

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2016年6月30日(30.06.2016)



(10) 国際公開番号
WO 2016/103483 A1

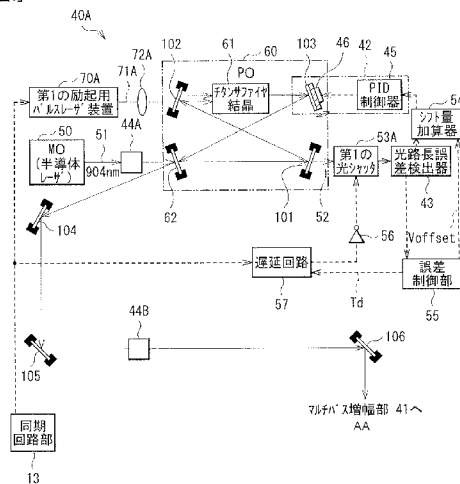
- (51) 国際特許分類:
H01S 3/16 (2006.01) H01S 3/23 (2006.01)
H01S 3/083 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/084618
- (22) 国際出願日: 2014年12月26日(26.12.2014)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 学校法人東京理科大学(TOKYO UNIVERSITY OF SCIENCE FOUNDATION) [JP/JP]; 〒1628601 東京都新宿区神楽坂一丁目3番地 Tokyo (JP). ギガフォトン株式会社(GIGAPHOTON INC.) [JP/JP]; 〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田400番地 Tochigi (JP).
- (72) 発明者: 渡部 俊太郎(WATANABE, Shuntaro); 〒1628601 東京都新宿区神楽坂一丁目3番地 学校法人東京理科大学内 Tokyo (JP). 中里 智治(NAKAZATO, Tomoharu); 〒1628601 東京都新宿区神楽坂一丁目3番地 学校法人東京理科大学内 Tokyo (JP). 小野瀬 貴士(ONOSE, Takashi); 〒3238558 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 Tochigi (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人つばさ国際特許事務所(TSUBASA PATENT PROFESSIONAL CORPORATION); 〒1600022 東京都新宿区新宿1丁目15番9号さわだビル3階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR),

[続葉有]

(54) Title: TITANIUM-SAPPHIRE LASER APPARATUS, LASER APPARATUS FOR EXPOSURE APPARATUS, AND TITANIUM-SAPPHIRE AMPLIFIER

(54) 発明の名称: チタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置、並びにチタンサファイヤ増幅器

[図6]



- 13... SYNCHRONIZATION CIRCUIT UNIT
43... OPTICAL PATH LENGTH ERROR DETECTOR
45... PID CONTROLLER
50... MO (SEMICONDUCTOR LASER)
53A... FIRST OPTICAL SHUTTER
54... SHIFT AMOUNT ADDER
55... ERROR CONTROL UNIT
57... DELAY CIRCUIT
61... TITANIUM-SAPPHIRE CRYSTAL
70A... FIRST EXCITATION PULSE LASER APPARATUS
AA... TO MULTIPASS AMPLIFICATION UNIT 41

(57) Abstract: This titanium-sapphire laser apparatus may be provided with: a CW oscillation laser device which outputs seed light by performing CW oscillation in a single longitudinal mode; an amplifier-oscillator which includes an optical resonator and a titanium-sapphire crystal disposed on an optical path within the optical resonator, and on which the seed light is incident; a pulse laser apparatus which outputs pulse laser light toward the titanium-sapphire crystal; an error detector which detects an optical path length error between a positive integral multiple of the wavelength of the seed light and an optical path length within the optical resonator; and an optical path length correction unit which changes the optical path length within the optical resonator such that the optical path length error approaches zero at a timing immediately before the pulse laser light is incident on the titanium-sapphire crystal.

(57) 要約: 本開示によるチタンサファイヤレーザ装置は、シングル縦モードでCW発振してシード光を出力するCW発振レーザ装置と、光共振器と、この光共振器内の光路上に配置されたチタンサファイヤ結晶とを含み、シード光が入射する増幅共振器と、チタンサファイヤ結晶に向けてパルスレーザ光を出力するパルスレーザ装置と、シード光の波長の正の整数倍と光共振器内の光路長との光路長誤差を検出する誤差検出器と、パルスレーザ光がチタンサファイヤ結晶に入射する直前のタイミングで光路長誤差が0に近づくように光共振器内の光路長を変化させる光路長補正部とを備えてもよい。



OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, — 補正された請求の範囲 (条約第 19 条(1))
ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：

チタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置、並びにチタンサファイヤ増幅器

技術分野

[0001] 本開示は、チタンサファイヤ結晶を用いたチタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置、並びにチタンサファイヤ増幅器に関する。

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、露光用のガス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並びに、波長193nm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。スペクトル線幅はスペクトル幅とも呼ばれる。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 Narrow Module) が設けられ、この狭帯域化モジュールによりスペクトル幅の狭帯域化が実現されている。なお、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。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開 2 0 1 3 - 1 3 5 0 7 5 号公報

特許文献2：特開 2 0 1 3 - 2 2 2 1 7 3 号公報

特許文献3：米国特許出願公開第 2 0 1 3 / 0 1 6 3 0 7 3 号明細書

特許文献4：米国特許出願公開第 2 0 1 3 / 0 2 7 9 5 2 6 号明細書

概要

[0006] 本開示によるチタンサファイヤレーザ装置は、シングル縦モードでCW発振してシード光を出力するCW発振レーザ装置と、光共振器と、この光共振器内の光路上に配置されたチタンサファイヤ結晶とを含み、シード光が入射する増幅発振器と、チタンサファイヤ結晶に向けてパルスレーザ光を出力するパルスレーザ装置と、シード光の波長の正の整数倍と光共振器内の光路長との光路長誤差を検出する誤差検出器と、パルスレーザ光がチタンサファイヤ結晶に入射する直前のタイミングで光路長誤差が0に近づくように光共振器内の光路長を変化させる光路長補正部とを備えてもよい。

[0007] 本開示による他のチタンサファイヤレーザ装置は、シングル縦モードでCW発振してシード光を出力するCW発振レーザ装置、を含むマスタ増幅発振部と、マスタ増幅発振部から出力されたシード光を往復させる第1のマルチ光路と、この第1のマルチ光路上に設けられた第1のチタンサファイヤ結晶とを含む第1のマルチパス増幅器と、第1のマルチパス増幅器から出力されたシード光を往復させる第2のマルチ光路と、この第2のマルチ光路上に設けられた第2のチタンサファイヤ結晶とを含む第2のマルチパス増幅器とを備えてもよい。第2のマルチパス増幅器におけるシード光の往復回数を、第

1 のマルチパス増幅器におけるシード光の往復回数以下であってもよい。

[0008] 本開示による露光装置用レーザ装置は、シングル縦モードでCW発振してシード光を出力するCW発振レーザ装置と、光共振器と、この光共振器内の光路上に配置されたチタンサファイヤ結晶とを含み、シード光が入射する増幅発振器と、チタンサファイヤ結晶に向けてパルスレーザ光を出力するパルスレーザ装置と、シード光の波長の正の整数倍と光共振器内の光路長との光路長誤差を検出する誤差検出器と、パルスレーザ光がチタンサファイヤ結晶に入射する直前のタイミングで光路長誤差が0に近づくように光共振器内の光路長を変化させる光路長補正部とを備えてもよい。

[0009] 本開示による他の露光装置用レーザ装置は、シングル縦モードでCW発振してシード光を出力するCW発振レーザ装置、を含むマスタ増幅発振部と、マスタ増幅発振部から出力されたシード光を往復させる第1のマルチ光路と、この第1のマルチ光路上に設けられた第1のチタンサファイヤ結晶とを含む第1のマルチパス増幅器と、第1のマルチパス増幅器から出力されたシード光を往復させる第2のマルチ光路と、この第2のマルチ光路上に設けられた第2のチタンサファイヤ結晶とを含む第2のマルチパス増幅器とを備えてもよい。第2のマルチパス増幅器におけるシード光の往復回数を、第1のマルチパス増幅器におけるシード光の往復回数以下であってもよい。

[0010] 本開示によるチタンサファイヤ増幅器は、増幅発振器から出力されたパルス状のシード光を往復させると共に、前記シード光の所定の入射位置における入射ビーム像を偶数回、転写結像させるマルチパス光学システムと、このマルチパス光学システム内のマルチ光路上に設けられ、前記シード光を増幅するチタンサファイヤ結晶とを備えてもよい。

図面の簡単な説明

[0011] 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、比較例に係る露光装置用レーザ装置の一構成例を概略的に示す。

[図2]図2は、比較例に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置の一構成例を概略的に示す。

[図3]図3は、図2に示した狭帯域チタンサファイヤレーザ装置において、光共振器内の光路長誤差を補正しなかった場合の光路長誤差の経時変化の一例を示す。

[図4]図4は、図2に示した狭帯域チタンサファイヤレーザ装置において、光共振器内の光路長誤差を補正した場合の光路長誤差の経時変化の一例を示す。

[図5]図5は、チタンサファイヤ結晶における熱レンズ効果による焦点距離の変化の一例を示す。

[図6]図6は、第1の実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置におけるMOP O部の一構成例を概略的に示す。

[図7]図7は、図6に示した狭帯域チタンサファイヤレーザ装置において、光共振器内の光路長誤差を補正した場合の光路長誤差の経時変化の一例を示す。

[図8]図8は、図6に示した狭帯域チタンサファイヤレーザ装置における光共振器内の光路長の制御の流れの一例を概略的に示すメインのフローチャートである。

[図9]図9は、図8に示したメインのフローチャートにおけるステップS105の処理の詳細を示すサブのフローチャートである。

[図10]図10は、光路長誤差の最小値の計測方法の一例を概略的に示す。

[図11]図11は、第1の実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置におけるマルチパスチタンサファイヤ増幅器の一構成例を概略的に示す。

[図12]図12は、図11に示したマルチパスチタンサファイヤ増幅器におけるマルチパス光学システムの光学的な等価図を模式的に示す。

[図13]図13は、図11に示したマルチパスチタンサファイヤ増幅器の第1の変形例を概略的に示す。

[図14]図14は、図11に示したマルチパスチタンサファイヤ増幅器の第2

の変形例を概略的に示す。

[図15]図15は、第2の実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置におけるMOPPO部の一構成例を概略的に示す。

[図16]図16は、第2の実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置におけるマルチパス増幅部の一構成例を概略的に示す。

[図17]図17は、図16に示したマルチパス増幅部の増幅特性の一例を示す。

[図18]図18は、図16に示したマルチパス増幅部の変形例を概略的に示す。

[図19]図19は、光路長誤差検出器の一構成例を概略的に示す。

[図20]図20は、光シャッタの一構成例を概略的に示す。

[図21]図21は、制御部のハードウェア環境の一例を示す。

実施形態

[0012] <内容>

[1. 概要]

[2. 比較例]

2. 1 露光装置用レーザ装置

2. 1. 1 構成 (図1)

2. 1. 2 動作

2. 2 狭帯域チタンサファイヤレーザ装置

2. 2. 1 構成 (図2)

2. 2. 2 動作

2. 2. 3 課題 (図3～図5)

[3. 第1の実施形態]

3. 1 MOPPO部 (図6～図10)

3. 1. 1 構成

3. 1. 2 動作

3. 1. 3 作用

3. 2 マルチパス増幅部

3. 2. 1 構成 (図 1 1、図 1 2)

3. 2. 2 動作

3. 2. 3 作用

3. 2. 4 変形例

3. 2. 4. 1 第 1 の変形例 (図 1 3)

3. 2. 4. 2 第 2 の変形例 (図 1 4)

[4. 第 2 の実施形態]

4. 1 MOP O 部 (図 1 5)

4. 1. 1 構成

4. 1. 2 作用

4. 2 マルチパス増幅部

4. 2. 1 構成 (図 1 6)

4. 2. 2 動作及び作用 (図 1 7)

4. 2. 3 変形例 (図 1 8)

[5. 光路長誤差検出器の構成例] (図 1 9)

5. 1 構成

5. 2 動作

5. 3 変形例

[6. 光シャッタの構成例] (図 2 0)

6. 1 構成

6. 2 動作

[7. 制御部のハードウェア環境] (図 2 1)

[8. その他]

[0013] 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。

[0014] [1. 概要]

本開示は、例えば、チタンサファイヤ結晶を用いたチタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置に関する。

[0015] [2. 比較例]

まず、本開示の実施形態に対する比較例のチタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置について説明する。

[0016] (2. 1 露光装置用レーザ装置)

(2. 1. 1 構成)

図 1 は、本開示の実施形態に対する比較例の露光装置用レーザ装置の一構成例を概略的に示している。

[0017] 露光装置用レーザ装置は、固体レーザシステム 1 と、増幅器 2 と、同期制御部 3 と、高反射ミラー 9 1, 9 2 とを備えてもよい。

[0018] 固体レーザシステム 1 は、第 1 の固体レーザ装置 1 1 と、第 2 の固体レーザ装置 1 2 と、同期回路部 1 3 と、固体レーザ制御部 1 4 と、波長変換システム 1 5 とを含んでもよい。

[0019] 第 1 の固体レーザ装置 1 1 は、波長 1 3 4 2 n m のパルスレーザ光を出力する N d : Y V O₄パルスレーザ装置で、シングル縦モードで発振するレーザ装置であってもよい。第 2 の固体レーザ装置 1 2 は、波長 9 0 4 n m で発振する狭帯域チタンサファイヤレーザ装置 2 0 と、L B O (L i B₃O₅) 結晶 2 1 と、B B O (β - B a B₂O₄) 結晶 2 2 とを含んでもよい。

[0020] 波長変換システム 1 5 は、高反射ミラー 1 6 と、ビームスプリッタ 1 7 と、C L B O (C s L i B₆O₁₀) 結晶 1 8 とを含んでもよい。

[0021] 固体レーザ制御部 1 4 は、例えば、第 1 の固体レーザ装置 1 1 と第 2 の固体レーザ装置 1 2 とに、図示しない制御信号でデータの送信や立ち上げや停止信号の送信ができるように構成されていてもよい。

[0022] 同期回路部 1 3 は、第 1 の固体レーザ装置 1 1 から出力された第 1 のパル

スレーザ光と、第2の固体レーザ装置12から出力された第2のパルスレーザ光とが波長変換システム15のCLBO結晶18に略同時に入射するように構成されていてもよい。

[0023] 増幅器2は、増幅器制御部30と、充電器31と、トリガ補正器32と、スイッチ33を含むパルスパワーモジュール（PPM）34と、チャンバ35と、部分反射ミラー36と出力結合ミラー37とを含んでいてもよい。

[0024] チャンバ35にはウインドウ39a, 39bが設けられていてもよい。チャンバ35の中には例えばArガスとF₂ガスとNeガスとを含むレーザガスが入っていてもよい。チャンバ35の中には1対の放電電極38が配置されていてもよい。1対の放電電極38は、PPM34の出力端子に接続されていてもよい。

[0025] 増幅器2において、部分反射ミラー36と出力結合ミラー37とを含む光共振器が構成されていてもよい。部分反射ミラー36は例えば、波長193nmの光を透過するCaF₂結晶からなる基板に、反射率が70～90%の部分反射膜がコートされていてもよい。出力結合ミラー37は例えば、波長193nmの光を透過するCaF₂結晶からなる基板に反射率が10～20%の部分反射膜がコートされていてもよい。

[0026] 同期制御部3には、露光装置4の露光装置制御部5から発振トリガTrOが入力されてもよい。同期制御部3は、固体レーザシステム1からの波長193nmのパルスレーザ光が増幅器2の光共振器に注入されるのと同期して1対の放電電極38が放電するように、増幅器制御部30を介してトリガ補正器32に発振トリガを出力するように構成されていてもよい。

[0027] (2. 1. 2 動作)

固体レーザ制御部14は、第1の固体レーザ装置11と第2の固体レーザ装置12とからパルスレーザ光を出力可能となるように、第1の固体レーザ装置11と第2の固体レーザ装置12との運転準備をしてもよい。同期制御部3は、露光装置4の露光装置制御部5から発振トリガTrOを受信すると、固体レーザシステム1の固体レーザ制御部14を介して同期回路部13に

所定のタイミングで発振トリガを出力してもよい。同期制御部3はまた、露光装置4の露光装置制御部5から発振トリガTrOを受信すると、増幅器2の増幅器制御部30を介して、トリガ補正器32に所定のタイミングで発振トリガを出力してもよい。

[0028] 同期回路部13は、第1の固体レーザ装置11と第2の固体レーザ装置12の狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20とにそれぞれ、所定のタイミングで発振トリガを出力してもよい。第1の固体レーザ装置11からは波長1342nmの第1のパルスレーザ光が出力され得る。

[0029] 第2の固体レーザ装置12において、狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20に発振トリガが入力されると、狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20から波長904nmのパルスレーザ光が出力され得る。そして、LBO結晶21とBBO結晶22とによって、波長226nmの第4高調波光である第2のパルスレーザ光が生成され得る。第1の固体レーザ装置11から出力された波長1342nmの第1のパルスレーザ光と、第2の固体レーザ装置12から出力された波長226nmの第2のパルスレーザ光は、波長変換システム15に入射し得る。

[0030] 波長変換システム15では、高反射ミラー16とビームスプリッタ17とによってCLBO結晶18に第1及び第2のパルスレーザ光が略同時に入射し、CLBO結晶18上で第1及び第2のパルスレーザ光が重なり得る。CLBO結晶18では、波長226nmと波長1342nmとの和周波を取り、波長193nmのパルスレーザ光を生成し得る。このパルスレーザ光が高反射ミラー91, 92を介して、増幅器2の部分反射ミラー36に入射し得る。

[0031] このパルスレーザ光はシード光として、出力結合ミラー37と部分反射ミラー36を含む増幅器2の光共振器中に注入され得る。この注入に同期して、増幅器2のチャンバ35内では1対の放電電極38による放電で反転分布を作り得る。ここで、トリガ補正器32は、波長193nmの固体レーザシステム1からのパルスレーザ光が増幅器2で効率よく増幅されるようにPP

M34のスイッチ33のタイミングを調整してもよい。その結果、増幅器2の光共振器によって増幅発振して、出力結合ミラー37から増幅されたパルスレーザ光を出力し得る。

[0032] (2. 2 狭帯域チタンサファイヤレーザ装置)

(2. 2. 1 構成)

図2は、本開示の実施形態に対する比較例の狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20の一構成例を概略的に示している。

[0033] 狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20は、MOP O部（マスタ増幅発振部）40と、第4の高反射ミラー104と、第5の高反射ミラー105と、第2の光アイソレータ44Bと、第6の高反射ミラー106と、マルチパス増幅部41とを備えてもよい。

[0034] MOP O部40は、MO（マスタオシレータ）50と、PO（増幅発振器：パワーオシレータ）60とを含んでもよい。MOP O部40はまた、第1の光アイソレータ44Aと、第1の励起用パルスレーザ装置70Aと、第1の集光レンズ72Aと、光路長補正部42と、光路長誤差検出器43とを含んでもよい。

[0035] MO50は、シングル縦モードでCW（連続波）発振するCW発振レーザ装置であってもよい。MO50は例えば、シングル縦モードでCW発振して波長904nmのシード光51を出力する分布帰還型の半導体レーザであってもよい。MO50とPO60との間の光路上には、戻り光の透過を抑制するための第1の光アイソレータ44Aが配置されていてもよい。

[0036] 第1の励起用パルスレーザ装置70Aは、Nd：YLFパルスレーザ光の第2高調波光である波長523nmの励起用の第1のパルスレーザ光71Aを出力するパルスレーザ装置であってもよい。

[0037] PO60は、光共振器と、この光共振器内の光路上に配置されたチタンサファイヤ結晶61とを含んでもよい。チタンサファイヤ結晶61の両端面はブリュースター角で入射するようにカットされていてもよい。PO60には、シード光51と励起用の第1のパルスレーザ光71Aとが入射してもよい。

。P O 6 0の光共振器は、Z型のリング型光共振器であって、出力結合ミラー62と、第1の高反射ミラー101と、第2の高反射ミラー102と、第3の高反射ミラー103とを含んでもよい。

[0038] 第1の高反射ミラー101は、波長904nmの光を透過する基板に、波長904nmの光を高反射するが一部は透過する膜がコートされた構成であってもよい。光路長誤差検出器43は、第1の高反射ミラー101からのシード光51の漏れ光52が入射するように、漏れ光52の光路上に配置されていてもよい。

[0039] 第2の高反射ミラー102は、励起光となる第1のパルスレーザ光71Aを高透過し、波長904nmのシード光51を高反射するダイクロイックミラーであってもよい。

[0040] 第3の高反射ミラー103は、波長904nmの光を高反射するミラーであってもよい。第3の高反射ミラー103は、 piezo素子を含むpiezo素子付きミラーホルダ46に固定されていてもよい。piezo素子によるミラーの移動方向は、ミラー面の法線方向と略一致していてもよい。

[0041] 第1の励起用パルスレーザ装置70Aと第1の集光レンズ72Aは、励起用の第1のパルスレーザ光71Aが第1の高反射ミラー101を介してチタンサファイヤ結晶61に集光するように配置されていてもよい。

[0042] 光路長補正部42は、piezo素子付きミラーホルダ46及び第3の高反射ミラー103と、PID (Proportional Integral Derivative) 制御器45とを含んでもよい。

[0043] PID制御器45は、第3の高反射ミラー103の位置を制御する構成となってもよい。光路長誤差検出器43の出力信号を、PID制御器45に入力してもよい。

[0044] P O 6 0で増幅されたシード光51は、出力結合ミラー62を介して出力されてもよい。第4の高反射ミラー104、第5の高反射ミラー105、第2の光アイソレータ44B、及び第6の高反射ミラー106を介して、増幅されたシード光51がマルチパス増幅部41に入力するように、それらの光

学素子が配置されていてもよい。第2の光アイソレータ44Bは、戻り光の透過を抑制するために配置されていてもよい。

[0045] マルチパス増幅部41は、第2の励起用パルスレーザ装置70Bと、第3の励起用パルスレーザ装置70Cと、第2の集光レンズ72Bと、第3の集光レンズ72Cとを含んでいてもよい。マルチパス増幅部41はまた、第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aと、第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bと、第7ないし第10の高反射ミラー107～110とを含んでいてもよい。

[0046] 第2の励起用パルスレーザ装置70Bは、Nd:YLFパルスレーザ光の第2高調波光である波長523nmの励起用の第2のパルスレーザ光71Bを出力するパルスレーザ装置であってもよい。第3の励起用パルスレーザ装置70Cは、Nd:YLFパルスレーザ光の第2高調波光である波長523nmの励起用の第3のパルスレーザ光71Cを出力するパルスレーザ装置であってもよい。

[0047] 第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aは、後述する図11に示す実施形態のように、第1の他のチタンサファイヤ結晶74Aを含んでいてもよい。第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bは、後述する図11に示す実施形態のように、第2の他のチタンサファイヤ結晶74Bを含んでいてもよい。

[0048] 第1、第2及び第3の励起用パルスレーザ装置70A、70B、70Cは、同期回路部13から発振トリガ入力されるように構成されていてもよい。

[0049] (2. 2. 2 動作)

MO50は、半導体レーザをシングル縦モードでCW発振させて、シード光51を出力してもよい。シード光51は、第1の光アイソレータ44Aを介して、出力結合ミラー62からPO60の光共振器に入力され得る。シード光51がPO60の光共振器の光路上を周回することによって、第1の高反射ミラー101からシード光51の漏れ光52が出力され得る。

[0050] この漏れ光52が光路長誤差検出器43に入力され、光路長誤差検出器4

3から光路長誤差信号が出力され得る。光路長誤差信号は、シード光51の波長の正の整数倍 L_0 と実際の光共振器内の光路長 L との光路長誤差 ΔL ($=L-L_0$)を示す信号であってもよい。光路長誤差検出器43は、光路長誤差信号として、例えば、電圧 V であって、 $V=K \cdot \Delta L$ を出力してもよい。Kは比例定数であってもよい。また、光路長とは、屈折率も考慮した光学的距離であってもよい。

[0051] PID制御部45は、光路長誤差 ΔL を示す電圧 V を受信して、 $V=0$ すなわち $\Delta L=0$ に近づくように第3の高反射ミラー103の位置をPID制御してもよい。

[0052] 次に、同期回路部13から第1の励起用パルスレーザ装置70Aに発振トリガが入力されると、励起用の第1のパルスレーザ光71Aが出力され、P060のチタンサファイヤ結晶61をパルス状に励起し得る。チタンサファイヤ結晶61には、すでに、シード光51が注入されているので、シード光51がパルス状に増幅され得る。その結果、この光共振器でレーザ発振して、パルス状に増幅されたシード光51が出力結合ミラー62から出力され得る。

[0053] このパルス状に増幅されたシード光51は、第4の高反射ミラー104と、第5の高反射ミラー105と、第2の光アイソレータ44Bと、第6の高反射ミラー106とを經由してマルチパス増幅部41に入射し得る。

[0054] 第7の高反射ミラー107を介して、第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aにおいて、後述する図11に示す第1の他のチタンサファイヤ結晶74Aに、パルス状に増幅された波長904nmのシード光51が入射し得る。このシード光51の入射タイミングに同期して、第2の励起用パルスレーザ装置70Bから励起光として第2のパルスレーザ光71Bが、後述する第1の他のチタンサファイヤ結晶74Aに入射することによってシード光51がパルス状に励起され得る。第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aでは、波長904nmのパルスレーザ光が後述する第1の他のチタンサファイヤ結晶74Aをマルチパスすることによって、シード光51が複

数回に亘って増幅され得る。

[0055] 第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aでパルス状に増幅されたシード光51は、第8の高反射ミラー108と第9の高反射ミラー109とを經由して第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bに入力し得る。第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bにおいて、後述する図11に示す第2の他のチタンサファイヤ結晶74Bに、パルス状に増幅された波長904 nmのシード光51が入射し得る。このシード光51の入射タイミングに同期して、第3の励起用パルスレーザ装置71Cから励起光として第3のパルスレーザ光71Cが、後述する第2の他のチタンサファイヤ結晶74Bに入射することによってシード光51がパルス状に励起され得る。第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bでは、波長904 nmのパルスレーザ光が後述する第2の他のチタンサファイヤ結晶74Bをマルチパスすることによって、シード光51が複数回に亘って増幅され得る。

[0056] 第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bで増幅されたシード光51は、第10の高反射ミラー110を介してLBO結晶21に入射し得る。

[0057] (2. 2. 3 課題)

(PO60の光共振器内の光路長の制御の課題)

図3は、図2に示した狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20において、PO60の光共振器内の光路長誤差 ΔL を補正しなかった場合の光路長誤差 ΔL の経時変化の一例を示す。図3にはPO60での励起開始直後からの経時変化を示す。図3の横軸は時間、縦軸は光路長誤差 ΔL を示す。

[0058] 励起開始前の状態では、チタンサファイヤ結晶61の温度の変化が少ないために、光路長誤差 ΔL ($=L-L_0$) は0に近づいている。しかしながら、6 kHzで励起を開始すると、光路長誤差 ΔL は、次第に+側に ΔL_c 分ドリフトして変化し、励起パルス毎に最大値 L_{max} と最小値 L_{min} との値を交互に繰り返し得る。

[0059] 図4は、図2に示した狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20において、PO60の光共振器内の光路長誤差 ΔL を補正した場合の光路長誤差 ΔL の

経時変化の一例を示す。図4にはP O 6 0での励起開始直後からの経時変化を示す。図4の横軸は時間、縦軸は光路長誤差 ΔL を示す。

[0060] 光路長補正部42のP I D制御部45は、制御の発散を抑制するために、誤差信号の積分値が0に近づくように制御し得る。このため、 ΔL_c 成分を0に近づける制御はでき得るが、励起パルス毎の変動 $\Delta \Delta L (= \Delta L_{max} - \Delta L_{min})$ を抑制することは困難であり得た。その理由としては、光路長の変化の速度が光路長補正部42の応答速度に追従できない場合があることが挙げられる。その結果、チタンサファイヤ結晶61に励起用の第1のパルスレーザ光71Aが入力する毎に光共振器内の光路長がチタンサファイヤ結晶61の温度変化によって、屈折率が変化するため、シード光51の波長の正の整数倍の光路長に合わせるのが困難となり得る。その結果、出力結合ミラー62から出力されるパルス状に増幅されたシード光51の出力タイミングやパルス波形が不安定となり得た。

[0061] (マルチパス増幅部41の課題)

第1及び第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73A, 73Bにおいて、波長904nmでは、後述する図11に示すチタンサファイヤ結晶74A, 74Bの利得は小さいので、利得を増やすために励起光を集光する必要がある。この条件で高出力化しようとする、後述するチタンサファイヤ結晶74A, 74Bでは温度分布によって、屈折率分布が発生し、この屈折率分布から熱レンズとしての機能を果たし得る。チタンサファイヤ結晶74A, 74Bに入射する励起光の出力が大きくなればなるほど、熱レンズ効果による焦点距離が短くなり得る。

[0062] 図5は、チタンサファイヤ結晶における熱レンズ効果による焦点距離の一例を示す。図5において横軸は励起光の入力(W)、縦軸は熱レンズ効果による焦点距離(mm)を示す。

[0063] 後述するチタンサファイヤ結晶74A, 74Bの利得を増やすためには、高出力の励起光をチタンサファイヤ結晶74A, 74Bに小さく集光する必要がある。例えば、集光径を100 μm ~200 μm にする必要がある。

得る。この場合、チタンサファイヤ結晶 74 A, 74 B で生成する熱レンズ効果による熱レンズの焦点距離が短くなり得る。図 5 に示したように、励起光の入力が高くなると熱レンズ効果による焦点距離が短くなり得る。

[0064] この熱レンズ効果による熱レンズの焦点距離が約 10 mm 以下になると、チタンサファイヤ結晶 74 A, 74 B をマルチパスさせるための光学システムの光学素子の位置を調整しても増幅後のビーム特性の悪化が抑制できなくなり得た。特に、第 1 及び第 2 のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 A, 73 B においてシード光 51 をマルチパスさせる回数が増えると、この熱レンズ効果によって、ビーム特性の悪化が顕著になり得た。

[0065] [3. 第 1 の実施形態]

次に、本開示の第 1 の実施形態に係るチタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置について説明する。なお、以下では上記図 1 及び図 2 に示した比較例のチタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置の構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

本実施形態における露光装置用レーザ装置の基本構成は、図 1 に示した露光装置用レーザ装置と略同様であってもよい。

[0066] (3. 1 MOP O 部)

(3. 1. 1 構成)

図 6 は、本開示の第 1 の実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置 20 の要部構成として、MOP O 部 40 A の一構成例を概略的に示している。

[0067] 本実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置 20 は、図 2 に示した比較例の構成における MOP O 部 40 に代えて、第 1 の光シャッタ 53 A とシフト量加算器 54 とを含む MOP O 部 40 A を備えてもよい。本実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置 20 はまた、図 2 に示した比較例の構成に加えて、インバータ 56 と、遅延回路 57 と、誤差制御部 55 とをさらに備えてもよい。

[0068] 第1の光シャッタ53Aは、第1の高反射ミラー101と光路長誤差検出器43との間の漏れ光52の光路上に配置されていてもよい。第1の光シャッタ53Aは、第1のパルスレーザ光71Aがチタンサファイヤ結晶61に入射している期間では閉じ、チタンサファイヤ結晶61に入射していない期間では開けるようなシャッタ制御がなされてもよい。

[0069] シフト量加算器54は、光路長誤差検出器43とPID制御器45との間の信号ライン上に配置されていてもよい。

[0070] 誤差制御部55は、光路長誤差検出器43から出力された光路長誤差信号に基づいて、シフト量加算器54に補正值V o f f s e tのデータを送信してもよい。

[0071] 遅延回路57は、同期回路部13の発振トリガを受信して、所定の遅延時間後にインバータ56を介して、第1の光シャッタ53Aの開閉を制御する信号を出力してもよい。遅延回路57には、誤差制御部55から遅延時間を設定する遅延データT dが入力されてもよい。

[0072] 光路長補正部42は、励起用の第1のパルスレーザ光71Aがチタンサファイヤ結晶61に入射する直前のタイミングで光路長誤差 ΔL が0に近づくようにPO60の光共振器内の光路長を変化させてもよい。

[0073] (3. 1. 2 動作)

誤差制御部55は、遅延回路57に遅延時間を設定する遅延データT dを送信して、第1の光シャッタ53Aの開閉タイミングを、同期回路部13からの発振トリガに対して、遅延させてもよい。誤差制御部55は、励起用の第1のパルスレーザ光71Aに同期して、パルス状に増幅されたシード光51の漏れ光52が光路長誤差検出器43に検出されないように、光シャッタ53Aを制御してもよい。この場合、誤差制御部55は、第1のパルスレーザ光71Aがチタンサファイヤ結晶61に入射している期間では第1の光シャッタ53Aを閉じるように遅延回路57を制御してもよい。誤差制御部55はまた、第1のパルスレーザ光71Aがチタンサファイヤ結晶61に入射していない期間では第1の光シャッタ53Aを開けるように遅延回路57を

制御してもよい。このように、光シャッタ53Aは、パルス状に増幅されたシード光51が入射している期間では閉じ、パルス状に増幅されたシード光51が入射していない期間では開ける制御がなされてもよい。

[0074] 誤差制御部55は、光路長誤差検出器43から光路長誤差 ΔL の経時変化のデータを読み込み、光路長誤差 ΔL の最少値 ΔL_{min} が0に近づくように、シフト量加算器54に、補正值 $Voffset$ のデータを送信してもよい。これにより、光路長誤差信号である光路長誤差検出器43からの電圧 V に対して、シフト量加算器54からの補正值 $Voffset$ が加算された電圧値がPID制御器45に入力され得る。これらの制御を繰り返すことによって、光路長誤差 ΔL の最少値 ΔL_{min} が0に近づき得る。

[0075] 図7は、図6に示したMOPPO部40Aにおいて、PO60の光共振器内の光路長誤差 ΔL を補正した場合の光路長誤差 ΔL の経時変化の一例を示す。本実施形態では、図7に示したように、PO60の光共振器において、光路長誤差 ΔL の最少値 ΔL_{min} が0に近づいた状態で、シード光51がパルス状に増幅され得る。

[0076] 図8は、図6に示した狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20における光共振器内の光路長の制御の流れの一例を概略的に示している。

[0077] 誤差制御部55は、遅延データ T_d を初期遅延データ $T_d = T_{d0}$ にセットしてもよい（ステップS101）。次に、その遅延データ T_d を遅延回路57に送信してもよい（ステップS102）。そして、誤差制御部55は、光路長誤差検出器43にシード光51の増幅光が入射しないように第1の光シャッタ53Aによって増幅光がカットされたか否かを判断してもよい（ステップS103）。誤差制御部55は、増幅光がカットされていないと判断した場合（ステップS103；N）には、次に、遅延時間の再設定を行い（ステップS104）、ステップS102の処理に戻ってもよい。なお、遅延時間の再設定は、 $T_d = T_d + \Delta T_d$ であってもよい。すなわち、再設定前の遅延データ T_d に所定の時間 ΔT_d を加算した値であってもよい。

[0078] 一方、増幅光がカットされたと判断した場合（ステップS103；Y）に

は、次に、誤差制御部55は、光路長誤差 ΔL の最少値 ΔL_{min} を計測してもよい（ステップS105）。次に、誤差制御部55は、光路長誤差 ΔL の最少値 ΔL_{min} が0に近づくようにシフト量加算器54に補正值 V_{offset} のデータを送信してもよい（ステップS106）。次に、誤差制御部55は、光路長の制御を中止するか否か判断してもよい（ステップS107）。誤差制御部55は、光路長の制御を中止しない場合（ステップS107；N）には、ステップS105の処理に戻ってもよい。誤差制御部55は、光路長の制御を中止する場合（ステップS107；Y）には、処理を終了してもよい。

[0079] 図9は、ステップS105の処理の詳細を示すサブのフローチャートである。

誤差制御部55は、図示しないタイマの時間Tをリセットしてスタートさせてもよい（ステップS111）。次に、誤差制御部55は、光路長誤差検出器43から出力された光路長誤差 ΔL のデータを読み込んでもよい（ステップS112）。次に、誤差制御部55は、時間Tのデータと光路長誤差 ΔL のデータとを記憶してもよい（ステップS113）。次に、誤差制御部55は、 $T \geq K$ 、すなわち時間Tが所定の時間K以上であるか否か判断してもよい（ステップS114）。誤差制御部55は、時間Tが所定の時間K以上ではないと判断した場合（ステップS114；N）には、ステップS112の処理に戻ってもよい。一方、時間Tが所定の時間K以上であると判断した場合（ステップS114；Y）には、誤差制御部55は、次に、記憶したデータを読み出し、複数の最少値 ΔL_{min} のデータを抽出して平均化値 $\Delta L_{min_{av}}$ を計算してもよい（ステップS115）。

[0080] ここで、図10に、光路長誤差 ΔL の最少値 ΔL_{min} の計測方法の一例を概略的に示す。図10において、横軸は時間、縦軸は光路長誤差 ΔL であってもよい。図10に示したように、例えば、所定の時間K内において、光路長誤差 ΔL の最少値 ΔL_{min} のデータとして、 $\Delta L_{min}(1)$ 、 $\Delta L_{min}(2)$ 、 $\Delta L_{min}(3)$ 、 $\Delta L_{min}(4)$ が検出されてもよい。

この場合、誤差制御部55は、最少値 ΔL_{min} の平均化値 ΔL_{minav} を、以下のように計算してもよい。

$$\Delta L_{minav} = \{\Delta L_{min}(1) + \Delta L_{min}(2) + \Delta L_{min}(3) + \Delta L_{min}(4)\} / 4$$

[0081] 次に、誤差制御部55は、求められた平均化値 ΔL_{minav} を光路長誤差 ΔL の最少値 ΔL_{min} とし（ステップS116）、図8のメインのフローに戻ってもよい。

[0082] (3. 1. 3 作用)

本実施形態のMOP O部40Aによれば、PO60の光共振器においてシード光51がパルス状に増幅される直前では、光路長誤差 ΔL の最少値 ΔL_{min} が0に近づくように制御されているため、シード光51のパルス増幅の効率が高くなり得る。また、パルス状に増幅されたシード光51の出力タイミングやパルス波形が安定化され得る。

[0083] (3. 2 マルチパス増幅部)

(3. 2. 1 構成)

図11は、本開示の第1の実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20の要部構成として、マルチパス増幅部41内のマルチパスチタンサファイヤ増幅器の一構成例を概略的に示している。図12は、図11に示したマルチパスチタンサファイヤ増幅器におけるマルチパス光学システムの光学的に等価な図を模式的に示している。

[0084] 図11には、第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aと第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bとの構成をまとめて示す。

[0085] 第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aは、第1のマルチパス光学システムとして、マルチパス光学システム80を含んでもよい。第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bは、第2のマルチパス光学システムとして、マルチパス光学システム80を含んでもよい。マルチパス光学システム80は、入力ミラー81と、出力ミラー82とを含んでもよい。マルチパス光学システム80はまた、集光レンズ84と、ダイクロイックミラー8

5と、ダイクロイックミラー86と、集光レンズ87と、折り返しミラー88A、88Bとを含んでもよい。

[0086] 第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aは、マルチパス光学システム80によって形成される第1のマルチ光路75Aと、この第1のマルチ光路75A上に設けられた第1の他のチタンサファイヤ結晶74Aとを含んでもよい。第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aには、P060で増幅されたシード光51が、第4の高反射ミラー104等を経由し、入力ミラー81を介して入力されてもよい。

[0087] 第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bは、マルチパス光学システム80によって形成される第2のマルチ光路75Bと、この第2のマルチ光路75B上に設けられた第2の他のチタンサファイヤ結晶74Bとを含んでもよい。第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bには、第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aで増幅されたシード光51が、第8の高反射ミラー108と第9の高反射ミラー109とを経由し、入力ミラー81を介して入力されてもよい。

[0088] 第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aにおいて、第2の集光レンズ72Bは、ダイクロイックミラー86を介して第2のパルスレーザ光71Bが第1の他のチタンサファイヤ結晶74Aに集光するように配置されてもよい。第2のパルスレーザ光71Bは、第2の励起用パルスレーザ装置70Bから出力された増幅用の励起光であってもよい。第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aにおいて、ダイクロイックミラー85とダイクロイックミラー86は、シード光51が第1の他のチタンサファイヤ結晶74Aを往復して通過するように配置されていてもよい。第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aにおいて、出力ミラー82は、第1の他のチタンサファイヤ結晶74Aを往復して通過した後のシード光51が第8の高反射ミラー108に向けて出力されるように配置されていてもよい。

[0089] 第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bにおいて、第3の集光レンズ72Cは、ダイクロイックミラー86を介して第3のパルスレーザ光7

1 Cが第2の他のチタンサファイヤ結晶7 4 Bに集光するように配置されてもよい。第3のパルスレーザ光7 1 Cは、第3の励起用パルスレーザ装置7 0 Cから出力された増幅用の励起光であってもよい。第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器7 3 Bにおいて、ダイクロイックミラー8 5とダイクロイックミラー8 6は、シード光5 1が第2の他のチタンサファイヤ結晶7 4 Bを往復して通過するように配置されていてもよい。第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器7 3 Bにおいて、出力ミラー8 2は、第2の他のチタンサファイヤ結晶7 4 Bを往復して通過した後のシード光5 1が第1 0の高反射ミラー1 1 0に向けて出力されるように配置されていてもよい。

[0090] 集光レンズ8 4の焦点距離 f 1と集光レンズ8 7の焦点距離 f 2は、略同じ所定の焦点距離 f であってもよい。図1 2に示したように、集光レンズ8 4と集光レンズ8 7は、略同じ所定の焦点距離 f であって、両レンズ間の光路長が所定の焦点距離 f の略2倍となるように配置されていてもよい。第1及び第2の他のチタンサファイヤ結晶7 4 A, 7 4 Bはそれぞれ、集光レンズ8 4と集光レンズ8 7との略中間点の光路上に配置されていてもよい。

[0091] ダイクロイックミラー8 5は、集光レンズ8 4と第1又は第2の他のチタンサファイヤ結晶7 4 A, 7 4 Bとの間の光路上であって、略4 5度でシード光5 1が反射されるように配置されていてもよい。ダイクロイックミラー8 5の表面には、励起光を高透過し、シード光5 1を高反射する膜がコートされていてもよい。

[0092] ダイクロイックミラー8 6は、集光レンズ8 7と第1又は第2の他のチタンサファイヤ結晶7 4 A, 7 4 Bとの間の光路上であって、略4 5度でシード光5 1が反射されるように配置されていてもよい。ダイクロイックミラー8 6の表面には、励起光を高透過し、シード光5 1を高反射する膜がコートされていてもよい。

[0093] 入力ミラー8 1は、シード光5 1が集光レンズ8 4の略中心を通過するように配置されていてもよい。折り返しミラー8 8 A, 8 8 Bは、一對の折り返しミラーを構成し、集光レンズ8 7を介して入射したシード光5 1を集光

レンズ 87 へと折り返すように配置されていてもよい。集光レンズ 87 から折り返しミラー 88A, 88B を経て再度、集光レンズ 87 に至るまでの光路の光路長が所定の焦点距離 f の略 2 倍となるように、折り返しミラー 88A, 88B が配置されていてもよい。

[0094] (3. 2. 2 動作)

マルチパス光学システム 80 に入力されたシード光 51 は、入力ミラー 81 によって反射され、集光レンズ 84 の前側焦点位置を通過して集光レンズ 84 の略中央に入射し得る。図 12 に示したように、シード光 51 の入射ビーム像 $Im0$ が形成される入射ビーム位置 $P0$ は、集光レンズ 84 の前側焦点位置と略同一であってもよい。そして、このシード光 51 は、ダイクロイックミラー 85 を介して、第 1 又は第 2 の他のチタンサファイヤ結晶 74A, 74B を通過することによって増幅され得る。

[0095] この増幅されたシード光 51 は、ダイクロイックミラー 86 と集光レンズ 87 とを介して、所定の入射位置である折り返しミラー 88A によって反射され、第 1 の転写位置 $P1$ を通過して、折り返しミラー 88B によって反射され、再び集光レンズ 87 に入射し得る。第 1 の転写位置 $P1$ には、図 12 に示したように、入射ビーム像 $Im0$ の第 1 の転写像 $Im1$ が転写結像されてもよい。そして、このシード光 51 は、ダイクロイックミラー 86 を介して、再び第 1 又は第 2 の他のチタンサファイヤ結晶 74A, 74B を通過することによって、さらに増幅され得る。この増幅されたシード光 51 は、ダイクロイックミラー 85 と集光レンズ 84 とを介して、出力ミラー 82 によって反射され、第 2 の転写位置 $P2$ を通過して、出力され得る。第 2 の転写位置 $P2$ には、図 12 に示したように、入射ビーム像 $Im0$ の第 2 の転写像 $Im2$ が転写結像されてもよい。

[0096] 以上のように、マルチパス光学システム 80 では、第 1 又は第 2 の他のチタンサファイヤ結晶 74A, 74B にシード光 51 を往復して通過させ得る。この際、入射ビーム像 $Im0$ の第 1 の転写像 $Im1$ を第 1 の転写位置 $P1$ に転写結像させ得る。さらに、入射ビーム像 $Im0$ の第 2 の転写像 $Im2$ を

第2の転写位置P2に転写結像させ得る。

[0097] ここで、第1の転写像Im1と第2の転写像Im2とのビームプロファイルを比較すると、第1の転写像Im1のビームプロファイルは悪化し、第2の転写像Im2のビームプロファイルの悪化は抑制され得る。

[0098] (3. 2. 3 作用)

以上のように本実施形態のマルチパス増幅部41によれば、マルチパス光学システム80によって、入射ビーム像Im0を偶数回、転写結像させながら、シード光51を第1又は第2の他のチタンサファイヤ結晶74A, 74Bで往復させて増幅させ得る。これにより、熱レンズ効果による増幅光のビームの歪みが抑制され得る。

[0099] (3. 2. 4 変形例)

上記説明では、集光レンズ84の焦点距離 f_1 と集光レンズ87の焦点距離 f_2 とが略同じ所定の焦点距離 f の場合の実施形態を示したが、この例に限定されることなく、焦点距離 f_1 , f_2 が互いに異なってもよい。この場合であっても、入射ビーム像Im0を複数回、転写結像させながら複数回往復させるマルチパス光学システムを構成すればよい。集光レンズ84の焦点距離 f_1 と集光レンズ87の焦点距離 f_2 とが互いに異なる場合は、例えば図12に示すように、集光レンズ84と集光レンズ87は、集光レンズ84の後側焦点位置と、集光レンズ87の前側焦点位置とが略一致するように配置されてもよい。ここで、集光レンズ84と集光レンズ87との間の光路長は略両集光レンズの焦点距離の和($f_1 + f_2$)となり得る。また、集光レンズ87から折り返しミラー88A, 88Bを経て再度、集光レンズ87に至るまでの光路の光路長が集光レンズ87の焦点距離 f_2 の略2倍となるように、折り返しミラー88A, 88Bが配置されていてもよい。

[0100] また、第1及び第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73A, 73Bにおいて、シード光51の往復数は図11に示した1往復に限定されることなく、入射ビーム像Im0を複数回、転写結像させながら複数回往復させるマルチパス光学システムであってもよい。また、第1のマルチパスチタンサ

ファイヤ増幅器 73 A と第 2 のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 B とで、シード光 51 の往復数を互いに異ならせた構成であってもよい。また、第 2 のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 B におけるシード光 51 の往復回数は、第 1 のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 A におけるシード光 51 の往復回数以下であってもよい。

[0101] 以下、上記実施形態の変形例として、シード光 51 を 3 往復させる例を示す。なお、以下の変形例では上記図 11 及び図 12 に示したマルチパス光学システム 80 の構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0102] (3. 2. 4. 1 第 1 の変形例)

図 13 は、図 11 に示したマルチパスチタンサファイヤ増幅器の第 1 の変形例を示している。図 13 には、第 1 のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 A と第 2 のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 B との構成をまとめて示す。

[0103] (構成)

第 1 のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 A は、第 1 のマルチパス光学システムとして、上記図 11 及び図 12 に示したマルチパス光学システム 80 に代えて、マルチパス光学システム 80 A を含んでもよい。第 2 のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 B は、第 2 のマルチパス光学システムとして、上記図 11 及び図 12 に示したマルチパス光学システム 80 に代えて、マルチパス光学システム 80 A を含んでもよい。

[0104] マルチパス光学システム 80 A は、折り返しミラー 83 A, 83 B と、折り返しミラー 83 C, 83 D と、折り返しミラー 88 A, 88 B と、折り返しミラー 88 C, 88 D と、折り返しミラー 88 E, 88 F とを含んでもよい。

[0105] 折り返しミラー 88 A, 88 B は、一对の折り返しミラーを構成し、集光レンズ 87 を介して入射したシード光 51 を集光レンズ 87 へと折り返すように配置されていてもよい。集光レンズ 87 から折り返しミラー 88 A, 8

８Ｂを経て再度、集光レンズ８７に至るまでの光路の光路長が所定の焦点距離 f の略２倍となるように、折り返しミラー８８Ａ，８８Ｂが配置されていてもよい。

[0106] 折り返しミラー８３Ａ，８３Ｂは、一对の折り返しミラーを構成し、集光レンズ８４を介して入射したシード光５１を集光レンズ８４へと折り返すように配置されていてもよい。集光レンズ８４から折り返しミラー８３Ａ，８３Ｂを経て再度、集光レンズ８４に至るまでの光路の光路長が所定の焦点距離 f の略２倍となるように、折り返しミラー８３Ａ，８３Ｂが配置されていてもよい。

[0107] 折り返しミラー８８Ｃ，８８Ｄは、一对の折り返しミラーを構成し、集光レンズ８７を介して入射したシード光５１を集光レンズ８７へと折り返すように配置されていてもよい。集光レンズ８７から折り返しミラー８８Ｃ，８８Ｄを経て再度、集光レンズ８７に至るまでの光路の光路長が所定の焦点距離 f の略２倍となるように、折り返しミラー８８Ｃ，８８Ｄが配置されていてもよい。

[0108] 折り返しミラー８３Ｃ，８３Ｄは、一对の折り返しミラーを構成し、集光レンズ８４を介して入射したシード光５１を集光レンズ８４へと折り返すように配置されていてもよい。集光レンズ８４から折り返しミラー８３Ｃ，８３Ｄを経て再度、集光レンズ８４に至るまでの光路の光路長が所定の焦点距離 f の略２倍となるように、折り返しミラー８３Ｃ，８３Ｄが配置されていてもよい。

[0109] 折り返しミラー８８Ｅ，８８Ｆは、一对の折り返しミラーを構成し、集光レンズ８７を介して入射したシード光５１を集光レンズ８７へと折り返すように配置されていてもよい。集光レンズ８７から折り返しミラー８８Ｅ，８８Ｆを経て再度、集光レンズ８７に至るまでの光路の光路長が所定の焦点距離 f の略２倍となるように、折り返しミラー８８Ｅ，８８Ｆが配置されていてもよい。

[0110] （動作）

マルチパス光学システム 80A に入力されたシード光 51 は、入力ミラー 81 によって反射され、所定の入射位置である集光レンズ 84 の前側焦点位置を通過して集光レンズ 84 の略中央に入射し得る。ここで、図 12 の実施形態と同様に、シード光 51 の入射ビーム像 $Im0$ が形成される入射ビーム位置 $P0$ は、集光レンズ 84 の前側焦点位置と略同一であってもよい。そして、このシード光 51 は、ダイクロイックミラー 85 を介して、第 1 又は第 2 の他のチタンサファイヤ結晶 74A, 74B を通過することによって増幅され得る。

[0111] この増幅されたシード光 51 は、ダイクロイックミラー 86 と集光レンズ 87 とを介して、折り返しミラー 88A によって反射され、第 1 の転写位置 $P1$ を通過して、折り返しミラー 88B によって反射され、再び集光レンズ 87 に入射し得る。第 1 の転写位置 $P1$ には、入射ビーム像 $Im0$ の第 1 の転写像 $Im1$ が転写結像されてもよい。そして、このシード光 51 は、ダイクロイックミラー 86 を介して、再び第 1 又は第 2 の他のチタンサファイヤ結晶 74A, 74B を通過することによって、さらに増幅され得る。

[0112] この増幅されたシード光 51 は、ダイクロイックミラー 85 と集光レンズ 84 とを介して、折り返しミラー 83A によって反射され、第 2 の転写位置 $P2$ を通過して、折り返しミラー 83B によって反射され、再び集光レンズ 84 に入射し得る。第 2 の転写位置 $P2$ には、入射ビーム像 $Im0$ の第 2 の転写像 $Im2$ が転写結像されてもよい。そして、このシード光 51 は、ダイクロイックミラー 85 を介して、再び第 1 又は第 2 の他のチタンサファイヤ結晶 74A, 74B を通過することによって、さらに増幅され得る。

[0113] この増幅されたシード光 51 は、ダイクロイックミラー 86 と集光レンズ 87 とを介して、折り返しミラー 88C によって反射され、第 3 の転写位置 $P3$ を通過して、折り返しミラー 88D によって反射され、再び集光レンズ 87 に入射し得る。第 3 の転写位置 $P3$ には、入射ビーム像 $Im0$ の第 3 の転写像 $Im3$ が転写結像されてもよい。そして、このシード光 51 は、ダイクロイックミラー 86 を介して、再び第 1 又は第 2 の他のチタンサファイヤ

結晶 7 4 A, 7 4 B を通過することによって、さらに増幅され得る。

[0114] この増幅されたシード光 5 1 は、ダイクロイックミラー 8 5 と集光レンズ 8 4 とを介して、折り返しミラー 8 3 C によって反射され、第 4 の転写位置 P 4 を通過して、折り返しミラー 8 3 D によって反射され、再び集光レンズ 8 4 に入射し得る。第 4 の転写位置 P 4 には、入射ビーム像 $Im0$ の第 4 の転写像 $Im4$ が転写結像されてもよい。そして、このシード光 5 1 は、ダイクロイックミラー 8 5 を介して、再び第 1 又は第 2 の他のチタンサファイヤ結晶 7 4 A, 7 4 B を通過することによって、さらに増幅され得る。

[0115] この増幅されたシード光 5 1 は、ダイクロイックミラー 8 6 と集光レンズ 8 7 とを介して、折り返しミラー 8 8 E によって反射され、第 5 の転写位置 P 5 を通過して、折り返しミラー 8 8 F によって反射され、再び集光レンズ 8 7 に入射し得る。第 5 の転写位置 P 5 には、入射ビーム像 $Im0$ の第 5 の転写像 $Im5$ が転写結像されてもよい。そして、このシード光 5 1 は、ダイクロイックミラー 8 6 を介して、再び第 1 又は第 2 の他のチタンサファイヤ結晶 7 4 A, 7 4 B を通過することによって、さらに増幅され得る。

[0116] この増幅されたシード光 5 1 は、ダイクロイックミラー 8 5 と集光レンズ 8 4 とを介して、出力ミラー 8 2 によって反射され、第 6 の転写位置 P 6 を通過して、出力され得る。第 6 の転写位置 P 6 には、入射ビーム像 $Im0$ の第 6 の転写像 $Im6$ が転写結像されてもよい。

[0117] 以上のように、マルチパス光学システム 8 0 A では、第 1 又は第 2 の他のチタンサファイヤ結晶 7 4 A, 7 4 B にシード光 5 1 を往復して通過させ得る。この際、入射ビーム像 $Im0$ を合計 6 回、第 1 ～第 6 の転写像として転写結像させ得る。ここで、第 1 ～第 6 の転写像のうち、第 1、第 3、及び第 5 の転写像のビームプロファイルは悪化し、第 2、第 4、及び第 6 の転写像のビームプロファイルの悪化は抑制され得る。

[0118] (作用)

以上のように、マルチパス光学システム 8 0 A によって、入射ビーム像 $Im0$ を偶数回、転写結像させながら、シード光 5 1 を第 1 又は第 2 の他のチ

タンサファイヤ結晶 74 A, 74 B で往復させて増幅させ得る。これにより、熱レンズ効果による増幅光のビームの歪みが抑制され得る。

[0119] (3. 2. 4. 2 第2の変形例)

図 14 は、図 11 に示したマルチパスチタンサファイヤ増幅器の第2の変形例を示している。図 14 には、第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 A と第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 B との構成をまとめて示す。

[0120] 第1及び第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 A, 73 B はそれぞれ、上記図 13 に示したマルチパス光学システム 80 A に代えて、マルチパス光学システム 80 B を含んでもよい。マルチパス光学システム 80 B は、分散プリズム 89 A, 89 B を含んでもよい。

[0121] 波長 904 nm の波長域では、利得が小さいために、ASE (Amplified Spontaneous Emission: 自然放射増幅光) が発生しやすい。ASE 抑制のために、図 14 に示したように、第1及び第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器 73 A, 73 B のそれぞれにおいて、光路中に分散プリズム 89 A, 89 B を挿入してもよい。また、分散プリズム 89 A, 89 B のうち、いずれか1つだけを挿入してもよい。分散プリズム 89 A は、折り返しミラー 83 A, 83 C と集光レンズ 84 との間に配置されていてもよい。分散プリズム 89 B は、折り返しミラー 88 C, 88 E と集光レンズ 87 との間に配置されていてもよい。

[0122] [4. 第2の実施形態]

次に、本開示の第2の実施形態に係るチタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置について説明する。なお、以下では上記比較例、又は上記第1の実施形態に係るチタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置の構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

本実施形態における露光装置用レーザ装置の基本構成は、図 1 に示した露光装置用レーザ装置と略同様であってもよい。

[0123] (4. 1 MOP O部)

(4. 1. 1 構成)

図15は、本開示の第2の実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20の要部構成として、MOP O部40Bの一構成例を概略的に示している。

[0124] 本実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20は、図6に示した上記第1の実施形態の構成におけるMOP O部40Aに代えて、バンドパスフィルタ58を含むMOP O部40Bを備えてもよい。本実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20はまた、図6に示した上記第1の実施形態の構成に加えて、第2の光シャッタ53Bをさらに備えてもよい。

[0125] バンドパスフィルタ58は、PO60の光共振器内の光路上に配置されていてもよい。バンドパスフィルタ58は、シード光51の波長である波長904nm付近の波長域の光を選択的に透過してもよい。

[0126] 第2の光シャッタ53Bは、PO60とマルチパス増幅部41との間の光路上に配置されていてもよい。遅延回路57は、同期回路部13の発振トリガを受信して、所定の遅延時間後に第2の光シャッタ53Bの開閉を制御する信号を出力してもよい。

[0127] (4. 1. 2 作用)

本実施形態のMOP O部40Bによれば、PO60の光共振器内の光路上にバンドパスフィルタ58を配置したことで、シード光51以外の波長成分が発振することを抑制し得る。波長904nmの波長域では、利得が小さいのでシード光51以外の波長成分のレーザ光が発振しやすい。そこで、シード光51の波長域を高透過するバンドパスフィルタ58を配置することによって、シード光51以外の波長成分が発振することを抑制し得る。その結果、弱いCW発振のシード光51でもPO60で半導体レーザと同じ波長のレーザ光を増幅発振させ得る。

[0128] また、本実施形態の狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20によれば、PO60とマルチパス増幅部41との間に第2の光シャッタ53Bを配置した

ことで、第2の光シャッタ53Bを透過した後のパルス状に増幅されたシード光51のパルス幅の変化とパルスの立ち上がり時間の揺らぎとが抑制され得る。PO60への注入同期法では、光共振器内の光路長のわずかな誤差で立ち上がり時間とパルス波形とが多少変化し得る。すなわち、第2の光シャッタ53Bに入射するシード光51のパルスが多少変化したとしても、第2の光シャッタ53Bによってこのパルスをトリミングすることによって、第2の光シャッタ53Bから出射されるシード光51のパルスの立ち上がり時間とパルス波形とが安定化し得る。また、PO60のチタンサファイヤ結晶61の熱レンズに合わせて光共振器を設計すると光共振器内の光路長が長くなり得る。そのため、高速で動作する第2の光シャッタ53Bを導入し、所定のタイミングで開閉を行って、パルス状に増幅されたシード光51をトリミングすることによって、パルス幅の変化とパルスの立ち上がり時間の揺らぎが抑制され得る。狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20からの最終的な出力はマルチパス増幅部41で決まるため、第2の光シャッタ53Bによるトリミングによる損失の影響は小さくなり得る。

[0129] (4. 2 マルチパス増幅部)

(4. 2. 1 構成)

図16は、本開示の第2の実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20の要部構成として、マルチパス増幅部41Aの一構成例を概略的に示している。

[0130] 本実施形態に係る狭帯域チタンサファイヤレーザ装置20は、図2に示した比較例の構成におけるマルチパス増幅部41に代えて、第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cを含むマルチパス増幅部41Aを備えてもよい。第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cは、第3の他のチタンサファイヤ結晶を含んでもよい。第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cは、図11に示した第1及び第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73A, 73Bの構成と略同様に、第3の他のチタンサファイヤ結晶に対してシード光51を往復して通過させるように構成されていてもよい。

[0131] マルチパス増幅部41Aはまた、第4の励起用パルスレーザ装置70Dと、第4の集光レンズ72Dと、第11の高反射ミラー111と、第12の高反射ミラー112とをさらに含んでもよい。第4の励起用パルスレーザ装置70Dは、励起用の第4のパルスレーザ光71Dを出力するパルスレーザ装置であってもよい。

[0132] 第1、第2及び第3の励起用パルスレーザ装置70A、70B、70C、並びに第4の励起用パルスレーザ装置70Dには、同期回路部13から発振トリガ入力されるように構成されていてもよい。

[0133] (4. 2. 2 動作及び作用)

マルチパス増幅部41Aにおいて、第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bで増幅されたシード光51は、第10の高反射ミラー110及び第11の高反射ミラー111を経由して第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cに入射し得る。第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cにおいて、第3の他のチタンサファイヤ結晶に、パルス状に増幅された波長904nmのシード光51が入射し得る。このシード光51の入射タイミングに同期して、第4の励起用パルスレーザ装置70Dから励起光として第4のパルスレーザ光71Dが、第3の他のチタンサファイヤ結晶に入射することによってシード光51がパルス状に励起され得る。第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cでは、波長904nmのパルスレーザ光が第3の他のチタンサファイヤ結晶をマルチパスすることによって、シード光51が複数回に亘って増幅され得る。

[0134] 第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cで増幅されたシード光51は、第12の高反射ミラー112を介してLBO結晶21に入射し得る。

[0135] ここで、パルス状に増幅された波長904nmのシード光51をさらに増幅するためのマルチパス増幅部41Aは、この波長での増幅利得が小さい。チタンサファイヤ結晶での熱レンズの焦点距離が結晶長に対して十分長くなるように、マルチパス増幅部41Aのマルチパルス数とマルチパスチタンサファイヤ増幅器の数の最適化が必要となる。

[0136] 本実施形態のマルチパス増幅部41Aでは、第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aにおけるマルチパス数は3往復にしてもよい。また、第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bにおけるマルチパス数は2往復にしてもよい。また、第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cにおけるマルチパス数は1往復にしてもよい。

[0137] ところで、上述の図5に示したように、励起光の入力が高くなるとチタンサファイヤ結晶における熱レンズ効果による焦点距離が短くなり得る。この熱レンズ効果による熱レンズの焦点距離が約10mm以下になると、チタンサファイヤ結晶をマルチパスさせるための光学システムの光学素子、例えば図11に示した集光レンズ84、87を光路軸方向に位置調整しても増幅後のビーム特性の悪化を抑制できなくなり得る。特に、往復数が多くなると、このチタンサファイヤ結晶における熱レンズ効果によって、ビーム特性の悪化が顕著になり得る。

[0138] 図17は、図16に示したマルチパス増幅部41Aの増幅特性の一例を示している。

図17の上段には、第1、第2及び第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73A、73B、73Cにおけるシード光51のトータルの往復数とシード光51の増幅光のパルスエネルギーとの関係とを示す。図17の上段に示したように、第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aにおいては、P060から出力されたパルスエネルギーの小さなシード光51の第1の増幅光を3往復させることによって、利得が飽和するまで増幅し、第2の増幅光として出力し得る。

[0139] 第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bにおいては、シード光51の第2の増幅光を2往復させることによって、利得が飽和するまで増幅し、第3の増幅光として出力し得る。

[0140] 第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cにおいては、シード光51の第3の増幅光を1往復させることによって、利得が飽和するまで増幅し、第4の増幅光として出力し得る。

[0141] 図17の下段には、第1、第2及び第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73A、73B、73Cにおけるシード光51のトータルの往復数とシード光51の増幅光の M^2 の関係を示す。ここで、 M^2 はレーザビーム特性の集光性能を意味してもよい。 $M^2=1$ がシングル横モードのレーザビームの集光性能を示してもよい。 M^2 が1より大きくなればなるほど、レーザ光の集光性能が悪化していることを意味してもよい。

[0142] 第1、第2及び第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73A、73B、73Cにおいては、奇数回のマルチパスにおいては M^2 が大きくなり、偶数回のマルチパスをさせることによって、 M^2 が改善し得る。偶数回のマルチパスをさせることは、すなわちチタンサファイヤ結晶を往復するようなマルチパスであり得る。第1、第2及び第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73A、73B、73Cのそれぞれの励起光のエネルギーは、飽和する利得を順番に大きくするために、励起光の入力の関係が以下の関係となるようにしてもよい。

(第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aへの励起光入力) < (第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bへの励起光入力) < (第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cへの励起光入力)

[0143] 励起光の入力が大きくなればなるほど、図17の下段に示したように、1往復後の増幅光の M^2 は、大きくなり得る。

[0144] 以上のように、利得の飽和と M^2 の増加の関係から、第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aは3往復、第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bは2往復、第3のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Cは1往復としてもよい。これにより、増幅効率の向上と、 M^2 の増加を抑制し得る。

[0145] (4. 2. 3 変形例)

図18は、本実施形態の変形例に係るマルチパス増幅部41Bの一構成例を概略的に示している。図18に示したマルチパス増幅部41Bのように、分散プリズム59を、第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aと第

2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bとの間の光路上に配置してもよい。この分散プリズム59によって、第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aの第1の他のチタンサファイヤ結晶74Aで発生したASE光が、第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bに入射するのを抑制し得る。

[0146] (その他)

図18の変形例では、分散プリズム59を第1のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Aと第2のマルチパスチタンサファイヤ増幅器73Bとの間の光路上に配置し得る。これに対して、必要に応じて、シード光51のその他の光路中に分散プリズム59を配置してもよい。その結果、波長904nm付近以外の波長のASEは抑制され、熱レンズ効果による増幅されたパルスレーザ光のビーム特性の悪化が抑制され得る。

[0147] [5. 光路長誤差検出器の構成例]

次に、図19を参照して、光路長誤差検出器43の具体的な構成例を説明する。なお、以下では上記比較例、上記第1又は第2の実施形態に係るチタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置の構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0148] (5. 1 構成)

光路長誤差検出器43は、Hansch-Couillaud法による検出器であってもよい。Hansch-Couillaud法は、光共振器からのシード光51の漏れ光52の偏光特性を計測することによって、シード光51の波長の正の整数倍と光共振器内の光路長との光路長誤差 ΔL を検出する方法であってもよい。

[0149] 光路長誤差検出器43は、 $\lambda/2$ 板91と、 $\lambda/4$ 板92と、偏光子93と、高反射ミラー94と、第1の光センサ95Aと、第2の光センサ95Bと、減算器96とを含んでもよい。

[0150] (5. 2 動作)

漏れ光52の偏光状態を解析するために、 $\lambda/2$ 板91と $\lambda/4$ 板92と

を透過させ、偏光子 93 によって、P 偏光成分と S 偏光成分を分離して、それぞれの偏光成分の光強度をそれぞれ、第 1 の光センサ 95 A と第 2 の光センサ 95 B とで検出し得る。

[0151] 第 1 の光センサ 95 A と第 2 の光センサ 95 B との光強度の信号を減算器 96 で減算し、減算器 96 の値が 0 のときはシード光 51 の波長の正の整数倍と光共振器内の光路長とが一致し得る。光路長誤差 ΔL に応じて、減算器 96 から減算された電圧値を出力してもよい。この減算器 96 から出力された電圧値を誤差制御部 55 が読み込むことによって、光路長誤差 ΔL の状態が計測され得る。

[0152] (5. 3 変形例)

図 19 の構成例では、光路長誤差 ΔL を計測する方法として H a n s c h - C o u i l l a u d 法を示したが、この方法に限定されることなく、P o u n d - D e r e v e r - H a l l 法や位相敏感検波法等を用いてもよい。

[0153] [6. 光シャッタの構成例]

次に、図 20 を参照して、上記した第 1 の光シャッタ 53 A 及び第 2 の光シャッタ 53 B として適用可能な光シャッタ 310 の具体的な構成例を説明する。なお、以下では上記比較例、上記第 1 又は第 2 の実施形態に係るチタンサファイヤレーザ装置、及び露光装置用レーザ装置の構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0154] (6. 1 構成)

図 20 は、光シャッタ 310 の一構成例を示している。光シャッタ 310 は、ポッケルスセル 394 と、偏光子 396 とを含んでもよい。ポッケルスセル 394 は、高電圧電源 393 と、第 1 の電極 395 a と、第 2 の電極 395 b と、電気光学結晶 395 c とを含んでもよい。第 1 の電極 395 a と第 2 の電極 395 b とは対向配置され、それらの間に電気光学結晶 395 c が配置されていてもよい。高電圧電源 393 は、透過率設定部 311、及び同期回路 312 によって制御されてもよい。

[0155] (6. 2 動作)

高電圧電源 393 は、透過率設定部 311 又は同期回路 312 から、光シャッタ 310 の制御信号を受信してもよい。高電圧電源 393 は、光シャッタ 310 の制御信号として光シャッタ 310 を開状態にする開信号を受信した場合に、0 V ではない所定の高電圧を生成し、その電圧を第 1 の電極 395 a と第 2 の電極 395 b との間に印加してもよい。高電圧電源 393 は、光シャッタ 310 の制御信号として光シャッタ 310 を閉状態にする閉信号を受信した場合に、第 1 の電極 395 a と第 2 の電極 395 b との間に印加する電圧を 0 V にしてもよい。

[0156] ポッケルスセル 394 は、第 1 の電極 395 a と第 2 の電極 395 b との間に所定の高電圧を印加したときに、 $\lambda/2$ 板と等価な機能となってもよい。第 1 の電極 395 a と第 2 の電極 395 b との間に所定の高電圧が印加されていないときは、紙面に対して、垂直な直線偏光方向の光は、そのままの偏光状態で、電気光学結晶 395 c を透過し、偏光子 396 によって反射され得る。図 20 においては、紙面に対して垂直な方向に直線偏光した光はレーザ光路上に描画された黒丸で示し得る。ここで、所定の高電圧を印加すると、位相が $\lambda/2$ ずれて、紙面に対して垂直な方向の直線偏光が、紙面を含む方向の直線偏光に変換され得る。図 20 においては、紙面を含む方向に直線偏光した光はレーザ光路上に描画された光路に垂直な矢印で示し得る。この光は、偏光子 396 を透過し得る。以上のように、光シャッタ 310 は、電気光学結晶 395 c に高電圧を印加している期間、光が透過し得る。

[0157] ポッケルスセル 394 は、1 ns 程度の応答性を有するので、高速の光シャッタとして使用可能である。また、光シャッタ 310 として、例えば AO（音響光学）素子を使用してもよい。この場合は、数 100 ns 程度の応答性を有するので使用可能である。また、透過率設定部 311 からの制御に応じて、第 1 の電極 395 a と第 2 の電極 395 b との間に印加する電圧を変えることで、透過率を変化させることもできる。

[0158] なお、図 20 の光シャッタ 310 の構成に対して、上流側の光路に、偏光子と $\lambda/2$ 板とをさらに追加して光アイソレータとして機能させてもよい。

なお、図20において左側が上流側、右側が下流側であってもよい。その場合、光アイソレータは、ポッケルスセル394の第1の電極395aと第2の電極395bとの間に所定の高電圧を印加したときには、上流側と下流側の双方からの光を高透過し得る。すなわち、光アイソレータは開状態になり得る。第1の電極395aと第2の電極395bとの間に所定の高電圧を印加しないときには、上流側と下流側の双方からの光の透過を抑制し得る。すなわち、光アイソレータは閉状態になり得る。

[0159] [7. 制御部のハードウェア環境]

当業者は、汎用コンピュータ又はプログラマブルコントローラにプログラムモジュール又はソフトウェアアプリケーションを組み合わせ、ここに述べられる主題が実行されることを理解するだろう。一般的に、プログラムモジュールは、本開示に記載されるプロセスを実行できるルーチン、プログラム、コンポーネント、データストラクチャーなどを含む。

[0160] 図21は、開示される主題の様々な側面が実行され得る例示的なハードウェア環境を示すブロック図である。図21の例示的なハードウェア環境100は、処理ユニット1000と、ストレージユニット1005と、ユーザインターフェイス1010と、パラレルI/Oコントローラ1020と、シリアルI/Oコントローラ1030と、A/D、D/Aコンバータ1040とを含んでもよいが、ハードウェア環境100の構成は、これに限定されない。

[0161] 処理ユニット1000は、中央処理ユニット(CPU)1001と、メモリ1002と、タイマ1003と、画像処理ユニット(GPU)1004とを含んでもよい。メモリ1002は、ランダムアクセスメモリ(RAM)とリードオンリーメモリ(ROM)とを含んでもよい。CPU1001は、市販のプロセッサのいずれでもよい。デュアルマイクロプロセッサや他のマルチプロセッサアーキテクチャが、CPU1001として使用されてもよい。

[0162] 図21におけるこれらの構成物は、本開示において記載されるプロセスを実行するために、相互に接続されていてもよい。

[0163] 動作において、処理ユニット１０００は、ストレージユニット１００５に保存されたプログラムを読み込んで、実行してもよい。また、処理ユニット１０００は、ストレージユニット１００５からプログラムと一緒にデータを読み込んでよい。また、処理ユニット１０００は、ストレージユニット１００５にデータを書き込んでよい。ＣＰＵ１００１は、ストレージユニット１００５から読み込んだプログラムを実行してもよい。メモリ１００２は、ＣＰＵ１００１によって実行されるプログラム及びＣＰＵ１００１の動作に使用されるデータを、一時的に保管する作業領域であってもよい。タイマ１００３は、時間間隔を計測して、プログラムの実行に従ってＣＰＵ１００１に計測結果を出力してもよい。ＧＰＵ１００４は、ストレージユニット１００５から読み込まれるプログラムに従って、画像データを処理し、処理結果をＣＰＵ１００１に出力してもよい。

[0164] パラレルＩ／Ｏコントローラ１０２０は、同期制御部３、露光装置制御部５、同期回路部１３、増幅器制御部３０、充電器３１、シフト量加算器５４、及び誤差制御部５５等の、処理ユニット１０００と通信可能なパラレルＩ／Ｏデバイスに接続されてもよく、処理ユニット１０００とそれらパラレルＩ／Ｏデバイスとの間の通信を制御してもよい。シリアルＩ／Ｏコントローラ１０３０は、遅延回路５７、及び誤差制御部５５等の、処理ユニット１０００と通信可能な複数のシリアルＩ／Ｏデバイスに接続されてもよく、処理ユニット１０００とそれら複数のシリアルＩ／Ｏデバイスとの間の通信を制御してもよい。Ａ／Ｄ、Ｄ／Ａコンバータ１０４０は、アナログポートを介して、各種センサ、例えば光路長誤差検出器４３等のアナログデバイスに接続されてもよく、処理ユニット１０００とそれらアナログデバイスとの間の通信を制御したり、通信内容のＡ／Ｄ、Ｄ／Ａ変換を行ってもよい。

[0165] ユーザインターフェイス１０１０は、操作者が処理ユニット１０００にプログラムの停止や、割込みルーチンの実行を指示できるように、処理ユニット１０００によって実行されるプログラムの進捗を操作者に表示してもよい。

[0166] 例示的なハードウェア環境 100 は、本開示における固体レーザ制御部 14 等の構成に適用されてもよい。当業者は、それらのコントローラが分散コンピューティング環境、すなわち、通信ネットワークを介して繋がっている処理ユニットによってタスクが実行される環境において実現されてもよいことを理解するだろう。本開示において、固体レーザ制御部 14 と、同期制御部 3 と、増幅器制御部 30 とを統括制御する図示しない露光装置レーザ用制御部等は、イーサネット（登録商標）やインターネットといった通信ネットワークを介して互いに接続されてもよい。分散コンピューティング環境において、プログラムモジュールは、ローカル及びリモート両方のメモリストレージデバイスに保存されてもよい。

[0167] [8. その他]

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実施形態に変更を加えることができることは、当業者には明らかであろう。

[0168] 本明細書及び添付の特許請求の範囲全体で使用する用語は、「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不定冠詞「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。

請求の範囲

- [請求項1] シングル縦モードでCW発振してシード光を出力するCW発振レーザ装置と、
- 光共振器と、この光共振器内の光路上に配置されたチタンサファイヤ結晶とを含み、前記シード光が入射する増幅発振器と、
- 前記チタンサファイヤ結晶に向けてパルスレーザ光を出力するパルスレーザ装置と、
- 前記シード光の波長の正の整数倍と前記光共振器内の光路長との光路長誤差を検出する誤差検出器と、
- 前記パルスレーザ光が前記チタンサファイヤ結晶に入射する直前のタイミングで前記光路長誤差が0に近づくように前記光共振器内の光路長を変化させる光路長補正部と
- を備えるチタンサファイヤレーザ装置。
- [請求項2] 前記誤差検出器は、前記光共振器からの前記シード光の漏れ光の光路上に設けられている
- 請求項1に記載のチタンサファイヤレーザ装置。
- [請求項3] 前記パルスレーザ光の出力タイミングを制御する発振トリガを前記パルスレーザ装置に出力する同期回路と、
- 前記光共振器と前記誤差検出器との間における前記漏れ光の光路上に配置された光シャッタと、
- 前記発振トリガに基づいて、前記光シャッタを、前記増幅発振器によってパルス状に増幅された前記シード光が前記光シャッタに入射している期間では閉じ、前記パルス状に増幅されたシード光が前記光シャッタに入射していない期間では開ける制御を行う光シャッタ制御部と
- をさらに備える
- 請求項2に記載のチタンサファイヤレーザ装置。
- [請求項4] 前記光共振器内の光路上に配置され、前記シード光を選択的に透過

するバンドパスフィルタ

をさらに備える

請求項 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項5] 前記シード光の波長は略 904 nm である

請求項 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項6] 前記光共振器は、リング型の光共振器である

請求項 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項7] 前記増幅発振器から出力された前記シード光を往復させる第 1 のマルチパス光学システムと、この第 1 のマルチパス光学システム内の第 1 のマルチ光路上に設けられた第 1 の他のチタンサファイヤ結晶とを含む第 1 のマルチパス増幅器

をさらに備える

請求項 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項8] 前記第 1 のマルチパス増幅器から出力された前記シード光を往復させる第 2 のマルチパス光学システムと、この第 2 のマルチパス光学システム内の第 2 のマルチ光路上に設けられた第 2 の他のチタンサファイヤ結晶とを含む第 2 のマルチパス増幅器

をさらに備え、

前記第 2 のマルチパス増幅器における前記シード光の往復回数は、前記第 1 のマルチパス増幅器における前記シード光の往復回数以下である

請求項 7 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項9] 前記第 1 のマルチパス増幅器と前記第 2 のマルチパス増幅器との間の光路上に配置された分散プリズム

をさらに備える

請求項 8 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項10] 前記第 1 のマルチパス光学システムは、前記シード光の光路上の所定の入射位置における入射ビーム像を偶数回、前記シード光の光路上

に転写結像させる

請求項 7 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項11] 前記第 1 のマルチパス光学システムは、第 1 の集光レンズと第 2 の集光レンズとを含み、

前記第 1 及び第 2 の集光レンズ間の光路長は、前記第 1 の集光レンズの焦点距離と前記第 2 の集光レンズの焦点距離との略和であり、

前記第 1 の他のチタンサファイヤ結晶は、前記第 1 及び第 2 の集光レンズ間において前記第 1 の集光レンズの略後側焦点位置に設けられている

請求項 7 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項12] 前記第 1 の集光レンズの焦点距離と前記第 2 の集光レンズの焦点距離とが略同一である

請求項 1 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項13] 前記第 1 のマルチパス光学システムは、前記第 1 及び第 2 の集光レンズのうちのいずれか一方の集光レンズを通過した前記シード光の光路上に配置され、前記シード光の光路を前記一方の集光レンズに向けて折り返す一対の折り返しミラーを含み、

前記一方の集光レンズから前記一対の折り返しミラーを経て、再度、前記一方の集光レンズに至るまでの光路の光路長が前記一方の集光レンズの焦点距離の略 2 倍である

請求項 1 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項14] 前記第 1 の集光レンズの焦点距離と前記第 2 の集光レンズの焦点距離とが略同一である

請求項 1 3 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項15] シングル縦モードで CW 発振してシード光を出力する CW 発振レーザ装置、を含むマスタ増幅発振部と、

前記マスタ増幅発振部から出力された前記シード光を往復させる第 1 のマルチパス光学システムと、この第 1 のマルチパス光学システム

内の第1のマルチ光路上に設けられた第1のチタンサファイヤ結晶とを含む第1のマルチパス増幅器と、

前記第1のマルチパス増幅器から出力された前記シード光を往復させる第2のマルチパス光学システムと、この第2のマルチパス光学システム内の第2のマルチ光路上に設けられた第2のチタンサファイヤ結晶とを含む第2のマルチパス増幅器と

を備え、

前記第2のマルチパス増幅器における前記シード光の往復回数は、前記第1のマルチパス増幅器における前記シード光の往復回数以下である

チタンサファイヤレーザ装置。

[請求項16]

シングル縦モードでCW発振してシード光を出力するCW発振レーザ装置と、

光共振器と、この光共振器内の光路上に配置されたチタンサファイヤ結晶とを含み、前記シード光が入射する増幅発振器と、

前記チタンサファイヤ結晶に向けてパルスレーザ光を出力するパルスレーザ装置と、

前記シード光の波長の正の整数倍と前記光共振器内の光路長との光路長誤差を検出する誤差検出器と、

前記パルスレーザ光が前記チタンサファイヤ結晶に入射する直前のタイミングで前記光路長誤差が0に近づくように前記光共振器内の光路長を変化させる光路長補正部と

を備える露光装置用レーザ装置。

[請求項17]

シングル縦モードでCW発振してシード光を出力するCW発振レーザ装置、を含むマスタ増幅発振部と、

前記マスタ増幅発振部から出力された前記シード光を往復させる第1のマルチパス光学システムと、この第1のマルチパス光学システム内の第1のマルチ光路上に設けられた第1のチタンサファイヤ結晶と

を含む第1のマルチパス増幅器と、

前記第1のマルチパス増幅器から出力された前記シード光を往復させる第2のマルチパス光学システムと、この第2のマルチパス光学システム内の第2のマルチ光路上に設けられた第2のチタンサファイヤ結晶とを含む第2のマルチパス増幅器と

を備え、

前記第2のマルチパス増幅器における前記シード光の往復回数は、前記第1のマルチパス増幅器における前記シード光の往復回数以下である

露光装置用レーザ装置。

[請求項18] 増幅発振器から出力されたパルス状のシード光を往復させると共に、前記シード光の光路上の所定の入射位置における入射ビーム像を偶数回、前記シード光の光路上に転写結像させるマルチパス光学システムと、

このマルチパス光学システム内のマルチ光路上に設けられ、前記シード光を増幅するチタンサファイヤ結晶と

を備えるチタンサファイヤ増幅器。

[請求項19] 前記マルチパス光学システムは、第1の集光レンズと第2の集光レンズとを含み、

前記第1及び第2の集光レンズ間の光路長は、前記第1の集光レンズの焦点距離と前記第2の集光レンズの焦点距離との略和であり、

前記チタンサファイヤ結晶は、前記第1及び第2の集光レンズ間において前記第1の集光レンズの略後側焦点位置に設けられている

請求項18に記載のチタンサファイヤ増幅器。

[請求項20] 前記第1の集光レンズの焦点距離と前記第2の集光レンズの焦点距離とが略同一である

請求項19に記載のチタンサファイヤ増幅器。

[請求項21] 前記マルチパス光学システムは、前記第1及び第2の集光レンズの

うちのいずれか一方の集光レンズを通過した前記シード光の光路上に配置され、前記シード光の光路を前記一方の集光レンズに向けて折り返す一対の折り返しミラーを含み、

前記一方の集光レンズから前記一対の折り返しミラーを経て、再度、前記一方の集光レンズに至るまでの光路の光路長が前記一方の集光レンズの焦点距離の略2倍である

請求項20に記載のチタンサファイヤ増幅器。

補正された請求の範囲
[2016年1月7日(07.01.2016) 国際事務局受理]

[請求項 1] (補正後) シングル縦モードで CW 発振してシード光を出力する CW 発振レーザ装置と、

光共振器と、この光共振器内の光路上に配置されたチタンサファイヤ結晶とを含み、前記シード光が入射する増幅発振器と、

前記チタンサファイヤ結晶に向けてパルスレーザ光を出力するパルスレーザ装置と、

前記光共振器からの前記シード光の漏れ光の光路上に設けられ、前記シード光の波長の正の整数倍と前記光共振器内の光路長との光路長誤差を検出し、光路長誤差信号を出力する誤差検出器と、

前記光路長誤差信号の補正值を出力する誤差制御部と、

前記光路長誤差信号に対して前記補正值が加算された信号に基づいて、前記光共振器内の光路長を変化させる光路長補正部と

を備えるチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 2] (補正後) 前記誤差制御部は、前記誤差検出器から所定の期間内に入力された前記光路長誤差信号に基づいて前記補正值を算出する

請求項 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 3] (補正後) 前記誤差制御部は、前記パルスレーザ光が前記チタンサファイヤ結晶に入射する直前のタイミングで前記光路長誤差が 0 に近づくように前記補正值を算出する

請求項 2 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 4] (補正後) 前記パルスレーザ光の出力タイミングを制御する発振トリガを前記パルスレーザ装置に出力する同期回路と、

前記光共振器と前記誤差検出器との間における前記漏れ光の光路上に配置された光シャッタと、

前記発振トリガに基づいて、前記光シャッタを、前記増幅発振器によってパルス状に増幅された前記シード光が前記光シャッタに入射している期間では閉じ、前記パルス状に増幅されたシード光が前記光シャッタに入射していない期間では開ける制御を行う光シャッタ制御部と

をさらに備える

請求項 2 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 5] (補正後) 前記光共振器内の光路上に配置され、前記シード光を選択的に透過するバンドパスフィルタ

をさらに備える

請求項 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 6] (補正後) 前記シード光の波長は略 904 nm である

請求項 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 7] (補正後) 前記光共振器は、リング型の光共振器である

請求項 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 8] (補正後) 前記増幅発振器から出力された前記シード光を往復させる第 1 のマルチパス光学システムと、この第 1 のマルチパス光学システム内の第 1 のマルチ光路上に設けられた第 1 の他のチタンサファイヤ結晶とを含む第 1 のマルチパス増幅器

をさらに備える

請求項 1 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 9] (補正後) 前記第 1 のマルチパス増幅器から出力された前記シード光を往復させる第 2 のマルチパス光学システムと、この第 2 のマルチパス光学システム内の第 2 のマルチ光路上に設けられた第 2 の他のチタンサファイヤ結晶とを含む第 2 のマルチパス増幅器

をさらに備え、

前記第 2 のマルチパス増幅器における前記シード光の往復回

数は、前記第 1 のマルチパス増幅器における前記シード光の往復回数以下である

請求項 8 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 10] (補正後) 前記第 1 のマルチパス増幅器と前記第 2 のマルチパス増幅器との間の光路上に配置された分散プリズム

をさらに備える

請求項 9 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 11] (補正後) 前記第 1 のマルチパス光学システムは、前記シード光の光路上の所定の入射位置における入射ビーム像を偶数回、前記シード光の光路上に転写結像させる

請求項 8 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 12] (補正後) 前記第 1 のマルチパス光学システムは、第 1 の集光レンズと第 2 の集光レンズとを含み、

前記第 1 及び第 2 の集光レンズ間の光路長は、前記第 1 の集光レンズの焦点距離と前記第 2 の集光レンズの焦点距離との略和であり、

前記第 1 の他のチタンサファイヤ結晶は、前記第 1 及び第 2 の集光レンズ間において前記第 1 の集光レンズの略後側焦点位置に設けられている

請求項 8 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 13] (補正後) 前記第 1 の集光レンズの焦点距離と前記第 2 の集光レンズの焦点距離とが略同一である

請求項 12 に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項 14] (補正後) 前記第 1 のマルチパス光学システムは、前記第 1 及び第 2 の集光レンズのうちのいずれか一方の集光レンズを通過した前記シード光の光路上に配置され、前記シード光の光路を前記一方の集光レンズに向けて折り返す一対の折り返しミラーを含み、

前記一方の集光レンズから前記一対の折り返しミラーを経て、再

度、前記一方の集光レンズに至るまでの光路の光路長が前記一方の集光レンズの焦点距離の略2倍である

請求項12に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項15] (補正後) 前記第1の集光レンズの焦点距離と前記第2の集光レンズの焦点距離とが略同一である

請求項14に記載のチタンサファイヤレーザ装置。

[請求項16] (補正後) シングル縦モードでCW発振してシード光を出力するCW発振レーザ装置、を含むマスタ増幅発振部と、

前記マスタ増幅発振部から出力された前記シード光を往復させる第1のマルチパス光学システムと、この第1のマルチパス光学システム内の第1のマルチ光路上に設けられた第1のチタンサファイヤ結晶とを含む第1のマルチパス増幅器と、

前記第1のマルチパス増幅器から出力された前記シード光を往復させる第2のマルチパス光学システムと、この第2のマルチパス光学システム内の第2のマルチ光路上に設けられた第2のチタンサファイヤ結晶とを含む第2のマルチパス増幅器と

を備え、

前記第2のマルチパス増幅器における前記シード光の往復回数は、前記第1のマルチパス増幅器における前記シード光の往復回数以下である

露光装置用レーザ装置。

[請求項17] (補正後) チタンサファイヤ結晶と、

複数の集光光学素子を含み、前記チタンサファイア結晶に、所定の入射位置を介して入射したシード光を偶数回通過させるように構成されると共に、前記所定の入射位置における入射ビーム像を前記複数の集光光学素子によって偶数回転写結像させるよう構成されたマルチパス光学システムと、

前記マルチパス光学システム内の前記シード光の光路上に配置さ

れると共に、前記チタンサファイヤ結晶に励起光を入射させるよう配置された第1のダイクロイックミラーと、

前記マルチパス光学システム内の前記シード光の光路上に配置されると共に、前記チタンサファイヤ結晶から出射された前記励起光を前記マルチパス光学システム外に出射させるよう配置された第2のダイクロイックミラーと

を備えるチタンサファイヤ増幅器。

[請求項18] (補正後) 前記複数の集光光学素子は、第1の集光レンズと第2の集光レンズとを含み、

前記第1及び第2の集光レンズ間の光路長は、前記第1の集光レンズの焦点距離と前記第2の集光レンズの焦点距離との略和であり、

前記チタンサファイヤ結晶は、前記第1及び第2の集光レンズ間において前記第1の集光レンズの略後側焦点位置に設けられている

請求項17に記載のチタンサファイヤ増幅器。

[請求項19] (補正後) 前記第1の集光レンズの焦点距離と前記第2の集光レンズの焦点距離とが略同一である

請求項18に記載のチタンサファイヤ増幅器。

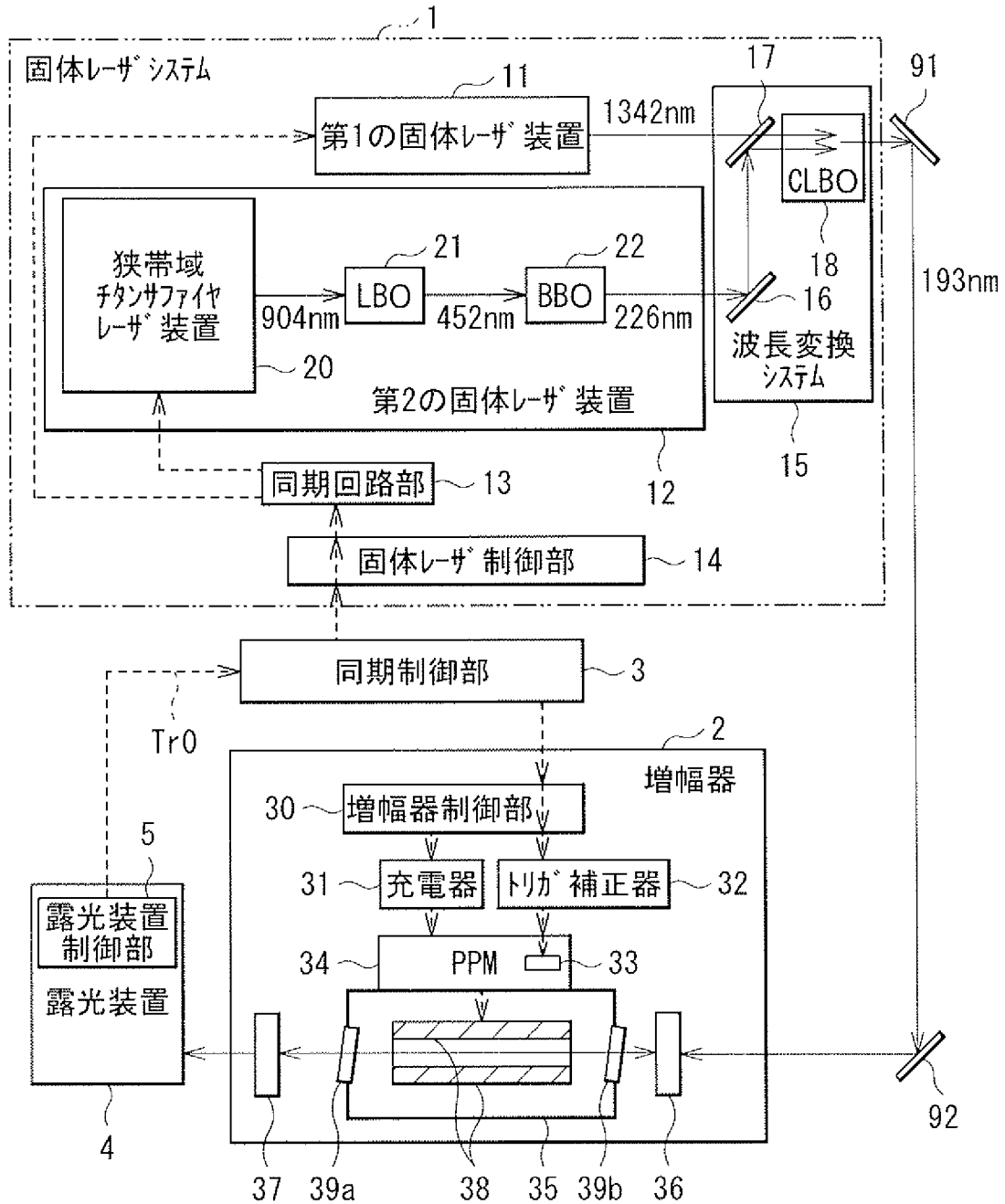
[請求項20] (補正後) 前記マルチパス光学システムは、前記第1及び第2の集光レンズのうちのいずれか一方の集光レンズを通過した前記シード光の光路上に配置され、前記シード光の光路を前記一方の集光レンズに向けて折り返す一対の折り返しミラーを含み、

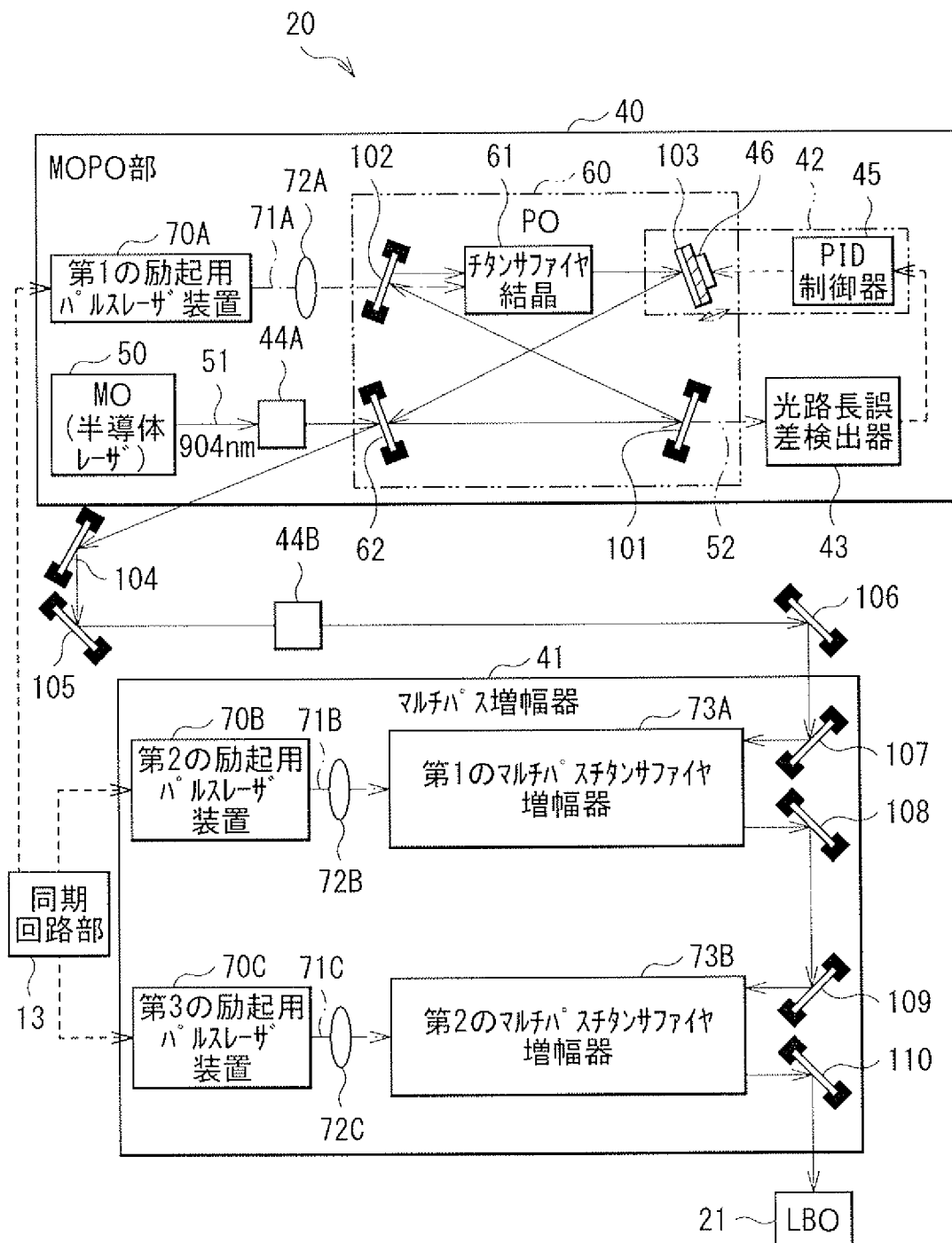
前記一方の集光レンズから前記一対の折り返しミラーを経て、再度、前記一方の集光レンズに至るまでの光路の光路長が前記一方の集光レンズの焦点距離の略2倍である

請求項19に記載のチタンサファイヤ増幅器。

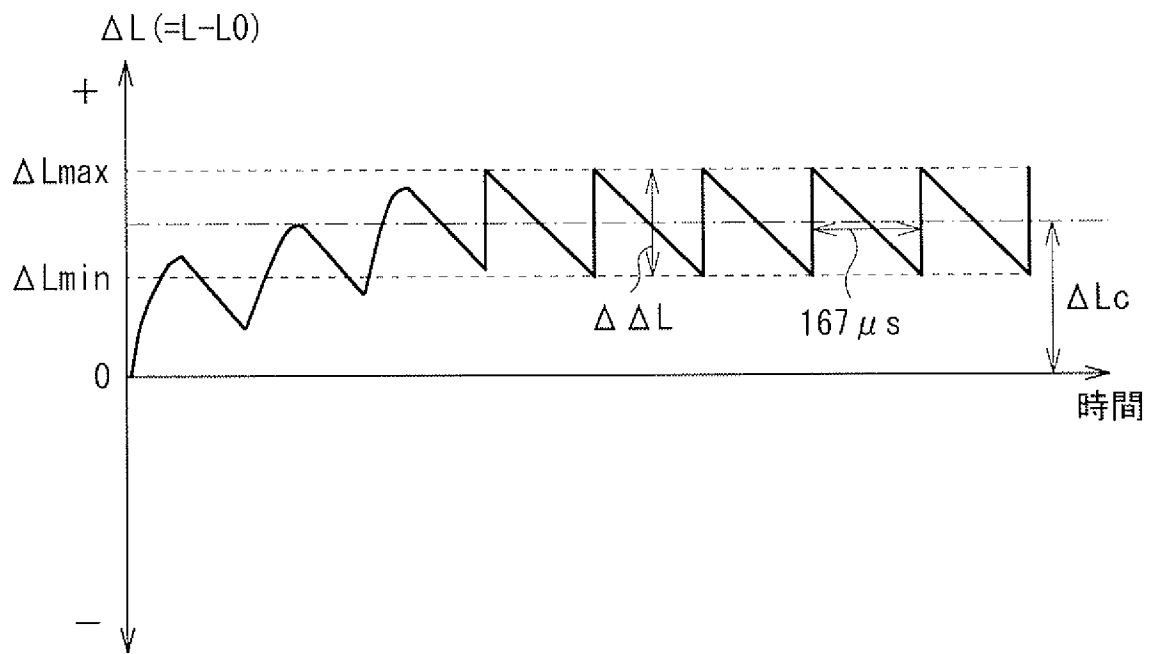
[請求項21] (削除)

[図1]

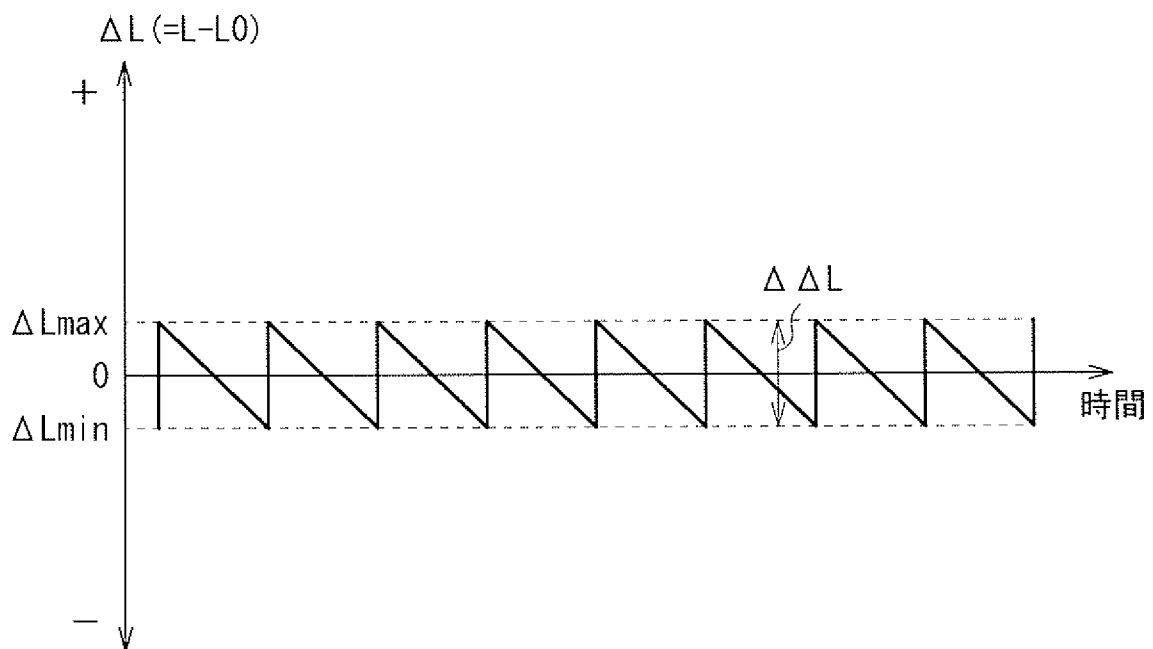




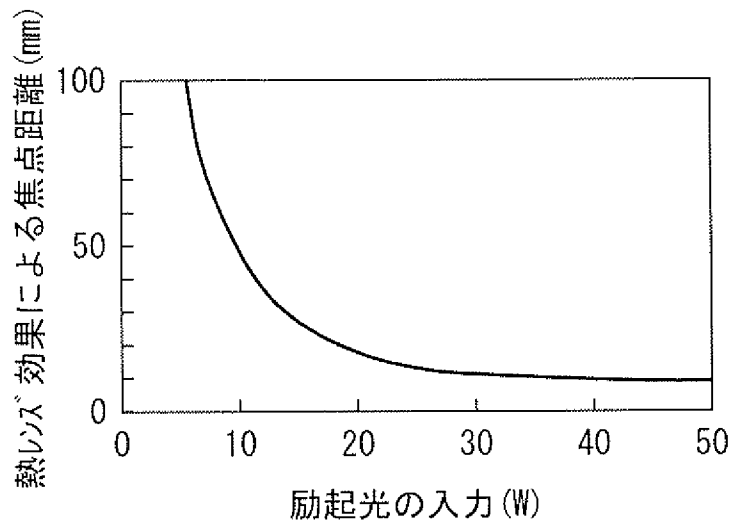
[図3]



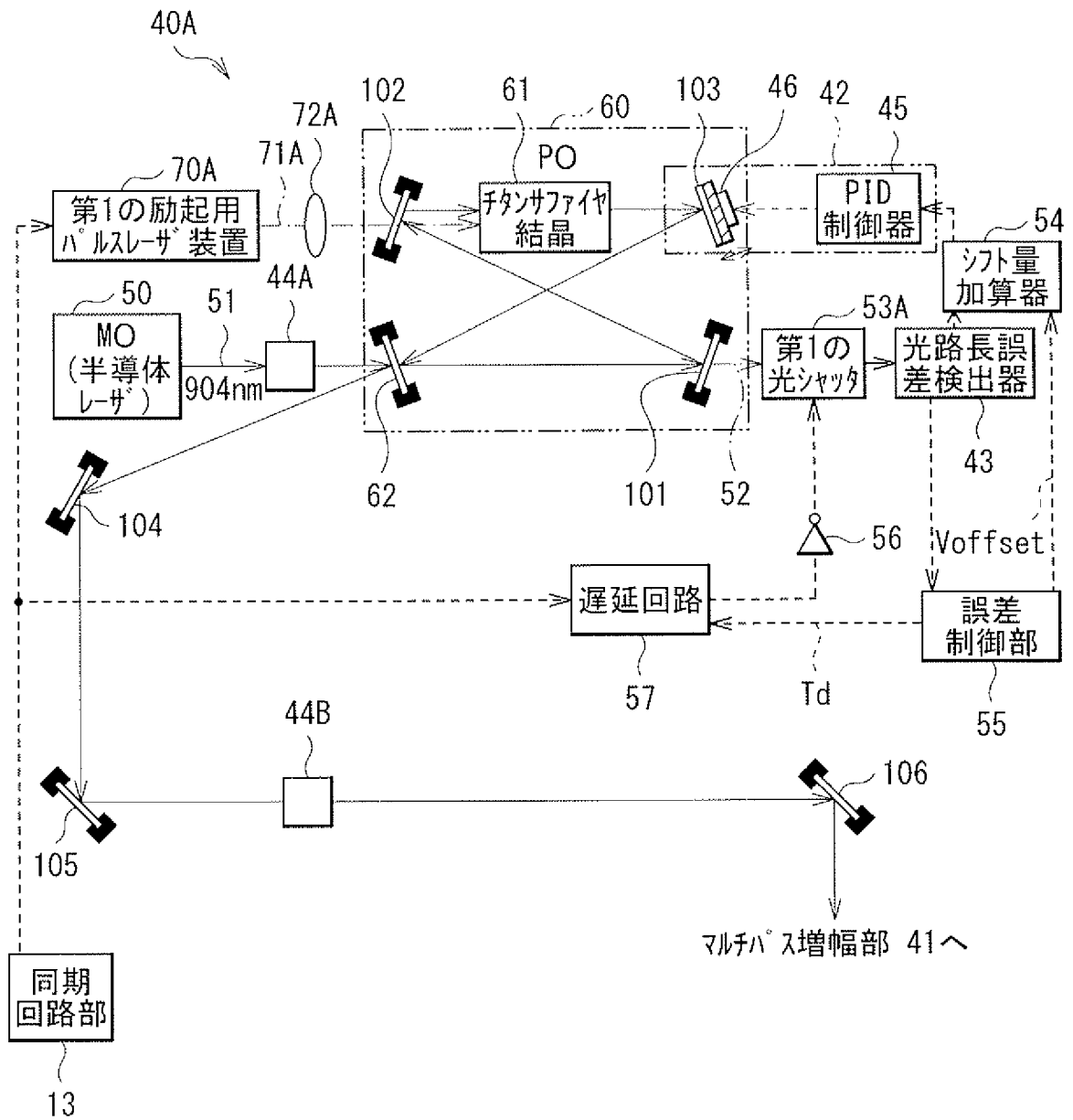
[図4]



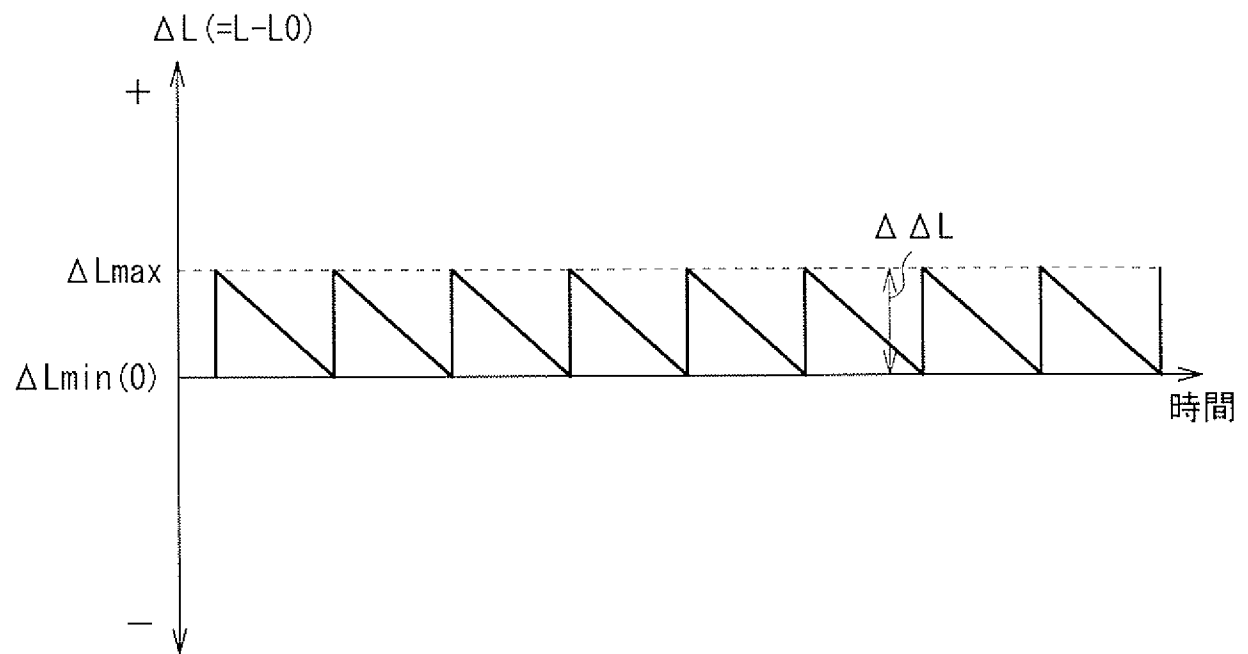
[図5]



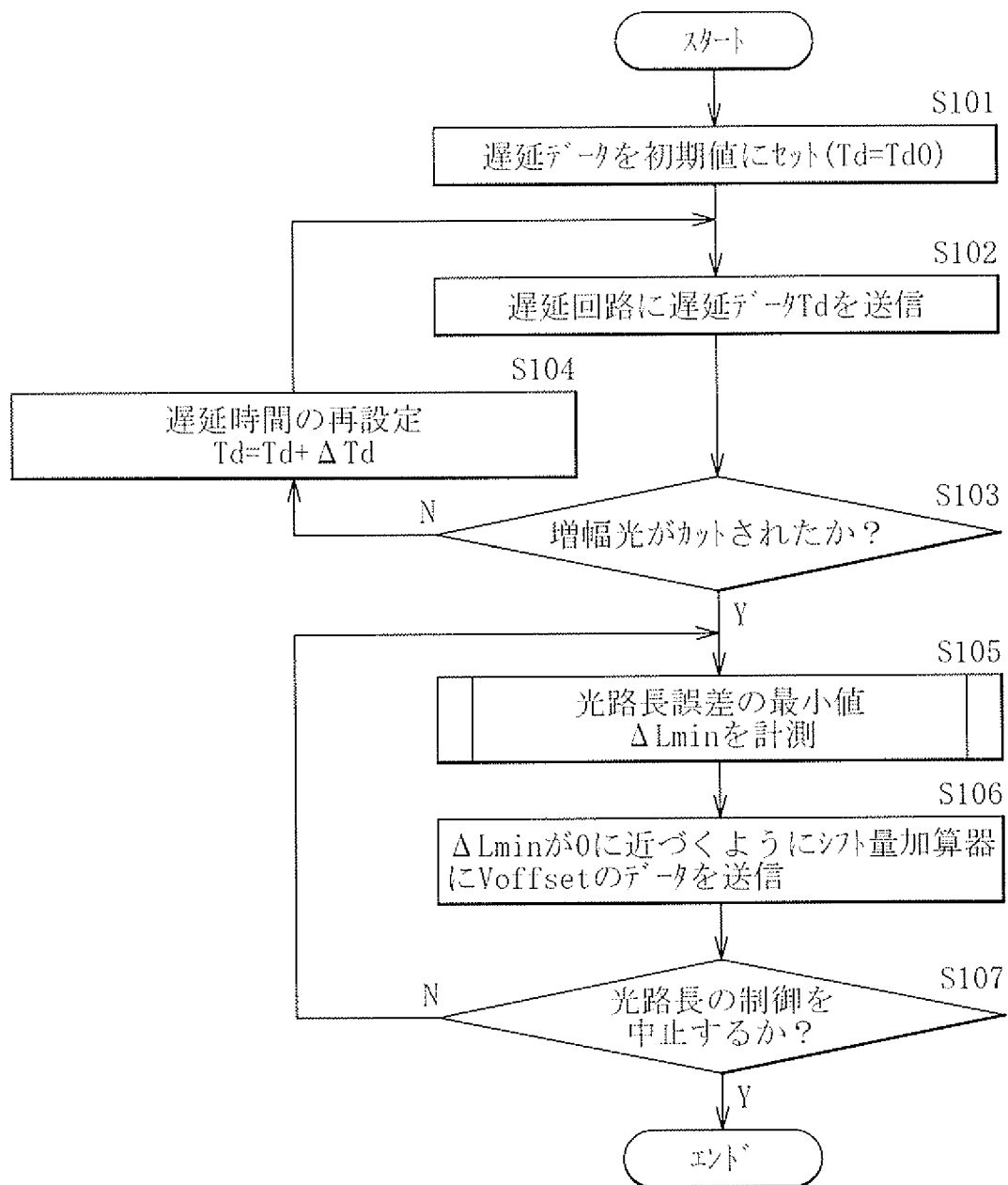
[図6]



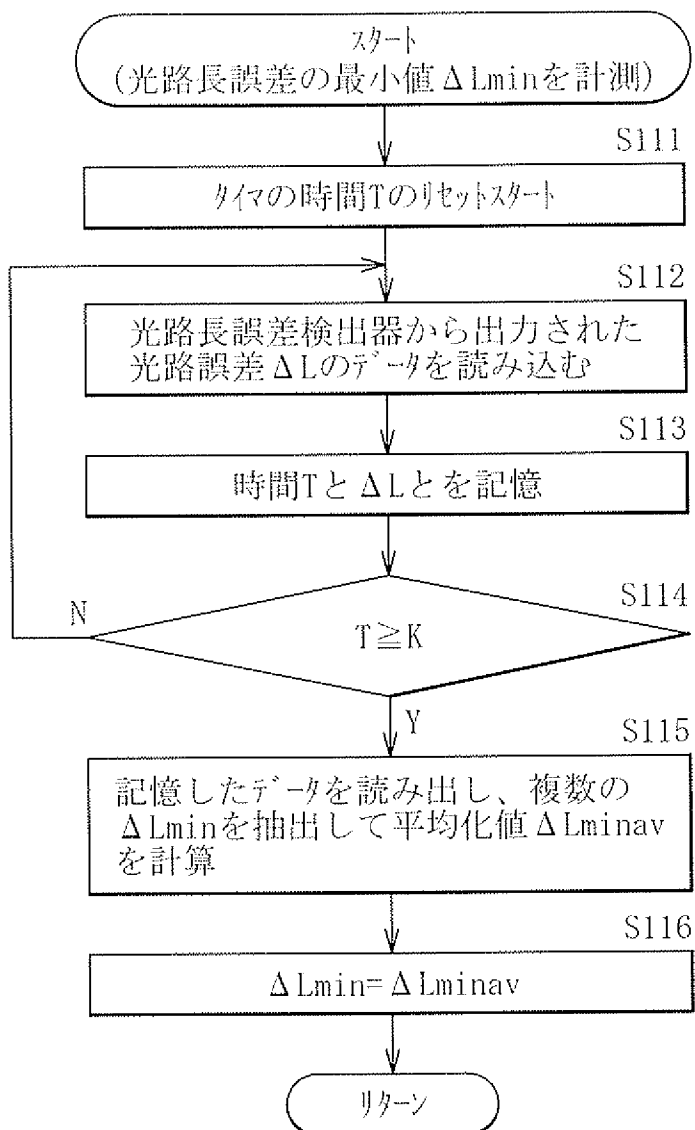
[図7]



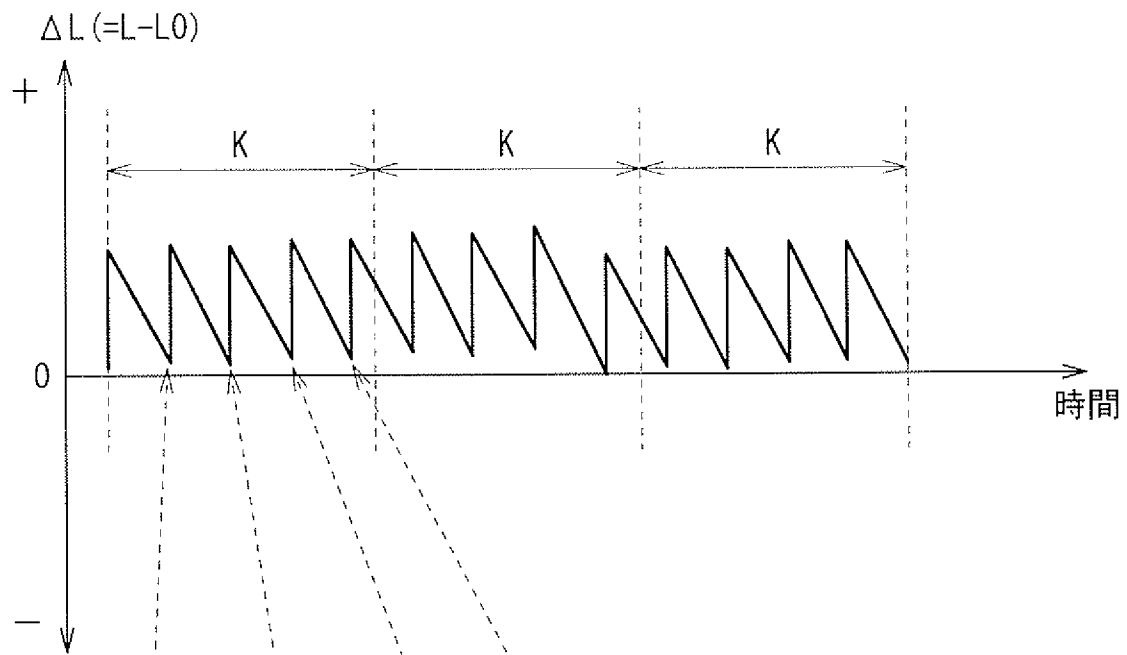
[図8]



[図9]



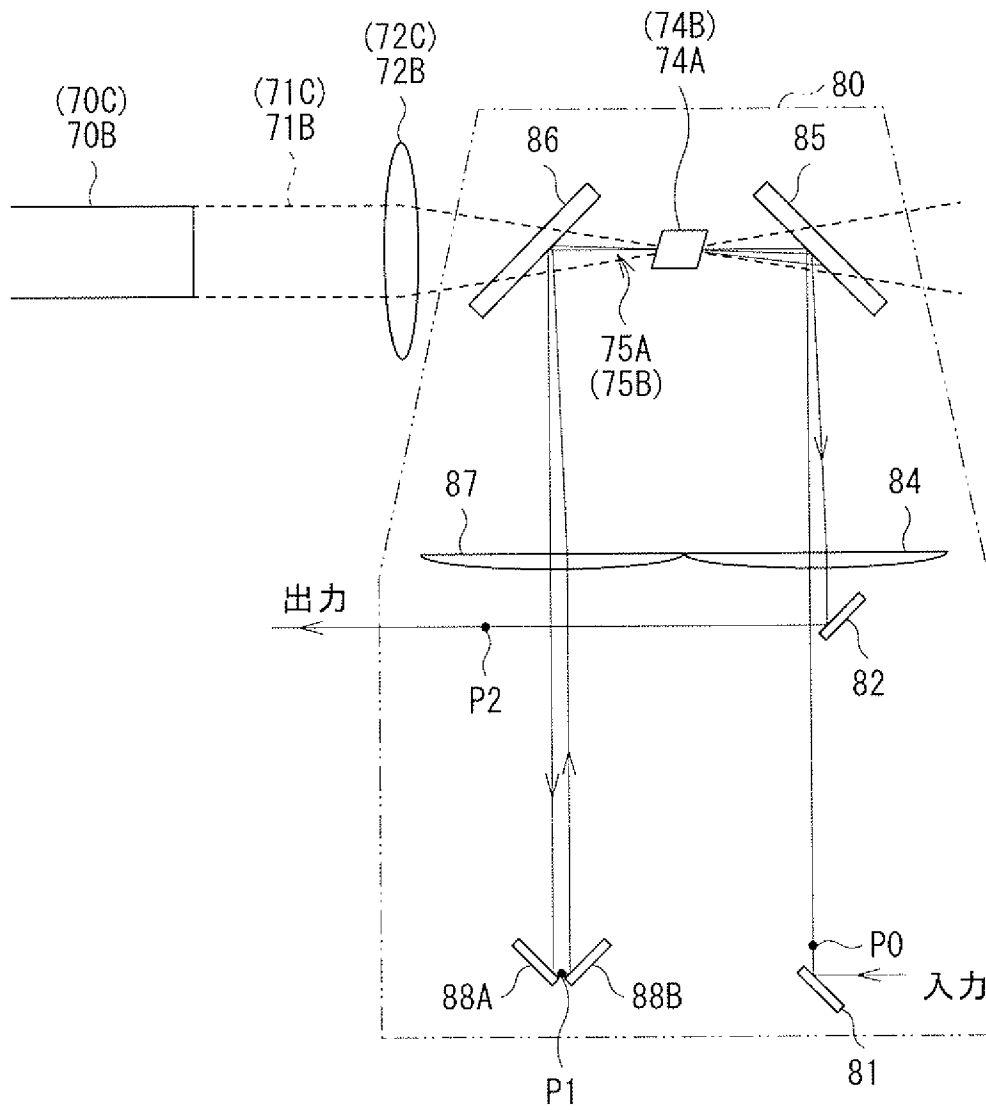
[図10]



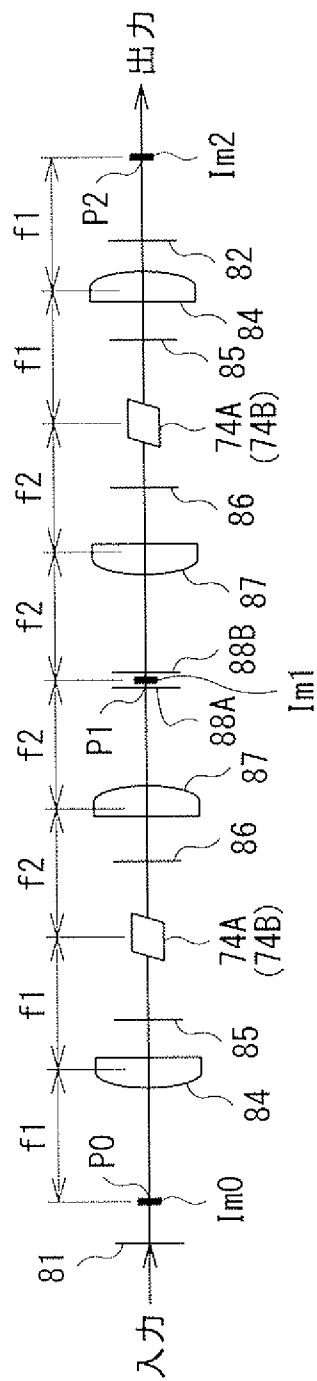
$\Delta L_{\min}(1), \Delta L_{\min}(2), \Delta L_{\min}(3), \Delta L_{\min}(4)$

$$\Delta L_{\min av} = \{ \Delta L_{\min}(1) + \Delta L_{\min}(2) + \Delta L_{\min}(3) + \Delta L_{\min}(4) \} / 4$$

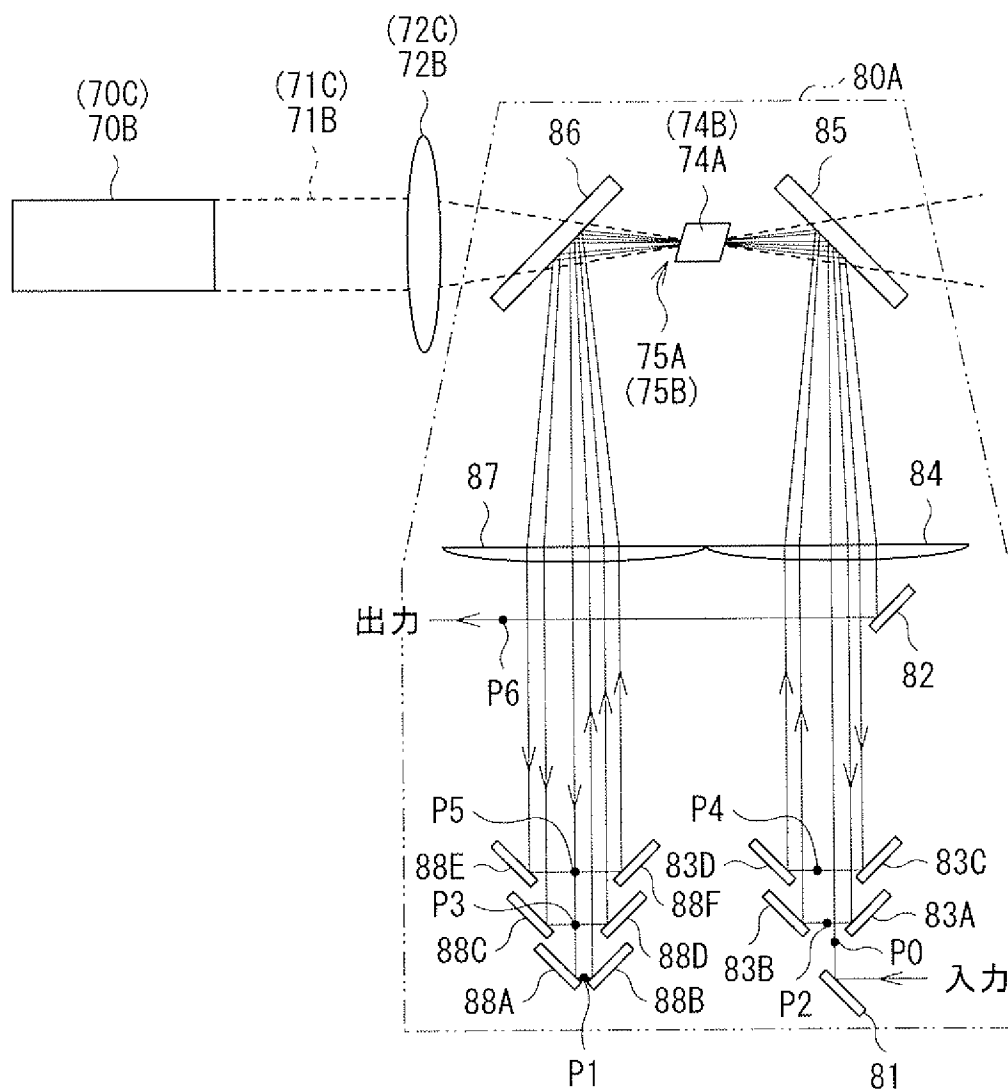
[図11]

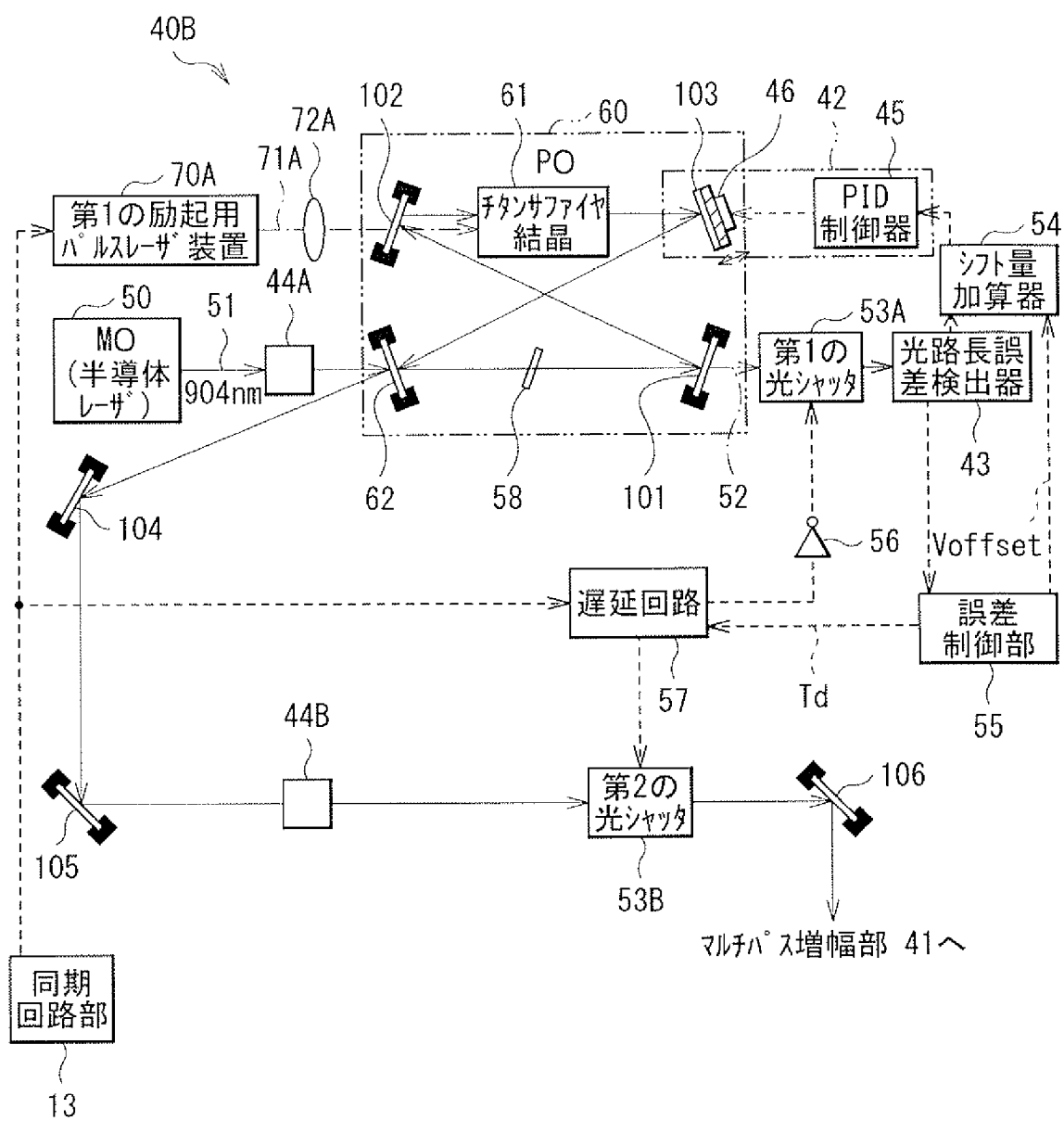


[図12]

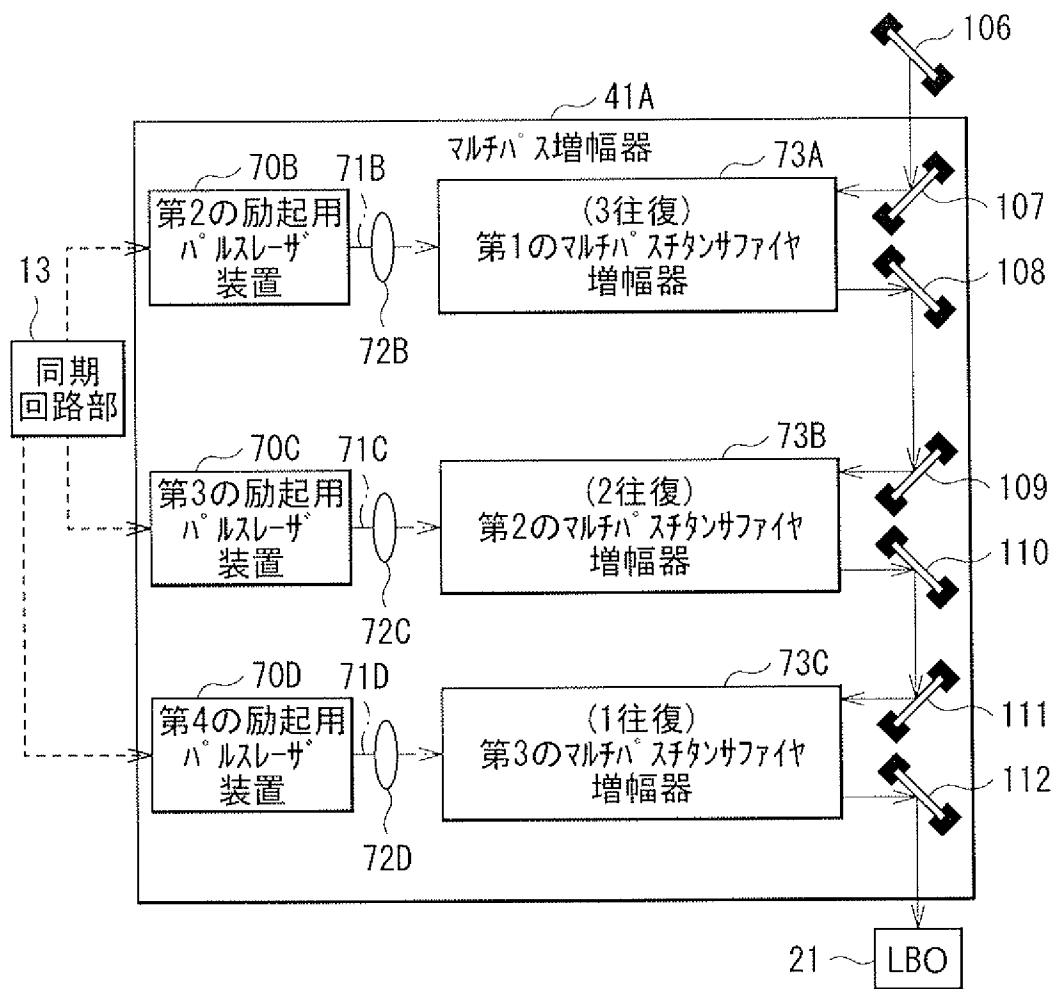


[図13]

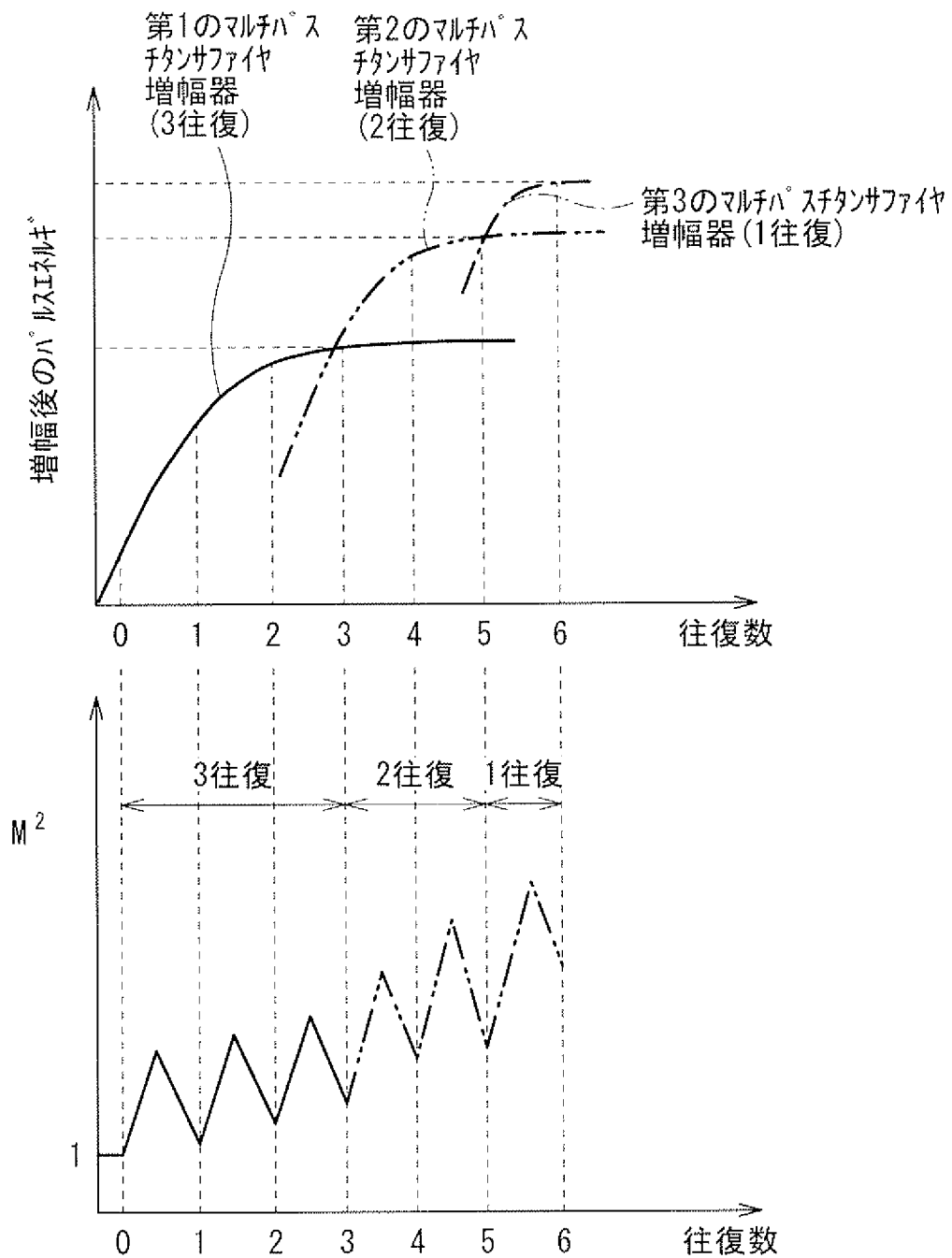


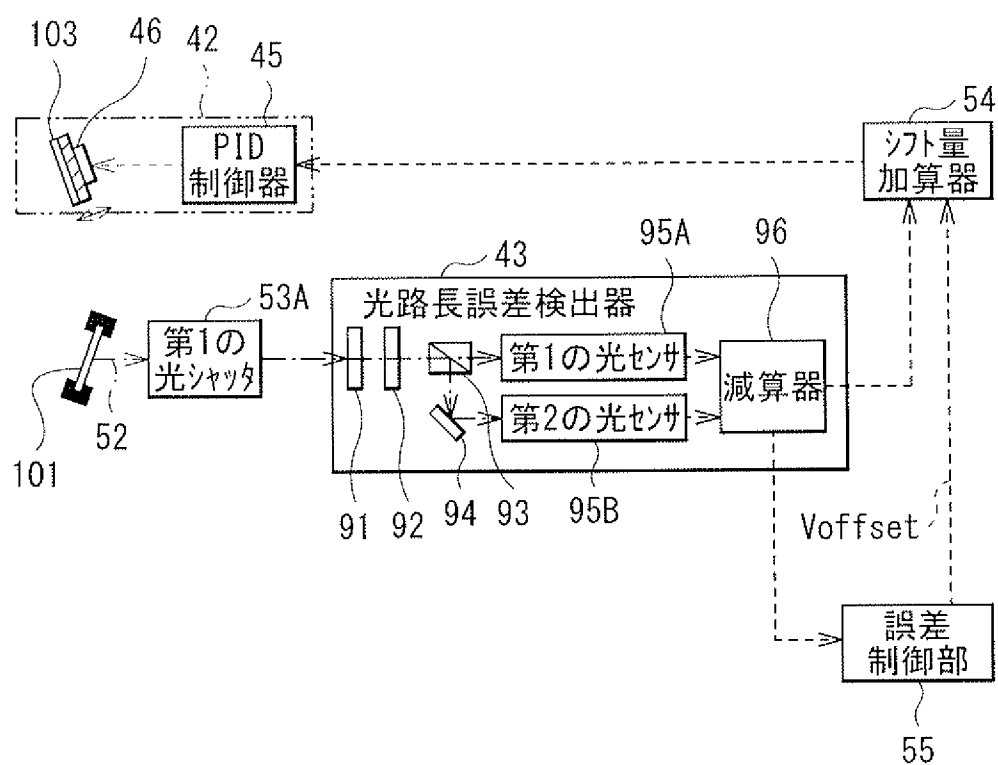
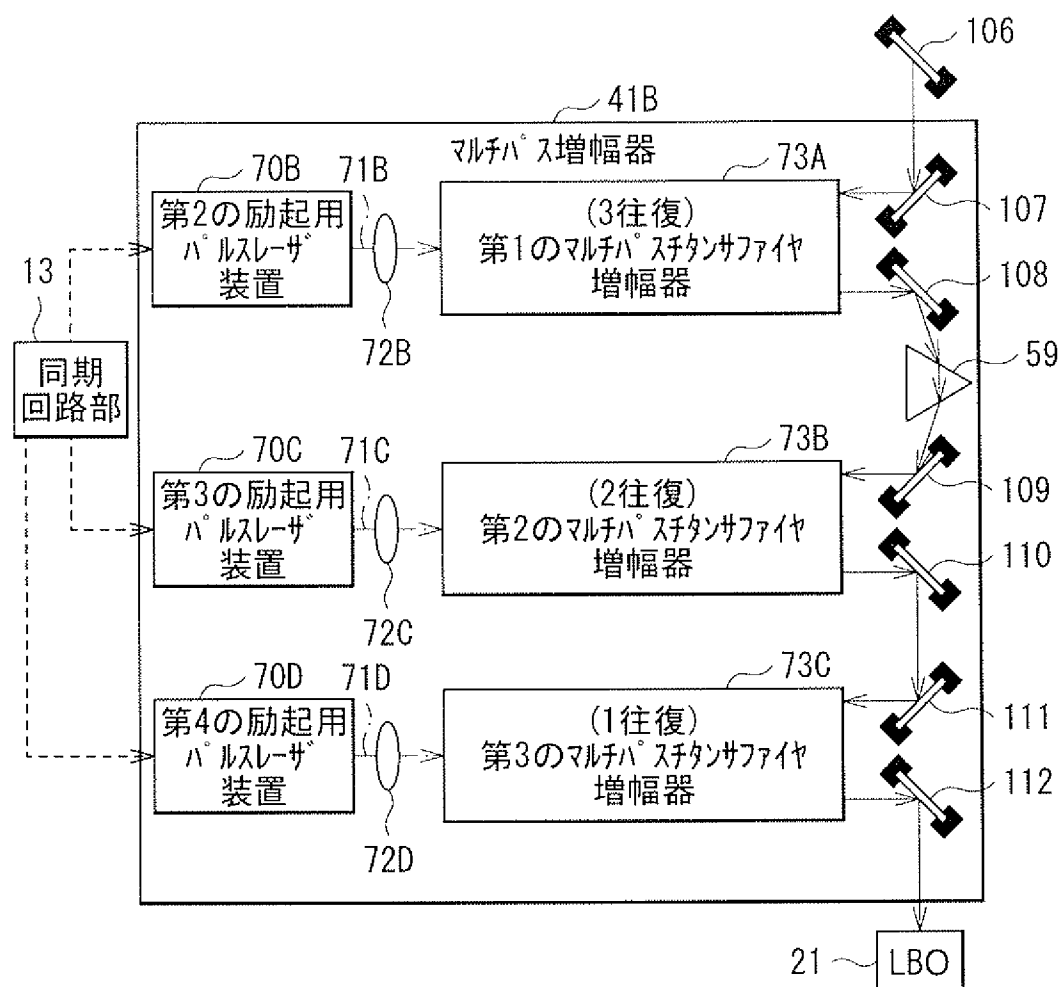


[図16]

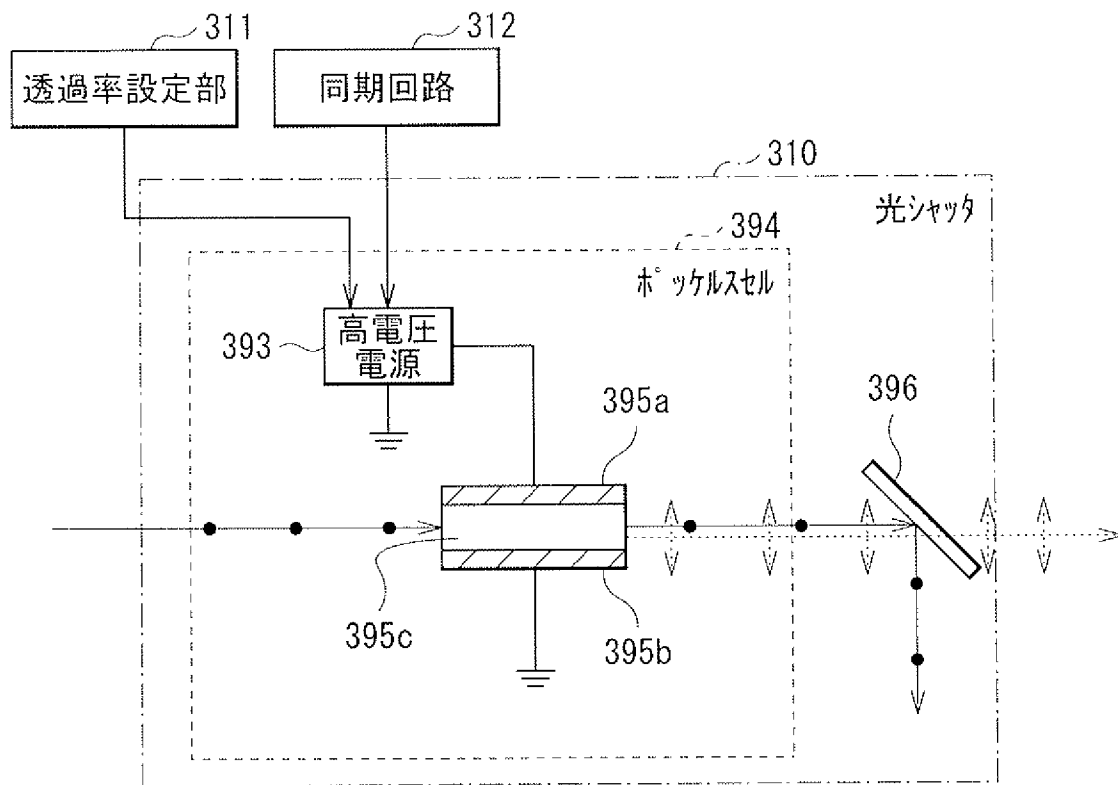


[図17]

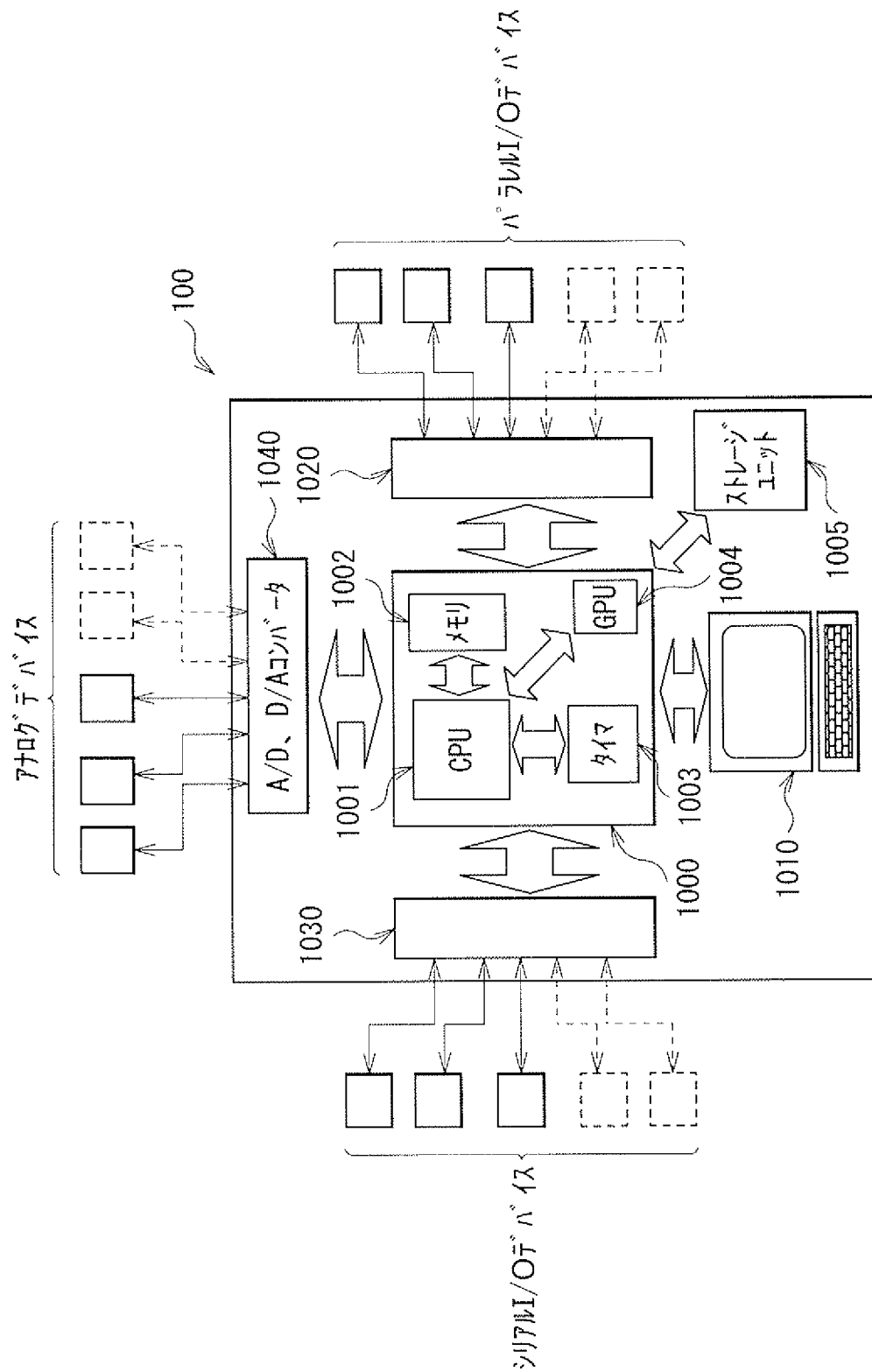




[図20]



[図21]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/084618

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01S3/16(2006.01)i, H01S3/083(2006.01)i, H01S3/23(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01S3/00-3/23

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

IEEE Xplore, Optics InfoBase

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	OPTICS LETTERS, 1992.05.15, Vol.17, No.10, 728-730	1, 2, 6 3-5, 7-14, 16
X Y	JP 2001-339115 A (Komatsu Ltd.), 07 December 2001 (07.12.2001), entire text; all drawings (Family: none)	1, 2, 6 4, 5, 7-14, 16
Y	JP 2013-222173 A (Gigaphoton Inc.), 28 October 2013 (28.10.2013), entire text; all drawings & US 2013/0279526 A1	5, 7-17
Y	JP 2012-204818 A (Gigaphoton Inc.), 22 October 2012 (22.10.2012), entire text; all drawings & US 2012/0250708 A1 & US 8514899 B2	7-17



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
16 March 2015 (16.03.15)

Date of mailing of the international search report
31 March 2015 (31.03.15)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/084618

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y X	US 5546222 A (Lightwave Electronics Corp.), 13 August 1996 (13.08.1996), entire text; all drawings (Family: none)	10-14 18-21
A	JP 63-85417 A (Shimadzu Corp.), 15 April 1988 (15.04.1988), entire text; all drawings (Family: none)	3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/084618

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

The technical feature common to claims 1, 15, 16, 17, 18 is amplifying seedlight using a titanium-sapphire crystal. However, this technical feature cannot be considered to be a special technical feature, since it does not make a contribution over the prior art in the light of the contents disclosed in document 1 and the like.

Further, there is no other same or corresponding special technical feature among these inventions.

Accordingly, claims are classified into three inventions each of which has a special technical feature indicated below.

(Continued to extra sheet)

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☒ As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- ☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/084618

Continuation of Box No.III of continuation of first sheet(2)

Claims 1-14 and 16:

An invention wherein an optical path length correction unit which changes an optical path length in an optical resonator is provided in an amplification/oscillation unit of a titanium-sapphire laser device.

Claims 15 and 17:

An invention wherein in a titanium-sapphire laser device, seed light outputted from an amplification/oscillation unit is incident on a multipass amplifier including a first titanium-sapphire crystal and a multipass amplifier including a second titanium-sapphire crystal in sequence.

Claims 18-21:

An invention wherein a titanium-sapphire amplifier is constituted of a multipass optical system including an image forming optical system.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01S3/16(2006.01)i, H01S3/083(2006.01)i, H01S3/23(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01S3/00-3/23

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2015年
日本国実用新案登録公報	1996-2015年
日本国登録実用新案公報	1994-2015年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

IEEE Xplore Optics InfoBase

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X Y	OPTICS LETTERS, 1992.05.15, Vol.17, No.10, 728-730	1, 2, 6 3-5, 7-14, 16
X Y	JP 2001-339115 A（株式会社小松製作所）2001.12.07, 全文、全図 （ファミリーなし）	1, 2, 6 4, 5, 7-14, 16
Y	JP 2013-222173 A（ギガフォトン株式会社）2013.10.28, 全文、全 図 & US 2013/0279526 A1	5, 7-17

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

16.03.2015

国際調査報告の発送日

31.03.2015

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

佐藤 宙子

2 X

9316

電話番号 03-3581-1101 内線 3294

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2012-204818 A (ギガフォトン株式会社) 2012. 10. 22, 全文、全図 & US 2012/0250708 A1 & US 8514899 B2	7-17
Y X	US 5546222 A (Lightwave Electronics Corporation) 1996. 08. 13, 全文、全図 (ファミリーなし)	10-14 18-21
A	JP 63-85417 A (株式会社島津製作所) 1988. 04. 15, 全文、全図 (ファミリーなし)	3

第II欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見（第1ページの2の続き）

法第8条第3項（PCT17条(2)(a)）の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. ☐ 請求項 _____ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。つまり、
2. ☐ 請求項 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、
3. ☐ 請求項 _____ は、従属請求の範囲であってPCT規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第III欄 発明の単一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるところの国際調査機関は認めた。

請求項1, 15, 16, 17, 18は、チタンサファイヤ結晶を用いてシード光の増幅を行う点を共通の技術的特徴とし、しかしながら、当該技術的特徴は、文献1等の開示内容に照らして先行技術に対する貢献をもたらすものではないため、特別な技術的特徴であるとはいえない。また、これらの発明の間には、他に同一の又は対応する特別な技術的特徴は存在しない。そして、請求の範囲は、各々下記の特別な技術的特徴を有する3の発明に区分される。請求項1-14, 16：チタンサファイヤレーザ装置の増幅発振部に、光共振器内の光路長を変化させる光路長補正部を設ける発明。

請求項15, 17：チタンサファイヤレーザ装置において、増幅発振部から出力されたシード光が、第1のチタンサファイヤ結晶を含むマルチパス増幅器と、第2のチタンサファイヤ結晶を含むマルチパス増幅器とに、順次入射される構成となす発明。

請求項18-21：チタンサファイヤ増幅器を、結像光学系を含むマルチパス光学システムから構成する発明。

1. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求項について作成した。
2. ☒ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求項について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求項のみについて作成した。
4. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求項について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

- ☐ 追加調査手数料及び、該当する場合には、異議申立手数料の納付と共に、出願人から異議申立てがあった。
- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあったが、異議申立手数料が納付命令書に示した期間内に支払われなかった。
- ☐ 追加調査手数料の納付はあったが、異議申立てはなかった。