

(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
2024年3月7日(07.03.2024)



(10) 国際公開番号
WO 2024/047871 A1

(51) 国際特許分類:
H01S 3/105 (2006.01) **H01S 3/0943** (2006.01)
G03F 7/20 (2006.01) **H01S 3/10** (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2022/033143

(22) 国際出願日: 2022年9月2日(02.09.2022)

(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: 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 4 0 0 番地 Tochigi (JP).

(72) 発明者: 服部 正和 (**HATTORI Masakazu**); 〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田 4 0 0 番地 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP).

(74) 代理人: 保坂 延寿 (**HOSAKA Nobuhisa**); 〒1010025 東京都千代田区神田佐久間町 3

- 2 2 神田 S K ビル 4 階 新井・橋本・保坂国際特許事務所 Tokyo (JP).

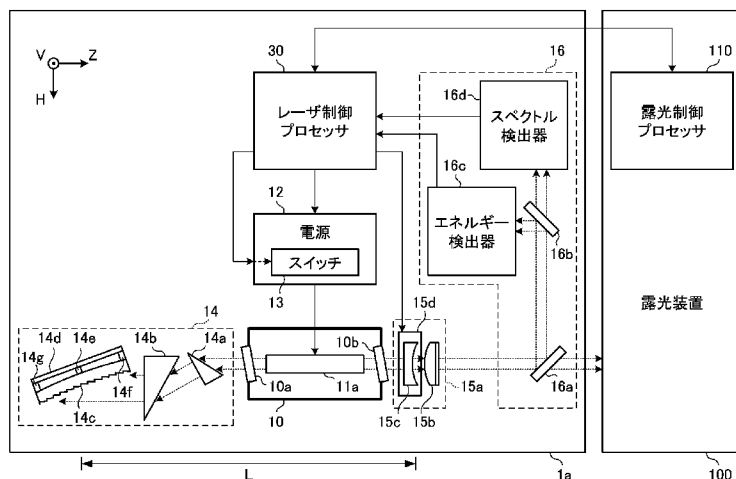
(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU,

(54) **Title:** NARROW-BAND LASER APPARATUS AND METHOD FOR MANUFACTURING ELECTRONIC DEVICE

(54) 発明の名称: 狭帯域化レーザ装置、及び電子デバイスの製造方法

[図8]



12... ELECTRIC POWER SUPPLY
13... SWITCH
16c... ENERGY DETECTOR
16d... SPECTRUM DETECTOR
30... LASER CONTROL PROCESSOR
100... EXPOSURE APPARATUS
110... EXPOSURE CONTROL PROCESSOR

(57) **Abstract:** A narrow-band laser apparatus according to the present invention comprises: a laser resonator that includes an output coupling mirror and a narrow-band module, the narrow-band module including a prism and a grating, a reflecting surface of the grating being concave; a laser chamber that is disposed in an optical path of the laser resonator, the laser chamber including a pair of discharge electrodes; an electric power supply that applies a high-voltage pulse to the discharge electrodes, the repetition frequency of the high-voltage pulse being variable; a wavefront regulator that includes an output coupling mirror; a spectrum detector for measuring a spectral line width of pulsed laser radiation that is outputted from the output coupling mirror; and a processor that controls the wavefront regulator on the basis of the measured spectral line width.

[続葉有]



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), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

一 国際調査報告（条約第21条(3)）

(57) 要約：狭帯域化レーザ装置は、出力結合ミラー及び狭帯域化モジュールを含むレーザ共振器であって、狭帯域化モジュールがプリズム及びグレーティングを含み、グレーティングの反射面が凹面状である、レーザ共振器と、一対の放電電極を含み、レーザ共振器の光路に配置されたレーザチャンバと、放電電極に高電圧パルス印加する電源であって、高電圧パルスの繰り返し周波数が可変である電源と、出力結合ミラーを含む波面調節器と、出力結合ミラーから出力されたパルスレーザ光のスペクトル線幅を計測するためのスペクトル検出器と、計測されたスペクトル線幅に基づいて波面調節器を制御するプロセッサと、を備える。

明 細 書

発明の名称：狭帯域化レーザ装置、及び電子デバイスの製造方法 技術分野

[0001] 本開示は、狭帯域化レーザ装置、及び電子デバイスの製造方法に関する。

背景技術

[0002] 近年、半導体露光装置においては、半導体集積回路の微細化及び高集積化につれて、解像力の向上が要請されている。このため、露光用光源から放出される光の短波長化が進められている。たとえば、露光用のガスレーザ装置としては、波長約248nmのレーザ光を出力するKrFエキシマレーザ装置、ならびに波長約193nmのレーザ光を出力するArFエキシマレーザ装置が用いられる。

[0003] KrFエキシマレーザ装置及びArFエキシマレーザ装置の自然発振光のスペクトル線幅は、350～400pmと広い。そのため、KrF及びArFレーザ光のような紫外線を透過させる材料で投影レンズを構成すると、色収差が発生してしまう場合がある。その結果、解像力が低下し得る。そこで、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、色収差が無視できる程度となるまで狭帯域化する必要がある。そのため、ガスレーザ装置のレーザ共振器内には、スペクトル線幅を狭帯域化するために、狭帯域化素子（エタロンやグレーティング等）を含む狭帯域化モジュール（Line Narrowing Module：LNM）が備えられる場合がある。スペクトル線幅が狭帯域化されるガスレーザ装置を狭帯域化ガスレーザ装置という。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：米国特許出願公開第2007／014326号明細書

特許文献2：米国特許第6526086号明細書

概要

[0005] 本開示の1つの観点に係る狭帯域化レーザ装置は、出力結合ミラー及び狭

帯域化モジュールを含むレーザ共振器であって、狭帯域化モジュールがプリズム及びグレーティングを含み、グレーティングの反射面が凹面状である、レーザ共振器と、一对の放電電極を含み、レーザ共振器の光路に配置されたレーザチャンバと、放電電極に高電圧パルスを印加する電源であって、高電圧パルスの繰り返し周波数が可変である電源と、出力結合ミラーを含む波面調節器と、出力結合ミラーから出力されたパルスレーザ光のスペクトル線幅を計測するためのスペクトル検出器と、計測されたスペクトル線幅に基づいて波面調節器を制御するプロセッサと、を備える。

[0006] 本開示の1つの観点に係る電子デバイスの製造方法は、出力結合ミラー及び狭帯域化モジュールを含むレーザ共振器であって、狭帯域化モジュールがプリズム及びグレーティングを含み、グレーティングの反射面が凹面状である、レーザ共振器と、一对の放電電極を含み、レーザ共振器の光路に配置されたレーザチャンバと、放電電極に高電圧パルスを印加する電源であって、高電圧パルスの繰り返し周波数が可変である電源と、出力結合ミラーを含む波面調節器と、出力結合ミラーから出力されたパルスレーザ光のスペクトル線幅を計測するためのスペクトル検出器と、計測されたスペクトル線幅に基づいて波面調節器を制御するプロセッサと、を備える狭帯域化レーザ装置によってパルスレーザ光を生成し、パルスレーザ光を露光装置に出力し、電子デバイスを製造するために、露光装置内で感光基板上にパルスレーザ光を露光することを含む。

図面の簡単な説明

[0007] 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、比較例における露光システムの構成を概略的に示す。

[図2]図2は、比較例に係るレーザ装置の構成を概略的に示す。

[図3]図3は、パルスレーザ光の出力タイミングの例を示すグラフである。

[図4]図4は、比較例におけるスペクトル線幅制御の手順を示すフローチャートである。

[図5]図5は、E95について説明するためのスペクトル波形の例を示す。

[図6]図6は、比較例におけるパルスレーザ光の繰り返し周波数に応じたスペクトル線幅の変動の計測結果を示す。

[図7]図7は、比較例におけるパルスレーザ光の繰り返し周波数に応じたスペクトル線幅の変動のシミュレーション結果を示す。

[図8]図8は、第1の実施形態に係るレーザ装置の構成を概略的に示す。

[図9]図9は、第1の実施形態における狭帯域化モジュールの構成を示す。

[図10]図10は、第1の実施形態における波面調節器の構成を示す。

[図11]図11は、グレーティング及び波面調節器のgパラメータに応じたパルスレーザ光のスペクトル線幅のシミュレーション結果を示すグラフである。

[図12]図12は、第1の実施形態におけるパルスレーザ光の繰り返し周波数に応じたスペクトル線幅の変動の計測結果を示す。

[図13]図13は、第1の実施形態におけるパルスレーザ光の繰り返し周波数に応じたスペクトル線幅の変動のシミュレーション結果を示す。

[図14]図14は、グレーティングのgパラメータとパルスエネルギーとの関係をシミュレーションした結果を示すグラフである。

[図15]図15は、第2の実施形態におけるレーザ装置の構成を概略的に示す。

[図16]図16は、第3の実施形態におけるレーザ装置の構成を概略的に示す。

[図17]図17は、図16に示されるパワーオシレータを図16と異なる方向から見た様子を示す。

実施形態

[0008] <内容>

1. 比較例

1. 1 露光装置100の構成

1. 2 露光装置100の動作

1. 3 レーザ装置 1 の構成
 1. 3. 1 レーザ共振器
 1. 3. 2 モニタモジュール 1 6
1. 4 レーザ装置 1 の動作
 1. 4. 1 レーザ制御プロセッサ 3 0
 1. 4. 2 レーザ発振
 1. 4. 3 モニタモジュール 1 6
 1. 4. 4 バースト発振
 1. 4. 5 スペクトル線幅制御
1. 5 比較例の課題
2. 凹面状のグレーティング 1 4 c を含むレーザ装置 1 a
 2. 1 構成
 2. 2 グレーティング 1 4 c の g パラメータ $g_Grating$
 2. 3 波面調節器 1 5 a の g パラメータ g_EFM
 2. 4 g パラメータとスペクトル線幅との関係
 2. 5 g パラメータとパルスエネルギーとの関係
 2. 6 作用
3. マスターオシレータ MO 及びパワーオシレータ PO を含むレーザ装置 1 b
 3. 1 構成
 3. 2 動作
 3. 2. 1 レーザ制御プロセッサ 3 0
 3. 2. 2 マスターオシレータ MO
 3. 2. 3 パワーオシレータ PO
 3. 3 作用
4. リング共振器を含むレーザ装置 1 c
 4. 1 構成
 4. 2 動作

4. 3 作用

5. その他

[0009] 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。

[0010] 1. 比較例

図1は、比較例における露光システムの構成を概略的に示す。本開示の比較例とは、出願人のみによって知られていると出願人が認識している形態であって、出願人が自認している公知例ではない。

[0011] 露光システムは、レーザ装置1と、露光装置100と、を含む。レーザ装置1は、レーザ制御プロセッサ30を含む。レーザ制御プロセッサ30は、制御プログラムが記憶されたメモリ302と、制御プログラムを実行するCPU (central processing unit) 301と、を含む処理装置である。レーザ制御プロセッサ30は本開示に含まれる各種処理を実行するために特別に構成又はプログラムされている。レーザ制御プロセッサ30は本開示におけるプロセッサに相当する。レーザ装置1は、本開示における狭帯域化レーザ装置に相当し、パルスレーザ光を露光装置100に向けて出力するように構成されている。

[0012] 1. 1 露光装置100の構成

露光装置100は、照明光学系101と、投影光学系102と、露光制御プロセッサ110と、を含む。

照明光学系101は、レーザ装置1から入射したパルスレーザ光によって、レチクルステージRT上に配置された図示しないレチクルのレチクルパターンを照明する。

投影光学系102は、レチクルを透過したパルスレーザ光を、縮小投影し

てワークピーステーブルWT上に配置された図示しないワークピースに結像させる。ワークピースはレジスト膜が塗布された半導体ウエハ等の感光基板である。

[0013] 露光制御プロセッサ110は、制御プログラムが記憶されたメモリ112と、制御プログラムを実行するCPU111と、を含む処理装置である。露光制御プロセッサ110は本開示に含まれる各種処理を実行するために特別に構成又はプログラムされている。露光制御プロセッサ110は、露光装置100の制御を統括するとともに、レーザ制御プロセッサ30との間で各種データ及び各種信号を送受信する。

[0014] 1. 2 露光装置100の動作

露光制御プロセッサ110は、目標スペクトル線幅及び目標パルスエネルギーの設定データ、及びトリガ信号をレーザ制御プロセッサ30に送信する。レーザ制御プロセッサ30は、これらのデータ及び信号に従ってレーザ装置1を制御する。

露光制御プロセッサ110は、レチクルステージRTとワークピーステーブルWTとを同期して互いに逆方向に平行移動させる。これにより、レチクルパターンを反映したパルスレーザ光でワークピースが露光される。

このような露光工程によって半導体ウエハにレチクルパターンが転写される。その後、複数の工程を経ることで電子デバイスを製造することができる。

[0015] 1. 3 レーザ装置1の構成

図2は、比較例に係るレーザ装置1の構成を概略的に示す。レーザ装置1は、レーザチャンバ10と、放電電極11aと、電源12と、狭帯域化モジュール14と、波面調節器15aと、モニタモジュール16と、レーザ制御プロセッサ30と、を含む。レーザ装置1は露光装置100に接続可能とされている。

[0016] 1. 3. 1 レーザ共振器

波面調節器15aは出力結合ミラーを含み、この出力結合ミラーと狭帯域

化モジュール14とで、レーザ共振器が構成される。レーザチャンバ10は、レーザ共振器の光路に配置されている。レーザチャンバ10の両端にはウインドウ10a及び10bが設けられている。レーザチャンバ10の内部に、放電電極11a及びこれと対をなす図示しない放電電極が配置されている。図示しない放電電極は、紙面に垂直なV軸の方向において放電電極11aと重なるように位置している。V軸の方向は本開示における第1方向に相当する。レーザチャンバ10には、例えばレアガスとしてアルゴンガス又はクリプトンガス、ハロゲンガスとしてフッ素ガス、バッファガスとしてネオンガス等を含むレーザガスが封入される。

電源12は、スイッチ13を含むとともに、放電電極11aと図示しない充電器とに接続されている。

[0017] 狭帯域化モジュール14は、複数のプリズム14a及び14bとグレーティング14cとを含む。プリズム14a及び14bは、ウインドウ10aから出射した光の光路にこの順で配置されている。光が入出射するプリズム14a及び14bの表面はいずれもV軸に平行である。

グレーティング14cは、プリズム14a及び14bを透過した光の光路に配置されている。グレーティング14cの溝の方向は、V軸に平行である。

[0018] 波面調節器15aは、シリンドリカル凸レンズ15bと、シリンドリカル凹レンズ15cと、を含む。

シリンドリカル凸レンズ15bは、部分反射膜が形成された平らな表面と、この表面と反対側の凸面と、を含むシリンドリカル平凸レンズである。シリンドリカル凸レンズ15bの焦点軸はV軸に平行である。

シリンドリカル凹レンズ15cは、平らな表面と、この表面と反対側の凹面と、を含むシリンドリカル平凹レンズである。シリンドリカル凹レンズ15cの焦点軸はV軸に平行である。シリンドリカル凹レンズ15cは、リニアステージ15dに支持されている。リニアステージ15dは、シリンドリカル凹レンズ15cをレーザ共振器の光路に沿って移動させる図示しないア

クチュエータと、レーザ制御プロセッサ 30 からの制御信号に応じてアクチュエータを駆動する図示しないドライバと、を含む。

[0019] シリンドリカル凸レンズ 15 b の凸面とシリンドリカル凹レンズ 15 c の凹面とは互いに向かい合っている。シリンドリカル凸レンズ 15 b の平らな表面は出力結合ミラーを構成し、波面調節器 15 a を構成するシリンドリカル凸レンズ 15 b の凸面とシリンドリカル凹レンズ 15 c とは出力結合ミラーとレーザチャンバ 10 との間に位置する。

ここではシリンドリカル凸レンズ 15 b の平らな表面が出力結合ミラーを構成する場合について説明したが、シリンドリカル凸レンズと出力結合ミラーとは別々の光学部品で構成されてもよい。すなわち、波面調節器 15 a は、シリンドリカル凸レンズ 15 b の代わりに、平面基板又はウェッジ基板で構成され部分反射膜を有する出力結合ミラーと、この出力結合ミラーとレーザチャンバ 10 との間に位置し部分反射膜を有しないシリンドリカル凸レンズと、を含んでもよい。

[0020] 1. 3. 2 モニタモジュール 16

モニタモジュール 16 は、波面調節器 15 a に含まれる出力結合ミラーから出力されたパルスレーザ光の光路に位置する。モニタモジュール 16 は、ビームスプリッタ 16 a 及び 16 b と、エネルギー検出器 16 c と、スペクトル検出器 16 d と、を含む。

[0021] ビームスプリッタ 16 a は、出力結合ミラーから出力されたパルスレーザ光の光路に位置する。ビームスプリッタ 16 a は、パルスレーザ光の一部を露光装置 100 に向けて高い透過率で透過させるとともに、他の一部を反射するように構成されている。ビームスプリッタ 16 b は、ビームスプリッタ 16 a によって反射されたパルスレーザ光の光路に位置する。エネルギー検出器 16 c は、ビームスプリッタ 16 b によって反射されたパルスレーザ光の光路に位置する。スペクトル検出器 16 d は、ビームスプリッタ 16 b を透過したパルスレーザ光の光路に位置する。スペクトル検出器 16 d は、図示しないエタロン及び光分布センサを含む。

[0022] 1. 4 レーザ装置 1 の動作

1. 4. 1 レーザ制御プロセッサ 30

レーザ制御プロセッサ 30 は、露光制御プロセッサ 110 から受信した目標パルスエネルギーの設定データに基づいて、放電電極 11a に印加される印加電圧の設定データを電源 12 に送信する。レーザ制御プロセッサ 30 は、露光制御プロセッサ 110 から受信した目標スペクトル線幅の設定データに基づいて、波面調節器 15a に含まれるリニアステージ 15d に制御信号を送信する。また、レーザ制御プロセッサ 30 は、露光制御プロセッサ 110 から受信したトリガ信号に基づく発振トリガ信号を電源 12 に含まれるスイッチ 13 に送信する。

[0023] 1. 4. 2 レーザ発振

スイッチ 13 は、レーザ制御プロセッサ 30 から発振トリガ信号を受信するとオン状態となる。電源 12 は、スイッチ 13 がオン状態となると、図示しない充電器に充電された電気エネルギーから高電圧パルスを生成し、この高電圧パルスを放電電極 11a に印加する。

[0024] 放電電極 11a に高電圧パルスが印加されると、レーザチャンバ 10 の内部に放電が起こる。この放電のエネルギーにより、レーザチャンバ 10 内のレーザ媒質が励起されて高エネルギー準位に移行する。励起されたレーザ媒質が、その後低エネルギー準位に移行するとき、そのエネルギー準位差に応じた波長の光を放出する。

[0025] レーザチャンバ 10 の内部で発生した光は、ウインドウ 10a 及び 10b を介してレーザチャンバ 10 の外部に出射する。レーザチャンバ 10 のウインドウ 10a から出射した光は、プリズム 14a 及び 14b によってビーム幅を拡大させられて、グレーティング 14c に入射する。

プリズム 14a 及び 14b からグレーティング 14c に入射した光は、グレーティング 14c の複数の溝によって反射されるとともに、光の波長に応じた方向に回折させられる。

[0026] プリズム 14a 及び 14b は、グレーティング 14c からの回折光のビー

ム幅を縮小させるとともに、その光を、ウインドウ 10 a を介してレーザチャンバ 10 に戻す。

波面調節器 15 a に含まれる出力結合ミラーは、レーザチャンバ 10 のウインドウ 10 b から出射した光のうちの一部を透過させて出力し、他の一部を反射してウインドウ 10 b を介してレーザチャンバ 10 の内部に戻す。

[0027] このようにして、レーザチャンバ 10 から出射した光は、狭帯域化モジュール 14 と出力結合ミラーとの間で往復し、レーザチャンバ 10 の内部の放電空間を通過する度に増幅される。この光は、狭帯域化モジュール 14 で折り返される度に狭帯域化される。このようにしてレーザ発振し狭帯域化された光が、出力結合ミラーからパルスレーザ光として出力される。パルスレーザ光の繰り返し周波数は放電電極 11 a に印加される高電圧パルスの繰り返し周波数と同じであり、この繰り返し周波数は露光装置 100 から受信するトリガ信号の繰り返し周波数に応じて変化する。

[0028] 1. 4. 3 モニタモジュール 16

エネルギー検出器 16 c は、パルスレーザ光のパルスエネルギーを検出し、パルスエネルギーのデータをレーザ制御プロセッサ 30 に出力する。パルスエネルギーのデータは、レーザ制御プロセッサ 30 が放電電極 11 a に印加される印加電圧の設定データをフィードバック制御するのに用いられる。

[0029] スペクトル検出器 16 d において、図示しないエタロンによって形成される干渉縞が図示しない光分布センサによって計測され、干渉縞の光強度分布を示すフリンジ波形が生成される。

[0030] 1. 4. 4 バースト発振

図 3 は、パルスレーザ光の出力タイミングの例を示すグラフである。レーザ装置 1 は、露光制御プロセッサ 110 からのトリガ信号に従い、ある期間にわたって一定値以上の繰り返し周波数でレーザ発振を行う。一定値以上の繰り返し周波数でレーザ発振を行い、パルスレーザ光を出力することを「バースト発振」という。

[0031] 露光制御プロセッサ 110 からのトリガ信号が休止すると、レーザ装置 1

はバースト発振を休止する。その後、露光制御プロセッサ 110 からのトリガ信号に従い、レーザ装置 1 は再度バースト発振を行う。第 1 のバースト発振とその次の第 2 のバースト発振との間の期間を「休止期間」という。

[0032] バースト発振が行われる期間は、例えば、露光装置 100 において半導体ウエハの 1 つの露光エリアの露光を行う期間に相当する。休止期間は、例えば、露光装置 100 において 1 つの露光エリアから他の露光エリアにレチクルパターンの結像位置を移動する期間や、半導体ウエハを交換する期間に相当する。

[0033] 1. 4. 5 スペクトル線幅制御

図 2 を再び参照し、波面調節器 15 a に含まれるリニアステージ 15 d は、レーザ制御プロセッサ 30 から出力される制御信号に応じて、レーザチャンバ 10 とシリンドリカル凸レンズ 15 b との間の光路に沿ってシリンドリカル凹レンズ 15 c を移動させる。これにより、波面調節器 15 a から狭帯域化モジュール 14 へ向かう光の波面が変化する。波面が変化することにより、パルスレーザ光のスペクトル線幅が変化する。

[0034] 図 4 は、比較例におけるスペクトル線幅制御の手順を示すフローチャートである。図 4 に示される処理は、数パルスから数十パルスのパルスレーザ光が出力されるごとに実行される。

S 1 において、レーザ制御プロセッサ 30 は、露光装置 100 から目標スペクトル線幅を受信する。

[0035] S 2 において、レーザ制御プロセッサ 30 は、スペクトル検出器 16 d から出力されるフリンジ波形のデータに基づいてスペクトル線幅を算出する。

具体的には、レーザ制御プロセッサ 30 は、フリンジ波形のうちのエタロンのフリースペクトラルレンジに相当する一部分の波形を抽出する。フリンジ波形から抽出された一部分の波形は、干渉縞を構成する同心円の中心からの距離と光強度との関係を示している。次に、レーザ制御プロセッサ 30 は、この波形を、波長と光強度との関係に座標変換することにより、スペクトル波形を取得する。レーザ制御プロセッサ 30 は、スペクトル波形に基づい

てスペクトル線幅を算出する。スペクトル線幅は、半値全幅でもよいし、E 95 と呼ばれる指標でもよい。

[0036] 図5は、E 95 について説明するためのスペクトル波形の例を示す。図5の横軸は波長を示し、縦軸は光強度を示す。このスペクトルの全体のエネルギーのうち、中心波長 λ_0 を中心として95%を占める部分の全幅をE 95 とする。

[0037] 図4を再び参照し、S3において、レーザ制御プロセッサ30は、受信した目標スペクトル線幅と算出されたスペクトル線幅との差 $\Delta\lambda$ を算出する。

S4において、レーザ制御プロセッサ30は、差 $\Delta\lambda$ に基づいて波面調節器15aに制御信号を送信する。これにより、パルスレーザ光のスペクトル線幅がフィードバック制御される。

[0038] S5において、レーザ制御プロセッサ30は、スペクトル線幅の制御を終了するか否かを判定する。例えば、パルスレーザ光を一定の繰り返し周波数で出力するバースト発振が終了して休止期間に入る場合、スペクトル線幅の制御を終了する。スペクトル線幅の制御を終了する場合（S5：YES）、レーザ制御プロセッサ30は本フローチャートの処理を終了する。スペクトル線幅の制御を終了しない場合（S5：NO）、レーザ制御プロセッサ30はS1に処理を戻して上述の動作を繰り返す。

[0039] 1. 5 比較例の課題

図6は、比較例におけるパルスレーザ光の繰り返し周波数に応じたスペクトル線幅の変動の計測結果を示す。スペクトル線幅の変動は、以下の手順により計測される。まず、パルスレーザ光の繰り返し周波数を6000Hzとして第1のバースト発振を行い、波面調節器15aを用いたスペクトル線幅の制御を行う。その後、波面調節器15aを用いたスペクトル線幅の制御を中止し、パルスレーザ光の繰り返し周波数を例えば4500Hzとして第1のバースト発振の次の第2のバースト発振を行う。第1のバースト発振における目標スペクトル線幅と、第2のバースト発振における最初のパルスから

所定数のパルスのスペクトル線幅の平均値との差をスペクトル線幅の変動とする。同様に、繰り返し周波数を6000Hzとして第1のバースト発振を行った後、他の繰り返し周波数に切り替えてスペクトル線幅の変動を計測する。

[0040] 図6においては、パルスレーザ光の繰り返し周波数の変化によりスペクトル線幅が最大で50fm変動したことが示されている。繰り返し周波数の変化によるスペクトル線幅変動の最大値を以下では変動幅という。

[0041] 図7は、比較例におけるパルスレーザ光の繰り返し周波数に応じたスペクトル線幅の変動のシミュレーション結果を示す。

図7においては、パルスレーザ光の繰り返し周波数の変化によるスペクトル線幅の変動幅が59fmであることが示されている。

[0042] レーザ装置1においてパルスレーザ光を生成するとき、レーザチャンバ10の内部で音響波が発生する。音響波はガスの粗密波であり、レーザチャンバ10の内部のレーザ共振器の光路に音響波が到達すると、ガスの粗密により光路に屈折率分布が発生する。光路の屈折率分布により、狭帯域化モジュール14へ向かう光の波面が変化し、パルスレーザ光のスペクトル線幅が変化する。光路に音響波が到達するタイミングと光が通過するタイミングとの関係はパルスレーザ光の繰り返し周波数に依存するため、パルスレーザ光の繰り返し周波数を変更するとパルスレーザ光のスペクトル線幅が変化するものと考えられる。

[0043] 図4を参照しながら説明したようにスペクトル線幅は波面調節器15aを用いてフィードバック制御されるが、パルスレーザ光の繰り返し周波数を切り替えるタイミングではスペクトル線幅が大幅に変化し、その後フィードバック制御により目標スペクトル線幅に収束するまでには時間を要することがある。

[0044] パルスレーザ光の繰り返し周波数を変更されるのは、例えば以下のような場合である。

(a) 露光制御プロセッサ110から受信するトリガ信号の繰り返し周波数

が変わった場合

(b) レーザ装置 1 のアライメントを行う際に繰り返し周波数を変更し、アライメントの終了後に元の繰り返し周波数に戻す場合

(c) レーザ装置 1 のキャリブレーションを行う際に繰り返し周波数を変更し、キャリブレーションの終了後に元の繰り返し周波数に戻す場合

[0045] 以下に説明する実施形態は、パルスレーザ光の繰り返し周波数に変更されたときのスペクトル線幅の変動を抑制することに関連している。

[0046] 2. 凹面状のグレーティング 14 c を含むレーザ装置 1 a

2. 1 構成

図 8 は、第 1 の実施形態に係るレーザ装置 1 a の構成を概略的に示す。レーザ装置 1 a に含まれる狭帯域化モジュール 14 は、凹面状の反射面を有するグレーティング 14 c を含む。グレーティング 14 c の反射面の形状を調整するために、ホルダ 14 d、伸縮部 14 e、支持部 14 f 及び 14 g を含むグレーティング曲げ機構が設けられてもよい。

[0047] 図 9 は、第 1 の実施形態における狭帯域化モジュール 14 の構成を示す。グレーティング曲げ機構に含まれるホルダ 14 d は、グレーティング 14 c の裏面に対向して位置し、支持部 14 f 及び 14 g はグレーティング 14 c の両端を支持する。支持部 14 f 及び 14 g の間に位置する伸縮部 14 e は、例えばボルトを含み、グレーティング 14 c の中央部とホルダ 14 d との間隔を調整することにより、グレーティング 14 c の反射面 14 h の曲率を調整できるように構成されている。間隔を狭くすると反射面 14 h は凹面状となり、間隔を広くすると反射面 14 h は凸面状となる。

[0048] グレーティング 14 c は V 軸に平行な複数の溝及び稜線を含み、これらの溝及び稜線は V 軸に垂直な方向に交互に並んで配置されている。これらの稜線を含む曲面、すなわち、グレーティング 14 c の溝をすべて埋めたときにできるグレーティング 14 c の表面を、グレーティング 14 c の反射面 14 h とする。反射面 14 h は V 軸に垂直な面内に湾曲した円筒形の一部であってもよく、この円筒の半径を曲率半径 R_{Grating} とする。反射面 1

4 hの曲率半径 $R_Grating$ は、グレーティング14 cで回折してプリズム14 bへ向かう光の波面を図示しない波面計測器で計測した計測結果から算出することができる。波面計測器としては米国Zygo CorporationのGP1-XPを用いることができる。

[0049] レーザチャンバ10からプリズム14 aに入射する光のV軸に垂直な方向のビーム幅を $w1$ とし、プリズム14 bからグレーティング14 cに入射する光のV軸に垂直な方向のビーム幅を $w2$ とすると、プリズム14 a及び14 bのビーム拡大率 M は以下の式で与えられる。

$$M = w2 / w1$$

[0050] 2. 2 グレーティング14 cの g パラメータ $g_Grating$

プリズム14 bからグレーティング14 cに入射する光の入射角を θ とする。グレーティング14 cと波面調節器15 aとの主点間の光路長を L とする(図8参照)。このとき、グレーティング14 cの g パラメータ $g_Grating$ は以下の式で定義される。

$$g_Grating = 1 - (L \times M^2) / (R_Grating \times \cos \theta)$$

[0051] 反射面14 hが凹面であるとき、 g パラメータ $g_Grating$ は1より小さい値となる。例えば、グレーティング14 cと波面調節器15 aとの主点間の光路長 L を 1×10^3 mmとし、プリズム14 a及び14 bのビーム拡大率 M を40倍とし、反射面14 hを曲率半径 $R_Grating$ が 1×10^7 mmである凹面とし、プリズム14 bからグレーティング14 cに入射する光の入射角 θ を70度としたとき、 g パラメータ $g_Grating$ は約0.53となる。

反射面14 hが凸面であるとき、 g パラメータ $g_Grating$ は1より大きい値となる。

[0052] 2. 3 波面調節器15 aの g パラメータ g_EFM

図10は、第1の実施形態における波面調節器15 aの構成を示す。シリンドリカル凹レンズ15 cの焦点軸を $F1$ 、焦点距離を $f1$ とし、シリンド

リカル凸レンズ15bの焦点軸をF2、焦点距離をf2とし、シリンダリカル凹レンズ15cとシリンダリカル凸レンズ15bとの主点間の距離をdとする。波面調節器15aのgパラメータg_{EFM}は以下のように算出される。

[0053] まず、レーザチャンバ10から波面調節器15aに入射し、シリンダリカル凸レンズ15bの部分反射膜15eによって反射されてレーザチャンバ10に戻る光路における波面調節器15aの合成焦点距離f_{EFM}を算出する。レーザチャンバ10から部分反射膜15eまでの合成焦点距離f_{EFM1}は以下の通りである。

$$f_{EFM1} = (f_1 \times f_2) / (f_1 + f_2 - d)$$

部分反射膜15eからレーザチャンバ10までの合成焦点距離f_{EFM2}は合成焦点距離f_{EFM1}と同じである。

$$f_{EFM2} = f_{EFM1}$$

[0054] 波面調節器15aの合成焦点距離f_{EFM}は以下の通りである。

$$f_{EFM} = (f_{EFM1} \times f_{EFM2}) / (f_{EFM1} + f_{EFM2} + \delta_1 - \delta_2)$$

ここで、 δ_1 はシリンダリカル凹レンズ15cと像側主点との距離であり、以下の式で算出される。

$$\delta_1 = f_{EFM1} \times d / f_2$$

δ_2 はシリンダリカル凸レンズ15bと物側主点との距離であり、以下の式で算出される。

$$\delta_2 = f_{EFM1} \times d / f_1$$

[0055] 波面調節器15aのgパラメータg_{EFM}は以下のように算出される。

$$g_{EFM} = 1 - L / (2 \times f_{EFM})$$

[0056] シリンダリカル凹レンズ15cの焦点距離f1の絶対値とシリンダリカル凹レンズ15cとシリンダリカル凸レンズ15bとの主点間の距離dとの和よりシリンダリカル凸レンズ15bの焦点距離f2が小さいとき、gパラメータg_{EFM}は1より小さい値となる。例えば、グレーティング14cと

波面調節器 15 a との主点間の光路長 L を $1 \times 10^3 \text{ mm}$ とし、焦点距離 f_1 を -70 mm とし、焦点距離 f_2 を 74 mm とし、距離 d を 6 mm としたとき、 g パラメータ g_EFM は約 0.58 となる。

焦点距離 f_1 の絶対値と距離 d との和より焦点距離 f_2 が大きいとき、 g パラメータ g_EFM は 1 より大きい値となる。

[0057] 2. 4 g パラメータとスペクトル線幅との関係

図 11 は、グレーティング 14 c 及び波面調節器 15 a の g パラメータ $g_Grating$ 及び g_EFM に応じたパルスレーザ光のスペクトル線幅のシミュレーション結果を示すグラフである。図 11 の横軸はグレーティング 14 c の g パラメータ $g_Grating$ を示し、縦軸は波面調節器 15 a の g パラメータ g_EFM を示す。これらの g パラメータの組み合わせごとのスペクトル線幅の等高線がグラフに示されている。等高線は 0.0375 pm ごとに実線と点線とで交互に描かれている。

[0058] 比較例においてはグレーティング 14 c の反射面が平面状であるため、グレーティング 14 c の g パラメータ $g_Grating$ は 1 である。 g パラメータ $g_Grating$ を 1 に固定して波面調節器 15 a の g パラメータ g_EFM を変化させると、パルスレーザ光のスペクトル線幅が変化する。

[0059] 第 1 の実施形態においては、グレーティング 14 c の反射面を凹面状としており、グレーティング 14 c の g パラメータ $g_Grating$ は 1 未満である。 g パラメータ $g_Grating$ を 1 より小さくすると、スペクトル線幅の等高線の間隔が広くなる。すなわち、波面調節器 15 a の g パラメータ g_EFM を変化させたときのスペクトル線幅の安定性が高くなる。音響波によりレーザ共振器の光路に屈折率分布が発生したときのスペクトル線幅の安定性も、同様に高くなると考えられる。

[0060] 図 11 においてはパルスレーザ光のスペクトル線幅が 0.15 pm から 0.75 pm までの値を取り得るが、スペクトル線幅は 0.15 pm 以上 0.5 pm 以下が好ましい。

[0061] 図 12 は、第 1 の実施形態におけるパルスレーザ光の繰り返し周波数に応

じたスペクトル線幅の変動の計測結果を示す。グレーティング14cのgパラメータ $g_Grating$ を0.4としている。

図12においては、パルスレーザ光の繰り返し周波数の変化によるスペクトル線幅の変動幅が37 fmであったことが示されている。

[0062] 図13は、第1の実施形態におけるパルスレーザ光の繰り返し周波数に応じたスペクトル線幅の変動のシミュレーション結果を示す。グレーティング14cのgパラメータ $g_Grating$ を0.4としている。

図13においては、パルスレーザ光の繰り返し周波数の変化によるスペクトル線幅の変動幅が34 fmであることが示されている。

[0063] 第1の実施形態によれば、パルスレーザ光の繰り返し周波数を変化させたときのスペクトル線幅の変動が抑制され、スペクトル線幅の安定性が向上する。

[0064] 2.5 gパラメータとパルスエネルギーとの関係

図14は、グレーティング14cのgパラメータ $g_Grating$ とパルスエネルギーとの関係をシミュレーションした結果を示すグラフである。パルスエネルギーをシミュレーションする際の目標スペクトル線幅は0.3 pmとした。図14には、パルスレーザ光の繰り返し周波数の変化によるスペクトル線幅の変動幅が併せて示されている。図14の横軸はグレーティング14cのgパラメータ $g_Grating$ を示し、縦軸は $g_Grating$ を1としたときのパルスエネルギーを基準としたパルスエネルギーの相対値、あるいは、スペクトル線幅の変動幅を示す。

[0065] gパラメータ $g_Grating$ が小さくなるほどスペクトル線幅の変動幅が小さくなるので、gパラメータ $g_Grating$ は小さい方が望ましい。

但し、gパラメータ $g_Grating$ が0.4以上0.5未満でパルスエネルギーはピークとなり、gパラメータ $g_Grating$ がその範囲よりも大きくても小さくてもパルスエネルギーが低くなる。gパラメータ $g_Grating$ が0.2である場合のパルスエネルギーは、gパラメータ g

__Gratingが1である場合のパルスエネルギーとほぼ同じとなる。gパラメータg__Gratingが0.2未満又は1.0以上となると、グレーティング14cによって回折された光のうちの波面調節器15aに入射する光の割合が低下し、レーザ共振器の外部に漏れてパルスエネルギーが低下すると考えられる。従って、gパラメータg__Gratingは0.2以上1.0未満が好ましく、0.4以上0.5未満がより好ましい。

[0066] 2.6 作用

(1) 第1の実施形態によれば、レーザ装置1aは、レーザ共振器と、レーザチャンバ10と、電源12と、波面調節器15aと、スペクトル検出器16dと、レーザ制御プロセッサ30と、を含む。

レーザ共振器は、シリンдриカル凸レンズ15bの平らな表面で構成される出力結合ミラーと、狭帯域化モジュール14と、を含み、狭帯域化モジュール14はプリズム14a及び14bとグレーティング14cとを含み、グレーティング14cの反射面14hは凹面状である。

レーザチャンバ10は、放電電極11a及びこれと対をなす放電電極を含み、レーザ共振器の光路に配置される。

電源12は、放電電極11aに高電圧パルスを印加するように構成され、高電圧パルスの繰り返し周波数は可変である。

波面調節器15aは、出力結合ミラーを含む。

スペクトル検出器16dは、出力結合ミラーから出力され、ビームスプリッタ16aによって反射されたパルスレーザ光のスペクトル線幅を計測するためにフリンジ波形を生成する。

レーザ制御プロセッサ30は、計測されたスペクトル線幅に基づいて波面調節器15aを制御する。

これによれば、反射面14hを凹面状としたことで、パルスレーザ光の繰り返し周波数の変化によるスペクトル線幅の変動が抑制され、スペクトル線幅が安定化する。

[0067] (2) 第1の実施形態によれば、グレーティング14cの反射面14hの

曲率半径を $R_Grating$ とし、プリズム 14 a 及び 14 b からグレーティング 14 c に入射する光の入射角を θ とし、グレーティング 14 c の主点から波面調節器 15 a の主点までの光路長を L とし、プリズム 14 a 及び 14 b によるビーム拡大率を M としたとき、

$$g_Grating = 1 - (L \times M^2) / (R_Grating \times \cos \theta)$$

の式で算出される $g_Grating$ の値が 0.2 以上 1.0 未満である。

これによれば、スペクトル線幅を安定化するとともに、パルスエネルギーの低下を抑制し得る。

[0068] (3) 第 1 の実施形態によれば、 $g_Grating$ の値が 0.4 以上 0.5 未満である。

これによれば、スペクトル線幅を安定化するとともに、高いパルスエネルギーを得ることができる。

[0069] (4) 第 1 の実施形態によれば、波面調節器 15 a の合成焦点距離を f_EFM としたとき、レーザ制御プロセッサ 30 は、

$$g_EFM = 1 - L / (2 \times f_EFM)$$

の式で算出される g_EFM が $g_Grating$ の値より大きい値となるように波面調節器 15 a を制御する。

これによれば、グレーティング 14 c の g パラメータ $g_Grating$ を小さくする分だけ波面調節器 15 a の g パラメータ g_EFM を大きくすることで、目標スペクトル線幅を実現し得る。

[0070] (5) 第 1 の実施形態によれば、レーザ制御プロセッサ 30 は、スペクトル検出器 16 d を用いて計測されるスペクトル線幅が 0.15 pm 以上 0.5 pm 以下となるように波面調節器 15 a を制御するように構成され、グレーティング 14 c の g パラメータ $g_Grating$ は 0.2 以上 1.0 未満である。

これによれば、スペクトル線幅を 0.15 pm 以上 0.5 pm 以下とし、グレーティング 14 c の g パラメータ $g_Grating$ を 0.2 以上 1.

0未満とすることで、スペクトル線幅が安定化するとともに、パルスエネルギーの低下を抑制し得る。

[0071] (6) 第1の実施形態によれば、グレーティング14cは、V軸の方向の複数の溝を含み、反射面14hは、V軸の方向に垂直な面内に湾曲した凹面状である。

これによれば、V軸の方向に垂直な面内の波面形状を調整することで、スペクトル線幅を安定化できる。

[0072] (7) 第1の実施形態によれば、レーザ共振器を往復する光がプリズム14aに入射及びプリズム14aから出射するプリズム14aの表面と、プリズム14bに入射及びプリズム14bから出射するプリズム14bの表面とは、V軸の方向に平行である。

これによれば、プリズム14a及び14bによりV軸の方向に垂直な面内のビーム幅を拡大してグレーティング14cに入射させることで、スペクトル線幅を狭帯域化できる。

[0073] (8) 第1の実施形態によれば、波面調節器15aは、V軸の方向に平行な焦点軸F2を有するシリンドリカル凸レンズ15b及びV軸の方向に平行な焦点軸F1を有するシリンドリカル凹レンズ15cを含む。

これによれば、V軸の方向に垂直な面内の波面形状を調整することで、スペクトル線幅を制御できる。

[0074] (9) 第1の実施形態によれば、波面調節器15aは、シリンドリカル凸レンズ15bと、シリンドリカル凹レンズ15cと、リニアステージ15dと、を含む。シリンドリカル凸レンズ15bは、出力結合ミラーを構成する平らな表面と、この平らな表面とレーザチャンバ10との間に位置する凸面と、を含む。シリンドリカル凹レンズ15cは、シリンドリカル凸レンズ15bとレーザチャンバ10との間の光路に位置する。リニアステージ15dは、シリンドリカル凹レンズ15cを移動させる。

これによれば、シリンドリカル凹レンズ15cを移動させるので、共振器長を変化させることなく波面を調整してスペクトル線幅を制御できる。

[0075] (10) 第1の実施形態によれば、狭帯域化モジュール14は、グレーティング14cの曲率を調整するホルダ14d、伸縮部14e、支持部14f及び14gを含むグレーティング曲げ機構を含む。

これによれば、グレーティング14cの反射面14hの曲率を適切な値に調整し得る。

他の点については、第1の実施形態は比較例と同様である。

[0076] 3. マスターオシレータMO及びパワーオシレータPOを含むレーザ装置1b

3. 1 構成

図15は、第2の実施形態におけるレーザ装置1bの構成を概略的に示す。レーザ装置1bは、マスターオシレータMOと、パワーオシレータPOと、モニタモジュール16と、レーザ制御プロセッサ30と、高反射ミラー31及び32と、を含む。レーザ制御プロセッサ30の構成は第1の実施形態において対応する構成と同様である。

[0077] マスターオシレータMOは、レーザチャンバ10と、放電電極11aと、狭帯域化モジュール14と、波面調節器15aと、を含む。これらの構成は第1の実施形態において対応する構成と同様であり、狭帯域化モジュール14に含まれるグレーティング14cの反射面は凹面状である。図15には放電電極11aと対をなす放電電極11bが図示されている。図15においては電源12の図示が省略されている。

[0078] 高反射ミラー31及び32は、マスターオシレータMOから出力されたパルスレーザ光B1の光路に配置されている。高反射ミラー31及び32は、それぞれ図示しないアクチュエータによって位置及び姿勢を変更できるように構成されている。高反射ミラー31及び32は、パルスレーザ光B1のパワーオシレータPOへの入射位置及び入射方向を調整するためのビームステアリングユニットを構成する。

[0079] パワーオシレータPOは、ビームステアリングユニットを通過したパルスレーザ光B1の光路に配置されている。パワーオシレータPOは、レーザチ

チャンバ20と、放電電極21a及びこれと対をなす放電電極21bと、リアミラー24と、出力結合ミラー25と、を含む。

[0080] リアミラー24は、パルスレーザ光B1を透過させる材料で構成され、その1つの面には部分反射膜がコーティングされている。出力結合ミラー25も同様である。但し、リアミラー24の反射率は、出力結合ミラー25の反射率より高く設定されている。リアミラー24と出力結合ミラー25とがレーザ共振器を構成する。レーザチャンバ20は、レーザ共振器の光路に配置されている。レーザチャンバ20の両端にはウインドウ20a及び20bが設けられている。

[0081] 他の点については、パワーオシレータPOの上述の構成要素は、マスターオシレータMOの対応する構成要素と同様である。

[0082] モニタモジュール16は、出力結合ミラー25から出力されたパルスレーザ光B2の光路に配置されている。モニタモジュール16の構成は第1の実施形態において対応する構成と同様である。図15においてはエネルギー検出器16c及びビームスプリッタ16bの図示が省略されている。

[0083] 3. 2 動作

3. 2. 1 レーザ制御プロセッサ30

レーザ制御プロセッサ30は、パワーオシレータPOから出力されるパルスレーザ光B2の第1の目標パルスエネルギーの設定データを露光制御プロセッサ110から受信する。

レーザ制御プロセッサ30は、さらに、マスターオシレータMOから出力されるパルスレーザ光B1の第2の目標パルスエネルギーを設定する。

[0084] レーザ制御プロセッサ30は、第1及び第2の目標パルスエネルギーに基づいて、マスターオシレータMO及びパワーオシレータPOそれぞれの電源に印加電圧の設定データを送信する。

レーザ制御プロセッサ30は、露光制御プロセッサ110から受信したトリガ信号に基づく第1及び第2の発振トリガ信号をマスターオシレータMO及びパワーオシレータPOそれぞれの電源に含まれるスイッチに送信する。

[0085] 3. 2. 2 マスターオシレータMO

マスターオシレータMOの動作は、第1の実施形態におけるレーザ装置1aの動作と同様である。

[0086] 3. 2. 3 パワーオシレータPO

パワーオシレータPOに含まれる電源は、レーザ制御プロセッサ30から第2の発振トリガ信号を受信すると高電圧パルスを生成し、この高電圧パルスを放電電極21aに印加する。

[0087] レーザチャンバ20の内部に放電が起こるタイミングと、マスターオシレータMOから出力されたパルスレーザ光B1がレーザチャンバ20の内部に入射するタイミングとが同期するように、マスターオシレータMOに含まれる電源への第1の発振トリガ信号に対するパワーオシレータPOに含まれる電源への第2の発振トリガ信号の遅延時間が設定される。

[0088] パルスレーザ光B1は、リアミラー24と出力結合ミラー25との間で往復し、レーザチャンバ20の内部の放電空間を通過する度に増幅される。増幅されたパルスレーザ光B2が、出力結合ミラー25から出力される。

[0089] 3. 3 作用

第2の実施形態によれば、マスターオシレータMOから出力されたパルスレーザ光B1を増幅することにより、高いパルスエネルギーを有するパルスレーザ光B2を露光装置100に向けて出力することができる。

パルスレーザ光B2のスペクトル線幅はパルスレーザ光B1のスペクトル線幅に依存する。グレーティング14cの反射面を凹面状とすることで、パルスレーザ光B2のスペクトル線幅を安定化し得る。

他の点については、第2の実施形態は第1の実施形態と同様である。

[0090] 4. リング共振器を含むレーザ装置1c

4. 1 構成

図16は、第3の実施形態におけるレーザ装置1cの構成を概略的に示す。図17は、図16に示されるパワーオシレータPOを図16と異なる方向から見た様子を示す。レーザ装置1cは、マスターオシレータMOと、パワ

ーオシレータPOと、モニタモジュール16と、レーザ制御プロセッサ30と、高反射ミラー31及び32と、を含む。マスターオシレータMOの構成は第2の実施形態において対応する構成と同様であり、狭帯域化モジュール14に含まれるグレーティング14cの反射面は凹面状である。

[0091] パワーオシレータPOは、レーザチャンバ20と、高反射ミラー26a～26cと、出力結合ミラー27と、高反射ミラー33と、を含む。レーザチャンバ20と、これに設けられたウインドウ20a及び20bと、一对の放電電極21a及び21bと、の構成は、第2の実施形態において対応する構成と同様である。

[0092] 出力結合ミラー27及び高反射ミラー26aは、レーザチャンバ20の外側であってウインドウ20aの付近に配置されている。高反射ミラー26b及び26cは、レーザチャンバ20の外側であってウインドウ20bの付近に配置されている。レーザチャンバ20の内部の放電空間において、高反射ミラー26aから高反射ミラー26bまでの光路と、高反射ミラー26cから出力結合ミラー27までの光路と、が交差する。高反射ミラー26a～26cと出力結合ミラー27とで構成されるレーザ共振器をリング共振器という。

[0093] 4. 2 動作

マスターオシレータMOから出力されたパルスレーザ光B1は、高反射ミラー31、32、及び33によってこの順で反射され、パワーオシレータPOのレーザ共振器の外側から出力結合ミラー27にほぼH方向に入射する。出力結合ミラー27を介してレーザ共振器に入射したパルスレーザ光B1は、高反射ミラー26a、26b、及び26cによってこの順で反射され、放電空間を通過する際に増幅されて、レーザ共振器の内側から出力結合ミラー27にZ方向に入射する。

[0094] 出力結合ミラー27にZ方向に入射したパルスレーザ光B1の一部はほぼH方向に反射されて再び高反射ミラー26a、26b、及び26cによって反射されて増幅される。出力結合ミラー27にZ方向に入射したパルスレ

ーザ光 B 1 の他の一部は透過して、パルスレーザ光 B 2 として露光装置 1 0 0 に向けて出力される。

[0095] 4. 3 作用

第 3 の実施形態によれば、パワーオシレータ P O からマスターオシレータ M O へ向かう戻り光が発生しにくいため、マスターオシレータ M O を安定して動作させることができる。

他の点については、第 3 の実施形態は第 2 の実施形態と同様である。

[0096] 5. その他

上述の説明は、制限ではなく単なる例示を意図している。従って、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る。また、本開示の実施形態を組み合わせで使用することも当業者には明らかである。

[0097] 本明細書及び特許請求の範囲全体で使用される用語は、明記が無い限り「限定的でない」用語と解釈されるべきである。たとえば、「含む」、「有する」、「備える」、「具備する」などの用語は、「記載されたもの以外の構成要素の存在を除外しない」と解釈されるべきである。また、修飾語「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。また、「A、B 及び C の少なくとも 1 つ」という用語は、「A」「B」「C」「A + B」「A + C」「B + C」又は「A + B + C」と解釈されるべきである。さらに、それらと「A」「B」「C」以外のものとの組み合わせも含むと解釈されるべきである。

請求の範囲

- [請求項1] 出力結合ミラー及び狭帯域化モジュールを含むレーザ共振器であって、前記狭帯域化モジュールがプリズム及びグレーティングを含み、前記グレーティングの反射面が凹面状である、前記レーザ共振器と、
一対の放電電極を含み、前記レーザ共振器の光路に配置されたレーザチャンバと、
前記放電電極に高電圧パルスを印加する電源であって、前記高電圧パルスの繰り返し周波数が可変である前記電源と、
前記出力結合ミラーを含む波面調節器と、
前記出力結合ミラーから出力されたパルスレーザ光のスペクトル線幅を計測するためのスペクトル検出器と、
前記計測されたスペクトル線幅に基づいて前記波面調節器を制御するプロセッサと、
を備える狭帯域化レーザ装置。
- [請求項2] 請求項1記載の狭帯域化レーザ装置であって、
前記グレーティングの反射面の曲率半径を $R_Grating$ とし、前記プリズムから前記グレーティングに入射する光の入射角を θ とし、前記グレーティングの主点から前記波面調節器の主点までの光路長を L とし、前記プリズムによるビーム拡大率を M としたとき、
$$g_Grating = 1 - (L \times M^2) / (R_Grating \times \cos \theta)$$

の式で算出される $g_Grating$ の値が0.2以上1.0未満である、
狭帯域化レーザ装置。
- [請求項3] 請求項2記載の狭帯域化レーザ装置であって、
前記 $g_Grating$ の値が0.4以上0.5未満である、
狭帯域化レーザ装置。
- [請求項4] 請求項2記載の狭帯域化レーザ装置であって、

前記波面調節器の合成焦点距離を f_{EFM} としたとき、前記プロセッサは、

$$g_{EFM} = 1 - L / (2 \times f_{EFM})$$

の式で算出される g_{EFM} が前記 $g_{Grating}$ の値より大きい値となるように前記波面調節器を制御する、
狭帯域化レーザ装置。

[請求項5] 請求項2記載の狭帯域化レーザ装置であって、
前記プロセッサは、前記計測されるスペクトル線幅が $0.15 \mu m$ 以上 $0.5 \mu m$ 以下となるように前記波面調節器を制御する、
狭帯域化レーザ装置。

[請求項6] 請求項1記載の狭帯域化レーザ装置であって、
前記グレーティングは、第1方向の複数の溝を含み、前記反射面は、
前記第1方向に垂直な面内に湾曲した凹面状である、
狭帯域化レーザ装置。

[請求項7] 請求項6記載の狭帯域化レーザ装置であって、
前記レーザ共振器を往復する光が前記プリズムに入射及び前記プリズムから出射する前記プリズムの表面は、前記第1方向に平行である、
狭帯域化レーザ装置。

[請求項8] 請求項6記載の狭帯域化レーザ装置であって、
前記波面調節器は、それぞれ前記第1方向に平行な焦点軸を有する
シリンドリカル凸レンズ及びシリンドリカル凹レンズを含む、
狭帯域化レーザ装置。

[請求項9] 請求項1記載の狭帯域化レーザ装置であって、
前記波面調節器は、
前記出力結合ミラーを構成する平らな表面と、前記平らな表面と
前記レーザチャンバとの間に位置する凸面と、を含むシリンドリカル
平凸レンズと、

前記シリンドリカル平凸レンズと前記レーザチャンバとの間の光路に位置するシリンドリカル凹レンズと、

前記シリンドリカル凹レンズを移動させるアクチュエータと、
を含む、狭帯域化レーザ装置。

[請求項10] 請求項1記載の狭帯域化レーザ装置であって、
前記狭帯域化モジュールは、前記グレーティングの曲率を調整する
グレーティング曲げ機構を含む、
狭帯域化レーザ装置。

[請求項11] 電子デバイスの製造方法であって、
出力結合ミラー及び狭帯域化モジュールを含むレーザ共振器であって、前記狭帯域化モジュールがプリズム及びグレーティングを含み、前記グレーティングの反射面が凹面状である、前記レーザ共振器と、
一対の放電電極を含み、前記レーザ共振器の光路に配置されたレーザチャンバと、
前記放電電極に高電圧パルスを印加する電源であって、前記高電圧パルスの繰り返し周波数が可変である前記電源と、
前記出力結合ミラーを含む波面調節器と、
前記出力結合ミラーから出力されたパルスレーザ光のスペクトル線幅を計測するためのスペクトル検出器と、
前記計測されたスペクトル線幅に基づいて前記波面調節器を制御するプロセッサと、
を備える狭帯域化レーザ装置によって前記パルスレーザ光を生成し、
前記パルスレーザ光を露光装置に出力し、
前記電子デバイスを製造するために、前記露光装置内で感光基板上に前記パルスレーザ光を露光することを
含む電子デバイスの製造方法。

[請求項12] 請求項11記載の電子デバイスの製造方法であって、
前記グレーティングの反射面の曲率半径を R_{Grating} とし

、前記プリズムから前記グレーティングに入射する光の入射角を θ とし、前記グレーティングの主点から前記波面調節器の主点までの光路長を L とし、前記プリズムによるビーム拡大率を M としたとき、

$$g_Grating = 1 - (L \times M^2) / (R_Grating \times \cos \theta)$$

の式で算出される $g_Grating$ の値が 0.2 以上 1.0 未満である、

電子デバイスの製造方法。

[請求項13] 請求項12記載の電子デバイスの製造方法であって、
前記 $g_Grating$ の値が 0.4 以上 0.5 未満である、
電子デバイスの製造方法。

[請求項14] 請求項12記載の電子デバイスの製造方法であって、
前記波面調節器の合成焦点距離を f_EFM としたとき、前記プロセッサは、

$$g_EFM = 1 - L / (2 \times f_EFM)$$

の式で算出される g_EFM が前記 $g_Grating$ の値より大きい値となるように前記波面調節器を制御する、

電子デバイスの製造方法。

[請求項15] 請求項12記載の電子デバイスの製造方法であって、
前記プロセッサは、前記計測されるスペクトル線幅が $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 以上 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以下となるように前記波面調節器を制御する、
電子デバイスの製造方法。

[請求項16] 請求項11記載の電子デバイスの製造方法であって、
前記グレーティングは、第1方向の複数の溝を含み、前記反射面は、前記第1方向に垂直な面内に湾曲した凹面状である、
電子デバイスの製造方法。

[請求項17] 請求項16記載の電子デバイスの製造方法であって、
前記レーザ共振器を往復する光が前記プリズムに入射及び前記プリ

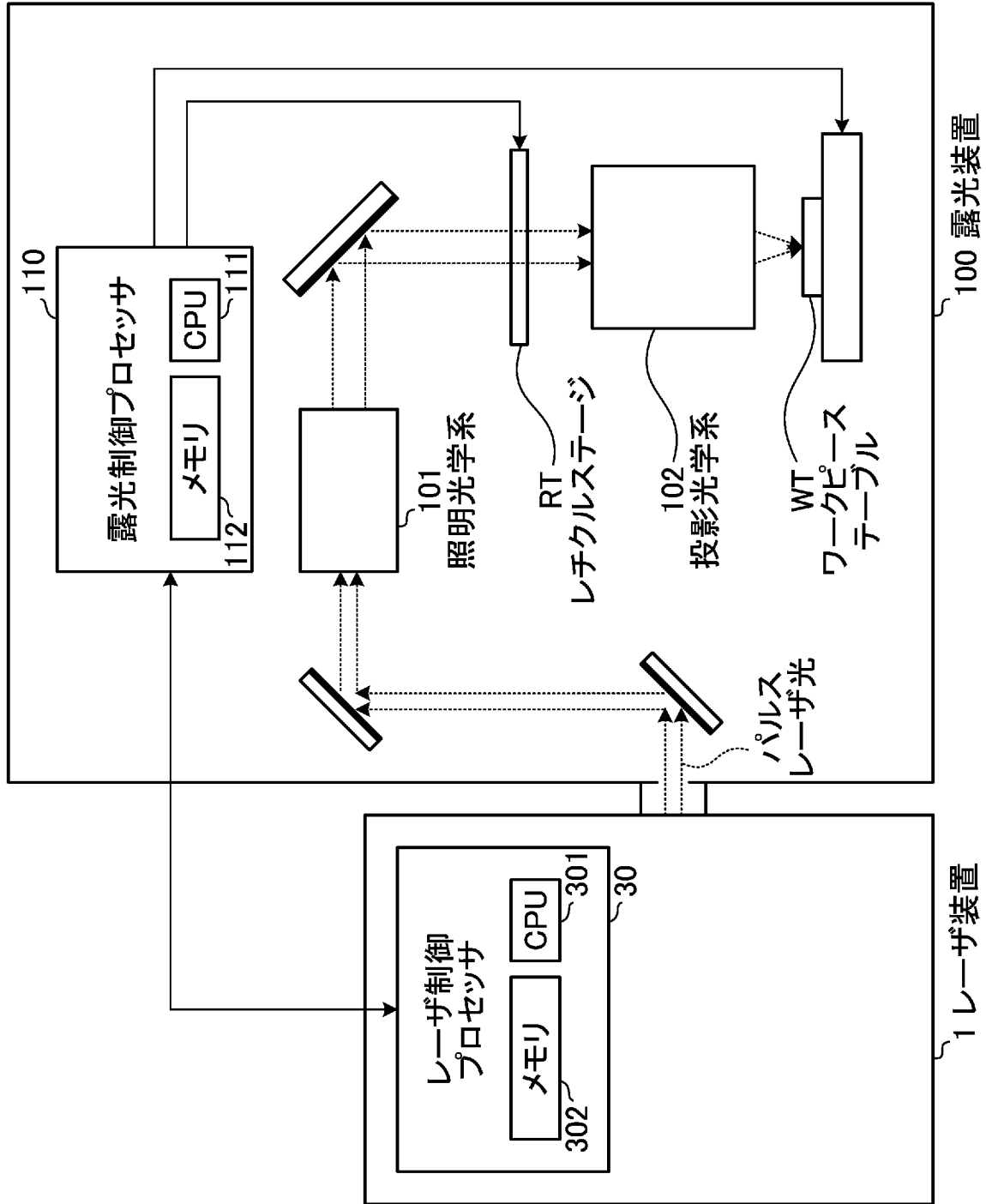
ズムから出射する前記プリズムの表面は、前記第 1 方向に平行である、
電子デバイスの製造方法。

[請求項18] 請求項 1 6 記載の電子デバイスの製造方法であって、
前記波面調節器は、それぞれ前記第 1 方向に平行な焦点軸を有する
シリンドリカル凸レンズ及びシリンドリカル凹レンズを含む、
電子デバイスの製造方法。

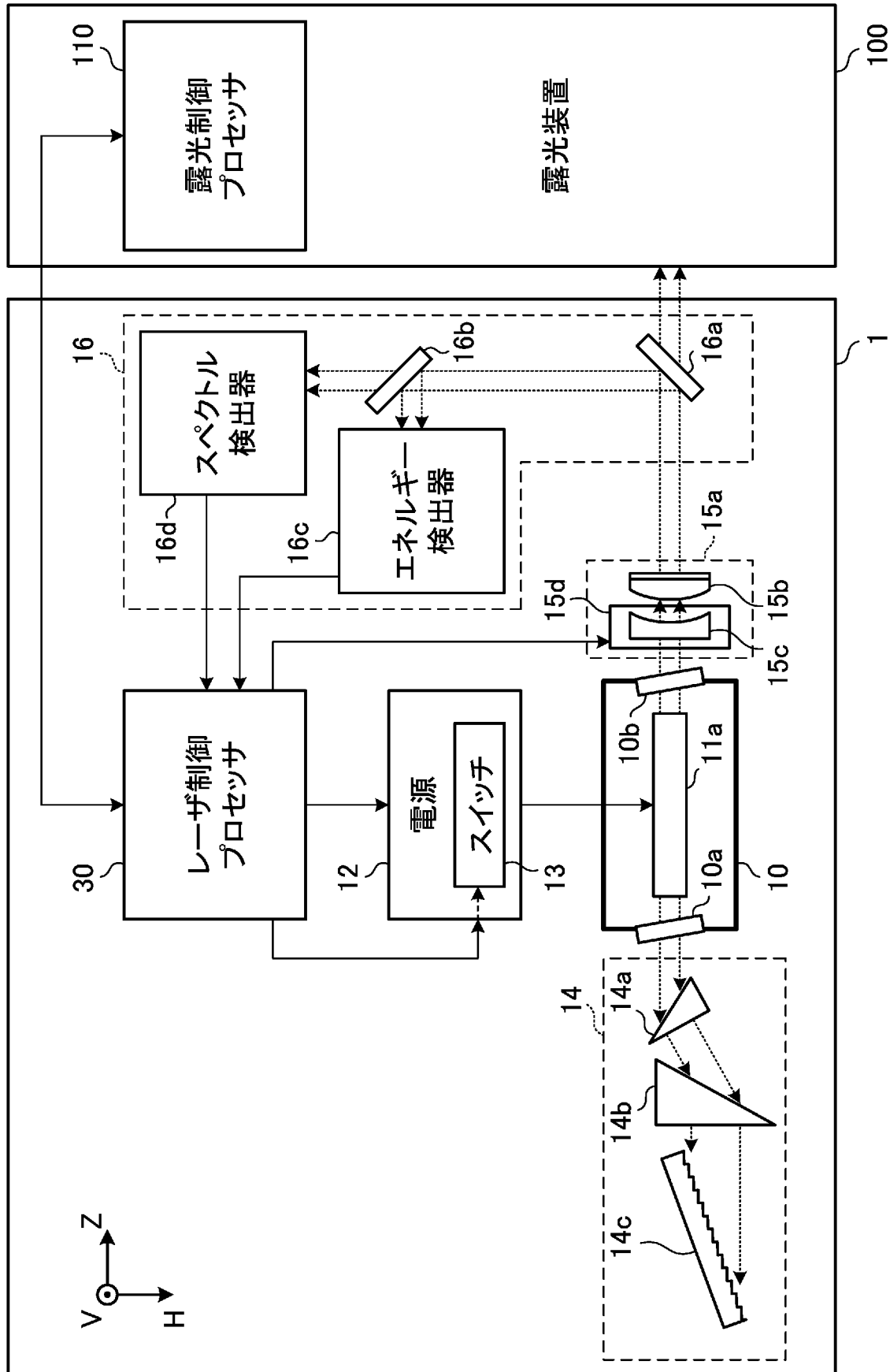
[請求項19] 請求項 1 1 記載の電子デバイスの製造方法であって、
前記波面調節器は、
前記出力結合ミラーを構成する平らな表面と、前記平らな表面と
前記レーザチャンバとの間に位置する凸面と、を含むシリンドリカル
平凸レンズと、
前記シリンドリカル平凸レンズと前記レーザチャンバとの間の光
路に位置するシリンドリカル凹レンズと、
前記シリンドリカル凹レンズを移動させるアクチュエータと、
を含む、電子デバイスの製造方法。

[請求項20] 請求項 1 1 記載の電子デバイスの製造方法であって、
前記狭帯域化モジュールは、前記グレーティングの曲率を調整する
グレーティング曲げ機構を含む、
電子デバイスの製造方法。

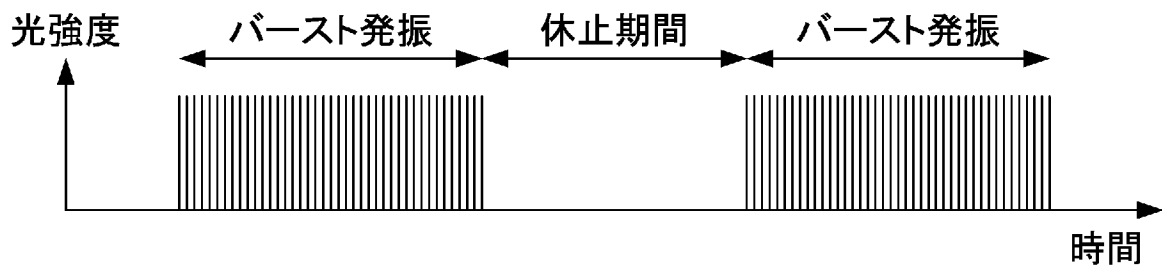
[図1]



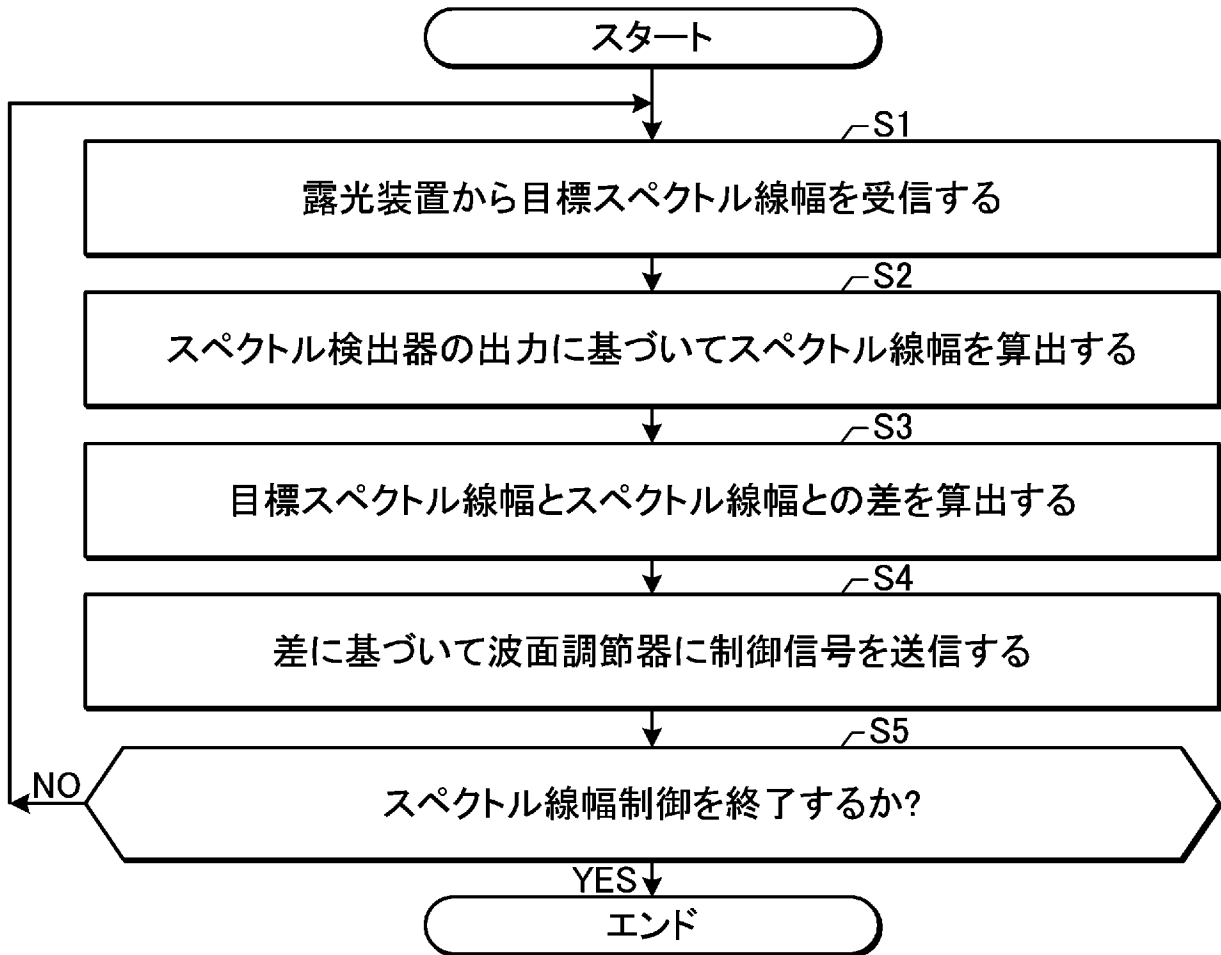
[図2]



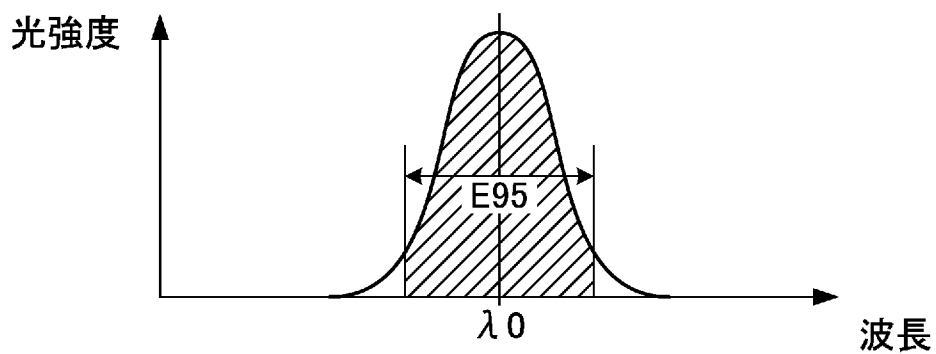
[図3]



[図4]



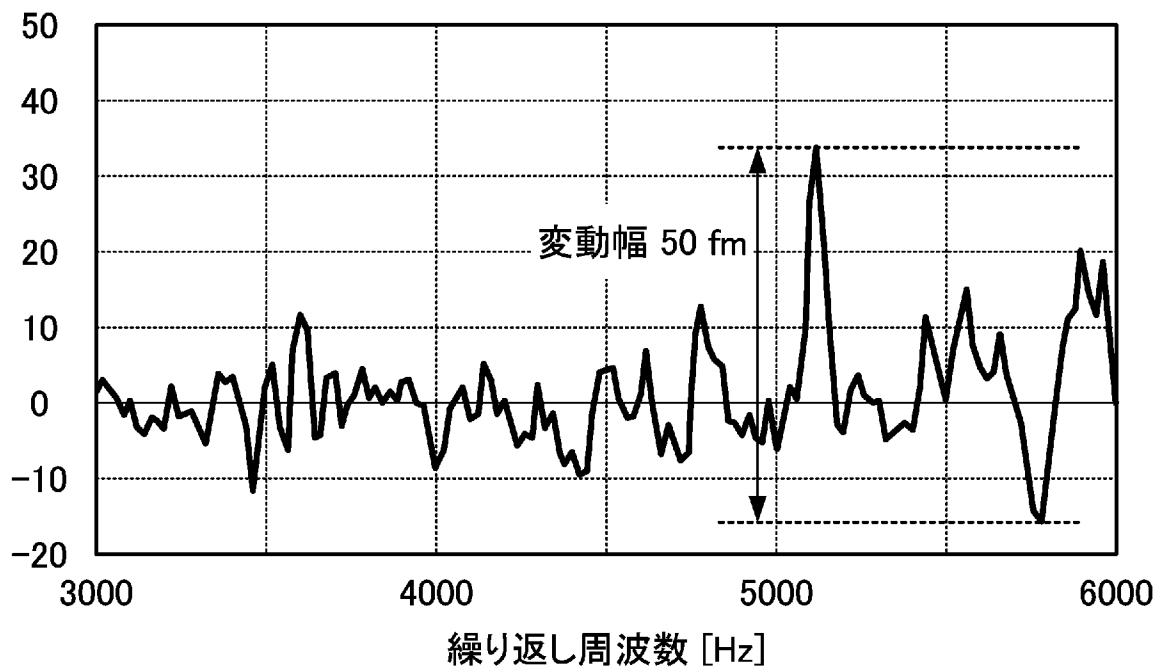
[図5]



[図6]

スペクトル線幅の
変動 [fm]

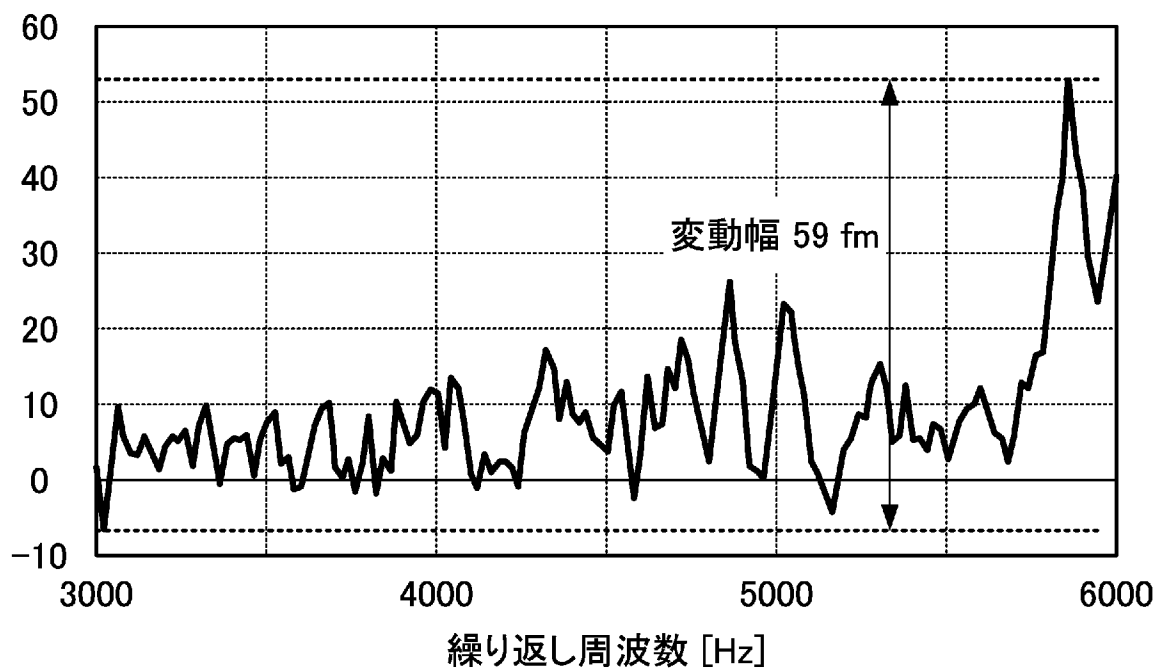
計測結果



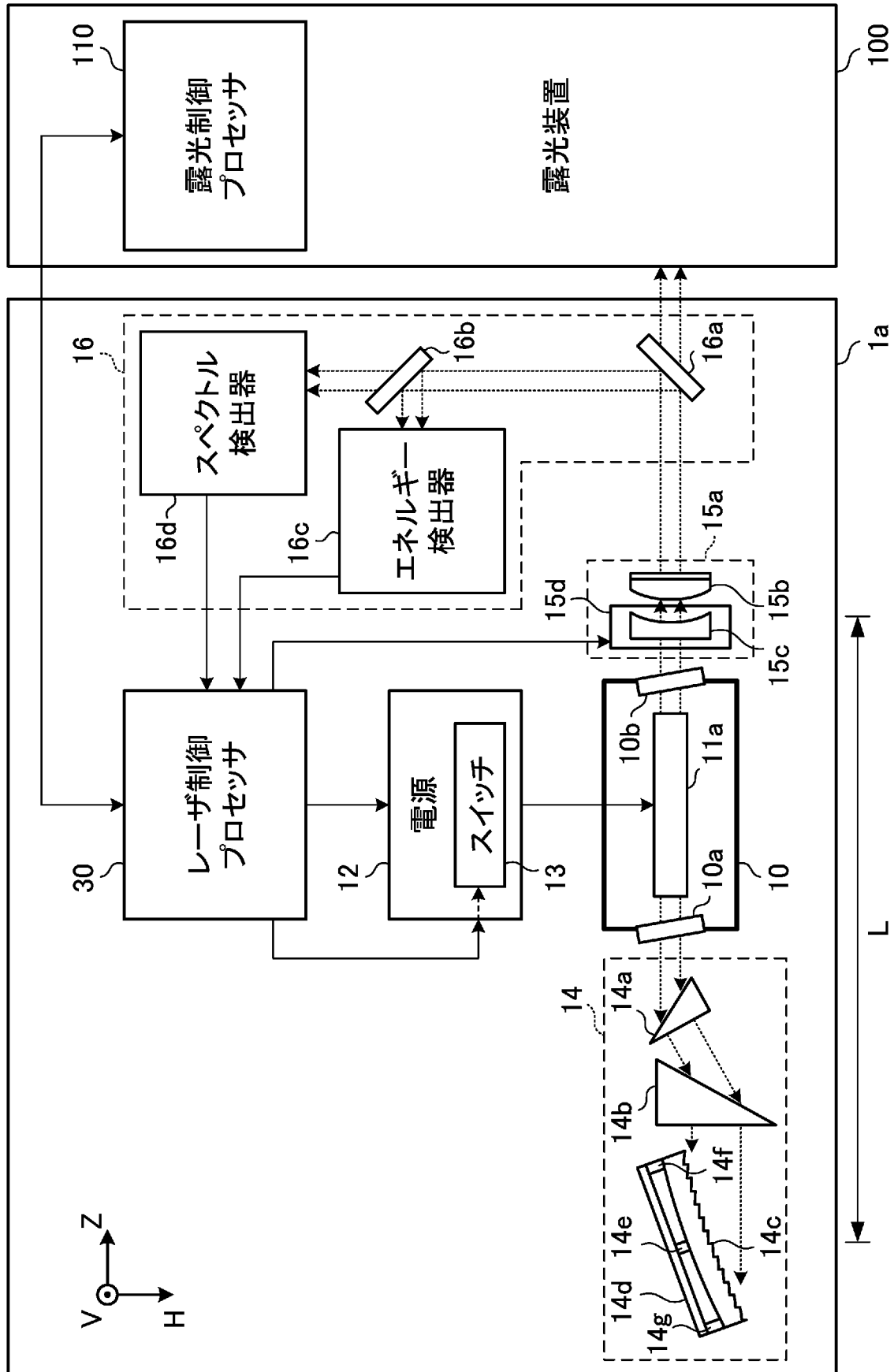
[図7]

スペクトル線幅の
変動 [fm]

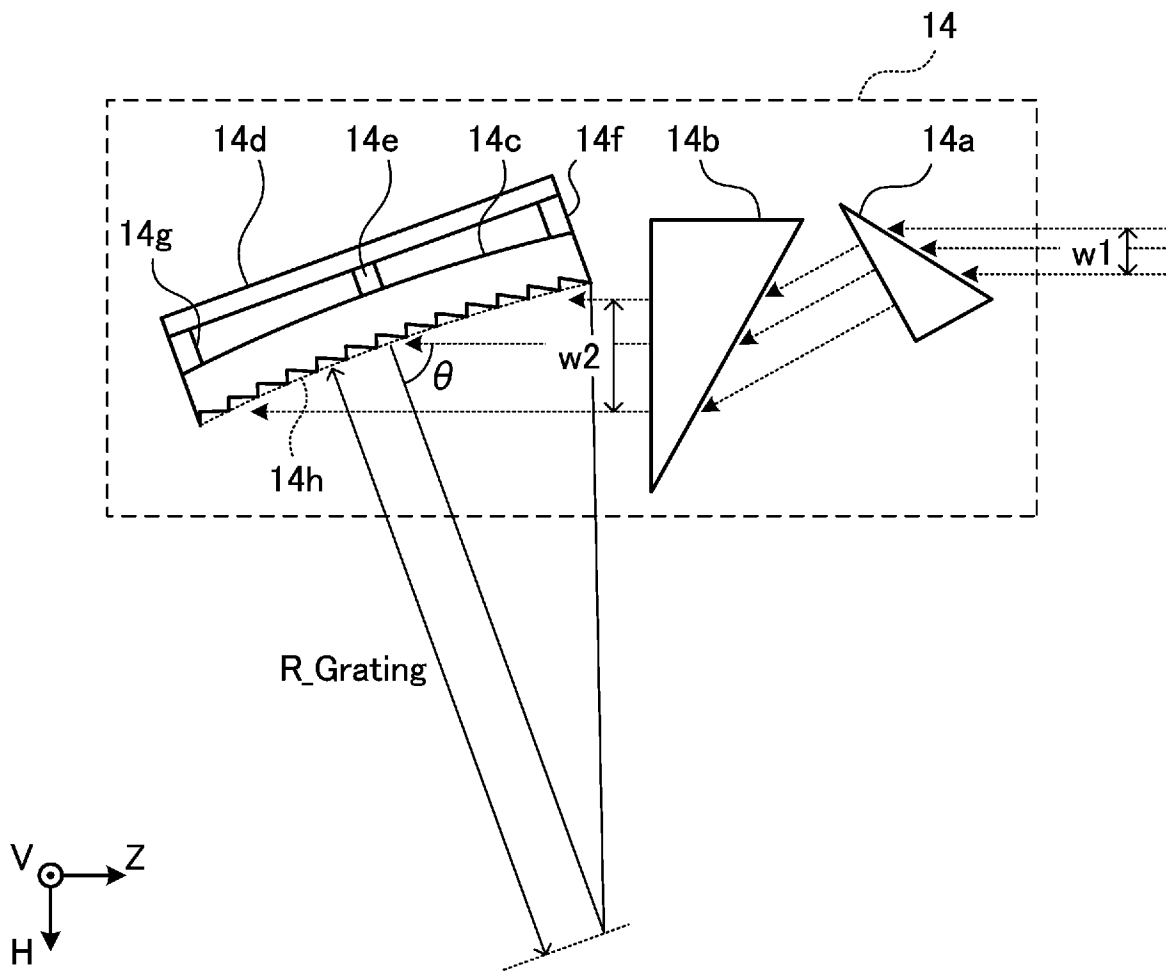
シミュレーション結果



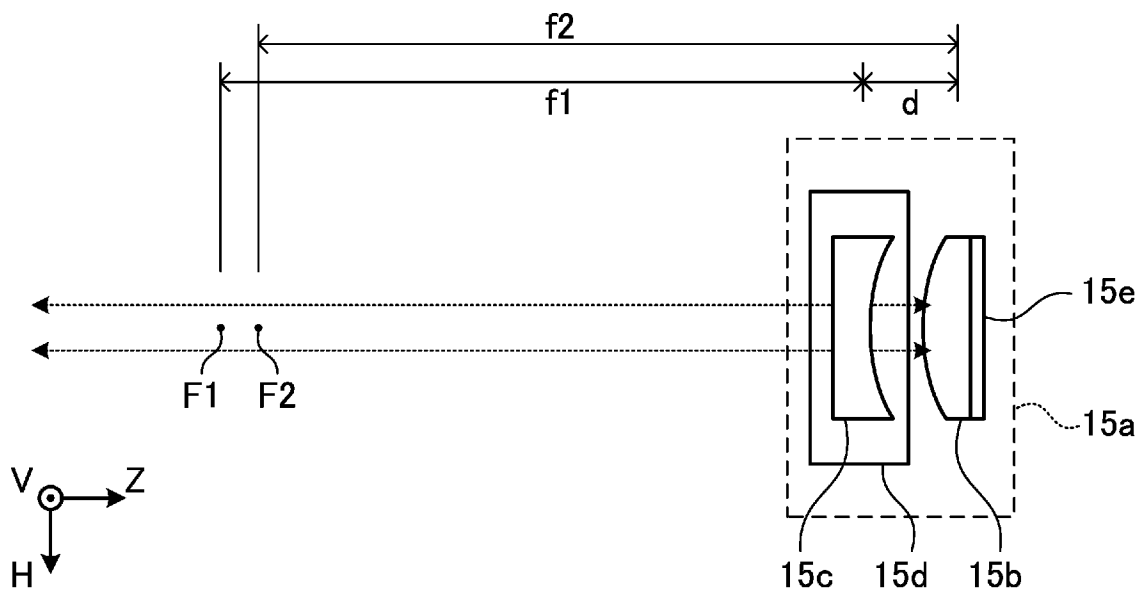
[図8]



[図9]

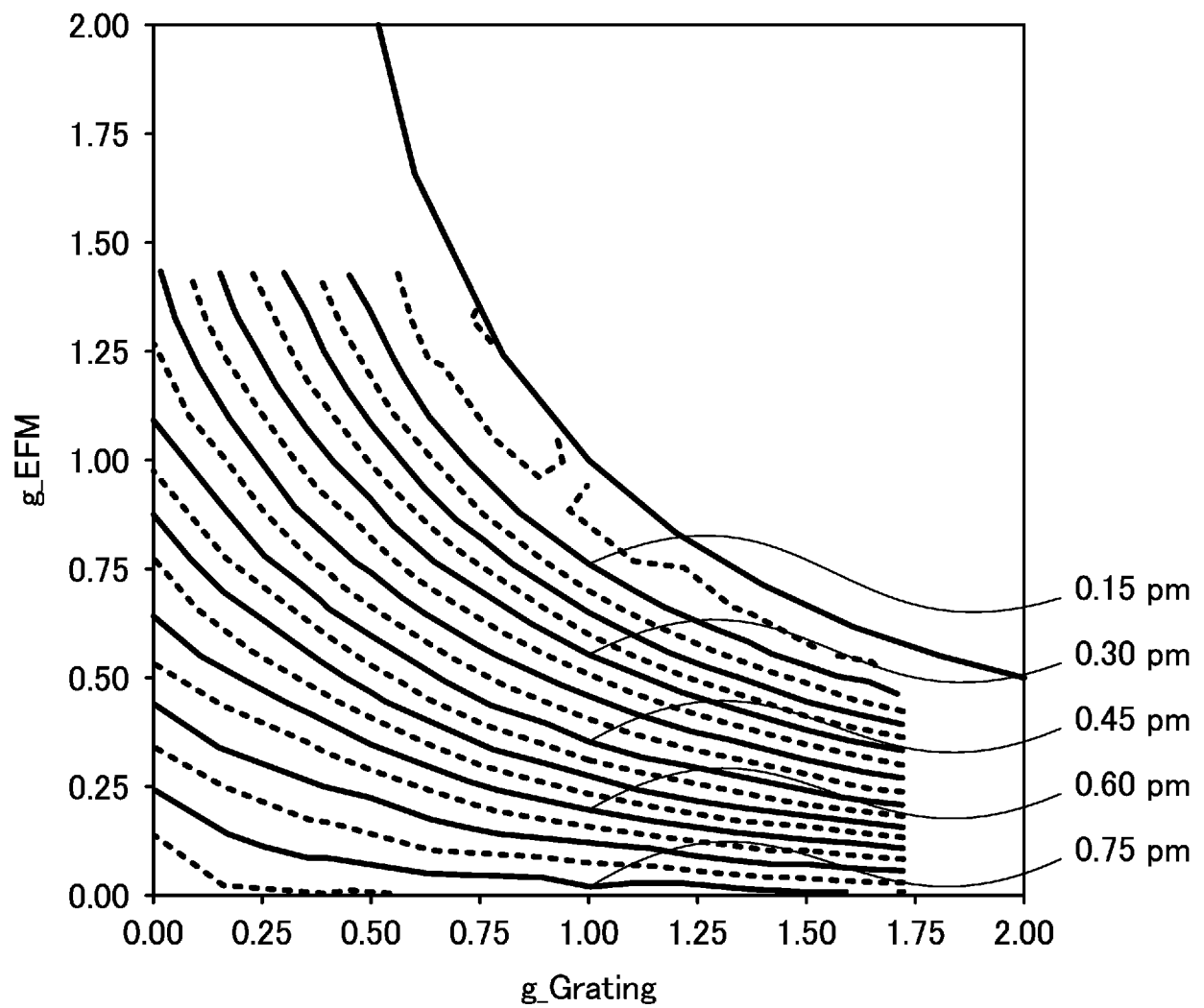


[図10]



[図11]

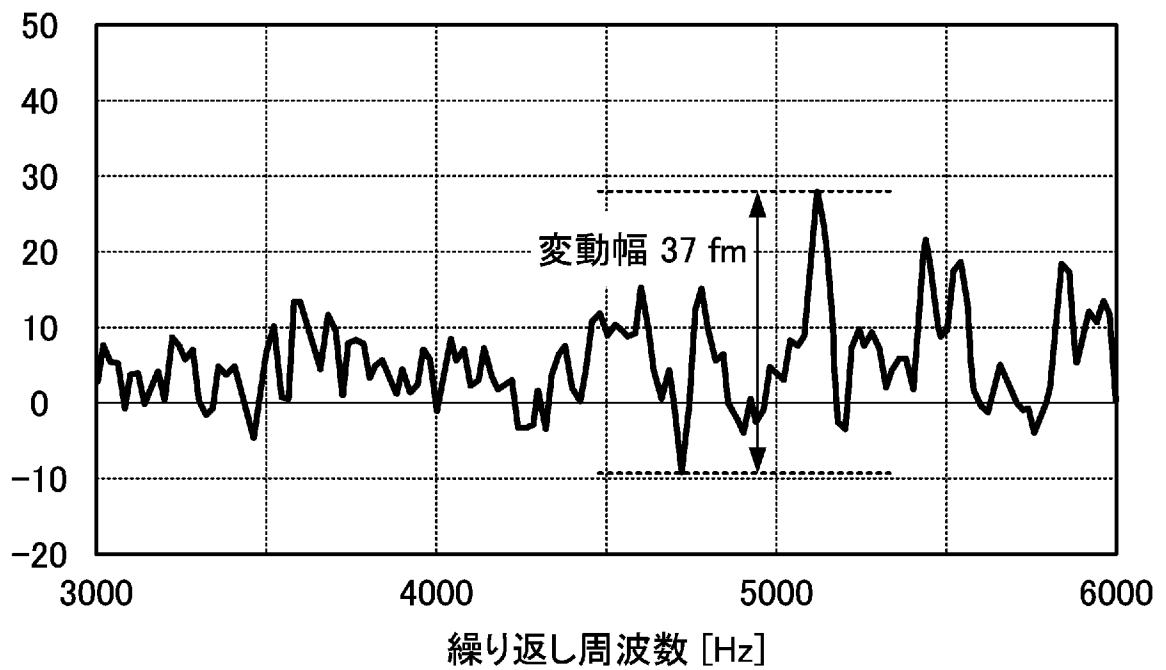
g パラメータに応じた
スペクトル線幅のシミュレーション結果



[図12]

スペクトル線幅の
変動 [fm]

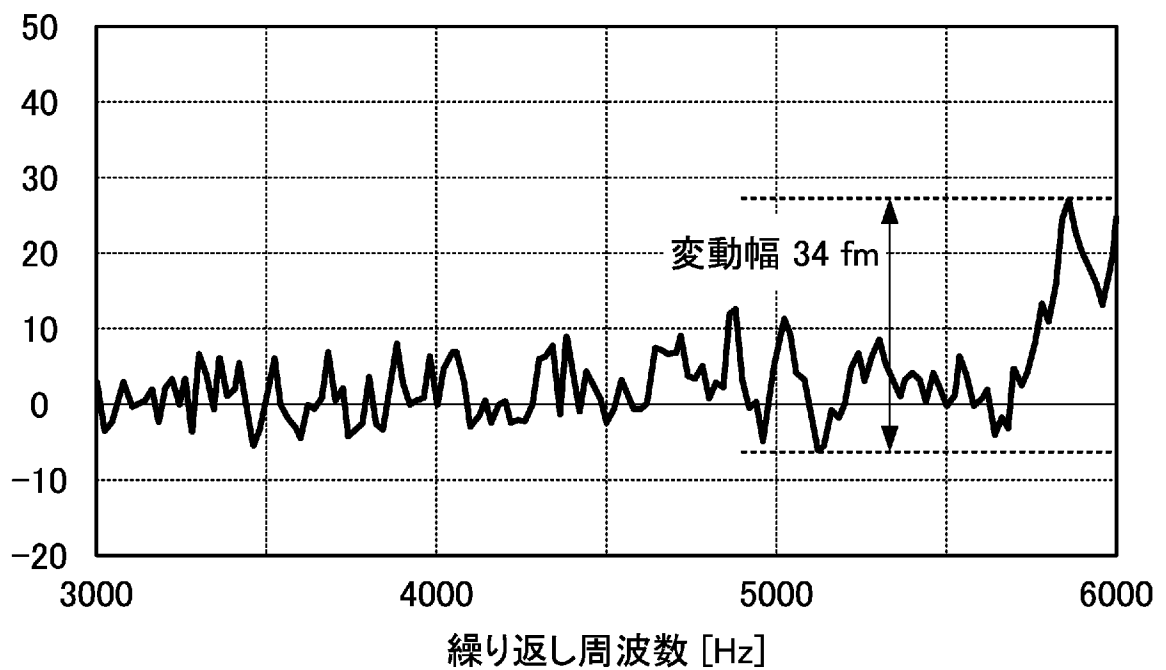
計測結果



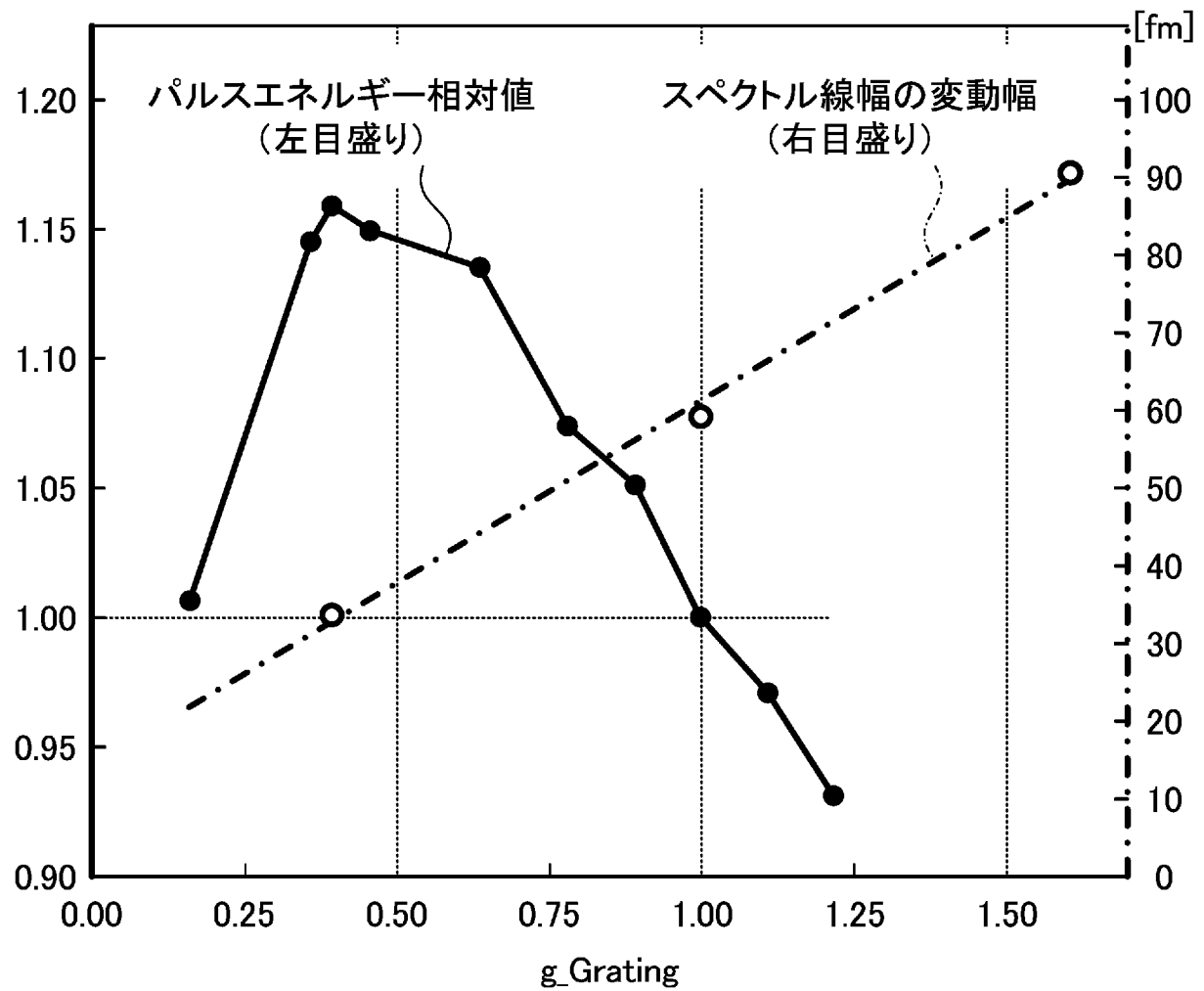
[図13]

スペクトル線幅の
変動 [fm]

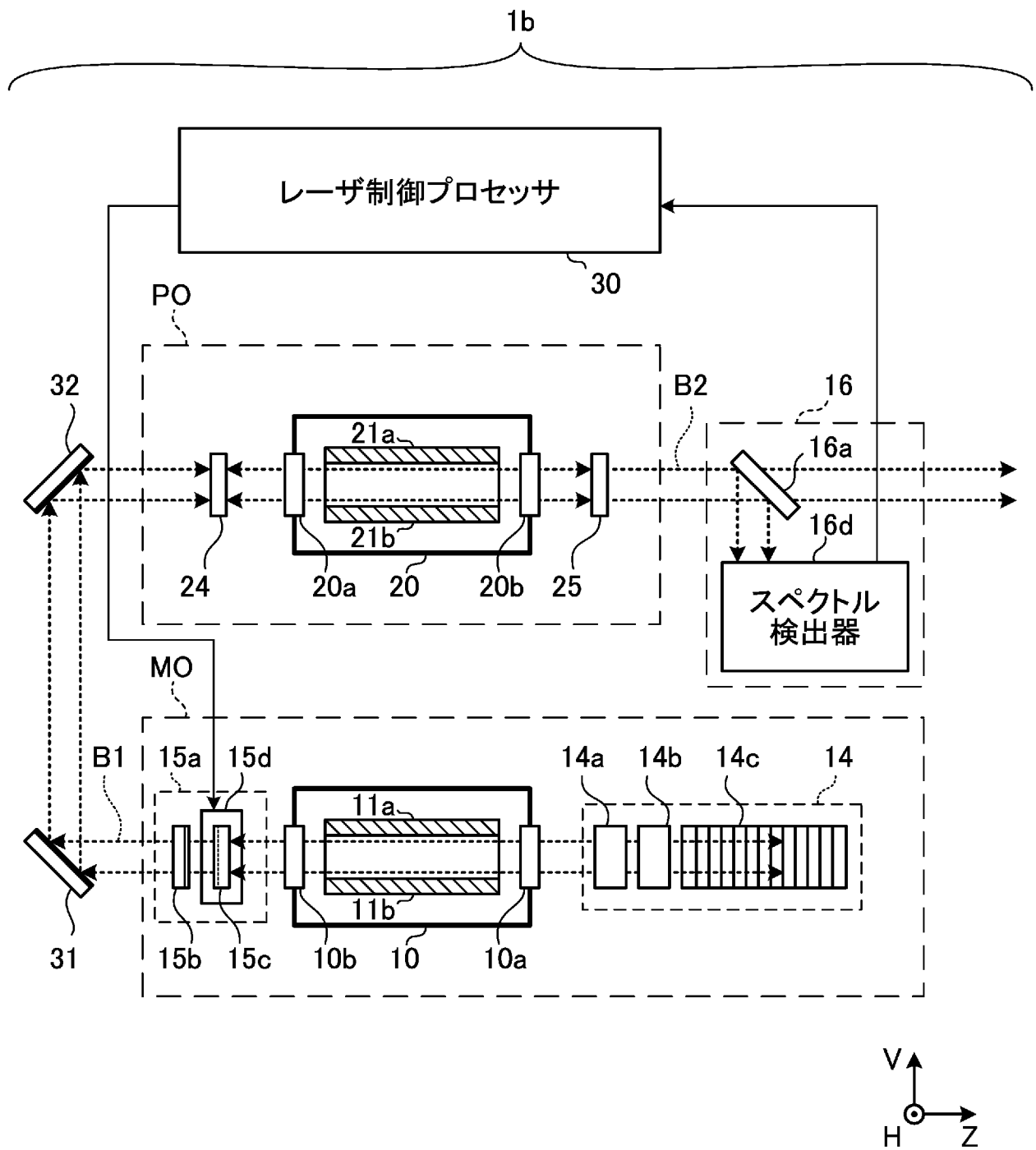
シミュレーション結果



[図14]



[図15]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2022/033143

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**H01S 3/105**(2006.01)i; **G03F 7/20**(2006.01)i; **H01S 3/0943**(2006.01)i; **H01S 3/10**(2006.01)i

FI: H01S3/105; H01S3/0943; H01S3/10 D; G03F7/20

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)

H01S3/105; G03F7/20; H01S3/0943; H01S3/10

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

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2022
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2022
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2022/085146 A1 (GIGAPHOTON INC) 28 April 2022 (2022-04-28)	1, 6-11, 16-20
A	paragraphs [0001]-[0003], [0010]-[0073], fig. 1-18	2-5, 12-15
Y	JP 2008-16544 A (KOMATSU LTD) 24 January 2008 (2008-01-24)	1, 6-11, 16-20
A	paragraphs [0068]-[0077], fig. 12	2-5, 12-15
Y	JP 11-26856 A (KOMATSU LTD) 29 January 1999 (1999-01-29)	1, 6-11, 16-20
A	paragraphs [0067]-[0084], fig. 9-10	2-5, 12-15
Y	JP 4-27182 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP) 30 January 1992 (1992-01-30)	1, 6-11, 16-20
A	p. 2, upper right column, line 19 to p. 3, lower right column, line 14	2-5, 12-15
A	JP 11-274632 A (KOMATSU LTD) 08 October 1999 (1999-10-08)	1-20
	entire text, all drawings	

☒ 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

“T” 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

21 September 2022

Date of mailing of the international search report

04 October 2022

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)
 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915
 Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2022/033143

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5095492 A (CYMER LASER TECHNOLOGIES) 10 March 1992 (1992-03-10) entire text, all drawings	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2022/033143

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO	2022/085146	A1	28 April 2022	(Family: none)	
JP	2008-16544	A	24 January 2008	US 2008/0181262 A1 paragraphs [0107]-[0116], fig. 12	
JP	11-26856	A	29 January 1999	(Family: none)	
JP	4-27182	A	30 January 1992	(Family: none)	
JP	11-274632	A	08 October 1999	(Family: none)	
US	5095492	A	10 March 1992	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01S 3/105(2006.01)i; G03F 7/20(2006.01)i; H01S 3/0943(2006.01)i; H01S 3/10(2006.01)i FI: H01S3/105; H01S3/0943; H01S3/10 D; G03F7/20										
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（IPC）） H01S3/105; G03F7/20; H01S3/0943; H01S3/10										
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										
<table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2022年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2022年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2022年	日本国実用新案登録公報	1996-2022年	日本国登録実用新案公報	1994-2022年
日本国実用新案公報	1922-1996年									
日本国公開実用新案公報	1971-2022年									
日本国実用新案登録公報	1996-2022年									
日本国登録実用新案公報	1994-2022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）										
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								
Y A	WO 2022/085146 A1（ギガフォトン株式会社）28.04.2022（2022-04-28） [0001]-[0003], [0010]-[0073], 図1-18	1, 6-11, 16-20 2-5, 12-15								
Y A	JP 2008-16544 A（株式会社小松製作所）24.01.2008（2008-01-24） [0068]-[0077], 図12	1, 6-11, 16-20 2-5, 12-15								
Y A	JP 11-26856 A（株式会社小松製作所）29.01.1999（1999-01-29） [0067]-[0084], 図9-10	1, 6-11, 16-20 2-5, 12-15								
Y A	JP 4-27182 A（三菱電機株式会社）30.01.1992（1992-01-30） 第2頁左上欄第19行-第3頁右下欄第14行	1, 6-11, 16-20 2-5, 12-15								
A	JP 11-274632 A（株式会社小松製作所）08.10.1999（1999-10-08） 全文, 全図	1-20								
☒ 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。										
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な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 </td> <td> “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抵触するものではなく、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 </td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な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抵触するものではなく、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						
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な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抵触するものではなく、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 21.09.2022	国際調査報告の発送日 04.10.2022									
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 浅見 一喜 2K 4783 電話番号 03-3581-1101 内線 3255									

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
A	US 5095492 A (CYMER LASER TECHNOLOGIES) 10.03.1992 (1992 - 03 - 10) 全文, 全図	1-20

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2022/033143

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO	2022/085146	A1	28.04.2022	(ファミリーなし)	
JP	2008-16544	A	24.01.2008	US 2008/0181262 A1 [0107]-[0116], FIG.12	
JP	11-26856	A	29.01.1999	(ファミリーなし)	
JP	4-27182	A	30.01.1992	(ファミリーなし)	
JP	11-274632	A	08.10.1999	(ファミリーなし)	
US	5095492	A	10.03.1992	(ファミリーなし)	