

(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
2023年2月2日(02.02.2023)



(10) 国際公開番号

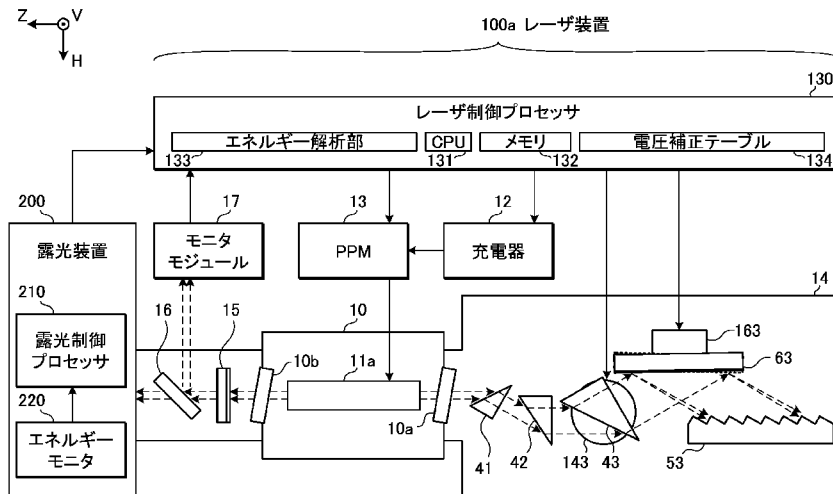
WO 2023/007685 A1

- (51) 国際特許分類:
H01S 3/136 (2006.01) *H01S 3/139* (2006.01)
G03F 7/20 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2021/028219
- (22) 国際出願日: 2021年7月29日(29.07.2021)
- (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: 石田 啓介(ISHIDA Keisuke); 〒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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, 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.

(54) Title: CONTROL METHOD FOR DISCHARGE EXCITATION TYPE LASER DEVICE, DISCHARGE EXCITATION TYPE LASER DEVICE, AND MANUFACTURING METHOD FOR ELECTRONIC DEVICE

(54) 発明の名称: 放電励起型レーザ装置の制御方法、放電励起型レーザ装置、及び電子デバイスの製造方法



- 12 Charger
17 Monitor module
100a Laser device
130 Laser control processor
132 Memory
133 Energy analysis unit
134 Voltage correction table
200 Exposure device
210 Exposure control processor
220 Energy monitor

(57) Abstract: A control method for a discharge excitation type laser device according to the present invention provided with a power supply that controls pulse energy of a pulsed laser light, the method including: in a first period, outputting pulsed laser light that includes a plurality of pulses from a discharge excitation type laser device while periodically varying the wavelength; calculating correction data that corrects a voltage command value set by the power supply according to the variation in wavelength using first time series data of the pulse energy of the plurality of pulses; and in a second period, acquiring the voltage command value, correcting the acquired voltage command value using the correction data, and outputting pulsed laser light from the discharge excitation type laser device according to the corrected voltage command value.

(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:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約: パルスレーザー光のパルスエネルギーを制御する電源を備えた放電励起型レーザー装置の制御方法は、第1の期間において、波長を周期的に変動させながら放電励起型レーザー装置から複数のパルスを含むパルスレーザー光を出力させることと、複数のパルスのパルスエネルギーの第1の時系列データを用いて、電源に設定される電圧指令値を波長の変動に伴って補正する補正データを算出することと、第2の期間において、電圧指令値を取得し、取得された電圧指令値を補正データを用いて補正し、補正された電圧指令値に従って放電励起型レーザー装置からパルスレーザー光を出力させることと、を含む。

明 細 書

発明の名称：

放電励起型レーザ装置の制御方法、放電励起型レーザ装置、及び電子デバイスの製造方法

技術分野

[0001] 本開示は、放電励起型レーザ装置の制御方法、放電励起型レーザ装置、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。例えば、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。以下では、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レーザ装置という。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2003-218437号公報

特許文献2：米国特許第9 2 6 1 7 9 4 号明細書

概要

- [0005] 本開示の1つの観点において、パルスレーザ光のパルスエネルギーを制御する電源を備えた放電励起型レーザ装置の制御方法は、第1の期間において、波長を周期的に変動させながら放電励起型レーザ装置から複数のパルスを含むパルスレーザ光を出力させることと、複数のパルスのパルスエネルギーの第1の時系列データを用いて、電源に設定される電圧指令値を波長の変動に伴って補正する補正データを算出することと、第2の期間において、電圧指令値を取得し、取得された電圧指令値を補正データを用いて補正し、補正された電圧指令値に従って放電励起型レーザ装置からパルスレーザ光を出力させることと、を含む。
- [0006] 本開示の1つの観点において、放電励起型レーザ装置は、パルスレーザ光のパルスエネルギーを制御する電源と、電源を制御するプロセッサと、を備える。プロセッサは、第1の期間において、波長を周期的に変動させながら放電励起型レーザ装置から複数のパルスを含むパルスレーザ光を出力させ、複数のパルスのパルスエネルギーの第1の時系列データを用いて、電源に設定される電圧指令値を波長の変動に伴って補正する補正データを算出し、第2の期間において、電圧指令値を取得し、取得された電圧指令値を補正データを用いて補正し、補正された電圧指令値に従って放電励起型レーザ装置からパルスレーザ光を出力させる。
- [0007] 本開示の1つの観点に係る電子デバイスの製造方法は、パルスレーザ光のパルスエネルギーを制御する電源と、電源を制御するプロセッサと、を備える放電励起型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。プロセッサは、第1の期間において、波長を周期的に変動させながら放電励起型レーザ装置から複数のパルスを含むパルスレーザ光を出力させ、複数のパルスのパルスエネルギーの第1の時系列データを用いて、電源に設定される電圧指令値を波長の変動に

伴って補正する補正データを算出し、第2の期間において、電圧指令値を取得し、取得された電圧指令値を補正データを用いて補正し、補正された電圧指令値に従って放電励起型レーザ装置からパルスレーザ光を出力させる。

図面の簡単な説明

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

[図1]図1は、比較例における露光システムの構成を概略的に示す。

[図2]図2は、比較例におけるレーザ装置の構成を概略的に示す。

[図3]図3は、露光システムによって露光される半導体ウエハの例を示す。

[図4]図4は、露光制御プロセッサからレーザ制御プロセッサに送信されるトリガ信号の例を示す。

[図5]図5は、波長の周期的な変動の例を示すグラフである。

[図6]図6は、比較例においてレーザ制御プロセッサによって実行されるパルスレーザ光の出力のための処理を示すフローチャートである。

[図7]図7は、比較例において露光制御プロセッサによって実行されるレーザ制御の処理を示すフローチャートである。

[図8]図8は、目標波長を切り替えながらパルスレーザ光を出力したときのパルスエネルギーの変化を示すグラフである。

[図9]図9は、第1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10]図10は、電圧補正テーブルに含まれる補正データを示すグラフである。

[図11]図11は、第1の実施形態におけるパルスエネルギーの制御ブロック図である。

[図12]図12は、第1の実施形態においてレーザ制御プロセッサによって実行されるパルスレーザ光の出力のための処理を示すフローチャートである。

[図13]図13は、第1の実施形態においてレーザ制御プロセッサによって実行される電圧補正テーブルの更新処理を示すフローチャートである。

[図14]図14は、第1の実施形態における電圧補正テーブルの更新処理の詳細

細を示すフローチャートである。

[図15]図15は、図14において算出される平均値及び差を概念的に示すグラフである。

[図16]図16は、第2の実施形態における電圧補正テーブルの更新処理の詳細を示すフローチャートである。

[図17]図17は、図16において算出される平均値及び差を概念的に示すグラフである。

[図18]図18は、図16において算出される平均値及び差を概念的に示すグラフである。

[図19]図19は、第3の実施形態における電圧補正テーブルの更新処理の詳細を示すフローチャートである。

[図20]図20は、図19においてパルスエネルギーの時系列データをフーリエ変換したスペクトルデータのグラフである。

[図21]図21は、第4の実施形態における電圧補正テーブルの更新処理の詳細を示すフローチャートである。

[図22]図22は、第5の実施形態における電圧補正テーブルの更新処理の詳細を示すフローチャートである。

[図23]図23は、周期的に変化する波長を示すグラフである。

[図24]図24は、第6の実施形態においてレーザ制御プロセッサによって実行されるパルスレーザ光の出力のための処理を示すフローチャートである。

[図25]図25は、第6の実施形態において露光制御プロセッサによって実行されるレーザ制御の処理を示すフローチャートである。

[図26]図26は、比較例及び第1～第6の実施形態において用いられるモニタモジュールの構成を概略的に示す。

実施形態

[0009] <内容>

1. 比較例

1. 1 露光システム

- 1. 1. 1 構成
- 1. 1. 2 動作
- 1. 2 レーザ装置 100
 - 1. 2. 1 構成
 - 1. 2. 2 動作
- 1. 3 狭帯域化モジュール 14
 - 1. 3. 1 構成
 - 1. 3. 2 動作
- 1. 4 ステップアンドスキャン露光
- 1. 5 周期的な波長変化の例
- 1. 6 パルスレーザ光の出力制御
 - 1. 6. 1 レーザ制御プロセッサ 130 による制御
 - 1. 6. 2 露光制御プロセッサ 210 によるレーザ制御
- 1. 7 比較例の課題
- 2. パルスエネルギー E_n [] の時系列データを用いて補正データを算出するレーザ装置
 - 2. 1 構成
 - 2. 2 制御ブロック図
 - 2. 3 パルスレーザ光の出力制御
 - 2. 4 電圧補正テーブル 134 の更新タイミング
 - 2. 5 電圧補正テーブル 134 の更新処理
 - 2. 6 作用
- 3. 電圧指令値 HV_c [] の時系列データをさらに用いて補正データを算出するレーザ装置
 - 3. 1 電圧補正テーブル 134 の更新処理
 - 3. 2 作用
- 4. パルスエネルギー E_n [] の時系列データをフーリエ変換して補正データを算出するレーザ装置

- 4. 1 電圧補正テーブル 1 3 4 の更新処理
- 4. 2 作用
- 5. 電圧指令値 $H V c$ [] の時系列データをフーリエ変換して補正データを算出するレーザ装置
 - 5. 1 電圧補正テーブル 1 3 4 の更新処理
 - 5. 2 作用
- 6. 波長変動周期内のパルス番号 j ごとに補正データを算出するレーザ装置
 - 6. 1 電圧補正テーブル 1 3 4 の更新処理
 - 6. 2 作用
- 7. 目標パルスエネルギー $E t$ に基づいて電圧指令値 $H V c$ を設定するレーザ装置
 - 7. 1 レーザ制御プロセッサ 1 3 0 による制御
 - 7. 2 露光制御プロセッサ 2 1 0 による制御
- 8. その他
 - 8. 1 モニタモジュール 1 7 の構成
 - 8. 2 モニタモジュール 1 7 の動作
 - 8. 3 補足

[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. 比較例

1. 1 露光システム

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。

露光システムは、レーザ装置１００と、露光装置２００と、を含む。図１においてはレーザ装置１００が簡略化して示されている。

[0012] レーザ装置１００は、レーザ制御プロセッサ１３０を含む。レーザ制御プロセッサ１３０は、制御プログラムが記憶されたメモリ１３２と、制御プログラムを実行するＣＰＵ（central processing unit）１３１と、を含む処理装置である。レーザ制御プロセッサ１３０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１３０は本開示におけるプロセッサに相当する。レーザ装置１００は、パルスレーザ光を露光装置２００に向けて出力するように構成されている。

[0013] １．１．１ 構成

図１に示されるように、露光装置２００は、照明光学系２０１と、投影光学系２０２と、露光制御プロセッサ２１０と、を含む。

[0014] 照明光学系２０１は、レーザ装置１００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２０２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。

[0015] 露光制御プロセッサ２１０は、制御プログラムが記憶されたメモリ２１２と、制御プログラムを実行するＣＰＵ２１１と、を含む処理装置である。露光制御プロセッサ２１０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２１０は、露光装置２００の制御を統括する。

[0016] １．１．２ 動作

露光制御プロセッサ２１０は、目標波長 λ_1 及び λ_2 と電圧指令値 HV_c とを含む各種パラメータと、トリガ信号と、をレーザ制御プロセッサ１３０に送信する。レーザ制御プロセッサ１３０は、これらのパラメータ及び信号

に従ってレーザ装置 100 を制御する。目標波長 λ_1 及び λ_2 は波長の目標値であって、目標波長 λ_1 は本開示における第 1 の目標波長に相当し、目標波長 λ_2 は本開示における第 2 の目標波長に相当する。目標波長 λ_1 は目標波長 λ_2 より大きい波長とする。

[0017] 露光制御プロセッサ 210 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。

[0018] 1. 2 レーザ装置 100

1. 2. 1 構成

図 2 は、比較例におけるレーザ装置 100 の構成を概略的に示す。図 2 においては露光装置 200 に含まれる幾つかの要素の図示が省略されている。

[0019] レーザ装置 100 は放電励起型レーザ装置であり、レーザ制御プロセッサ 130 の他に、レーザチャンバ 10 と、充電器 12 と、パルスパワーモジュール (PPM) 13 と、狭帯域化モジュール 14 と、出力結合ミラー 15 と、モニタモジュール 17 と、を含む。狭帯域化モジュール 14 及び出力結合ミラー 15 は光共振器を構成する。

[0020] レーザチャンバ 10 は、光共振器の光路に配置されている。レーザチャンバ 10 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 は、放電電極 11a 及びこれと対をなす図示しない放電電極を内部に備えている。図示しない放電電極は、図 2 の紙面に垂直な方向において放電電極 11a と重なるように位置している。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。

[0021] 充電器 12 は、パルスパワーモジュール 13 に供給するための電気エネル

ギーを保持する。パルスパワーモジュール 13 は、図示しない充電コンデンサ及びスイッチを含む。充電器 12 は充電コンデンサに接続される。充電コンデンサは放電電極 11a に接続される。充電器 12 及びパルスパワーモジュール 13 は本開示における電源を構成する。

[0022] 狭帯域化モジュール 14 は、プリズム 41～43 と、グレーティング 53 と、ミラー 63 と、を含む。狭帯域化モジュール 14 の詳細については後述する。

出力結合ミラー 15 は、部分反射ミラーで構成されている。

[0023] 出力結合ミラー 15 から出力されたパルスレーザ光の光路に、パルスレーザ光の一部を高い透過率で透過させ、他の一部を反射するビームスプリッタ 16 が配置されている。ビームスプリッタ 16 によって反射されたパルスレーザ光の光路に、モニタモジュール 17 が配置されている。モニタモジュール 17 の構成の詳細については図 26 を参照しながら後述する。

[0024] 1. 2. 2 動作

レーザ制御プロセッサ 130 は、露光制御プロセッサ 210 から目標波長 $\lambda 1$ 及び $\lambda 2$ と、電圧指令値 HV_c と、を含む各種パラメータを取得する。レーザ制御プロセッサ 130 は、目標波長 $\lambda 1$ 及び $\lambda 2$ に基づいて狭帯域化モジュール 14 に制御信号を送信する。レーザ制御プロセッサ 130 は、取得した電圧指令値 HV_c を充電器 12 に設定する。

[0025] レーザ制御プロセッサ 130 は、露光制御プロセッサ 210 からトリガ信号を受信する。レーザ制御プロセッサ 130 は、トリガ信号に基づく発振トリガ信号をパルスパワーモジュール 13 に送信する。パルスパワーモジュール 13 に含まれるスイッチは、レーザ制御プロセッサ 130 から発振トリガ信号を受信するとオン状態となる。パルスパワーモジュール 13 は、スイッチがオン状態となると、充電器 12 に充電された電気エネルギーからパルス状の高電圧を生成し、この高電圧を放電電極 11a に印加する。

[0026] 放電電極 11a に高電圧が印加されると、放電電極 11a 及び図示しない放電電極の間の放電空間に放電が起こる。この放電のエネルギーにより、レ

ーザチャンバ10内のレーザガスが励起されて高エネルギー準位に移行する。励起されたレーザガスが、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。

[0027] レーザチャンバ10内で発生した光は、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。ウインドウ10aから出射した光は、狭帯域化モジュール14に入射する。狭帯域化モジュール14に入射した光のうちの所望波長付近の光が、狭帯域化モジュール14によって折り返されてレーザチャンバ10に戻される。

[0028] 出力結合ミラー15は、ウインドウ10bから出射した光のうちの一部を透過させてパルスレーザ光として出力し、他の一部を反射してレーザチャンバ10に戻す。

[0029] 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15との間で往復する。この光は、レーザチャンバ10内の放電空間を通過する度に増幅される。また、この光は、狭帯域化モジュール14によって折り返される度に狭帯域化され、狭帯域化モジュール14による選択波長の範囲の一部を中心波長とした急峻な波長分布を有する光となる。こうしてレーザ発振し狭帯域化された光が、出力結合ミラー15からパルスレーザ光として出力される。パルスレーザ光の波長とは、特に断らない限り中心波長をいうものとする。

[0030] モニタモジュール17は、パルスレーザ光の波長を計測し、計測された波長をレーザ制御プロセッサ130に送信する。レーザ制御プロセッサ130は、計測された波長に基づいて狭帯域化モジュール14を制御する。

[0031] ビームスプリッタ16を透過したパルスレーザ光は、露光装置200へ入射する。露光装置200に含まれるエネルギーモニタ220がパルスレーザ光のパルスエネルギー E_n を計測する。パルスエネルギー E_n と目標パルスエネルギー E_t とに基づいて露光制御プロセッサ210が電圧指令値 HV_c を算出し、レーザ制御プロセッサ130に送信する。パルスレーザ光のパルスエネルギー E_n は電圧指令値 HV_c によって制御される。

[0032] 1. 3 狭帯域化モジュール 1 4

1. 3. 1 構成

プリズム 4 1、4 2、及び 4 3 は、ウインドウ 1 0 a から出射した光ビームの光路にこの順で配置されている。プリズム 4 1～4 3 は、光ビームが入射するプリズム 4 1～4 3 の表面がいずれも V 軸に平行となるように配置され、それぞれ図示しないホルダによって支持されている。プリズム 4 3 は、回転ステージ 1 4 3 によって V 軸に平行な軸周りに回転可能となっている。回転ステージ 1 4 3 の例としては、ステッピングモータを備えた可動範囲の大きい回転ステージが挙げられる。

[0033] ミラー 6 3 は、プリズム 4 1～4 3 を透過した光ビームの光路に配置されている。ミラー 6 3 は、光ビームを反射する表面が V 軸に平行となるように配置されており、回転ステージ 1 6 3 によって V 軸に平行な軸周りに回転可能となっている。回転ステージ 1 6 3 の例としては、 piezo 素子を備えた応答性の高い回転ステージが挙げられる。

[0034] あるいは、プリズム 4 2 を回転ステージ 1 4 3 によって回転可能とし、プリズム 4 3 を回転ステージ 1 6 3 によって回転可能とし、ミラー 6 3 は回転させなくてもよい。

[0035] グレーティング 5 3 は、ミラー 6 3 によって反射された光ビームの光路に配置されている。グレーティング 5 3 の溝の方向は、V 軸に平行である。

グレーティング 5 3 は、図示しないホルダによって支持されている。

[0036] 1. 3. 2 動作

ウインドウ 1 0 a から出射した光ビームは、プリズム 4 1～4 3 の各々によって、V 軸に垂直な面である H Z 面に平行な面内で進行方向を変えられ、H Z 面に平行な面内でビーム幅を拡大させられる。

プリズム 4 1～4 3 を透過した光ビームは、ミラー 6 3 によって反射されてグレーティング 5 3 に入射する。

[0037] グレーティング 5 3 に入射した光ビームは、グレーティング 5 3 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。

グレーティング53は、ミラー63からグレーティング53に入射する光ビームの入射角と、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とされる。

[0038] ミラー63は、グレーティング53から戻された光をプリズム43に向けて反射する。プリズム41～43は、ミラー63によって反射された光のビーム幅をH-Z面に平行な面内で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の内部に戻す。

[0039] レーザ制御プロセッサ130は、図示しないドライバを介して回転ステージ143及び163を制御する。回転ステージ143及び163の回転角度に応じて、グレーティング53に入射する光ビームの入射角が変化し、狭帯域化モジュール14によって選択される波長が変化する。回転ステージ143は主に粗調整に使用され、回転ステージ163は主に微調整に使用される。

[0040] レーザ制御プロセッサ130は、露光制御プロセッサ210から受信した目標波長 λ_1 及び λ_2 に基づいて、ミラー63の姿勢が複数のパルスごとに周期的に変化するように、回転ステージ163を制御する。これにより、パルスレーザ光の波長が複数のパルスごとに周期的に変化する。このように、レーザ装置100は2波長発振又は多波長発振を行うことができる。

[0041] 露光装置200における焦点距離は、パルスレーザ光の波長に依存する。2波長発振又は多波長発振して露光装置200に入射したパルスレーザ光は、パルスレーザ光の光路軸の方向において複数の異なる位置で結像することができるので、実質的に焦点深度を大きくすることができる。例えば、膜厚の大きいレジスト膜を露光する場合でも、レジスト膜の厚み方向での結像性能を維持し得る。

[0042] 1. 4 ステップアンドスキャン露光

図3は、露光システムによって露光される半導体ウエハWF#1の例を示す。半導体ウエハWF#1は、例えば、ほぼ円板形を有する単結晶シリコンの板である。半導体ウエハWF#1には例えば感光性のレジスト膜が塗布さ

れている。半導体ウエハWF # 1 の露光は、スキャンフィールドSF # 1、SF # 2等の区画ごとに行われる。スキャンフィールドSF # 1、SF # 2の各々は、1枚のレチクルのレチクルパターンが転写される領域に相当する。1つめのスキャンフィールドSF # 1にパルスレーザ光が照射されるように半導体ウエハWF # 1を移動させて、スキャンフィールドSF # 1を露光する。その後、2つめのスキャンフィールドSF # 2にパルスレーザ光が照射されるように半導体ウエハWF # 1を移動させて、スキャンフィールドSF # 2を露光する。その後同様に半導体ウエハWF # 1を移動させながら最後のスキャンフィールドSF # maxまでの露光を行う。

[0043] 図4は、露光制御プロセッサ210からレーザ制御プロセッサ130に送信されるトリガ信号の例を示す。1つのスキャンフィールドSF # 1又はSF # 2を露光するときはパルスレーザ光が所定の繰り返し周波数で連続して出力される。パルスレーザ光を所定の繰り返し周波数で連続して出力することをバースト出力という。1つのスキャンフィールドSF # 1から他のスキャンフィールドSF # 2に移動するときはパルスレーザ光のバースト出力を休止する。従って、1つの半導体ウエハWF # 1を露光するために、バースト出力が複数回にわたって繰り返される。

[0044] 1つめの半導体ウエハWF # 1の露光が終了すると、ワークピーステーブルWT上の半導体ウエハWF # 1を2つめの半導体ウエハWF # 2に交換するために露光装置200へのパルスレーザ光の出力は中止される。但し、図示しない光シャッターを閉じた状態で、パラメータの調整などを目的とした調整発光が行われてもよい。

[0045] 1. 5 周期的な波長変化の例

図5は、波長の周期的な変動の例を示すグラフである。図5において、横軸は時間を示し、縦軸は波長を示す。

1つのスキャンフィールドSF # 1又はSF # 2を露光するための1回のバースト出力のパルス数をNmaxとする。パルスレーザ光の繰り返し周波数をFとすると、1回のバースト出力の所要時間はNmax/Fである。

[0046] 図5に示される例では、目標波長 λ_1 及び λ_2 の間で、波長が4パルスごとに周期的に変動する。1番目及び4番目のパルスレーザ光の波長は目標波長 λ_1 に設定され、2番目及び3番目のパルスレーザ光の波長は目標波長 λ_2 に設定される。その後も同様に、目標波長 λ_1 で2パルス生成し、目標波長 λ_2 で2パルス生成することが繰り返される。このようにして、レーザ装置100は波長を周期的に変動させながら複数のパルスを含むパルスレーザ光を出力する。

[0047] 1. 6 パルスレーザ光の出力制御

1. 6. 1 レーザ制御プロセッサ130による制御

図6は、比較例においてレーザ制御プロセッサ130によって実行されるパルスレーザ光の出力のための処理を示すフローチャートである。比較例においては、以下に説明するように露光制御プロセッサ210から受信する電圧指令値HVcをそのまま用いてパルスレーザ光が出力される。

[0048] S11において、レーザ制御プロセッサ130は、露光装置200の露光制御プロセッサ210から電圧指令値HVcを受信することにより、電圧指令値HVcを取得する。

[0049] S17において、レーザ制御プロセッサ130は、電圧指令値HVcを充電器12に設定する。

[0050] S18において、レーザ制御プロセッサ130は、露光制御プロセッサ210からトリガ信号を受信したか否かを判定する。トリガ信号を受信していない場合(S18:NO)、レーザ制御プロセッサ130は、トリガ信号を受信するまで待機する。トリガ信号を受信した場合(S18:YES)、レーザ制御プロセッサ130は、S19に処理を進める。

[0051] S19において、レーザ制御プロセッサ130は、トリガ信号に基づく発振トリガ信号をパルスパワーモジュール13に送信することにより、レーザ装置100からパルスレーザ光を出力させる。

S19の後、レーザ制御プロセッサ130はS11に処理を戻し、S11からS19までの処理を繰り返すことにより、パルスレーザ光の出力を繰り返す。

返す。

[0052] 1. 6. 2 露光制御プロセッサ210によるレーザ制御

図7は、比較例において露光制御プロセッサ210によって実行されるレーザ制御の処理を示すフローチャートである。露光制御プロセッサ210は、以下のようにパルスレーザ光のパルスエネルギー E_n が目標パルスエネルギー E_t に近づくように電圧指令値 HV_c を決定する。

[0053] S90において、露光制御プロセッサ210は、レーザ装置100のレーザ制御プロセッサ130に電圧指令値 HV_c を送信する。電圧指令値 HV_c を送信するのが初めてであれば、露光制御プロセッサ210は、目標パルスエネルギー E_t に基づいて算出された電圧指令値 HV_c を送信する。電圧指令値 HV_c を送信するのが2回目以降であれば、露光制御プロセッサ210は、S95で更新された電圧指令値 HV_c を送信する。

[0054] S91において、露光制御プロセッサ210は、レーザ制御プロセッサ130にトリガ信号を送信する。これによりレーザ装置100はパルスレーザ光を出力する。

S92において、露光制御プロセッサ210は、レーザ装置100から出力されたパルスレーザ光のパルスエネルギー E_n をエネルギーモニタ220により検出する。

[0055] S93において、露光制御プロセッサ210は、検出されたパルスエネルギー E_n と目標パルスエネルギー E_t との差 ΔE_n を以下の式により算出する。

$$\Delta E_n = E_n - E_t$$

目標パルスエネルギー E_t としては、1回のバースト出力においては一定の値が設定される。

[0056] S94において、露光制御プロセッサ210は、以下の式により差 ΔE_n を電圧の補正量 ΔHV に換算する。

$$\Delta HV = \Delta E_n / HV_{epgain}$$

ここで、 HV_{epgain} は電圧指令値 HV_c の変化量に対するパルスエネ

ルギー E_n の変化量の比を示す。

[0057] S 9 5 において、露光制御プロセッサ 2 1 0 は、電圧指令値 HV_c を以下の式により更新する。

$$HV_c = HV_c - \Delta HV$$

例えば、S 9 2 で検出されたパルスエネルギー E_n が目標パルスエネルギー E_t より小さかった場合は、S 9 3 及び S 9 4 において差 ΔE_n 及び補正量 ΔHV が負数となる。この場合、S 9 5 においては電圧指令値 HV_c から負数である補正量 ΔHV が減算され、次のパルスのパルスエネルギー E_n が大きくなる。

[0058] S 9 5 の後、露光制御プロセッサ 2 1 0 は S 9 0 に処理を戻し、S 9 0 から S 9 5 までの処理を繰り返すことにより、電圧指令値 HV_c を算出し、レーザ装置 1 0 0 にパルスレーザ光を出力させる。

[0059] 1. 7 比較例の課題

図 8 は、目標波長 λ_1 及び λ_2 を切り替えながらパルスレーザ光を出力したときのパルスエネルギー E_n の変化を示すグラフである。図 8 の横軸はバースト出力におけるパルス番号 i を示し、縦軸はパルスエネルギー E_n を示す。電圧指令値 HV_c は一定の値としている。電圧指令値 HV_c が一定の値であってもパルスエネルギー E_n が変化することがある。図 7 を参照しながら説明した目標パルスエネルギー E_t に基づく電圧指令値 HV_c の制御によって、パルスエネルギー E_n の変化はある程度抑制することができる。

[0060] しかし、図 5 を参照しながら説明したように目標波長 λ_1 及び λ_2 を高速で切り替えたときに、図 8 に示されるように目標波長 λ_1 及び λ_2 の切り替えに応じてパルスエネルギー E_n が変動することがある。目標波長 λ_1 及び λ_2 の切り替えに応じてパルスエネルギー E_n が変動する要因としては、ミラー 6 3 の高速な駆動による光学部品の振動が考えられる。パルスエネルギー E_n が頻繁に変動すると、図 7 を参照しながら説明した制御によってはパルスエネルギー E_n を十分に安定化できないことがある。

[0061] さらに、パルスエネルギー E_n の変動は、波長変動周期の逆数に相当する

周波数成分を多く含んでいる。波長変動周期の逆数は、目標波長 λ_1 及び λ_2 の切り替えの周波数に相当する。このため、目標波長 λ_1 で生成されたパルスレーザ光のパルスエネルギー E_n の積分値と、目標波長 λ_2 で生成されたパルスレーザ光のパルスエネルギー E_n の積分値とが一致しないことがある。この場合、露光性能がレジスト膜の厚み方向で不均一となり得る。

[0062] 2. パルスエネルギー E_n [] の時系列データを用いて補正データを算出するレーザ装置

2. 1 構成

図9は、第1の実施形態におけるレーザ装置100aの構成を概略的に示す。第1の実施形態において、レーザ制御プロセッサ130は、エネルギー解析部133と電圧補正テーブル134とを含む。

[0063] エネルギー解析部133は、モニタモジュール17から受信したパルスエネルギー E_n のデータを統計処理して補正データを算出する。エネルギー解析部133は、そのような統計処理及び補正データの算出をするための制御プログラムを含んでもよい。あるいは、エネルギー解析部133は、そのような統計処理及び補正データの算出をするためのハードウェアを含んでもよい。

[0064] 電圧補正テーブル134は、電圧指令値 HV_c をパルスレーザ光の波長の変動に伴って補正するための補正データを記憶する。電圧補正テーブル134は本開示におけるテーブルに相当する。

[0065] 図10は、電圧補正テーブル134に含まれる補正データを示すグラフである。図10の横軸はバースト出力におけるパルス番号 i を示し、縦軸は補正データに含まれる補正值 HV_{tbl} を示す。補正值 HV_{tbl} は、目標波長 λ_1 及び λ_2 の切り替えに対応して変化する。電圧補正テーブル134は、パルス番号 i ごとに補正值 HV_{tbl} を格納した表であってもよいし、関数、行列、その他の形式であってもよい。

その他の点については、第1の実施形態の構成は、比較例の構成と同様である。

[0066] 2. 2 制御ブロック図

図 1 1 は、第 1 の実施形態におけるパルスエネルギー E_n の制御ブロック図である。

エネルギー制御ブロック 2 1 0 a は、図 7 の S 9 3 において露光制御プロセッサ 2 1 0 が差 ΔE_n を算出する処理に相当する。

[0067] 電圧換算ブロック 2 1 0 b は、図 7 の S 9 4 において露光制御プロセッサ 2 1 0 が補正量 ΔHV を算出する処理に相当する。この補正量 ΔHV を用いて電圧指令値 HV_c が補正される。

[0068] 電圧補正ブロック 1 3 0 a は、レーザ制御プロセッサ 1 3 0 が露光制御プロセッサ 2 1 0 から受信した電圧指令値 HV_c を補正して電圧設定値 HV_{act} を算出する処理に相当する。この処理については図 1 2 を参照しながら後述する。

[0069] パルスレーザ光出力ブロック 1 0 0 b は、レーザ装置 1 0 0 a が電圧設定値 HV_{act} に従って放電電極 1 1 a に高電圧を印加して、パルスレーザ光を出力する処理に相当する。パルスレーザ光のパルスエネルギー E_n は露光制御プロセッサ 2 1 0 による上述の処理にフィードバックされる。

[0070] 2. 3 パルスレーザ光の出力制御

図 1 2 は、第 1 の実施形態においてレーザ制御プロセッサ 1 3 0 によって実行されるパルスレーザ光の出力のための処理を示すフローチャートである。第 1 の実施形態においては、以下のように露光制御プロセッサ 2 1 0 から受信する電圧指令値 HV_c を補正して電圧設定値 HV_{act} を算出する。

[0071] S 1 1 の処理は図 6 を参照しながら説明したものと同様である。

S 1 6 a において、レーザ制御プロセッサ 1 3 0 は、電圧補正テーブル 1 3 4 から読み出す補正值 $HV_{tbl}(i)$ を決定する。(i) はバースト出力における i 番目のパルスに相当することを意味する。例えば、バースト出力における 1 番目のパルスの電圧指令値 HV_c を補正する場合に、補正值は $HV_{tbl}(1)$ である。レーザ制御プロセッサ 1 3 0 は、読み出された補正值 $HV_{tbl}(i)$ を用いて以下の式により電圧指令値 HV_c を補正し、

電圧設定値 HV_{act} を算出する。

$$HV_{act} = HV_c + HV_{tbl}(i)$$

電圧設定値 HV_{act} は、本開示における補正された電圧指令値に相当する。

[0072] S17aにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、電圧設定値 HV_{act} を充電器12に設定する。

S18及びS19の処理は図6を参照しながら説明したものと同様である。

[0073] 以上のように、補正值 $HV_{tbl}(i)$ を電圧補正テーブル134から読み出して電圧指令値 HV_c を補正することにより、電圧指令値 HV_c の補正をパルスごとに高速に行い、パルスエネルギー E_n を安定化することができる。

第1の実施形態において、露光制御プロセッサ210によるレーザ制御は図7を参照しながら説明したものと同様である。

[0074] 2. 4 電圧補正テーブル134の更新タイミング

図13は、第1の実施形態においてレーザ制御プロセッサ130によって実行される電圧補正テーブル134の更新処理を示すフローチャートである。

[0075] S20において、レーザ制御プロセッサ130は、バースト出力が休止中であるか否かを判定する。例えば、パルスレーザ光の出力を1秒以上行っていない場合に、バースト出力が休止中であると判定する。バースト出力が休止中である場合（S20：YES）、レーザ制御プロセッサ130はS30に処理を進める。

[0076] S30において、レーザ制御プロセッサ130は、電圧補正テーブル134に含まれる補正データを更新する。S30の処理はエネルギー解析部133によって行われる。S30の詳細については図14を参照しながら後述する。

[0077] バースト出力が休止中ではない場合（S20：NO）、あるいはS30の

後、レーザ制御プロセッサ130はS20に処理を戻す。

このような処理により、レーザ制御プロセッサ130は第1のバースト出力の終了後、第1のバースト出力の次の第2のバースト出力の開始前の休止期間において補正データを更新する。第1のバースト出力が行われる期間は本開示における第1の期間の一例であり、第2のバースト出力が行われる期間は本開示における第2の期間の一例である。

[0078] 2. 5 電圧補正テーブル134の更新処理

図14は、第1の実施形態における電圧補正テーブル134の更新処理の詳細を示すフローチャートである。図14に示される処理は、図13のS30のサブルーチンに相当する。図15は、図14において算出される平均値 $E_{n\text{avg}}$ 、 $E_{n\lambda 1\text{avg}}$ 、及び $E_{n\lambda 2\text{avg}}$ と、差 $\Delta E_{n\lambda 1}$ 及び $\Delta E_{n\lambda 2}$ とを概念的に示すグラフである。図15の横軸はバースト出力におけるパルス番号 i を示し、縦軸はパルスエネルギー E_n を示す。

[0079] 図14のS31aにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、バースト出力における複数のパルスエネルギー $E_n[\]$ の時系列データを取得する。

$[\]$ は配列を意味し、 $[\]$ の中が空白であれば1回のバースト出力に対応する配列の全体を意味する。パルスエネルギー $E_n[\]$ の時系列データは、本開示における第1の時系列データに相当する。図15に示されるように、目標波長 $\lambda 1$ 及び $\lambda 2$ に応じてパルスエネルギー E_n が変動することがある。

[0080] レーザ制御プロセッサ130は、パルスエネルギー $E_n[\]$ の平均値 $E_{n\text{avg}}$ を算出する。平均値 $E_{n\text{avg}}$ は本開示における第3の平均値に相当し、補正データを算出する基準となる。

[0081] S32aにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、目標波長 $\lambda 1$ でのパルスエネルギー $E_n[\lambda 1]$ の平均値 $E_{n\lambda 1\text{avg}}$ と、目標波長 $\lambda 2$ でのパルスエネルギー $E_n[\lambda 2]$ の平均値 $E_{n\lambda 2\text{avg}}$ と、を算出する。パルスエネルギー $E_n[\lambda 1]$ は、パルスエネルギー $E_n[\]$ のうちの目標波長 $\lambda 1$ に従って出力された第1波長パルス $P[\lambda 1]$ のパルスエネルギー

E_n の配列を意味する。同様に、パルスエネルギー $E_n[\lambda 2]$ は、目標波長 $\lambda 2$ に従って出力された第2波長パルス $P[\lambda 2]$ のパルスエネルギー E_n の配列を意味する。平均値 $E_{n\lambda 1avg}$ は本開示における第1の平均値に相当し、平均値 $E_{n\lambda 2avg}$ は本開示における第2の平均値に相当する。

[0082] S33aにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、平均値 $E_{n\lambda 1avg}$ と平均値 E_{navg} との差 $\Delta E_{n\lambda 1}$ と、平均値 $E_{n\lambda 2avg}$ と平均値 E_{navg} との差 $\Delta E_{n\lambda 2}$ とを以下の式で算出する。

$$\Delta E_{n\lambda 1} = E_{n\lambda 1avg} - E_{navg}$$

$$\Delta E_{n\lambda 2} = E_{n\lambda 2avg} - E_{navg}$$

[0083] S34aにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、以下の式により差 $\Delta E_{n\lambda 1}$ 及び $\Delta E_{n\lambda 2}$ をそれぞれ電圧の補正量 $\Delta HV_{\lambda 1}$ 及び $\Delta HV_{\lambda 2}$ に換算する。

$$\Delta HV_{\lambda 1} = \Delta E_{n\lambda 1} / HV_{epgain}$$

$$\Delta HV_{\lambda 2} = \Delta E_{n\lambda 2} / HV_{epgain}$$

[0084] S38aにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、補正值 $HV_{tbl}[\lambda 1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda 2]$ を以下の式により算出し、電圧補正テーブル134に含まれる補正データを更新する。

$$HV_{tbl}[\lambda 1] = HV_{tbl}[\lambda 1] - \Delta HV_{\lambda 1}$$

$$HV_{tbl}[\lambda 2] = HV_{tbl}[\lambda 2] - \Delta HV_{\lambda 2}$$

このように、補正值 $HV_{tbl}[\lambda 1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda 2]$ は目標波長ごとに算出される。ここで、 $HV_{tbl}[\lambda 1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda 2]$ の初期値は、調整発光（図4参照）によって予め設定されてもよい。

[0085] 過補正を防止するため、補正量 $\Delta HV_{\lambda 1}$ 及び $\Delta HV_{\lambda 2}$ に0より大きく1より小さい係数を乗算して得られた値をそれぞれ用いて補正值 $HV_{tbl}[\lambda 1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda 2]$ を算出してもよい。

[0086] 算出される補正值 $HV_{tbl}[\lambda 1]$ はすべて同じ値の配列となる。同様に、補正值 $HV_{tbl}[\lambda 2]$ はすべて同じ値の配列となる。

但し、本開示はこれに限定されず、1回のバースト出力において補正值 $HV_{tbl}[\lambda 1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda 2]$ がそれぞれ変化するようにしてもよい。例えば、補正量 $\Delta HV_{\lambda 1}$ 及び $\Delta HV_{\lambda 2}$ に時間の関数を乗算して得られた値を用いて補正值 $HV_{tbl}[\lambda 1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda 2]$ を算出してもよい。

[0087] 図14に示される処理によれば、第1のバースト出力におけるパルスエネルギー E_n []の時系列データを用いて、補正值 $HV_{tbl}[\lambda 1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda 2]$ を含む補正データが算出される。補正データは電圧補正テーブル134に記憶される。第1のバースト出力の次の第2のバースト出力において、図12のS16aの処理により電圧補正テーブル134から読み出した補正データを用いて電圧指令値 HV_c が補正される。電圧指令値 HV_c が補正されてもパルスエネルギー E_n []の積分値が変わらないように、補正值 $HV_{tbl}[\lambda 1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda 2]$ の全体の平均を0としてもよい（図10参照）。

[0088] 2.6 作用

(1) 第1の実施形態によれば、波長を周期的に変動させながら出力された複数のパルスのパルスエネルギー E_n []の時系列データを用いて、電圧指令値 HV_c の補正データを算出する。

これによれば、波長の変動に伴うパルスエネルギー E_n の変動を抑制するように、電圧指令値 HV_c を補正することができる。

[0089] (2) 第1の実施形態によれば、第1のバースト出力が行われる期間の終了後、第1のバースト出力の次の第2のバースト出力が行われる期間の開始前に補正データを算出する。

これによれば、バースト出力ごとに最新のデータを用いて電圧指令値 HV_c を補正できる。

[0090] (3) 第1の実施形態によれば、補正データを電圧補正テーブル134に記憶させ、電圧補正テーブル134から読み出した補正データを用いて電圧指令値 HV_c を補正する。

電圧補正テーブル 134 を用いることで、電圧指令値 HV_c の補正を高速に行うことができる。

[0091] (4) 第 1 の実施形態によれば、パルスエネルギー E_n [] の平均値 $E_{n\text{avg}}$ を基準として、補正データを算出する。

これによれば、露光装置 200 において設定されている目標パルスエネルギー E_t が不明であっても、平均値 $E_{n\text{avg}}$ を基準として電圧指令値 HV_c を適切に補正できる。

[0092] (5) 第 1 の実施形態によれば、目標波長 λ_1 によるパルスエネルギー $E_n[\lambda_1]$ の平均値 $E_{n\lambda_1\text{avg}}$ と、目標波長 λ_2 によるパルスエネルギー $E_n[\lambda_2]$ の平均値 $E_{n\lambda_2\text{avg}}$ と、パルスエネルギー E_n [] の平均値 $E_{n\text{avg}}$ と、が算出される。補正データは、平均値 $E_{n\lambda_1\text{avg}}$ と平均値 $E_{n\text{avg}}$ との差 $\Delta E_{n\lambda_1}$ と、平均値 $E_{n\lambda_2\text{avg}}$ と平均値 $E_{n\text{avg}}$ との差 $\Delta E_{n\lambda_2}$ と、を用いて算出される。

これによれば、目標波長 λ_1 でのパルスエネルギー $E_n[\lambda_1]$ の積分値と、目標波長 λ_2 でのパルスエネルギー $E_n[\lambda_2]$ の積分値と、を互いに近づけることができる。これにより、露光性能をレジスト膜の厚み方向で均一化することができる。

[0093] (6) 第 1 の実施形態によれば、第 1 のバースト出力が行われる期間において設定された目標波長ごとに補正值 $HV_{tbl}[\lambda_1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda_2]$ を算出する。

これによれば、補正值 $HV_{tbl}[\lambda_1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda_2]$ を含む補正データを高速に計算することができる。

その他の点については、第 1 の実施形態は比較例と同様である。

[0094] 3. 電圧指令値 HV_c [] の時系列データをさらに用いて補正データを算出するレーザ装置

3. 1 電圧補正テーブル 134 の更新処理

図 16 は、第 2 の実施形態における電圧補正テーブル 134 の更新処理の詳細を示すフローチャートである。図 16 に示される処理は、図 13 の S3

0のサブルーチンに相当する。図17は、図16において算出される平均値 $HV_{c\text{avg}}$ 、 $HV_{c\lambda 1\text{avg}}$ 、及び $HV_{c\lambda 2\text{avg}}$ と、差 $\Delta HV_{c\lambda 1}$ 及び $\Delta HV_{c\lambda 2}$ とを概念的に示すグラフである。図17の横軸はバースト出力におけるパルス番号 i を示し、縦軸は電圧指令値 HV_c を示す。図18は、図16において算出される平均値 $E_{n\text{avg}}$ 、 $E_{n\lambda 1\text{avg}}$ 、及び $E_{n\lambda 2\text{avg}}$ と、差 $\Delta E_{n\lambda 1}$ 及び $\Delta E_{n\lambda 2}$ とを概念的に示すグラフである。図18の横軸はバースト出力におけるパルス番号 i を示し、縦軸はパルスエネルギー E_n を示す。

[0095] 図16のS31aからS34aまでの処理は、図14を参照しながら説明したものと同様である。図7を参照しながら説明したようにパルスエネルギー E_n が目標パルスエネルギー E_t に近づくように電圧指令値 HV_c が制御された場合、図17に示されるように、電圧指令値 HV_c の変動が波長変動周期の逆数に相当する周波数成分を含むことがある。このような電圧指令値 HV_c の変動によって、パルスエネルギー E_n の変動がある程度抑制される。しかし、計測されたパルスエネルギー E_n の変動をS31aからS34aまでの処理によってキャンセルするだけでは、パルスエネルギー E_n の変動を十分にキャンセルすることができないことがある。パルスエネルギー E_n をより安定化するには、電圧指令値 HV_c の変動分も補正することが望ましい。

[0096] S35bにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、バースト出力における複数の電圧指令値 HV_c []の時系列データを取得する。電圧指令値 HV_c []の時系列データは、本開示における第2の時系列データに相当する。

[0097] レーザ制御プロセッサ130は、電圧指令値 HV_c []の平均値 $HV_{c\text{avg}}$ を算出する。平均値 $HV_{c\text{avg}}$ は本開示における第6の平均値に相当し、補正データを算出する基準となる。

[0098] S36bにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、目標波長 $\lambda 1$ での電圧指令値 HV_c [$\lambda 1$]の平均値 $HV_{c\lambda 1\text{avg}}$ と、目標波長 $\lambda 2$ での電

圧指令値 $HV_c[\lambda 2]$ の平均値 $HV_c\lambda 2avg$ と、を算出する。電圧指令値 $HV_c[\lambda 1]$ は、電圧指令値 $HV_c[]$ のうちの目標波長 $\lambda 1$ に従って第1波長パルス $P[\lambda 1]$ を出力するときの電圧指令値 HV_c の配列を意味する。同様に、電圧指令値 $HV_c[\lambda 2]$ は、目標波長 $\lambda 2$ に従って第2波長パルス $P[\lambda 2]$ を出力するときの電圧指令値 HV_c の配列を意味する。平均値 $HV_c\lambda 1avg$ は本開示における第4の平均値に相当し、平均値 $HV_c\lambda 2avg$ は本開示における第5の平均値に相当する。

[0099] S37bにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、平均値 $HV_c\lambda 1avg$ と平均値 HV_cavg との差 $\Delta HV_c\lambda 1$ と、平均値 $HV_c\lambda 2avg$ と平均値 HV_cavg との差 $\Delta HV_c\lambda 2$ とを以下の式で算出する。

$$\Delta HV_c\lambda 1 = HV_c\lambda 1avg - HV_cavg$$

$$\Delta HV_c\lambda 2 = HV_c\lambda 2avg - HV_cavg$$

[0100] S38bにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、補正值 $HV_{tbl}[\lambda 1]$ 及び $HV_{tbl}[\lambda 2]$ を以下の式により算出し、電圧補正テーブル134に含まれる補正データを更新する。

$$HV_{tbl}[\lambda 1] = HV_{tbl}[\lambda 1] - (\Delta HV_{\lambda 1} - \Delta HV_c\lambda 1)$$

$$HV_{tbl}[\lambda 2] = HV_{tbl}[\lambda 2] - (\Delta HV_{\lambda 2} - \Delta HV_c\lambda 2)$$

[0101] 図17において、電圧指令値 HV_c を平均値 HV_cavg で一定とした場合と比べて、電圧指令値 HV_c を変動させた場合に、目標波長 $\lambda 1$ が設定されると電圧指令値 HV_c が $\Delta HV_c\lambda 1$ 低くなり、目標波長 $\lambda 2$ が設定されると電圧指令値 HV_c が $\Delta HV_c\lambda 2$ 高くなったとする。

この場合、図18に示されるように、電圧指令値 HV_c を一定とした場合と比べて、電圧指令値 HV_c を変動させた場合には、目標波長 $\lambda 1$ が設定されるとパルスエネルギー E_n が $\Delta HV_c\lambda 1 \times HV_{epgain}$ 小さくなる。そこで、S31aからS34aまでの処理によって差 $\Delta E_n\lambda 1$ に基づく補正をするだけでなく、S35bからS38bまでの処理によって電圧指令

値 HV_c [] の時系列データをさらに用いて補正することにより、パルスエネルギー E_n をより安定化できる。

同様に、電圧指令値 HV_c を一定とした場合と比べて、電圧指令値 HV_c を変動させた場合には、目標波長 λ_2 が設定されるとパルスエネルギー E_n が $\Delta HV_c \lambda_2 \times HV_{epgain}$ 大きくなる。そこで、差 $\Delta E_n \lambda_2$ に基づく補正をするだけでなく、電圧指令値 HV_c [] の時系列データをさらに用いて補正することにより、パルスエネルギー E_n をより安定化できる。

[0102] 過補正を防止するため、補正量 $\Delta HV \lambda_1$ 及び $\Delta HV_c \lambda_1$ に 0 より大きく 1 より小さい係数を乗算して得られた値を用いて補正值 $HV_{tbl}[\lambda_1]$ を算出してもよい。また、補正量 $\Delta HV \lambda_2$ 及び $\Delta HV_c \lambda_2$ に 0 より大きく 1 より小さい係数を乗算して得られた値を用いて補正值 $HV_{tbl}[\lambda_2]$ を算出してもよい。

[0103] 3. 2 作用

(7) 第2の実施形態によれば、第1のバースト出力が行われる期間において設定された複数の電圧指令値 HV_c [] の時系列データを用いて補正データを算出する。

これによれば、露光装置 200 によって設定された電圧指令値 HV_c の変動分も補正して、補正をより適切に行うことができる。

[0104] (8) 第2の実施形態によれば、電圧指令値 HV_c [] の平均値 HV_{cavg} を基準として補正データを算出する。

これによれば、露光装置 200 において設定されている目標パルスエネルギー E_t が不明であっても、平均値 HV_{cavg} を基準として適切に補正できる。

[0105] (9) 第2の実施形態によれば、目標波長 λ_1 が設定された場合の電圧指令値 $HV_c[\lambda_1]$ の平均値 $HV_{c\lambda_1avg}$ と、目標波長 λ_2 が設定された場合の電圧指令値 $HV_c[\lambda_2]$ の平均値 $HV_{c\lambda_2avg}$ と、電圧指令値 HV_c [] の平均値 HV_{cavg} と、が算出される。補正データは、平均値 $HV_{c\lambda_1avg}$ と平均値 HV_{cavg} との差 $\Delta HV_{c\lambda_1}$ と、平均値

$H V c \lambda 2 a v g$ と平均値 $H V c a v g$ との差 $\Delta H V c \lambda 2$ と、を用いて算出される。

これによれば、露光装置200によって設定された電圧指令値 $H V c$ の変動分も補正して、目標波長 $\lambda 1$ でのパルスエネルギー $E n [\lambda 1]$ の積分値と、目標波長 $\lambda 2$ でのパルスエネルギー $E n [\lambda 2]$ の積分値と、を互いに近づけることができる。

その他の点については、第2の実施形態は第1の実施形態と同様である。

[0106] 4. パルスエネルギー $E n []$ の時系列データをフーリエ変換して補正データを算出するレーザ装置

4. 1 電圧補正テーブル134の更新処理

図19は、第3の実施形態における電圧補正テーブル134の更新処理の詳細を示すフローチャートである。図19に示される処理は、図13のS30のサブルーチンに相当する。図20は、図19においてパルスエネルギー $E n []$ の時系列データをフーリエ変換したスペクトルデータ $F F T e n []$ のグラフである。図20の横軸は周波数を示し、縦軸はスペクトル密度を示す。

[0107] 図19のS31cにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、バースト出力における複数のパルスのパルスエネルギー $E n []$ の時系列データを取得する。

[0108] レーザ制御プロセッサ130は、パルスエネルギー $E n []$ の時系列データをフーリエ変換してスペクトルデータ $F F T e n []$ を算出する。フーリエ変換の処理は高速フーリエ変換により行うことができる。図20に示されるように、波長を周期的に変動させて出力されたパルスレーザ光のパルスエネルギー $E n []$ の時系列データをフーリエ変換して得られるスペクトルデータ $F F T e n []$ は、特定の周波数にピークを有する。この周波数は波長変動周期の逆数に相当する。

[0109] S32cにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、スペクトルデータ $F F T e n []$ のうちの選択された周波数成分 $F F T e n [f r e q]$ を抽

出する。ここでは波長変動周期の逆数に相当する周波数成分 $FFTen[freq]$ が選択される。図20に示される例では、1000Hzの周波数成分が選択される。あるいは、スペクトルデータ $FFTen[]$ のピークとその周辺の周波数を含む周波数帯域が選択されてもよい。あるいは、スペクトルデータ $FFTen[]$ が複数のピークを含む場合に、それらのピークに対応する複数の周波数成分が選択されてもよい。

[0110] S33cにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、周波数成分 $FFTen[freq]$ を逆フーリエ変換することにより、選択された周波数のエネルギーデータ $Enfft[]$ を算出する。エネルギーデータ $Enfft[]$ はパルスごとのエネルギー振幅を含む。逆フーリエ変換の処理は高速逆フーリエ変換により行うことができる。

[0111] S34cにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、以下の式によりエネルギーデータ $Enfft[]$ を電圧の補正量 $HVfft[]$ に換算する。

$$HVfft[] = Enfft[] / HVepgain$$

[0112] S38cにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、補正值 $HVtbi[]$ を以下の式により算出し、電圧補正テーブル134に含まれる補正データを更新する。

$$HVtbi[] = HVtbi[] - HVfft[]$$

このように、補正值 $HVtbi[]$ はバースト出力における個々のパルスごとに算出される。ここで、補正值 $HVtbi[]$ の初期値は調整発光（図4参照）によって予め設定されてもよい。

[0113] 過補正を防止するため、補正量 $HVfft[]$ に0より大きく1より小さい係数を乗算して得られた値を用いて補正值 $HVtbi[]$ を算出してもよい。

[0114] 4.2 作用

(10) 第3の実施形態によれば、第1のバースト出力が行われる期間において出力された複数のパルスのパルスエネルギー $En[]$ の時系列デー

タから、選択された周波数成分を抽出して補正データを算出する。

これによれば、パルスエネルギー E_n の選択された周波数成分の変動を低減して、パルスエネルギー E_n を安定化できる。

[0115] (11) 第3の実施形態によれば、選択された周波数成分は、第1のバースト出力が行われる期間においてパルスレーザ光を出力させたときの波長変動周期の逆数に相当する周波数成分である。

これによれば、目標波長 λ_1 及び λ_2 の切り替えの周波数に相当する周波数成分の変動を低減して、パルスエネルギー E_n を安定化できる。

[0116] (12) 第3の実施形態によれば、パルスエネルギー E_n [] の時系列データをフーリエ変換してスペクトルデータ FFT_{E_n} [] が算出される。スペクトルデータ FFT_{E_n} [] のうちの選択された周波数成分 $FFT_{E_n}[freq]$ を逆フーリエ変換してエネルギーデータ $E_n f f t$ [] が算出される。このエネルギーデータ $E_n f f t$ [] を用いて補正データが算出される。

これによれば、目標波長 λ_1 及び λ_2 の切り替えとパルスエネルギー E_n の変動との位相のずれに対応した補正データが算出されるので、パルスエネルギー E_n をより安定化できる。

[0117] (13) 第3の実施形態によれば、第1のバースト出力が行われる期間に出力された個々のパルスごとに補正值 $H V t b l$ [] を算出する。

これによれば、パルスごとに適切な補正值 $H V t b l$ [] を算出できる。

その他の点については、第3の実施形態は第1の実施形態と同様である。

[0118] 5. 電圧指令値 $H V c$ [] の時系列データをフーリエ変換して補正データを算出するレーザ装置

5. 1 電圧補正テーブル 134 の更新処理

図21は、第4の実施形態における電圧補正テーブル 134 の更新処理の詳細を示すフローチャートである。図21に示される処理は、図13のS30のサブルーチンに相当する。

[0119] 図21のS31cからS34cまでの処理は、図19を参照しながら説明したものと同様である。図7を参照しながら説明したようにパルスエネルギー E_n が目標パルスエネルギー E_t に近づくように電圧指令値 HV_c が制御された場合、図17に示されるように、電圧指令値 HV_c の変動が波長変動周期の逆数に相当する周波数成分を含むことがある。第2の実施形態において説明したように、パルスエネルギー E_n をより安定化するには、電圧指令値 HV_c の変動分も補正することが望ましい。

[0120] S35dにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、バースト出力における複数の電圧指令値 HV_c []の時系列データを取得する。

[0121] レーザ制御プロセッサ130は、電圧指令値 HV_c []の時系列データをフーリエ変換してスペクトルデータ FFT_{hv_c} []を算出する。フーリエ変換の処理は高速フーリエ変換により行うことができる。

[0122] S36dにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、スペクトルデータ FFT_{hv_c} []のうちの選択された周波数成分 $FFT_{hv_c} [freq]$ を抽出する。周波数成分 $FFT_{hv_c} [freq]$ の周波数は、S32cで選択された周波数成分 $FFT_{en} [freq]$ の周波数と同じであってもよい。

[0123] S37dにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、周波数成分 $FFT_{hv_c} [freq]$ を逆フーリエ変換することにより、選択された周波数の電圧データ HV_{cfft} []を算出する。電圧データ HV_{cfft} []はパルスごとの電圧振幅を含む。逆フーリエ変換の処理は高速逆フーリエ変換により行うことができる。

[0124] S38dにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、補正值 HV_{tbl} []を以下の式により算出し、電圧補正テーブル134に含まれる補正データを更新する。

$$HV_{tbl} [] = HV_{tbl} [] - (HV_{fft} [] - HV_{cfft} [])$$

[0125] 過補正を防止するため、補正量 HV_{fft} []及び HV_{cfft} []

に0より大きく1より小さい係数を乗算して得られた値を用いて補正值 HV_{tbl} を算出してもよい。

[0126] 5. 2 作用

(14) 第4の実施形態によれば、第1のバースト出力が行われる期間において設定された複数の電圧指令値 HV_c の時系列データから、選択された周波数成分を抽出して補正データを算出する。

電圧指令値 HV_c の時系列データを用いることで、露光装置200によって設定された電圧指令値 HV_c の変動分も補正して、補正をより適切に行うことができる。

[0127] (15) 第4の実施形態によれば、電圧指令値 HV_c の時系列データをフーリエ変換してスペクトルデータ FFT_{hv_c} が算出される。スペクトルデータ FFT_{hv_c} のうちの選択された周波数成分 $FFT_{hv_c}[freq]$ を逆フーリエ変換して電圧データ HV_{cfft} が算出される。この電圧データ HV_{cfft} を用いて補正データが算出される。

これによれば、目標波長 λ_1 及び λ_2 の切り替えと電圧指令値 HV_c の変動との位相のずれに対応した補正データが算出されるので、パルスエネルギー E_n をより安定化できる。

その他の点については、第4の実施形態は第3の実施形態と同様である。

[0128] 6. 波長変動周期内のパルス番号jごとに補正データを算出するレーザ装置

6. 1 電圧補正テーブル134の更新処理

図22は、第5の実施形態における電圧補正テーブル134の更新処理の詳細を示すフローチャートである。図22に示される処理は、図13のS30のサブルーチンに相当する。図23は、周期的に変化する波長を示すグラフである。図23の横軸はバースト出力におけるパルス番号iを示し、縦軸は波長を示す。波長変動周期内のパルス番号jは、波長変動周期内の何番目のパルスであるかを示す。例えば1周期のパルス数を4パルスとした場合、jは1から4までの整数である。

[0129] 図22のS31aの処理は、図14を参照しながら説明したものと同様である。但し、パルスエネルギー E_n [] の平均値 $E_{n\text{avg}}$ は本開示における第9の平均値に相当する。

[0130] S32eにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、波長変動周期内のパルス番号 j ごとのパルスエネルギー E_n [# j] の平均値 $E_{n\#j\text{avg}}$ を算出する。パルスエネルギー E_n [# j] は、パルスエネルギー E_n [] のうちのパルス番号 j のパルスエネルギー E_n の配列を意味する。パルス番号 j のパルスは、例えば j の値が1であればバースト出力におけるパルス番号 i が1、5、9、・・・であるパルスに相当し、 j の値が2であればバースト出力におけるパルス番号 i が2、6、10、・・・であるパルスに相当する。平均値 $E_{n\#j\text{avg}}$ は、例えば j の値が1であれば $E_{n\#1\text{avg}}$ と表され、 j の値が2であれば $E_{n\#2\text{avg}}$ と表される。平均値 $E_{n\#1\text{avg}}$ は本開示における第7の平均値に相当する。平均値 $E_{n\#2\text{avg}}$ は本開示における第8の平均値に相当する。平均値 $E_{n\#j\text{avg}}$ の数は j の最大値に一致する。

[0131] S33eにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、以下の式により平均値 $E_{n\#j\text{avg}}$ と平均値 $E_{n\text{avg}}$ との差 $\Delta E_{n\#j}$ をそれぞれ算出する。

$$\Delta E_{n\#j} = E_{n\#j\text{avg}} - E_{n\text{avg}}$$

差 $\Delta E_{n\#j}$ は、例えば j の値が1であれば $\Delta E_{n\#1}$ と表され、 j の値が2であれば $\Delta E_{n\#2}$ と表される。

[0132] S34eにおいて、レーザ制御プロセッサ130は、以下の式により差 $\Delta E_{n\#j}$ をそれぞれ電圧の補正量 $\Delta HV\#j$ に換算する。

$$\Delta HV\#j = \Delta E_{n\#j} / HV\text{epgain}$$

[0133] 第1の実施形態と同様に補正量 $\Delta HV\#j$ を用いて補正值 $HV\text{tbl}[\#j]$ を算出してもよい。しかし、図7を参照しながら説明したようにパルスエネルギー E_n が目標パルスエネルギー E_t に近づくように電圧指令値 HV_c が制御された場合、図17に示されるように、電圧指令値 HV_c の変動が

波長変動周期の逆数に相当する周波数成分を含むことがある。第2の実施形態において説明したように、パルスエネルギー E_n をより安定化するには、電圧指令値 HV_c の変動分も補正することが望ましい。

[0134] S35b の処理は、図16を参照しながら説明したものと同様である。但し、電圧指令値 HV_c [] の平均値 $HV_{c\ avg}$ は本開示における第12の平均値に相当する。

[0135] S36e において、レーザ制御プロセッサ130は、波長変動周期内のパルス番号 j ごとの電圧指令値 HV_c [# j] の平均値 $HV_{c\ #j\ avg}$ を算出する。電圧指令値 HV_c [# j] は、電圧指令値 HV_c [] のうちのパルス番号 j のパルスの電圧指令値 HV_c の配列を意味する。平均値 $HV_{c\ #j\ avg}$ は、例えば j の値が1であれば $HV_{c\ #1\ avg}$ と表され、 j の値が2であれば $HV_{c\ #2\ avg}$ と表される。平均値 $HV_{c\ #1\ avg}$ は本開示における第10の平均値に相当し、平均値 $HV_{c\ #2\ avg}$ は本開示における第11の平均値に相当する。平均値 $HV_{c\ #j\ avg}$ の数は j の最大値に一致する。

[0136] S37e において、レーザ制御プロセッサ130は、以下の式により平均値 $HV_{c\ #j\ avg}$ と平均値 $HV_{c\ avg}$ との差 $\Delta HV_{c\ #j}$ をそれぞれ算出する。

$$\Delta HV_{c\ #j} = HV_{c\ #j\ avg} - HV_{c\ avg}$$

差 $\Delta HV_{c\ #j}$ は、例えば j の値が1であれば $\Delta HV_{c\ #1}$ と表され、 j の値が2であれば $\Delta HV_{c\ #2}$ と表される。

[0137] S38e において、レーザ制御プロセッサ130は、補正值 HV_{tbl} [# j] を以下の式により算出し、電圧補正テーブル134に含まれる補正データを更新する。

$$HV_{tbl} [\# j] = HV_{tbl} [\# j] - (\Delta HV_{\#j} - \Delta HV_{c\ #j})$$

このように、補正值 $HV_{tbl} [\# j]$ は波長変動周期内のパルス番号 j ごとに算出される。ここで、 $HV_{tbl} [\# j]$ の初期値は、調整発光（図4

参照)によって予め設定されてもよい。

[0138] 過補正を防止するため、補正量 $\Delta HV \# j$ 及び $\Delta HV c \# j$ に0より大きく1より小さい係数を乗算して得られた値を用いて補正值 $HV t b l \# j$ を算出してもよい。

[0139] 算出される補正值 $HV t b l \# j$ は、同じパルス番号 j については同じ値の配列となる。

但し、本開示はこれに限定されず、1回のバースト出力において補正值 $HV t b l \# j$ がそれぞれ変化するようにしてもよい。例えば、補正量 $\Delta HV \# j$ 及び $\Delta HV c \# j$ に時間の関数を乗算して得られた値を用いて補正值 $HV t b l \# j$ を算出してもよい。

[0140] 6. 2 作用

(16) 第5の実施形態によれば、波長変動周期内のパルス番号 j が1であるパルスのパルスエネルギー $E n \# 1$ の平均値 $E n \# 1 a v g$ と、パルス番号 j が2であるパルスのパルスエネルギー $E n \# 2$ の平均値 $E n \# 2 a v g$ と、パルスエネルギー $E n$ の平均値 $E n a v g$ と、が算出される。補正データは、平均値 $E n \# 1 a v g$ と平均値 $E n a v g$ との差 $\Delta E n \# 1$ と、平均値 $E n \# 2 a v g$ と平均値 $E n a v g$ との差 $\Delta E n \# 2$ と、を用いて算出される。

これによれば、目標波長 $\lambda 1$ 及び $\lambda 2$ の切り替えとパルスエネルギー $E n$ の変動との位相のずれに対応した補正データが算出されるので、パルスエネルギー $E n$ をより安定化できる。

[0141] (17) 第5の実施形態によれば、第1のバースト出力が行われる期間においてパルスレーザ光を出力させたときの波長変動周期内のパルス番号 j ごとに補正值 $HV t b l \# j$ を算出する。

これによれば、補正值 $HV t b l \# j$ を含む補正データを高速に計算することができる。

[0142] (18) 第5の実施形態によれば、波長変動周期内のパルス番号 j が1である場合の電圧指令値 $HV c \# 1$ の平均値 $HV c \# 1 a v g$ と、パル

ス番号 j が 2 である場合の電圧指令値 HVc [# 2] の平均値 $HVc \# 2 avg$ と、電圧指令値 HVc [] の平均値 $HVc avg$ と、が算出される。補正データは、平均値 $HVc \# 1 avg$ と平均値 $HVc avg$ との差 $\Delta HVc \# 1$ と、平均値 $HVc \# 2 avg$ と平均値 $HVc avg$ との差 $\Delta HVc \# 2$ と、を用いて算出される。

これによれば、目標波長 $\lambda 1$ 及び $\lambda 2$ の切り替えと電圧指令値 HVc の変動との位相のずれに対応した補正データが算出されるので、パルスエネルギー E_n をより安定化できる。

その他の点については、第 5 の実施形態は第 2 の実施形態と同様である。

[0143] 7. 目標パルスエネルギー E_t に基づいて電圧指令値 HVc を設定するレーザ装置

7. 1 レーザ制御プロセッサ 130 による制御

図 24 は、第 6 の実施形態においてレーザ制御プロセッサ 130 によって実行されるパルスレーザ光の出力のための処理を示すフローチャートである。第 6 の実施形態においては、以下のように露光制御プロセッサ 210 から受信する目標パルスエネルギー E_t に基づいて、レーザ制御プロセッサ 130 が電圧指令値 HVc を算出することにより、電圧指令値 HVc を取得する。

第 6 の実施形態の構成は第 1 の実施形態と同様でよい。但し、モニタモジュール 17 はパルスレーザ光の波長だけでなくパルスエネルギー E_n も計測する。

[0144] S10f において、レーザ制御プロセッサ 130 は、露光制御プロセッサ 210 から目標パルスエネルギー E_t を受信する。目標パルスエネルギー E_t はパルスごとに受信しなくてもよく、例えばバースト出力ごとに受信してもよい。

S12f において、レーザ制御プロセッサ 130 は、パルスレーザ光のパルスエネルギー E_n をモニタモジュール 17 により検出する。

[0145] S13f において、レーザ制御プロセッサ 130 は、検出されたパルスエ

エネルギー E_n と目標パルスエネルギー E_t との差 ΔE_n を以下の式により算出する。

$$\Delta E_n = E_n - E_t$$

[0146] S 1 4 f において、レーザ制御プロセッサ 1 3 0 は、以下の式により差 ΔE_n を電圧の補正量 ΔHV に換算する。

$$\Delta HV = \Delta E_n / HV_{epgain}$$

[0147] S 1 5 f において、レーザ制御プロセッサ 1 3 0 は、電圧指令値 HV_c を以下の式により更新する。

$$HV_c = HV_c - \Delta HV$$

例えば、S 1 2 f で検出されたパルスエネルギー E_n が目標パルスエネルギー E_t より小さかった場合は、S 1 3 f 及び S 1 4 f において差 ΔE_n 及び補正量 ΔHV が負数となる。この場合、S 1 5 f においては正数である電圧指令値 HV_c の絶対値が大きくなるので、次のパルスのパルスエネルギー E_n が大きくなる。

[0148] S 1 6 a から S 1 9 までの処理は、図 1 2 を参照しながら説明したものと同様である。S 1 9 の後、レーザ制御プロセッサ 1 3 0 は、S 1 2 f に処理を戻す。

[0149] 7. 2 露光制御プロセッサ 2 1 0 による制御

図 2 5 は、第 6 の実施形態において露光制御プロセッサ 2 1 0 によって実行されるレーザ制御の処理を示すフローチャートである。露光制御プロセッサ 2 1 0 は、電圧指令値 HV_c の決定を行わない。

[0150] S 8 0 f において、露光制御プロセッサ 2 1 0 は、レーザ装置 1 0 0 a のレーザ制御プロセッサ 1 3 0 に目標パルスエネルギー E_t を送信する。目標パルスエネルギー E_t はパルスごとに送信しなくてもよく、例えばバースト出力ごとに送信してもよい。

[0151] S 9 1 の処理は、図 7 を参照しながら説明したものと同様である。露光制御プロセッサ 2 1 0 は S 9 1 の処理を繰り返すことにより、レーザ装置 1 0 0 a にパルスレーザ光を出力させる。

その他の点については、第6の実施形態は第1～第5の実施形態のいずれかと同様である。

[0152] 8. その他

8. 1 モニタモジュール17の構成

図26は、比較例及び第1～第6の実施形態において用いられるモニタモジュール17の構成を概略的に示す。モニタモジュール17は、ビームスプリッタ17aと、エネルギーセンサ17bと、エタロン分光器18と、を含む。

ビームスプリッタ17aは、ビームスプリッタ16によって反射されたパルスレーザ光の光路に位置する。エネルギーセンサ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の光路に位置する。

[0153] エタロン分光器18は、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配置されている。エタロン分光器18は、拡散プレート18aと、エタロン18bと、集光レンズ18cと、ラインセンサ18dと、を含む。

[0154] 拡散プレート18aは、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位置する。拡散プレート18aは、表面に多数の凹凸を有し、パルスレーザ光を透過させるとともに拡散させるように構成されている。

エタロン18bは、拡散プレート18aを透過したパルスレーザ光の光路に位置する。エタロン18bは、2枚の部分反射ミラーを含む。2枚の部分反射ミラーは、所定距離のエアギャップを有して対向し、スペーサを介して貼り合わせられている。

[0155] 集光レンズ18cは、エタロン18bを透過したパルスレーザ光の光路に位置する。

ラインセンサ18dは、集光レンズ18cを透過したパルスレーザ光の光路であって、集光レンズ18cの焦点面に位置する。ラインセンサ18dは、エタロン18b及び集光レンズ18cによって形成される干渉縞を受光する。干渉縞はパルスレーザ光の干渉パターンであって、同心円状の形状を有

し、この同心円の中心からの距離の2乗は波長の変化に比例する。

[0156] ラインセンサ18dは、一次元に配列された多数の受光素子を含む光分布センサである。あるいは、ラインセンサ18dの代わりに、二次元に配列された多数の受光素子を含むイメージセンサが光分布センサとして用いられてもよい。受光素子の各々をチャネルという。各チャネルにおいて検出された光強度から干渉縞の光強度分布が得られる。

[0157] 8. 2 モニタモジュール17の動作

エネルギーセンサ17bは、パルスレーザ光のパルスエネルギー E_n を検出し、パルスエネルギー E_n のデータをレーザ制御プロセッサ130に出力する。パルスエネルギー E_n のデータは、第6の実施形態においてレーザ制御プロセッサ130が電圧指令値 HV_c をフィードバック制御するのに用いられてもよい。また、パルスエネルギー E_n のデータを受信したタイミングは、レーザ制御プロセッサ130がエタロン分光器18にデータ出力トリガを出力するタイミングの基準として用いることができる。

[0158] エタロン分光器18は、ラインセンサ18dで検出されたパルスレーザ光の干渉パターンから計測波形を生成する。エタロン分光器18は、レーザ制御プロセッサ130から出力されるデータ出力トリガに従って、計測波形をレーザ制御プロセッサ130に送信する。

計測波形は、フリンジ波形ともいい、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。

[0159] レーザ制御プロセッサ130は、エタロン分光器18から出力される計測波形を用いてパルスレーザ光の中心波長を計測波長として算出する。あるいは、エタロン分光器18に含まれる図示しないコントローラが計測波長を算出してレーザ制御プロセッサ130に送信する。レーザ制御プロセッサ130は、目標波長 λ_1 及び λ_2 と計測波長とに基づいて回転ステージ143及び163の図示しないドライバに制御信号を出力することにより、パルスレーザ光の中心波長をフィードバック制御する。

[0160] 8. 3 補足

上記の説明は、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。

[0161] 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] パルスレーザ光のパルスエネルギーを制御する電源を備えた放電励起型レーザ装置の制御方法であって、
- 第1の期間において、波長を周期的に変動させながら前記放電励起型レーザ装置から複数のパルスを含むパルスレーザ光を出力させることと、
- 前記複数のパルスのパルスエネルギーの第1の時系列データを用いて、前記電源に設定される電圧指令値を前記波長の変動に伴って補正する補正データを算出することと、
- 第2の期間において、前記電圧指令値を取得し、取得された前記電圧指令値を前記補正データを用いて補正し、補正された前記電圧指令値に従って前記放電励起型レーザ装置からパルスレーザ光を出力させることと、
- を含む、制御方法。
- [請求項2] 請求項1に記載の制御方法であって、
- 前記第1の期間は第1のバースト出力が行われる期間に相当し、前記第2の期間は前記第1のバースト出力の次の第2のバースト出力が行われる期間に相当し、
- 前記第1の期間の終了後、前記第2の期間の開始前に前記補正データを算出する、
- 制御方法。
- [請求項3] 請求項1に記載の制御方法であって、
- 前記補正データをテーブルに記憶させ、
- 前記テーブルから読み出した前記補正データを用いて前記電圧指令値を補正する、
- 制御方法。
- [請求項4] 請求項1に記載の制御方法であって、
- 前記複数のパルスのパルスエネルギーの平均値を基準として、前記

補正データを算出する、
制御方法。

[請求項5] 請求項 1 に記載の制御方法であって、
前記複数のパルスのうち、第 1 の目標波長に従って出力された第 1
波長パルスのパルスエネルギーの第 1 の平均値と、
前記複数のパルスのうち、第 2 の目標波長に従って出力された第 2
波長パルスのパルスエネルギーの第 2 の平均値と、
前記複数のパルスのパルスエネルギーの第 3 の平均値と、
を算出し、前記第 1 の平均値と前記第 3 の平均値との差と、前記第 2
の平均値と前記第 3 の平均値との差と、を用いて前記補正データを算
出する、
制御方法。

[請求項6] 請求項 1 に記載の制御方法であって、
前記第 1 の期間において設定された目標波長ごとに、前記補正デー
タに含まれる補正值を算出する、
制御方法。

[請求項7] 請求項 1 に記載の制御方法であって、
前記第 1 の期間において設定された複数の前記電圧指令値の第 2 の
時系列データをさらに用いて前記補正データを算出する、
制御方法。

[請求項8] 請求項 7 に記載の制御方法であって、
前記複数の電圧指令値の平均値を基準として、前記補正データを算
出する、
制御方法。

[請求項9] 請求項 1 に記載の制御方法であって、
前記第 1 の期間において設定された複数の前記電圧指令値のうち、
第 1 の目標波長が設定された場合の前記電圧指令値の第 4 の平均値と
、

前記複数の電圧指令値のうち、第2の目標波長が設定された場合の前記電圧指令値の第5の平均値と、

前記複数の電圧指令値の第6の平均値と、

を算出し、前記第4の平均値と前記第6の平均値との差と、前記第5の平均値と前記第6の平均値との差と、をさらに用いて前記補正データを算出する、

制御方法。

[請求項10] 請求項1に記載の制御方法であって、

前記第1の時系列データから、選択された周波数成分を抽出して前記補正データを算出する、

制御方法。

[請求項11] 請求項10に記載の制御方法であって、

前記選択された周波数成分は、前記第1の期間においてパルスレーザ光を出力させたときの波長変動周期の逆数に相当する周波数成分である、

制御方法。

[請求項12] 請求項1に記載の制御方法であって、

前記第1の時系列データをフーリエ変換してスペクトルデータを算出し、前記スペクトルデータのうちの選択された周波数成分を逆フーリエ変換して得られたデータを用いて前記補正データを算出する、

制御方法。

[請求項13] 請求項1に記載の制御方法であって、

前記第1の期間に出力された個々のパルスごとに、前記補正データに含まれる補正値を算出する、

制御方法。

[請求項14] 請求項1に記載の制御方法であって、

前記第1の期間において設定された複数の前記電圧指令値の第2の時系列データから、選択された周波数成分を抽出して前記補正データ

を算出する、
制御方法。

[請求項15] 請求項1に記載の制御方法であって、
前記第1の期間において設定された複数の前記電圧指令値の第2の時系列データをフーリエ変換してスペクトルデータを算出し、前記スペクトルデータのうちの選択された周波数成分を逆フーリエ変換して得られたデータをさらに用いて前記補正データを算出する、
制御方法。

[請求項16] 請求項1に記載の制御方法であって、
前記複数のパルスのうち、波長変動周期内のパルス番号が第1の値であるパルスのパルスエネルギーの第7の平均値と、
前記複数のパルスのうち、前記パルス番号が第2の値であるパルスのパルスエネルギーの第8の平均値と、
前記複数のパルスのパルスエネルギーの第9の平均値と、
を算出し、前記第7の平均値と前記第9の平均値との差と、前記第8の平均値と前記第9の平均値との差と、を用いて前記補正データを算出する、
制御方法。

[請求項17] 請求項1に記載の制御方法であって、
前記第1の期間においてパルスレーザ光を出力させたときの波長変動周期内のパルス番号ごとに、前記補正データに含まれる補正値を算出する、
制御方法。

[請求項18] 請求項1に記載の制御方法であって、
前記第1の期間において設定された複数の前記電圧指令値のうち、波長変動周期内のパルス番号が第1の値であるパルスにおいて設定された前記電圧指令値の第10の平均値と、
前記複数の電圧指令値のうち、前記パルス番号が第2の値であるパ

ルスにおいて設定された前記電圧指令値の第 1 1 の平均値と、
前記複数の電圧指令値の第 1 2 の平均値と、
を算出し、前記第 1 0 の平均値と前記第 1 2 の平均値との差と、前記
第 1 1 の平均値と前記第 1 2 の平均値との差と、をさらに用いて前記
補正データを算出する、
制御方法。

[請求項19]

パルスレーザ光のパルスエネルギーを制御する電源と、
前記電源を制御するプロセッサであって、
第 1 の期間において、波長を周期的に変動させながら放電励起型レ
ーザ装置から複数のパルスを含むパルスレーザ光を出力させ、
前記複数のパルスのパルスエネルギーの第 1 の時系列データを用い
て、前記電源に設定される電圧指令値を前記波長の変動に伴って補正
する補正データを算出し、
第 2 の期間において、前記電圧指令値を取得し、取得された前記電
圧指令値を前記補正データを用いて補正し、補正された前記電圧指令
値に従って前記放電励起型レーザ装置からパルスレーザ光を出力させ
る、
前記プロセッサと、
を備える、放電励起型レーザ装置。

[請求項20]

電子デバイスの製造方法であって、
パルスレーザ光のパルスエネルギーを制御する電源と、
前記電源を制御するプロセッサであって、
第 1 の期間において、波長を周期的に変動させながら放電励起型レ
ーザ装置から複数のパルスを含むパルスレーザ光を出力させ、
前記複数のパルスのパルスエネルギーの第 1 の時系列データを用い
て、前記電源に設定される電圧指令値を前記波長の変動に伴って補正
する補正データを算出し、
第 2 の期間において、前記電圧指令値を取得し、取得された前記電

圧指令値を前記補正データを用いて補正し、補正された前記電圧指令値に従って前記放電励起型レーザ装置からパルスレーザ光を出力させる、

前記プロセッサと、

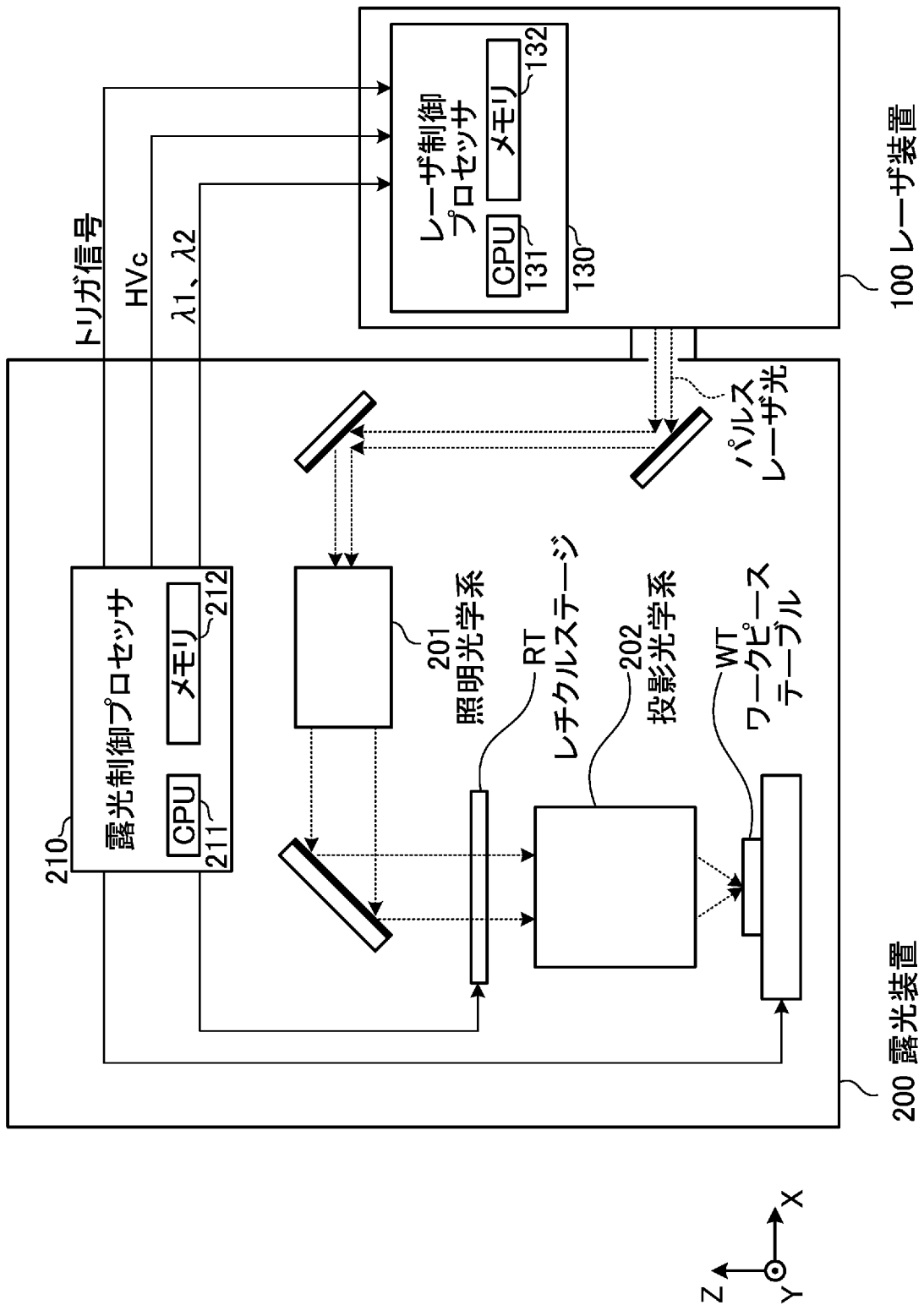
を備える前記放電励起型レーザ装置によってパルスレーザ光を生成し、

パルスレーザ光を露光装置に出力し、

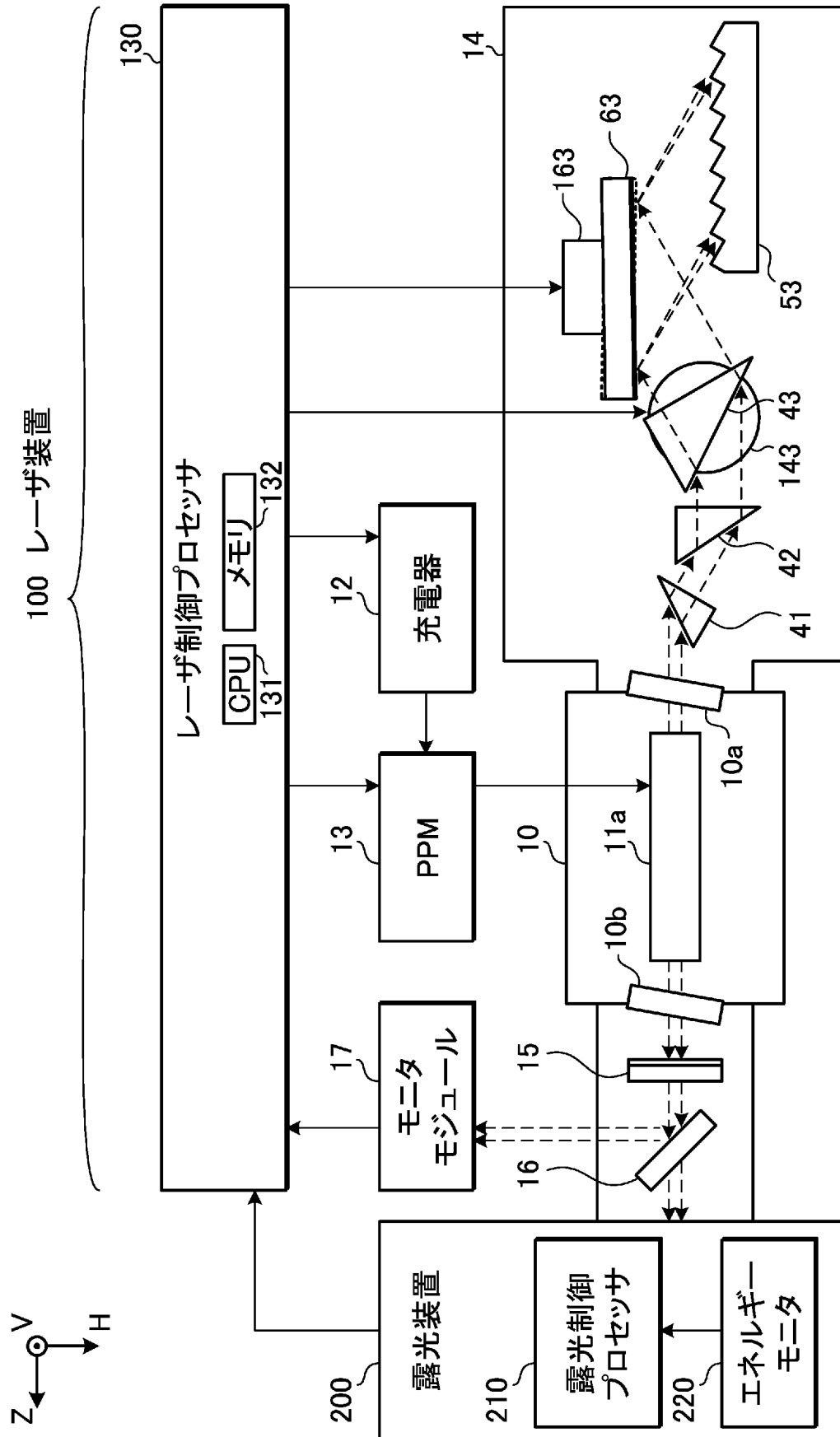
電子デバイスを製造するために、前記露光装置内で感光基板上にパルスレーザ光を露光する

ことを含む、電子デバイスの製造方法。

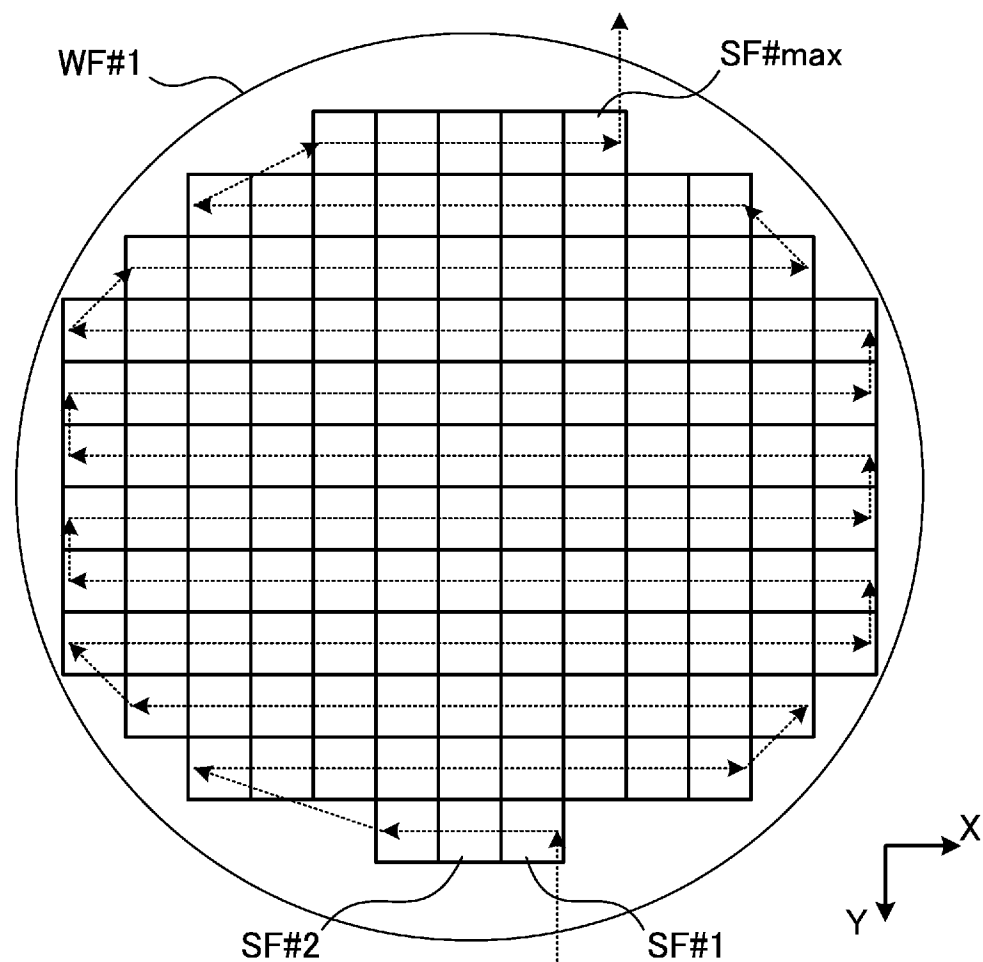
[図1]



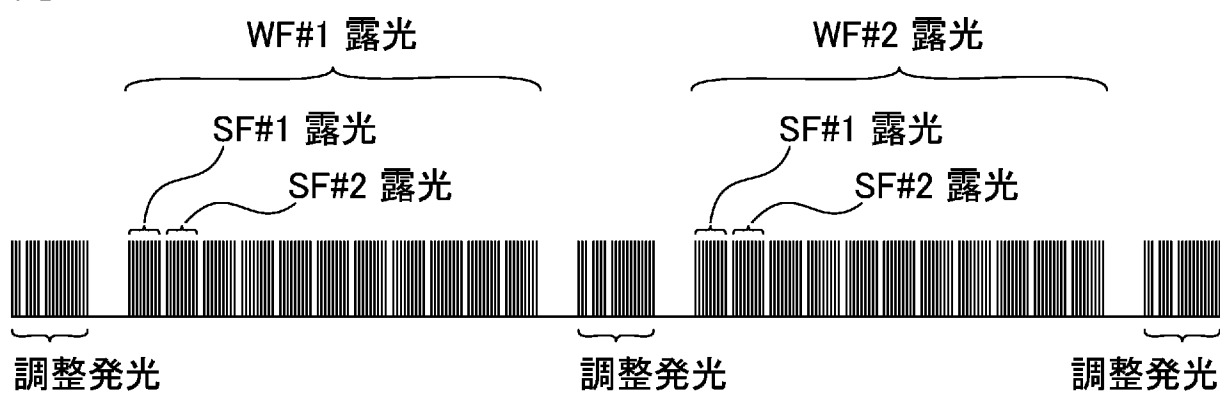
[図2]



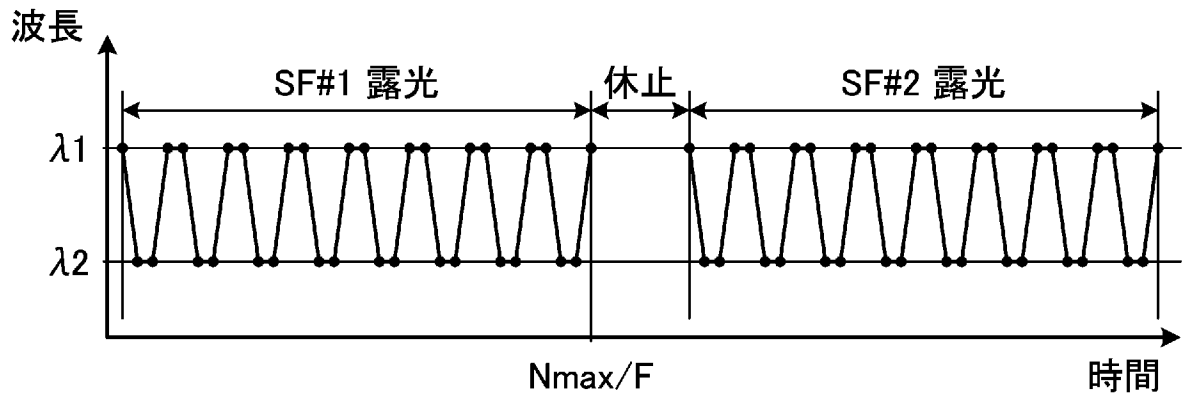
[図3]



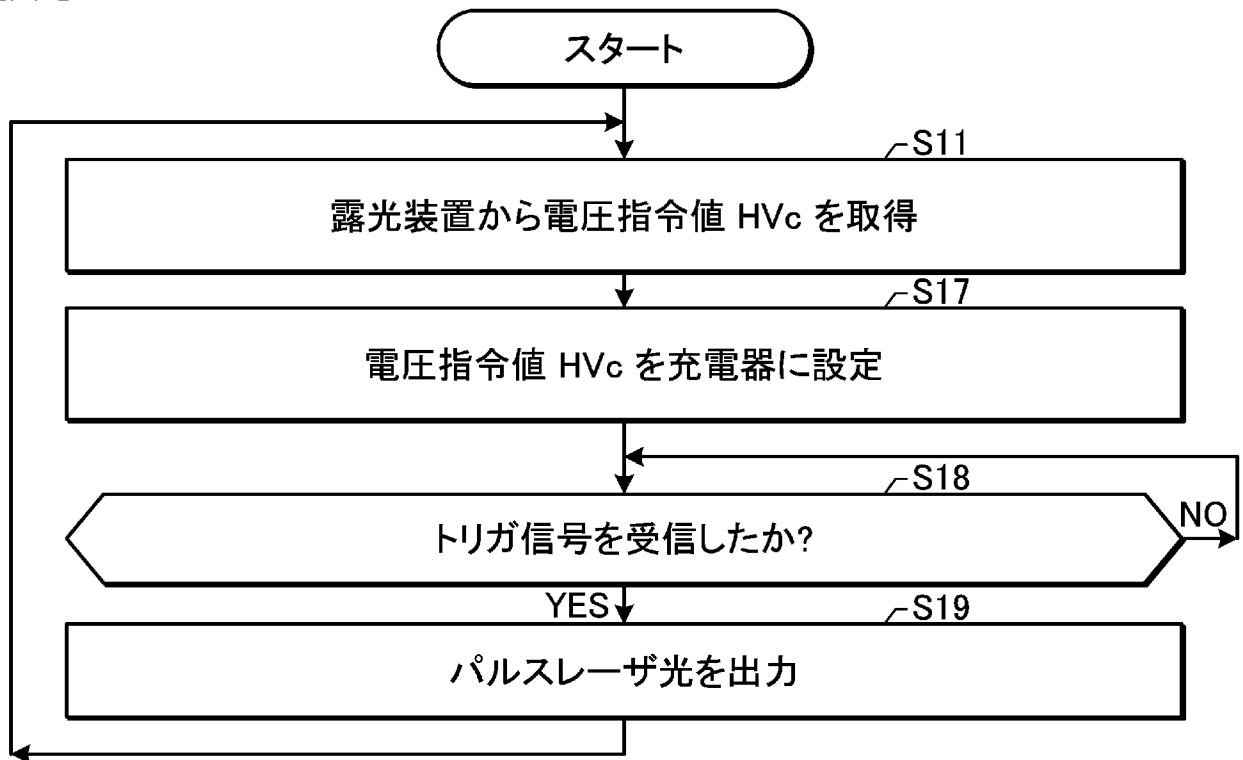
[図4]



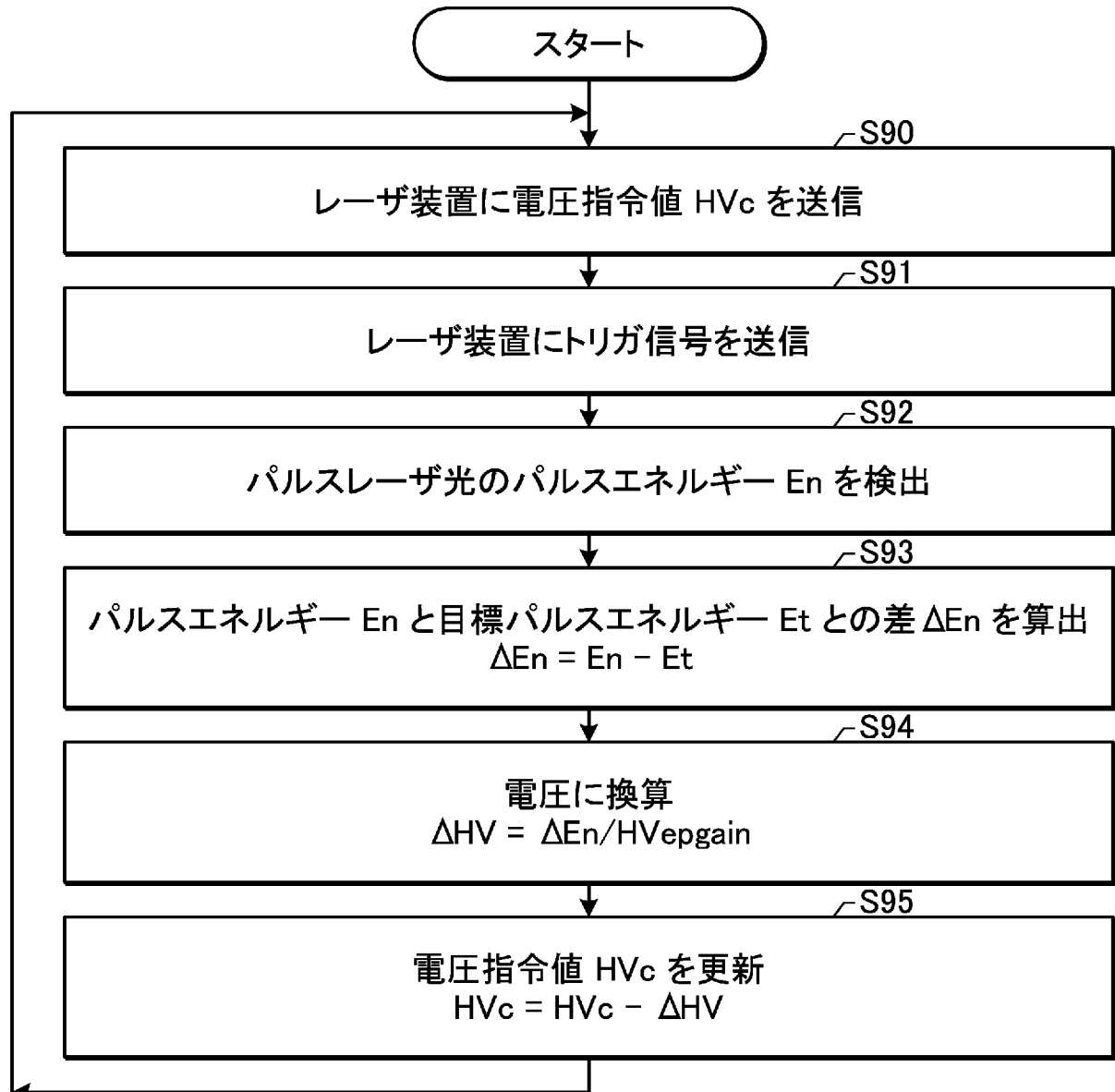
[図5]



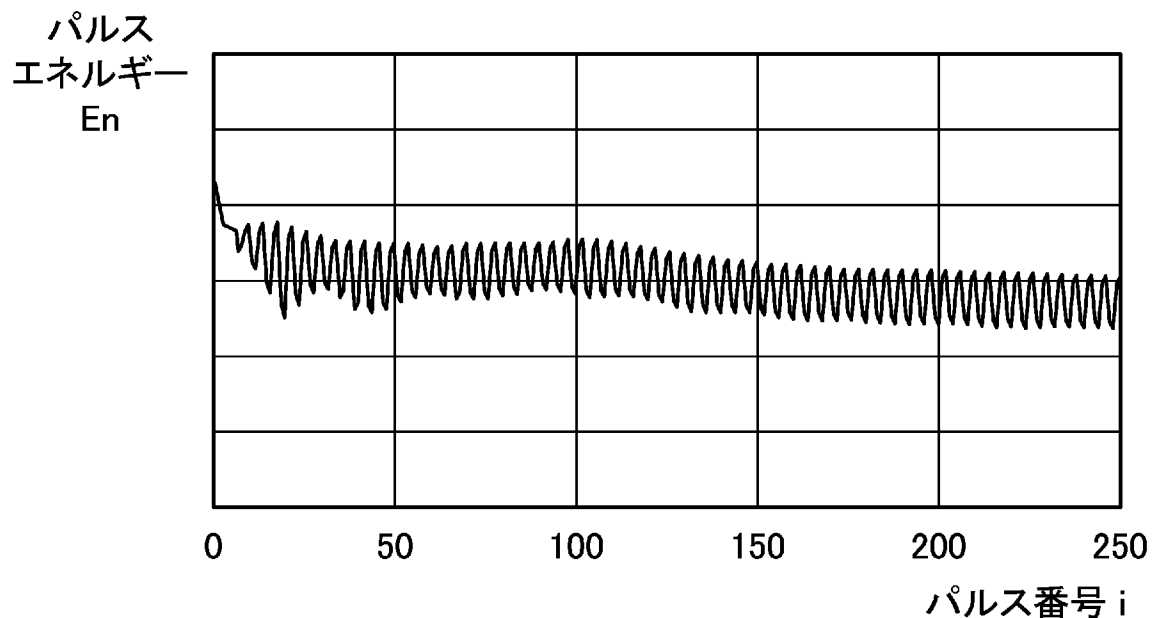
[図6]



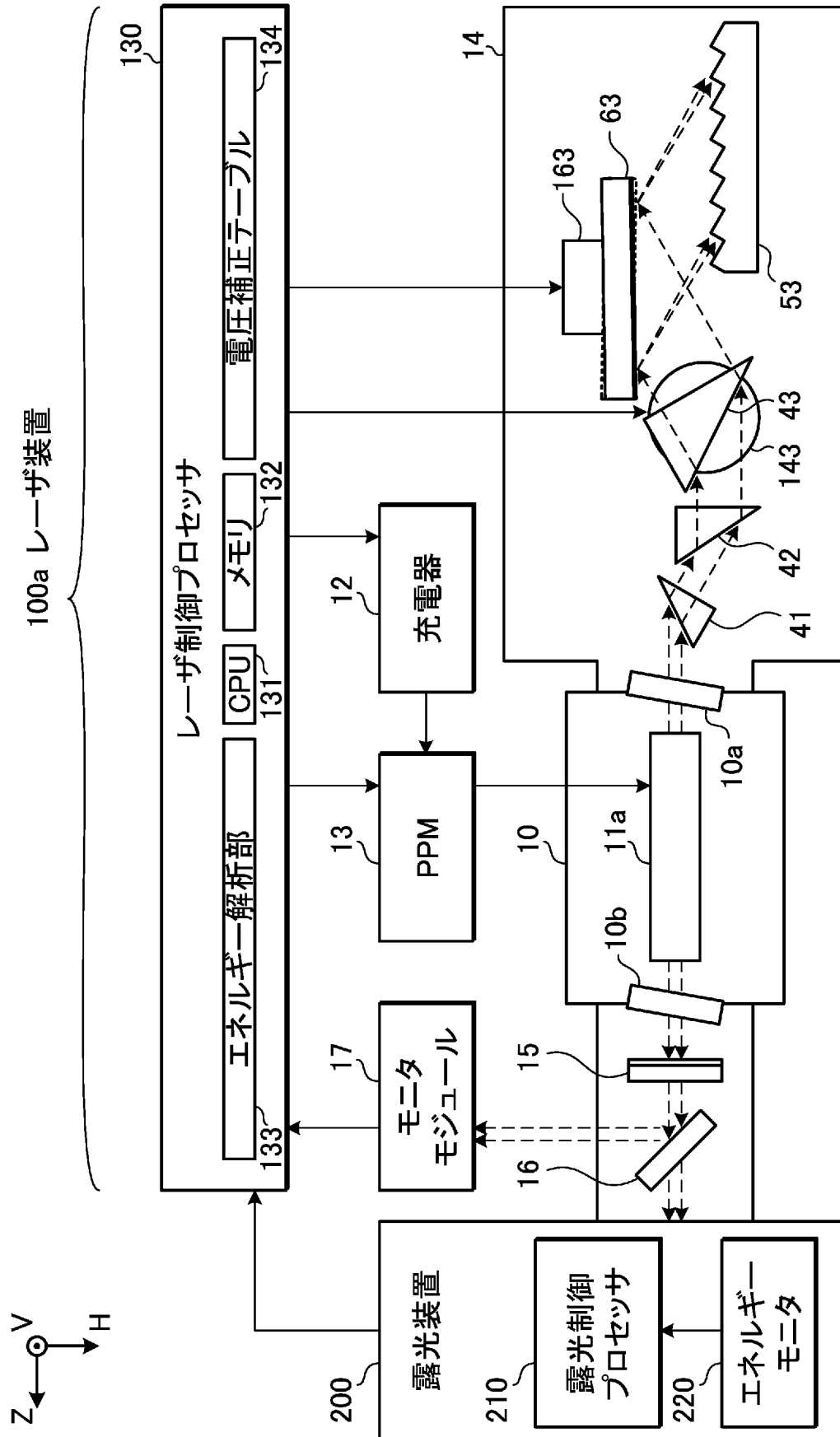
[図7]



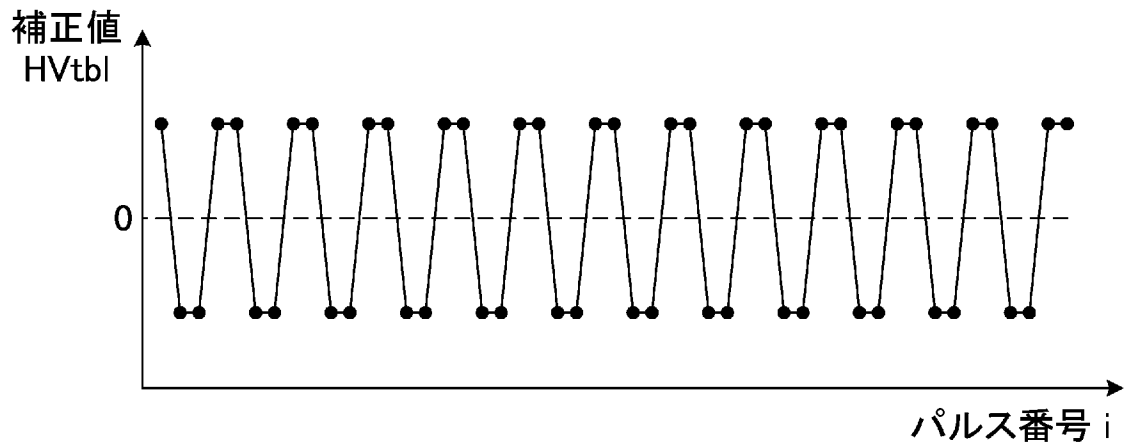
[図8]



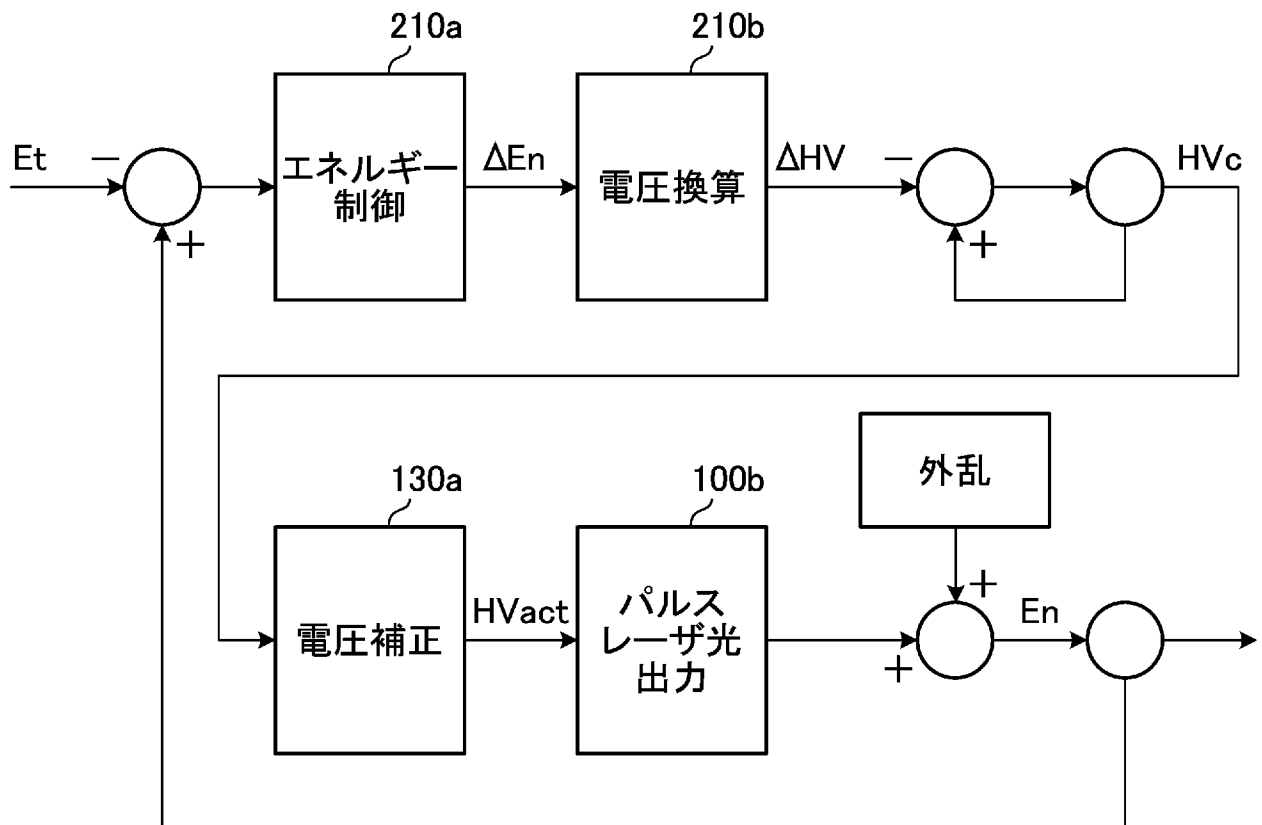
[図9]



[図10]



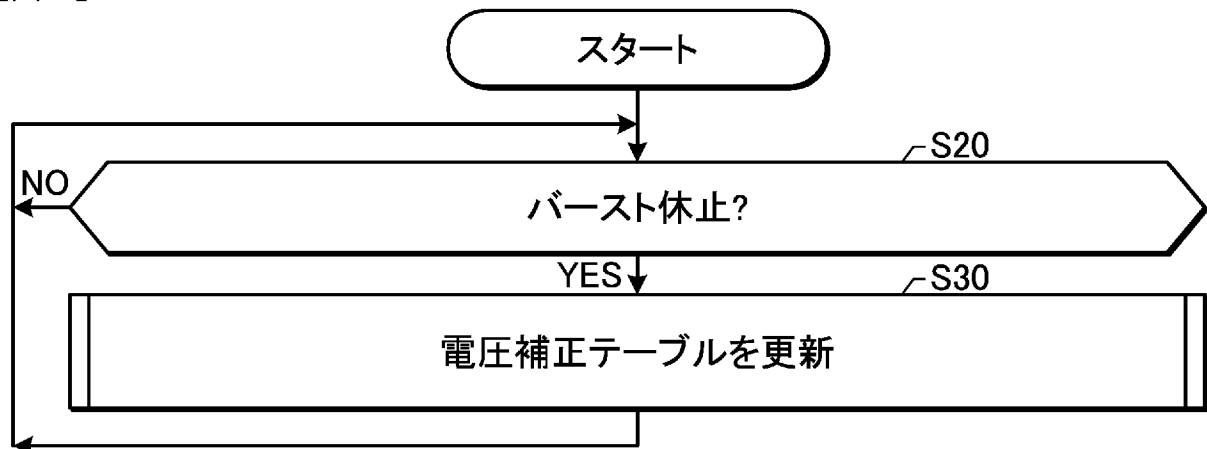
[図11]



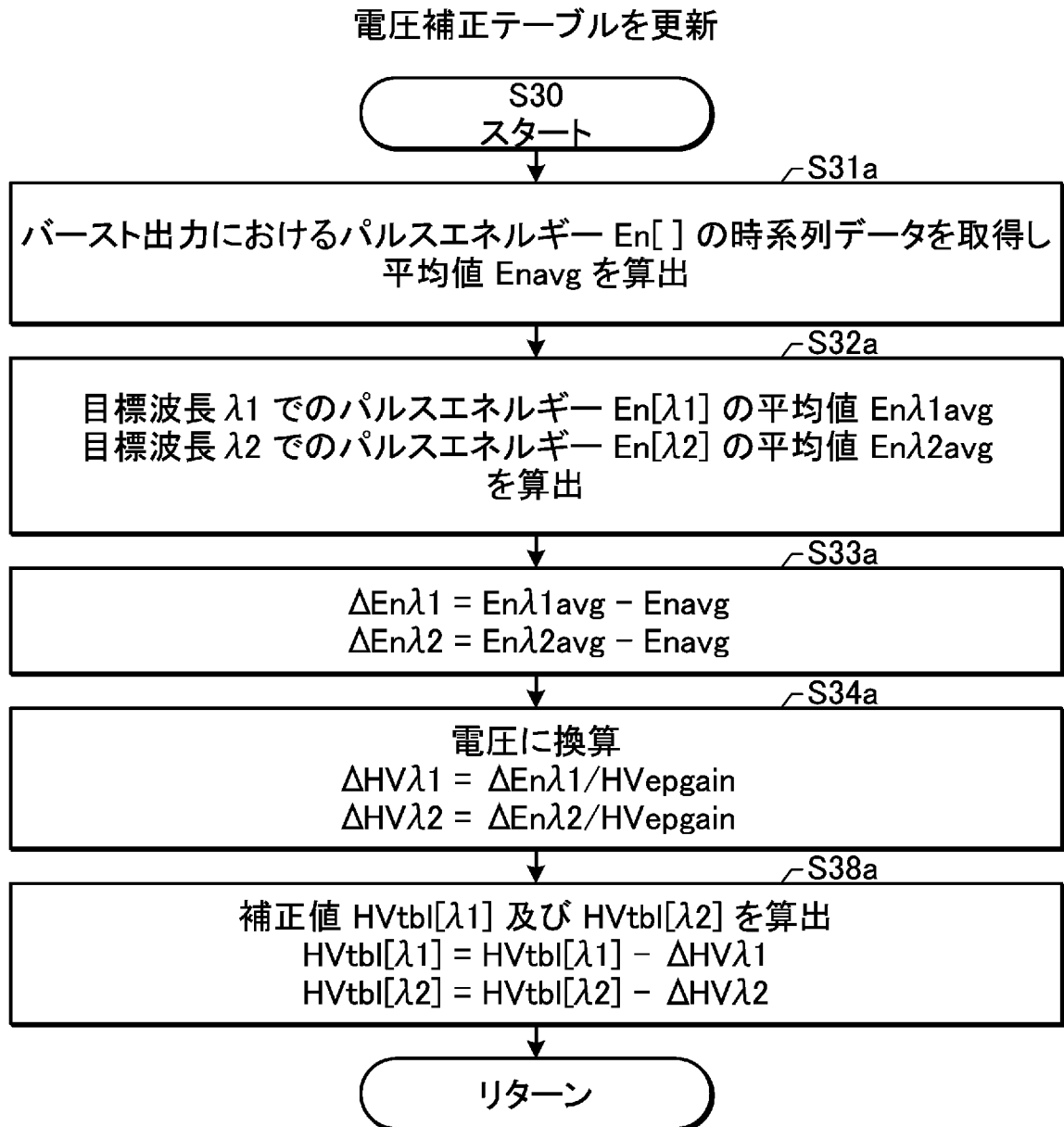
[図12]



[図13]

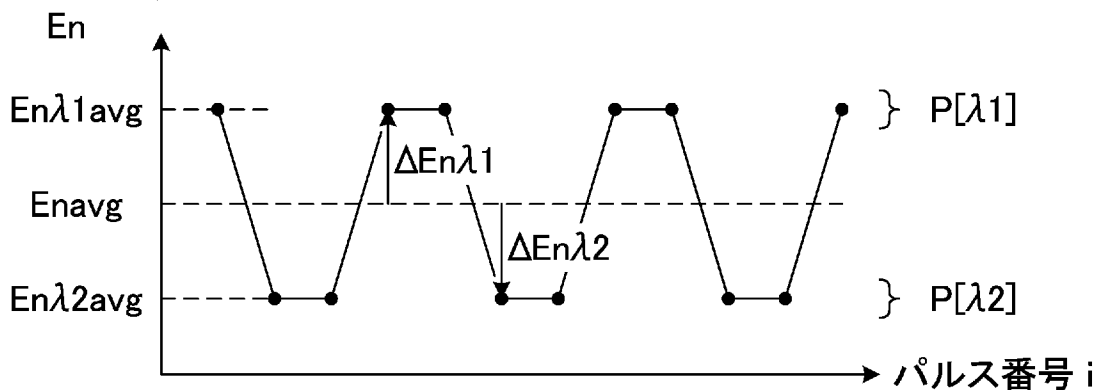


[図14]

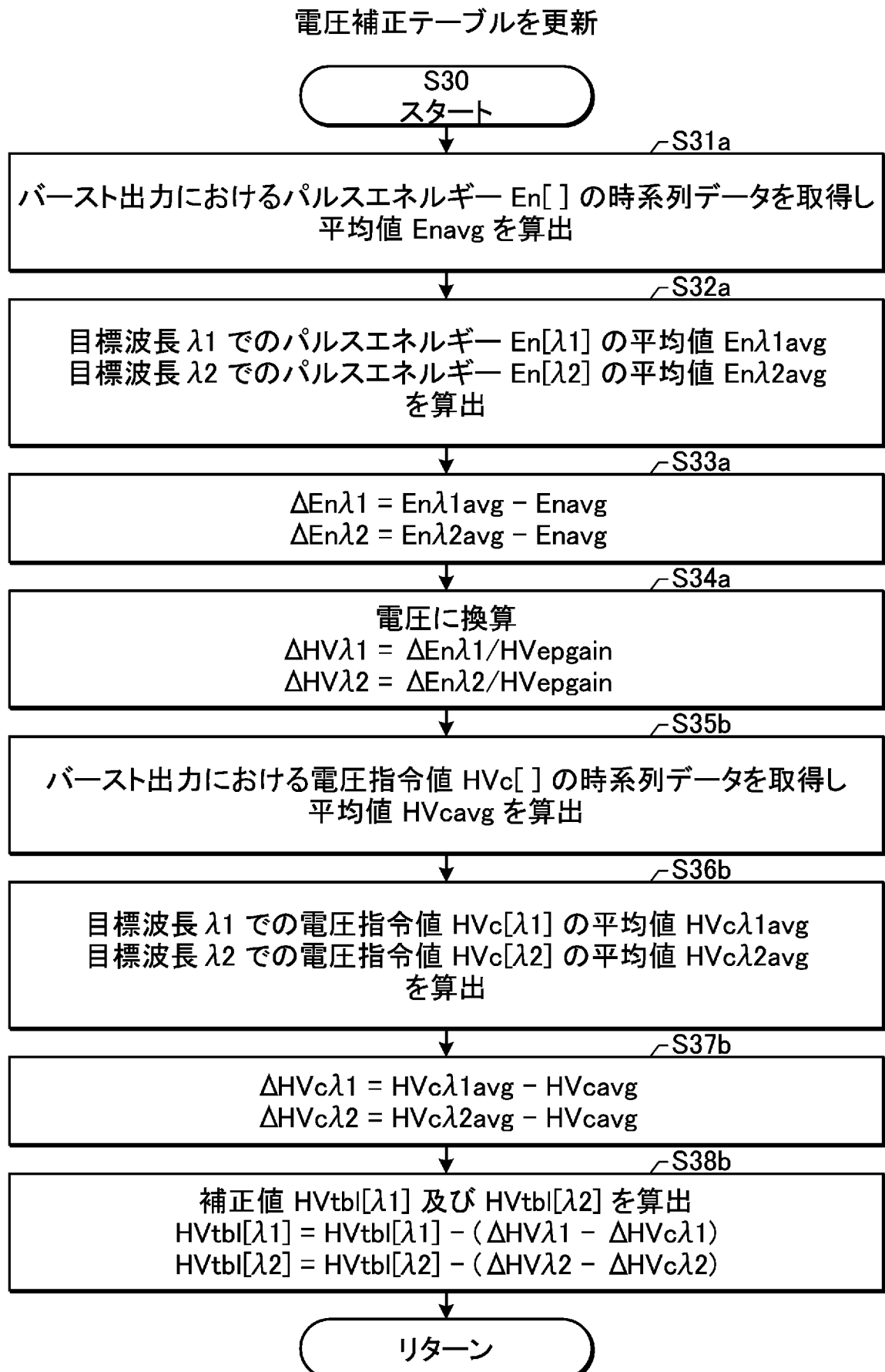


[図15]

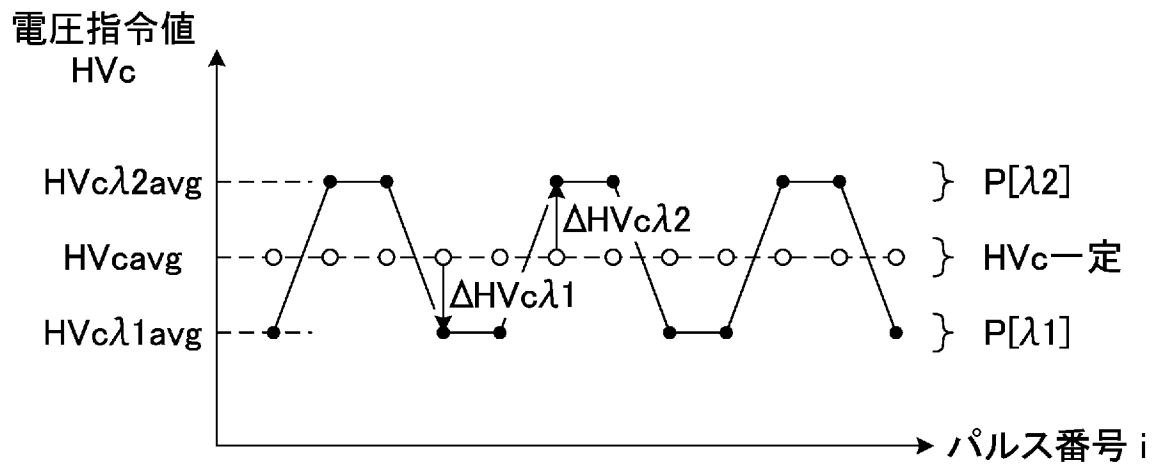
パルスエネルギー



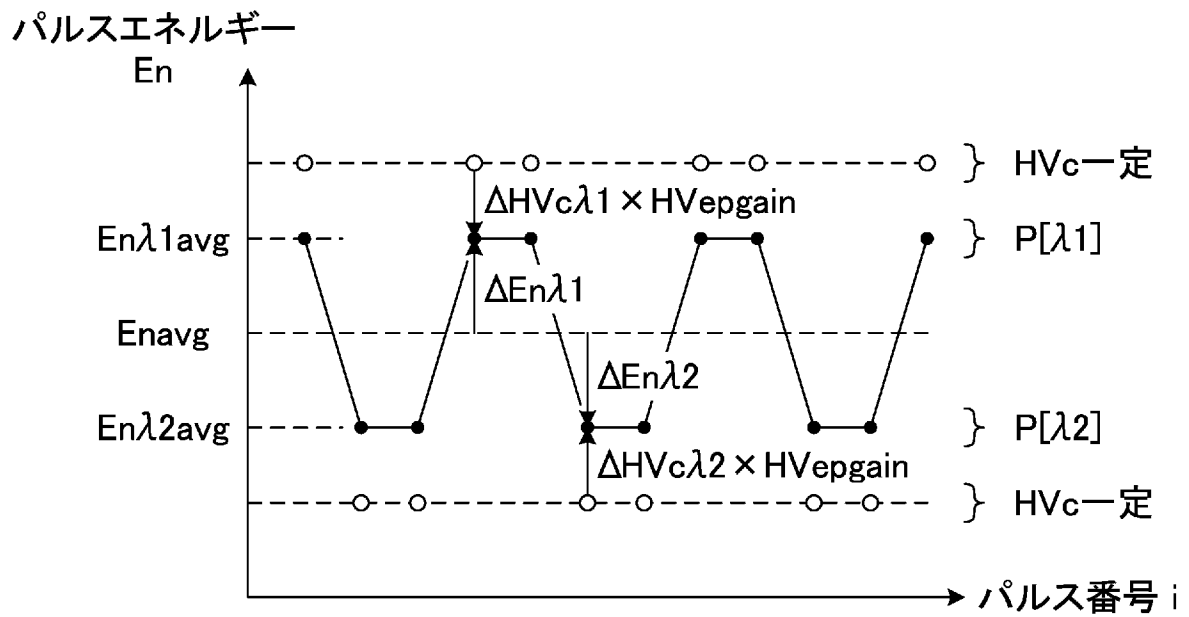
[図16]



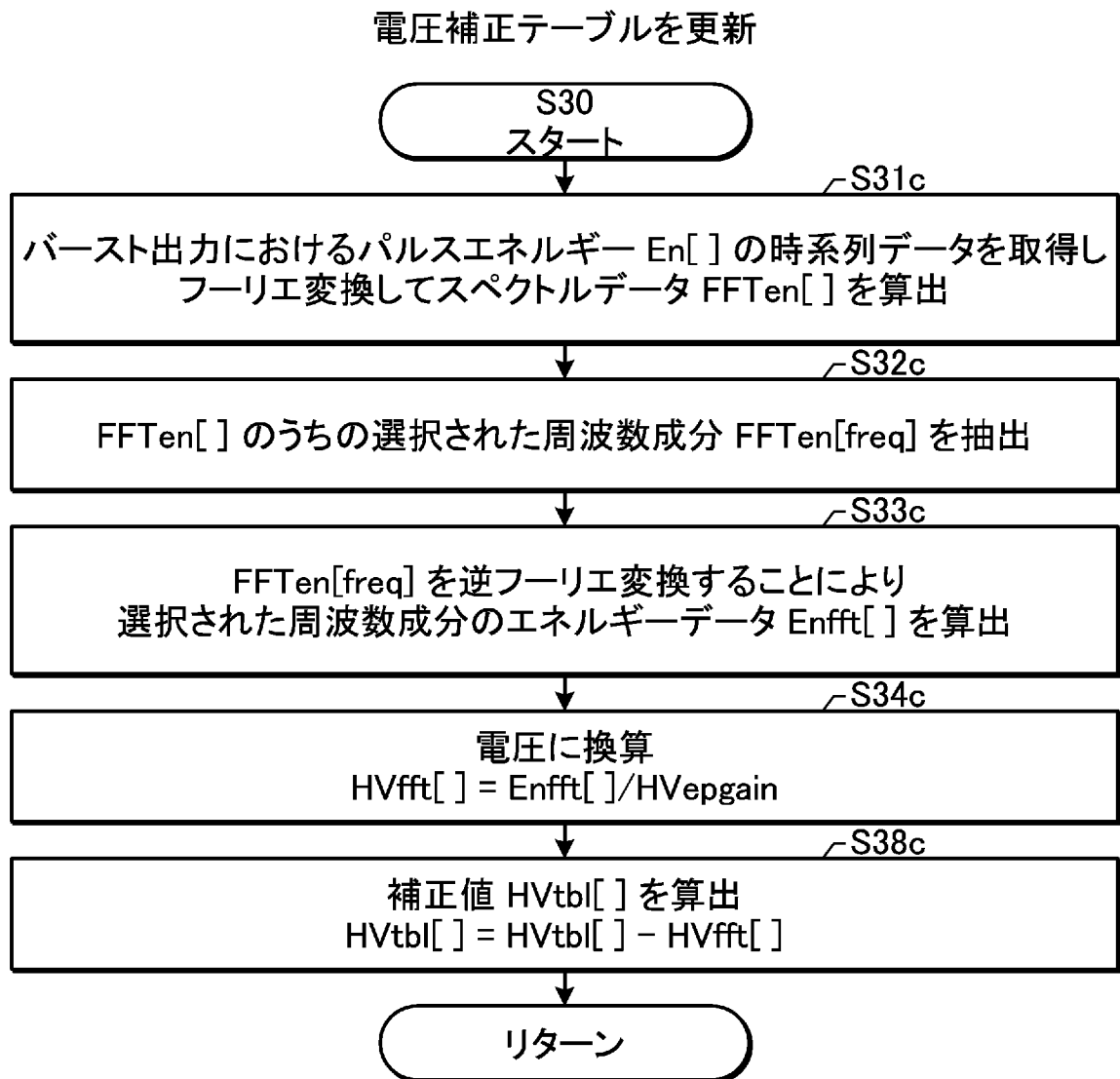
[図17]



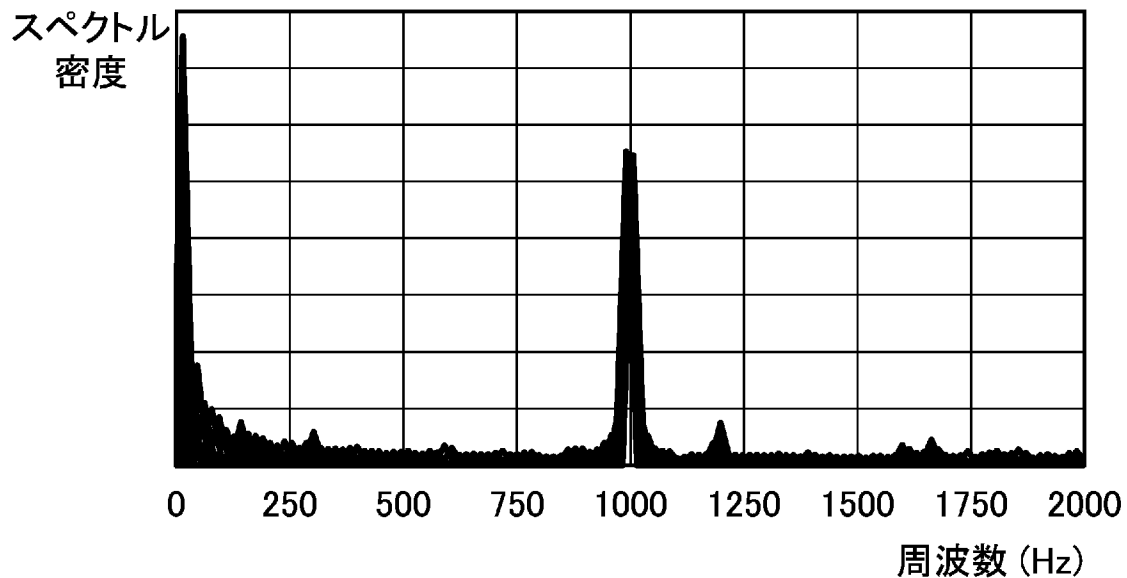
[図18]



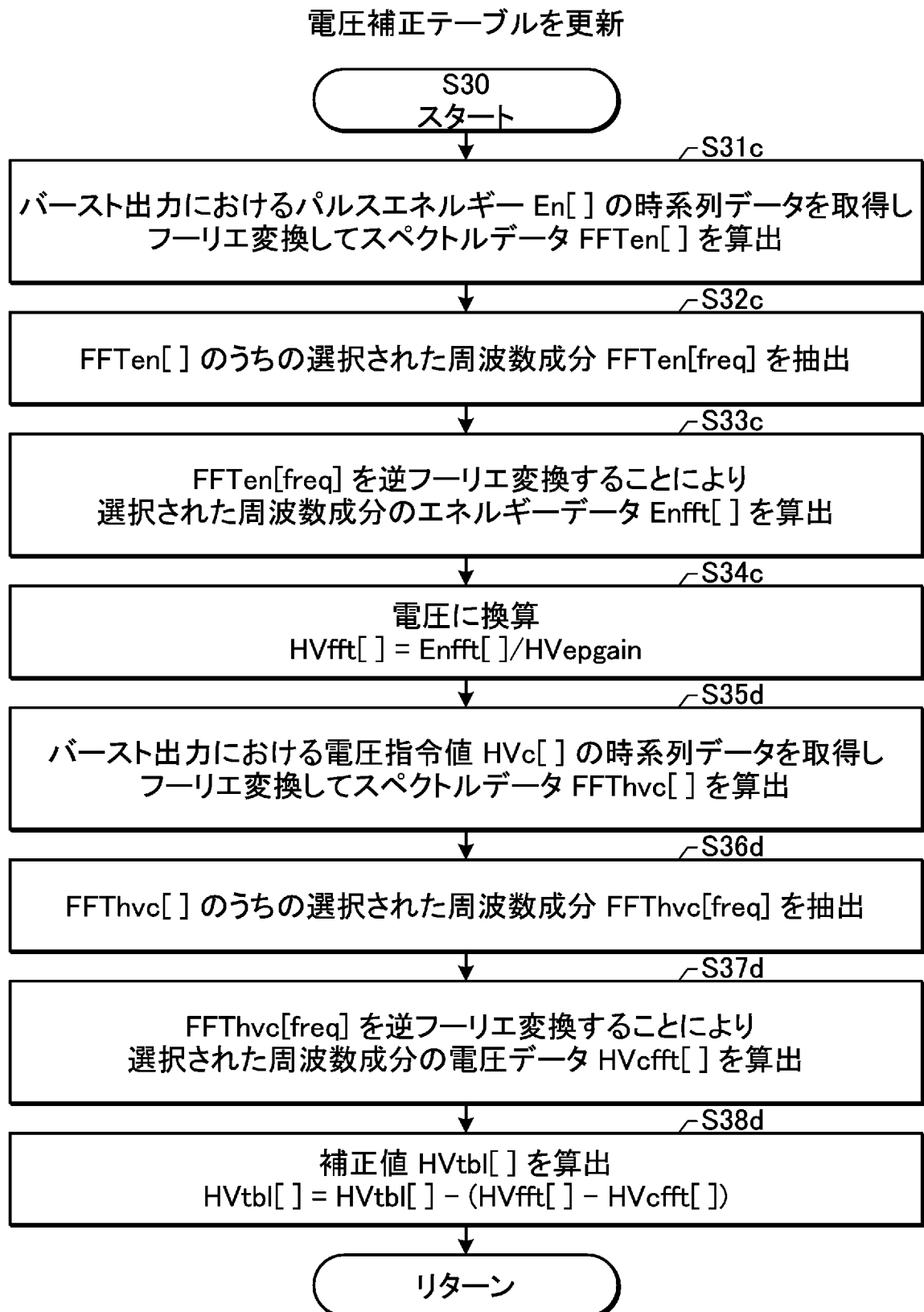
[図19]



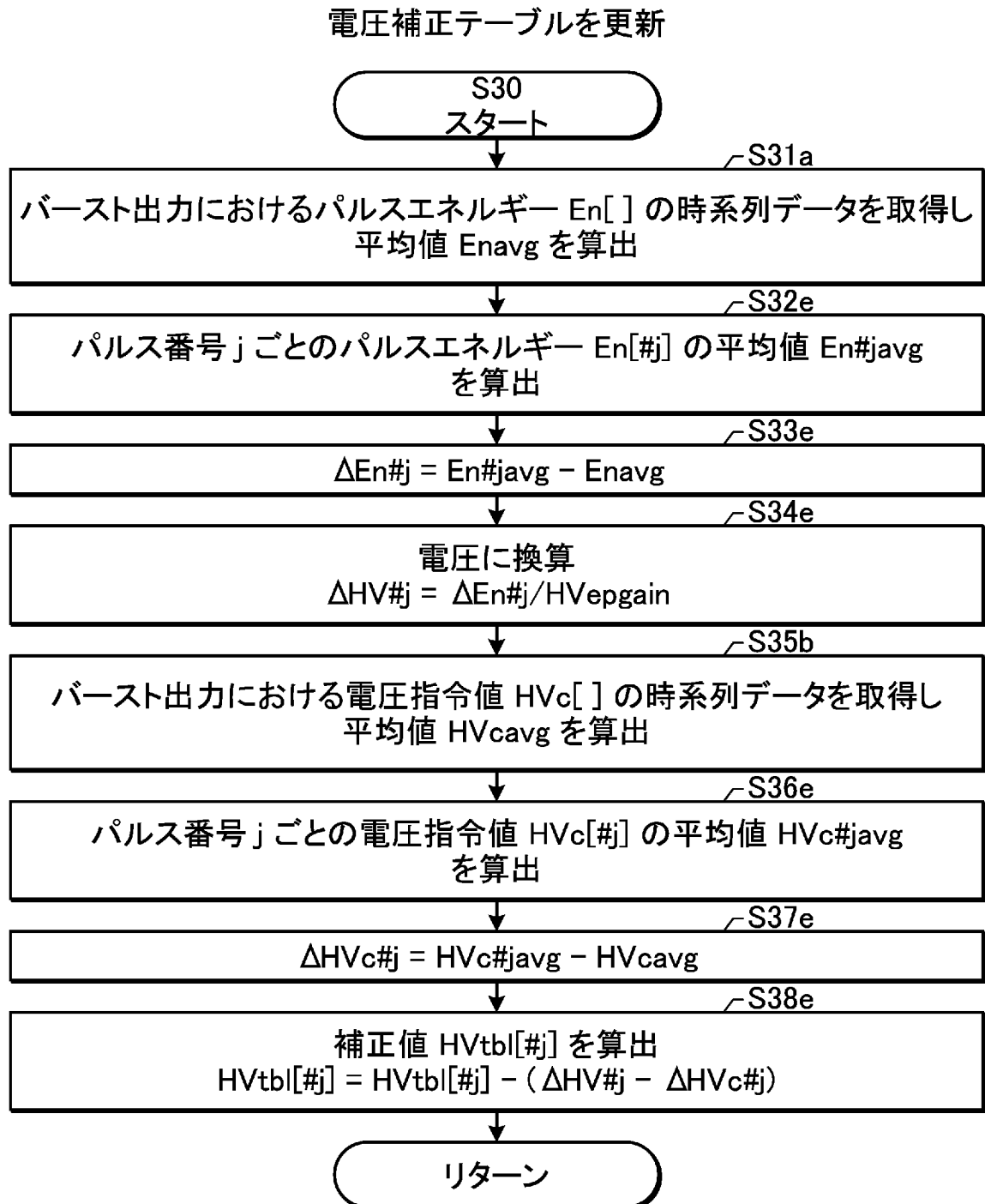
[図20]



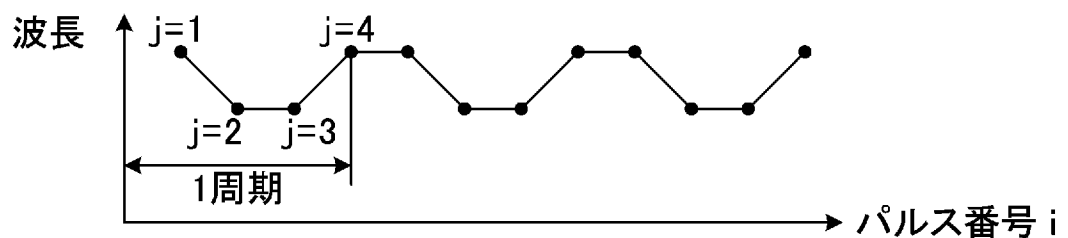
[図21]



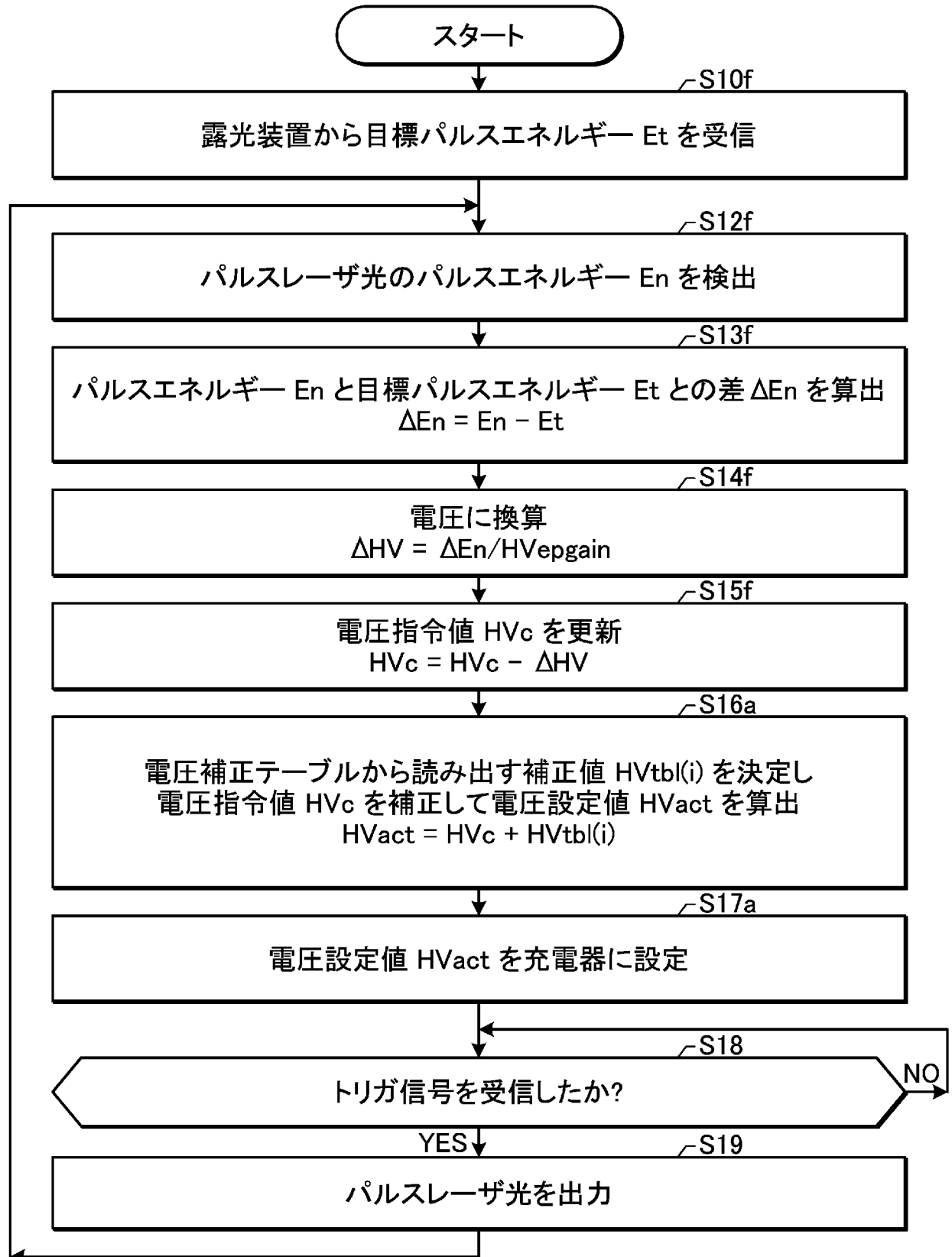
[図22]



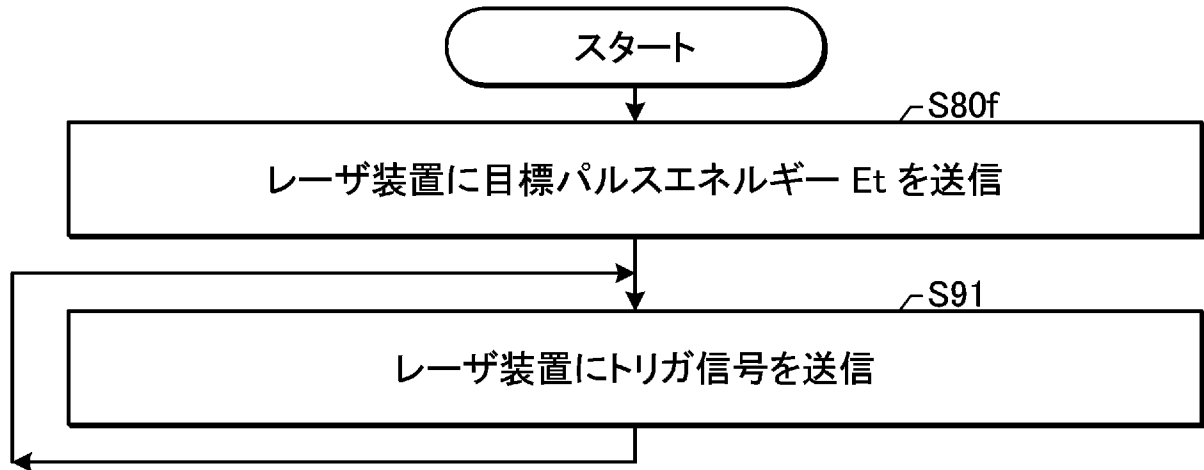
[図23]



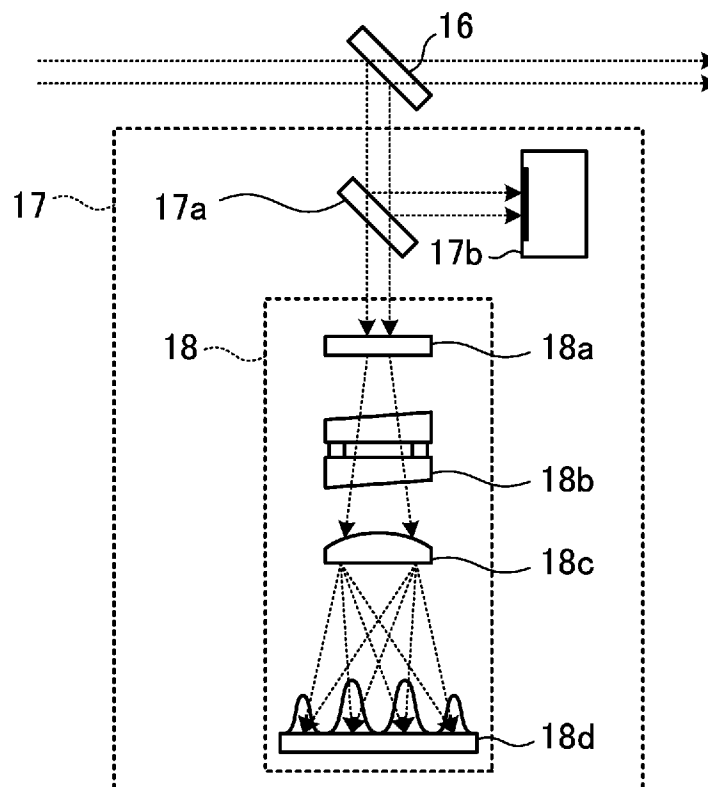
[図24]



[図25]



[図26]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/028219

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. H01S3/136(2006.01)i, G03F7/20(2006.01)i, H01S3/139(2006.01)i
FI: H01S3/136, H01S3/139, G03F7/20521

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)

Int.Cl. H01S3/136, G03F7/20, H01S3/139

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 1971-2021

Registered utility model specifications of Japan 1996-2021

Published registered utility model applications of Japan 1994-2021

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.
A	JP 2003-218437 A (GIGAPHOTON INC.) 31 July 2003 (2003-07-31), entire text, all drawings	1-20
A	JP 10-173274 A (KOMATSU LTD.) 26 June 1998 (1998-06-26), entire text, all drawings	1-20
A	JP 11-214782 A (KOMATSU LTD.) 06 August 1999 (1999-08-06), entire text, all drawings	1-20
A	JP 2014-078765 A (CYMER, INC.) 01 May 2014 (2014-05-01), entire text, all drawings	1-20

☒ 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

24 August 2021

Date of mailing of the international search report

07 September 2021

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/JP2021/028219

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2008-515230 A (CYMER, INC.) 08 May 2008 (2008-05-08), entire text, all drawings	1-20
A	WO 2020/157839 A1 (GIGAPHOTON INC.) 06 August 2020 (2020-08-06), entire text, all drawings	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2021/028219

JP 2003-218437 A	31 July 2003	(Family: none)
JP 10-173274 A	26 June 1998	(Family: none)
JP 11-214782 A	06 August 1999	(Family: none)
JP 2014-078765 A	01 May 2014	US 2009/0067457 A1 entire text, all drawings KR 10-2010-0067100 A TW 200922057 A
JP 2008-515230 A	08 May 2008	US 2006/0072636 A1 entire text, all drawings
WO 2020/157839 A1	06 August 2020	CN 113169510 A

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01S 3/136(2006.01)i; G03F 7/20(2006.01)i; H01S 3/139(2006.01)i FI: H01S3/136; H01S3/139; G03F7/20 521		
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）） H01S3/136; G03F7/20; H01S3/139		
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 1971-2021年 日本国実用新案登録公報 1996-2021年 日本国登録実用新案公報 1994-2021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
A	JP 2003-218437 A（ギガフォトン株式会社）31.07.2003（2003-07-31） 全文、全図	1-20
A	JP 10-173274 A（株式会社小松製作所）26.06.1998（1998-06-26） 全文、全図	1-20
A	JP 11-214782 A（株式会社小松製作所）06.08.1999（1999-08-06） 全文、全図	1-20
A	JP 2014-078765 A（サイマー インコーポレイテッド）01.05.2014（2014-05-01） 全文、全図	1-20
A	JP 2008-515230 A（サイマー インコーポレイテッド）08.05.2008（2008-05-08） 全文、全図	1-20
A	WO 2020/157839 A1（ギガフォトン株式会社）06.08.2020（2020-08-06） 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。		
* 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 24.08.2021		国際調査報告の発送日 07.09.2021
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

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/JP2021/028219

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	2003-218437	A	31.07.2003	(ファミリーなし)	
JP	10-173274	A	26.06.1998	(ファミリーなし)	
JP	11-214782	A	06.08.1999	(ファミリーなし)	
JP	2014-078765	A	01.05.2014	US 2009/0067457	A1
				全文, 全図	
				KR 10-2010-0067100	A
				TW 200922057	A
JP	2008-515230	A	08.05.2008	US 2006/0072636	A1
				全文, 全図	
WO	2020/157839	A1	06.08.2020	CN 113169510	A