

(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2日(02.06.2016)



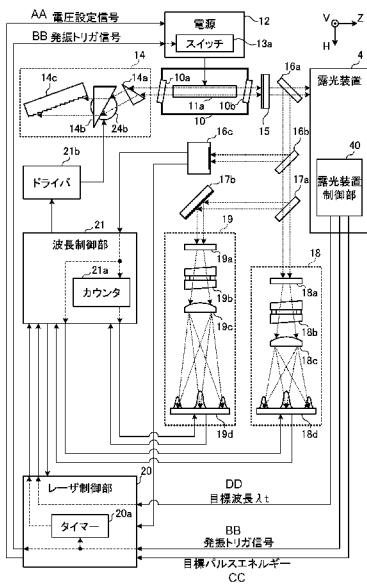
(10) 国際公開番号
WO 2016/084263 A1

- (51) 国際特許分類:
H01S 3/13 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/081660
- (22) 国際出願日: 2014年11月28日(28.11.2014)
- (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: 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: 守屋 正人(MORIYA Masato); 〒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). 太田 毅(OHTA Takeshi); 〒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). 石田 啓介(ISHIDA Keisuke); 〒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). 草間 高史(KUSAMA 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: 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SK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, 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, 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.

[続葉有]

(54) Title: NARROWBAND LASER DEVICE

(54) 発明の名称: 狭帯域化レーザー装置



(57) Abstract: This narrowband laser device may be provided with: a laser resonator which includes an optical component for narrowing a spectral width; an optical system which branches a portion of output pulsed laser light from the laser resonator into first pulsed laser light of a first light quantity and second pulsed laser light of a second light quantity which is lower than the first light quantity; a first wavelength meter which is disposed on the light path of the first pulsed laser light, measures the wavelength of the first pulsed laser light, and outputs a first measurement result; a second wavelength meter which is disposed on the light path of the second pulsed laser light, measures the wavelength of the second pulsed laser light, and outputs a second measurement result; and a control unit which calibrates the first measurement result on the basis of the second measurement result.

(57) 要約: 狭帯域化レーザー装置は、スペクトル幅を狭帯域化する光学素子を含むレーザー共振器と、レーザー共振器から出力されたパルスレーザー光の一部を、第1の光量の第1のパルスレーザー光と第1の光量より低い第2の光量の第2のパルスレーザー光とに分岐させる光学系と、第1のパルスレーザー光の光路に配置され、第1のパルスレーザー光の波長を計測して第1の計測結果を出力する第1の波長計測器と、第2のパルスレーザー光の光路に配置され、第2のパルスレーザー光の波長を計測して第2の計測結果を出力する第2の波長計測器と、第2の計測結果に基づいて、第1の計測結果を校正する制御部と、を備えてもよい。

- 4 Exposure device
- 12 Power supply
- 13a Switch
- 20 Laser control unit
- 20a Timer
- 21 Wavelength control unit
- 21a Counter
- 21b Driver
- 40 Exposure device control unit
- AA Voltage setting signal
- BB Oscillation trigger signal
- CC Target pulse energy
- DD Target wavelength λ_t

WO 2016/084263 A1



(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), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, 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：狭帯域化レーザ装置

技術分野

[0001] 本開示は、狭帯域化レーザ装置に関する。

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ならびに、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 Narrowing 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：米国特許第7 1 9 6 7 9 6号明細書
特許文献2：米国特許第5 4 2 0 8 7 7号明細書
特許文献3：米国特許出願公開第2 0 1 3 / 0 1 7 0 5 0 8号明細書
特許文献4：特開平6 - 1 8 8 5 0 2号公報
特許文献5：特開平5 - 0 0 7 0 3 1号公報

概要

- [0006] 本開示の1つの観点に係る狭帯域化レーザ装置は、スペクトル幅を狭帯域化する光学素子を含むレーザ共振器と、レーザ共振器から出力されたパルスレーザ光の一部を、第1の光量の第1のパルスレーザ光と第1の光量より低い第2の光量の第2のパルスレーザ光とに分岐させる光学系と、第1のパルスレーザ光の光路に配置され、第1のパルスレーザ光の波長を計測して第1の計測結果を出力する第1の波長計測器と、第2のパルスレーザ光の光路に配置され、第2のパルスレーザ光の波長を計測して第2の計測結果を出力する第2の波長計測器と、第2の計測結果に基づいて、第1の計測結果を較正する制御部と、を備えてもよい。
- [0007] 本開示の他の1つの観点に係る狭帯域化レーザ装置は、スペクトル幅を狭帯域化する光学素子を含むレーザ共振器と、レーザ共振器から出力されたパルスレーザ光の波長を計測して、第1の頻度で第1の計測結果を出力する第1の波長計測器と、レーザ共振器から出力されたパルスレーザ光の波長を計測して、第1の頻度より低い第2の頻度で第2の計測結果を出力する第2の波長計測器と、第2の計測結果に基づいて第1の計測結果を較正する制御部と、を備えてもよい。

図面の簡単な説明

[0008] 本開示のいくつかの実施形態を、単なる例として、添付の図面を参照して以下に説明する。

[図1A]図1 Aは、第1の実施形態に係る狭帯域化レーザ装置の構成を模式的に示す。

[図1B]図1 Bは、第1の実施形態に係る狭帯域化レーザ装置の一部の構成を模式的に示す。

[図2]図2は、狭帯域化レーザ装置によるパルスレーザ光の出力パターンの例を示す。

[図3A]図3 Aは、波長の計測結果を校正しない場合に第1のエタロン分光器18が検出する干渉縞に基づく計測波長 λ_1 の例を示すグラフである。

[図3B]図3 Bは、波長の計測結果を校正しない場合の実際の発振波長の例を示すグラフである。

[図3C]図3 Cは、波長の計測結果を校正する処理を説明するためのグラフである。

[図4]図4は、図1に示される波長制御部による波長制御の処理を示すフローチャートである。

[図5]図5は、図4に示される回転ステージを制御する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図6]図6は、図1に示される波長制御部による波長オフセットパラメータの計算処理を示すフローチャートである。

[図7]図7は、図6に示されるリファレンス波長 λ_{20} を計算する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図8]図8は、図5に示される、第1のエタロン分光器から干渉縞のデータを受信して計測波長 λ_1 を計算する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図9]図9は、図6又は図7に示される、第2のエタロン分光器から干渉縞のデータを受信して現在の波長 λ_2 を計算する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図10]図10は、本開示の第2の実施形態に係る狭帯域化レーザ装置におい

て現在の波長 λ_2 を計算する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図11]図11は、本開示の第3の実施形態に係る狭帯域化レーザ装置において用いられる第2のエタロン分光器の構成を示す。

[図12]図12は、制御部の概略構成を示すブロック図である。

実施形態

[0009] <内容>

1. 概要
2. 波長計測器を有する狭帯域化レーザ装置（第1の実施形態）
 2. 1 レーザチャンバ
 2. 2 狭帯域化モジュール
 2. 3 出力結合ミラー
 2. 4 エネルギーセンサ
 2. 5 エタロン分光器
 2. 6 制御部
 2. 7 パルスレーザ光の出力パターン
 2. 8 波長制御
 2. 9 フローチャート
 2. 9. 1 波長制御
 2. 9. 2 波長オフセットパラメータの計算
3. 現在の波長 λ_2 の計算のバリエーション（第2の実施形態）
4. エタロン分光器のバリエーション（第3の実施形態）
5. 制御部の構成

[0010] 以下、本開示の実施形態について、図面を参照しながら詳しく説明する。

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

。

[0011] 1. 概要

ダブルパターンやトリプルパターンによる露光を行う露光装置においては、狭帯域化レーザ装置の発振波長の変動により縮小投影レンズの焦点の位置ずれが起こり得る。従って、狭帯域化レーザ装置の発振波長の制御が重要であり得る。波長制御のために、狭帯域化レーザ装置にはエタロン分光器が搭載されてもよい。エタロン分光器によるレーザ光の波長の計測結果に基づいて、波長制御が行われてもよい。

[0012] しかしながら、狭帯域化レーザ装置の発振条件の変化、例えばデューティの変化により、エタロン分光器の特性に変動が生じ得ることがわかった。エタロン分光器の特性が変動すると、エタロン分光器による波長の計測結果に基づいて制御される狭帯域化レーザ装置の発振波長が意図せずに変化し得る。その結果、露光性能に影響を及ぼすことがあり得る。

[0013] 本開示の1つの観点によれば、パルスレーザ光の一部を、第1の光量の第1のパルスレーザ光と第1の光量より低い第2の光量の第2のパルスレーザ光とに分岐させてもよい。第1のパルスレーザ光の波長を第1の波長計測器で計測し、第2のパルスレーザ光の波長を第2の波長計測器で計測してもよい。第2の波長計測器の計測結果に基づいて、第1の波長計測器の計測結果を較正してもよい。

第1の波長計測器は、第1の頻度で計測結果を出力してもよい。第2の波長計測器は、第1の頻度より低い第2の頻度で計測結果を出力してもよい。

[0014] 2. 波長計測器を有する狭帯域化レーザ装置（第1の実施形態）

図1A及び図1Bは、第1の実施形態に係る狭帯域化レーザ装置の構成を模式的に示す。図1A及び図1Bに示される狭帯域化レーザ装置は、レーザチャンバ10と、一对の放電電極11a及び11bと、電源12と、狭帯域化モジュール14と、出力結合ミラー15と、を含んでもよい。狭帯域化レーザ装置は、さらに、エネルギーセンサ16cと、第1のエタロン分光器18と、第2のエタロン分光器19と、レーザ制御部20と、波長制御部21と、を含んでもよい。狭帯域化レーザ装置は、図示しない増幅器に入射させ

るシード光をレーザ発振して出力するマスターオシレータであってもよい。

[0015] 図1Aにおいては、一对の放電電極11a及び11bの間の放電方向に略平行な方向からみたレーザ装置の内部構成が示されている。図1Bにおいては、一对の放電電極11a及び11bの間の放電方向に略垂直で、且つ、出力結合ミラー15から出力されるレーザ光の進行方向に略垂直な方向からみたレーザ装置の内部構成が示されている。出力結合ミラー15から出力されるレーザ光の進行方向は、Z方向であってよい。一对の放電電極11a及び11bの間の放電方向は、V方向又は-V方向であってよい。これらの両方に垂直な方向は、H方向であってよい。-V方向は、重力の方向とほぼ一致していてもよい。

[0016] 2. 1 レーザチャンバ

レーザチャンバ10は、例えば、レアガスとしてアルゴンガスやクリプトンガス、ハロゲンガスとしてフッ素ガスや塩素ガス、バッファガスとしてネオンガスやヘリウムガスを含むレーザガスが封入されるチャンバでもよい。レーザチャンバ10の両端にはウインドウ10a及び10bが設けられてもよい。

[0017] 一对の放電電極11a及び11bは、レーザ媒質を放電により励起するための電極として、レーザチャンバ10内に配置されてもよい。一对の放電電極11a及び11b間には、電源12からパルス状の高電圧が印加されてもよい。電源12は、図示しない充電器と、図示しないパルスパワーモジュールと、を含んでもよい。パルスパワーモジュールは、スイッチ13aを含んでもよい。レーザ制御部20からスイッチ13aに発振トリガ信号が入力されると、電源12は、一对の放電電極11a及び11b間に印加される上述のパルス状の高電圧を生成してもよい。

[0018] 一对の放電電極11a及び11b間に高電圧が印加されると、一对の放電電極11a及び11b間に放電が起こり得る。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し得る。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光を放出し得る。

[0019] 図1Aに示されるように、ウィンドウ10a及び10bは、これらのウィンドウに対する光の入射面とHZ平面とが略一致し、かつ、この光の入射角度が略ブリュースター角となるように配置されてもよい。レーザチャンバ10内で発生した光は、ウィンドウ10a及び10bを介してレーザチャンバ10の外部に出射してもよい。

[0020] 2. 2 狭帯域化モジュール

狭帯域化モジュール14は、2つのプリズム14a及び14bと、グレーティング14cと、ホルダ24a~24cと、を含んでもよい。プリズム14aはホルダ24aに支持され、プリズム14bはホルダ24bに支持され、グレーティング14cはホルダ24cに支持されてもよい。

[0021] プリズム14a及び14bは、レーザチャンバ10のウィンドウ10aから出射された光のH方向のビーム幅を拡大させて、その光をグレーティング14cに入射させてもよい。また、プリズム14a及び14bは、グレーティング14cからの反射光のH方向のビーム幅を縮小させるとともに、その光を、ウィンドウ10aを介して、レーザチャンバ10内の放電空間に戻してもよい。

[0022] グレーティング14cは、表面の物質が高反射率の材料によって構成され、表面に多数の溝が所定間隔で形成されていてもよい。各溝は例えば直角三角形の溝であってもよい。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、これら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てもよい。グレーティング14cは、プリズム14a及び14bからグレーティング14cに入射する光の入射角と、所望波長の回折光の回折角とが一致するようにリトロ配置されてもよい。これにより、所望波長付近の光がプリズム14a及び14bを介してレーザチャンバ10に戻されてもよい。

[0023] プリズム14bを支持するホルダ24bは、V軸と平行な軸周りにプリズム14bを回転させる図示しない回転ステージを含んでもよい。プリズム1

4 bを回転させることにより、グレーティング14 cに対する光の入射角度が変更されるので、選択波長が変更され得る。

[0024] 2. 3 出力結合ミラー

出力結合ミラー15の表面には、部分反射膜がコーティングされていてもよい。従って、出力結合ミラー15は、レーザチャンバ10のウィンドウ10 bから出力される光のうちの一部を透過させて出力し、他の一部を反射させてレーザチャンバ10内に戻してもよい。

[0025] 狭帯域化モジュール14と出力結合ミラー15とが、光共振器を構成してもよい。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15との間で往復し、放電電極11 a及び11 bの間の放電空間を通過する度に増幅されレーザ発振し得る。レーザ光は、狭帯域化モジュール14で折り返される度にスペクトル幅が狭帯域化され得る。さらに、上述したウィンドウ10 a及び10 bの配置によって、H方向の偏光成分が選択され得る。こうして増幅されたレーザ光が、出力結合ミラー15から露光装置4に向けて出力され得る。

[0026] 2. 4 エネルギーセンサ

出力結合ミラー15と露光装置4との間のパルスレーザ光の光路には、ビームスプリッタ16 aが配置されていてもよい。ビームスプリッタ16 aは、出力結合ミラー15から出力されたパルスレーザ光を高い透過率で透過させ、出力結合ミラー15から出力されたパルスレーザ光の一部を反射してもよい。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、別のビームスプリッタ16 bが配置されていてもよい。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一部を透過させ、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他の一部を反射してもよい。

[0027] エネルギーセンサ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配置されてもよい。エネルギーセンサ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パルスエネルギー

ーを検出してもよい。エネルギーセンサ16cは、検出されたパルスエネルギーのデータを、レーザ制御部20と波長制御部21との両方に出力してもよい。エネルギーセンサ16cは、フォトダイオード、光電管、あるいは焦電素子であってもよい。

[0028] 2.5 エタロン分光器

ビームスプリッタ16bを透過したパルスレーザ光の光路には、ビームスプリッタ17aが配置されていてもよい。ビームスプリッタ17aは、ビームスプリッタ16bを透過したパルスレーザ光の一部を透過させ、ビームスプリッタ16bを透過したパルスレーザ光の他の一部を反射してもよい。ビームスプリッタ17aを透過したパルスレーザ光の光量は、ビームスプリッタ17aによって反射されたパルスレーザ光の光量より高くてもよい。

[0029] ビームスプリッタ17aを透過したパルスレーザ光の光路には、第1のエタロン分光器18が配置されてもよい。

ビームスプリッタ17aによって反射されたパルスレーザ光の光路には、高反射ミラー17bが配置されてもよい。高反射ミラー17bは、ビームスプリッタ17aによって反射されたパルスレーザ光を高い反射率で反射してもよい。高反射ミラー17bによって反射されたパルスレーザ光の光路には、第2のエタロン分光器19が配置されてもよい。

[0030] 第1のエタロン分光器18及び第2のエタロン分光器19は、それぞれ、拡散プレート18a及び19aと、エタロン18b及び19bと、集光レンズ18c及び19cと、ラインセンサ18d及び19dと、を含んでもよい。

[0031] 拡散プレート18a及び19aの各々は、表面に多数の凹凸を有する透過型の光学素子であってもよい。拡散プレート18a及び19aは、それぞれに入射したパルスレーザ光を散乱光として透過させてもよい。拡散プレート18a及び19aを透過した散乱光は、それぞれ、エタロン18b及び19bに入射してもよい。

[0032] エタロン18b及び19bの各々は、2枚の所定の反射率Rの部分反射ミ

ラーを含むエアギャップエタロンであってもよい。このエアギャップエタロンにおいては、2枚の部分反射ミラーが、所定距離のエアギャップdを有して対向し、スペーサを介して貼りあわせられていてもよい。

エタロン18bに入射した光の入射角 θ に応じて、2枚の部分反射ミラーの間で往復せずにエタロン18bを透過する光と、2枚の部分反射ミラーの間で往復した後でエタロン18bを透過する光との光路差が異なり得る。エタロン18bに入射した光は、上記の光路差が波長 λ の整数m倍の時に高い透過率でエタロン18bを透過し得る。

エタロンの基本式を以下に示す。

$$m\lambda = 2nd\cos\theta \quad (1)$$

ここで、nはエアギャップ間での屈折率であってもよい。

エタロン18bに入射した波長 λ の光は、(1)式を満たす入射角 θ になった時に、高い透過率でエタロンを通過し得る。

従って、エタロン18bに入射する光の波長に応じて、エタロン18bを高い透過率で透過する光の入射角 θ が異なり得る。エタロン19bについても同様となり得る。

エタロン18b及び19bを透過した光は、それぞれ、集光レンズ18c及び19cに入射してもよい。

[0033] 集光レンズ18c及び19cの各々は、集光性能を有する光学素子であってもよい。集光レンズ18c及び19cを透過した光は、集光レンズ18c及び19cからそれぞれの焦点距離に相当する位置に配置されたラインセンサ18d及び19dに入射してもよい。集光レンズ18c及び19cを透過した光は、それぞれ、ラインセンサ18d及び19dにおいて干渉縞を形成し得る。

特許文献5に記載されているように、(1)式から、この干渉縞の半径の2乗は、パルスレーザー光の波長 λ と比例関係となり得る。

[0034] ラインセンサ18d及び19dは、それぞれ、集光レンズ18c及び19cを透過した光を受光し、干渉縞を検出してもよい。ラインセンサ18d及

び19dは、波長制御部21からデータ出力トリガを受信してもよい。ラインセンサ18d及び19dは、データ出力トリガを受信した場合に、干渉縞のデータを波長制御部21に出力してもよい。なお、ラインセンサ18d及び19dの代わりに、図示しない2次元のイメージセンサが用いられてもよい。

[0035] 本開示においては、第1のエタロン分光器18に入射するパルスレーザー光の光量よりも、第2のエタロン分光器19に入射するパルスレーザー光の光量が低くてもよい。好ましくは、第2のエタロン分光器19の1つのパルス当たりの入射光量は第1のエタロン分光器18の1つのパルス当たりの入射光量の約1/5以上、約1/12以下であってもよい。従って、パルスレーザー光のエネルギーによる第1のエタロン分光器18の特性変化よりも、パルスレーザー光のエネルギーによる第2のエタロン分光器19の特性変化が小さくなり得る。第2のエタロン分光器19の出力に基づいて計算される波長を用いて、第1のエタロン分光器18の出力に基づいて計算される波長を校正することにより、より精密な波長制御が可能となり得る。

[0036] また、第1のエタロン分光器18の分解能よりも、第2のエタロン分光器19の分解能が高くてもよい。第2のエタロン分光器19の分解能が高いことにより、第1のエタロン分光器18の出力に基づいて計算される波長をより精密に校正することが可能となり得る。なお、第1のエタロン分光器18と第2のエタロン分光器19の装置関数の半値全幅をそれぞれ $\Delta\lambda_{1F1}$ と $\Delta\lambda_{1F2}$ とすると、 $\Delta\lambda_{1F1}$ が $\Delta\lambda_{1F2}$ より大きいことが好ましい。さらに好ましくは、 $\Delta\lambda_{1F1}/\Delta\lambda_{1F2}$ の値が5以上、7以下であってもよい。エタロン分光器の装置関数は、シングル縦モードの波長193nmのレーザー光をエタロン分光器に入射することによって計測し得る。

具体的なエタロンの仕様としては、第1のエタロン分光器18と第2のエタロン分光器19のフリースペクトラルレンジ(= $\lambda^2/(2nd)$)をそれぞれ FSR_1 と FSR_2 とすると、 FSR_1 が FSR_2 より大きいことが好ましい。さらに好ましくは、 FSR_1/FSR_2 の値が5以上、7以下であって

もよい。そして、好ましくは、集光レンズ19dの焦点距離が集光レンズ18dの焦点距離よりも長くてもよい。

[0037] 2.6 制御部

露光装置4は、露光装置制御部40を含んでもよい。露光装置制御部40は、図示しないウエハステージの移動などの制御を行ってもよい。露光装置制御部40は、レーザ制御部20に対し、目標波長 λ_t のデータと、目標パルスエネルギーのデータと、発振トリガ信号とを出力してもよい。

[0038] レーザ制御部20は、露光装置制御部40から受信した目標波長 λ_t のデータを、波長制御部21に送信してもよい。

レーザ制御部20は、露光装置制御部40から受信した目標パルスエネルギーのデータと、エネルギーセンサ16cから受信したパルスエネルギーのデータとを参照して、電源12における充電電圧の設定値を制御してもよい。レーザ制御部20が電源12における充電電圧の設定値を制御することにより、パルスレーザ光のパルスエネルギーが制御されてもよい。

[0039] レーザ制御部20は、露光装置制御部40から受信した発振トリガ信号に基づいて、電源12に含まれるスイッチ13aに発振トリガ信号を出力してもよい。

レーザ制御部20は、露光装置制御部40から受信した発振トリガ信号に基づいて、発振インターバル ΔT を計測してもよい。レーザ制御部20は、発振インターバル ΔT を計測するためのタイマー20aを有してもよい。発振インターバル ΔT は、1つの発振トリガ信号を受信してから次の発振トリガ信号を受信するまでの期間であってもよい。レーザ制御部20は、計測した発振インターバル ΔT のデータを、波長制御部21に出力してもよい。

[0040] 波長制御部21は、エネルギーセンサ16cからパルスエネルギーのデータを受信したときに、第1のエタロン分光器18に含まれるラインセンサ18dに上述のデータ出力トリガを出力してもよい。すなわち、第1のエタロン分光器18は、1つのパルスレーザ光を受光する毎に、干渉縞のデータを

波長制御部 21 に出力してもよい。

[0041] 波長制御部 21 は、エネルギーセンサ 16c からパルスエネルギーのデータを所定回数受信したときに、第 2 のエタロン分光器 19 に含まれるラインセンサ 19d に上述のデータ出力トリガを出力してもよい。すなわち、第 2 のエタロン分光器 19 は、パルスレーザ光を所定回数受光する毎に、所定回数分の干渉縞のデータの積算値を波長制御部 21 に出力してもよい。所定回数は、後述の J_{max} でもよい。所定回数をカウントするために、波長制御部 21 はカウンタ 21a を有していてもよい。

[0042] 波長制御部 21 は、第 1 のエタロン分光器 18 から干渉縞のデータを受信して、干渉縞の半径を計測し、干渉縞の半径に基づいて、計測波長 λ_1 を計算してもよい。

波長制御部 21 は、第 2 のエタロン分光器 19 から干渉縞のデータの積算値を受信して、干渉縞の半径を計測し、干渉縞の半径に基づいて、現在の波長 λ_2 を計算してもよい。

[0043] 波長制御部 21 は、第 2 のエタロン分光器 19 で検出された干渉縞に基づいて現在の波長 λ_2 に基づいて、後述の波長オフセットパラメータ λ_{ofst} を計算してもよい。

波長制御部 21 は、第 1 のエタロン分光器 18 による計測波長 λ_1 と、波長オフセットパラメータ λ_{ofst} とに基づいて、校正波長 λ_{1c} を計算してもよい。波長制御部 21 は、校正波長 λ_{1c} が目標波長 λ_t に近づくように、プリズム 14b を支持するホルダ 24b の回転ステージを制御してもよい。回転ステージの制御は、ホルダ 24b の回転ステージに接続されたドライバ 21b に、波長制御部 21 が制御信号を送信することによって行われてもよい。

[0044] 2. 7 パルスレーザ光の出力パターン

図 2 は、狭帯域化レーザ装置によるパルスレーザ光の出力パターンの例を示す。図 2 における上側のグラフには、第 1 の半導体ウエハを露光するための発光期間 T_{w1} と、第 2 の半導体ウエハを露光するための発光期間 T_{w2}

と、これらの発光期間の間のウエハ交換期間 T_{wc} とが示されている。ウエハ交換期間 T_{wc} においては、発光が行われなくてもよい。あるいは、ウエハ交換期間 T_{wc} において、後述の調整発振が行われてもよい。

[0045] 第1の半導体ウエハを露光するための発光期間 T_{w1} には、第1のチップ領域を露光するための発振期間 T_{c1} 、第2のチップ領域を露光するための発振期間 T_{c2} 等が含まれてもよい。第2の半導体ウエハを露光するための発光期間 T_{w2} についても同様でよい。

[0046] 図2における下側のグラフには、第1のチップ領域を露光するための発振期間 T_{c1} と、第2のチップ領域を露光するための発振期間 T_{c2} とが、図2における上側のグラフよりも拡大されて示されている。図2における下側のグラフには、それらの発振期間の間に図示しないウエハステージの移動を行うための発振休止期間 T_{off} も示されている。

[0047] 第1のチップ領域を露光するための発振期間 T_{c1} においては、例えば1 kHz以上6 kHz以下の高い繰り返し周波数でパルスレーザ光の発振が行われてもよい。第2のチップ領域を露光するための発振期間 T_{c2} も同様でよい。

[0048] パルスレーザ光のデューティ $Duty$ は、以下の式によって計算されてもよい。

$$Duty = (T_{on} / (T_{on} + T_{off})) \times 100 (\%)$$

ここで、 T_{on} は、1つのチップ領域を露光するための発振期間であってよい。 T_{off} は、次の発振期間までの間の発振休止期間であってよい。

[0049] あるいは、パルスレーザ光のデューティ $Duty$ は、以下の式によって計算されてもよい。

$$Duty = (N / (f_{max} \cdot T_s)) \times 100 (\%)$$

ここで、 f_{max} は、当該狭帯域化レーザ装置の最大繰り返し周波数であってよい。 T_s は、デューティ $Duty$ を取得するためのサンプル期間であってよい。 N は、サンプル期間 T_s における発振パルス数であってよい。

以上のように、本明細書では、所定の時間 T_{on} の間に所定の繰り返し周

波数 f で発振し、所定時間 $T \propto f$ 発振を休止するようなレーザ発振の運転パターンをバースト運転と呼ぶことがある。

[0050] 2. 8 波長制御

図 3 A は、波長の計測結果を較正しない場合に第 1 のエタロン分光器 1 8 が検出する干渉縞に基づく計測波長 λ_1 の例を示すグラフである。波長の計測結果を較正しない場合、波長制御部 2 1 は、計測波長 λ_1 が目標波長 λ_t に近づくように、プリズム 1 4 b を支持するホルダ 2 4 b の回転ステージを制御してもよい。従って、計測波長 λ_1 は、目標波長 λ_t 付近の略一定値に維持されてもよい。

[0051] 図 3 B は、波長の計測結果を較正しない場合の実際の発振波長の例を示すグラフである。計測波長 λ_1 を略一定値に維持した場合、デューティが低い期間においては実際の発振波長も目標波長 λ_t 付近の略一定値となるが、デューティが高くなると実際の発振波長が目標波長 λ_t からずれることが判明した。

[0052] このような波長のずれが生じる原因として、以下の点が考えられる。

第 1 に、エタロンに入射するパルスレーザ光のエネルギーによってエタロンの温度が変化し、その結果、計測波長がずれたと推定される。

第 2 に、エタロン分光器の分解能が低いために、スペクトル波形が変化したときの波長の変化によって、計測波長がずれたと推定される。

[0053] そこで、本開示においては、第 2 のエタロン分光器 1 9 の出力に基づく波長の計測結果を用いて、第 1 のエタロン分光器 1 8 の出力に基づく波長の計測結果を較正してもよい。

[0054] 図 3 C は、波長の計測結果を較正する処理を説明するためのグラフである。図 3 C の詳細については、後述する。

[0055] 2. 9 フローチャート

2. 9. 1 波長制御

図 4 は、図 1 に示される波長制御部による波長制御の処理を示すフローチャートである。波長制御部 2 1 は、以下の処理により、目標波長 λ_t に基づ

いて、狭帯域化レーザ装置の発振波長を制御してもよい。図5のS241を参照しながら後述するように、図4に示される波長制御の処理は、パルスレーザ光に含まれる1つのパルス毎に実行されてもよい。

- [0056] まず、S240において、波長制御部21は、目標波長 λ_t に基づいて、プリズム14bを支持するホルダ24bの回転ステージを制御してもよい。この処理の詳細については、図5を参照しながら後述する。
- [0057] 次に、S249において、波長制御部21は、波長制御を中止するか否かを判定してもよい。例えば、波長制御よりも波長制御以外のレーザの制御を優先させることが必要な場合には、波長制御部21は、波長制御を中止すると判定してもよい。波長制御を中止しない場合（S249；NO）、波長制御部21は、処理を上述のS240に戻してもよい。波長制御を中止する場合（S249；YES）、波長制御部21は、本フローチャートの処理を終了してもよい。
- [0058] 図5は、図4に示される回転ステージを制御する処理の詳細を示すフローチャートである。図5に示される処理は、図4に示されるS240のサブルーチンとして、波長制御部21によって行われてもよい。
- [0059] まず、S241において、波長制御部21は、狭帯域化レーザ装置がレーザ発振したか否かを判定してもよい。例えば、波長制御部21は、エネルギーセンサ16cからパルスエネルギーのデータを1回受信した場合に、狭帯域化レーザ装置がレーザ発振したと判定してもよい。狭帯域化レーザ装置がレーザ発振していない場合（S241；NO）、波長制御部21は、狭帯域化レーザ装置がレーザ発振するまで待機してもよい。狭帯域化レーザ装置がレーザ発振した場合（S241；YES）、波長制御部21は、処理をS242に進めてもよい。
- [0060] S242において、波長制御部21は、第1のエタロン分光器18から干渉縞のデータを受信して、計測波長 λ_1 を計算してもよい。この処理の詳細については、図8を参照しながら後述する。
- [0061] 次に、S245において、波長制御部21は、波長オフセットパラメータ

λ_{ofst} を図示しないメモリから読み込んでもよい。波長オフセットパラメータ λ_{ofst} は、後述の図6に示される処理によって計算されたものでもよい。

[0062] 次に、S246において、波長制御部21は、計測波長 λ_1 を以下の式によって校正し、校正波長 λ_{1c} を計算してもよい。

$$\lambda_{1c} = \lambda_1 + \lambda_{\text{ofst}}$$

[0063] 次に、S247において、波長制御部21は、校正波長 λ_{1c} と目標波長 λ_t との差 $\Delta\lambda$ を、以下の式によって計算してもよい。

$$\Delta\lambda = \lambda_{1c} - \lambda_t$$

[0064] 次に、S248において、波長制御部21は、校正波長 λ_{1c} と目標波長 λ_t との差 $\Delta\lambda$ が0に近づくように、プリズム14bを支持するホルダ24bの回転ステージを制御してもよい。

以上の処理により、波長制御部21は、目標波長 λ_t に基づく制御を行ってもよい。

[0065] 2.9.2 波長オフセットパラメータの計算

図6は、図1に示される波長制御部による波長オフセットパラメータの計算処理を示すフローチャートである。波長制御部21は、以下の処理により、第2のエタロン分光器19から干渉縞のデータの積算値を受信して、波長オフセットパラメータ λ_{ofst} を計算してもよい。

[0066] まず、S100において、波長制御部21は、目標波長 λ_t のデータを読み込んでもよい。目標波長 λ_t のデータは、レーザ制御部20から受信したものでよい。

[0067] 次に、S200において、波長制御部21は、目標波長 λ_t で低いデュリティによる調整発振を行い、第2のエタロン分光器19から干渉縞のデータの積算値を受信して、リファレンス波長 λ_{20} を計算してもよい。この処理の詳細については、図7を参照しながら後述する。

[0068] 次に、S300において、波長制御部21は、波長オフセットパラメータ λ_{ofst} の初期値として、波長オフセットパラメータ λ_{ofst} を0にセットしてもよい。

[0069] 次に、S400において、波長制御部21は、レーザ制御部20のタイマー20aが計測した発振インターバル ΔT の値を読み込んでよい。

次に、S500において、波長制御部21は、バースト運転が始まったか否かを判定してもよい。ここで、バースト運転とは、発振インターバル ΔT が閾値 K_{max} 以下で繰り返しパルス発振する状態を意味し得る。閾値 K_{max} は、例えば、1秒以上、2秒以下の値でもよい。バースト運転が始まっていない場合(S500; NO)、波長制御部21は、処理を上述のS300に戻してもよい。バースト運転が始まった場合(S500; YES)、波長制御部21は、処理をS600に進めてもよい。

[0070] S600において、波長制御部21は、第2のエタロン分光器19から干渉縞のデータの積算値を受信して、現在の波長 λ_2 を計算してもよい。この処理の詳細については、図9を参照しながら後述する。図9のS604~S611を参照しながら後述するように、現在の波長 λ_2 の値は、パルスレーザ光に含まれる($J_{max} \times n$)個のパルス毎に計算されてもよい。

[0071] 次に、S700において、波長制御部21は、現在の波長 λ_2 とリファレンス波長 λ_{20} との差 $\Delta\lambda_2$ を、以下の式により計算してもよい。

$$\Delta\lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_{20}$$

[0072] 次に、S800において、波長制御部21は、次の式に示されるように、現在の波長オフセットパラメータ λ_{ofst} の値に差 $\Delta\lambda_2$ を加算することにより、波長オフセットパラメータ λ_{ofst} の値を更新してもよい。

$$\lambda_{ofst} = \lambda_{ofst} + \Delta\lambda_2$$

[0073] 次に、S900において、波長制御部21は、目標波長 λ_t が変更されたか否かを判定してもよい。目標波長 λ_t が変更されない場合(S900; NO)、波長制御部21は、処理を上述のS400に戻してもよい。目標波長 λ_t が変更された場合(S900; YES)、波長制御部21は、処理を上述のS100に戻してもよい。

以上のようにして、波長制御部21は、波長オフセットパラメータ λ_{ofst} を計算してもよい。こうして計算された波長オフセットパラメータ λ_{ofst} の

値が、図5を参照しながら上述したS245及びS246において、計測波長 λ_1 を校正するために用いられてもよい。

[0074] 図7は、図6に示されるリファレンス波長 λ_{20} を計算する処理の詳細を示すフローチャートである。図7に示される処理は、図6に示されるS200のサブルーチンとして、波長制御部21によって行われてもよい。

[0075] まず、S210において、波長制御部21は、調整発振が可能か否かを判定してもよい。調整発振が可能な場合とは、例えば、以下のような場合でもよい。

(1) 露光装置制御部40からリファレンス波長 λ_{20} を取得する命令を受信した場合

(2) 第1の半導体ウエハを露光するための発光期間 T_{w1} と第2の半導体ウエハを露光するための発光期間 T_{w2} との間のウエハ交換期間 T_{wc} である場合

(3) レーザ装置が半導体ウエハを露光するための露光運転をする前の立ち上げ時

調整発振が可能でない場合(S210; NO)、波長制御部21は、調整発振が可能となるまで待機してもよい。調整発振が可能である場合(S210; YES)、波長制御部21は、処理をS220に進めてもよい。

[0076] S220において、波長制御部21は、波長オフセットパラメータ λ_{ofst} の初期値として、波長オフセットパラメータ λ_{ofst} を0にセットしてもよい。

[0077] 次に、S230において、波長制御部21は、狭帯域化レーザ装置が低いデューティでレーザ発振するように、レーザ制御部20に信号を送信してもよい。低いデューティでのレーザ発振が、調整発振と呼ばれてもよい。低いデューティとは、例えば、繰り返し周波数が100Hz程度でレーザ発振させる場合のデューティであってもよい。この場合のデューティは $100/6000=1.7\%$ となる。レーザ制御部20は、調整発振を行うときは、露光装置制御部40から発振トリガ信号を受信することなく、電源12のスイ

ッチ13aに発振トリガ信号を出力してもよい。

[0078] 次に、S240において、波長制御部21は、目標波長 λ_t に基づいて、プリズム14bを支持するホルダ24bの回転ステージを制御してもよい。この処理は、図4及び図5を参照しながら説明したものと同様でよい。ここで、S220において説明したように、波長オフセットパラメータ λ_{ofst} は、0であってもよい。すなわち、計測波長 λ_1 の較正波長 λ_{1c} は、計測波長 λ_1 と等しくてもよい。S230において説明したようにデューティが低い期間においては、計測波長 λ_1 を目標波長 λ_t に合わせることにより、実際の発振波長も目標波長 λ_t 付近に近づき得る。

[0079] 次に、S250において、波長制御部21は、図5を参照しながら説明した差 $\Delta\lambda$ が許容範囲内か否かを判定してもよい。例えば、差 $\Delta\lambda$ の絶対値が所定の閾値 $\Delta\lambda_r$ 以下であるか否かを判定してもよい。差 $\Delta\lambda$ が許容範囲内でない場合(S250; NO)、波長制御部21は、処理を上述のS240に戻してもよい。差 $\Delta\lambda$ が許容範囲内である場合(S250; YES)、波長制御部21は、処理をS260に進めてもよい。

[0080] S260において、波長制御部21は、第2のエタロン分光器19から干渉縞のデータの積算値を受信して、現在の波長 λ_2 を計算してもよい。この処理は、図6を参照しながら説明したS600と同様でもよい。この処理の詳細については、図9を参照しながら後述する。

[0081] 次に、S270において、波長制御部21は、リファレンス波長 λ_{20} を設定してもよい。リファレンス波長 λ_{20} として、S260において計算された現在の波長 λ_2 が設定されてもよい。

[0082] S270の後、波長制御部21は、図6を参照しながら説明したS300に処理を移行してもよい。

以上のようにして、波長制御部21は、リファレンス波長 λ_{20} を計算してもよい。

[0083] 図8は、図5に示される、第1のエタロン分光器から干渉縞のデータを受信して計測波長 λ_1 を計算する処理の詳細を示すフローチャートである。図

8に示される処理は、図5に示されるS242のサブルーチンとして、波長制御部21によって行われてもよい。

[0084] まず、S243において、波長制御部21は、第1のエタロン分光器18のラインセンサ18dで検出された干渉縞のデータを読み込んでもよい。

次に、S244において、波長制御部21は、干渉縞のデータに基づいて、計測波長 λ_1 を計算してもよい。

[0085] S244の後、波長制御部21は、図5を参照しながら説明したS245に処理を移行してもよい。

以上のようにして、波長制御部21は、計測波長 λ_1 を計算してもよい。

[0086] 図9は、図6又は図7に示される、第2のエタロン分光器から干渉縞のデータを受信して現在の波長 λ_2 を計算する処理の詳細を示すフローチャートである。図9に示される処理は、図6に示されるS600又は図7に示されるS260のサブルーチンとして、波長制御部21によって行われてもよい。

[0087] まず、S601において、波長制御部21は、較正間隔を計測するための図示しないタイマーT2の値をリセットし、タイマーT2のカウントをスタートしてもよい。

[0088] 次に、S602において、波長制御部21は、第2のエタロン分光器19のラインセンサ19dの積算パルス数 J_{max} をセットしてもよい。積算パルス数 J_{max} は、例えば、40パルス程度でもよい。なお、波長制御部21の内部にあるカウンタ21aに積算パルス数 J_{max} をセットし、カウンタ21aがエネルギーセンサ16cからのパルス数を計測して、ラインセンサ19dにデータの読出し信号を送信する実施形態を示すが、本開示はこの実施形態には限定されない。ソフトウェアで、エネルギーセンサ16cからのパルス数を計測して、ラインセンサ19dにデータの読出し信号を送信し、カウンタをリセットして、再びパルス数を計測してもよい。

[0089] 次に、S603において、波長制御部21は、カウンタnの値を1にセットしてもよい。第2のエタロン分光器19のラインセンサ19dは、パルス

レーザ光の干渉縞の検出を開始してもよい。第2のエタロン分光器19のラインセンサ19dは、複数のパルスの干渉縞を検出し、検出した干渉縞のデータを積算してもよい。

[0090] 次に、S604において、波長制御部21は、第2のエタロン分光器19のラインセンサ19dが受光したパルス数が、積算パルス数 J_{max} に達したか否かを判定してもよい。ラインセンサ19dが受光したパルス数が積算パルス数 J_{max} に達していない場合(S604; NO)、波長制御部21は、ラインセンサ19dが受光したパルス数が積算パルス数 J_{max} に達するまで待機してもよい。ラインセンサ19dが受光したパルス数が、積算パルス数 J_{max} に達した場合(S604; YES)、波長制御部21は、処理をS605に進めてもよい。

[0091] S605において、波長制御部21は、第2のエタロン分光器19のラインセンサ19dで検出された干渉縞の積算値のデータを読み込んでもよい。

[0092] 次に、S606において、波長制御部21は、干渉縞の積算値のデータに基づいて、 n 番目の波長 λ_{2n} を計算してもよい。

[0093] 次に、S607において、波長制御部21は、較正間隔を計測するためのタイマー T_2 の値が、較正間隔 T_{in} 以上となったか否かを判定してもよい。較正間隔を計測するためのタイマー T_2 の値が、較正間隔 T_{in} 以上となっていない場合(S607; NO)、波長制御部21は、S610に処理を進めてもよい。較正間隔を計測するためのタイマー T_2 の値が、較正間隔 T_{in} 以上となった場合(S607; YES)、波長制御部21は、S611に処理を進めてもよい。較正間隔 T_{in} は、例えば、100msであってもよい。

[0094] S610において、波長制御部21は、カウンタ n の値に1を加算してカウンタ n の値を更新してもよい。S610の後、波長制御部21は、処理を上述のS604に戻してもよい。

[0095] S611において、波長制御部21は、以下の式により、第1番目から第 n 番目までの波長の平均値を現在の波長 λ_2 として計算してもよい。

$$\lambda 2 = (\lambda 2 1 + \lambda 2 2 + \dots + \lambda 2 n) / n$$

以上の処理により、波長制御部 2 1 は、現在の波長 $\lambda 2$ を計算してもよい。以上のようにして計算された現在の波長 $\lambda 2$ が、図 7 を参照しながら上述した S 2 7 0 においてリファレンス波長 $\lambda 2 0$ を設定するために用いられてもよい。また、以上のようにして計算された現在の波長 $\lambda 2$ が、図 6 を参照しながら上述した S 7 0 0 及び S 8 0 0 において波長オフセットパラメータ $\lambda ofst$ を更新するために用いられてもよい。

[0096] 図 3 C を再び参照する。本開示においては、図 5 を参照しながら上述したように、較正波長 $\lambda 1 c$ と目標波長 λt との差が 0 に近くなるように、プリズム 1 4 b を支持するホルダ 2 4 b の回転ステージが制御されてもよい。また、図 9 を参照しながら上述したように、較正間隔 $T i n$ の期間における波長 $\lambda 2 1$ 、 $\lambda 2 2$ 、 \dots 、 $\lambda 2 n$ の平均値を現在の波長 $\lambda 2$ として計算してもよい。

[0097] 較正波長 $\lambda 1 c$ と目標波長 λt とに基づく上述の制御によれば、デューティが低い調整発振においては、波長 $\lambda 2 n$ は目標波長 λt の付近で安定し得る。しかしながら、デューティが高いバースト運転が始まると、第 1 のエタロン分光器 1 8 の特性が変化する等の原因により、波長 $\lambda 2 n$ は目標波長 λt から乖離し得る。そこで、デューティが低い調整発振において計算したリファレンス波長 $\lambda 2 0$ と現在の波長 $\lambda 2$ との差 $\Delta \lambda 2$ に基づいて、波長オフセットパラメータ $\lambda ofst$ を更新してもよい。そして、第 1 のエタロン分光器 1 8 による計測波長 $\lambda 1$ に波長オフセットパラメータ $\lambda ofst$ を加算することにより、較正波長 $\lambda 1 c$ を計算してもよい。これにより、波長 $\lambda 2 n$ と目標波長 λt との差を低減し、より精密な波長制御が可能となり得る。

[0098] 較正波長 $\lambda 1 c$ と目標波長 λt とに基づく上述の制御は、パルスレーザ光に含まれる 1 つのパルス毎に実行されてもよい。これに対し、差 $\Delta \lambda 2$ に基づく波長オフセットパラメータ $\lambda ofst$ の更新は、パルスレーザ光に含まれる ($Jmax \times n$) 個のパルス数毎に実行されてもよい。このように、波長制御の頻度よりも較正の頻度を低くしたので、較正のための波長 $\lambda 2 n$ のデー

タを蓄積して平均化することによって、より正確な較正を行うことができる。

[0099] 3. 現在の波長 λ_2 の計算のバリエーション（第2の実施形態）

図10は、本開示の第2の実施形態に係る狭帯域化レーザ装置において現在の波長 λ_2 を計算する処理の詳細を示すフローチャートである。第2の実施形態は、現在の波長 λ_2 の計算において第1の実施形態と異なってもよい。

[0100] 図10に示されるS602～S606の処理と、S610、S611の処理は、図9を参照しながら説明した第1の実施形態における処理と同様でよい。第2の実施形態においては、較正間隔 T_{in} を判定するためのタイマー T_2 は、用いられなくてもよい。

[0101] 図10に示されるように、S608において、波長制御部21は、レーザ制御部20のタイマー20aが計測した発振インターバル ΔT の値を読み込んでよい。なお、発振インターバル ΔT の計測はレーザ制御部の中のタイマー20aで行う実施形態を示したが、この実施形態に限定されることなく、ソフトウェア処理で発振インターバル ΔT の計測を行ってもよい。

[0102] 次に、S609において、波長制御部21は、発振休止となったか否かを判定してもよい。ここで、発振休止とは、発振インターバル ΔT の値が閾値 K_b 以上となった状態を意味し得る。閾値 K_b は、例えば、0.1秒以上、0.2秒以下の値でもよい。発振休止となっていない場合（S609；NO）、波長制御部21は、処理をS610に進めてもよい。発振休止となった場合（S609；NO）、波長制御部21は、処理をS611に進めて現在の波長 λ_2 を計算してもよい。

[0103] 第2の実施形態によれば、波長制御部21は、パルスレーザ光が発振休止する毎に、現在の波長 λ_2 を計算し、波長オフセットパラメータ λ_{ofst} を更新し得る。このようにバースト毎に波長オフセットパラメータ λ_{ofst} を更新し、実際の露光するチップ領域ごとに波長較正できるので、チップ領域内で露光される波長の変動が抑制され得る。

[0104] 本開示はこれに限らず、例えば、上述のS608の代わりにカウンタnの値を読み込んでもよい。そして、上述のS609の代わりにカウンタnの値が上限値 n_{max} に達したか否かを判定してもよい。カウンタnの値が上限値 n_{max} に達したときに、処理をS611に進めて現在の波長 λ_2 を計算してもよい。この場合、一定のパルス数毎に波長オフセットパラメータ λ_{offset} を更新し得る。ここで、一定のパルス数は、 $J_{max} \times n_{max}$ であってもよい。

[0105] 4. エタロン分光器のバリエーション（第3の実施形態）

図11は、本開示の第3の実施形態に係る狭帯域化レーザ装置において用いられる第2のエタロン分光器の構成を示す。第3の実施形態において、第2のエタロン分光器19は、拡散プレート19aとエタロン19bとの間に、光ファイバー19eが配置されてもよい。

[0106] ビームスプリッタ17aと拡散プレート19aとの間には、集光レンズ19fが配置されてもよい。集光レンズ19fによってパルスレーザ光を集光することにより、拡散プレート19aを通過した散乱光が光ファイバー19eの入射端部19gに入射するようにしてもよい。光ファイバー19eの入射端部19gに入射した散乱光は、光ファイバー19eの出射端部19hからエタロン19bに向けて出射してもよい。

さらに、光ファイバー19eを振動させる加振装置19iが設けられてもよい。加振装置19iは図示しないアクチュエータを備えてもよい。パルスレーザ光の干渉性が高い場合に、加振装置19iによって光ファイバー19eを振動させることにより、干渉縞に加算されるスペckルノイズが低減し得る。その結果、パルスレーザ光の波長の計測精度が向上し得る。

[0107] 5. 制御部の構成

図12は、制御部の概略構成を示すブロック図である。

上述した実施の形態におけるレーザ制御部20、波長制御部21等の制御部は、コンピュータやプログラマブルコントローラ等汎用の制御機器によって構成されてもよい。例えば、以下のように構成されてもよい。

[0108] (構成)

制御部は、処理部1000と、処理部1000に接続される、ストレージメモリ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とによって構成されてもよい。また、処理部1000は、CPU1001と、CPU1001に接続された、メモリ1002と、タイマー1003と、GPU1004とから構成されてもよい。

[0109] (動作)

処理部1000は、ストレージメモリ1005に記憶されたプログラムを讀出してもよい。また、処理部1000は、讀出したプログラムを実行したり、プログラムの実行に従ってストレージメモリ1005からデータを讀出したり、ストレージメモリ1005にデータを記憶させたりしてもよい。

[0110] パラレルI/Oコントローラ1020は、パラレルI/Oポートを介して通信可能な機器1021~102xに接続されてもよい。パラレルI/Oコントローラ1020は、処理部1000がプログラムを実行する過程で行うパラレルI/Oポートを介した、デジタル信号による通信を制御してもよい。

[0111] シリアルI/Oコントローラ1030は、シリアルI/Oポートを介して通信可能な機器1031~103xに接続されてもよい。シリアルI/Oコントローラ1030は、処理部1000がプログラムを実行する過程で行うシリアルI/Oポートを介した、デジタル信号による通信を制御してもよい。

[0112] A/D、D/Aコンバータ1040は、アナログポートを介して通信可能な機器1041~104xに接続されてもよい。A/D、D/Aコンバータ1040は、処理部1000がプログラムを実行する過程で行うアナログポートを介した、アナログ信号による通信を制御してもよい。

[0113] ユーザインターフェイス1010は、オペレータが処理部1000によるプログラムの実行過程を表示したり、オペレータによるプログラム実行の中

止や割り込み処理を処理部1000に行わせたりするよう構成されてもよい。

[0114] 処理部1000のCPU1001はプログラムの演算処理を行ってもよい。メモリ1002は、CPU1001がプログラムを実行する過程で、プログラムの一時記憶や、演算過程でのデータの一時的記憶を行ってもよい。タイマー1003は、時刻や経過時間を計測し、プログラムの実行に従ってCPU1001に時刻や経過時間を出力してもよい。GPU1004は、処理部1000に画像データが入力された際、プログラムの実行に従って画像データを処理し、その結果をCPU1001に出力してもよい。

[0115] パラレルI/Oコントローラ1020に接続される、パラレルI/Oポートを介して通信可能な機器1021~102xは、露光装置制御部40、他の制御部等の発振トリガ信号やタイミングを示す信号の受送信に使用してもよい。

シリアルI/Oコントローラ1030に接続される、シリアルI/Oポートを介して通信可能な機器1031~103xは、露光装置制御部40、他の制御部等のデータの受送信に使用してもよい。

A/D、D/Aコンバータ1040に接続される、アナログポートを介して通信可能な機器1041~104xは、エネルギーセンサ16c、ラインセンサ18d、19d等の各種センサであってもよい。

以上のように構成されることで、制御部は各実施形態に示された動作を実現可能であってよい。

[0116] 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。

[0117] 本明細書及び添付の特許請求の範囲全体で使用される用語は、「限定的でない」用語と解釈されるべきである。例えば、「含む」又は「含まれる」という用語は、「含まれるものとして記載されたものに限定されない」と解釈されるべきである。「有する」という用語は、「有するものとして記載され

たものに限定されない」と解釈されるべきである。また、本明細書及び添付の特許請求の範囲に記載される修飾句「1つの」は、「少なくとも1つ」又は「1又はそれ以上」を意味すると解釈されるべきである。

請求の範囲

[請求項1]

スペクトル幅を狭帯域化する光学素子を含むレーザ共振器と、

前記レーザ共振器から出力されたパルスレーザ光の一部を、第1の光量の第1のパルスレーザ光と前記第1の光量より低い第2の光量の第2のパルスレーザ光とに分岐させる光学系と、

前記第1のパルスレーザ光の光路に配置され、前記第1のパルスレーザ光の波長を計測して第1の計測結果を出力する第1の波長計測器と、

前記第2のパルスレーザ光の光路に配置され、前記第2のパルスレーザ光の波長を計測して第2の計測結果を出力する第2の波長計測器と、

前記第2の計測結果に基づいて、前記第1の計測結果を校正する制御部と、

を備える狭帯域化レーザ装置。

[請求項2]

前記レーザ共振器におけるパルスレーザ光の光路を挟んで配置された一对の放電電極と、

前記一对の放電電極にパルス状の電圧を印加する電源と、
をさらに備え、

前記制御部は、

第1の繰り返し周波数で前記電源が前記一对の放電電極にパルス状の電圧を印加するように前記電源を制御したときの前記第2の計測結果と、

前記第1の繰り返し周波数より高い第2の繰り返し周波数で前記電源が前記一对の放電電極にパルス状の電圧を印加するように前記電源を制御したときの前記第2の計測結果との差に基づいて、前記第1の計測結果を校正する、

請求項1記載の狭帯域化レーザ装置。

[請求項3]

前記第2の波長計測器は、前記第1の波長計測器よりも分解能が高

い、

請求項 1 記載の狭帯域化レーザー装置。

[請求項4]

前記光学系は、

少なくとも前記第 2 の波長計測器に入射するパルスレーザー光が通過する光ファイバーと、

前記光ファイバーを振動させる加振装置と、

を含む、請求項 1 記載の狭帯域化レーザー装置。

[請求項5]

スペクトル幅を狭帯域化する光学素子を含むレーザー共振器と、

前記レーザー共振器から出力されたパルスレーザー光の波長を計測して、第 1 の頻度で第 1 の計測結果を出力する第 1 の波長計測器と、

前記レーザー共振器から出力されたパルスレーザー光の波長を計測して、前記第 1 の頻度より低い第 2 の頻度で第 2 の計測結果を出力する第 2 の波長計測器と、

前記第 2 の計測結果に基づいて前記第 1 の計測結果を校正する制御部と、

を備える狭帯域化レーザー装置。

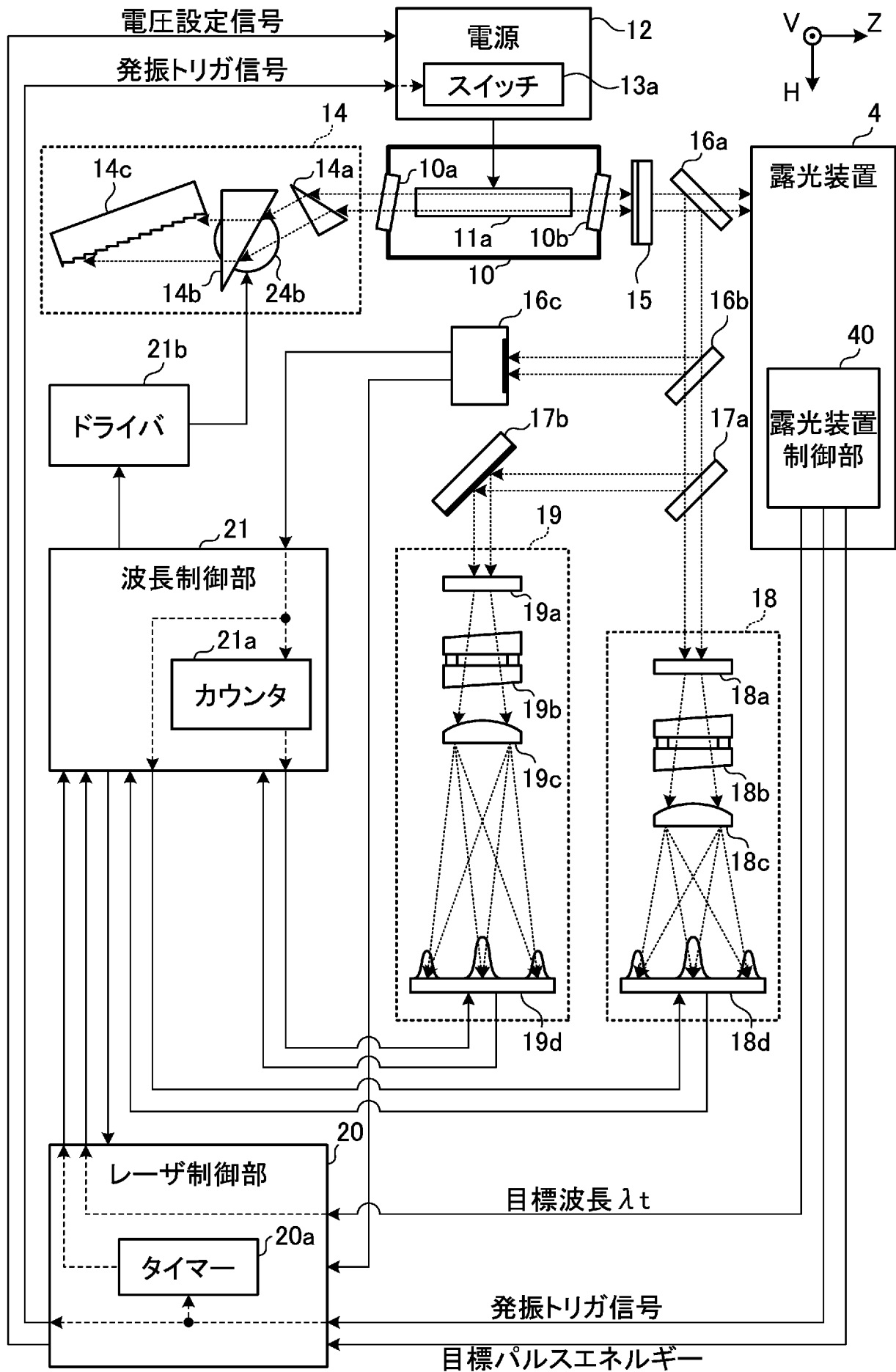
[請求項6]

前記第 1 の波長計測器は、パルスレーザー光の波長を 1 つのパルス毎に計測して、1 つのパルス毎に前記第 1 の計測結果を出力し、

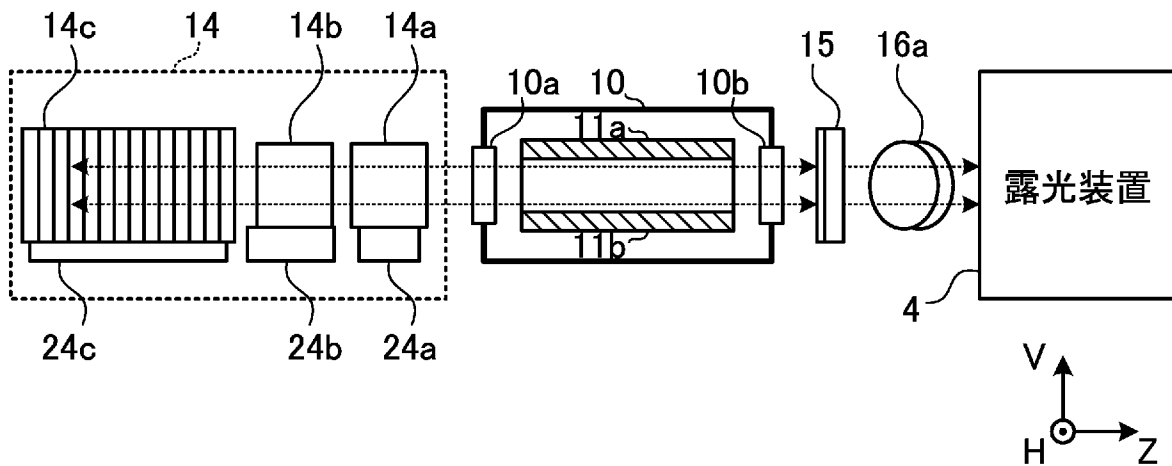
前記第 2 の波長計測器は、パルスレーザー光の波長を複数のパルス毎に計測して、複数のパルスの波長を平均して前記第 2 の計測結果を出力する、

請求項 5 記載の狭帯域化レーザー装置。

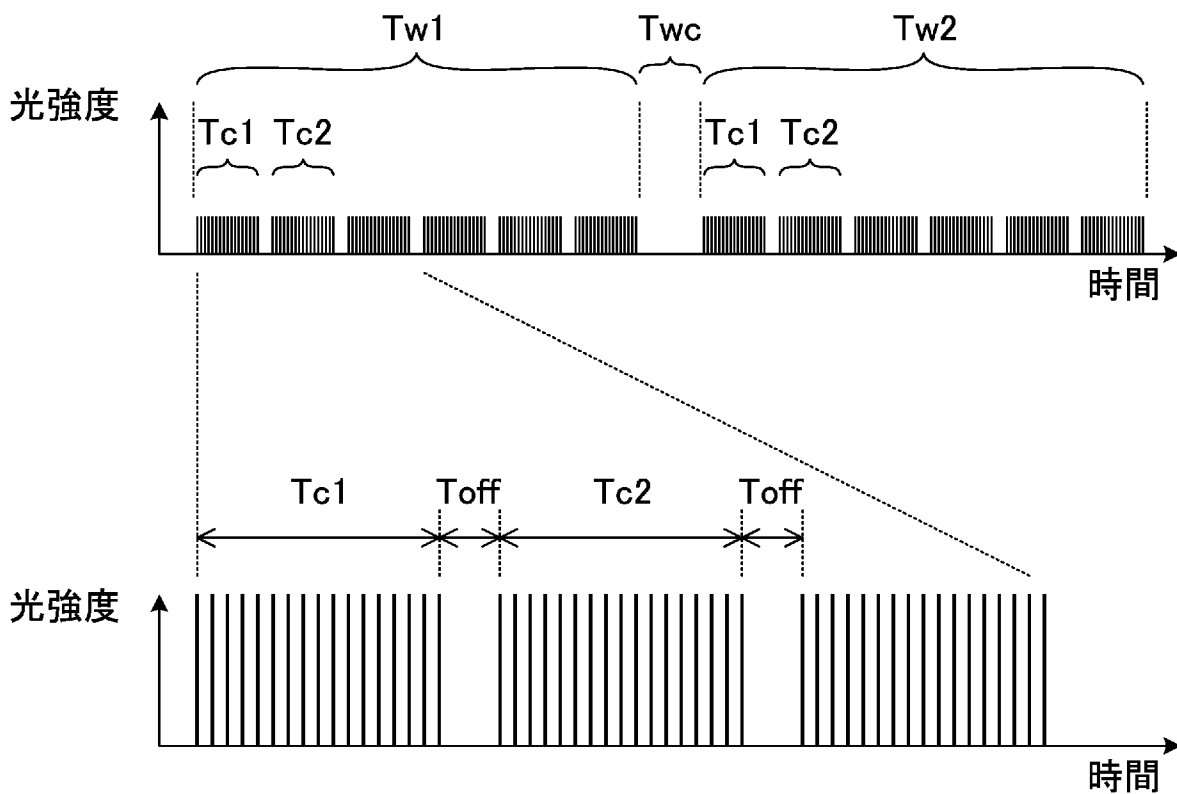
[図1A]



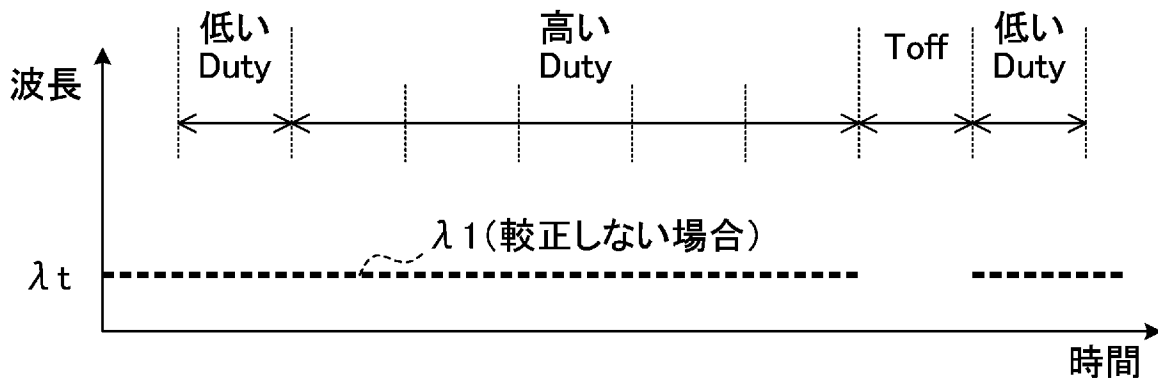
[図1B]



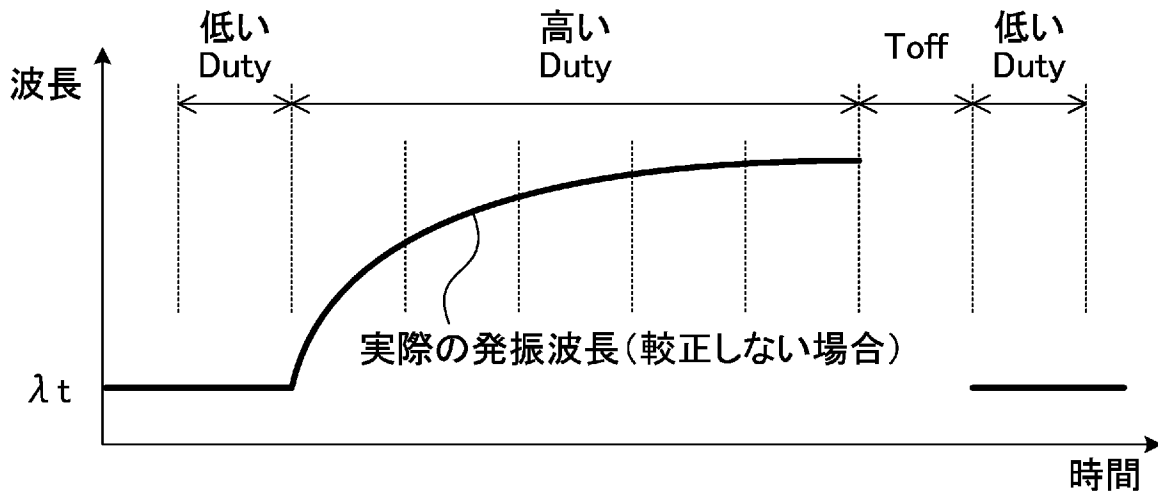
[図2]



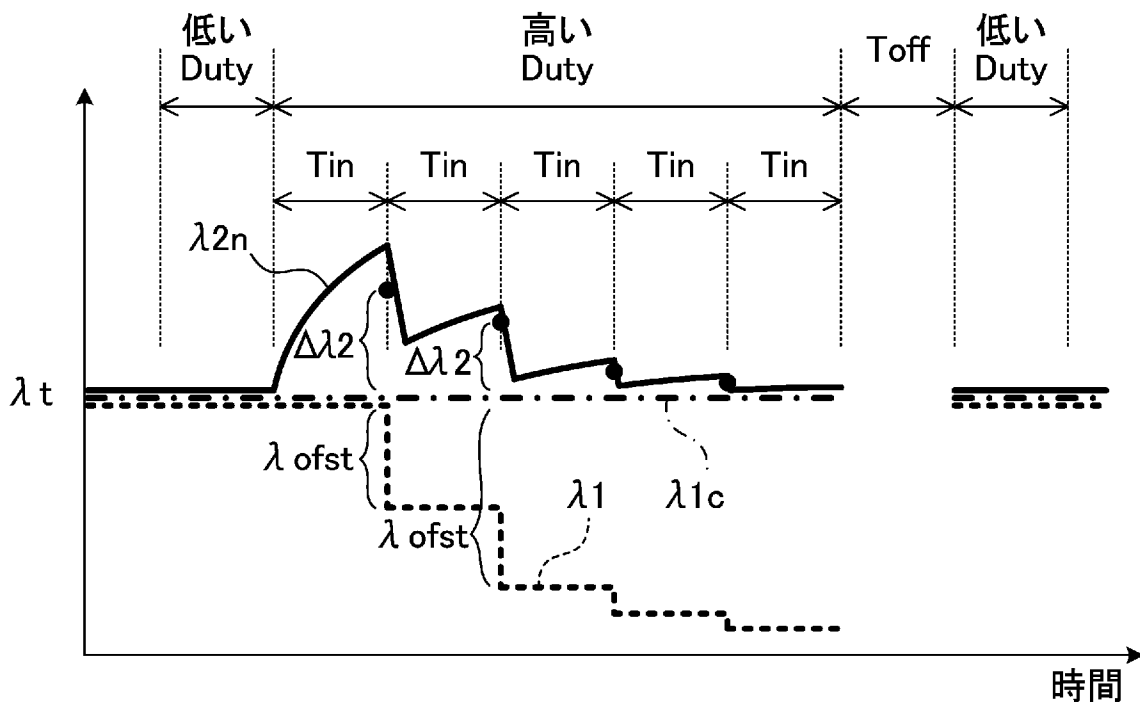
[図3A]



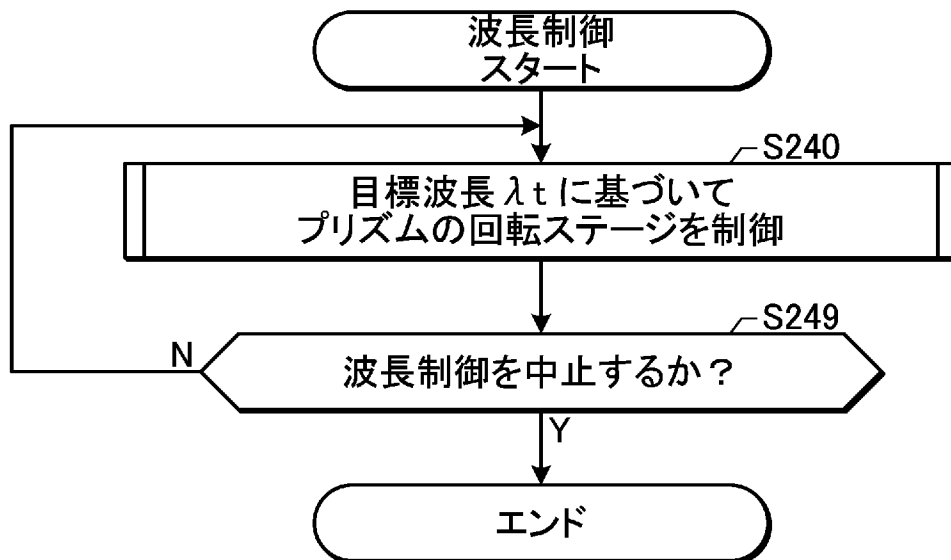
[図3B]



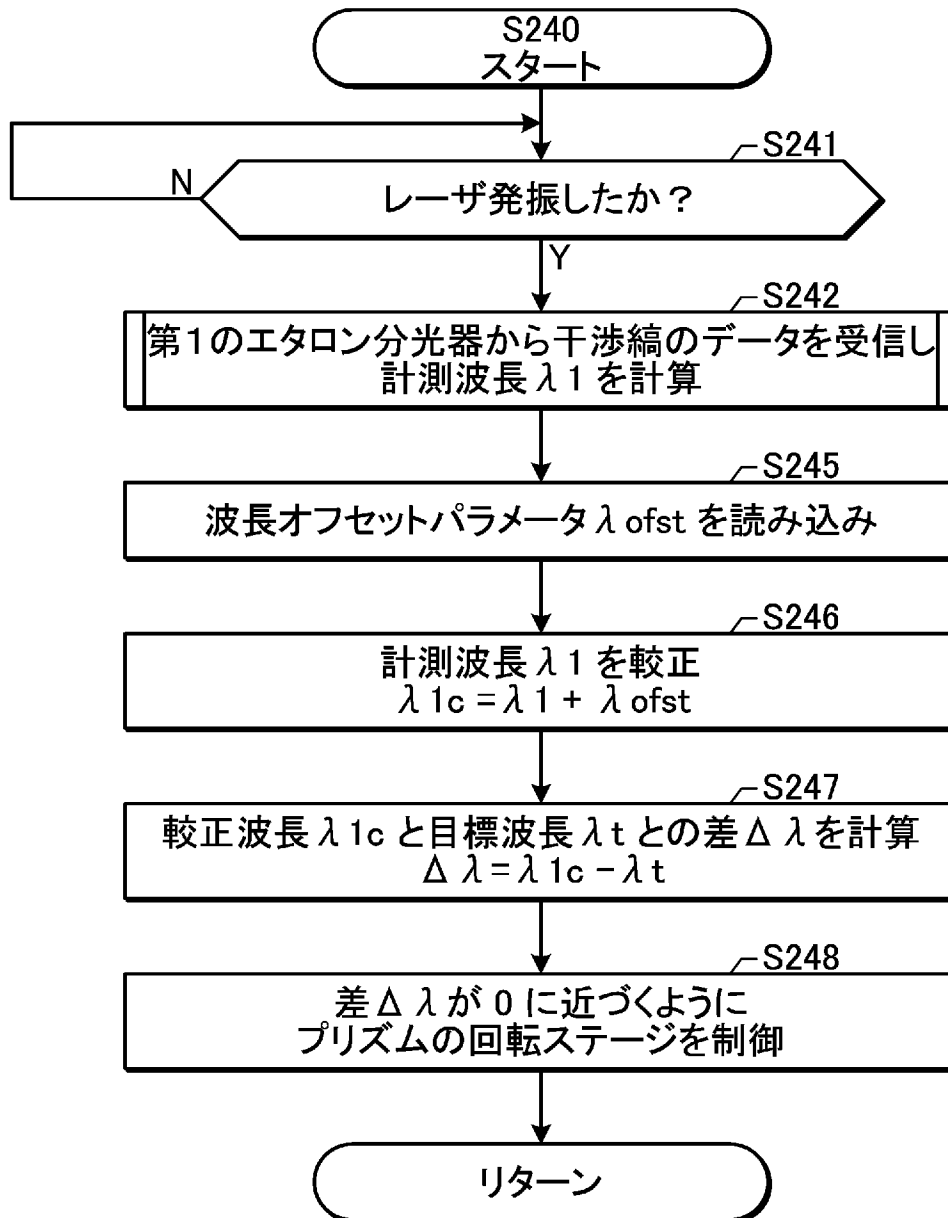
[図3C]



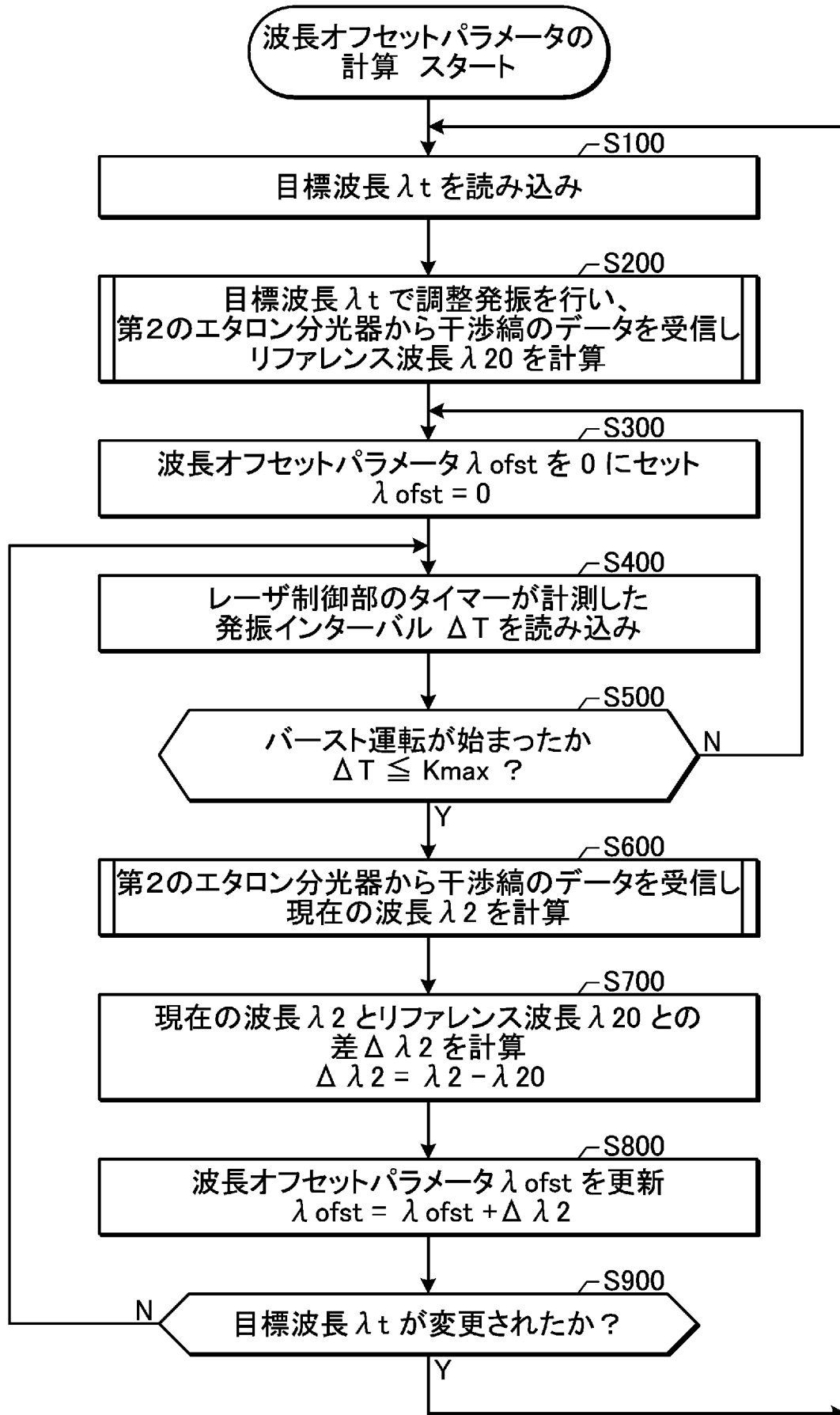
[図4]



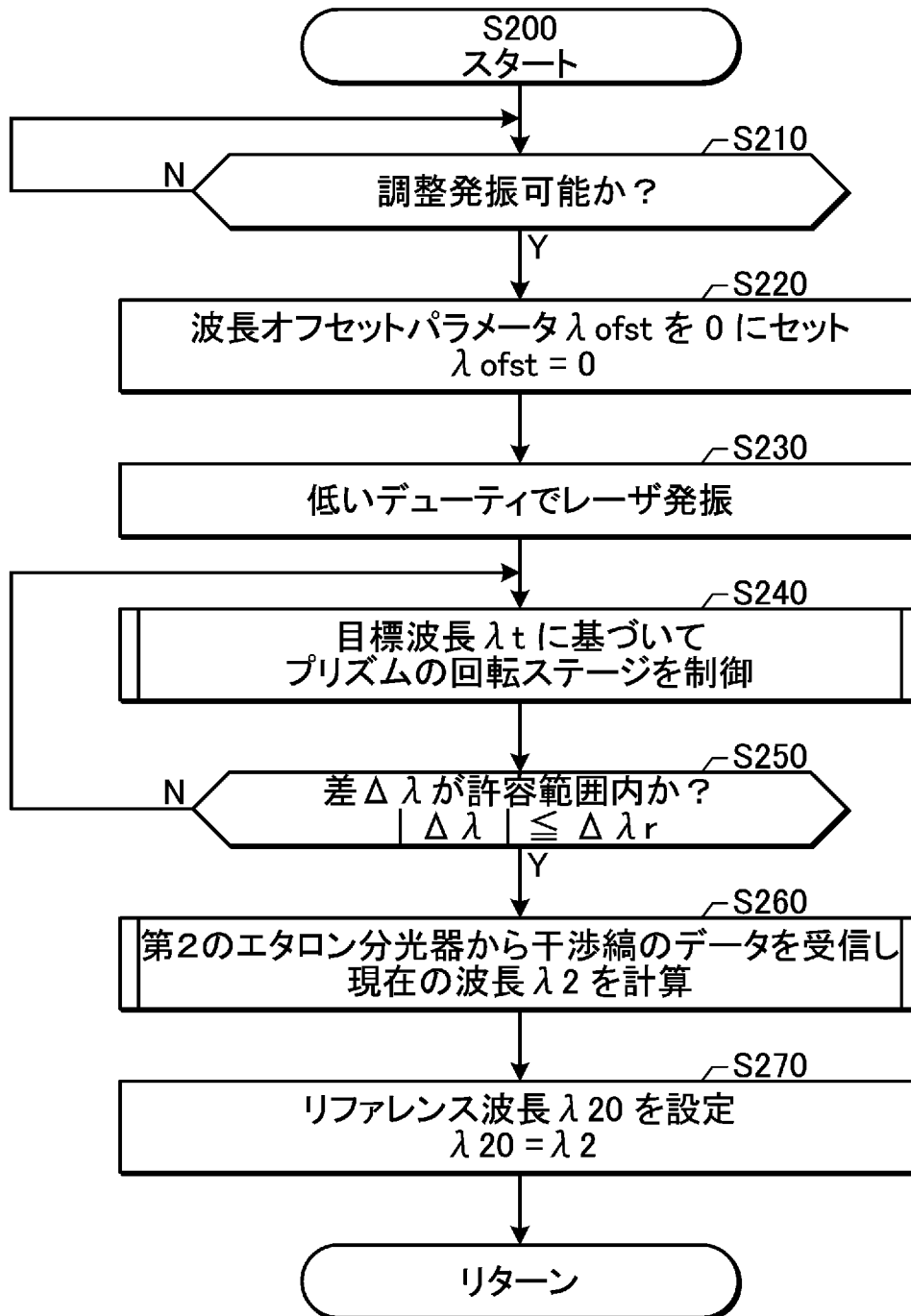
[図5]



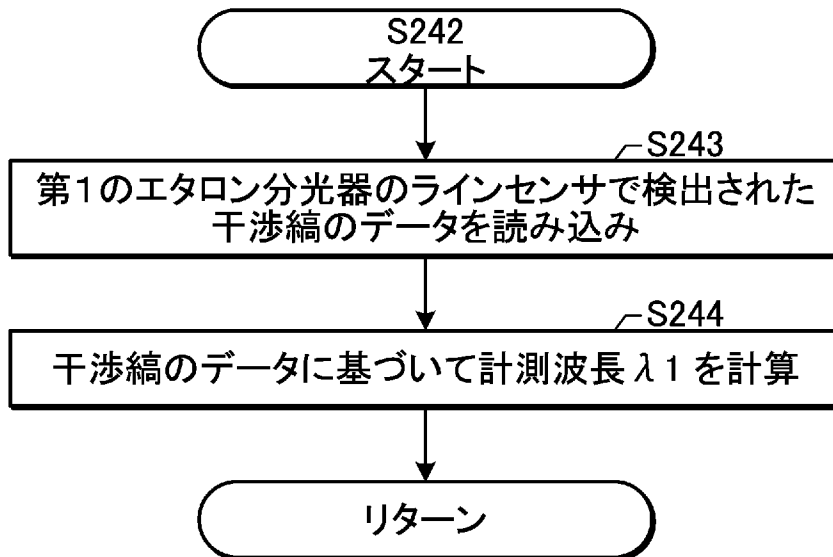
[図6]



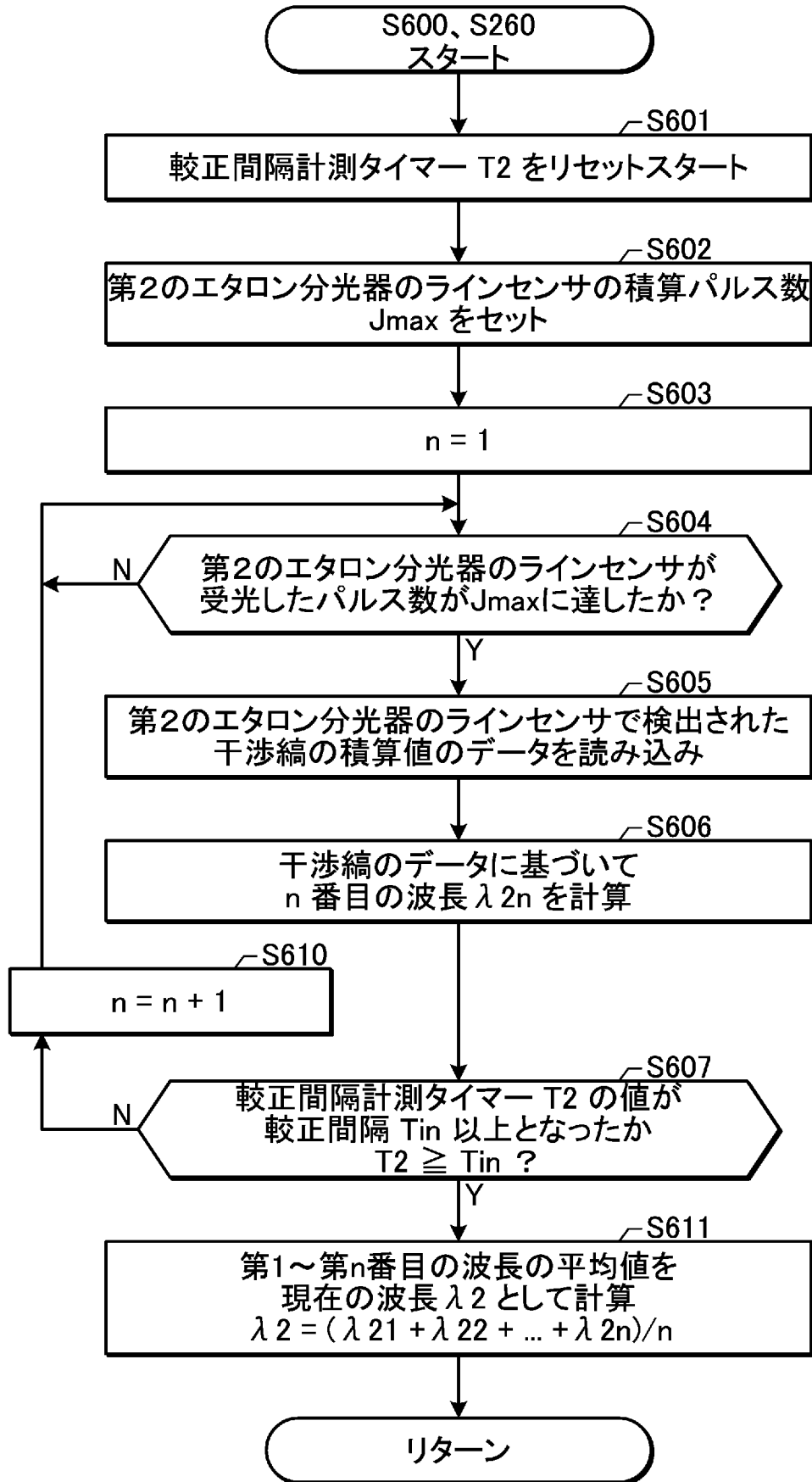
[図7]



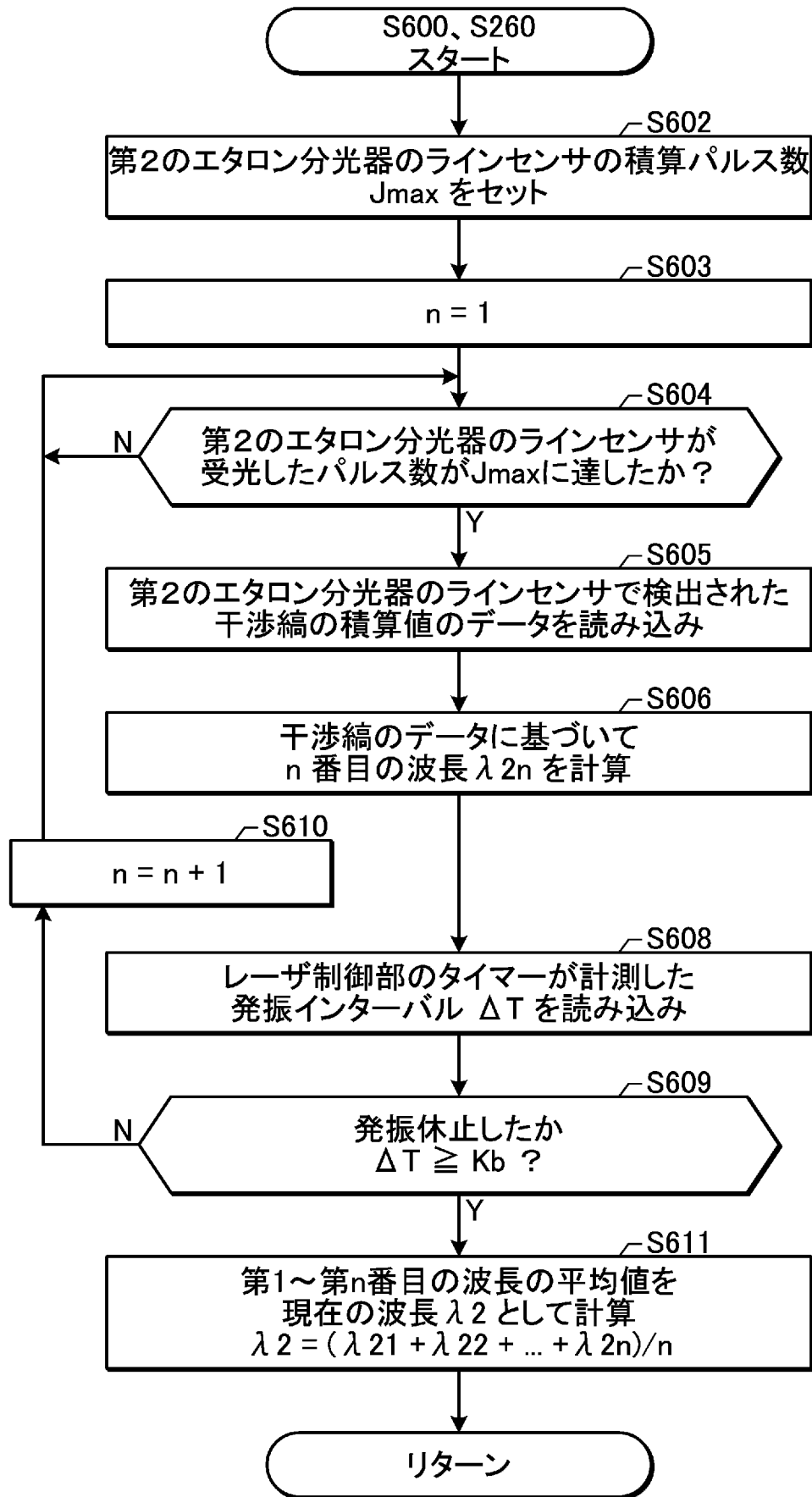
[図8]



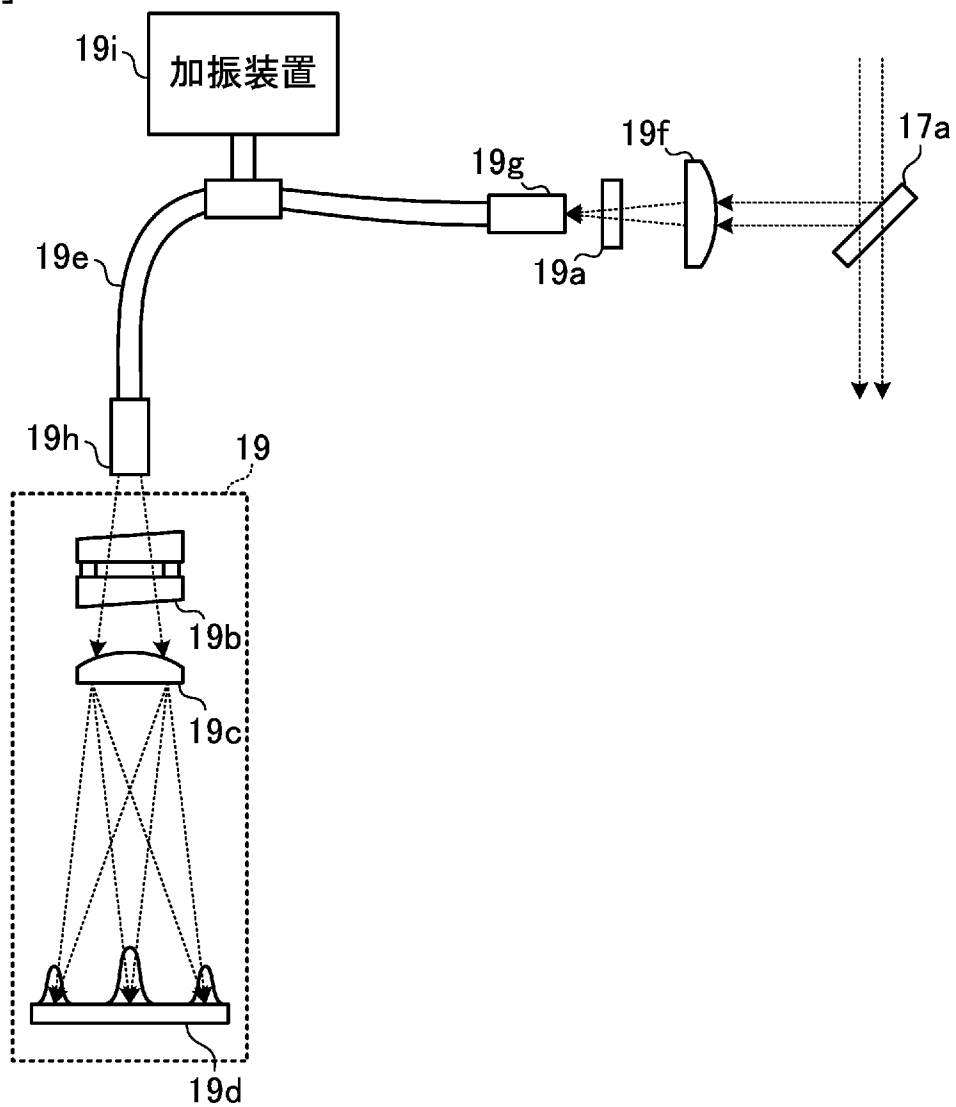
[図9]



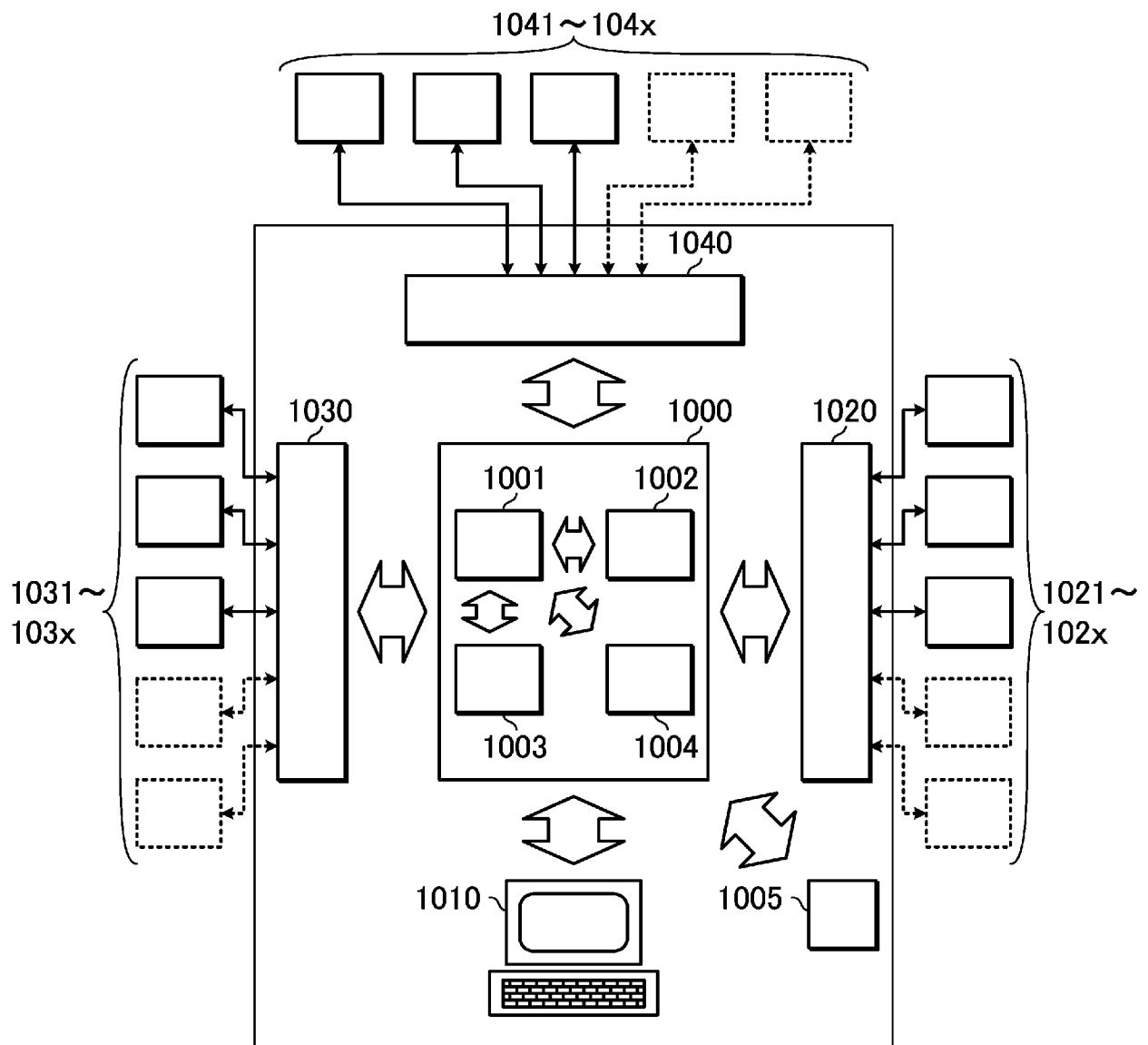
[図10]



[図11]



[図12]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2014/081660

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
H01S3/13(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)
H01S3/00-3/30

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)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2001-298234 A (Komatsu Ltd.), 26 October 2001 (26.10.2001), specification, paragraphs [0010] to [0048]; fig. 1 to 4 (Family: none)	1, 3-6 2
Y A	JP 2-273981 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 08 November 1990 (08.11.1990), specification, page 2, lower left column, line 1 to page 3, lower right column, line 2; fig. 1 (Family: none)	1, 3-6 2

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"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	

Date of the actual completion of the international search 20 April 2015 (20.04.15)	Date of mailing of the international search report 12 May 2015 (12.05.15)
---	--

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/JP2014/081660

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 4-127488 A (Mitsubishi Electric Corp.), 28 April 1992 (28.04.1992), specification, page 5, upper right column, line 14 to page 7, upper left column, line 2; fig. 1 & US 5130998 A & DE 4105471 A1	3-6
Y	JP 2005-3389 A (Gigaphoton Inc., Ushio Inc.), 06 January 2005 (06.01.2005), specification, paragraphs [0152] to [0177]; fig. 8, 10 (Family: none)	4-6
Y	JP 2003-185502 A (Gigaphoton Inc.), 03 July 2003 (03.07.2003), specification, paragraphs [0066] to [0069]; fig. 17 to 19 (Family: none)	5, 6
A	US 6807205 B1 (LAMBDA PHYSIK AG), 19 October 2004 (19.10.2004), specification, column 5, line 20 to column 21, line 40; fig. 1 to 7 (Family: none)	1-6

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） Int.Cl. H01S3/13(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（IPC）） Int.Cl. H01S3/00-3/30		
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）		
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	JP 2001-298234 A（株式会社小松製作所）2001.10.26, 明細書【0010】-【0048】欄，図1-4 （ファミリーなし）	1,3-6 2
Y A	JP 2-273981 A（松下電器産業株式会社）1990.11.08, 明細書第2ページ左下欄第1行-第3ページ右下欄第2行，第1図 （ファミリーなし）	1,3-6 2
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> 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 20.04.2015	国際調査報告の発送日 12.05.2015	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ISA/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） 百瀬 正之 電話番号 03-3581-1101 内線 3294	2X 4084

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 4-127488 A (三菱電機株式会社) 1992. 04. 28, 明細書第5 ページ右上欄第1 4行ー第7 ページ左上欄第2 行, 第1 図 & US 5130998 A & DE 4105471 A1	3-6
Y	JP 2005-3389 A (ギガフォトン株式会社, ウシオ電機株式会社) 2005. 01. 06, 明細書【0 1 5 2】ー【0 1 7 7】欄, 図8, 1 0 (ファミリーなし)	4-6
Y	JP 2003-185502 A (ギガフォトン株式会社) 2003. 07. 03, 明細書【0 0 6 6】ー【0 0 6 9】欄, 図1 7ー1 9 (ファミリーなし)	5, 6
A	US 6807205 B1 (LAMBDA PHYSIK AG) 2004. 10. 19, 明細書第5 欄第2 0行ー第2 1 欄第4 0行, F I G. 1ーF I G. 7 (ファミリーなし)	1-6