光発生部は、パルス光を発生する光源と、当該パルス光の一部を切り出してパルス幅を狭める光変調器とを有して、パルス幅が狭められたパルス光が前記光分岐手段に入射され、
前記光分岐手段は、前記レーザ光発生部から入射された前記パルス光を複数に分岐するとともに、分岐された各パルス光が互いに時間的に重ならない状態の分岐光として出射し、
空間的コヒーレンスが低い単一波長の紫外光を発生することを特徴とするレーザ装置。
【請求項２】

前記光分岐手段は、前記レーザ光発生部から入射されたパルス光を複数に並列分岐するスプリッタを有するとともに、前記スプリッタの射出側には、互いに長さの異なるファイバーが設けられ、前記互いに長さの異なるファイバーの出力端において、前記並列分岐された各パルス光が互いに時間的に重ならない状態の分岐光となるように構成したことを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。

【請求項３】

前記互いに長さの異なるファイバーは、前記出力端における前記複数の分岐光の遅延間隔が、前記スプリッタに入射するパルス光の繰り返し周波数と前記スプリッタにより並列分岐される分岐光路数との積の逆数となるようにその長さがそれぞれ定められ、それにより前記ファイバーのそれぞれの出力端における前記複数の分岐光の遅延間隔が略一定間隔となることを特徴とする請求項２に記載のレーザ装置。

【請求項４】

前記光分岐手段は、時分割光分岐手段（Time Division Multiplexer）を有し、前記レーザ光発生部から入射されたパルス光を時分割して複数に分岐することにより、前記分岐された各パルス光が互いに時間的に重ならない状態の分岐光となるように構成したことを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。

【請求項５】

前記光増幅器はその出力端におけるファイバー出力端部のコアがテーパ状に広がって形成されることを特徴とする請求項１～４のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項６】

前記光増幅器はその出力端におけるファイバー出力端部に前記増幅したレーザ光を透過する窓部材が設けられることを特徴とする請求項１～５のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項７】

前記光増幅器は、エルビウム・ドープ・ファイバー光増幅器を有することを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。

【請求項８】

前記光増幅器は、エルビウムおよびイットリビウムをともにドープしたファイバー光増幅器を有することを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。

【請求項９】

前記光増幅器は、前記紫外光の出力、あるいは前記増幅した複数の分岐光の各出力を調整するために、前記並列に設けられる複数のファイバー光増幅器の各々の励起強度を制御するファイバー出力制御手段を有することを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。

【請求項１０】

前記光増幅器は、前記増幅した複数の分岐光をそれぞれ出力する複数のファイバー出力端が１つに束ねられる、もしくは複数の出力群に分けられ、かつ出力群毎に束ねられることを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。

【請求項１１】

前記光増幅器は、前記複数のファイバー出力端の一部を束ねた第１の出力群と、前記第１の出力群を除いた残りのファイバー出力端を１つに束ねる、もしくは複数の出力群に略均等に分けて各々束ねた第２の出力群とを有することを特徴とする請求項１０に記載のレーザ装置。

【請求項１２】

前記光増幅器は、前記出力群に各分岐光を透過する窓部材を有することを特徴とする請求項１０又は１１に記載のレーザ装置。

【請求項１３】

前記光増幅器は、前記複数のファイバー出力端が複数の出力群に分けられて各々束ねられ、前記波長変換部は前記出力群ごとに設けられることを特徴とする請求項１０～１２のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項１４】

前記波長変換部の入力側には、前記光増幅器から射出されるレーザ光を前記非線形光学結晶に集光して入射させる集光光学素子を有することを特徴とする請求項１～１３のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項１５】

前記集光光学素子は、前記光増幅器の出力群ごとに束ねられた出力端部を、それぞれの出力群ごとにレンズとすることにより設けることを特徴とする請求項１４に記載のレーザ装置。

【請求項１６】

前記集光光学素子は、前記増幅したレーザ光を出力する前記光増幅器のファイバー出力端にそれぞれ設けられることを特徴とする請求項１４に記載のレーザ装置。

【請求項１７】

前記集光光学素子は、前記光増幅器の複数のファイバー出力端部をそれぞれレンズとすることにより設けることを特徴とする請求項１６に記載のレーザ装置。

【請求項１８】

前記レーザ光発生部は、波長が１．５μｍ付近の単一波長のレーザ光を発生し、

前記波長変換部は、前記光増幅器から出力される前記波長１．５μｍ付近の基本波を、８倍高調波又は１０倍高調波の紫外光として発生させることを特徴とする請求項１～１７のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項１９】

前記レーザ光発生部は、１．５１μｍ～１．５９μｍの範囲内に発振波長を持つＤＦＢ半導体レーザもしくはファイバーレーザを有し、

前記波長変換部は、発生波長が１８９ｎｍ～１９９ｎｍの範囲内である８倍高調波を発生することを特徴とする請求項１～１７のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項２０】

前記レーザ光発生部は、１．５４４μｍ～１．５５２μｍの範囲内に発振波長を持つレーザ光を発生し、

前記波長変換部は、発生波長がＡｒＦエキシマレーザの発振波長と略同一波長である１９３ｎｍ～１９４ｎｍの範囲内の８倍高調波を発生することを特徴とする請求項１８又は１９に記載のレーザ装置。

【請求項２１】

前記波長変換部は、前記基本波と、前記基本波の７倍高調波とから、和周波発生により前記基本波の８倍高調波を発生する第１の非線形光学結晶を有することを特徴とする請求項１８～２０のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項２２】

前記波長変換部は、

前記基本波から２次高調波発生により２倍高調波を発生する第２の非線形光学結晶と、

前記基本波と前記２倍高調波とから和周波発生により前記基本波の３倍高調波を発生する第３の非線形光学結晶と、

前記２倍高調波の２次高調波発生により前記基本波の４倍高調波を発生する第４の非線形光学結晶と、

前記基本波の３倍高調波と前記基本波の４倍高調波とから和周波発生により前記基本波の７倍高調波を発生する第５の非線形光学結晶とを有することを特徴とする請求項２１に記載のレーザ装置。

【請求項２３】

前記第１～第４の非線形光学結晶はLiB_3O_5（ＬＢＯ）結晶であり、

前記第５の非線形光学結晶はβ－BaB_2O_4（ＢＢＯ）結晶もしくは$CsLiB_6O_{10}$（ＣＬＢＯ）結晶であることを特徴とする請求項２２に記載のレーザ装置。

【請求項２４】

前記レーザ光発生部は、１．５１μｍ～１．５９μｍの範囲内に発振波長を持つＤＦＢ半導体レーザもしくはファイバーレーザを有し、

前記波長変換部は、発生波長が１５１ｎｍ～１５９ｎｍの範囲内である１０倍高調波を発生することを特徴とする請求項１～１７のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項２５】

前記レーザ光発生部は、１．５７μｍ～１．５８μｍの範囲内に発振波長を持つレーザ光を発生し、

前記波長変換部は、発生波長がF_2レーザの発振波長と略同一波長である１５７ｎｍ～１５８ｎｍの範囲内の１０倍高調波を発生することを特徴とする請求項１～１７のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項２６】

前記レーザ光発生部は、波長が１．１μｍ付近の単一波長のレーザ光を発生し、

前記波長変換部は、前記光増幅器から出力される前記波長１．１μｍ付近の基本波を、７倍高調波の紫外光として発生させることを特徴とする請求項１～１７のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項２７】

前記レーザ光発生部は、１．０３μｍ～１．１２μｍの範囲内に発振波長を持つＤＦＢ半導体レーザもしくはファイバーレーザを有し、

前記波長変換部は、発生波長が１４７ｎｍ～１６０ｎｍの範囲内である７倍高調波を発生することを特徴とする請求項１～１７のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項２８】

前記レーザ光発生部は、１．０９９μｍ～１．１０６μｍの範囲内に発振波長を持つレーザ光を発生し、

前記波長変換部は、発生波長がF_2レーザの発振波長と略同一波長である１５７ｎｍ～１５８ｎｍの範囲内の７倍高調波を発生することを特徴とする請求項２６又は２７に記載のレーザ装置。

【請求項２９】

前記レーザ光発生部は、イットリビウム・ドープ・ファイバーレーザを有することを特徴とする請求項２６～２８のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項３０】

前記複数のファイバー光増幅器の少なくとも一つの入射側に光分岐手段を更に備え、前記光分岐手段で複数に分割されるパルス光がその後段に配置されるファイバー光増幅器に入射することを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。

【請求項３１】

前記分割された複数のパルス光をそれぞれ遅延させて前記光分岐手段の後段に配置されるファイバー光増幅器に入射させる遅延手段を更に備えたことを特徴とする請求項３０に記載のレーザ装置。

【請求項３２】

前記複数の分岐光をそれぞれ増幅する前記複数のファイバー光増幅器のうち少なくとも最終段のファイバー光増幅器は大モード径ファイバーであることを特徴とする請求項３０又は３１に記載のレーザ装置。

【請求項３３】

前記大モード径ファイバーはＺＢＬＡＮファイバーであることを特徴とする請求項３１に記載のレーザ装置。

【請求項３４】

前記波長変換部はＮＣＰＭ（Non-Critical Phase Matching）で使用される非線形光学結晶を含むことを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。

【請求項３５】

前記波長変換部は温度制御される非線形光学結晶を含むことを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。

【請求項３６】

前記レーザ光発生部と前記波長変換部との間における光の波長幅の広がりを抑制する光

学装置を更に備えることを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。
【請求項３７】
前記光学装置はその少なくとも一部が前記レーザ光発生部と前記波長変換部との間に配置されることを特徴とする請求項３６に記載のレーザ装置。
【請求項３８】
前記光学装置の少なくとも一部は前記複数のファイバー光増幅器の間に配置されることを特徴とする請求項３６に記載のレーザ装置。
【請求項３９】
前記光学装置は狭帯域フィルタ及びアイソレータの少なくとも一方を含むことを特徴とする請求項３６～３８のいずれか一項に記載のレーザ装置。
【請求項４０】
前記複数の分岐光の各光路に配置された前記複数のファイバー光増幅器において、光学的に最も下流に配置されるファイバー光増幅器のファイバーはフッ化物系ファイバーであることを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。
【請求項４１】
前記光増幅器はその少なくとも一部がユニットとして交換可能であることを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。
【請求項４２】
前記レーザ光発生部と前記光増幅器との少なくとも一方に接続され、前記紫外光の発振特性を調整するための調整装置を更に備え、前記発振特性は、前記紫外光の強度、中心波長、波長幅、および発振間隔の少なくとも一つを含むことを特徴とする請求項１に記載のレーザ装置。
【請求項４３】
前記調整装置は、前記紫外光と、前記紫外光と波長が異なる光との少なくとも一方の検出によって得られる情報に基づいて調整することを特徴とする請求項４２に記載のレーザ装置。
【請求項４４】
請求項１～４３のいずれか一項に記載のレーザ装置と、
前記レーザ装置から発生される紫外光を物体に導く光学系とを備え、
前記光学系を介して前記紫外光を前記物体に照射することを特徴とする光照射装置。
【請求項４５】
前記紫外光の照射によって、前記物体上のパターンの検出、前記物体の加工、あるいは前記物体へのパターン像の形成を行うことを特徴とする請求項４４に記載の光照射装置。
【請求項４６】
前記物体は、デバイス製造工程で使用される基板であることを特徴とする請求項４５に記載の光照射装置。
【請求項４７】
請求項４６に記載の光照射装置を用いて、前記紫外光をマスクに照射するとともに、前記マスクを介して前記紫外光で前記基板を露光することを特徴とする露光方法。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
【発明の属する技術分野】
本発明は、レーザ装置に係り、特に半導体素子、液晶表示素子、撮像素子（ＣＣＤなど）、及び薄膜磁気ヘッドなどのマイクロデバイスを製造するフォトリソグラフィ工程で使用される露光装置用光源のように、低コヒーレンスでスペックルの発生を抑制することができる紫外光を発生することが可能なレーザ装置及びこのようなレーザ装置を用いた露光装置に関する。
【０００２】
【従来の技術】
情報機器の進歩に伴い、半導体集積回路には機能の充実、記憶容量の向上、小型化などが

求められており、そのためには集積回路の集積度を上げる必要がある。この集積度を上げるためには個々の回路パターンを小さくすればよいわけであるが、回路の最小パターン寸法は、一般的には製造過程で使用される露光装置の性能によって決定される。

【０００３】

光リソグラフィによる露光装置は、フォトマスク上に精密に描かれた回路パターンを、フォトレジストを塗布した半導体ウエハー上に光学的に縮小投影し、転写する。この露光時におけるウエハー上での最小パターン寸法（解像度）Ｒは、露光装置で投影するために用いる光源の波長λ、投影光学系の開口数ＮＡによって次式（１）で、また焦点深度ＤＦは次式（２）で示される。

$R = K \cdot \lambda / NA$ ・・・・・・（１）

$DF = \lambda / 2(NA)^2$ ・・・（２）

【０００４】

上記の式（１）から明らかなように、最小パターン寸法Ｒを小さくするためには、この定数Ｋを小さくする方向、開口数ＮＡを大きくする方向、そして投影する光源の波長λを小さくする方向、の３方向があることがわかる。

【０００５】

ここで定数Ｋは投影光学系やプロセスによって決まる定数であり、通常０．５～０．８程度の値をとる。この定数Ｋを小さくする方法は、広い意味での超解像と呼ばれている。今までに、投影光学系の改良、変形投影、フェーズシフトマスク法などが提案、研究されてきた。しかし、適用できるパターンに制限があるなどの難点があった。一方、開口数ＮＡは（１）式からその値が大きいほど最小パターン寸法Ｒを小さくできるが、このことは同時に（２）式から明らかなように焦点深度が浅くなってしまうことを意味する。このため、ＮＡ値は大きくするにも限界があり、通常はこれら両者のかねあいから０．５～０．６程度が適当とされている。

【０００６】

従って、最小パターン寸法Ｒを小さくするのに最も単純かつ有効な方法は、露光に用いる光の波長λを小さくすることである。ここで短波長化の実現とあわせ、露光装置の光源を作る上で備えるべき条件がいくつかある。以下これらの条件について説明する。

【０００７】

第１に、数ワットの光出力が求められる。これは集積回路パターンの露光、転写に要する時間を短く保つために必要である。

【０００８】

第２に、波長３００ｎｍ以下の紫外光の場合には、露光装置のレンズとして使用できる材料が限られ、色収差の補正が難しくなってくる。このため光源の単色性が必要であり、スペクトルの線幅は１ｐｍ以下にすることが求められる。

【０００９】

第３に、このスペクトル線幅の狭帯域化にともない時間的コヒーレンス（干渉性）が高くなるため、狭い線幅の光をそのまま照射すると、スペックルと呼ばれる不要な干渉パターンが生ずる。従ってこのスペックル発生を抑制するために、光源ではその空間的コヒーレンスを低下させる必要がある。

【００１０】

これらの条件を満たし、かつ高解像度を実現するため露光光源の短波長化に対し多くの開発がなされてきた。これまで検討されてきた短波長化の方向は主に次の２種に大別される。その一つはレーザの発振波長自身が短波長であるエキシマレーザの露光装置への適用開発であり、もう一つは赤外又は可視光レーザの高調波発生を利用した短波長露光光源の開発である。

【００１１】

このうち、前者の方法を用いて実用化された短波長光源としては、ＫｒＦエキシマレーザ（波長２４８ｎｍ）が使用されており、現在ではさらに短波長の光源としてＡｒＦエキシマレーザ（波長１９３ｎｍ）を使用する露光装置の開発が進められている。しかし、これ

らのエキシマレーザは大型であること、１パルスあたりのエネルギーが大きいことにより光学部品の損傷が生じやすいこと、有毒なフッ素ガスを使用するためレーザのメインテナンスが煩雑でかつ費用が高額となることなど種々の問題があった。

【００１２】

また後者の方法としては、非線形光学結晶の２次の非線形光学効果を利用して、長波長の光（赤外光、可視光）をより短波長の紫外光に変換する方法がある。例えば「Longitudinally diode pumped continuous wave 3.5W green laser (L. Y. Liu, M. Oka, W. Wiechmann and S. Kubota, Optics Letters, vol.19(1994),p189)」では、半導体励起の固体レーザからの光を波長変換するレーザ光源が開示されている。この従来例では、Ｎｄ：ＹＡＧレーザの発する１０６４ｎｍのレーザ光を、非線形光学結晶を用いて波長変換し、４倍高調波の２６６ｎｍの光を発生させる方式が記載されている。なお、固体レーザとは、レーザ媒質が固体であるレーザの総称である。従って広義には、半導体レーザも固体レーザに含まれるが、通常は固体レーザというと、例えばＮｄ：ＹＡＧレーザやルビーレーザのように光によって励起される固体レーザのことをさす。ここでもそのように区別する。

【００１３】

また、固体レーザを用いて露光装置の光源とした例では、レーザ光を発生するレーザ光発生部と、このレーザ光発生部からの光を紫外光に波長変換する波長変換部とから構成されるレーザ要素を、複数マトリックス状に束ねたアレイレーザが提案されている。例えば特開平８－３３４８０３号公報では、半導体レーザを備えたレーザ光発生部からの光を、波長変換部に設けた非線形光学結晶により波長変換し、紫外光を発生させるひとつのレーザー要素を、複数本マトリックス状（例えば１０×１０）に束ねて一つの紫外光源とするアレイレーザの例が開示されている。

【００１４】

前記のような構成のアレイレーザでは、個々に独立なレーザ要素を複数本束ねることによって、個々のレーザ要素の光出力を低く押さえつつ、装置全体の光出力を高出力とすることができる。このため非線形光学素子への負担を軽減することができる。しかし、一方では、個々のレーザ要素が独立していることから、露光装置への適用を考慮した場合には、レーザ要素全体でその発振スペクトルを一致させる必要がある。例えば、個々のレーザ要素についてその発振スペクトル線幅が１ｐｍ以下であっても、複数のレーザ要素全体で、相互の波長の差が３ｐｍであってはならなず、全幅で１ｐｍ以下とする必要がある。

【００１５】

このためには、例えば、各レーザ要素に自律的に同一波長の単一縦モード発振をさせるためには、各々のレーザ要素の共振器長を調整し、あるいは共振器中に波長選択素子を挿入したりする必要があった。しかし、これらの方法は、その調整が微妙であること、構成するレーザ要素が多くなればなるほど全体を同一波長で発振させるのに複雑な構成が必要になること等の問題があった。

【００１６】

一方、これら複数のレーザを能動的に単一波長化する方法としてインジェクションシード法がよく知られている（例えば、Walter KoechnerによるSolid-state Laser Engineering, 3rd Edition, Springer Series in Optical Science, Vol.1, Springer-Verlag, ISBN 0-387-53756-2, p246-249）。これは、発振スペクトル線幅の狭い単一のレーザ光源からの光を複数のレーザ要素に分岐し、このレーザ光を誘導波として用いることにより、各レーザ要素の発振波長を同調させ、かつスペクトル線幅を狭帯域化するという方法である。しかしこの方法では、シード光を各レーザ要素に分岐する光学回路や、発振波長の同調制御部を必要とするため構造が複雑になるという問題があった。

【００１７】

さらに、このようなアレイレーザは、従来のエキシマレーザに比べて装置全体を格段に小さくすることが可能だが、それでもアレイ全体の出力ビーム系を数センチメートル以下におさえるパッケージングは困難であった。また、このように構成されたアレイレーザでは、各アレーごとに波長変換部が必要となるため高価となること、アレイを構成するレーザ

要素の一部にアライメントずれが生じた場合や構成する光学素子に損傷が発生した場合に、このレーザ要素の調整をするためには、一度アレイ全体を分解してこのレーザ要素を取り出し、調整した上で再度アレイを組み立て直す必要があること、などの課題があった。

【００１８】

【発明が解決しようとする課題】

本発明は、上記従来技術の問題点、例えば露光装置の紫外光源としてエキシマレーザを用いた場合に生ずる問題であるところの、装置の大型化、有毒なフッ素ガスの使用、メインテナンスの煩雑さと高価さなどという諸問題や、露光装置の紫外光源として例えばＮｄ：ＹＡＧレーザなどの様な固体レーザの高調波を用いた場合に考えられる非線形光学結晶の損傷や、空間的コヒーレンスの増加に伴うスペックル発生等の問題、また露光装置の紫外光源として、紫外光を発生する複数のレーザ要素をマトリックス状に束ねたアレイレーザを用いた場合に考えられる同調機構を含めた構造の複雑さや出力ビーム径小型化の難しさ、メインテナンスの煩雑さ等の問題を考慮してなされたものである。

【００１９】

すなわち、本発明の目的は露光装置の光源として充分に狭帯域化された単一波長の紫外光を、空間的コヒーレンスの低い紫外光出力として安定して発生することにあり、あわせてコンパクトで取り扱いの容易なレーザ装置を提供することにある。また、このような小型で取り扱いの容易なレーザ装置を光源として用いたコンパクトで自由度の高い露光装置を提供することにある。

【００２０】

【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するため、本発明のレーザ装置は、赤外域から可視域までの波長範囲内で単一波長のパルス状のレーザ光を発生させるレーザ光発生部と、前記レーザ光発生部から発生させるレーザ光の発振波長を制御する発振波長制御手段と、前記レーザ光発生部から入射される単一波長のパルス光を複数に分岐する光分岐手段と、前記光分岐手段から分岐されて出力される複数の分岐光をそれぞれ複数回増幅する複数のファイバー光増幅器を有する複数の光増幅器と、前記複数の光増幅器により増幅された分岐光を非線形光学結晶を用いて波長変換する波長変換部とを備え、前記レーザ光発生部は、パルス光を発生する光源と、当該パルス光の一部を切り出してパルス幅を狭める光変調器とを有して、パルス幅が狭められたパルス光が前記光分岐手段に入射され、前記光分岐手段は、前記レーザ光発生部から入射された前記パルス光を複数に分岐するとともに、分岐された各パルス光が互いに時間的に重ならない状態の分岐光として出射し、空間的コヒーレンスが低い単一波長の紫外光を発生するように構成される。

【００２１】

上記レーザ装置において、好ましくは、前記光分岐手段は、前記レーザ光発生部から入射されたパルス光を複数に並列分岐するスプリッタを有するとともに、前記スプリッタの射出側に互いに長さの異なるファイバーが設けられ、前記互いに長さの異なるファイバーの出力端において、前記並列分岐された各パルス光が互いに時間的に重ならない状態の分岐光となるように構成する。

さらに好ましくは、前記互いに長さの異なるファイバーは、その出力端における前記複数の分岐光の遅延間隔が、前記スプリッタに入射するパルス光の繰り返し周波数と前記スプリッタにより並列分岐される分岐光路数との積の逆数となるようにその長さがそれぞれ定められ、それにより前記ファイバーのそれぞれの出力端における前記複数の分岐光の遅延間隔が略一定間隔となる。

【００２２】

上記レーザ装置において、好ましくは、前記光分岐手段は、時分割光分岐手段（Time Division Multiplexer）を有し、前記レーザ光発生部から入射されたパルス光を時分割して複数に分岐することにより、分岐された各パルス光が互いに時間的に重ならない状態の分岐光となるように構成する。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記光増幅器はその出力端におけるファイバー

出力端部のコアがテーパ状に広がって形成される。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記光増幅器はその出力端におけるファイバー出力端部に前記増幅したレーザ光を透過する窓部材が設けられる。
【００２３】
上記レーザ装置において、好ましくは、前記光増幅器は、エルビウム・ドープ・ファイバー光増幅器を有する。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記光増幅器は、エルビウムおよびイットリビウムをともにドープしたファイバー光増幅器を有しても良い。
【００２４】
上記レーザ装置において、好ましくは、前記光増幅器は、前記紫外光の出力、あるいは前記増幅した複数の分岐光の各出力を調整するために、前記並列に設けられる複数のファイバー光増幅器の各々の励起強度を制御するファイバー出力制御手段を有する。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記光増幅器は、前記増幅した複数の分岐光をそれぞれ出力する複数のファイバー出力端が１つに束ねられる、もしくは複数の出力群に分けられ、かつ出力群毎に束ねられる。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記光増幅器は、前記複数のファイバー出力端の一部を束ねた第１の出力群と、前記第１の出力群を除いた残りのファイバー出力端を１つに束ねる、もしくは複数の出力群に略均等に分けて各々束ねた第２の出力群とを有する。
【００２５】
上記レーザ装置において、好ましくは、前記光増幅器は、前記出力群に各分岐光を透過する窓部材を有する。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記光増幅器は、前記複数のファイバー出力端が複数の出力群に分けられて各々束ねられ、前記波長変換部は前記出力群ごとに設けられる。
【００２６】
上記レーザ装置において、好ましくは、前記波長変換部の入力側には、前記光増幅器から射出されるレーザ光を前記非線形光学結晶に集光して入射させる集光光学素子を有する。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記集光光学素子は、前記光増幅器の出力群ごとに束ねられた出力端部を、それぞれの出力群ごとにレンズとすることにより設けている。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記集光光学素子は、前記増幅したレーザ光を出力する前記光増幅器のファイバー出力端にそれぞれ設けられる。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記集光光学素子は、前記光増幅器の複数のファイバー出力端部をそれぞれレンズとすることにより設けられる。
【００２７】
上記レーザ装置において、好ましくは、前記レーザ光発生部は、波長が１．５μｍ付近の単一波長のレーザ光を発生し、前記波長変換部は、前記光増幅器から出力される前記波長１．５μｍ付近の基本波を、８倍高調波又は１０倍高調波の紫外光として発生させる。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記レーザ光発生部は、１．５１μｍ～１．５９μｍの範囲内に発振波長を持つＤＦＢ半導体レーザもしくはファイバーレーザを有し、前記波長変換部は、発生波長が１８９ｎｍ～１９９ｎｍの範囲内である８倍高調波を発生する。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記レーザ光発生部は、１．５４４μｍ～１．５５２μｍの範囲内に発振波長を持つレーザ光を発生し、前記波長変換部は、発生波長がＡｒＦエキシマレーザの発振波長と略同一波長である１９３ｎｍ～１９４ｎｍの範囲内の８倍高調波を発生する。
上記レーザ装置において、好ましくは、前記波長変換部は、前記基本波と、前記基本波の７倍高調波とから、和周波発生により前記基本波の８倍高調波を発生する第１の非線形

光学結晶を有する。

【００２８】

上記レーザ装置において、好ましくは、 前記レーザ光発生部は、１．５１μｍ～１．５９μｍの範囲内に発振波長を持つＤＦＢ半導体レーザもしくはファイバーレーザを有し、前記波長変換部は、発生波長が１５１ｎｍ～１５９ｎｍの範囲内である１０倍高調波を発生する。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記レーザ光発生部は、１．５７μｍ～１．５８μｍの範囲内に発振波長を持つレーザ光を発生し、前記波長変換部は、発生波長がF_2レーザの発振波長と略同一波長である１５７ｎｍ～１５８ｎｍの範囲内の１０倍高調波を発生する。

【００２９】

上記レーザ装置において、好ましくは、前記レーザ光発生部は、波長が１．１μｍ付近の単一波長のレーザ光を発生し、前記波長変換部は、前記光増幅器から出力される前記波長１．１μｍ付近の基本波を、７倍高調波の紫外光として発生させる。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記レーザ光発生部は、１．０３μｍ～１．１２μｍの範囲内に発振波長を持つＤＦＢ半導体レーザもしくはファイバーレーザを有し、

前記波長変換部は、発生波長が１４７ｎｍ～１６０ｎｍの範囲内である７倍高調波を発生する。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記レーザ光発生部は、１．０９９μｍ～１．１０６μｍの範囲内に発振波長を持つレーザ光を発生し、前記波長変換部は、発生波長がF_2レーザの発振波長と略同一波長である１５７ｎｍ～１５８ｎｍの範囲内の７倍高調波を発生する。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記レーザ光発生部は、イットリビウム・ドープ・ファイバーレーザを有する。

【００３０】

上記レーザ装置において、好ましくは、前記複数のファイバー光増幅器の少なくとも一つの入射側に光分岐手段を更に備え、前記光分岐手段で複数に分割されるパルス光がその後段に配置されるファイバー光増幅器に入射する。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記分割された複数のパルス光をそれぞれ遅延させて前記光分岐手段の後段に配置されるファイバー光増幅器に入射させる遅延手段を更に備える。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記複数の分岐光をそれぞれ増幅する前記複数のファイバー光増幅器のうち少なくとも最終段のファイバー光増幅器は大モード径ファイバーである。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記大モード径ファイバーはＺＢＬＡＮファイバーである。

【００３１】

上記レーザ装置において、好ましくは、前記波長変換部はＮＣＰＭ（Non-Critical Phase Matching）で使用される非線形光学結晶を含む。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記波長変換部は温度制御される非線形光学結晶を含む。

【００３２】

上記レーザ装置において、好ましくは、前記レーザ光発生部と前記波長変換部との間における光の波長幅の広がりを抑制する光学装置を更に備える。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記光学装置はその少なくとも一部が前記レーザ光発生部と前記波長変換部との間に配置される。

【００３３】

上記レーザ装置において、好ましくは、前記光学装置の少なくとも一部は前記複数のファイバー光増幅器の間に配置される。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記光学装置は狭帯域フィルタ及びアイソレー

タの少なくとも一方を含む。

【００３４】

上記レーザ装置において、好ましくは、前記複数の分岐光の光路に配置された前記複数のファイバー光増幅器において、光学的に最も下流に配置されるファイバー光増幅器のファイバーはフッ化物系ファイバーである。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記光増幅器はその少なくとも一部がユニットとして交換可能である。

【００３５】

上記レーザ装置において、好ましくは、前記レーザ光発生部と前記光増幅器との少なくとも一方に接続され、前記紫外光の発振特性を調整するための調整装置を更に備え、前記発振特性は、前記紫外光の強度、中心波長、波長幅、および発振間隔の少なくとも一つを含む。

上記レーザ装置において、好ましくは、前記調整装置は、前記紫外光と、前記紫外光と波長が異なる光との少なくとも一方の検出によって得られる情報に基づいて調整する。

【００３６】

本発明に係る光照射装置は、上述のレーザ装置と、前記レーザ装置から発生される紫外光を物体に導く光学系とを備え、前記光学系を介して前記紫外光を前記物体に照射するように構成される。

上記光照射装置において、好ましくは、前記紫外光の照射によって、前記物体上のパターンの検出、前記物体の加工、あるいは前記物体へのパターン像の形成を行う。

上記光照射装置において、好ましくは、前記物体は、デバイス製造工程で使用される基板である。

【００３７】

本発明に係る露光方法は、上述の光照射装置を用いて前記紫外光をマスクに照射するとともに、前記マスクを介して前記紫外光で前記基板を露光するように構成される。

【００３８】

【発明の実施の形態】

本発明によるレーザ光源は、レーザ光発生部からの単一波長の光を光増幅器によって増幅し、この増幅された光を波長変換部に備える非線形光学結晶により紫外光に変換するように構成することにより、複雑な構成を用いることなく所要のスペクトル線幅（例えば１ｐｍ以下）の紫外光を容易に得ることができるものである。

【００３９】

さらに、単一波長のレーザ光を複数に分割（又は時分割）し、この出力光を複数のファイバー光増幅器で増幅し、この増幅された光を非線形光学結晶により紫外光に変換するよう構成することにより、パルス光の１パルスあたりのピークパワーを押さえつつ光源全体としてのレーザ光出力の増大をはかり、かつ光の空間的コヒーレンスの低い紫外光を供給しようとするものである。

【００４０】

以下、本発明の好ましい実施形態について、図面を参照しながら説明する。まず、本発明に係るレーザ装置の第１の実施形態について図１を参照しながら説明する。本実施形態による紫外光発生装置は、単一波長発振レーザ１１からなり単一波長のレーザー光を発生するレーザ光発生部と、ファイバー光増幅器１３、１８、１９からなりこの光を増幅する光増幅器と、光を複数に並列分岐させる光分岐手段１４、１６と、各々長さの異なるファイバー１５、１７と、そして後述する非線形光学結晶からなり前記増幅された光を波長変換する波長変換部とから構成され、ＡｒＦエキシマレーザと同じ出力波長（１９３ｎｍ）あるいはF_2レーザと同じ出力波長（１５７ｎｍ）を発生し、かつ空間的コヒーレンスの低いレーザ装置を提供するものである。

【００４１】

本実施形態において、図１には本発明に係るレーザ装置のレーザ光発生部から出力された単一波長のレーザ光が分岐され増幅されるまでの構成例を示す。まず、図１に基づいて説

明すると、レーザ光発生部には、単一波長のレーザ光を発生する単一波長発振レーザ１１が備えられ、さらに、光分岐手段であるスプリッタ１４、１６と、各々長さの異なるファイバー１５、１７とを備え、各々長さの異なるファイバー１７の射出側にはファイバー光増幅器１８、１９が接続され複数並列に増幅される。

【００４２】

このファイバー光増幅器１９の出射端はバンドル状に束ねられ、例えば図１１（ａ）に示す波長変換部（５０２～５０６）にその増幅されたレーザ光が入射する。図１中に示されるファイバー光増幅器１９のファイバーバンドル出射端１１４は、図１１（ａ）～（ｄ）にそれぞれ示されるファイバーバンドル出射端５０１に対応する。この波長変換部は、非線形光学結晶５０２～５０４等を備えて構成され、ファイバー光増幅器１９から射出される基本波を紫外光に変換する。なお、本発明に係る波長変換部については、本発明の実施の形態の後段において実施形態４～７として詳細に説明する。

【００４３】

以下、本実施形態についてより詳細に説明する。図１に示す単一波長で発振する単一波長発振レーザ１１としては、例えば、発振波長１．５４４μｍ、連続波出力（以下ＣＷ出力という）２０ｍＷのInGaAsP，ＤＦＢ半導体レーザを用いる。ここでＤＦＢ半導体レーザとは、縦モード選択性の低いファブリーペロー型共振器の代わりに、回折格子を半導体レーザ内に作り上げたもので、どのような状況下であっても単一縦モード発振をするように構成されており、分布帰還型(Distributed Feedback：ＤＦＢ)レーザと呼ばれるものである。この様なレーザでは基本的に単一縦モード発振をすることから、その発振スペクトル線幅は０．０１ｐｍ以下に抑えられる。

【００４４】

なお、レーザ装置の出力波長を特定波長に固定するためには、単一波長発振レーザ(Master Oscillator)の発振波長を一定波長に制御する発振波長制御装置を設けることが好ましい。逆に、この発振波長制御装置によって単一波長発振レーザの発振波長を積極的に変化させてその出力波長を調整可能にすることも好ましい。例えば、本発明のレーザ装置を露光装置に適用する場合、前者によれば、波長変動による投影光学系の収差の発生、又はその変動が防止され、パターン転写中にその像特性（像質などの光学的特性）が変化することがなくなる。

【００４５】

また、後者によれば、露光装置が組立、調整される製造現場と露光装置の設置場所（納入先）との標高差や気圧差、更には環境（クリーンルーム内の雰囲気）の違いなどに応じて生じる投影光学系の結像特性（収差など）の変動を相殺でき、納入先で露光装置の立ち上げに要する時間を短縮することが可能になる。さらに後者によれば、露光装置の稼働中に、露光用照明光の照射、及び大気圧変化などに起因して生じる投影光学系の収差、投影倍率、及び焦点位置などの変動も相殺でき、常に最良の結像状態でパターン像を基板上に転写することが可能となる。

【００４６】

このような発振波長制御手段としては、例えば、単一波長発振レーザとしてＤＦＢ半導体レーザを用いる場合には、ＤＦＢ半導体レーザの温度制御を行うことにより達成することができ、この方法により発振波長をさらに安定化して一定の波長に制御したり、あるいは出力波長を微調整することができる。

【００４７】

通常、ＤＦＢ半導体レーザなどはヒートシンクの上に設けられ、これらが筐体内に収納されている。そこで本例では、単一波長発振レーザ（ＤＦＢ半導体レーザなど)１１に付設されるヒートシンクに設けられた温度調整器（例えばペルチェ素子など）を用いてその温度を制御して発振波長を調整する。ここで、ＤＦＢ半導体レーザなどではその温度を０．００１℃単位で制御することが可能である。

【００４８】

また、ＤＦＢ半導体レーザの発振波長は０．１ｎｍ／℃程度の温度依存性を持つ。例えば

、ＤＦＢ半導体レーザの温度を１℃変化させると、基本波（１５４４ｎｍ）ではその波長が０．１ｎｍ変化するので、８倍波（１９３ｎｍ）ではその波長が０．０１２５ｎｍ変化し、１０倍波（１５７ｎｍ）ではその波長が０．０１ｎｍ変化することになる。なお、露光装置では露光用照明光（パルス光）の波長をその中心波長に対して±２０ｐｍ程度変化させることができれば十分である。従って、ＤＦＢ半導体レーザ１１の温度を８倍波では±１．６℃程度、１０倍波では±２℃程度変化させればよい。

【００４９】

そして、この発振波長を所定の波長に制御する際のフィードバック制御のモニター波長としては、ＤＦＢ半導体レーザの発振波長、あるいは後述する波長変換出力（２倍波、３倍波、４倍波等）のうちから所望の波長制御を行うに当たって必要な感度を与え、かつ最もモニターしやすい波長を選択する。例えば、単一波長発振レーザとして発振波長１．５１～１．５９μｍのＤＦＢ半導体レーザを使用する場合に、この発振レーザ光の３倍波は５０３ｎｍ～５３０ｎｍの波長になるが、この波長帯はヨウ素分子の吸収線が密に存在する波長域に該当しており、ヨウ素分子の適切な吸収線を選んでその波長にロックすることにより精密な発振波長制御を行うことが可能である。

【００５０】

この半導体レーザの光出力を例えば電気光学光変調素子や音響光学光変調素子などの光変調素子１２を用いて、ＣＷ光（連続光）をパルス光に変換する。本構成例では一例として、この光変調素子１２によってパルス幅１ｎｓ、繰り返し周波数１００ｋＨｚ（パルス周期１０μｓ）のパルス光に変調させた場合について説明を行う。この様な光変調を行った結果、光変調素子１２から出力されるパルス光のピーク出力は２０ｍＷ、平均出力は２μＷとなる。ここでは、光変調素子１２の挿入による損失がないものとしたが、その挿入損失がある、例えば損失が－３ｄＢである場合、パルス光のピーク出力は１０ｍＷ、平均出力は１μＷとなる。

【００５１】

なお、光変調素子として電気光学変調素子を用いる場合には、屈折率の時間変化に伴うチャープによる半導体レーザ出力の波長広がりが小さくなるように、チャープ補正を行った電極構造を持つ電気光学変調素子（例えば二電極型変調器）を用いることが好ましい。また、繰り返し周波数を１００ｋＨｚ程度以上に設定することにより、後述するファイバー光増幅器においてＡＳＥ（Amplified Spontaneous Emission,自然放出光）ノイズの影響による増幅率低下を阻止することができ、このような変調器構成とすることが望ましい。

【００５２】

さらに、半導体レーザなどではその電流制御を行うことで、出力光をパルス発振させることができる。このため、本例（及び後述の各実施形態）では単一波長発振レーザ（ＤＦＢ半導体レーザなど）１１の電流制御と光変調素子１２とを併用してパルス光を発生させることが好ましい。そこで、ＤＦＢ半導体レーザ１１の電流制御によって、例えば１０～２０ｎｓ程度のパルス幅を有するパルス光を発振させるとともに、光変調素子１２によってそのパルス光からその一部のみを切り出す、すなわち本例ではパルス幅が１ｎｓのパルス光に変調する。

【００５３】

これにより、光変調素子１２のみを用いる場合に比べて、パルス幅が狭いパルス光を容易に発生させることが可能になるとともに、パルス光の発振間隔や発振の開始及びその停止などをより簡単に制御することが可能になる。特に、光変調素子１２のみを用いてパルス光をオフの状態にしてもその消光比が充分でない場合には、ＤＦＢ半導体レーザ１１の電流制御を併用することが望ましい。

【００５４】

このようにして得たパルス光出力を、初段のエルビウム（Ｅｒ）・ドープ・ファイバー光増幅器（ＥＤＦＡ）１３に接続し、３５ｄＢ（３１６２倍）の光増幅を行う。このときパルス光は、ピーク出力約６３Ｗ、平均出力約６．３ｍＷとなる。

【００５５】

この初段の光増幅器であるファイバー増幅器１３の出力を、光分岐手段であるスプリッタ１４（平板導波路１×４スプリッタ）でまずチャネル０～３の４出力に並列分割する。このチャネル０～３の各出力を、各々長さの異なるファイバー１５（図ではチャネル０の一本のみを表示する）に接続することにより、各ファイバーから出力される光は、各出力光にファイバー長に対応した遅延が与えられる。例えば本実施形態では、ファイバー中の光の伝搬速度を2×10^{8}m／ｓであるとし、チャネル０、１、２、３にそれぞれ０．１ｍ、１９．３ｍ、３８．５ｍ、５７．７ｍの長さのファイバーを接続する。この場合、各ファイバー出口での隣り合うチャネル間の光の遅延は９６ｎｓとなる。なおここでは、この様に光を遅延させる目的で使用するファイバーを、便宜的に遅延ファイバーと呼ぶ。

【００５６】

次に、前記４本の遅延ファイバー出力を、４ブロックの平板導波路１×３２スプリッタ１６でさらに３２出力に並列分割（各ブロックでチャネル０～３１）し、合計１２８のチャネルに分割する。そして、各ブロックともチャネル０をのぞくチャネル１～３１に再び長さの異なる遅延ファイバー１７を接続する。例えば本実施形態では、チャネル１から３１にそれぞれ０．６×Ｎメートル（Ｎはチャネル番号）の長さのファイバーを接続する。この結果、各ブロック内の隣り合うチャネル間では３ｎｓの遅延が与えられ、各ブロックのチャネル０出力に対し、チャネル３１出力は、３×３１＝９３ｎｓの遅延が与えられる。

【００５７】

一方、第１から第４までの各ブロック間には、前記のように遅延ファイバー１５によって、各ブロックの入力時点で各々９６ｎｓの遅延が与えられている。従って、第２ブロックのチャネル０出力は第１ブロックのチャネル０出力に対し９６ｎｓの遅延となり、第１ブロックのチャネル３１との遅延は３ｎｓとなる。このことは、第２～第３、第３～第４のブロック間においても同様である。この結果、全体の出力として総計１２８チャネルの出力端で、隣り合うチャネル間に３ｎｓの遅延を持つパルス光が得られる。なお、図１では第１ブロックのチャネル１についてのみ記載し、他のチャネルの記載を省略しているが、他のチャネルについても同様に構成するものである。

【００５８】

以上の分岐及び遅延により、総計１２８チャネルの出力端では、隣り合うチャネル間で３ｎｓの遅延を持つパルス光が得られるが、このとき各々の出力端で観測される光パルスは、光変調素子１２によって変調されたパルスと同じ１００ｋＨｚ（パルス周期１０μｓ）である。従って、レーザ光発生部全体として見ると、１２８パルスが３ｎｓ間隔で発生した後、９．６２μｓの間隔を置いて次のパルス列が発生するという繰り返しが１００ｋＨｚで行われる。即ち全体の出力は$128\times100\times10^{3}=1.28\times10^{7}$パルス／秒となる。

【００５９】

なお本実施形態では、分割数を１２８とし、また遅延用ファイバーとして短いものを用いた例について説明した。このため各パルス列の間に９．６２μｓの発光しない間隔が生じたが、分割数を増加させる、または遅延用ファイバーをより長くして適切な長さとする、あるいはこれらを組み合わせて用いることにより、パルス間隔を完全な等間隔とすることも可能である。例えば、前記スプリッタ１４に入射するレーザ光のパルス繰り返し数をｆ[Ｈｚ]、分割数をｍとしたときに、各ファイバーの遅延間隔が１／（ｆ×ｍ）となるように各ファイバー長を設定することによっても達成できるものである。

【００６０】

また、前述のパルス間隔を完全な等間隔とするように、スプリッタ１４、１６の少なくとも一方の分割数、又は光変調素子１２によって規定されるパルス繰り返し数ｆを調整する、あるいはその分割数と繰り返し数ｆの両方を調整するようしてもよい。従って、遅延ファイバー１５、１７の各ファイバー長、スプリッタ１４、１６の少なくとも一方の分割数、及びパルス繰り返し数ｆの少なくとも１つを調整することで、パルス間隔を等間隔に設定できるだけでなく、その間隔を任意に設定することができる。

【００６１】

なお、光源を組み上げた後にファイバー長を変更するためには、例えば遅延ファイバー１５、１７をそれぞれ束ねてユニット化しておき、このユニットをチャネル間の遅延時間が異なる別の遅延ファイバー・ユニットと交換できるように構成しておくことが好ましい。また、スプリッタ１４、１６の分割数を変更するときも、スプリッタ１４、１６にそれぞれ対応して分割数が異なる別のスプリッタを用意しておき、これらを交換可能に構成しておくことが好ましい。このとき、スプリッタ１４、１６の分割数の変更に応じて遅延ファイバー１５、１７の各ユニットを交換可能に構成しておくことが望ましい。

【００６２】

また、本例では光変調素子１２に印加するドライブ用電圧パルスのタイミングを制御することによって、光源（パルス光）の発振タイミング、即ち繰り返し周波数ｆ（パルス周期）を調整することができる。さらに、この発振タイミングの変更に伴ってパルス光の出力が変動し得る場合には、光変調素子１２に印加するドライブ用電圧パルスの大きさも同時に調整してその出力変動を補償するようにしてもよい。

【００６３】

このとき、単一波長発振レーザ１１の発振制御のみ、あるいは前述した光変調素子１２の制御との併用によってそのパルス光の出力変動を補償するようにしても良い。なお、パルス光の出力変動はその発振タイミングの変更時だけでなく、単一波長発振レーザの出力（すなわち、パルス光のファイバー光増幅器への入射）を所定時間だけ停止した後にその発振を再開するときにも生じ得る。また、単一波長発振レーザ１１をパルス発振させる場合、単一波長発振レーザ１１の電流制御のみ、あるいは前述した光変調素子１２の制御との併用によってパルス光の発振タイミング（パルス周期）を調整するようにしても良い。

【００６４】

さて、本例では１２８本の遅延ファイバー１７にそれぞれファイバー光増幅器１８が接続され、さらに狭帯域フィルタ１１３を挟んでファイバー光増幅器１９が接続されている。狭帯域フィルタ１１３は、ファイバー光増幅器１３及び１８でそれぞれ発生するＡＳＥ光をカットし、かつＤＦＢ半導体レーザ１１の出力波長（波長幅は１ｐｍ程度以下）を透過させることで、透過光の波長幅を実質的に狭帯化するものである。これにより、ＡＳＥ光が後段のファイバー光増幅器（１８及び１９）に入射してレーザ光の増幅利得を低下させるのを防止することができる。ここで、狭帯域フィルタはその透過波長幅が１ｐｍ程度であることが好ましいが、ＡＳＥ光の波長幅は数十ｎｍ程度であるので、現時点で得られる透過波長幅が１００ｐｍ程度の狭帯域フィルタを用いても実用上問題がない程度にＡＳＥ光をカットすることができる。

【００６５】

また、ＤＦＢ半導体レーザ１１の出力波長を積極的に変化させる場合、その出力波長に応じて狭帯域フィルタを交換するようにしてもよいが、その出力波長の可変幅（露光装置では一例として前述した±２０ｐｍ程度）に応じた透過波長幅（可変幅と同程度以上）を持つ狭帯域フィルタを用いておくことが好ましい。なお、露光装置に適用されるレーザ装置ではその波長幅が１ｐｍ程度以下に設定される。また、図１のレーザ装置には３つのアイソレータ１１０、１１１、１１２が設けられており、これらによって戻り光の影響が低減されるようになっている。

【００６６】

以上のように構成することにより、前記発生部（ファイバー光増幅器１９の出射端）からの出力光は、極めて狭帯域化された光でありながら、お互いに時間的に重なり合うことがない。従って、各チャネル出力間の空間的コヒーレンスを低減することができる。

【００６７】

なお以上の構成では、単一波長発振レーザ１１としてＤＦＢ半導体レーザを用い、光分岐手段の分岐要素として平板導波路型スプリッタ１４、１６を用いた例について説明したが、レーザ光源としては、ＤＦＢ半導体レーザと同様に、この波長領域で狭帯域化されたレーザであれば良く、例えばエルビウム（Ｅｒ）・ドープ・ファイバー・レーザであっても同様の効果を奏する。また、光分岐手段の分岐要素としては、平板導波路スプリッタと同

様に、光を並列に分岐するものであれば良く、例えばファイバースプリッタや、部分透過鏡を用いたビームスプリッタであっても同様の効果を奏する。

【００６８】

また、前述したように本実施形態では、遅延ファイバーであるファイバー１７の出力を、一段あるいは多段のＥＤＦＡ（エルビウム・ドープ・ファイバー光増幅器、以下同じ）で更に増幅する。本実施形態では、一例として、前記レーザ光発生部での各チャネルの平均出力約５０μＷ、全チャネル合計での平均出力約６．３ｍＷを２段のＥＤＦＡ１８、１９によって合計４６ｄＢ（４０６００倍）の増幅を行う例について示している。この場合、各チャネルの出力端ではピーク出力２０ｋＷ、パルス幅１ｎｓ、パルス繰り返し１００ｋＨｚ、平均出力２Ｗ、全チャネルでの平均出力約２５６Ｗを得る。

【００６９】

ここでは、平板導波路型スプリッタ１４、１６での結合損失を考慮していないが、その結合損失がある場合にはその損失分だけファイバー光増幅器（例えばＥＤＦＡ１８、１９などの少なくとも１つ）の増幅利得を上げることにより、ＥＤＦＡ１９から発生する基本波の出力を前述した値（例えばピーク出力２０ｋＷなど）と同一にすることができる。なお、ファイバー光増幅器の増幅利得を変化させることで、基本波の出力を前述した値よりも大きくしたり、あるいは小さくしたりすることができる。

【００７０】

この光増幅器の出力である波長１．５４４μｍの単一波長パルスレーザ光は、非線形光学結晶を用いた波長変換部により、スペクトル線幅の狭い紫外光パルス出力に変換される。この波長変換部の実施形態については後述する。

【００７１】

次に本発明に係るレーザ装置の第２の実施形態を、図２を参照しながら説明する。本実施形態による紫外光発生装置は、単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、この光を増幅する光増幅器、及び前記増幅された光を波長変換する波長変換部とから構成され、ＡｒＦエキシマレーザと同じ出力波長（１９３ｎｍ）あるいはF_2レーザと同じ出力波長（１５７ｎｍ）のレーザ光を発生し、かつ空間的コヒーレンスの低い紫外レーザ装置を提供するものである。なお本発明の第１の実施形態における紫外レーザ装置とは、光分岐手段が光を時間的に分割し分岐するものである点、この光分岐手段に入射されるまでのレーザ光はファイバー光増幅器で増幅されていない点、の２点において異なっている。このうち、光分岐手段とファイバー光増幅器の先後はいずれの構成をとることも可能である。

【００７２】

また、前述の実施形態１（図１）と同様に、光分岐手段（本例ではＴＤＭ２３）の入射側（単一波長発振レーザ２１側）にファイバー光増幅器を更に設け、ここで増幅したパルス光を光分岐手段に入射させるように構成してもよい。これにより、光分岐手段よりも後段に配置されるファイバー光増幅器（本例では２４、２５）で必要な増幅利得を図２の構成よりも下げることができ、例えばファイバー光増幅器の交換回数などが減るのでより経済的である。

【００７３】

ところで、本実施形態において、図２には本発明に係る紫外レーザ装置の、レーザ光発生部と光分岐手段と光増幅器の部分の構成例を示す。図２に示すとおり、本実施形態による紫外レーザ装置は、単一波長のレーザ光を発生する単一波長発振レーザ２１からなるレーザ光発生部と、光を分岐させる光分岐手段２３とを備え、この光分岐手段２３からの複数の光出力はそれぞれファイバー光増幅器２４、２５により複数並列に増幅される。このファイバー光増幅器２５の射出端はバンドル状に束ねられ、例えば図１４に示す非線形光学結晶などからなる波長変換部（７０２～７１２）にその増幅されたレーザ光が入射する。

【００７４】

ここで、図２中に示されるファイバー光増幅器２５のファイバーバンドル出射端２９は、図１４に示されるファイバーバンドル出射端７０１に対応する。この波長変換部は、一群の非線形光学結晶７０２、７０５、７１０、７１２を備えて構成され、光増幅器（２１～

２８）から出射される基本波を紫外光に変換する。なお、本発明に係る波長変換部については、実施の形態の後段において実施形態４～７として詳細に説明する。

【００７５】

以下、本実施形態についてより詳細に説明する。図２に示す単一波長で発振するレーザ２１としては、例えば、発振波長１．０９９μｍ、ＣＷ出力２０ｍＷのＤＦＢ半導体レーザあるいはイットリビウム（Ｙｂ）・ドープ・ファイバーレーザを用いる。これらのレーザは基本的に単一縦モード発振をすることから、その発振スペクトル線幅は０．０１ｐｍ以下に抑えられる。

【００７６】

この半導体レーザの光出力を例えば電気光学光変調素子や音響光学光変調素子などの光変調素子２２を用いて、ＣＷ光（連続光）をパルス光に変換する。本構成例では一例として、この光変調素子２２によってパルス幅１ｎｓ、繰り返し周波数１２．８ＭＨｚ（パルス周期約７８ｎｓ）のパルス光に変調させた場合について説明を行う。この様な光変調を行った結果、光変調素子から出力されるパルス光のピーク出力は２０ｍＷ、平均出力は０．２５６ｍＷとなる。

【００７７】

このパルス光出力を、光分岐手段である時分割光分岐手段（Time Division Multiplexer: ＴＤＭ）２３により、パルス光を各パルスごとに、順次チャネル０からチャネル１２７の総計１２８チャネルに振り分ける。すなわち、パルス周期７８ｎｓごとのパルスを順次チャネル０からチャネル１、２、３・・・１２７に順次振り分けてゆく。この結果を各チャネルごとについてみると、出力パルスのパルス周期は７８ｎｓ×１２８＝１０μｓ（パルス周波数１００ｋＨｚ）、パルスピーク出力２０ｍＷ、平均出力２μＷのパルス光となる。また、レーザ光発生部全体で見ると、パルス周波数１２．８ＭＨｚ、パルスピーク出力２０ｍＷ、平均出力０．２５６ｍＷの平均化されたパルス光となる。なお、隣り合うチャネル間では７８ｎｓの遅延があり、各チャネル間のパルス光はお互いに重なり合うことがない。

【００７８】

また、本例では光変調素子２２から出力されるパルス光の繰り返し周波数ｆを１００ｋＨｚ（パルス周期は１０μｓ）とし、時分割光分岐手段（ＴＤＭ）２３のチャネル０～１２７から出力されるパルス光を、光変調素子２２によって規定されるパルス周期（１０μｓ）を１２８等分した時間間隔（７８ｎｓ）ずつ遅延させるようにしているが、その遅延時間は等時間間隔でなくてもよいし、あるいは前述の第１実施形態と同様にパルス周期（１０μｓ）の一部のみで、チャネル０～１２７からパルス光を出力させるようにしてもよい。さらに、光変調素子２２に印加するドライブ用電圧パルスのタイミングも同時に制御して前述のパルス周期（１０μｓ）を変更してもよく、例えばその変更されたパルス周期を１２８等分した時間間隔である遅延時間を変化させることもできる。

【００７９】

なお、前述した第１の実施形態と同様に、本例でも単一波長発振レーザ２１をパルス発振させても良い。さらに、時分割光分岐装置（ＴＤＭ）２３と単一波長発振レーザ２１の電流制御とを併用する、あるいは光変調素子２２の制御をさらに併用して前述のパルス周期（１０μｓ）を変更しても良い。

【００８０】

以上のように構成することにより、前記発生部からの出力光は、極めて狭帯域化された単一波長の光でありながら、お互いに時間的に重なり合うことがない。従って、各チャネル出力間の空間的コヒーレンスを低減することができる。

【００８１】

なお以上の構成では、単一波長発振レーザ２１としてＤＦＢ半導体レーザあるいはイットリビウム(Ｙｂ)・ドープ・ファイバーレーザを用いた例について説明したが、レーザ光源としては、ＤＦＢ半導体レーザと同様に、この波長領域で狭帯域化されたレーザであれば同様の効果を奏する。

【００８２】
時分割光分岐手段２３の出力は、そのチャネル０～１２７に対応してそれぞれ設けられる、一段あるいは多段のＹＤＦＡ（イットリビウム・ドープ・ファイバー光増幅器、以下同じ）で構成されたファイバー光増幅器２４、２５によって増幅される。このイットリビウム・ドープ・ファイバー光増幅器は、前述のエルビウム・ドープ・ファイバー光増幅器よりも半導体レーザによる励起効率が高く経済的である。また、前述の第１実施形態（図１）と同様に戻り光の影響の低減、及び波長幅の狭帯化などを目的として、単一波長発振レーザ２１と光変調素子２２との間にアイソレータ２６が配置されるとともに、ファイバー光増幅器２４と２５との間には狭帯域フィルタ２８とアイソレータ２７とが配置されている。

【００８３】
本実施形態では、一例として、時分割光分岐手段２３での各チャネルの平均出力２μＷ、全チャネルでの平均出力０．２５６ｍＷを２段のＹＤＦＡ２４、２５によって合計６０ｄＢ（１０００００００倍）の増幅を行う例について示す。この場合、各チャネルの出力端では、ピーク出力２０ｋＷ、パルス幅１ｎｓ、パルス繰り返し１００ｋＨｚ、平均出力２Ｗ、全チャネル合計での平均出力２５６Ｗを得る。なお、図３では全チャネル中チャネル０についてのみ記載し、他のチャネルの記載を省略しているが、他のチャネルについても同様に構成する。

【００８４】
この光増幅器の出力である波長１．０９９μｍの単一波長パルスレーザ光は、非線形光学結晶を用いた波長変換部により、スペクトル線幅の狭い紫外光パルス出力に変換される。この波長変換部の実施形態については後述する。

【００８５】
以上説明した実施の形態１及び実施の形態２では光増幅器の出力波長が異なるが、これらは以上の各説明に述べたように、単一波長発振レーザ（１１、２１）の発振波長によって定まり、さらに増幅効率を考慮したファイバー光増幅器、即ち利得波長幅（例えばエルビウム・ドープ・ファイバーでは１５３０～１５６０ｎｍ、イットリビウム・ドープ・ファイバーでは９９０～１２００ｎｍ）の組み合わせにより得られるものである。従って、本発明の実施の形態では単一波長発振レーザに対してその発振波長に応じた利得波長幅を持つファイバー光増幅器を適宜選択して組み合わせればよい。さらに、例えば実施形態１では平板導波路型スプリッタ（１４、１６）の代わりに実施形態２で用いたＴＤＭ（２３）を用いてもよいし、実施形態２ではＴＤＭ（２３）の代わりに平板導波路型スプリッタを用いてもよい。なお、波長変換部の実施形態については後述する。

【００８６】
なお、これらの実施形態における最終段の高ピーク出力ファイバー光増幅器（図１では１９、図２では２５）においては、ファイバー中での非線形効果による増幅光のスペクトル幅の増加を避けるため、ファイバーモード径が通常通信で用いられているもの（５～６μｍ）よりも広い、例えば２０～３０μｍの大モード径ファイバー光増幅器を使用することが望ましい。

【００８７】
この大モード径ファイバー光増幅器を用いた光増幅器の構成例を図４に示す。図４中で点線の四角で囲んだ部分のファイバーをモード径の広いものにするこの光増幅器４２では、上記のモード径の広い光増幅器用ドープ・ファイバーを励起するための半導体レーザ４３を、光増幅器用ドープ・ファイバーの径に合わせた大モード径ファイバーにファイバー結合し、この半導体レーザ出力を波長分割多重化装置（Wavelength Division Multiplexer: ＷＤＭ）４５、４６を用いて、光増幅器用ドープ・ファイバーに入力し、ドープ・ファイバーを励起する。

【００８８】
この大モード径ファイバー（光増幅器）４２で増幅されたレーザ光は波長変換部５００に入射し、ここで紫外レーザ光に波長変換される。この大モード径ファイバーを伝播する増

幅されるべきレーザ光（信号）は、主に基本モードであることが望ましく、これは、シングルモードあるいはモード次数の低いマルチモードファイバーにおいて、主に基本モードを選択的に励起することにより実現できる。

【００８９】

また、特に図４では半導体レーザ４３とＷＤＭ４５との間に光偏波結合素子４４が設けられ、互いに偏光方向が直交する、２つの半導体レーザ４３から出力されるレーザ光を合成できるようになっている。なお、本例では光偏波結合素子４４でレーザ光の偏光方向を直交させるものとしたが、レーザ光の合成効率の低下を許容できる場合にはその偏光方向を直交させなくてもよい。さらに、大モード径ファイバー光増幅器４２の入射側に設けられたアイソレータ４０４によって、戻り光の影響が低減される。

【００９０】

また、標準的なモード径を持つファイバー光増幅器４１と大モード径ファイバー光増幅器４２との間に、ファイバー光増幅器４２から発生するＡＳＥ光を除去するために狭帯域フィルタ４０３が設けられている。また、ファイバー光増幅器４１にはその励起用の半導体レーザ４０１がファイバー結合されるとともに、この半導体レーザ４０１の出力がＷＤＭ４０２を通して光増幅器用ドープ・ファイバーに入力し、それによりこのドープ・ファイバーが励起される。

【００９１】

このような方法によれば、大モード径ファイバーに半導体レーザ４３をカップリングすることになるため、ファイバーへのカップリング効率が向上し、半導体レーザ出力を有効に使用できる。また、同一径の大モード径ファイバーを用いることにより、ＷＤＭ４５、４６での損失も軽減できるため効率的である。なお、標準的なモード径を持つ前段のファイバー光増幅器４１と、上記モード径の広い最終段のファイバー光増幅器４２との接続は、テーパ状にモード径が増加するファイバーを用いて行う。

【００９２】

さらに、最終段のファイバー光増幅器（１９、２５）において高出力を得るためには、図４における大モード径ファイバー（４２）に代えて、ファイバー・クラッドが二重構造となったダブル・クラッド・ファイバー４１０を用いるようにしてもよい。このファイバー４１０の断面図の一例を図５に示す。この構造では、コア４１１の部分にレーザ光の増幅に寄与するイオンがドープされており、増幅されるレーザ光（信号）がこのコア内を伝搬する。コアを取り巻く第１クラッド４１２に励起用半導体レーザをカップリングする。この第１クラッドはマルチモードであり、断面積も大きいため高出力の励起用半導体レーザ光の伝導が容易であり、マルチモード発振の半導体レーザを効率よくカップリングし、励起用光源を効率よく使用することができる。第１クラッドの外周には第１クラッドの導波路を形成するための第２クラッド４１３が形成されている。

【００９３】

また、前述の第１及び第２実施形態でのファイバー光増幅器として石英ファイバー、又はシリケイト系ファイバーを用いることができるが、これらの他にフッ化物系ファイバー、例えばＺＢＬＡＮファイバーを用いるようにしてもよい。このフッ化物系ファイバーでは、石英やシリケイト系などに比べてエルビウム・ドープ濃度を大きくすることができ、これにより増幅に必要なファイバー長を短縮することができる。

【００９４】

このフッ化物系ファイバーは、特に最終段のファイバー光増幅器（１９、２５）に適用することが望ましく、ファイバー長の短縮により、パルス光のファイバー伝播中の非線形効果による波長幅の広がりを抑えることができ、例えば露光装置に必要な波長幅が狭帯化された光源を得ることが可能となる。特に開口数が大きい投影光学系を有する露光装置でこの狭帯化光源が使用できることは、例えば投影光学系を設計、製造する上で有利である。

【００９５】

ところで、前述のように二重構造のクラッドを持つファイバー光増幅器の出力波長として１．５１～１．５９μｍを使用する場合には、ドープするイオンとしてエルビウムに加え

イットリビウムを共にドープすることが好ましい。これは半導体レーザによる励起効率を向上させる効果があるためである。すなわち、エルビウムとイットリビウムの両方をドープする場合、イットリビウムの強い吸収波長が９１５～９７５ｎｍ付近に広がっており、この近傍の波長で各々異なる発振波長を持つ複数の半導体レーザをＷＤＭにより結合させて第１クラッドにカップリングすることで、その複数の半導体レーザを励起光として使用できるため大きな励起強度を実現することができる。さらに、例えば図４における光結合素子４４として偏光結合素子を用いれば、偏光方向の異なる半導体レーザ出力を共に結合することができるため、さらに励起強度を２倍に高めることができる。

【００９６】

また、ファイバー光増幅器のドープ・ファイバーの設計については、本発明のようにあらかじめ定められた一定の波長で動作する装置（例えば露光装置）では、所望の波長におけるファイバー光増幅器の利得が大きくなるように材質を選択する。例えば、ＡｒＦエキシマレーザと同じ出力波長（１９３～１９４ｎｍ）を得るための紫外レーザ装置において、光増幅器用ファイバーを用いる場合には所望の波長、例えば１．５４８μｍで利得が大きくなる材質を選ぶことが望ましい。

【００９７】

しかしながら、通信用ファイバーでは波長分割多重化通信のため、１．５５μｍ付近の数十ｎｍの波長領域で、比較的平坦な利得を持つように設計されている。そこで、例えば励起媒質としてエルビウム単一ドープのコアを持つ通信用ファイバーでは、この平坦な利得特性を実現するために、アルミやリンをシリカファイバーにコ・ドープする手法が用いられる。このためこの種のファイバーでは、１．５４８μｍで必ずしも利得が大きくならない。この様子を図６に示す。

【００９８】

図６は横軸に波長を縦軸に蛍光強度をとり、ファイバーによる蛍光強度特性の差異を示したものである。図中のAl /P Silicaが通信用ケーブル材料に該当するが、これに対して図６に示したSilicate L22を用いれば、１．５４７μｍでより高い利得を得ることができる。また、ドープ元素のアルミは、１．５５μｍ付近のピークを長波長側にシフトさせ、リンは短波長側にシフトさせる効果を持つ。従って、１．５４７μｍ近傍で利得を大きくするためには、Silicate L22に少量のリンをドープすることで達成できる。

【００９９】

一方、例えばエルビウムとイットリビウムをともにドープ（コ・ドープ）したコアを持つ光増幅器用ファイバー（例えば前記ダブル・クラッド・タイプのファイバー）を用いる場合には、図７に示すように、コアに少量のリンを加えることにより、１．５４７μｍ付近でより高い利得を得ることができる。なお図７は、横軸に波長を、縦軸に単位長さ当たりの利得をとり、図中に励起強度を変化させ、反転分布密度を変化させたときの波長に対するゲインの変化を示したものである。

【０１００】

さて、実施形態１および２におけるファイバー光増幅器では、各ファイバーが独立した光増幅器であるため、各光増幅器のゲインの差が各チャネルの光出力のばらつきとなる。従って、このような形態のレーザ装置においては、例えば図８に示すように、各チャネルのファイバー光増幅器（４１、４２）で出力の一部を分岐させて光強度をモニターし、各ファイバー光増幅器からの光出力が各増幅段で一定になるように（即ちバランスするように）、各励起用半導体レーザ（４０１、４３）のドライブ電流をフィードバック制御するファイバー出力制御装置４０５、４０６を設けることが望ましい。図８では、ファイバー光増幅器４１からの分岐光を検出するファイバー出力制御装置４０５が、その検出値に基づいてファイバー光増幅器４１に接続される半導体レーザ４０１のドライブ電流を制御し、大モード径ファイバー光増幅器４２からの分岐光を検出するファイバー出力制御装置４０６が、その検出値に基づいて大モード径ファイバー光増幅器４２に接続される半導体レーザ４３のドライブ電流を制御するようになっている。

【０１０１】

さらに、図８に示すように波長変換部５００からの光出力が所定の光出力となるように波長変換部５００における光強度をモニターし、ファイバー光増幅器全体（４１、４２）としての励起用半導体レーザ４０１、４３のドライブ電流をそれぞれフィードバック制御するファイバー出力制御装置４０７をさらに備えることが好ましい。図８では、ファイバー出力制御装置４０７が半導体レーザ４０１、４３をそれぞれ独立に制御するものとしたが、波長変換部５００で検出される光強度に基づいて半導体レーザ４０１、４３のいずれか一方のみを制御するだけでもよい。また、ファイバー出力制御装置４０７は波長変換部５００の途中でレーザ光を分岐してその強度を検出するものとしたが、波長変換部５００の射出端から出力されるレーザ光の一部を分岐してその強度を検出するようにしてもよい。なお、図８では図４と同一の他の構成要素については同一の番号を付し、説明を省略する。

【０１０２】

このような構成とすることにより、各増幅段ごとに各チャネルのファイバー光増幅器の増幅率が一定化されるため、各ファイバー光増幅器間に偏った負荷がかかることがなく全体として均一な光強度が得られる。また、波長変換部５００における光強度をモニターすることにより、予定される所定の光強度を各増幅段にフィードバックし、所望の紫外光出力を安定して得ることができる。

【０１０３】

なお、図８では示していないが、ファイバー出力制御装置４０５、４０６、４０７の少なくとも１つは、単一波長発振レーザ（１１又は２１）及び光変調素子（１２又は２２）にそれぞれ接続され、単一波長発振レーザの温度制御及び電流制御を行うとともに、光変調素子にドライブ用電圧パルスを印加し、且つその電圧パルスのタイミング及び大きさを制御することがさらに可能となっている。

【０１０４】

従って、その少なくとも１つのファイバー出力制御装置はパルス光（基本波、又は波長変換部で少なくとも１回波長変換された可視光、又は赤外光、あるいは紫外光）の強度、中心波長、及び波長幅を検出し、この検出値に基づいて単一波長発振レーザの温度をフィードバック制御してそのパルス光の中心波長及び波長幅を制御する。さらに、その検出値に基づいて単一波長発振レーザの電流制御と、光変調素子に印加する電圧パルスの制御とを行い、そのパルス光の強度、出力間隔、及びパルス出力の開始と停止などを制御する。

【０１０５】

また、少なくとも１つのファイバー出力制御装置は、単一波長発振レーザのパルス出力と連続出力との切替、及びそのパルス出力時における出力間隔やパルス幅などの制御を行うとともに、パルス光の出力変動を補償するするように、単一波長発振レーザの発振制御と光変調素子の制御との少なくとも一方を行う。

【０１０６】

なお、図８では大モード径ファイバー光増幅器の使用を前提としているが、ここで説明したファイバー光増幅器に接続される励起用半導体レーザ（４０１など）の電流制御と、単一波長発振レーザ及び光変調素子の制御とは、大モードファイバー光増幅器を使用しない、前述の第１及び第２実施形態による紫外レーザ装置（図１、図２）にもそのまま適用することが可能である。

【０１０７】

以上説明した実施形態１及び２における最終段のファイバー光増幅器１９、２５の出力端は束ねられて所要のバンドル形状に成形される（１１４、２９）。バンドルの数及び形状は、波長変換部の構成や必要とされる光源の形状に合わせて定める。例えば、本実施形態では一つの円形断面を有するバンドルの場合を示す（１１４、２９、５０１、６０１等）。このとき、各ファイバーのクラッド直径は１２５μｍ程度であることから、１２８本を束ねた出力端でのバンドルの直径は約２ｍｍ以下とすることができる。バンドルは最終段のＥＤＦＡもしくはＹＤＦＡの出力端をそのまま用いて形成することができるが、最終段のＥＤＦＡもしくはＹＤＦＡに無ドープのファイバーを結合させ、その出力端でバンドル

を形成することも可能である。

【０１０８】

また、図９に示すように、光増幅器における最終段の各ファイバー４２２の出力端部４２３では、そのファイバー４２２内のコア４２１の径を出力端に向けてテーパ状に徐々に広げて配設し、出力端面４２３での光のパワー密度（単位面積当たりの光強度）を小さくしてやることが好ましい。このとき、テーパの形状はコア径の広がりが出力端面４２３に向けて十分緩やかに増加し、増幅されたレーザ光がテーパ部を伝搬する際にファイバー中での伝搬横モードが保存され、他の横モードの励起が十分無視できる程度（例えば数mrad程度）となるように設定する。

【０１０９】

このように設定することにより、ファイバーの出力端面４２３における光のパワー密度を低下させることができ、ファイバーの損傷において最も問題であるファイバー出力端部のレーザ光による損傷を大幅に抑制する効果が得られる。この効果は、ファイバー光増幅器の出力端から射出されるレーザ光のパワー密度が高いほど（例えば光強度が高いほど、また同一パワーに対するコア径が小さいほど、あるいは全パワーを分割するチャネル数が少ないほど等）大きな効果が得られる。

【０１１０】

また、図１０（ａ）に示すように最終段のファイバー４３２の出力端部４３４には、上記コア径の拡大と併せて、あるいはレーザ光のパワー密度によっては単独で、レーザ光を透過する適切な厚さの窓部材４３３を密着して配設することが好ましい。但し、図１０（ａ）ではファイバー内のコア４３１の径を拡大しないで、窓部材４３３のみによって出力光のパワー密度を小さくしている。

【０１１１】

ここで、前述の実施形態１、２のようにファイバー出力が複数の場合には、各ファイバー端部毎に窓部材を設ける図１０（ａ）の方法のほか、図１０（ｂ）に示すように、各ファイバー光増幅器４４２の出力群ごとの出力端部４４４に共通の窓部材４４３を設けることも本形態における一つの実施例である。但し、図１０（ｂ）ではファイバー内のコア４４１の径を拡大していないが、コア径の拡大を併用してもよい。

【０１１２】

なお、１つの窓部材４４３が共通に設けられる複数のファイバー光増幅器の数は任意でよく、例えば図１又は図２に示した最終段のファイバー光増幅器１９又は２５の総数、即ち１２８本としてもよい。なお、窓部材（４３３又は４４３）は基本波レーザ光の波長域での透過率、及びファイバーとの密着性などを考慮してその材質が適宜選定（例えばＢＫ７等の光学ガラス材や石英材等）され、またファイバーと窓部材との密着には、オプティカルコンタクトあるいは融着等の方法を用いることができる。

【０１１３】

このように構成することにより、窓部材から射出されるレーザ光のパワー密度はファイバー・コア４３１、４４１中でのパワー密度より小さくなるため、ファイバー出力端部のレーザ光による損傷を抑制する効果が得られる。そして、前記出力端部におけるファイバー・コア径の拡大と組み合わせることにより、従来問題であったファイバー出力端部の損傷の問題を解決することが可能である。

【０１１４】

なお、以上の各実施形態（図１、図２、図４、図８）では、戻り光の影響を避けるため、各接続部に適宜アイソレータ１１０、１１１、１１２、２６、２７、４０４等を挿入し、また良好なＥＤＦＡ増幅特性を得るために狭帯域フィルタ１１３、２８、４０３を挿入する構成例を示した。但し、アイソレータ又は狭帯域フィルターを配置する箇所、あるいはその数は前述の実施形態に限定されるものではなく、例えば本発明によるレーザ光源が適用される各種装置（露光装置など）の要求精度などに応じて適宜決定すればよく、アイソレータと狭帯域フィルターとの少なくとも一方を一切設けないこともある。

【０１１５】

なお狭帯域フィルターは、所望の単一波長のみに対して高透過率が得られればよく、フィルターの透過波長幅は１ｐｍ以下で十分である。このように狭帯域フィルターを用いることにより、ファイバー増幅器で発生する自然放出光ＡＳＥ（Amplified Spontaneous Emission）によるノイズを軽減でき、また、前段のファイバー光増幅器からのＡＳＥによる、基本波出力の増幅率低下を押さえることができる。

【０１１６】

また、前述の実施形態では光変調素子１２又は２２で切り出されるパルス光の強度又はファイバー光増幅器の出力をモニターしておき、パルス毎にその強度が一定となるように、光変調素子に印加するドライブ用電圧パルス、及びオフセットＤＣ電圧の大きさを調整して、パルス光の強度をフィードバック制御してもよい。さらに、多数のファイバー光増幅器１９又は２５から発生するレーザ光を検出して、各チャネルでのレーザ光の遅延時間やチャネル間でのレーザ光の発振間隔などをモニターし、その遅延時間や発振間隔などがそれぞれ所定値となるように、光変調素子に印加するドライブ用電圧パルスのタイミングを制御したり、あるいは図２中のＴＤＭ２３を制御することで、ファイバーバンドル出力端でのレーザ光の発振タイミングをフィードバック制御してもよい。また、波長変換部５００から発生する紫外光の波長を検出し、この検出値に基づいて単一波長発振レーザ１１又は２１の温度を調整して、紫外光の波長をフィードバック制御してもよい。

【０１１７】

さらに、光変調素子１２又は２２で切り出されるパルス光の強度変動を検出し、この出力変動を補償するように光変調素子よりも後段に配置される複数段のファイバー光増幅器（１３、１８、１９、又は２４、２５）の少なくとも一段での利得を制御する、いわゆるフィードフォワード制御を行うようにしてもよい。また、前述のチャネル０～１２７のうち、遅延時間が短いチャネル、即ちパルス光が早く出力されるチャネルの出力（光強度）を検出し、この検出値に基づいてファイバー光増幅器の利得（又はＴＤＭ２３）を制御して、そのチャネルよりも遅延時間が長いチャネル、即ちパルス光が遅れて出力されるチャネルの出力をフィードフォワード制御するようにしてもよい。また、特に図１に示した実施形態１では、チャネル単位でその出力を制御するのではなく、３２個のチャネルを持つブロック単位でその出力を制御してもよく、例えば第１ブロックの少なくとも１つのチャネルの出力を検出し、この検出値に基づいて第２ブロックでのチャネルの出力を制御してもよい。

【０１１８】

本発明に係る紫外レーザ装置の第３の実施形態を、図３を参照しながら説明する。本実施形態による紫外光発生装置は、単一波長発振レーザ３１からなり単一波長のレーザ光を発生するレーザ光発生部と、ファイバー光増幅器３３、３４からなり入射光を増幅する光増幅器、及び増幅された光を波長変換する波長変換部（不図示）などから構成され、ＡｒＦエキシマレーザと同じ出力波長（１９３ｎｍ）あるいはF_2レーザと同じ出力波長（１５７ｎｍ）のレーザ光を発生する紫外レーザ装置を提供するものである。

【０１１９】

本実施形態において、図３に示す紫外レーザ装置には、単一波長のレーザ光を発生する単一波長発振レーザ３１を備え、この単一波長発振レーザ３１の光出力はファイバー光増幅器３３、３４により増幅される。このファイバー光増幅器３４の出力は、例えば図１３に示す波長変換部（６０２～６１１）にその増幅されたレーザ光が入射する。なお、図３におけるファイバー光増幅器３４の出射端は、図１１及び図１３に示されるファイバーバンドル出射端５０１及び６０１に対応する。この波長変換部は、一組の非線形光学結晶６０２、６０４、６０９、６１１などを備えて構成され、光増幅器（３１～３６）から出射される基本波を紫外光に変換する。なお、本発明に係る波長変換部については、実施の形態の後段において実施形態４～７として詳細に説明する。

【０１２０】

以下、本実施形態についてより詳細に説明する。図３に示す単一波長で発振する単一波長発振レーザ３１としては、例えば、発振波長１．５４４μｍ、ＣＷ出力３０ｍＷのInGaAs

P,ＤＦＢ半導体レーザを用いる。このレーザは基本的に単一縦モード発振をすることから、その発振スペクトル線幅は０．０１ｐｍ以下に抑えられる。

【０１２１】

この半導体レーザ３１の光出力（連続光）は、例えば電気光学光変調素子や音響光学光変調素子などの光変調素子３２によってパルス光に変換される。本構成例では一例として、この光変調素子３２によってパルス幅１ｎｓ、繰り返し周波数１００ｋＨｚのパルス光に変調させた場合について説明を行う。この様な光変調を行った結果、光変調素子３２から出力されるパルス光のピーク出力は３０ｍＷ、平均出力は３μＷとなる。

【０１２２】

前述の実施形態１、２と同様にしてパルス化された出力光を、一段あるいは多段のＥＤＦＡ（エルビウム・ドープ・ファイバー光増幅器）を有するファイバー光増幅器によって増幅する。本実施形態では、一例として、２段のファイバー光増幅器３３、３４によって合計５８ｄＢ（６６７０００倍）の増幅を行う場合について示した。この場合には、このファイバー光増幅器３４の出力端での平均出力は２Ｗとなる。この出力端部は最終段のファイバー光増幅器３４の出力端をそのまま用いて形成することができるが、最終段のファイバー光増幅器３４に無ドープのファイバーを結合させる事も可能である。また、本実施形態では、戻り光の影響を避けるため、各接続部に適宜アイソレータ３５、３６を挿入した構成例を示す。

【０１２３】

この光増幅器の出力である波長１．５４４μｍの単一波長パルスレーザ光は、非線形光学結晶を用いた波長変換部（詳細後述）により、スペクトル線幅の狭い紫外光パルス出力に変換される。なお、本実施形態による光増幅器（３１～３６）ではその出力端が１本のファイバー光増幅器３４からなるが、例えば実施形態１（図１）で用いた平板導波路型スプリッタ（１６）、又は実施形態２で用いたＴＤＭ（２３）とともに、ファイバー光増幅器（３３、３４）をそれぞれ複数用意してファイバー光増幅器３４を束ねてファイバーバンドルを形成するようにしてもよい。このとき、複数の光増幅器にそれぞれ設けられる光変調素子３２に印加するドライブ用電圧パルスのタイミングを調整して、複数の光増幅器から射出されるパルス光の発振間隔を調整可能とする、例えば等時間間隔でパルス光が順次発光されるように、光増幅器毎にその発光タイミングをずらすことが好ましい。

【０１２４】

また、本実施形態についても前述の実施形態１、２の変形例を適用することが可能である。例えば、単一波長発振レーザ３１をパルス発振させても良いし、さらには単一波長発振レーザ３１の電流制御のみ、あるいはその電流制御と光変調素子３２の制御とを併用してパルス光の出力間隔（パルス周期）を変更しても良い。

【０１２５】

次に、前述の実施形態１～３でそれぞれ使用される波長変換部の実施の形態について述べる。図１１（ａ）～（ｄ）には、本発明に係る波長変換部の構成例を実施の形態４として示す。これらはいずれも、ファイバーバンドルの出力端５０１（実施の形態１における１１４、実施の形態２における２９等に該当するが、実施の形態３における単一ファイバー（３４）の出力端であってもよい。）から射出される波長１．５４４ｎｍの基本波を、非線形光学結晶を用いて８倍波（高調波）に波長変換して、ＡｒＦエキシマレーザと同じ波長である１９３ｎｍの紫外光を発生する構成例を示したものである。

【０１２６】

図１１（ａ）では、ファイバーバンドル出力端５０１から出力される波長１．５４４ｎｍ（周波数ω）の基本波は、非線形光学結晶５０２、５０３、５０４を図中左から右に向かって透過して出力される。基本波が非線形光学結晶５０２を通る際に、２次高調波発生により基本波の周波数ωの２倍、すなわち周波数２ω（波長は１／２の７７２ｎｍ）の２倍波が発生する。発生した２倍波は右方向へ進み、次の非線形光学結晶５０３に入射する。ここで再び第２次高調波発生を行い、入射波の周波数２ωの２倍、すなわち基本波に対し４倍の周波数４ω（波長は１／４の３８６ｎｍ）をもつ４倍波が発生する。発生した４倍

波はさらに右の非線形光学結晶５０４に進み、ここで再び第２次高調波発生を行い、入射波の周波数４ωの２倍、すなわち基本波に対し８倍の周波数８ωを有する８倍波（波長は１／８の１９３ｎｍ）を発生する。

【０１２７】

前記波長変換に使用する非線形光学結晶としては、例えば基本波から２倍波への変換結晶５０２にはLiB_3O_5（ＬＢＯ）結晶を、２倍波から４倍波への変換結晶５０３にはLiB_3O_5（ＬＢＯ）結晶を、４倍波から８倍波への変換結晶５０４には$Sr_2Be_2B_2O_7$（ＳＢＢＯ）結晶を使用する。ここで、ＬＢＯ結晶を使用した基本波から２倍波への変換には、波長変換のための位相整合にＬＢＯ結晶の温度調節による方法、Non-Critical Phase Matching：ＮＣＰＭを使用する。ＮＣＰＭは、非線形光学結晶内での基本波と第二高調波との角度ずれ(Walk-off)が起こらないため高効率で２倍波への変換を可能にし、また発生した２倍波はWalk-offによるビームの変形も受けないため有利である。

【０１２８】

図１１（ｂ）は、基本波（波長１．５４４μｍ）→２倍波（波長７７２ｎｍ）→３倍波（波長５１５ｎｍ）→６倍波（波長２５７ｎｍ）→８倍波（波長１９３ｎｍ）の順に波長変換する場合について示したものである。

【０１２９】

1段目の波長変換部５０７では、基本波から2倍波への２次高調波発生の変換にＬＢＯ結晶が前述したＮＣＰＭで使用される。波長変換部（ＬＢＯ結晶）５０７は、基本波の一部を波長変換せずに透過させるとともに、基本波を波長変換して２倍波を発生し、この基本波と２倍波に波長板（例えば１／２波長板）５０８でそれぞれ半波長、１波長の遅延を与え、基本波の偏光のみ９０度回転させる。この基本波と２倍波はそれぞれレンズ５０９を通って２段目の波長変換部５１０に入射する。

【０１３０】

２段目の波長変換部５１０では、１段目の波長変換部５０７で発生した２倍波と、変換せずに透過した基本波とから和周波発生により３倍波（波長５１５ｎｍ）を得る。波長変換結晶としてはＬＢＯ結晶が用いられるが、１段目の波長変換部（ＬＢＯ結晶）５０７とは温度が異なるＮＣＰＭで使用される。波長変換部５１０で得られた３倍波と、波長変換されずに透過した２倍波とは、ダイクロイック・ミラー５１１により分離し、ダイクロイック・ミラー５１１で反射された３倍波は、レンズ５１３を通って３段目の波長変換部５１４に入射する。波長変換部５１４はβ-BaB_2O_4（ＢＢＯ）結晶であり、ここで３倍波が２次高調波発生により６倍波 （波長２５７ｎｍ）に変換される。

【０１３１】

波長変換部５１４で得られた６倍波と、ダイクロイック・ミラー５１１を透過してレンズ５１２を通った２倍波とは、ダイクロイック・ミラー５１６で同軸に合成されて４段目の波長変換部５１７に入射する。波長変換部５１７はＢＢＯ結晶が用いられ、６倍波と２倍波とから和周波発生により８倍波（波長１９３ｎｍ）を得る。図１１（ｂ）の構成においては、４段目の波長変換部５１７の波長変換結晶として、ＢＢＯ結晶の代わりに$CsLiB_6O_{10}$（ＣＬＢＯ）結晶を用いることも可能である。

【０１３２】

なお、本実施例では２段目の波長変換部５１０で得られた３倍波と２倍波とをダイクロイック・ミラー５１１で分岐し、かつ３段目の波長変換部５１４で得られた６倍波と２段目の波長変換部５１０で得られた２倍波とをダイクロイック・ミラー５１６で合成して、４段目の波長変換部５１７に入射させるように構成した。ここで、ダイクロイック・ミラー５１１の特性を反転させる、即ち３倍波が透過し、かつ２倍波が反射するものとして、３段目の波長変換部５１４を２段目の波長変換部５１０と同一光軸上に配置するようにしてもよい。このとき、ダイクロイック・ミラー５１６の特性も反転させておく必要がある。このように６倍波と２倍波との一方が分岐光路を通って４段目の波長変換部５１７に入射する構成では、６倍波と２倍波をそれぞれ４段目の波長変換部５１７に入射させる集光レンズ５１５、５１２を互いに異なる光路に配置することができる。

【０１３３】
３段目の波長変換部５１４で発生した６倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっているため、４段目の波長変換部５１７で良好な変換効率を得るためには、その６倍波のビーム整形を行うことが望ましい。そこで本実施例のように、集光レンズ５１５、５１２を別々の光路に配置することにより、例えばレンズ５１５としてシリンドリカルレンズ対を用いること等が可能となり、６倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、４段目の波長変換部（ＢＢＯ結晶）５１７での２倍波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。
【０１３４】
なお、２段目の波長変換部５１０と４段目の波長変換部５１７との間の構成は図１１（ｂ）に限られるものではなく、４段目の波長変換部５１７に６倍波と２倍波とが同時に入射するように、６倍波と２倍波とでその光路長が等しくなっていれば、いかなる構成であってもよい。さらに、例えば２段目の波長変換部５１０と同一光軸上に３段目及び４段目の波長変換部５１４、５１７を配置し、３段目の波長変換部５１４で３倍波のみを第２高調波発生により６倍波に変換して、波長変換されない２倍波とともに４段目の波長変換部５１７に入射させてもよく、これによりダイクロイック・ミラー５１１、５１６を用いる必要がなくなる。
【０１３５】
図１１（ｃ）は、基本波（波長１．５４４μｍ）→２倍波（波長７７２ｎｍ）→４倍波（波長３８６ｎｍ）→６倍波（波長２５７ｎｍ）→８倍波（波長１９３ｎｍ）の順に波長変換する場合について示したものである。
【０１３６】
１段目の波長変換部５１８ではその波長変換結晶としてＬＢＯ結晶が用いられ、基本波を２倍波に波長変換するためにそのＬＢＯ結晶がＮＣＰＭで使用される。１段目の波長変換部５１８から発生する２倍波は、集光レンズ５１９を通って２段目の波長変換部５２０に入射する。
【０１３７】
２段目の波長変換部５２０では、その波長変換結晶としてＬＢＯ結晶が用いられ、１段目の波長変換部５１８で発生した２倍波から２次高調波発生により４倍波（波長３８６ｎｍ）を得る。波長変換部５２０で得られた４倍波と、波長変換されずにその波長変換部５２０を透過した２倍波とは、ダイクロイック・ミラー５２１により分離し、ここで反射された４倍波は集光レンズ５２４を通ってダイクロイック・ミラー５２５に達する。一方、ダイクロイック・ミラー５２１を透過した２倍波は、半波長板５２２でその偏光方向が９０°回転されるとともに、集光レンズ５２３を通ってダイクロイック・ミラー５２５に達し、ここで分岐光路を通った２倍波と同軸に合成されて３段目の波長変換部５２６に入射する。
【０１３８】
３段目の波長変換部５２６では、その波長変換結晶としてＢＢＯ結晶が用いられ、２段目の波長変換部５２０で発生した４倍波と、波長変換されずにその波長変換部５２０を透過した２倍波とから和周波発生により６倍波（波長２５７ｎｍ）を得る。波長変換部５２０で得られた６倍波と、波長変換されずにその波長変換部５２０を透過した２倍波とは、ダイクロイック・ミラー５２７により分離し、ここで反射された２倍波は半波長板５２８でその偏光方向が９０°回転されるとともに、集光レンズ５２９を通ってダイクロイック・ミラー５３１に達する。一方、ダイクロイック・ミラー５２７を透過した６倍波は、集光レンズ５３０を通ってダイクロイック・ミラー５３１に達し、ここで分岐光路を通った２倍波と同軸に合成されて４段目の波長変換部５３２に入射する。
【０１３９】
４段目の波長変換部５３２では、その波長変換結晶としてＢＢＯ結晶が用いられ、３段目の波長変換部５２６で発生した６倍波と、波長変換されずにその波長変換部５２６を透過した２倍波とから和周波発生により８倍波（波長１９３ｎｍ）を得る。上記構成において

は、４段目の波長変換部５３２の波長変換結晶として、ＢＢＯ結晶の代わりにＣＬＢＯ結晶を用いることも可能である。

【０１４０】

なお、本実施例では２段目及び３段目の波長変換部５２０、５２６の後にそれぞれダイクロイック・ミラー（５２１、又は５２７）を配置して、その波長変換部（５２０、又は５２６）から射出される一対の高調波（２倍波と４倍波、又は２倍波と６倍波）がそれぞれ異なる光路を通って次段の波長変換部（５２６、又は５３２）に入射するように構成したが、図１１（ｂ）での説明と同様に、３段目の波長変換部５２６を他の波長変換部５１８、５２０、５３２と同一光軸上に配置してもよく、これによりダイクロイック・ミラー５２１、５２５、５２７、５３１などを用いる必要がなくなる。

【０１４１】

ところで、本実施例では２段目および３段目の波長変換部５２０、５２６で発生した４倍波、及び６倍波はそれぞれ断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、このビームを入力とする３段目および４段目の波長変換部５２６、５３２で良好な変換効率を得るためには、入射ビームとなる４倍波及び６倍波のビーム形状を整形し、２倍波ビームとの重なりを良好にすることが望ましい。本実施例のように、集光レンズ５２３と５２４、及び５２９と５３０とをそれぞれ別々の光路に置くことにより、例えばレンズ５２４、５３０としてシリンドリカルレンズ対を用いることが可能になり、４倍波及び６倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、３段目および４段目の波長変換部５２６、５３２でそれぞれ２倍波との重なりが良好になり、変換効率を高めることが可能である。

【０１４２】

なお、２段目の波長変換部５２０から発生する２倍波と４倍波とが同時に３段目の波長変換部５２６に入射するように、その２倍波と４倍波の各光路長が同一になっていればよく、２つの波長変換部５２０、５２６間の構成は図１１（ｃ）に限られるものではない。このことは３段目の波長変換部５２６と４段目の波長変換部５３２との間でも同様である。

【０１４３】

図１１（ｄ）は、基本波（波長１．５４４μｍ）→２倍波（波長７７２ｎｍ）→３倍波（波長５１５ｎｍ）→４倍波（波長３８６ｎｍ）→７倍波（波長２２１ｎｍ）→８倍波（波長１９３ｎｍ）の順に波長変換する場合について示したものである。

【０１４４】

１段目の波長変換部５３３では、その波長変換結晶としてＬＢＯ結晶が用いられ、基本波を２倍波に波長変換するためにそのＬＢＯ結晶をＮＣＰＭで使用する。波長変換部５３３で波長変換されずに透過した基本波と、波長変換で発生した２倍波とは、波長板５３４でそれぞれ半波長、１波長の遅延が与えられて、基本波のみその偏光方向が９０度回転する。２段目の波長変換部５３６は、その波長変換結晶としてＬＢＯ結晶が用いられるとともに、そのＬＢＯ結晶は１段目の波長変換部（ＬＢＯ結晶）５３３とは温度が異なるＮＣＰＭで使用される。この波長変換部５３６では、１段目の波長変換部５３３で発生した２倍波と、波長変換されずにその波長変換部５３３を透過した基本波とから和周波発生により３倍波（波長５１５ｎｍ）を得る。

【０１４５】

波長変換部５３６で得られた３倍波と、波長変換されずにその波長変換部５３６を透過した基本波および２倍波とは、ダイクロイック・ミラー５３７により分離し、ここで反射された３倍波は集光レンズ５４０、及びダイクロイック・ミラー５４３を通って４段目の波長変換部５４５に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー５３７を透過した基本波および２倍波は、集光レンズ５３８を通って３段目の波長変換部５３９に入射する。

【０１４６】

３段目の波長変換部５３９は、その波長変換結晶としてＬＢＯ結晶が用いられ、基本波が波長変換されずにそのＬＢＯ結晶を透過するとともに、２倍波がＬＢＯ結晶で２次高調波発生により４倍波（波長３８６ｎｍ）に変換される。波長変換部５３９で得られた４倍波

とそれを透過した基本波とは、ダイクロイック・ミラー５４１により分離し、ここを透過した基本波は集光レンズ５４４を通るとともに、ダイクロイックミラー５４６で反射されて５段目の波長変換部５４８に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー５４１で反射された４倍波は、集光レンズ５４２を通ってダイクロイック・ミラー５４３に達し、ここでダイクロイック・ミラー５３７で反射された３倍波と同軸に合成されて４段目の波長変換部５４５に入射する。

【０１４７】

４段目の波長変換部５４５は、その波長変換結晶としてＢＢＯ結晶が用いられ、３倍波と４倍波とから和周波発生により７倍波（波長２２１ｎｍ）を得る。波長変換部５４５で得られた７倍波は集光レンズ５４７を通るとともに、ダイクロイック・ミラー５４６で、ダイクロイック・ミラー５４１を透過した基本波と同軸に合成されて、５段目の波長変換部５４８に入射する。

【０１４８】

５段目の波長変換部５４８は、その波長変換結晶としてＬＢＯ結晶が用いられ、基本波と７倍波とから和周波発生により８倍波（波長１９３ｎｍ）を得る。上記構成において、７倍波発生用ＢＢＯ結晶５４５、及び８倍波発生用ＬＢＯ結晶５４８のかわりに、ＣＬＢＯ結晶を用いることも可能である。

【０１４９】

本実施例では、４段目の波長変換部５４５に３倍波と４倍波とが互いに異なる光路を通って入射するので、３倍波を集光するレンズ５４０と、４倍波を集光するレンズ５４２とを別々の光路に置くことができる。３段目の波長変換部５３９で発生した４倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、４段目の波長変換部５４５で良好な変換効率を得るためには、その４倍波のビーム整形を行うことが望ましい。本実施例では、集光レンズ５４０、５４２を別々の光路に配置しているので、例えばレンズ５４２としてシリンドリカルレンズ対を用いることができ、４倍波のビーム整形を容易に行うことが可能となる。このため、４段目の波長変換部（ＢＢＯ結晶）５４５での３倍波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。

【０１５０】

さらに本実施例では、５段目の波長変換部５４８に入射する基本波を集光するレンズ５４４と、７倍波を集光するレンズ５４７とを別々の光路に置くことができる。４段目の波長変換部５４５で発生した７倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、５段目の波長変換部５４８で良好な変換効率を得るためには、その７倍波のビーム整形を行うことが好ましい。本実施例では、集光レンズ５４４、５４７を別々の光路に配置することができるので、例えばレンズ５４７としてシリンドリカルレンズ対を用いることができ、７倍波のビーム整形を容易に行うことが可能となる。このため、５段目の波長変換部（ＬＢＯ結晶）５４８での基本波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。

【０１５１】

なお、２段目の波長変換部５３６と４段目の波長変換部５４５との間の構成は図１１（ｄ）に限られるものではなく、波長変換部５３６から発生してダイクロイック・ミラー５３７で反射される３倍波と、波長変換部５３６から発生してダイクロイック・ミラー５３７を透過する２倍波を波長変換部５３９で波長変換して得られる４倍波とが同時に波長変換部５４５に入射するように、両波長変換部５３６、５４５間の２つの光路長が等しくなっていれば、いかなる構成であっても構わない。このことは３段目の波長変換部５３９と５段目の波長変換部５４８との間でも同様である。

【０１５２】

図１２（ａ）～（ｄ）は、図１１（ａ）～（ｄ）に示した波長変換部についてそれぞれ実験の結果得られた各チャネル当たりの各段での波長変換効率、及び得られた８倍波（波長１９３ｎｍ）の平均出力を示す。基本波の出力は前述の実施形態で説明した通り各チャネルの出力端で、ピーク・パワー２０ｋＷ、パルス幅１ｎｓ、パルス繰り返し周波数１００

ｋＨｚ、及び平均出力２Ｗである。この結果、各チャネル当たりの８倍波（波長１９３ｎｍ）の平均出力は、図１１（ａ）の波長変換部では２２９ｍＷ、図１１（ｂ）の波長変換部では３８．３ｍＷ、図１１（ｃ）の波長変換部では４０．３ｍＷ、図１１（ｄ）の波長変換部では４５．９ｍＷであった。従って、全１２８チャネルを合わせたバンドルからの平均出力は、図１１（ａ）では２９Ｗ、図１１（ｂ）では４．９Ｗ、図１１（ｃ）では５．２Ｗ、図１１（ｄ）では５．９Ｗとなり、いずれの波長変換部であっても露光装置用光源として十分な出力の、波長１９３ｎｍの紫外光を提供することができる。

【０１５３】

これらの実施形態のうちで図１１（ａ）の構成は最も簡略であり、変換効率も最も高い。このため、ファイバー光増幅器のチャネル数を前述の実施形態１、２（１２８チャネル）よりも減少させる、例えば１／２～１／３のチャネル数としてバンドルを構成するか、あるいは、本実施例で示した基本波出力よりも低い基本波出力で構成するなどしても露光装置用光源として十分な出力の、波長１９３ｎｍの紫外光を提供することが可能である。

【０１５４】

図１１（ｄ）の構成は、波長変換部の段数が５段とこれらの実施形態中で最も多いが、１９３ｎｍへの変換効率は図１１（ｂ）、（ｃ）の実施形態と同等程度であり、ほぼ同一の紫外光出力を得ることができる。また、図１１（ｂ）、（ｃ）の構成では、８倍波（１９３ｎｍ）の発生にＢＢＯ結晶を用いているため、ＢＢＯ結晶による８倍波（１９３ｎｍ）の吸収があり、ＢＢＯ結晶の損傷が問題となる可能性がある。これに対し、図１１（ｄ）の構成では８倍波（１９３ｎｍ）の発生にＬＢＯ結晶を用いることができる。このＬＢＯ結晶は、現在、市販品として良質の結晶が容易に入手可能であり、さらに１９３ｎｍの紫外光の吸収係数が非常に小さく、結晶の光損傷が問題とならないため耐久性の面で有利である。

【０１５５】

また、８倍波（例えば波長１９３ｎｍ）の発生部ではＬＢＯ結晶を角度位相整合させて用いるが、この位相整合角が大きいために実効非線形光学定数（ｄｅｆｆ）が小さくなる。そこで、このＬＢＯ結晶に温度制御機構を設け、ＬＢＯ結晶を高温で用いることが好ましい。これにより、位相整合角を小さくすることができる、即ち上記定数（ｄｅｆｆ）を増加させることができ、８倍波発生効率を向上させることができる。

【０１５６】

なお、以上は基本波から８倍波を発生させる波長変換部の構成例についてその好ましい実施の形態について説明してきたが、本発明の波長変換部はこの実施形態にのみ拘束されるものではなく、基本波である１．５４４μｍの８倍波を発生させる構成であれば、同様の効果を奏するものである。例えば、基本波（波長１．５４４μｍ）→２倍波（波長７７２ｎｍ）→３倍波（波長５１５ｎｍ）→４倍波（波長３８６ｎｍ）→６倍波（波長２５７ｎｍ）→７倍波（波長２２１ｎｍ）→８倍波（波長１９３ｎｍ）の順に波長変換することによっても同様の効果を奏するものである。

【０１５７】

このとき、この波長変換に使用する非線形光学結晶としては、例えば基本波から２倍波への変換結晶にはＬＢＯ結晶を、２倍波から４倍波への変換結晶にはＬＢＯ結晶を、２倍波と４倍波との和周波発生による６倍波発生にはＢＢＯ結晶を、基本波と６倍波との和周波発生による７倍波発生にはＢＢＯ結晶を、基本波と７倍波との和周波発生による８倍波発生にはＬＢＯ結晶を使用することで達成できる。この場合にも８倍波発生にＬＢＯ結晶を使用できるため結晶の損傷が問題とならない点で有利である。

【０１５８】

以上の実施形態４に示したように波長変換部を構成することにより、基本波発生部で発生させた波長１．５４４μｍの基本波を波長１９３ｎｍの紫外光に波長変換することができる。

【０１５９】

次に、図１３に本発明に係る波長変換部の他の構成例を実施形態５として示す。これは、

ファイバーバンドルの出力端６０１（実施形態１における１１４、実施形態２における２９等に該当する）から射出される波長１．５７μｍの基本波を非線形光学結晶を用いて１０倍波の高調波発生を行い、F_2レーザと同じ波長である１５７ｎｍの紫外光を発生する構成例を示したものである。なお、本実施形態における基本波出力部は、これまで述べてきた実施の形態１～３のいずれか、あるいはそれらを組み合わせて用いることが可能である

【０１６０】

図１３に示す波長変換部の構成例では、基本波（波長１．５７μｍ）→２倍波（波長７８５ｎｍ）→４倍波（波長３９２．５ｎｍ）→８倍波（波長１９６．２５ｎｍ）→１０倍波（波長１５７ｎｍ）の順に波長変換する場合について示したものである。本実施例では２倍波発生から８倍波発生までの各波長変換段において、各波長変換段に入射された波長の２次高調波発生を行っている。

【０１６１】

また、本例では波長変換に使用する非線型光学結晶として、波長変換部６０２における基本波から２次高調波発生による２倍波の発生にはＬＢＯ結晶を使用し、波長変換部６０４における２倍波から２次高調波発生による４倍波の発生にはＬＢＯ結晶を使用する。さらに、波長変換部６０９における４倍波から２次高調波発生による８倍波の発生には$Sr_2Be_2B_2O_7$（ＳＢＢＯ）結晶を使用し、波長変換部６１１における２倍波と８倍波とから和周波発生による１０倍波（波長１５７ｎｍ）の発生にはＳＢＢＯ結晶を使用する。

【０１６２】

なお、波長変換部６０２から発生する２倍波は、集光レンズ６０３を通って波長変換部６０４に入射し、この波長変換部６０４は前述の４倍波と波長変換されない２倍波とを発生する。次に、ダイクロイック・ミラー６０５を透過する２倍波は集光レンズ６０６を通るとともに、ダイクロイック・ミラー６０７で反射されて波長変換部６１１に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー６０５で反射された４倍波は、集光レンズ６０８を通って波長変換部６０９に入射し、ここで発生される８倍波は集光レンズ６１０、及びダイクロイック・ミラー６０７を通って波長変換部６１１に入射する。さらに波長変換部６１１は、ダイクロイック・ミラー６０７で同軸に合成される２倍波と８倍波とから和周波発生により１０倍波（波長１５７ｎｍ）を発生する。

【０１６３】

ところで、本実施例では２段目の波長変換部６０４から発生する２倍波と４倍波とをダイクロイック・ミラー６０５で分岐することで、ここを透過した２倍波と、４倍波を波長変換部６０９で波長変換して得られる８倍波とが互いに異なる光路を通って４段目の波長変換部６１１に入射するように構成したが、ダイクロイック・ミラー６０５、６０７を用いずに４つの波長変換部６０２、６０４、６０９、６１１を同一光軸上に配置してもよい。

【０１６４】

但し、本実施例では２段目の波長変換部６０４で発生した４倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、このビームを入力とする４段目の波長変換部６１１で良好な変換効率を得るためには、入射ビームとなる４倍波のビーム形状を整形し、２倍波との重なりを良好にすることが望ましい。本実施例では、集光レンズ６０６、６０８を別々の光路に配置することができるので、例えばレンズ６０８としてシリンドリカルレンズを用いることが可能になり、４倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、４段目の波長変換部６１１での２倍波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。

【０１６５】

以上の実施形態５に示したように波長変換部を構成することにより、基本波発生部で発生させた波長１．５７μｍの基本波を、波長１５７ｎｍの紫外光に波長変換させることができる。

【０１６６】

図１４には、本発明に係る波長変換部の他の構成例を実施の形態６として示す。これは、

例えば実施の形態２に示したように基本波発生部を構成し、ファイバーバンドルの出力端７０１（実施の形態１における１１４、実施の形態２における２９等に該当する）から射出される波長１．０９９μｍの基本波を、非線形光学結晶を用いて７倍波の高調波発生を行い、F_2レーザと同じ波長である１５７ｎｍの紫外光を発生する構成例を示したものである。なお、本実施形態における基本波出力部は、これまで述べてきた実施の形態１～３のいずれか、あるいはこれらを組み合わせて用いることが可能である。

【０１６７】

図１４に示す波長変換部の構成例では、基本波（波長１．０９９μｍ）→２倍波（波長５４９．５ｎｍ）→３倍波（波長３６６．３ｎｍ）→４倍波（波長２７４．８ｎｍ）→７倍波（波長１５７ｎｍ）の順に波長変換する場合について示したものである。本実施例では、各波長変換部で入射光の２次高調波発生、又は和周波発生を行っている。

【０１６８】

さて、本例では波長変換に使用する非線型光学結晶として、波長変換部７０２における基本波から２次高調波発生による2倍波の発生にはＬＢＯ結晶を使用し、波長変換部７０５における基本波と２倍波とから和周波発生による３倍波の発生にはＬＢＯ結晶を使用する。さらに、波長変換部７１０における２倍波から２次高調波発生による４倍波の発生にはＢＢＯ結晶を使用し、波長変換部７１２における３倍波と４倍波とから和周波発生による７倍波の発生にはＳＢＢＯ結晶を使用する。

【０１６９】

また、波長変換部（ＬＢＯ結晶）７０２から発生する基本波と２倍波とは１／２波長板７０３に入射し、基本波のみその偏光方向が９０度回転されるとともに、集光レンズ７０４を通って波長変換部（ＬＢＯ結晶）７０５に入射する。波長変換部７０５は、基本波と２倍波とから和周波発生により３倍波を得るとともに、２倍波を波長変換することなく透過させる。波長変換部７０５から発生される２倍波と３倍波とはダイクロイック・ミラー７０６で分岐され、ここを透過した３倍波は集光レンズ７０７を通り、ダイクロイック・ミラー７０８で反射されて波長変換部７１２に入射する。一方、ダイクロイック・ミラー７０６で反射された２倍波は、集光レンズ７０９を通って波長変換部７１０に入射し、この波長変換部７１０は２倍波から２次高調波発生により４倍波を発生する。この４倍波は、集光レンズ７１１、及びダイクロイック・ミラー７０８を通って波長変換部７１２に入射する。この波長変換部７１２は、３倍波と４倍波とから和周波発生により７倍波を発生する。

【０１７０】

ところで、本実施例では２段目の波長変換部７０５から発生する２倍波と３倍波とをダイクロイック・ミラー７０６で分岐することで、ここを透過した３倍波と、２倍波を波長変換部７１０で波長変換して得られる４倍波とが互いに異なる光路を通って４段目の波長変換部７１２に入射するように構成したが、ダイクロイック・ミラー７０６、７０８を用いずに４つの波長変換部７０２、７０５、７１０、７１２を同一光軸上に配置してもよい。

【０１７１】

但し、本実施例では３段目の波長変換部７１０で発生した４倍波はその断面形状がWalk-off現象により長円形になっている。このため、このビームを入力とする４段目の波長変換部７１２で良好な変換効率を得るためには、入射ビームとなる４倍波のビーム形状を整形し、３倍波との重なりを良好にすることが望ましい。本実施例では、集光レンズ７０７、７１１を別々の光路に配置することができるので、例えばレンズ７１１としてシリンドリカルレンズを用いることが可能になり、４倍波のビーム整形を容易に行うことができる。このため、４段目の波長変換部７１２での３倍波との重なりを良好にし、変換効率を高めることが可能である。

【０１７２】

以上の実施形態６に示したように波長変換部を構成することにより、基本波発生部で発生させた波長１．０９９μｍの基本波を、波長１５７ｎｍの紫外光に波長変換させることができる。

【０１７３】
次に、本発明に係る光増幅器および波長変換部の他の構成例を実施形態７として図１５に示す。図１５では、波長変換部を複数の並列光路構成（図の例では４光路の正方形配置）とし、これにあわせて多数のファイバー光増幅器１９または２５の出力端を４つのバンドル（出力群）に分割するとともに、この４つのファイバーバンドル出力端に対応してそれぞれ集光光学素子、及び波長変換部を設ける実施例を示す。本例では、図１又は図２に示した光増幅器を用いることを前提としているので、１つのファイバーバンドルには３２本のファイバー光増幅器１９又は２５が束ねられることになる。なお、バンドルは最終段のＥＤＦＡ出力端もしくはＹＤＦＡ出力端をそのまま用いて形成することができるが、最終段のＥＤＦＡ等に無ドープのファイバーを結合させ、その出力端でバンドルを形成することも可能である。

【０１７４】
また、ファイバー光増幅器１９または２５の出力端を複数に分割して、複数個のファイバーバンドルを形成する場合には、多数（本例では１２８本）のファイバー光増幅器１９又は２５のうち、レーザ光の射出順番で隣り合う出力端（ファイバー光増幅器）は、互いに異なるファイバーバンドルに束ねる構成とすることが好ましい。例えば、レーザ光が射出する順番にその１２８本のファイバー光増幅器（１９又は２５）にＮｏ.０～１２７の番号を付けるものとすると、Ｎｏ.０、４、８、・・・、１２４のファイバー光増幅器を第１のファイバーバンドルとして束ね、Ｎｏ.１、５、９、・・・、１２５のファイバー光増幅器を第２のファイバーバンドルとして束ね、Ｎｏ.３、６、１０、・・・、１２６のファイバー光増幅器を第３のファイバーバンドルとして束ね、Ｎｏ.４、７、１１、・・・、１２７のファイバー光増幅器を第４のファイバーバンドルとして束ねる。これにより、ファイバーバンドル毎にそれに対応して配置される波長変換部（非線形光学結晶）に入射するパルス光の時間間隔を均等に分割することができる。

【０１７５】
さて、図１５に示すように４つのファイバーバンドルからなる光増幅器（図１、又は図２）の出力端８４１から射出される基本波は、本例では３段の波長変換部８４２、８４３、８４４でそれぞれ波長変換される。なお、本例では前述の実施形態４～６で説明した波長変換部（図１１、図１３、図１４）のいずれでも用いることができるが、ここでは図１１（ａ）に示した波長変換部を用いる、即ち基本波（波長１．５４４μｍ）を３段の非線形光学結晶（５０２～５０４）によって波長１９３ｎｍの紫外光に波長変換する例について説明する。従って、波長１．５４４μｍ（周波数ω）の基本波は、非線形光学結晶８４２、８４３、８４４を図中左から右に向かって透過いていくことで、２倍波、４倍波、８倍波（波長１９３ｎｍ）と順次波長変換されて出力される。

【０１７６】
図１５において、４つのファイバーバンドルからなる光増幅器の出力端８４１から射出される基本波（波長１．５４４μｍ）は、４つのファイバーバンドルに対応してそれぞれ設けられる集光レンズ８４５を通って波長変換部（非線形光学結晶）８４２に入射し、ここで２次高調波発生により基本波の周波数ωの２倍、すなわち周波数２ω（波長７７２ｎｍ）の２倍波が発生する。波長変換部８４２で発生した２倍波は右方向へ進み、集光レンズ８４６を通って次の波長変換部（非線形光学結晶）８４３に入射する。ここで再び２次高調波発生が行われ、入射波（２倍波）の周波数２ωの２倍、すなわち基本波に対して４倍の周波数４ω（波長３８６ｎｍ）をもつ４倍波が発生する。波長変換部８４３で発生した４倍波は、集光レンズ８４７を通ってさらに右の波長変換部（非線形光学結晶）８４４に入射し、ここでさらに２次高調波発生が行われ、入射波（４倍波）の周波数４ωの２倍、すなわち基本波に対して８倍の周波数８ω（波長１９３ｎｍ）をもつ８倍波を発生する。

【０１７７】
この実施形態において前記波長変換に使用する非線形光学結晶としては、例えば波長変換部８４２での基本波から２倍波への波長変換結晶としてＬＢＯ結晶を、波長変換部８４３での２倍波から４倍波への波長変換結晶としてＢＢＯ結晶を、波長変換部８４４での４倍

波から８倍波への波長変換結晶としＳＢＢＯ結晶を使用する。

【０１７８】

なお、本実態様では基本波（波長１．５４４μｍ）→２倍波（波長７７２ｎｍ）→４倍波（波長３８６ｎｍ）→８倍波（波長１９３ｎｍ）の順に波長変換する場合について示したが、これは既に説明した実施形態４における図１１（ａ）の波長変換部を複数並列化したものに相当する。従って、すでに示した他の波長変換部構成である図１１（ｂ）～図１１（ｄ）を本実施形態と同様の手法で複数並列化したものも本実施形態と同様に構成することができる。同様に、図１３及び図１４にそれぞれ示した波長変換部を複数並列化して構成するようにしてもよい。

【０１７９】

次に、図１６を参照して光増幅器と波長変換部との結合部についての本実施形態における第２の実施例を説明する。この実施例は図１５に示した波長変換部の構成を５光路の並列構成とし、これに合わせてファイバー光増幅器の出力端を５つに分割して５つのファイバーバンドル（出力群）を形成したものである。この分割に際してファイバー光増幅器の出力端を均等に５分割せず、５つのファイバーバンドル（出力群）の一部（図１５では１つのファイバーバンドル）の出力端８５０は単独又は少数のファイバー光増幅器で構成し、他（図１５では４つ）のファイバーバンドル出力端８５１はファイバー光増幅器の数が同数となるように均等に分割された複数のファイバー光増幅器を束ねたものである。

【０１８０】

そして、これら出力光は各出力群（ファイバーバンドル）ごとに設けられた波長変換部８５２～８５７で所定波長の紫外光に変換され、例えば露光装置へ供給される。なお、３段の波長変換部８５２～８５４はそれぞれ複数（５つ）のファイバーバンドルと同数の波長変換部から構成され、その波長変換部８５２～８５４の入射側にそれぞれ配置される集光光学素子８５５～８５７もそれぞれファイバーバンドルと同数の集光レンズから構成されている。

【０１８１】

ここで、本例による紫外レーザ装置を露光装置（図１９又は図２０）に適用する場合、４つのファイバーバンドルの出力端８５１からそれぞれ発生する基本波は、波長変換部（８５２～８５７）で紫外光に波長変換され、この紫外光が露光用照明光として照明光学系を通ってレチクルに照射される。即ち、４つのファイバーバンドルは露光用光源として使用される。一方、単独あるいは少数のファイバー光増幅器で構成されるファイバーバンドルの出力端８５０から発生して、紫外光に波長変換された光出力は、露光装置に設けられるアライメント系、又はモニター系などに導かれる。即ち、１つのファイバーバンドル（８５０）はアライメント用光源などとして使用される。なお、ファイバーバンドル出力端８５０から発生して波長変換された紫外光は、例えば３段目の波長変換部８５４に結合される無ドープ・ファイバーによってアライメント系などに伝送される。

【０１８２】

ところで、図１６では４つのファイバーバンドルの出力端８５１から発生する基本波を紫外光に波長変換して照明光学系に導くものとしたが、そのファイバーバンドルの数は１つであっても複数であってもよい。また、アライメントやモニターに用いるファイバーバンドルは１つであったが、その数を複数としてもよく、この複数のファイバーバンドルから射出される光をそれぞれ異なる光学系に導くようにしてもよい。

【０１８３】

本例では、露光用光源とアライメント用、又はモニター用等に使用する光源とが同一であり、露光用照明光とアライメント用照明光などとは同一の単一波長発振レーザの出力光を分岐、増幅、及び波長変換したものとなり、同一波長の紫外光を用いることができる。このため、アライメントあるいは各種のモニターを露光装置の照明光学系や投影光学系などの光学系を通して行うことが可能になる。

【０１８４】

従って、アライメント用光学系などの設計が容易になり、その構成を大幅に簡略化できる

、あるいは別途設ける必要がなくなり、露光装置を簡易に構築することが可能となる。なお、露光用照明光の照射とアライメント用照明光などの照射とを同時に行わないことがあるので、例えば照明光路内にそれぞれシャッターを設ける、あるいはＴＤＭ２３によってパルス光を振り分けるチャネルを選択するようにして、その照射のタイミングを独立に制御することが好ましい。

【０１８５】

さらに、投影光学系の焦点位置、投影倍率、収差、及びテレセントリシティなどを計測するために、前述のアライメント用やモニター用の紫外光を用いることができ、その計測精度を向上させることが可能となる。なお、投影光学系の結像面と感光基板（ウエハ）との焦点合わせを行う場合にも、露光波長と同一波長の光を使用し、かつ投影光学系を通してその焦点合わせを行うことにより、位置合わせ精度の向上も同時に達成することができる。

【０１８６】

ところで、以上説明した様な本実施形態（図１５、図１６）の構成によれば、ファイバー光増幅器のファイバー出力を複数の群に分割し、非線形光学結晶への入力光を分割することにより、非線形光学結晶への入射パワーを効果的に低減できる。従って、非線形光学結晶中での光吸収・熱効果に起因する出力低下や光損傷などの問題を解決することができる。なお、ファイバー光増幅器の出力端の分割数（ファイバーバンドルの数）は４つ又は５つに限られるものではなく、２つ以上であればよい。

【０１８７】

次に、本発明に係る紫外光発生装置における光増幅器と波長変換部との結合部について実施形態８として説明する。ここで、光増幅器の出力端は前述の実施形態１及び２で述べたようにファイバー光増幅器の出射端がバンドル状に束ねられ形成されている。このとき、各ファイバー光増幅器のクラッド直径は１２５μｍ程度であることから、１２８本を束ねた出力端でのバンドルの直径は約２ｍｍ以下とすることができる。

【０１８８】

ここで、バンドルの数及び形状は、波長変換部の構成や必要とされる光源の形状に合わせて定めることが可能であり、例えば実施形態１、２では一つの円形断面を有するバンドルの場合を示している（１１４、２９、５０１、６０１、７０１等）。このとき、ファイバー光増幅器の出力端部が例えば図９あるいは図１０に示したように平坦面に形成されている場合には、ファイバーバンドルの出力端と第１段目の波長変換部（非線形光学結晶）との間に集光レンズ（例えば図１５の集光レンズ８４５など）を設けて、ファイバーバンドルから発生する光を非線形光学結晶に集光させることにより、ファイバー光増幅器の出力光を有効に入射させることができる。

【０１８９】

また、本発明に係るこの結合部の他の実施例を図１７に示す。図１７において、複数のファイバー光増幅器の出射端が束ねられたファイバーバンドル出力端９０１から基本波が射出されるが、ファイバー光増幅器毎にレンズ９０２が配置され、このレンズ９０２によって基本波は１段目の波長変換部（非線形光学結晶）９０３（例えば第４の実施形態（図１１）における５０２、５０７、５１８、５３３等）に集光する。本実施例では、ファイバーバンドル全体の直径を２ｍｍ、ファイバーバンドルを構成する各ファイバー光増幅器のモード径を２０μｍとし、個別のレンズ９０２により、１段目の波長変換部９０３に集光する例について示す。なお、１段目の波長変換部９０３と２段目の波長変換部９０６との間には一対のレンズ９０４、９０５が配置されており、波長変換部９０３から射出される光がその波長変換部９０３への入射時と同じ条件で波長変換部９０６に入射するようになっている。

【０１９０】

このような実施形態においては、非線形光学結晶での各ビーム径が最適な高調波変換効率を得るのに望ましい大きさ（例えば本実施例では２００μｍ程度）となる様に、集光レンズ９０２の倍率（例えば本実施例では１０倍程度）を選ぶ。各ファイバー出力を個別のレ

ンズ９０２により集光しているため、ファイバーバンドル中のすべてのファイバーから集光された非線形結晶中での全光束の占める大きさ（断面積）は、集光レンズの倍率によらずファイバーバンドル自身の直径程度となる。従って、必要な波長変換結晶の大きさ（断面）は、ファイバーバンドルの直径程度となるため、数ミリ角程度の小さな波長変換結晶を用いることができ経済的である。なお、レンズ９０２を設ける代わりに、ファイバー出力端面を直接、球面あるいは非球面のレンズ状に加工して集光光学素子の機能を持たせてもよい。

【０１９１】

次に、光増幅器と波長変換部との結合部におけるファイバー出力端の他の実施例を図１８に示す。図１８（ａ）および（ｃ）に示した実施例は、図１７に示した集光レンズ９０２を、ファイバー４５２毎にその出力端部に形成する、及びこれを出力群ごとにバンドル状にまとめた例を示している。本例では、ファイバー４５２毎にその出力端部に集光光学素子４５３が形成されているが、これは既に図１０（ａ）を用いて説明したファイバー出力端部に設けた窓部材４３３をレンズ状に加工し、集光光学素子の機能を持たせたものである。このように構成することにより、図１７と同様の集光機能を備えると共にファイバー出力端面の損傷を抑制することができる。

【０１９２】

また、図１８（ｂ）は複数のファイバー４６２を束ねた出力群ごとに集光光学素子４６３を設ける場合の実施例である。本例では、例えば図１５に示した集光レンズ８４５をファイバーバンドルの出力端部に形成したものであり、既に図１０（ｂ）を用いて説明した窓部材４４３を球面あるいは非球面のレンズ状に加工して集光光学素子の機能を持たせたものである。

【０１９３】

なお、ファイバー端部あるいは窓部材の出力面を、球面あるいは非球面のレンズ形状に加工する代わりに、熱イオン交換法や電解イオン交換法等のイオン交換法を用いてファイバー端部を、あるいは窓部材としてガラス窓を用いるときにはガラス窓端部のガラス組成を、イオン交換により部分的に変化させ、これによりレンズと同等の屈折率分布を持たせることで集光光学機能を持たせるものであっても良い。また、図１８（ａ）～（ｃ）ではファイバー内のコア４５１、４６１の径は拡大されていないが、このコア径の拡大を併用することもできる。

【０１９４】

さて、２段目以降の波長変換部（非線形光学結晶）への集光は、１段目の場合と同様にファイバー毎、又はバンドル毎にその出力を個別のレンズにより行うこともできるが、本実施例ではファイバーバンドルの全出力を共通の１組あるいは１個のレンズで集光する場合について記述している。このように共通のレンズを使用することにより、使用するレンズの数が少なくなり、レンズのアライメントも容易になるため、経済的である。

【０１９５】

なお、波長変換結晶（非線形光学結晶）の出力端はその波長変換結晶で集光されたビームのレイリー長のなかに位置するため、波長変換結晶からの射出ビームは波長変換結晶の出力端でほぼ平行光となる。本実施例（図１７）ではこの射出ビームを一対のレンズ９０４、９０５により２段目の波長変換結晶９０６に集光する場合について示した。ここで、レンズ対の焦点距離は２段目の波長変換部９０６で最適な変換効率を得るのに望ましいビーム径となる倍率に定めることができる。なお、図１１、図１３、図１４に示した波長変換結晶に基本波又はその高調波を集光する集光光学素子（例えば図１１（ａ）に示す５０５、５０６等）は１個のレンズで構成されていたが、本実施例のように１組のレンズで構成することも可能である。

【０１９６】

このように実施の形態１～３に示した構成により基本波発生部（レーザ光発生部及び光増幅器）を構成し、実施の形態４～７に示した構成により波長変換部を構成し、また実施形態８に示した構成により光増幅器と波長変換部との結合部を構成することによって、出力

波長１５７ｎｍ、１９３ｎｍ等の紫外光出力を得ることができる。これらはそれぞれF_2レーザ、ＡｒＦエキシマレーザの発振波長と同一波長である。

【０１９７】

しかも、この様にして得られる紫外出力光は、例えば実施の形態１による基本波発生部を用いて構成した場合には、約３ｎｓの間隔で発光するパルス光であるため、互いに時間的に重なり合うことがなく、極めて狭帯域化された単一波長の紫外光でありながら、個々の出力光は互いに干渉することがない。また、例えば実施の形態２による基本波発生部を用いて構成した場合には得られる紫外出力光は、約７８ｎｓの等間隔で発光するパルス光であるため、互いに時間的に重なり合うことがなく、極めて狭帯域化された単一波長の紫外光でありながら、個々の出力光は互いに干渉することがない。

【０１９８】

さらに、例えば特開平８－３３４８０３号公報に開示されているような固体紫外レーザアレイでは、並列化された個々の基本波レーザに対し（個々のレーザ要素ごとに）それぞれ波長変換部が必要であるが、本実施形態によれば基本波出力のファイバーバンドル直径が全チャネルをあわせても２ｍｍ以下であるため、わずか１組の波長変換部ですべてのチャネルの波長変換を行うことが可能である。しかも、出力端が柔軟なファイバーであるため、波長変換部と単一波長発振レーザやスプリッタ、時分割光分岐手段等の他の構成部とを分けて配置することが可能となるなど、配置の自由度が極めて高い。従って、本発明により安価でコンパクトかつ、単一波長でありながら空間的コヒーレンスの低い紫外レーザ装置が提供できる。

【０１９９】

次に本発明に係る紫外レーザ装置の第９の実施形態について説明する。本実施形態による紫外レーザ装置は、既にこれまでの第１から第８の実施形態で述べてきた様な紫外レーザ装置が露光装置用光源であることを特徴とするものである。

【０２００】

以下、本発明に係る紫外レーザ装置を用いた露光装置の実施例について図１９を参照しながら説明する。光リソグラフィ工程で使用される露光装置は、原理的には写真製版と同じであり、フォトマスク（レチクル）上に精密に描かれたデバイスパターンを、フォトレジストを塗布した半導体ウエハーやガラス基板などの上に光学的に投影して転写する。本発明に係る紫外レーザ装置１２６１は、照明光学系１２６２、投影光学系１２６５などを含む露光装置全体と一体に設けられている。このとき、照明光学系１２６２を支持する架台に紫外レーザ装置１２６１を固定しても良いし、あるいは紫外レーザ装置１２６１を単独で架台に固定しても良い。但し、紫外レーザ装置１２６１に接続される電源などは別置きにしておくことが好ましい。

【０２０１】

また、紫外レーザ装置１２６１をレーザ光発生部および光増幅器を有する第１部分と、波長変換部を有する第２部分とに分け、第２部分を照明光学系１２６２と一体に架台に固定し、第１部分をその架台と異なる架台に固定しても良い。さらに、露光装置本体を収納するチャンバー内に紫外レーザ装置１２６１をすべて配置しても良いし、あるいは紫外レーザ装置１２６１の一部、例えば波長変換部をチャンバー内に配置し、残りの部分はチャンバーと一体にその外側に配置するようにしても良い。また、紫外レーザ装置１２６１の制御系はチャンバーとは別置される制御ラックに収納しても良いし、あるいは表示部（ディスプレイ）、スイッチ類などをチャンバーと一体にその外側に配置し、残りはチャンバー内に配置しても良い。

【０２０２】

そして、本発明により狭帯域化されかつ空間的コヒーレンスの低い紫外光は、照明光学系１２６２により必要な投影面上での照度分布が均一となるように拡大投影され、集積回路の回路パターンが精密に描かれた石英マスク（石英レチクル）１２６３上に照射される。レチクル１２６３の回路パターンは、投影光学系１２６５により所定の縮小倍率で縮小されフォトレジストの塗布された半導体ウエハー（例えばシリコンウエハー）１２６６に投

影され、前記回路パターンがウエハー上に結像・転写される。

【０２０３】

照明光学系１２６２は、レチクル１２６３のパターン面とほぼ共役な面内に配置され、かつレチクル１２６３上での照明領域を規定する視野絞り、照明光学系１２６２内でレチクル１２６３のパターン面とほぼフーリエ変換の関係となる所定面上での紫外光の光量分布を規定する開口絞り、および開口絞りを射出する紫外光をレチクル１２６３に照射するコンデンサーレンズなどを含む。このとき、所定面上での紫外光を光量分布を変更するために、互いに形状と大きさとの少なくとも一方が異なる複数の開口絞りをターレットに設け、レチクル１２６３のパターンに応じて選択される複数の開口絞りの一つを照明光学系１２６２の光路内に配置するようにしても良い。

【０２０４】

また、紫外レーザ装置１２６１の波長変換部と視野絞りとの間にオプティカルインテグレータ（ホモジナイザ）を配置しても良く、フライアイレンズを用いるときはその射出側焦点面がレチクル１２６３のパターン面とほぼフーリエ変換の関係となるように配置し、ロッドインテグレータを用いるときはその射出面がレチクル１２６３のパターン面とほぼ共役となるように配置すればよい。

【０２０５】

なお、露光装置の露光開始シャッタとしては、既に実施形態１～３で説明した電気光学変調素子あるいは音響光学変調素子（１２、２２、３２）を用いることができる。電気光学変調素子あるいは音響光学変調素子をオフの状態すなわちパルスを発生しない（内部損失が大の）状態からオンの状態すなわちパルスを発生する（パルス状に内部損失が小となる）状態に切り替えて露光を開始する。

【０２０６】

なお、紫外レーザ装置１２６１を有する露光装置では、紫外レーザ装置１２６１を構成する単一波長発振レーザから連続光を出力させても良いし、あるいは単一波長発振レーザをパルス出力させるようにしても良い。特に後者では、単一波長発振レーザの電流制御と前述の電気光学変調素子又は音響光学変調素子の制御とを併用して、レチクル１２６３及び半導体ウエハ１２６６に照射される紫外光（パルス光）の出力間隔や出力の開始及びその停止などを制御するようにしても良い。

【０２０７】

また、本実施形態での紫外レーザ装置１２６１を有する露光装置では、機械的なシャッタを用いてウエハ１２６６上での紫外光の積算光量を制御する必要はないが、例えば紫外レーザ装置１２６１の出力（パワー、中心波長、波長幅など）を安定化するために紫外光を発振させるとき、その紫外光がウエハ１２６６に到達してフォトレジストを感光させるのを防止するために、紫外レーザ装置１２６１とウエハ１２６６との間の照明光路内にシャッタを配置しても良いし、あるいはステージ１２６７を駆動してウエハ１２６６を紫外光の照射領域から退避させるようにしても良い。

【０２０８】

半導体ウエハー１２６６は、駆動機構１２６９を具備するステージ１２６７上に載置され、一回の露光が完了する度にステージを移動することにより、半導体ウエハー上の異なる位置に回路パターンが転写される。この様なステージの駆動、露光方式をステップ・アンド・リピート方式という。ステージの駆動、露光方式にはこのほかに、レチクル１２６３を支持する支持部材１２６４にも駆動機構を設け、レチクルと半導体ウエハとを同期移動して走査露光を行うステップ・アンド・スキャン方式があるが、この方式についても本発明の紫外レーザ装置を適用することが可能である。

【０２０９】

なお、本発明に係る紫外レーザ装置を用いた露光装置の様に紫外光で露光を行う露光装置では、通常、照明光学系１２６２、投影光学系１２６５ともに色補正なしの全石英レンズ構成である。また、特に紫外光の波長が２００ｎｍ以下であるときは、投影光学系１２６５を構成する複数の屈折光学素子のうち少なくとも一つを蛍石で構成しても良いし、ある

いは少なくともひとつの反射光学素子（凹面鏡、ミラー等）と屈折光学素子とを組み合わせた反射屈折光学系を用いるようにしてもよい。

【０２１０】

以上のように、本発明に係る紫外レーザ装置を用いた露光装置は従来の他の方式（エキシマレーザや固体レーザを用いた露光装置）にくらべて小型であり、また、各要素がファイバー接続されて構成されているため装置を構成する各ユニットの配置の自由度が高い。図２０には、このような本発明に係る紫外レーザ装置の特質を生かした他の実施例を示す。

【０２１１】

この実施例は、実施形態１～３に記載したレーザ装置のレーザ光発生部（単一波長レーザ、光分岐手段等）および光増幅器の構成部分と、実施形態４～７に記載した波長変換部とを分離して配置し、露光装置を構成したものである。すなわち、波長変換部１２７２を露光機本体に載置する一方、紫外レーザ装置の他の部分（レーザ光発生部、光増幅器等）１２７１を露光装置本体の外に別置して設け、これらの間を接続用ファイバー１２７３で接続することにより紫外レーザ装置を構成する。ここで、接続用ファイバー１２７３は、ファイバー光増幅器のファイバー自身（例えば実施形態１におけるファイバーバンドル１１４等）、無ドープのファイバー、あるいはこれらの組み合わせであっても良い。なお、紫外レーザ装置以外の露光機本体の部分は図１９と同一の装置を用いて構成することができる。

【０２１２】

このような構成とすることにより、ファイバー光増幅器の励起用半導体レーザや半導体レーザのドライブ用電源、温度コントローラ等の発熱を伴う主要な構成部分を露光機本体の外に配設することができる。従って、露光装置本体が露光光源である紫外レーザ装置からの発熱の影響を受けて光軸のアライメントが狂う等熱に起因する問題を抑制することができる。

【０２１３】

ところで、図２０に示すようにレチクル１２６３を保持するレチクルステージ１２６４は駆動機構１２６８によってＸ方向、Ｙ方向に移動可能で、かつ微小回転可能に構成されている。また、ウエハステージ１２６７上には基準マーク板ＦＭが設けられており、この基準マーク板は後述するベースライン計測などに用いられる。さらに本例では、レチクル１２６３上のアライメントマークを検出するアライメント系１２８０と、投影光学系１２６５とは別設されるオフアクシス方式のアライメント系１２８１とが設けられている。

【０２１４】

アライメント系１２８０は、露光用照明光、又はそれと同一波長域の照明光をレチクル１２６３上のアライメントマーク、及び投影光学系１２６５を通して基準マーク板ＦＭ上の基準マークに照射するとともに、両マークから発生する光を撮像素子（ＣＣＤ）で受光してその位置ずれを検出するものであり、レチクル１２６３のアライメントやアライメント系１２８１のベースライン計測などに用いられる。

【０２１５】

オフアクシス方式のアライメント系１２８１は、例えば５５０～７５０ｎｍ程度の波長幅を持つ白色光（ブロードバンド光）を半導体ウエハ１２６６上のアライメントマークに照射するとともに、その内部に設けられる指標マークの像とアライメントマークの像とを撮像素子（ＣＣＤ）上に結像させて両マークの位置ずれを検出するものである。

【０２１６】

なお、アライメント系１２８０、１２８１でそれぞれ基準マーク板ＦＭ上の基準マークを検出することで、その検出結果からアライメント系１２８１のベースライン量を計測することができる。なお、ベースライン計測は半導体ウエハの露光開始前に行われるが、半導体ウエハを交換するたびにベースライン計測を行ってもよいし、あるいは複数枚の半導体ウエハの露光動作に１回の割合でベースライン計測を行うようにしてもよい。但し、レチクル交換後には必ずベースライン計測が行われる。

【０２１７】

さて、本例では紫外レーザ装置（基本波発生部１２７１に接続される波長変換部として図１６に示した波長変換部を用いる。即ち、４つのファイバーバンドル出力端８５１から発生する基本波が入射する波長変換部１２７２と、ファイバーバンドル出力端８５０から発生する基本波が入射する波長変換部１２７９とを分離し、波長変換部１２７２は照明光学系１２６２を保持する架台に一体に設け、波長変換部１２７９はアライメント系１２８０を保持する架台に一体に設ける。このとき、ファイバーバンドル出力端８５０に接続用ファイバー１２７８を結合して基本波を波長変換部１２７９に導く。これにより、アライメント系１２８０の光源を別途用意する必要がなくなるとともに、露光用照明光と同一波長の照明光を用いて基準マークを検出でき、高精度なマーク検出が可能となる。

【０２１８】

なお、本例では露光用照明光と同一波長の照明光をアライメント系１２８０に導くものとしたが、露光用照明光の波長（例えば１９３ｎｍ）よりも長い波長をアライメント系１２８０、又は１２８１などに導くようにしてもよい。即ち、図１６に示した３段の波長変換部のうち、例えば２段目の波長変換部８５３から射出されるパルス光を接続用ファイバーでアライメント系に導けばよい。また、１段目の波長変換部８５２から射出されるパルス光の一部を分岐するとともに、その残りのパルス光を２段目の波長変換部８５３で波長変換し、２つの波長変換部８５２、８５３からそれぞれ射出される互いに波長が異なる２つのパルス光をアライメント系に導くようにしてもよい。

【０２１９】

また、図２０に示した露光装置には、基本波発生部１２７１内の単一波長発振レーザ、例えばＤＦＢ半導体レーザ（図１中の１１など）が載置されるヒートシンクに設けられた温度調整器（例えばペルチェ素子）を用いてその温度を調整することで、ＤＦＢ半導体レーザの発振波長、即ちレチクル１２６３に照射される紫外レーザ光（露光用照明光）の波長を制御する波長制御装置１２７４が設けられている。波長制御装置１２７４は、ＤＦＢ半導体レーザの温度を０．００１℃単位で制御することで、紫外レーザ光の中心波長の安定化、及び投影光学系１２６５の光学特性（収差、焦点位置、投影倍率など）の調整などを行うものである。これにより、半導体ウエハの露光動作中における紫外レーザ光の波長安定性を向上させることができ、かつ紫外レーザ光の照射、及び大気圧変化などに起因して変動する投影光学系１２６５の光学特性を簡単に調整することができる。

【０２２０】

さらに、図２０に示した露光装置には、基本波発生部１２７１内で単一波長発振レーザ（ＤＦＢ半導体レーザなど）から発生する連続光をパルス光に変換する光変調素子（図１中の１２など）にドライブ用電圧パルスを印加するパルス制御部１２７５と、半導体ウエハ１２６６に塗布されるフォトレジストの感度特性に応じて、回路パターン転写時にそのフォトレジストを露光するのに必要なパルス数を計算するとともに、そのパルス数に応じてパルス制御部１２７５から出力される制御パルスの発振タイミング、及びその大きさなどを制御する露光制御部１２７６と、露光装置全体を統括制御する制御装置１２７７とが設けられている。

【０２２１】

ここで、パルス制御部１２７５は基本波発生部１２７１内の単一波長発振レーザ（１１など）の電流制御あるいは光変調素子１２に印加する電圧の制御を行って、その単一波長発振レーザをパルス出力させることもできるようになっている。即ち、パルス制御部１２７５による電流あるいは電圧の出力制御によって、単一波長発振レーザは連続光とパルス光とを切り替えて出力することが可能となる。本実施例では、パルス制御部１２７５によって単一波長レーザをパルス発振させるとともに、前述した光変調素子の制御によってその発振されるパルス光（パルス幅が１０～２０ｎｓ程度）からその一部のみを切り出す、即ちパルス幅が１ｎｓのパルス光に変調する。これにより、光変調素子のみを用いて連続光をパルス光に変換する場合に比べて、消光比の高いパルス光を容易に発生させることが可能になるとともに、露光制御部１２７６によってパルス出力の間隔やパルス出力の開始及びその停止などをより簡単に制御することが可能になっている。

【０２２２】
また、パルス制御部１２７５は単一波長発振レーザのパルス発振と連続発振との切替だけでなく、そのパルス出力の間隔やパルス幅などの制御を行うとともに、パルス光の出力変動を補償するように、単一波長発振レーザの発振制御と、光変調素子に印加する電圧パルスの大きさの制御との少なくとも一方を行う。これにより、パルス光の発振間隔の変更時、あるいはパルス光の発振再開時などに生じるパルス光の出力変動を補償することができる。即ちパルス毎にその出力（強度）を常にほぼ一定値に維持することが可能となる。
【０２２３】
さらに、パルス制御部１２７５は、基本波発生部１２７１内で直列に配置される複数のファイバー光増幅器（図１中の１３、１８、１９など）の少なくとも１つの利得を調整し、この利得調整のみ、あるいは前述した光変調素子の制御との併用によって、半導体ウエハ上でのパルス光の強度を制御することが可能となっている。なお、光分岐装置で並列分割される複数のチャネルに対応して並列に設けられるファイバー光増幅器の少なくとも１つの利得も同様に制御することも可能となっている。
【０２２４】
また、露光制御部１２７６は基本波発生部１２７１から出力される基本波、または波長変換部１２７２から出力される紫外光、あるいは波長変換部１２７２内で、例えば１段目または２段目の非線形光学結晶から出力されるパルス光を検出するとともに、この検出値（強度、波長、及び波長幅などを含む）に基づいてパルス制御部１２７５を制御し、前述したパルス光の発振間隔、その発振の開始と停止、及びパルス光の強度などを調整するようになっている。さらに、その検出値は波長制御装置１２７４にも入力され、波長制御装置１２７４はその検出値に基づいて単一波長発振レーザの温度制御を行い、露光用照明光（紫外レーザ光）の中心波長や波長幅を調整するようになっている。
【０２２５】
制御装置１２７７は、半導体ウエハ又はそれを保持するカセットに付された識別記号（バーコードなど）の読取装置（不図示）、あるいはオペレータから入力されるフォトレジストの感度特性に関する情報を露光制御部１２７６に送り、露光制御部１２７６はその入力情報に基づいてパターン転写に必要な露光パルス数を計算する。さらに露光制御部１２７６は、露光パルス数とこれに応じて決定されるパルス光の強度とに基づいてトリガパルス制御部１２７５を制御し、光変調素子に印加する制御パルスの発振タイミング、及びその大きさを調整する。これにより、露光の開始と終了、及び半導体ウエハ１２６６上に照射されるパルス光の強度が制御され、複数のパルス光の照射によってフォトレジストに与えられる積算光量がその感度に応じた適正露光量に制御される。
【０２２６】
なお、露光制御部１２７６はパルス制御部１２７５に指令を送って、単一波長発振レーザの電流制御を行わせることで、その電流制御のみ、あるいは光変調素子の制御との併用によって露光（パルス出力）の開始と終了などを制御できるようになっている。
【０２２７】
ここで、本例での基本波発生部１２７１として図１又は図２のレーザ装置を用いる場合、光変調素子で切り出される１つのパルス光が複数（１２８個）に分割されることになるが、本例ではその分割された１２８個のパルス光を１パルスとして、このパルス単位で露光量制御を行うようにしてもよいし、あるいはその分割された１２８個のパルス光をそれぞれ１パルスとして露光量制御を行うようにしてもよい。なお、後者の露光量制御を行う場合には、パルス制御部１２７５による光変調素子の制御の代わりに、基本波発生部１２７１内のファイバー光増幅器の利得を調整して、半導体ウエハ上でのパルス光の強度を制御するようにしてもよいし、あるいはこの２つの制御を併用するようにしてもよい。
【０２２８】
また、図２０に示した露光装置は、ステップ・アンド・リピート方式とステップ・アンド・スキャン方式とを選択的に切り替えて半導体ウエハの露光を行うことが可能となっている。ステップ・アンド・リピート方式では、レチクル１２６３上の回路パターンの全体が

露光用照明光で照射されるように、照明光学系１２６２内の視野絞り（レチクルブラインド）を駆動してその開口の大きさなどを調整する。一方、ステップ・アンド・スキャン方式では、投影光学系１２６５の円形投影視野内で露光用照明光の照射領域がレチクル１２６３の走査方向と直交する方向に沿って延びる矩形スリット状に制限されるように視野絞りの開口を調整する。従って、ステップ・アンド・スキャン方式ではレチクル１２６３上の回路パターンの一部のみが照明されるので、その回路パターンの全体を半導体ウエハ上に走査露光するために、露光用照明光に対してレチクル１２６３を相対移動するのに同期して、投影光学系１２６５の投影倍率に応じた速度比で半導体ウエハ１２６６を露光用照明光に対して相対移動する。

【０２２９】

ところで、前述の走査露光時における露光量制御では、光変調素子によって規定されるパルス繰り返し周波数ｆと、図２に示したＴＤＭ２３によって規定されるチャネル間の遅延時間との少なくとも一方を調整して、走査露光中に基本波発生部１２７１から複数のパルス光を等時間間隔で発振させる。さらに、フォトレジストの感度特性に応じて、半導体ウエハ上でのパルス光の強度、半導体ウエハの走査速度、パルス光の発振間隔（周波数）、及び半導体ウエハの走査方向に関するパルス光（即ちその照射領域）の幅の少なくとも１つを調整し、半導体ウエハ上の各点が照射領域を横切る間に照射される複数のパルス光の積算光量を適正露光量に制御する。このとき、スループットを考慮して、半導体ウエハの走査速度がウエハステージ１２６７の最高速度にほぼ維持されるように、露光量制御では他の制御パラメータ、即ちパルス光の強度、発振周波数、及び照射領域の幅の少なくとも１つを調整することが好ましい。

【０２３０】

また、図１又は図２に示したレーザ装置を用いて走査露光を行う場合、露光量制御では前述のように分割される１２８個のパルス光をそれぞれ１パルスとして等時間間隔で発振させることが好ましい。但し、半導体ウエハの走査速度に応じてその分割された１２８個のパルス光の発振間隔を調整して、その１２８個のパルス光が１パルスと見做せる、即ち１２８個のパルス光が照射される間に半導体ウエハが移動する距離が露光量制御精度を低下させる要因とならないのであれば、その１２８個のパルス光を１パルスとして露光量制御を行うようにしてもよい。

【０２３１】

なお、以上に示した本発明の各実施形態の説明に於いては、ＡｒＦエキシマレーザもしくはF_2レーザと同じ出力波長１９３ｎｍ、１５７ｎｍを出力する紫外レーザ装置の構成例について説明を行ったが、本発明はこの波長のレーザ装置に限定されるものでなく、レーザー光発生部、光増幅器、波長変換部の構成内容を適宜選択することにより、例えばＫｒＦエキシマレーザと同じ出力波長２４８ｎｍを発生する紫外レーザ装置を提供することも可能である。

【０２３２】

例えば、レーザ光発生部における単一波長発振レーザとして９９２ｎｍで発振するイットリビウム（Ｙｂ）ドープ・ファイバーレーザあるいは半導体レーザを、ファイバー光増幅器としてイットリビウム・ドープ・ファイバー光増幅器を用い、波長変換部としてファイバー光増幅器の出力をＬＢＯ結晶を用いて第２次高調波（波長４９６ｎｍ）発生を行い、更にその出力をＢＢＯ結晶を用いて第４次高調波（波長２４８ｎｍ）の紫外光を発生するような４倍高調波発生光路を構成することにより、ＫｒＦエキシマレーザと同じ２４８ｎｍの紫外光を発生する紫外レーザ装置を提供することができる。

【０２３３】

なお、前述した実施形態で用いるファイバー（ファイバー光増幅器などを含む）はその表面をテフロンで被覆しておくことが好ましい。このテフロンによる被覆は全てのファイバーについて行うことが望ましいが、特に露光装置本体を収納するチャンバー内に配置されるファイバーはテフロンで被覆しておく。これは、ファイバーから発生する異物（繊維などを含む）が露光装置を汚染する物質となり得るためであり、この汚染物質に起因して生

じる照明光学系、投影光学系、及びアライメント光学系などを構成する光学素子の曇り、又はこれら光学系の透過率（反射率）や光学特性（収差などを含む）の変動、もしくはレチクル又は半導体ウエハ上での照度、及びその分布の変動などを防止することが可能となる。また、テフロンで被覆する代わりに、チャンバー内に配置されるファイバーをまとめてステンレス製の筐体に収納するようにしてもよい。

【０２３４】

なお、半導体デバイスはその機能・性能設計を行うステップ、この設計ステップに基づいてレチクルを製作するステップ、シリコン材料からウエハを製造するステップ、前述の露光装置を用いてレチクルのパターンをウエハに転写するステップ、デバイスの組立ステップ（ダイシング工程、ボンディング工程、パッケージ工程を含む）、および検査ステップ等を経て製造される。また、前述の露光装置は半導体素子の製造だけでなく、例えば液晶ディスプレー、撮像素子（例えばＣＣＤ等）、薄膜磁気ヘッドなどのデバイス、またはレチクルの製造などにも用いることができる。

【０２３５】

さらに、複数の光学素子から構成される照明光学系、および投影光学系を露光装置本体に組み込んでその光学調整を行うとともに、多数の機械部品からなるレチクルステージやウエハステージを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続し、さらに総合調整（電気調整、動作確認等）を行うことによる本実施例の露光装置を製造することができる。

【０２３６】

また、前述の露光装置では紫外レーザ装置１２６１の露光装置本体への取り付け、または露光装置本体外に配置される紫外レーザ装置１２６１の一部（レーザ光発生部および光増幅器など）と本体内に配置される波長変換部とをファイバーで接続したり、紫外レーザ装置１２６１（波長変換部）と照明光学系１２６２との光軸合わせなどが行われる。なお、露光装置の製造は温度、およびクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

【０２３７】

なお、以上の第９実施形態では、本発明によるレーザ装置を露光装置に適用するものとしたが、例えばウエハ上に形成された回路パターンの一部（ヒューズなど）を切断するために用いられるレーザリペア装置などにも本発明によるレーザ装置を用いることができる。また、本発明によるレーザ装置は可視光または赤外光を用いる検査装置などにも適用することができる。そしてこの場合には前述の第４～第７実施形態で説明した波長変換部をレーザ装置に組み込む必要がない。即ち、本発明は紫外レーザ装置だけでなく、可視域または赤外域の基本波を発生する、波長変換部がないレーザ装置に対しても有効なものである。

【０２３８】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、コンパクトで機器配置の自由度が高く、メインテナンスが容易であり、かつ非線形光学結晶の損傷が生じにくく、空間的コヒーレンスの低い紫外光を発生する紫外レーザ装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図１】本発明に係る紫外レーザ装置の、第１の実施形態のレーザ光発生部及び光増幅器の構成を示す説明図である。

【図２】本発明に係る紫外レーザ装置の、第２の実施形態のレーザ光発生部及び光増幅器の構成を示す説明図である。

【図３】本発明に係る紫外レーザ装置の、第３の実施形態のレーザ光発生部及び光増幅器の構成を示す説明図である。

【図４】本発明に係る紫外レーザ装置の、他の実施形態の光増幅器の構成を示す説明図である。

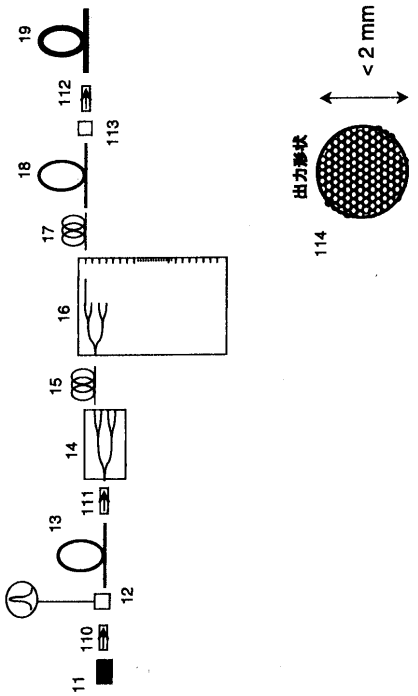
【図５】ダブル・クラッド・ファイバー光増幅器の断面図である。

【図６】エルビウム・ドープ・ファイバー光増幅器にドープする元素による、波長と利得

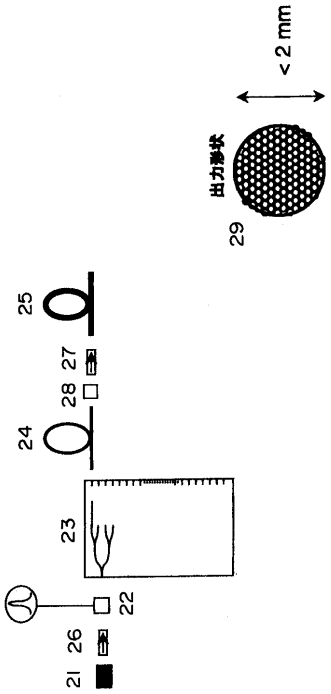
との関係を示す特性図である。
【図７】エルビウムおよびイットリウムをコ・ドープするファイバー光増幅器において、励起強度に対する利得の変化を示す特性図である。
【図８】本発明に係る紫外レーザ装置の、ファイバー出力制御手段の構成を示す構成図である。
【図９】ファイバー光増幅器の出力端部におけるファイバー・コアの拡大状況を例示する側面図である。
【図１０】ファイバー光増幅器の出力端部の一例を示す側面図である。
【図１１】本発明に係る紫外レーザ装置の、第４の実施形態の波長変換部の構成を示す説明図である。
【図１２】本発明に係る波長変換部の変換効率を示す図表である。
【図１３】本発明に係る紫外レーザ装置の、第５の実施形態の波長変換部の構成を示す説明図である。
【図１４】本発明に係る紫外レーザ装置の、第６の実施形態の波長変換部の構成を示す説明図である。
【図１５】本発明に係る紫外レーザ装置の、第７の実施の形態の波長変換部の構成を示す説明図である。
【図１６】本発明に係る紫外レーザ装置の、第８の実施形態である波長変換部入力部の実施例を示す説明図である。
【図１７】本発明に係る紫外レーザ装置の、波長変換部入力部の他の実施例を示す説明図である。
【図１８】本発明に係る紫外レーザ装置の、波長変換部入力部の他の実施例を示す説明図である。
【図１９】本発明に係る露光装置の構成実施例を示す説明図である。
【図２０】本発明に係る露光装置の他の構成実施例を示す説明図である。
【符号の説明】
１１　光源、単一波長発振レーザ（ＤＦＢ半導体レーザ、ファイバーレーザ等）
１２　光変調器
１４、１６　スプリッタ（光分岐手段）
１３　ファイバー光増幅器
１５、１７　互いに長さの異なるファイバー（遅延手段、遅延ファイバー）
１８　ファイバー光増幅器（第１ファイバー光増幅器）
１９ファイバー光増幅器（第２ファイバー光増幅器）
１１４　ファイバー出力端（ファイバーバンドル出力端）
２１　光源、単一波長発振レーザ（ＤＦＢ半導体レーザ、ファイバーレーザ等）
２２　光変調器
２３　時分割光分岐手段（ＴＤＭ、光分岐手段、遅延手段）
２４　ファイバー光増幅器（第１ファイバー光増幅器）
２５　ファイバー光増幅器（第２ファイバー光増幅器）
２９　ファイバー出力端（ファイバーバンドル出力端）
３１　光源、単一波長発振レーザ（ＤＦＢ半導体レーザ、ファイバーレーザ等）
３２　光変調器
３３　ファイバー光増幅器（第１ファイバー光増幅器）
３４　ファイバー光増幅器（第２ファイバー光増幅器）
４１　ファイバー光増幅器（第１ファイバー光増幅器）
４２　ファイバー光増幅器（第２ファイバー光増幅器）
４０５、４０６、４０７　ファイバー出力制御装置
４２１、３４１、４４１、４５１、４６１　コア
４２３、４３４、４４４、４５４、４６４　ファイバー出力端面
４３３、４４３（４５３、４６３）　窓部材

４５３、４６３　レンズ
５０１　ファイバー出力端（ファイバーバンドル出力端）
５０２～５０４、５０７、５１０、５１３、５１４、５１７、５１８、５２０、５２６、
５３２、５３３、５３６、５３９、５４５、５４８　非線形光学結晶
６０１　ファイバー出力端（ファイバーバンドル出力端）
６０２、６０４、６０９、６１１　非線形光学結晶
７０１　ファイバー出力端（ファイバーバンドル出力端）
７０２、７０５、７１０、７１２　非線形光学結晶
８４１　ファイバー出力端（ファイバーバンドル出力端）
８４２、８４３、８４４　非線形光学結晶
９０１　ファイバー出力端（ファイバーバンドル出力端）
９０２、９０４、９０５　レンズ
９０３、９０６　非線形光学結晶
１２６１　レーザ装置
１２６２　照明光学系
１２６３　マスク（レチクル）
１２６５　投影光学系
１２６６　ウエハー
１２６８、１２６９　駆動機構（駆動装置）
１２７１　レーザ装置
１２７２　波長変換部
１２７３　伝送系（第１ファイバー）
１２７７　制御装置（調整装置）
１２７８　伝送系（第２ファイバー）
１２７９　波長変換部
１２８０、１２８１　アライメント系

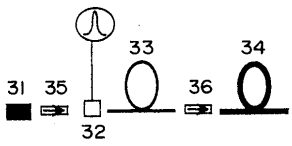
【図１】


< 2 mm
出力形状
19
112
113
18
17
16
15
14
111
13
12
110
11
114

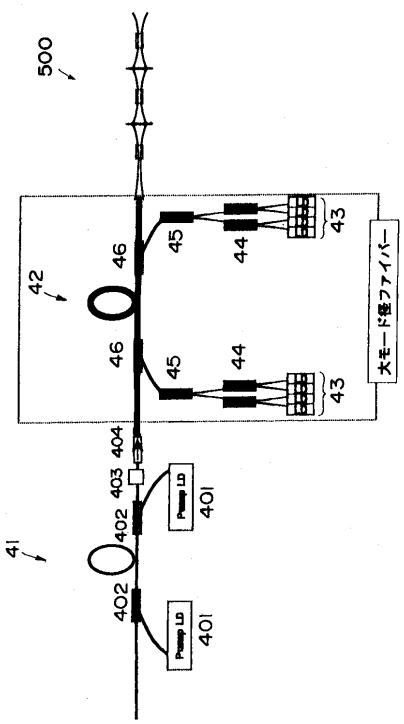
【図２】


< 2 mm
出力形状
29
25
28
27
24
23
22
26
21

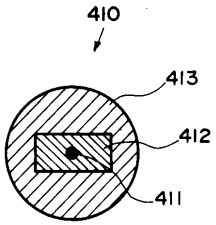
【図３】


33
34
31
35
36
32

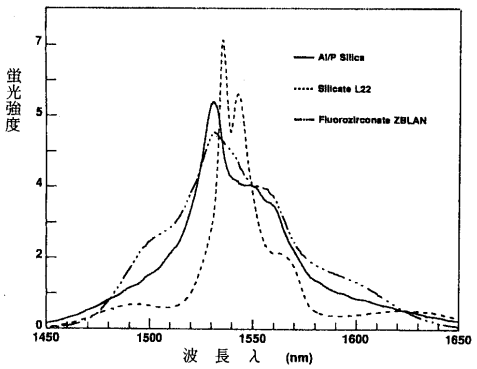
【図４】


500
42
46
45
44
43
大モード径ファイバー
404
403
402
401
Pump LD
41

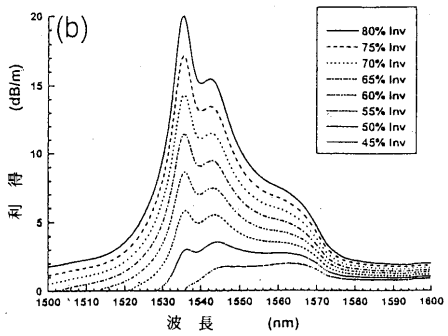
【図５】


410
413
412
411

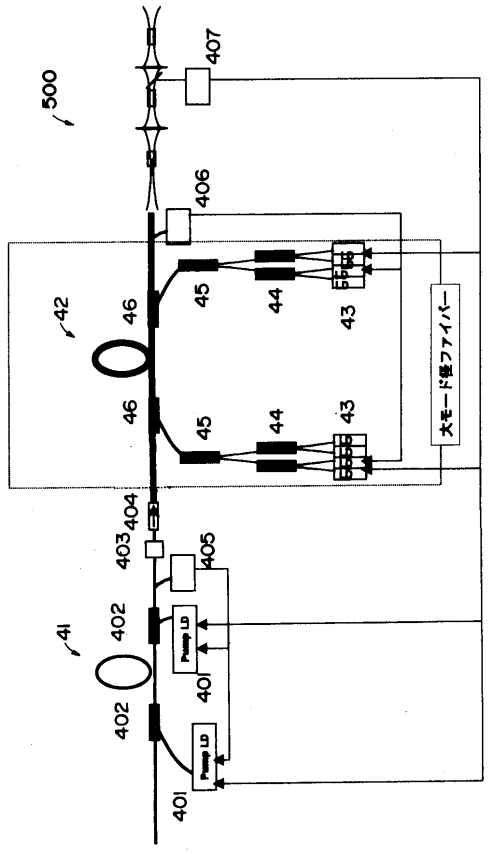
【図６】


蛍光強度
波長λ (nm)
Al/P Silica
Silicate L22
Fluorozirconate ZBLAN

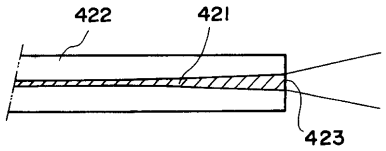
【図７】


(b)
利得 (dB/m)
波長 (nm)
80% Inv
75% Inv
70% Inv
65% Inv
60% Inv
55% Inv
50% Inv
45% Inv

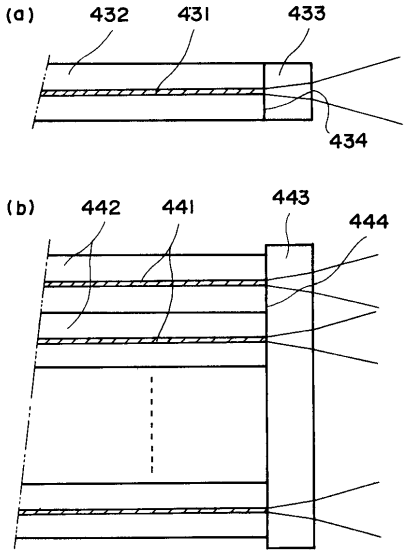
【図８】


500
407
406
42
46
45
44
43
大モード径ファイバー
404
403
405
41
402
401
Pump LD

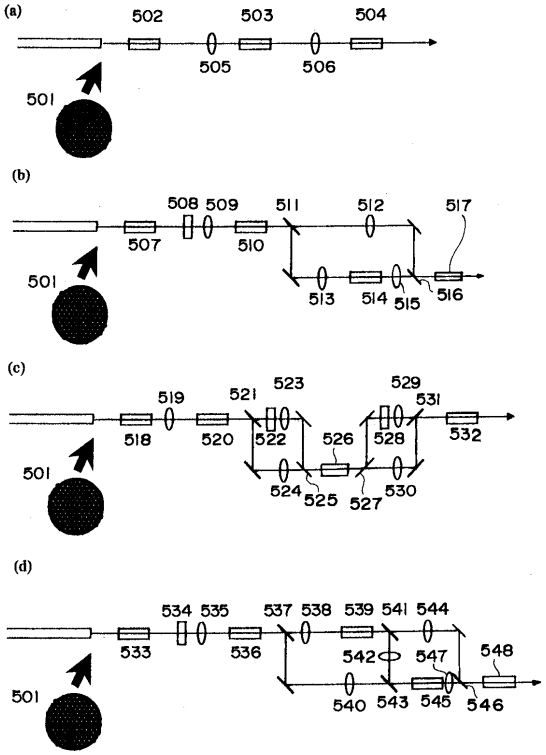
【図９】



【図１０】



【図１１】



【図１２】

(a)

Type of freq. conv.	Crystal	Conversion efficiency
ω + ω → 2ω	LBO	0.748
2ω + 2ω → 4ω	LBO	0.476
4ω + 4ω → 8ω	SBBO	0.321

Output 193 nm peak power : 2.29 kW Average power @100 kHz, 1 ns : 229 mW

(b)

Type of freq. conv.	Crystal	Conversion efficiency
ω + ω → 2ω	LBO	0.611
ω + 2ω → 3ω	LBO	0.909
3ω + 3ω → 6ω	BBO	0.307
2ω + 6ω → 8ω	BBO	0.177

Output 193 nm peak power : 383 W Average power @100 kHz, 1 ns : 38.3 mW

(c)

Type of freq. conv.	Crystal	Conversion efficiency
ω + ω → 2ω	LBO	0.748
2ω + 2ω → 4ω	LBO	0.476
2ω + 4ω → 6ω	BBO	0.308
2ω + 6ω → 8ω	BBO	0.184

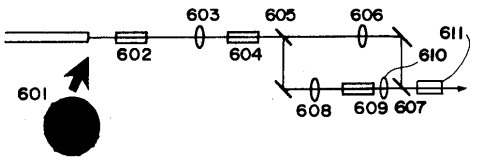
Output 193 nm peak power : 403 W Average power @100 kHz, 1 ns : 40.3 mW

(d)

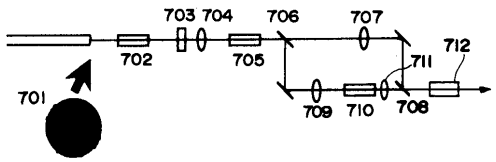
Type of freq. conv.	Crystal	Conversion efficiency
ω + ω → 2ω	LBO	0.633
ω + 2ω → 3ω	LBO	0.826
2ω + 2ω → 4ω	LBO	0.322
3ω + 4ω → 7ω	BBO	0.302
ω + 7ω → 8ω	LBO	0.251

Output 193 nm peak power : 459 W Average power @100 kHz, 1 ns : 45.9 mW

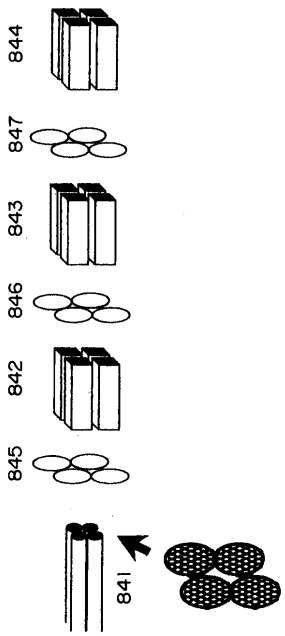
【図１３】



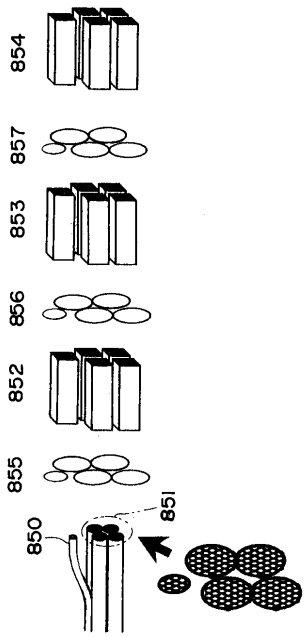
【図１４】



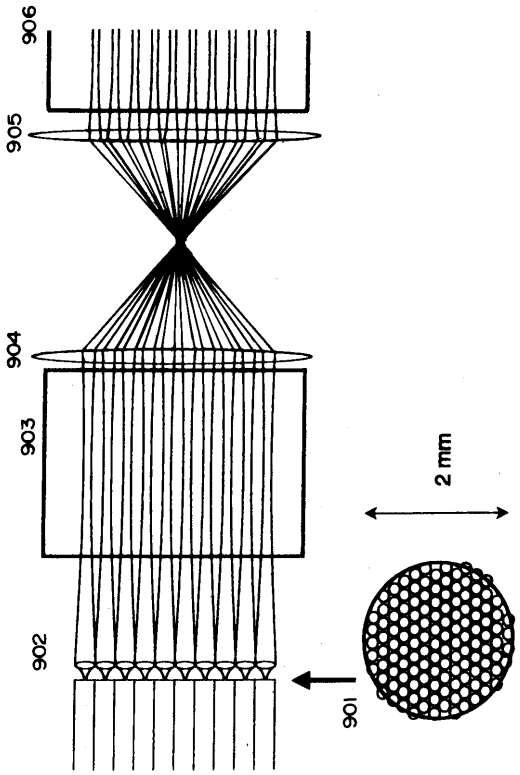
【図１５】



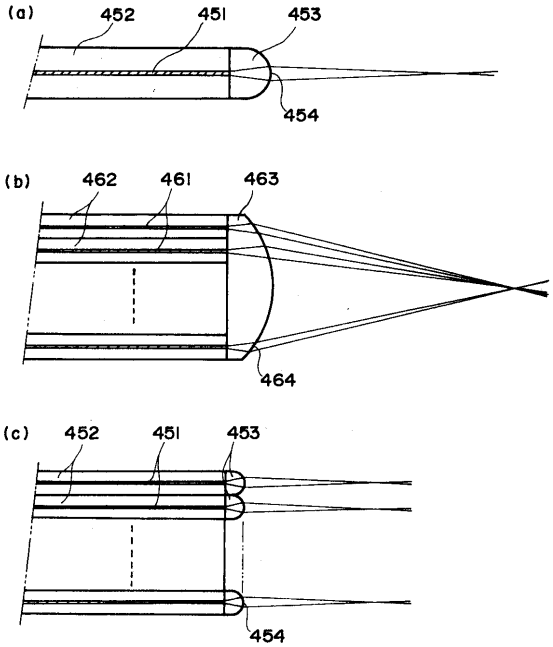
【図１６】



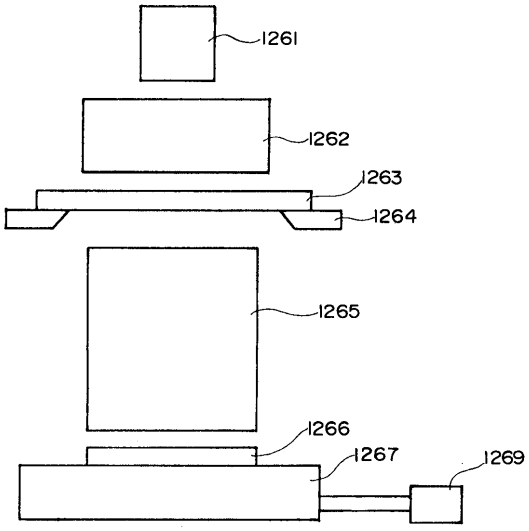
【図１７】



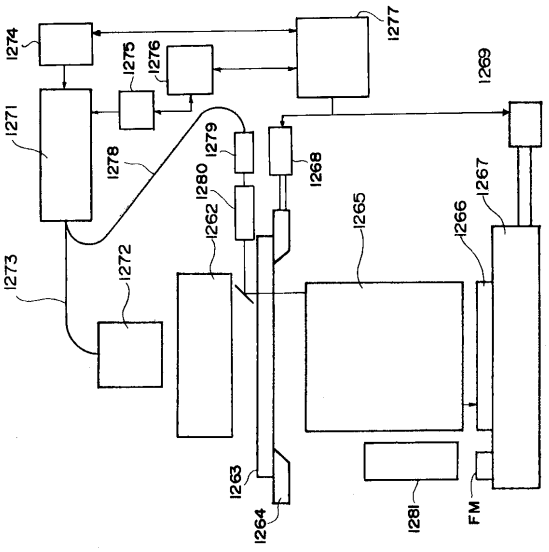
【図１８】



【図１９】


1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1269

【図２０】


1274
1275
1276
1277
1269
1271
1278
1279
1268
1280
1267
1262
1265
1266
1273
1272
1263
1264
1281
FM

フロントページの続き

(51)Int.Cl.			FI		
H01S	*3/108*	*(2006.01)*	G03F	7/20	505
			H01S	3/06	B
			H01S	3/10	Z
			H01S	3/108	

(31)優先権主張番号 特願平10-311147
(32)優先日 平成10年10月30日(1998.10.30)
(33)優先権主張国 日本国(JP)

(56)参考文献 特開平０５－１０２５６５（ＪＰ，Ａ）
特開平０９－１６２１０４（ＪＰ，Ａ）
実開平０５－０４６１４５（ＪＰ，Ｕ）
特開平０７－１２２４８３（ＪＰ，Ａ）
国際公開第９６／０４１４０４（WO，Ａ１）
特開平０９－２６５０６０（ＪＰ，Ａ）
Koplow et al, UV generation by frequency quadrupling of a Yb-doped fiber amplifier, IEEE photonics technology letters, 米国, IEEE INC, １９９８年 １月, vol. 10, no. 1, 75-77

(58)調査した分野(Int.Cl., ＤＢ名)
H01L 21/027
G03F 7/20 - 24
H01S 3/00- 4/00