

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6762364号
(P6762364)

(45) 発行日 令和2年9月30日(2020.9.30)

(24) 登録日 令和2年9月10日(2020.9.10)

(51) Int.Cl. F I
HO 1 S 3/10 (2006.01) HO 1 S 3/10 Z
 HO 1 S 3/10 D

請求項の数 15 (全 23 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2018-530224 (P2018-530224) (86) (22) 出願日 平成28年7月26日 (2016.7.26) (86) 国際出願番号 PCT/JP2016/071803 (87) 国際公開番号 W02018/020564 (87) 国際公開日 平成30年2月1日 (2018.2.1) 審査請求日 令和1年6月3日 (2019.6.3)</p>	<p>(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 100083116 弁理士 松浦 憲三 (72) 発明者 小野瀬 貴士 栃木県小山市大字横倉新田400番地 ギ ガフォトン株式会社内 (72) 発明者 若林 理 栃木県小山市大字横倉新田400番地 ギ ガフォトン株式会社内 審査官 百瀬 正之</p>
---	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

レーザシステムは、以下を備える：

A．パルスレーザ光を出力するレーザ装置；及び

B．前記パルスレーザ光のパルス幅を伸長するための遅延光路を含む第1の光学パルスストレッチャであって、前記遅延光路を周回して出力される周回光のビームウェスト位置を、周回数に応じて光路軸方向に変化させるように構成された第1の光学パルスストレッチャ。

【請求項2】

請求項1に記載のレーザシステムであって、

前記周回光は、理想レンズで集光した場合に、集光位置が、周回数に応じて光路軸方向に変化する。

【請求項3】

請求項1に記載のレーザシステムであって、以下をさらに含む：

前記遅延光路は、複数の凹面ミラーにより構成されており、

前記複数の凹面ミラーのうち少なくとも1つの凹面ミラーの曲率が、他の凹面ミラーの曲率と異なる。

【請求項4】

請求項1に記載のレーザシステムであって、以下をさらに含む：

前記遅延光路は、複数の凹面ミラーにより構成されており、

前記複数の凹面ミラーのうち少なくとも1つの凹面ミラーが、コリメート条件を満たす位置から、前記遅延光路の光路長を変更する方向に移動されている。

【請求項5】

請求項1に記載のレーザシステムであって、以下をさらに含む：

前記遅延光路は、複数の凹面ミラーにより構成されており、

前記遅延光路には、発散角を変更して出力するレンズが配置されている。

【請求項6】

請求項1に記載のレーザシステムであって、以下をさらに含む：

前記遅延光路は、複数の高反射ミラーと、複数の集光レンズとにより構成されており、

前記複数の集光レンズのうち少なくとも1つの集光レンズは、コリメート条件を満たす位置から光路軸方向に移動されている。

10

【請求項7】

請求項1に記載のレーザシステムであって、

前記遅延光路の光路長が、前記パルスレーザ光の時間的コヒーレント長以上である。

【請求項8】

請求項1に記載のレーザシステムであって、以下をさらに含む：

C．前記第1の光学パルスストレッチャから出力される伸長パルスレーザ光を増幅する増幅器。

【請求項9】

請求項8に記載のレーザシステムであって、

前記増幅器は、ファブリペロ共振器またはリング共振器を含む。

20

【請求項10】

請求項8に記載のレーザシステムであって、

前記増幅器は、マルチパス増幅器である。

【請求項11】

請求項8に記載のレーザシステムであって、以下をさらに含む：

D．前記第1の光学パルスストレッチャと前記増幅器との間に配置されたビームエキスパンダ；

ここで、前記ビームエキスパンダは、前記伸長パルスレーザ光のビーム径を、前記増幅器の放電空間の幅に合わせるように拡大する。

30

【請求項12】

請求項8に記載のレーザシステムであって、以下をさらに含む：

E．前記増幅器からの出力光のパルス幅を伸長する第2の光学パルスストレッチャ。

【請求項13】

請求項1に記載のレーザシステムであって、

前記パルスレーザ光のパルス幅を D、前記遅延光路の光路長を L_{OPS} 、光速を c とした場合に、下式 (a) を満たす。

$$L_{OPS} = c \cdot D \cdot \dots (a)$$

【請求項14】

請求項8に記載のレーザシステムであって、

前記増幅器は、ファブリペロ共振器であり、

伸長パルスレーザ光のパルス幅を DT、前記ファブリペロ共振器の光路長を L_{amp} 、光速を c とした場合に、下式 (b) を満たす。

$$DT = L_{amp} / c \cdot \dots (b)$$

40

【請求項15】

請求項1に記載のレーザシステムであって、

前記レーザ装置は、固体レーザ装置である。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

50

本開示は、レーザ装置及び光学パルスストレッチャを含むレーザシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

半導体集積回路の微細化、高集積化につれて、半導体露光装置においては解像力の向上が要請されている。半導体露光装置を以下、単に「露光装置」という。このため露光用光源から出力される光の短波長化が進められている。露光用光源には、従来の水銀ランプに代わってガスレーザ装置が用いられている。現在、露光用レーザ装置としては、波長248nmの紫外線を出力するKrFエキシマレーザ装置ならびに、波長193.4nmの紫外線を出力するArFエキシマレーザ装置が用いられている。

【0003】

現在の露光技術としては、露光装置側の投影レンズとウエハ間の間隙を液体で満たして、当該間隙の屈折率を変えることによって、露光用光源の見かけ上の波長を短波長化する液浸露光が実用化されている。ArFエキシマレーザ装置を露光用光源として用いて液浸露光が行われた場合は、ウエハには水中における波長134nmの紫外光が照射される。この技術をArF液浸露光という。ArF液浸露光はArF液浸リソグラフィーとも呼ばれる。

【0004】

KrF、ArFエキシマレーザ装置の自然発振におけるスペクトル線幅は約350~400pmと広いため、露光装置側の投影レンズによってウエハ上に縮小投影されるレーザ光（紫外線光）の色収差が発生して解像力が低下する。そこで色収差が無視できる程度となるまでガスレーザ装置から出力されるレーザ光のスペクトル線幅を狭帯域化する必要がある。このためガスレーザ装置のレーザ共振器内には、狭帯域化素子を有する狭帯域化モジュール（Line Narrowing Module）が設けられている。この狭帯域化モジュールによりスペクトル線幅の狭帯域化が実現されている。狭帯域化素子は、エタロンやグレーティング等であってもよい。このようにスペクトル線幅が狭帯域化されたレーザ装置を狭帯域化レーザ装置という。

【0005】

また、レーザ装置には、露光装置の光学系に与えるダメージが小さくなるように、レーザ光のパルス幅を伸長する光学パルスストレッチャが用いられる。光学パルスストレッチャは、レーザ装置から出力されるレーザ光に含まれる各パルス光を、時間差を有する複数のパルス光に分解することにより、各パルス光のピークパワーレベルを下げる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開2011-176358号公報

【特許文献2】特許第2760159号公報

【特許文献3】特開平11-312631号公報

【特許文献4】特開2012-156531号公報

【概要】

【0007】

本開示の1つの観点に係るレーザシステムは、以下を備える：

A．パルスレーザ光を出力するレーザ装置；及び

B．パルスレーザ光のパルス幅を伸長するための遅延光路を含む第1の光学パルスストレッチャであって、遅延光路を周回して出力される周回光のビームウェスト位置を、周回数に応じて光路軸方向に変化させるように構成された第1の光学パルスストレッチャ。

【図面の簡単な説明】

【0008】

本開示のいくつかの実施形態を、単なる例として、添付の図面を参照して以下に説明する。

【図1】図1は、比較例に係るレーザシステムの構成を概略的に示す図である。

10

20

30

40

50

【図 2】図 2 は、ビームスプリッタ及び第 1～第 4 の凹面ミラーの位置関係を説明する図である。

【図 3】図 3 は、O P S からの出力光について説明する図である。

【図 4】図 4 は、パルスレーザー光を時間的及び空間的に分解する O P S の構成を示す図である。

【図 5】図 5 は、伸長パルスレーザー光の放電空間内への入射光路を説明する図である。

【図 6】図 6 は、第 1 の実施形態に係るレーザーシステムの構成を示す図である。

【図 7】図 7 は、ビームスプリッタ及び第 1～第 4 の凹面ミラーの位置関係を説明する図である。

【図 8】図 8 は、増幅器に入射される伸長パルスレーザー光について説明する図である。 10

【図 9】図 9 A は、O P S から出力される 0 周回光について説明する図である。図 9 B は、O P S から出力される 1 周回光について説明する図である。図 9 C は、O P S から出力される 2 周回光について説明する図である。

【図 10】図 10 は、伸長パルスレーザー光の放電空間内への入射光路を説明する図である。

【図 11】図 11 A は、第 1 の実施形態の O P S からの出力光のビームウェスト位置の変化を計測する方法を説明する模式図である。図 11 B は、比較例の O P S からの出力光のビームウェスト位置の変化の計測例を示す図である。

【図 12】図 12 は、O P S からの出力光のスポット径の変化を例示する図である。

【図 13】図 13 は、第 1 の変形例に係る O P S の構成を示す図である。 20

【図 14】図 14 は、第 2 の変形例に係る O P S の構成を示す図である。

【図 15】図 15 は、第 2 の実施形態に係るレーザーシステムに用いられる O P S の構成を示す図である。

【図 16】図 16 A は、O P S から出力される 0 周回光について説明する図である。図 16 B は、O P S から出力される 1 周回光について説明する図である。

【図 17】図 17 は、O P S から出力される 2 周回光について説明する図である。

【図 18】図 18 は、増幅器と、増幅器の後段に配置された O P S とを示す斜視図である。

【図 19】図 19 は、第 1 の変形例に係る増幅器の構成を示す図である。

【図 20】図 20 は、第 2 の変形例に係る増幅器の構成を示す図である。 30

【実施形態】

【0009】

< 内容 >

1. 比較例

1.1 構成

1.2 動作

1.3 パルス幅の定義

1.4 課題

1.4.1 空間分解による可干渉性の低下

2. 第 1 の実施形態 40

2.1 構成

2.2 動作

2.3 効果

2.4 ビームウェスト位置について

2.5 O P S の変形例

2.5.1 第 1 の変形例

2.5.2 第 2 の変形例

3. 第 2 の実施形態

3.2 動作

3.3 効果 50

4. 増幅器の後段にO P Sを配置する例

5. 増幅器の変形例

5.1 第1の変形例

5.2 第2の変形例

【0010】

以下、本開示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。以下に説明される実施形態は、本開示のいくつかの例を示すものであって、本開示の内容を限定するものではない。また、各実施形態で説明される構成及び動作の全てが本開示の構成及び動作として必須であるとは限らない。なお、同一の構成要素には同一の参照符号を付して、重複する説明を省略する。

10

【0011】

1. 比較例

1.1 構成

図1は、比較例に係るレーザシステム2の構成を概略的に示す。図1において、レーザシステム2は、マスターオシレータとしての固体レーザ装置3と、光学パルスストレッチャ(O P S : Optical Pulse Stretcher) 10と、ビームエキスパンダ20と、増幅器30と、を含む。

【0012】

固体レーザ装置3は、図示しない半導体レーザ、増幅器、非線形結晶等を含んで構成されている。固体レーザ装置3は、シングル横モードで、パルスレーザ光P Lを出力する。パルスレーザ光P Lは、ガウシアンビームであって、例えば、中心波長が193.1nm ~ 193.5nmの波長範囲内であり、かつスペクトル線幅が約0.3pmである。固体レーザ装置3は、中心波長が約773.4nmの狭帯域化されたパルスレーザ光を出力するチタンサファイアレーザと、4倍高調波を出力する非線形結晶と、を含む固体レーザ装置であってもよい。

20

【0013】

O P S 10は、ビームスプリッタ11と、第1~第4の凹面ミラー12a~12dと、を含む。ビームスプリッタ11は、部分反射ミラーである。ビームスプリッタ11の反射率は、40%~70%の範囲内であることが好ましく、約60%であることがより好ましい。ビームスプリッタ11は、固体レーザ装置3から出力されるパルスレーザ光P Lの光路上に配置されている。ビームスプリッタ11は、入射したパルスレーザ光P Lの一部を透過させるとともに、他の一部を反射させる。

30

【0014】

第1~第4の凹面ミラー12a~12dは、パルスレーザ光P Lのパルス幅を伸長するための遅延光路を構成している。第1~第4の凹面ミラー12a~12dは、全て同じ曲率半径Rの鏡面を有する。第1及び第2の凹面ミラー12a, 12bは、ビームスプリッタ11で反射された光が、第1の凹面ミラー12aで反射され、第2の凹面ミラー12bに入射するように配置されている。第3及び第4の凹面ミラー12c, 12dは、第2の凹面ミラー12bで反射された光が、第3の凹面ミラー12cで反射され、さらに第4の凹面ミラー12dで反射され、再びビームスプリッタ11に入射するように配置されている。

40

【0015】

ビームスプリッタ11と第1の凹面ミラー12aとの間の距離、及び第4の凹面ミラー12dとビームスプリッタ11との間の距離は、それぞれ曲率半径Rの半分、すなわち、 $R/2$ である。また、第1の凹面ミラー12aと第2の凹面ミラー12bとの間の距離、第2の凹面ミラー12bと第3の凹面ミラー12cとの間の距離、及び第3の凹面ミラー12cと第4の凹面ミラー12dとの間の距離は、それぞれ曲率半径Rと同じである。

【0016】

第1~第4の凹面ミラー12a~12dは、全て同じ焦点距離Fを有する。焦点距離Fは、曲率半径Rの半分、すなわち、 $F = R/2$ である。したがって、第1~第4の凹面ミ

50

ラー 12a ~ 12d により構成される遅延光路の光路長 L_{OPS} は、焦点距離 F の 8 倍である。すなわち、 $OPS10$ は、 $L_{OPS} = 8F$ の関係を有する。

【0017】

図 2 は、ビームスプリッタ 11 及び第 1 ~ 第 4 の凹面ミラー 12a ~ 12d の位置関係を説明する図である。図 2 では、第 1 ~ 第 4 の凹面ミラー 12a ~ 12d を、それぞれ焦点距離が F である凸レンズ 13a ~ 13d に置き換えて示している。P0 は、ビームスプリッタ 11 の位置を表している。P1 ~ P4 は、それぞれ第 1 ~ 第 4 の凹面ミラー 12a ~ 12d の位置を表している。

【0018】

第 1 ~ 第 4 の凹面ミラー 12a ~ 12d により構成される遅延光学系は、コリメート光学系であるので、第 1 の凹面ミラー 12a への入射光がコリメート光である場合、第 4 の凹面ミラー 12d からの射出光はコリメート光となる。

【0019】

また、第 1 ~ 第 4 の凹面ミラー 12a ~ 12d は、光路長 L_{OPS} が、パルスレーザー光 PL の時間的コヒーレント長 L_C 以上となるように配置されている。時間的コヒーレント長 L_C は、 $L_C = \frac{2}{\Delta\nu}$ の関係式に基づいて算出される。ここで、 λ は、パルスレーザー光 PL の中心波長である。 $\Delta\nu$ は、パルスレーザー光 PL のスペクトル線幅である。例えば、 $\lambda = 193.35 \text{ nm}$ 、 $\Delta\nu = 0.3 \text{ pm}$ の場合には、 $L_C = 0.125 \text{ m}$ となる。

【0020】

ビームエキスパンダ 20 は、 $OPS10$ から出力される伸長パルスレーザー光 PT の光路上に配置されている。伸長パルスレーザー光 PT は、パルスレーザー光 PL のパルス幅が $OPS10$ により伸長された光である。ビームエキスパンダ 20 は、凹レンズ 21 と凸レンズ 22 とを含む。ビームエキスパンダ 20 は、 $OPS10$ から入力された伸長パルスレーザー光 PT を、そのビーム径を拡大して出力する。

【0021】

増幅器 30 は、ビームエキスパンダ 20 から出力される伸長パルスレーザー光 PT の光路上に配置されている。増幅器 30 は、レーザチャンバ 31 と、一对の放電電極 32a 及び 32b と、リアミラー 33 と、出力結合ミラー 34 と、を含むエキシマレーザ装置である。リアミラー 33 及び出力結合ミラー 34 は、部分反射ミラーであり、ファブリペロ共振器を構成している。リアミラー 33 及び出力結合ミラー 34 には、レーザ発振する波長の光を部分反射する膜がコートされている。リアミラー 33 の部分反射膜の反射率は、80% ~ 90% の範囲内である。出力結合ミラー 34 の部分反射膜の反射率は、20% ~ 40% の範囲内である。

【0022】

レーザチャンバ 31 内には、ArF レーザガス等のレーザ媒質が充填されている。一对の放電電極 32a 及び 32b は、レーザ媒質を放電により励起するための電極として、レーザチャンバ 31 内に配置されている。一对の放電電極 32a 及び 32b の間には、図示しない電源からパルス状の高電圧が印加される。

【0023】

以下、ビームエキスパンダ 20 から出力される伸長パルスレーザー光 PT の進行方向を、Z 方向と言う。一对の放電電極 32a 及び 32b の間の放電方向を、V 方向と言う。V 方向は、Z 方向に直交する。Z 方向と V 方向とに直交する方向を H 方向と言う。

【0024】

レーザチャンバ 31 の両端には、ウィンドウ 31a 及び 31b が設けられている。ビームエキスパンダ 20 から出力された伸長パルスレーザー光 PT は、リアミラー 33 及びウィンドウ 31a を通過して一对の放電電極 32a 及び 32b の間の放電空間 35 に、シード光として入射する。放電空間 35 の V 方向に関する幅は、ビームエキスパンダ 20 により拡大されたビーム径とほぼ一致している。

【0025】

固体レーザ装置 3 と増幅器 30 とは、図示しない同期制御部によって制御される。増幅

10

20

30

40

50

器 30 は、伸長パルスレーザー光 P T が放電空間 35 に入射したタイミングで放電するように、同期制御部によって制御される。

【 0026 】

1.2 動作

次に、比較例に係るレーザーシステム 2 の動作について説明する。まず、固体レーザー装置 3 から出力されたパルスレーザー光 P L は、O P S 10 内のビームスプリッタ 11 に入射する。ビームスプリッタ 11 に入射したパルスレーザー光 P L のうち一部は、ビームスプリッタ 11 を透過し、遅延光路を周回していない 0 周回光 P S₀ として O P S 10 から出力される。

【 0027 】

ビームスプリッタ 11 に入射したパルスレーザー光 P L のうち、ビームスプリッタ 11 により反射された反射光は、遅延光路に進入し、第 1 の凹面ミラー 12 a と第 2 の凹面ミラー 12 b とにより反射される。ビームスプリッタ 11 における反射光の光像は、第 1 及び第 2 の凹面ミラー 12 a , 12 b により、等倍の第 1 の転写像として結像される。そして、第 3 の凹面ミラー 12 c と第 4 の凹面ミラー 12 d とによって、等倍の第 2 の転写像が、ビームスプリッタ 11 の位置に結像する。

【 0028 】

第 2 の転写像としてビームスプリッタ 11 に入射した光の一部は、ビームスプリッタ 11 により反射され、遅延光路を 1 周回した 1 周回光 P S₁ として O P S 10 から出力される。この 1 周回光 P S₁ は、0 周回光 P S₀ から遅延時間 t だけ遅れて出力される。この t は、 $t = L_{OPs} / c$ と表される。ここで、 c は光速である。

【 0029 】

第 2 の転写像としてビームスプリッタ 11 に入射した光のうち、ビームスプリッタ 11 を透過した透過光は、再び遅延光路に進入し、第 1 ~ 第 4 の凹面ミラー 12 a ~ 12 d により反射されて、再びビームスプリッタ 11 に入射する。ビームスプリッタ 11 により反射された反射光は、遅延光路を 2 周回した 2 周回光 P S₂ として O P S 10 から出力される。この 2 周回光 P S₂ は、1 周回光 P S₁ から遅延時間 t だけ遅れて出力される。

【 0030 】

この後、光の遅延光路の周回が繰り返されることにより、O P S 10 からは、3 周回光 P S₃、4 周回光 P S₄、・・・と、順にパルス光が出力される。O P S 10 から出力されるパルス光は、遅延光路の周回数が多くなるほど光強度が低下する。

【 0031 】

図 3 に示すように、パルスレーザー光 P L が O P S 10 に入射した結果、パルスレーザー光 P L は、時間差を有する複数のパルス光 P S₀ , P S₁ , P S₂ , ... に分解されて出力される。図 3 において、横軸は時間を表し、縦軸は光強度を表している。前述の伸長パルスレーザー光 P T は、パルスレーザー光 P L が O P S 10 により分解されてなる複数のパルス光 P S_n ($n = 0, 1, 2, \dots$) が合成されたものである。ここで、 n は遅延光路の周回数を表す。

【 0032 】

光路長 L_{OPs} が時間的コヒーレント長 L_c 以上であるので、複数のパルス光 P S_n の相互の可干渉性 (coherence) が低下する。したがって、複数のパルス光 P S_n で構成される伸長パルスレーザー光 P T の可干渉性が低下する。

【 0033 】

O P S 10 から出力された伸長パルスレーザー光 P T は、ビームエキスパンダ 20 に入射し、ビームエキスパンダ 20 によりビーム径が拡大されて出力される。ビームエキスパンダ 20 から出力された伸長パルスレーザー光 P T は、増幅器 30 に入射する。増幅器 30 に入射された伸長パルスレーザー光 P T は、リアミラー 33 及びウィンドウ 31 a を通過して放電空間 35 にシード光として入射する。

【 0034 】

放電空間 35 には、伸長パルスレーザー光 P T が入射するのに同期して、図示しない電源

10

20

30

40

50

により放電が生じる。伸長パルスレーザー光 P T が、放電によって励起された放電空間 3 5 を通過することによって、誘導放出が生じ、増幅される。そして、増幅された伸長パルスレーザー光 P T は、光共振器によって発振して、出力結合ミラー 3 4 から出力される。

【 0 0 3 5 】

この結果、レーザーシステム 2 からは、固体レーザー装置 3 から出力されたパルスレーザー光 P L に比べて、ピークパワーレベルが低下し、かつ可干渉性が低下した伸長パルスレーザー光 P T が出力される。

【 0 0 3 6 】

1 . 3 パルス幅の定義

レーザー光のパルス幅 T I S は、下式 1 により定義される。ここで、t は時間である。I (t) は、時間 t における光強度である。伸長パルスレーザー光 P T のパルス幅は、下式 1 を用いて求められる。

【 0 0 3 7 】

【数 1】

$$TIS = \frac{\left[\int I(t) dt \right]^2}{\int I(t)^2 dt} \dots (1)$$

10

20

【 0 0 3 8 】

1 . 4 課題

次に、比較例に係るレーザーシステム 2 の課題について説明する。レーザーシステム 2 から露光装置に供給されるレーザー光は、可干渉性が低いほど好ましいため、さらなる可干渉性の低下が求められている。

【 0 0 3 9 】

1 . 4 . 1 空間分解による可干渉性の低下

比較例に係るレーザーシステム 2 では、O P S 1 0 によりパルスレーザー光 P L を時間的に分解することにより可干渉性を低下させているが、さらにパルスレーザー光 P L を空間的に分解することにより可干渉性を低下させることが可能である。

30

【 0 0 4 0 】

図 4 は、パルスレーザー光 P L を時間的及び空間的に分解することを可能とする O P S 4 0 の構成を示す。O P S 4 0 は、第 4 の凹面ミラー 1 2 d の配置が異なること以外は、前述の O P S 1 0 の構成と同一である。

【 0 0 4 1 】

図 4 において、第 4 の凹面ミラー 1 2 d は、破線で示す O P S 1 0 の第 4 の凹面ミラー 1 2 d の位置に対して、H 方向を回転軸として僅かに回転させた位置に配置されている。この構成により、O P S 4 0 から出力される複数のパルス光 P S_n は、遅延光路の周回数 n に応じて、出射角が V 方向に変化する。すなわち、O P S 4 0 から出力される複数のパルス光 P S_n は、光路軸が互いに異なる。この結果、O P S 4 0 から出力される複数のパルス光 P S_n は、V 方向に空間的に分解されてビームエキスパンダ 2 0 に入射する。なお、図 4 では、パルスレーザー光 P L の O P S 4 0 への入射方向を、Z 方向から僅かに傾けている。

40

【 0 0 4 2 】

図 5 は、ビームエキスパンダ 2 0 から出力された複数のパルス光 P S_n が、シード光として増幅器 3 0 の放電空間 3 5 に入射する光路を示す。このように、複数のパルス光 P S_n は、遅延光路の周回数 n に応じて、放電空間 3 5 内の通過光路が異なる。O P S 4 0 は、パルスレーザー光 P L を時間的及び空間的に分解した複数のパルス光 P S_n を生成するので、増幅器 3 0 の出力光の可干渉性がさらに低下する。

【 0 0 4 3 】

50

しかしながら、上記のようにパルスレーザ光 PL を時間的及び空間的に分解すると、放電空間 35 は、V 方向に関して時間的に同時にシード光で満たされることはない。例えば、放電空間 35 中の 0 周回光 PS_0 が入射する空間は、0 周回光 PS_0 が入射する時間しかシード光が存在しない。このため、1 周回光 PS_1 以降の周回光が入射する時間には、0 周回光 PS_0 の光路上には、シード光は存在しない。

【0044】

エキシマレーザである増幅器 30 では、上準位に励起された原子の寿命である上準位寿命が、2 ns 程度と短い。このため、放電空間 35 中にシード光で満たされない空間が存在すると、その空間では、シード光による誘導放出が生じる前に、自然放出が生じてしまう。この結果、増幅器 30 の出力光には、誘導放出による増幅光以外に、自然放出による増幅 (ASE: Amplified Spontaneous Emission) 光がノイズとして多く含まれることになる。

10

【0045】

したがって、図 4 に示すように構成された OPS 40 を用いると、増幅器 30 の出力光は、可干渉性が低下するが、ASE 光が増加するという問題がある。この ASE 光の発生を抑制するためには、増幅器 30 の光共振器の反射率を高め、光共振器内にシード光をより多く存在させることが考えられる。しかし、光共振器の反射率を高めると、光共振器内のエネルギーが高くなり、光学素子損傷する可能性がある。

【0046】

また、ASE 光の発生を抑制するためには、伸長パルスレーザ光 PT のパルス幅を長くすることが考えられる。しかし、伸長パルスレーザ光 PT のパルス幅を長くすると、シード光の光強度が低下し、増幅に寄与しない成分が増加するため、ASE 光がより多く発生する可能性がある。

20

【0047】

2. 第 1 の実施形態

次に、本開示の第 1 の実施形態に係るレーザシステムについて説明する。第 1 の実施形態に係るレーザシステムは、OPS の構成が異なること以外は、図 1 に示した比較例に係るレーザシステムの構成と同一である。以下では、図 1 に示した比較例に係るレーザシステムの構成要素と略同じ部分については、同一の符号を付し、適宜説明を省略する。

【0048】

1. 1 構成

図 6 は、第 1 の実施形態に係るレーザシステム 50 の構成を示す。レーザシステム 50 は、固体レーザ装置 3 と、OPS 60 と、ビームエキスパンダ 20 と、増幅器 30 と、を含む。OPS 60 は、ビームスプリッタ 61 と、第 1 ~ 第 4 の凹面ミラー 62 a ~ 62 d と、を含む。ビームスプリッタ 61 は、比較例のビームスプリッタ 11 と同一の構成である。

30

【0049】

第 1 ~ 第 4 の凹面ミラー 62 a ~ 62 d は、第 4 の凹面ミラー 62 d のみ、他のものとは鏡面の曲率半径が異なる。具体的には、第 1 の凹面ミラー 62 a の曲率半径を R_1 、第 2 の凹面ミラー 62 b の曲率半径を R_2 、第 3 の凹面ミラー 62 c の曲率半径を R_3 、第 4 の凹面ミラー 62 d の曲率半径を R_4 とすると、 $R_1 = R_2 = R_3 = R$ 、及び $R_4 < R$ の関係を満たす。また、第 1 の凹面ミラー 62 a の焦点距離を F_1 、第 2 の凹面ミラー 62 b の焦点距離を F_2 、第 3 の凹面ミラー 62 c の焦点距離を F_3 、第 4 の凹面ミラー 62 d の焦点距離を F_4 とすると、 $F_1 = F_2 = F_3 = F$ 、及び $F_4 < F$ の関係を満たす。

40

【0050】

第 1 ~ 第 4 の凹面ミラー 62 a ~ 62 d の配置は、比較例と同様である。ビームスプリッタ 61 と第 1 の凹面ミラー 62 a との間の距離、及び第 4 の凹面ミラー 62 d とビームスプリッタ 61 との間の距離は、第 1 ~ 第 3 の凹面ミラー 62 a ~ 62 c の曲率半径 R の半分、すなわち、 $R/2$ である。また、第 1 の凹面ミラー 62 a と第 2 の凹面ミラー 62 b との間の距離、第 2 の凹面ミラー 62 b と第 3 の凹面ミラー 62 c との間の距離、及び

50

第3の凹面ミラー62cと第4の凹面ミラー62dとの間の距離は、それぞれ曲率半径Rと同じである。

【0051】

したがって、第1～第4の凹面ミラー62a～62dにより構成される遅延光路の光路長 L_{OPS} は第1～第3の凹面ミラー62a～62cの焦点距離Fの8倍、すなわち、 $L_{OPS} = 8F$ である。なお、ビームスプリッタ11及び第1～第4の凹面ミラー12a～12dは、OPS60から出力される0周回光 PS_0 の光路軸と1周回光 PS_1 の光路軸とが一致するように配置されている。すなわち、第1の実施形態では、OPS60から出力される複数のパルス光 PS_n の光路軸は、全て一致する。

【0052】

図7は、ビームスプリッタ61及び第1～第4の凹面ミラー62a～62dの位置関係を説明する図である。図7では、第1～第4の凹面ミラー62a～62dを、それぞれ焦点距離がFである凸レンズ63a～63cと、焦点距離がFより短い凸レンズ63dとに置き換えて示している。P0は、ビームスプリッタ61の位置を表している。P1～P4は、それぞれ第1～第4の凹面ミラー62a～62dの位置を表している。

【0053】

$L_{OPS} = 8F$ であるのに対して、 $F_1 = F_2 = F_3 = F$ 、及び $F_4 < F$ であるので、遅延光学系は、コリメート条件を満たさない非コリメート光学系である。このため、第1の凹面ミラー62aへの入射光がコリメート光である場合、第4の凹面ミラー62dからの射出光は非コリメート光となる。

【0054】

OPS60は、比較例のOPS10と同様に、図3に示されるように、固体レーザ装置3から入射したパルスレーザ光PLを、時間差を有する複数のパルス光 PS_n ($n = 0, 1, 2, \dots$)に分解し、伸長パルスレーザ光PTとして出力する。パルスレーザ光PLは、ガウシアンビームであるので、OPS60から出力される複数のパルス光 PS_n の各発散角 θ_n は、遅延光路の周回数nに応じて変化する。また、複数のパルス光 PS_n の各ビームウェスト位置 w_n は、遅延光路の周回数nに応じてZ方向に移動する。発散角 θ_n とビームウェスト位置 w_n とは、反比例の関係にある。発散角 θ_n 及びビームウェスト位置 w_n は、第4の凹面ミラー62dの曲率によって決定される。

【0055】

ビームウェスト位置は、ビームのスポットサイズが最小となる位置であり、波面の曲率半径が平面となる位置と一致する。発散角は、ビームウェスト位置から十分離れた距離でのビームの角度広がりを表す。

【0056】

図8に示すように、増幅器30には、伸長パルスレーザ光PTが周期的に入射される。ASE光の発生を抑制するために、伸長パルスレーザ光PTの間隔PTは、増幅器30内で上準位に励起された原子の寿命である上準位寿命より短いことが好ましい。この上準位寿命は、約2nsである。このためには、伸長パルスレーザ光PTのパルス幅DTを可能な限り長くすればよい。間隔PTは、光強度がほぼ0となる期間である。例えば、光強度がピーク強度の1%以下である場合に、光強度が0であるとする。

【0057】

パルス幅DTを長くするためには、前述の遅延時間tが、パルスレーザ光PLのパルス幅Dと一致するように、光路長 L_{OPS} を設定することが好ましい。この場合、光路長 L_{OPS} を、下式2を満たすように設定すればよい。

【0058】

$$L_{OPS} = c \cdot D \cdot \dots (2)$$

【0059】

パルス幅Dは、複数のパルス光 PS_n の各パルス幅とほぼ同一である。例えば、 $D = 3 \text{ nm}$ とすると、 $L_{OPS} = 1 \text{ m}$ となり、光路長 L_{OPS} は、時間的コヒーレント長 L_C 以上となる。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 0 】

また、ASE光の発生を抑制するために、伸長パルスレーザー光PTのパルス幅DTは、増幅器30の光共振器の光路長を L_{amp} とした場合に、下式3を満たすことが好ましい。なお、光共振器の光路長 L_{amp} は、リアミラー33と出力結合ミラー34との間の距離である共振器長 L_a の2倍、すなわち、 $L_{amp} = 2L_a$ である。

【 0 0 6 1 】

$$DT = L_{amp} / c \quad \dots (3)$$

【 0 0 6 2 】

2.2 動作

次に、第1の実施形態に係るレーザーシステム50の動作について説明する。まず、固体レーザー装置3から出力されたパルスレーザー光PLは、OPSS60内のビームスプリッタ61に入射する。ビームスプリッタ61に入射したパルスレーザー光PLのうち一部は、ビームスプリッタ61を透過し、0周回光 PS_0 としてOPSS60から出力される。図9Aは、OPSS60から出力される0周回光 PS_0 を示す。0周回光 PS_0 は、コリメート光である。

10

【 0 0 6 3 】

ビームスプリッタ61に入射したパルスレーザー光PLのうち、ビームスプリッタ61により反射された反射光は、第1～第4の凹面ミラー62a～62dにより構成される遅延光路に進入し、遅延光路を1周回して再びビームスプリッタ61に入射する。ビームスプリッタ61に入射した光の一部は、ビームスプリッタ61により反射され、1周回光 PS_1 としてOPSS60から出力される。図9Bは、OPSS60から出力される1周回光 PS_1 を示す。前述のように、遅延光学系は非コリメート光学系であるので、1周回光 PS_1 は、非コリメート光となり、OPSS60から遠くに収束する。すなわち、1周回光 PS_1 のビームウエスト位置 w_1 は、OPSS60から遠くに位置する。

20

【 0 0 6 4 】

ビームスプリッタ61に入射した光のうち、ビームスプリッタ61を透過した透過光は、再び遅延光路に進入し、遅延光路をさらに1周回して再びビームスプリッタ61に入射する。ビームスプリッタ61に入射した光の一部は、ビームスプリッタ61により反射され、2周回光 PS_2 としてOPSS60から出力される。図9Cは、OPSS60から出力される2周回光 PS_2 を示す。2周回光 PS_2 のビームウエスト位置 w_2 は、1周回光 PS_1 のビームウエスト位置 w_1 よりもOPSS60側に近づく。

30

【 0 0 6 5 】

この後、光の遅延光路の周回が繰り返されることにより、OPSS60からは、3周回光 PS_3 、4周回光 PS_4 、・・・と、順にパルス光が出力される。遅延光路の周回数 n が多くなるほど、OPSS60からの出力光のビームウエスト位置 w_n は、OPSS60側に近づく。

【 0 0 6 6 】

パルスレーザー光PLがOPSS60に入射した結果、パルスレーザー光PLは、時間差を有する複数のパルス光 PS_n ($n = 0, 1, 2, \dots$) に分解されて出力される。複数のパルス光 PS_n は、伸長パルスレーザー光PTを構成する。

40

【 0 0 6 7 】

図10に示すように、伸長パルスレーザー光PTは、ビームエキスパンダ20によりビーム径が、放電空間35の幅に合うように拡大され、シード光として増幅器30に入射する。増幅器30に入射した伸長パルスレーザー光PTは、リアミラー33及びウィンドウ31aを通過して放電空間35に入射する。複数のパルス光 PS_n は、それぞれ光路軸が一致しているので、放電空間35内で重なり合う。

【 0 0 6 8 】

放電空間35には、伸長パルスレーザー光PTが入射するのに同期して、図示しない電源により放電が生じる。伸長パルスレーザー光PTが、放電によって励起された放電空間35を通過することによって、誘導放出が生じ、増幅される。そして、増幅された伸長パルス

50

レーザ光 P T は、光共振器によって発振して、出力結合ミラー 3 4 から出力される。

【 0 0 6 9 】

2 . 3 効果

O P S 6 0 は、パルスレーザ光 P L を時間的に分解することに加え、分解された複数のパルス光 P S_n を、進行方向を変えずに、ビームウェスト位置 w_n を光路軸方向に変化させる。これにより、複数のパルス光 P S_n は、それぞれビームウェスト位置 w_n 及び発散角 θ_n が異なるので、相互の可干渉性がさらに低下し、これらで構成される伸長パルスレーザ光 P T の可干渉性がさらに低下する。

【 0 0 7 0 】

また、シード光として放電空間 3 5 内に入射する複数のパルス光 P S_n は、放電空間 3 5 内で重なり合うので、放電空間 3 5 内が V 方向に関して時間的に同時にシード光で満たされる。これにより、A S E 光の発生が抑制される。

10

【 0 0 7 1 】

さらに、伸長パルスレーザ光 P T のパルス幅 Δ T を、前述の式 3 を満たすように設定することにより、放電期間中の何れの時間においても放電空間 3 5 内がシード光で満たされるので、A S E 光の発生がさらに抑制される。

【 0 0 7 2 】

したがって、第 1 の実施形態に係るレーザシステム 5 0 は、出力光の可干渉性を低下させるとともに、A S E 光の発生を抑制することができる。

【 0 0 7 3 】

20

2 . 4 ビームウェスト位置について

図 1 1 A は、第 1 の実施形態の O P S 6 0 から出力される複数のパルス光 P S_n のビームウェスト位置 w_n の変化を計測する方法を説明する模式図である。O P S 6 0 の出力光の光路軸上に焦点距離が f の理想レンズ 7 0 を配置し、理想レンズ 7 0 による出力光の集光位置を計測する。この集光位置がビームウェスト位置に対応する。理想レンズ 7 0 とは、収差を無視できる程度のレンズである。集光位置は、図 1 2 に示すように、ビームのスポット径が最小となる位置を計測することにより求まる。

【 0 0 7 4 】

0 周回光 P S₀ は、コリメート光であるので、理想レンズ 7 0 による集光位置 F P₀ は、理想レンズ 7 0 の焦点位置と一致する。理想レンズ 7 0 による 1 周回光 P S₁ の集光位置 F P₁ は、集光位置 F P₀ より理想レンズ 7 0 側に移動する。理想レンズ 7 0 による 2 周回光 P S₂ の集光位置 F P₂ は、集光位置 F P₁ より理想レンズ 7 0 側に移動する。以下、同様に、周回数 n が多くなるほど、集光位置は理想レンズ 7 0 側に近づく。

30

【 0 0 7 5 】

図 1 1 B は、比較例として説明した O P S 4 0 から出力される複数のパルス光 P S_n のビームウェスト位置 w_n の計測例を示している。O P S 4 0 は、複数のパルス光 P S_n の進行方向を変化させるので、集光位置 F P₀ , F P₁ , F P₂ , . . . は、順に V 方向に移動する。

【 0 0 7 6 】

なお、第 1 の実施形態では、遅延光学系を構成する第 1 ~ 第 4 の凹面ミラー 6 2 a ~ 6 2 d のうち、第 4 の凹面ミラー 6 2 d の曲率を変えることにより、遅延光学系を非コリメート光学系となるように設定している。第 4 の凹面ミラー 6 2 d に限られず、その他の凹面ミラーの曲率を変えてもよい。

40

【 0 0 7 7 】

また、遅延光学系を構成する凹面ミラーは 4 枚に限られない。さらに、曲率を変える凹面ミラーの枚数は 1 枚に限られない。したがって、遅延光学系を構成する複数の凹面ミラーのうち少なくとも 1 つの凹面ミラーの曲率を、他の凹面ミラーの曲率と異ならせることにより、遅延光学系を非コリメート光学系とすればよい。

【 0 0 7 8 】

2 . 5 O P S の変形例

50

次に、遅延光学系を非コリメート光学系とするためのその他の例について説明する。

【0079】

2.5.1 第1の変形例

図13は、第1の変形例に係るOPS80の構成を示す。OPS80は、ビームスプリッタ81と、第1～第4の凹面ミラー82a～82dと、を含む。ビームスプリッタ81は、比較例のビームスプリッタ11と同一の構成である。

【0080】

第1～第4の凹面ミラー82a～82dは、全て同じ曲率半径Rの鏡面を有する。また、第1～第4の凹面ミラー82a～82dは、全て同じ焦点距離Fを有する。OPS80は、第4の凹面ミラー82dの位置が異なること以外は、比較例に係るOPS10と同一の構成である。

10

【0081】

図13において、第4の凹面ミラー82dは、破線で示すOPS10の第4の凹面ミラー12dの位置から、遅延光路の光路長 L_{OPS} を長くする方向に移動されている。具体的には、第3の凹面ミラー62cと第4の凹面ミラー62dとの間の距離を焦点距離Fの2倍よりも長くし、かつ第4の凹面ミラー62dとビームスプリッタ61との間の距離を焦点距離Fよりも長くする。すなわち、OPS80は、 $L_{OPS} > 8F$ の関係を有する。

【0082】

第1～第4の凹面ミラー82a～82dにより構成される遅延光学系は、非コリメート光学系であるので、遅延光路を周回した周回光は、非コリメート光となる。OPS80から出力される複数のパルス光 PS_n は、遅延光路の周回数nに応じて、発散角 θ_n が変化するとともに、ビームウェスト位置 w_n がZ方向に移動する。なお、複数のパルス光 PS_n の光路軸は、ほぼ同一である。

20

【0083】

第1～第4の凹面ミラー82a～82dのうち、光路長 L_{OPS} を長くする方向に移動させる凹面ミラーは、第4の凹面ミラー82dに限られず、その他の凹面ミラーであってもよい。遅延光学系を構成する複数の凹面ミラーのうち少なくとも1つの凹面ミラーを、コリメート条件を満たす位置から、遅延光路の光路長を変更する方向に移動させればよい。

【0084】

2.5.2 第2の変形例

図14は、第2の変形例に係るOPS90の構成を示す。OPS90は、ビームスプリッタ91と、第1～第4の凹面ミラー92a～92dと、第1のレンズ93と、第2のレンズ94と、を含む。ビームスプリッタ91は、比較例のビームスプリッタ11と同一の構成である。第1～第4の凹面ミラー92a～92dは、比較例の第1～第4の凹面ミラー12a～12dと同一の構成であり、かつ同一の位置に配置されている。すなわち、OPS90は、 $L_{OPS} = 8F$ の関係を有する。

30

【0085】

第1及び第2のレンズ93, 94は、合成石英又はフッ化カルシウム(CaF_2)により形成されている。第1のレンズ93は、第2の凹面ミラー92bと第3の凹面ミラー92cとの間の光路上に配置されている。第1のレンズ93は、凹面レンズであり、入射した光の発散角を変更して射出する。第1のレンズ93により、遅延光学系が非コリメート光学系となるように設定される。

40

【0086】

第2のレンズ94は、ビームスプリッタ91に入射するパルスレーザ光PLの光路上に配置されている。第2のレンズ94は、凹面レンズであり、第1のレンズ93により変更される発散角を補正するために設けられている。なお、第2のレンズ94は、必須の構成要素ではなく、省略してもよい。

【0087】

第1～第4の凹面ミラー92a～92d及び第1のレンズ93により構成される遅延光学系は、非コリメート光学系であるので、遅延光路を周回した周回光は、非コリメート光

50

となる。OPS90から出力される複数のパルス光 PS_n は、遅延光路の周回数 n に応じて、発散角 θ_n が変化するとともに、ビームウェスト位置 w_n がZ方向に移動する。なお、複数のパルス光 PS_n の光路軸は、ほぼ同一である。

【0088】

第1のレンズ93は、第2の凹面ミラー92bと第3の凹面ミラー92cとの間の光路上に限られず、第4の凹面ミラー92dとビームスプリッタ91との間の光路上や、ビームスプリッタ91と第1の凹面ミラー92aとの間の光路上に配置してもよい。

【0089】

第1及び第2のレンズ93, 94は、凹面レンズに限られず、その他の光学素子により構成してもよい。例えば、第1及び第2のレンズ93, 94は、それぞれシリンダリカルレンズであってもよい。さらに、第1及び第2のレンズ93, 94は、それぞれ、湾曲方向が互い直交する2つのシリンダリカルレンズを組み合わせたものであってもよい。

10

【0090】

3. 第2の実施形態

次に、本開示の第2の実施形態に係るレーザシステムについて説明する。第2の実施形態に係るレーザシステムは、OPSの構成が異なること以外は、図6に示した第1の実施形態に係るレーザシステム50の構成と同一である。第1の実施形態では、OPSを複数の凹面ミラーを含む構成としているが、第2の実施形態では、OPSを、集光レンズを含む構成とする。

【0091】

20

図15は、第2の実施形態に係るレーザシステムに用いられるOPS100の構成を示す。OPS100は、ビームスプリッタ101と、第1～第4の高反射ミラー102a～102dと、第1～第5の集光レンズ103～107と、を含む。ビームスプリッタ101は、第1の実施形態のビームスプリッタ61と同一の構成である。第1～第5の集光レンズ103～107は、それぞれ凸レンズである。

【0092】

第1及び第2の集光レンズ103, 104は、0周回光 PS_0 の発散角 θ_0 を調整するための第1のレンズ群である。第1の集光レンズ103は、固体レーザ装置3から入射したパルスレーザ光PLが、ビームスプリッタ101に入射するまでの光路上に配置されている。第2の集光レンズ104は、パルスレーザ光PLのうち、ビームスプリッタ101を透過した光の光路上に配置されている。

30

【0093】

第2の集光レンズ104は、一軸ステージ104aに保持されている。一軸ステージ104aは、第2の集光レンズ104を光路軸方向であるZ方向に移動させることを可能とする。第2の集光レンズ104の光路軸方向に関する位置を調整することにより、0周回光 PS_0 の発散角 θ_0 を調整することができる。

【0094】

図16Aは、第1及び第2の集光レンズ103, 104の位置関係を示している。P1は、第1の集光レンズ103の位置を表している。P2は、第2の集光レンズ104の位置を表している。P0は、ビームスプリッタ101の位置を表している。第1の集光レンズ103の焦点距離を F_1 、第2の集光レンズ104の焦点距離を F_2 とする。位置P2は、位置P1と位置P2との間の光路長が「 $F_1 + F_2$ 」となるように設定されている。すなわち、第1のレンズ群は、コリメート光学系である。なお、位置P2を、コリメート条件を満たす位置からずらすことにより、第1のレンズ群を非コリメート光学系としてもよい。

40

【0095】

図15において、第1～第4の高反射ミラー102a～102dと、第3～第5の集光レンズ105～107を含む第2のレンズ群とは、遅延光路を構成している。第1～第4の高反射ミラー102a～102dは、表面に高反射膜が形成された平面ミラーである。第1～第4の高反射ミラー102a～102dの基板は、合成石英又はフッ化カルシウム

50

(CaF_2)により形成されている。高反射膜は、誘電体多層膜、例えば、フッ化物を含む膜である。

【0096】

第1～第4の高反射ミラー102a～102dは、パルスレーザー光PLのうち、ビームスプリッタ101により反射された光を、順に高反射して、再びビームスプリッタ61に入射させるように配置されている。第3及び第4の集光レンズ105, 106は、ビームスプリッタ101と第1の高反射ミラー102aとの間に配置されている。第5の集光レンズ107は、第2の高反射ミラー102bと第3の高反射ミラー102cとの間に配置されている。

【0097】

第4の集光レンズ106は、一軸ステージ106aに保持されている。一軸ステージ104aは、第4の集光レンズ106を光路軸方向であるV方向に移動させることを可能とする。第4の集光レンズ106の光路軸方向に関する位置を調整することにより、 n 周回光 PS_n ($n=1$)の発散角 θ_n を調整することができる。

【0098】

図16B及び図17は、第1～第5の集光レンズ103～107の位置関係を示している。P3は、第3の集光レンズ105の位置を表している。P4は、第4の集光レンズ106の位置を表している。P5は、第5の集光レンズ107の位置を表している。第3の集光レンズ105の焦点距離を F_3 、第4の集光レンズ106の焦点距離を F_4 、第5の集光レンズ107の焦点距離を F_5 とする。位置P3は、位置P1と位置P3との間の光路長が「 $F_1 + F_3$ 」となるように設定されている。

【0099】

また、P4'は、遅延光路がコリメート条件を満たす場合の第4の集光レンズ106の位置を表している。位置P5は、位置P4'と位置P5との間の光路長が「 $F_4 + 2F_5$ 」となり、位置P2と位置P5との間の光路長が「 $F_2 + 2F_5$ 」となり、位置P3と位置P5との間の光路長が「 $F_3 + 2F_5$ 」となるように設定されている。第4の集光レンズ106は、遅延光学系が非コリメート光学系となるように、すなわち、位置P4が位置P4'からずれた位置となるように、一軸ステージ106aによって光路軸方向に位置調整されている。

【0100】

また、ビームスプリッタ101と、第1～第4の高反射ミラー102a～102dと、第1～第5の集光レンズ103～107とは、OPS100から出力される0周回光 PS_0 の光路軸と1周回光 PS_1 の光路軸とが一致するように配置されている。すなわち、第2の実施形態では、OPS100から出力される複数のパルス光 PS_n の光路軸は、全て一致する。

【0101】

また、図16B及び図17において、 L_{OPS} は、遅延光路の光路長を表している。光路長 L_{OPS} は、前述の式2の関係を満たしている。また、OPS100により生成される伸長パルスレーザー光PTのパルス幅DTは、前述の式3の関係を満たしている。

【0102】

3.2 動作

次に、第2の実施形態に係るレーザーシステムの動作について説明する。まず、固体レーザー装置3から出力されたパルスレーザー光PLは、第1の集光レンズ103を介してビームスプリッタ101に入射する。ビームスプリッタ101に入射したパルスレーザー光PLのうち一部は、ビームスプリッタ101を透過し、第2の集光レンズ104に入射する。第2の集光レンズ104から出射される光は、0周回光 PS_0 としてOPS100から出力される。図16Aに示すように、0周回光 PS_0 は、コリメート光である。

【0103】

ビームスプリッタ101に入射したパルスレーザー光PLのうち、ビームスプリッタ101により反射された反射光は、遅延光路に進入する。遅延光路に進入した反射光は、第3

10

20

30

40

50

の集光レンズ105、第4の集光レンズ106、第1の高反射ミラー102a、第2の高反射ミラー102b、第5の集光レンズ107、第3の高反射ミラー102c、第4の高反射ミラー102dを經由して、再びビームスプリッタ101に入射する。ビームスプリッタ101に入射した光の一部は、ビームスプリッタ101により反射され第2の集光レンズ104に入射する。第2の集光レンズ104から出射される光は、1周回光 PS_1 としてOP S 100から出力される。図16Bに示すように、1周回光 PS_1 は、非コリメート光であり、OP S 100から遠くに収束する。すなわち、1周回光 PS_1 のビームウェスト位置 w_1 は、OP S 100から遠くに位置する。

【0104】

ビームスプリッタ101に入射した光のうち、ビームスプリッタ101を透過した透過光は、再び遅延光路に進入し、遅延光路をさらに1回周回して再びビームスプリッタ101に入射する。ビームスプリッタ101に入射した光の一部は、ビームスプリッタ101により反射され、第2の集光レンズ104を介して、2周回光 PS_2 としてOP S 100から出力される。図17は、OP S 100から出力される2周回光 PS_2 を示す。2周回光 PS_2 のビームウェスト位置 w_2 は、1周回光 PS_1 のビームウェスト位置 w_1 よりもOP S 100側に近づく。

【0105】

この後、光の遅延光路の周回が繰り返されることにより、OP S 100からは、3周回光 PS_3 、4周回光 PS_4 、・・・と、順にパルス光が出力される。遅延光路の周回数 n が多くなるほど、OP S 100からの出力光のビームウェスト位置 w_n は、OP S 100側に近づく。以下の動作は、第1の実施形態に係るレーザシステム50の動作と同様であるので、説明は省略する。

【0106】

3.3 効果

第2の実施形態に係るレーザシステムは、第1の実施形態と同様に、出力光の可干渉性を低下させるとともに、ASE光の発生を抑制することができる。また、第2の実施形態に係るレーザシステムでは、第2の集光レンズ104及び第4の集光レンズ106の位置を調整することにより、 n 周回光 PS_n の発散角 θ_n 及びビームウェスト位置 w_n を調整することができる。

【0107】

なお、第2の実施形態では、0周回光 PS_0 の発散角 θ_0 を調整するために第1のレンズ群を設けているが、第1のレンズ群は、必須の構成要素ではない。遅延光学系を構成する複数の高反射ミラーや集光レンズの配置は、適宜変更可能である。

【0108】

4. 増幅器の後段にOP Sを配置する例

第1及び第2の実施形態に係るレーザシステムでは、固体レーザ装置3と増幅器30との間にOP Sを配置しているが、さらに増幅器30の後段にOP Sを配置してもよい。なお、固体レーザ装置3と増幅器30との間に配置されたOP Sが、第1の光学パルスストレッチャに対応する。増幅器の後段に配置されたOP Sが、第2の光学パルスストレッチャに対応する。

【0109】

図18は、増幅器30と、増幅器30の後段に配置されたOP S 200とを示す斜視図である。OP S 200は、ビームスプリッタ201と、第1～第4の凹面ミラー202a～202dと、を含む。OP S 200は、図4に示したOP S 40と同様の構成である。第1～第4の凹面ミラー202a～202dは、全て同じ曲率半径の鏡面を有する。第1～第4の凹面ミラー202a～202dにより構成される遅延光路の光路長は、焦点距離の8倍である。第4の凹面ミラー202dは、コリメート条件を満たす位置に対して、Z方向を回転軸として僅かに回転させた位置に配置されている。

【0110】

増幅器30から出力された出力光PAは、OP S 200によりH方向に空間的に分解さ

10

20

30

40

50

れる。OPS200から出力される複数の PA_n ($n = 0, 1, 2, \dots$)は、OPS20内の遅延光路の周回数 n に応じて、出射角がH方向に変化する。この結果、レーザシステムからの出力光の可干渉性がさらに低下する。

【0111】

なお、第4の凹面ミラー202dは、レーザシステムからの出力光が、露光装置の光学系に影響のない範囲で回転させることが好ましい。また、OPS200に代えて、前述のOPS40, 60, 80, 90, 100のうちのいずれかを適用してもよい。さらに、増幅器30の後段に、複数のOPSを配置してもよい。例えば、増幅器30の後段に配置したOPS200の後段にOPS40を配置し、増幅器30からの出力光PAを、H方向及びV方向に分解してもよい。

10

【0112】

5. 増幅器の変形例

第1及び第2の実施形態に係るレーザシステムでは、図6に示される増幅器30を適用しているが、増幅器は、様々な構成を取り得る。

【0113】

5.1 第1の変形例

図19は、第1の変形例に係る増幅器300の構成を示す。増幅器300は、図6に示される増幅器30の構成におけるリアミラー33と出力結合ミラー34とに代えて、凹面ミラー310と凸面ミラー320とを備えている。凹面ミラー310と凸面ミラー320とは、伸長パルスレーザ光PTが一对の放電電極32a及び32b間の放電空間35を3回通過して、ビームが拡大されるように配置されている。増幅器300のその他の構成は、増幅器30と同様である。増幅器300は、マルチパス増幅器と称される。

20

【0114】

このように、増幅器300を適用する場合には、前述のビームエキスパンダ20を省略することが可能である。

【0115】

5.2 第2の変形例

図20は、第2の変形例に係る増幅器400の構成を示す。図20において、増幅器400は、レーザチャンバ31と、出力結合ミラー410と、高反射ミラー420~422とを含む。高反射ミラー420~422は、平面ミラーである。さらに、増幅器400は、伸長パルスレーザ光PTを高反射ミラー420に導くための高反射ミラーを含んでもよい。

30

【0116】

出力結合ミラー410と高反射ミラー420~422とは、リング共振器を構成している。増幅器400では、伸長パルスレーザ光PTは、出力結合ミラー410、高反射ミラー420、放電空間35、高反射ミラー421、高反射ミラー422、放電空間35の順に繰り返し進行して、増幅される。

【0117】

なお、高反射ミラー420~422を凹面ミラーとし、共振器への入射光が共振器内を周回するたびに発散角が変化するように構成してもよい。この場合、出力結合ミラー410からの出力光は、共振器内の周回数に応じて、ビームウェスト位置が光路軸方向に変化する。このように、増幅器400に、出力光の可干渉性を低下させる機能を持たせることが可能である。

40

【0118】

なお、上記各実施形態に係るレーザシステムでは、マスターオシレータとしての固体レーザ装置3を用いているが、マスターオシレータは、固体レーザ装置に限られず、エキシマレーザ装置等、その他のレーザ装置であってもよい。

【0119】

上記の説明は、制限ではなく単なる例示を意図したものである。従って、添付の特許請求の範囲を逸脱することなく本開示の各実施形態に変更を加えることができることは、当

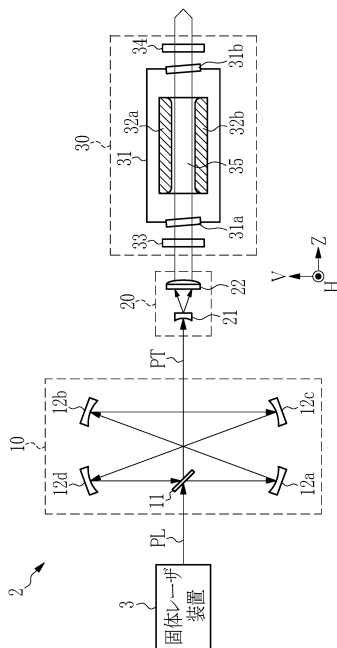
50

業者には明らかであろう。

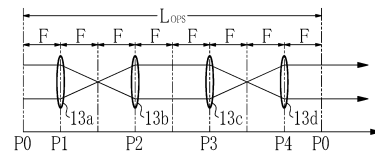
【0120】

本明細書及び添付の特許請求の範囲全体で使用される用語は、「限定的でない」用語と解釈されるべきである。例えば、「含む」又は「含まれる」という用語は、「含まれるものとして記載されたものに限定されない」と解釈されるべきである。「有する」という用語は、「有するものとして記載されたものに限定されない」と解釈されるべきである。また、本明細書及び添付の特許請求の範囲に記載される修飾句「1つの」は、「少なくとも1つ」又は「1又はそれ以上」を意味すると解釈されるべきである。

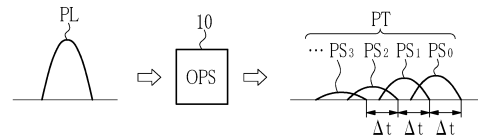
【図1】



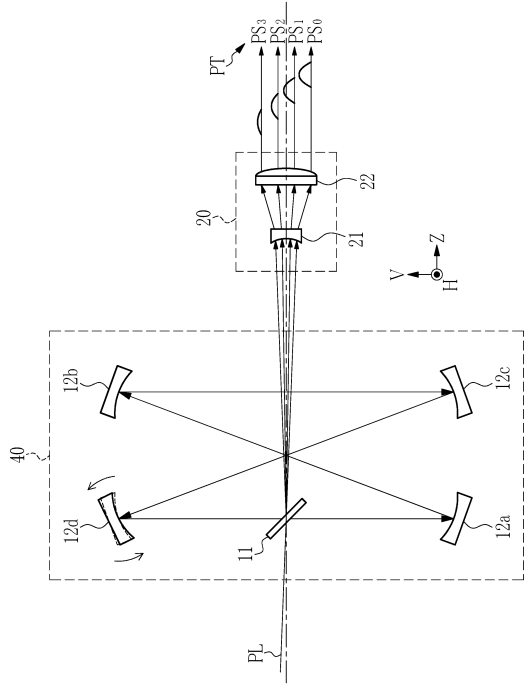
【図2】



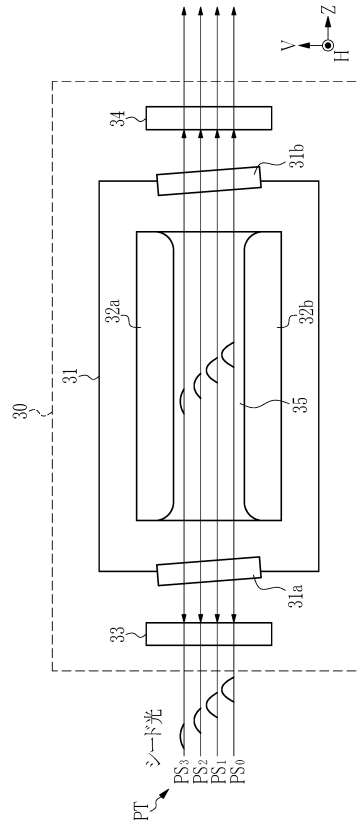
【図3】



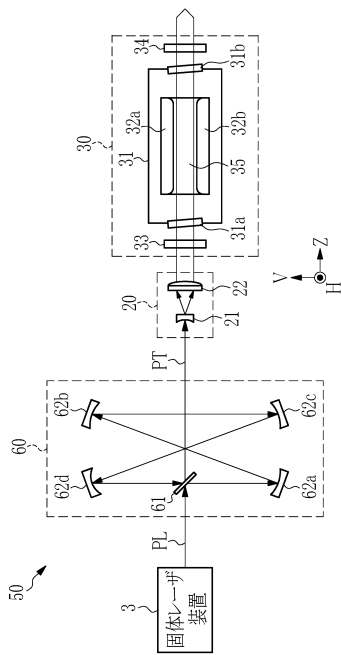
【図4】



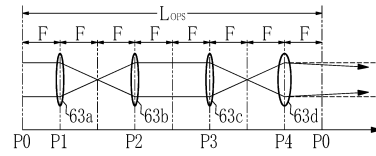
【図5】



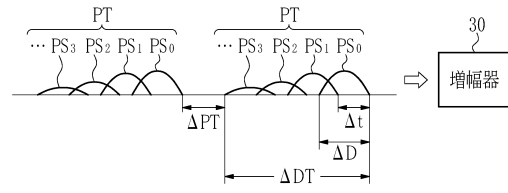
【図6】



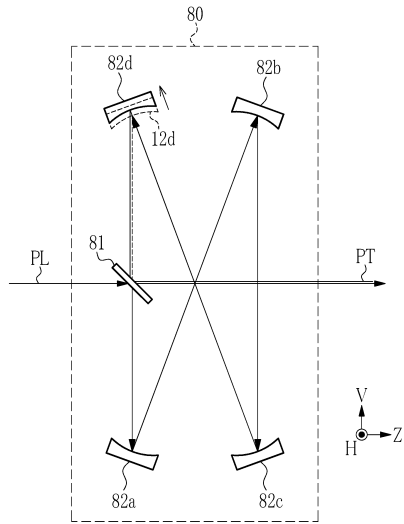
【図7】



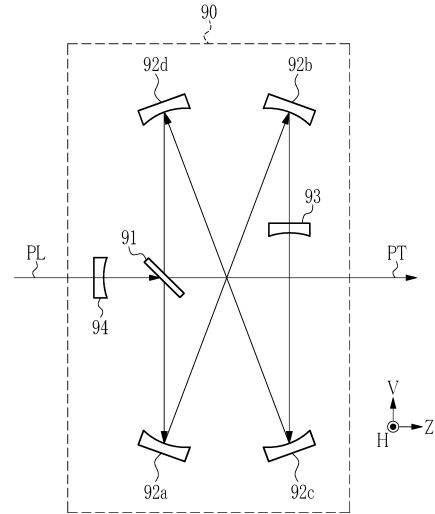
【図8】



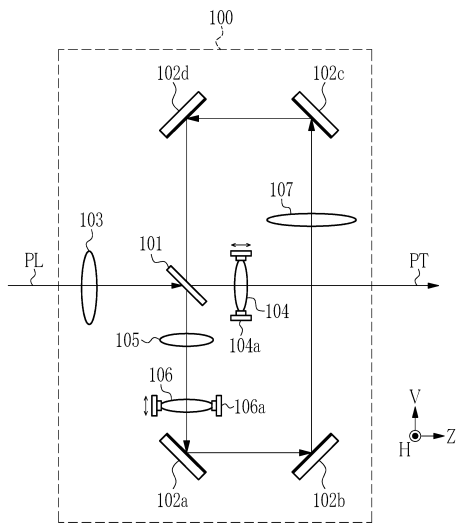
【 図 1 3 】



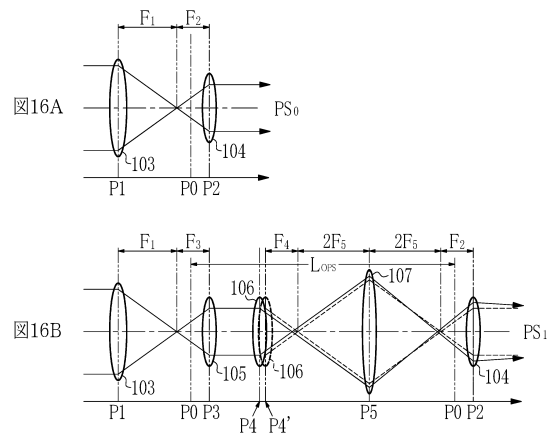
【 図 1 4 】



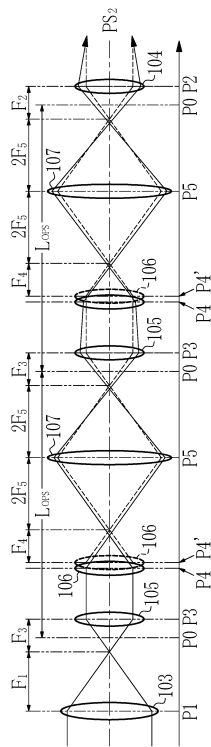
【 図 1 5 】



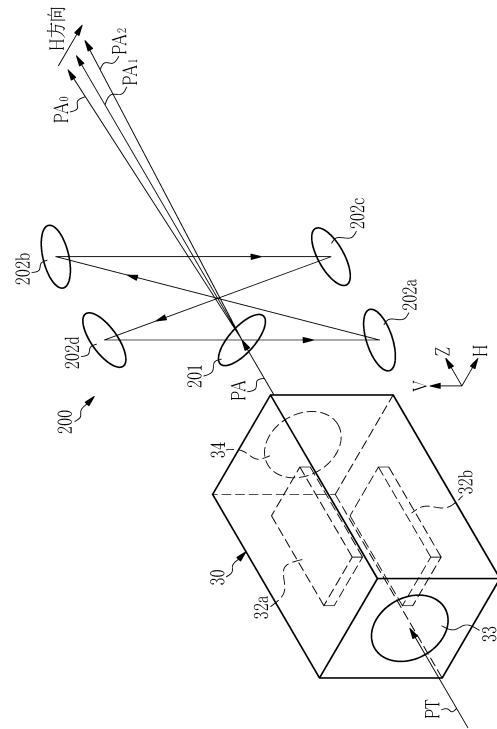
【 図 1 6 】



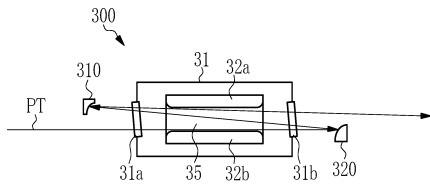
【 図 17 】



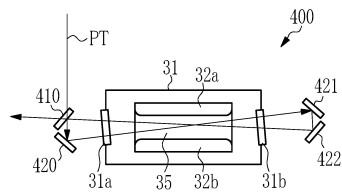
【 図 18 】



【 図 19 】



【 図 20 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2008-277617(JP,A)
特開2011-192849(JP,A)
国際公開第03/021732(WO,A1)
特開2010-3755(JP,A)
特開平1-132186(JP,A)
米国特許出願公開第2006/0216037(US,A1)
国際公開第2006/096171(WO,A1)
特開2008-135631(JP,A)
特開2006-186046(JP,A)
特開2005-148550(JP,A)
特表2009-532864(JP,A)
特開2013-214708(JP,A)
特開2012-15445(JP,A)
特開2009-76906(JP,A)
国際公開第2015/092855(WO,A1)
特開2008-34871(JP,A)
特表2009-540607(JP,A)
特開2005-303135(JP,A)
特開平4-147683(JP,A)
特開平4-73983(JP,A)
米国特許出願公開第2010/0290025(US,A1)
米国特許出願公開第2016/0126690(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 3/00-3/30