(19)日本国特許庁(JP)

# (12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7675183号
(P7675183)

(45)発行日　令和7年5月12日(2025.5.12)

(24)登録日　令和7年4月30日(2025.4.30)

(51)国際特許分類

| | | FI | | |
|---|---|---|---|---|
| *H01S* | *3/10 (2006.01)* | H01S | 3/10 | |
| *H01S* | *3/134(2006.01)* | H01S | 3/134 | |
| *H01S* | *3/00 (2006.01)* | H01S | 3/00 | A |

請求項の数　12　（全19頁）

(21)出願番号　特願2023-528886(P2023-528886)
(86)(22)出願日　令和3年6月17日(2021.6.17)
(86)国際出願番号　PCT/JP2021/023067
(87)国際公開番号　WO2022/264367
(87)国際公開日　令和4年12月22日(2022.12.22)
審査請求日　令和6年5月7日(2024.5.7)

(73)特許権者　300073919
ギガフォトン株式会社
栃木県小山市大字横倉新田４００番地
(74)代理人　100083116
弁理士　松浦 憲三
(72)発明者　志賀 昂
栃木県小山市大字横倉新田４００番地
ギガフォトン株式会社内
審査官　佐藤 美紗子

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　レーザ装置、レーザ制御方法及び電子デバイスの製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

繰返し周波数に同期した第１の放電タイミングにおいてパルスレーザ光を出力するマスターオシレータと、

前記パルスレーザ光が通過するレーザ媒質を第２の放電タイミングにおいて充電電圧により励起することにより前記パルスレーザ光を増幅する増幅器と、

露光装置から指令される充電電圧指令値に基づき前記増幅器に前記充電電圧を指令し、前記第１の放電タイミングに対して遅延時間を追加することで前記第２の放電タイミングを設定するように構成されたプロセッサであって、前記プロセッサは前記繰返し周波数の変更に応じて、前記遅延時間を変更する処理と前記充電電圧指令値を補正する処理とを行うプロセッサと、

を備えるレーザ装置。

【請求項２】

請求項１に記載のレーザ装置であって、

前記プロセッサは、前記繰返し周波数と、前記遅延時間と、前記充電電圧指令値の補正に用いる補正係数とを対応させたテーブルを用いて、前記遅延時間を変更する処理と前記充電電圧指令値を補正する処理とを行う、

レーザ装置。

【請求項３】

請求項１に記載のレーザ装置であって、

前記プロセッサは、前記繰返し周波数と、前記遅延時間の変更量と、前記充電電圧指令値の補正に用いる補正係数とを対応させたテーブルを記憶し、
前記繰返し周波数の変更に応じて前記テーブルに基づいて前記変更量と前記補正係数とを決定し、
前記決定した前記補正係数と前記充電電圧指令値とから充電電圧補正値を計算し、
前記充電電圧補正値を前記増幅器の前記充電電圧を指令する指令値として出力する、
レーザ装置。
【請求項４】
請求項３に記載のレーザ装置であって、
前記補正係数は、前記充電電圧指令値に乗算する第１の補正係数と、前記充電電圧指令値と前記第１の補正係数との積に加算する第２の補正係数と、を含む、
レーザ装置。
【請求項５】
請求項１に記載のレーザ装置であって、
前記充電電圧指令値を補正する処理には、第１の補正係数と第２の補正係数とが用いられ、
前記第１の補正係数と前記第２の補正係数とのそれぞれは、前記遅延時間の変更量の関数であり、
前記変更量をΔＤ、前記第１の補正係数をＡ（ΔＤ）、前記第２の補正係数をＢ（ΔＤ）、前記露光装置から指令される前記充電電圧指令値をＨＶｃｍｄ、前記補正により得られる充電電圧補正値をＨＶｃｍｐとすると、
前記プロセッサは、次式、
ＨＶｃｍｐ＝Ａ（ΔＤ）＊ＨＶｃｍｄ＋Ｂ（ΔＤ）
により、前記充電電圧指令値を補正して前記充電電圧補正値を決定する、
レーザ装置。
【請求項６】
請求項５に記載のレーザ装置であって、
前記増幅器から出力される出力レーザ光のパルスエネルギが前記充電電圧を指令する指令値に対する一次関数で近似されるときの前記一次関数の傾きをゲイン、切片をオフセットという場合に、
前記繰返し周波数が第１の繰返し周波数であるときの前記遅延時間が第１の遅延時間に設定され、
前記第１の遅延時間における前記ゲインと前記オフセットとをそれぞれα０、β０とし、前記繰返し周波数が前記第１の繰返し周波数から第２の繰返し周波数に変更される場合の前記変更量をΔＤとして、前記変更量の関数である前記ゲインと前記オフセットとをそれぞれα（ΔＤ）、β（ΔＤ）とする場合に、
前記第１の補正係数と前記第２の補正係数とのそれぞれは、次式、
Ａ（ΔＤ）＝α０／α（ΔＤ）
Ｂ（ΔＤ）＝（β０－β（ΔＤ））／α（ΔＤ）
に基づいて決定される、
レーザ装置。
【請求項７】
請求項１に記載のレーザ装置であって、
前記プロセッサは、前記充電電圧を前記マスターオシレータにも指令する、
レーザ装置。
【請求項８】
請求項１に記載のレーザ装置であって、
前記プロセッサは、前記繰返し周波数の変更によって生じるスペクトル幅の変動を抑制するように前記遅延時間を変更すると共に、前記遅延時間の変更に伴うパルスエネルギの変動を抑制するように前記充電電圧指令値を補正する、

レーザ装置。
【請求項９】
請求項１に記載のレーザ装置であって、
前記増幅器から出力される出力レーザ光のパルスエネルギを計測するパルスエネルギ計測器をさらに備え、
前記プロセッサは、
前記パルスエネルギ計測器を用いて計測される前記パルスエネルギが目標範囲内となるように、前記パルスエネルギ計測器の計測結果に基づいて前記充電電圧を指令する、
レーザ装置。
【請求項１０】
請求項１に記載のレーザ装置であって、
前記増幅器は、前記レーザ媒質としてのレアガスとハロゲンガスとバッファガスとを含むエキシマレーザガスが収容されるチャンバを備える、
レーザ装置。
【請求項１１】
レーザ制御方法であって、
繰返し周波数に同期した第１の放電タイミングでマスターオシレータからパルスレーザ光を出力させることと、
前記パルスレーザ光が通過する増幅器のレーザ媒質を、前記第１の放電タイミングに対して遅延時間を追加した第２の放電タイミングで充電電圧により励起して前記パルスレーザ光を増幅させることと、
露光装置から指令される充電電圧指令値に基づき、前記増幅器に前記充電電圧を指令することと、
前記繰返し周波数の変更に応じて、前記遅延時間を変更する処理と前記充電電圧指令値を補正する処理とを行うことと、を含む、
レーザ制御方法。
【請求項１２】
電子デバイスの製造方法であって、
繰返し周波数に同期した第１の放電タイミングにおいてパルスレーザ光を出力するマスターオシレータと、
前記パルスレーザ光が通過するレーザ媒質を第２の放電タイミングにおいて充電電圧により励起することにより前記パルスレーザ光を増幅する増幅器と、
露光装置から指令される充電電圧指令値に基づき前記増幅器に前記充電電圧を指令し、前記第１の放電タイミングに対して遅延時間を追加することで前記第２の放電タイミングを設定するよう構成されたプロセッサであって、前記プロセッサは前記繰返し周波数の変更に応じて、前記遅延時間を変更する処理と前記充電電圧指令値を補正する処理とを行うプロセッサと、
を備えるレーザ装置によってレーザ光を生成し、
前記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に前記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。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本開示は、レーザ装置、レーザ制御方法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、並びに波長約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す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 Narrow 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ガスレーザ装置という。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００４】

【文献】米国特許第７７５６１７１号

【文献】米国特許出願公開第２０１８／０３０９２５９号

【概要】

【０００５】

本開示の１つの観点に係るレーザ装置は、繰返し周波数に同期した第１の放電タイミングにおいてパルスレーザ光を出力するマスターオシレータと、パルスレーザ光が通過するレーザ媒質を第２の放電タイミングにおいて充電電圧により励起することによりパルスレーザ光を増幅する増幅器と、露光装置から指令される充電電圧指令値に基づき増幅器に充電電圧を指令し、第１の放電タイミングに対して遅延時間を追加することで第２の放電タイミングを設定するよう構成されたプロセッサであって、プロセッサは繰返し周波数の変更に応じて、遅延時間を変更する処理と充電電圧指令値を補正する処理とを行うプロセッサと、を備える。

【０００６】

本開示の他の１つの観点に係るレーザ制御方法は、繰返し周波数に同期した第１の放電タイミングでマスターオシレータからパルスレーザ光を出力させることと、パルスレーザ光が通過する増幅器のレーザ媒質を、第１の放電タイミングに対して遅延時間を追加した第２の放電タイミングで充電電圧により励起してパルスレーザ光を増幅させることと、露光装置から指令される充電電圧指令値に基づき、増幅器に充電電圧を指令することと、繰返し周波数の変更に応じて、遅延時間を変更する処理と充電電圧指令値を補正する処理とを行うことと、を含む。

【０００７】

本開示の他の１つの観点に係る電子デバイスの製造方法は、繰返し周波数に同期した第１の放電タイミングにおいてパルスレーザ光を出力するマスターオシレータと、パルスレーザ光が通過するレーザ媒質を第２の放電タイミングにおいて充電電圧により励起することによりパルスレーザ光を増幅する増幅器と、露光装置から指令される充電電圧指令値に基づき増幅器に充電電圧を指令し、第１の放電タイミングに対して遅延時間を追加することで第２の放電タイミングを設定するよう構成されたプロセッサであって、プロセッサは繰返し周波数の変更に応じて、遅延時間を変更する処理と充電電圧指令値を補正する処理とを行うプロセッサと、を備えるレーザ装置によってレーザ光を生成し、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にレーザ光を露光することを含む。

【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、レーザ装置の構成例を概略的に示す。
【図２】図２は、繰返し周波数とスペクトル幅との関係を示すグラフの例である。
【図３】図３は、ＭＯ（Master Oscillator）放電タイミングとＰＯ（Power Oscillator）放電タイミングとの間の遅延時間と、スペクトル幅及びパルスエネルギとの関係を示すグラフの例である。
【図４】図４は、繰返し周波数と遅延時間変更量との対応関係を定めたテーブルの例である。
【図５】図５は、ＭＯ充電電圧及び／又はＰＯ充電電圧とパルスエネルギとの関係を示すグラフの例であり、一次関数近似から定まるＨＶゲイン及びオフセットの例を示す。
【図６】図６は、比較例１の制御が適用された場合のレーザ動作を示すグラフの例である。
【図７】図７は、図３に示す特性を用いたスペクトル幅変動抑制の制御を含む比較例２の制御が適用された場合のレーザ動作を示すグラフの例である。
【図８】図８は、ＭＯ充電電圧及び／又はＰＯ充電電圧とパルスエネルギとの関係を示すグラフの例であり、遅延時間の変更による特性変化の例を示す。
【図９】図９は、ＭＯ充電電圧及び／又はＰＯ充電電圧とパルスエネルギとの関係を示すグラフの例であり、遅延時間の変更に伴いＨＶゲイン及びオフセットが変化する例を示す。
【図１０】図１０は、実施形態１に係るレーザ装置の構成例を概略的に示す。
【図１１】図１１は、繰返し周波数と、遅延時間変更量と、ＨＶ補正係数との対応関係を定めたテーブルの例である。
【図１２】図１２は、実施形態１に係るレーザ装置におけるＰＯ充電電圧の制御例を示すフローチャートである。
【図１３】図１３は、実施形態２に係るレーザ装置の構成例を概略的に示す。
【図１４】図１４は、露光装置の構成例を概略的に示す。
【実施形態】
【０００９】
－目次－
１．レーザ装置の概要
１．１　構成
１．２　動作
１．３　狭帯域化レーザの特性
２．課題
３．実施形態１
３．１　構成
３．２　動作
３．３　作用・効果
４．実施形態２
４．１　構成
４．２　動作
４．３　作用・効果
５．他の応用例
６．電子デバイスの製造方法について
７．その他
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．レーザ装置の概要

１．１　構成

図１は、レーザ装置１の構成例を概略的に示す。レーザ装置１は、マスターオシレータ（ＭＯ）１０と、パワーオシレータ（ＰＯ）２０と、レーザ制御部３０と、エネルギ制御部３２とを含むエキシマレーザ装置である。レーザ装置１は、高反射ミラー４１、４２と、ビーム計測器５０と、波長制御部６０と、波長調節部６２とを含んでもよい。

【００１１】

マスターオシレータ１０は、狭帯域化モジュール（ＬＮＭ）１２と、ＭＯチャンバ１３と、ＭＯ出力結合ミラー１４と、ＭＯパルスパワーモジュール（ＰＰＭ）１５と、ＭＯ充電器１６とを含む。ＬＮＭ１２は、スペクトル幅を狭帯域化するためのプリズム１２２と、グレーティング１２４とを含む。グレーティング１２４は入射角度と回折角度とが一致するようにリトロー配置される。

【００１２】

ＭＯ出力結合ミラー１４は、例えば、反射率が２０％～３０％の部分反射ミラーであってよい。ＭＯ出力結合ミラー１４は、ＬＮＭ１２と共に光共振器を構成するように配置される。

【００１３】

ＭＯチャンバ１３は、光共振器の光路上に配置される。ＭＯチャンバ１３は、１対の放電電極１３２、１３３と、レーザ光が透過する２枚のウインドウ１３４、１３６とを含む。ＭＯチャンバ１３内には、不図示のガス供給装置からレーザガスが供給される。レーザガスは、レアガスと、ハロゲンガスと、バッファガスとを含むエキシマレーザガスである。レアガスは、例えばアルゴン（Ａｒ）又はクリプトン（Ｋｒ）ガスであってよい。ハロゲンガスは、例えばフッ素（$Ｆ_2$）ガスであってよい。バッファガスは、例えばネオン（Ｎｅ）ガスであってよい。

【００１４】

ＭＯパルスパワーモジュール１５は、スイッチ１５２と、不図示の充電コンデンサとを含み、不図示の電気絶縁部材のフィードスルーを介して放電電極１３２と接続される。放電電極１３３は、接地されたＭＯチャンバ１３と接続される。ＭＯ充電器１６は、エネルギ制御部３２からの指令に従い、ＭＯパルスパワーモジュール１５の充電コンデンサを充電する。

【００１５】

マスターオシレータ１０は、ビームスプリッタ１７と、ＭＯパルスエネルギ計測器１８とを含む。ビームスプリッタ１７は、ＭＯ出力結合ミラー１４から出力されるレーザ光の光路上に配置される。ビームスプリッタ１７は、ビームスプリッタ１７の反射光がＭＯパルスエネルギ計測器１８に入射するように配置される。ＭＯパルスエネルギ計測器１８は、不図示の集光レンズと光センサとを含む。光センサは、紫外光に耐性がある高速応答のフォトダイオードであってよい。ＭＯパルスエネルギ計測器１８とエネルギ制御部３２との間には、ＭＯパルスエネルギ計測器１８で得られた情報をエネルギ制御部３２に伝送する信号ラインが設けられている。

【００１６】

ビームスプリッタ１７を透過したパルスレーザ光は、マスターオシレータ１０から出力される。

【００１７】

高反射ミラー４１及び高反射ミラー４２は、マスターオシレータ１０から出力されたレーザ光がパワーオシレータ２０に入射するように、マスターオシレータ１０とパワーオシレータ２０との間の光路上に配置される。

【００１８】

パワーオシレータ２０は、リアミラー２２と、ＰＯチャンバ２３と、ＰＯ出力結合ミラー２４と、ＰＯパルスパワーモジュール２５と、ＰＯ充電器２６と、モニタモジュール２７とを含むエキシマ増幅器である。

【００１９】

リアミラー２２とＰＯ出力結合ミラー２４とにより光共振器が構成され、この光共振器の光路上にＰＯチャンバ２３が配置される。

【００２０】

ＰＯチャンバ２３の構成は、ＭＯチャンバ１３と同様であってよい。ＰＯチャンバ２３は、１対の放電電極２３２、２３３と、２枚のウインドウ２３４、２３６とを含む。ＰＯチャンバ２３内には、ＭＯチャンバ１３と同様にレーザガスが供給される。リアミラー２２は、例えば、反射率８０％～９０％の部分反射ミラーであってよい。ＰＯ出力結合ミラー２４は、例えば、反射率２０％～３０％の部分反射ミラーであってよい。

【００２１】

ＰＯパルスパワーモジュール２５は、スイッチ２５２と、不図示の充電コンデンサとを含み、不図示の電気絶縁部材のフィードスルーを介して放電電極２３２と接続される。放電電極２３３は、接地されたＰＯチャンバ２３と接続される。ＰＯ充電器２６は、エネルギ制御部３２からの指令に従い、ＰＯパルスパワーモジュール２５の充電コンデンサを充電する。

【００２２】

図１において、パワーオシレータ２０から出力されるレーザ光の光路軸方向はｚ方向である。ｚ方向に略直交する２つの方向は、ｈ方向とｖ方向とであってもよい。ｖ方向は図１の紙面に略直交する方向である。放電電極２３２、２３３はｈ方向に対向して配置される。

【００２３】

モニタモジュール２７は、ビームスプリッタ２７１、２７２と、ＰＯパルスエネルギ計測器２７４と、スペクトル計測器２７６とを含む。

【００２４】

ビームスプリッタ２７１は、ＰＯ出力結合ミラー２４から出力されるパルスレーザ光の光路上に配置される。ビームスプリッタ２７２は、ビームスプリッタ２７１で反射されたパルスレーザ光の光路上に配置される。ビームスプリッタ２７２は、ビームスプリッタ２７２の反射光がＰＯパルスエネルギ計測器２７４に入射し、ビームスプリッタ２７２の透過光がスペクトル計測器２７６に入射するように配置される。ＰＯパルスエネルギ計測器２７４の構成は、ＭＯパルスエネルギ計測器１８と同様であってよい。

【００２５】

ＰＯパルスエネルギ計測器２７４とエネルギ制御部３２との間には、ＰＯパルスエネルギ計測器２７４で得られた情報をエネルギ制御部３２に伝送する信号ラインが設けられている。

【００２６】

スペクトル計測器２７６は、例えば、不図示のエタロンと、集光レンズと、イメージセンサとを含むエタロン分光器であってよい。エタロンを透過して集光レンズにより焦点面上に生成された干渉縞はイメージセンサを用いて計測される。スペクトル計測器２７６と波長制御部６０との間には、スペクトル計測器２７６で得られた情報を波長制御部６０に伝送する信号ラインが設けられている。

【００２７】

ビーム計測器５０は、ビームスプリッタ５１と、偏光計測器５２と、ビームポインティング計測器５４と、ビームプロファイラ５６とを含む。ビームスプリッタ５１は、モニタモジュール２７のビームスプリッタ２７１を透過したパルスレーザ光の光路上に配置される。

【００２８】

ビームスプリッタ５１は、ビームスプリッタ５１の反射光が不図示の光学素子を介して偏光計測器５２と、ビームポインティング計測器５４と、ビームプロファイラ５６とのそれぞれに入射し、ビームスプリッタ５１の透過光が露光装置７０に入射するように配置される。ビーム計測器５０とレーザ制御部３０との間には、ビーム計測器５０で得られたビーム関連データをレーザ制御部３０に伝送する信号ラインが設けられている。

【００２９】
レーザ制御部３０は、エネルギ制御部３２及び波長制御部６０と作動的に接続される。エネルギ制御部３２は、マスターオシレータ１０及びパワーオシレータ２０と作動的に接続される。エネルギ制御部３２は、ＭＯパルスエネルギ計測器１８で検出されたパルスエネルギに基づいてＭＯ充電器１６に充電電圧データを送信し、ＭＯパルスパワーモジュール１５の充電コンデンサに充電する電圧を制御する。また、エネルギ制御部３２は、ＰＯパルスエネルギ計測器２７４で検出されたパルスエネルギに基づいてＰＯ充電器２６に充電電圧データを送信し、ＰＯパルスパワーモジュール２５の充電コンデンサに充電する電圧を制御する。
【００３０】
波長制御部６０は、スペクトル計測器２７６で得られたデータに基づいて波長制御関連データを生成し、波長制御関連データをレーザ制御部３０に送信する。波長制御部６０は、波長調節部６２と作動的に接続される。波長調節部６２は、例えば、ＬＮＭ１２のプリズム１２２を回転させる回転ステージなどの回転駆動機構を含む。波長調節部６２は、スペクトル計測器２７６で計測された波長に基づいて制御される。
【００３１】
また、レーザ制御部３０は、ビーム計測器５０及び露光装置７０と作動的に接続される。露光装置７０は、露光装置コントローラ７２を含む。
【００３２】
レーザ制御部３０、エネルギ制御部３２、波長制御部６０、露光装置コントローラ７２及びその他の各制御部は、少なくとも１つのプロセッサを用いて構成される。本開示のプロセッサとは、制御プログラムが記憶された記憶装置と、制御プログラムを実行するＣＰＵ（Central Processing Unit）とを含む処理装置である。プロセッサは、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。プロセッサは、ＦＰＧＡ（Field Programmable Gate Array）やＡＳＩＣ（Application Specific Integrated Circuit）に代表される集積回路を含んでもよい。
【００３３】
レーザ制御部３０、エネルギ制御部３２及び波長制御部６０のそれぞれを別々のプロセッサで実現してもよいし、複数の制御部の処理機能を１つのプロセッサによって実現してもよい。
【００３４】
１．２　動作
レーザ制御部３０は、露光装置７０から発光トリガ信号、ＰＯ充電電圧指令値及びその他の目標データを受け取る。レーザ制御部３０は、エネルギ制御部３２に発光トリガ信号とＰＯ充電指令値とを出力する。
【００３５】
エネルギ制御部３２は、発光トリガ信号と同期した第１トリガ信号と、ＭＯ充電電圧指令値とを、マスターオシレータ１０に出力する。第１トリガ信号は、ＭＯ充電タイミングを規定する信号である。ＭＯ充電電圧はＰＯ充電電圧と同一であってもよいし、ＰＯ充電電圧と異なっていてもよい。
【００３６】
マスターオシレータ１０は、第１トリガ信号に同期してシードレーザ光を出力し得る。マスターオシレータ１０が出力するシードレーザ光は狭帯域化されている。
【００３７】
マスターオシレータ１０が出力するシードレーザ光は、高反射ミラー４１、４２を介してパワーオシレータ２０に入射し得る。
【００３８】
エネルギ制御部３２は、発光トリガ信号と同期した第２トリガ信号と、ＰＯ充電電圧とを、パワーオシレータ２０に出力する。第２トリガ信号は、第１トリガ信号に対して遅延時間を持つように生成される。第２トリガ信号はＰＯ放電タイミングを規定する信号であ

る。ＰＯ放電タイミングはＭＯ放電タイミングに対して遅延時間を追加したタイミングとなる。パワーオシレータ２０は、第２トリガ信号に同期して放電領域を形成し得る。パワーオシレータ２０に入射したシードレーザ光は、ＰＯチャンバ２３の放電領域を通過することにより増幅される。パワーオシレータ２０は、入射したシードレーザ光を放電領域により増幅し、出力レーザ光を出力し得る。

【００３９】

１．３　狭帯域化レーザの特性

パワーオシレータ２０から出力される出力レーザ光の特性は、繰返し周波数に依存して変化する。図２は、繰返し周波数とスペクトル幅との関係を示すグラフの例である。例えば、図２に示すように、スペクトル幅は、繰返し周波数に対して複雑に変化する。そのため、繰返し周波数がノミナル値ＲＲ０からある値ＲＲに変化すると、スペクトル幅がΔＢＷだけ変化する。また、パワーオシレータ２０から出力される出力レーザ光の特性は、ＭＯ放電タイミングとＰＯ放電タイミングとの間の遅延時間Ｄに依存して変化する。

【００４０】

図３は、ＭＯ放電タイミングとＰＯ放電タイミングとの間の遅延時間Ｄと、スペクトル幅及びパルスエネルギとの関係を示すグラフの例である。図３の横軸は遅延時間Ｄを表し、図３の左の縦軸はスペクトル幅、右の縦軸はパルスエネルギを表す。図３中の実線で示すグラフＧ１は、遅延時間Ｄとスペクトル幅との関係を示す。図３中の破線で示すグラフＧ２は、遅延時間Ｄとパルスエネルギとの関係を示す。図３に示すように、例えば、スペクトル幅は、遅延時間Ｄが増加すると小さくなる。また、パルスエネルギは、遅延時間Ｄに対して極大値を持つ。レーザ装置１は、この極大値を取る遅延時間Ｄをノミナル値Ｄｔとして動作する。繰返し周波数がＲＲ０であるときの遅延時間ＤはＤｔに設定される。遅延時間Ｄのノミナル値Ｄｔを「ノミナル遅延時間Ｄｔ」と表記する場合がある。

【００４１】

レーザ制御部３０は、繰返し周波数をＲＲ０からＲＲに変更する場合、この繰返し周波数の変更時に生じるスペクトル幅の変化量ΔＢＷを、図３に示す特性を利用して補正する。ここで、図３は繰返し周波数がＲＲ０からＲＲに変更された後の特性である。したがって遅延時間Ｄｔに対応するスペクトル幅は繰返し周波数がＲＲ時の幅である。すなわち、図２に示す特性から、ある繰返し周波数ＲＲにおけるΔＢＷがわかる。また、図３に示す特性から、ΔＢＷを打ち消す、あるいは低減するには、遅延時間Ｄをノミナル値Ｄｔから変更量ΔＤだけ変化させればよいことがわかる。遅延時間Ｄの変更量ΔＤを「遅延時間変更量ΔＤ」と表記する場合がある。

【００４２】

結果として、図４のように、繰返し周波数ＲＲと遅延時間変更量ΔＤとを対応させるテーブルが得られる。レーザ装置１はこのテーブルのデータを保持する。

【００４３】

一方、出力レーザ光の特性はＭＯ充電電圧及び／又はＰＯ充電電圧によっても変化し、パルスエネルギは、例えば、図５のＣ０で示す曲線のグラフのような特性を示す。図５に示す特性は、パルスエネルギの安定化に利用される。例えば、露光装置７０にレーザ光を出力する場合、パルスエネルギはＭＯ充電電圧及び／又はＰＯ充電電圧を調整することによって目標範囲内にフィードバック制御され安定化される。これをＨＶ制御と呼ぶ。このフィードバック制御のパラメータとして「ＨＶゲイン」と「オフセット」とを用いることがある。

【００４４】

次式（１）のように、レーザ装置１のパルスエネルギＥｐが充電電圧指令値ＨＶに対する一次関数として近似できるとき、傾きαをＨＶゲイン、切片βをオフセットという。

【００４５】

$$Ep = \alpha HV + \beta \qquad (1)$$

図３において、繰返し周波数がＲＲ０からＲＲに変化したことに対応して、スペクトル幅を維持するように遅延時間ＤをΔＤ変化させる場合、パルスエネルギがΔＥ変動してし

まう。このエネルギ変動を補償するようにＨＶ制御が働く。エネルギ制御部３２は、ＰＯパルスエネルギ計測器２７４の計測結果に基づいてＰＯ充電電圧をフィードバック制御する。

【００４６】

２．課題

レーザ装置１では、図５に示すようなパルスエネルギの特性を一次関数で近似して動作領域におけるＨＶゲイン及びオフセットを算出する。図５では、パルスエネルギの特性曲線Ｃ０におけるノミナルエネルギ値Ｅｔでの接線の傾きからＨＶゲインα０を算出する例が示されている。この接線の切片がオフセットβ０となる。ＨＶ制御では、パルスエネルギが一定となる（目標範囲内の値となる）ように、ＨＶゲイン及びオフセットに基づいた充電電圧を出力する。

【００４７】

一方、露光装置７０がレーザ装置１に対して繰返し周波数の切り替えを指示する場合がある（図６参照）。図６は、比較例１の制御が適用された場合のレーザ動作を示すグラフの例である。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。

【００４８】

図６には、上から、繰返し周波数、遅延時間Ｄ、スペクトル幅及びパルスエネルギのそれぞれの値の推移を示すグラフＧ６Ａ～Ｇ６Ｄが共通の時間軸によって示されている。

【００４９】

露光装置７０からの指令により繰返し周波数が変更されると、図２に示す特性のため、繰返し周波数の切り替えに伴って、急速なスペクトル幅変動が生じることがある（図６のグラフＧ６Ｃ）。このスペクトル幅変動を抑制するために、図３に示す特性を利用してＭＯ放電タイミングとＰＯ放電タイミングとの間の遅延時間Ｄをノミナル値Ｄｔから変更することがある。

【００５０】

図７は、図３に示す特性を用いたスペクトル幅変動抑制の制御を含む比較例２の制御が適用された場合のレーザ動作を示すグラフの例である。図７には、図６と同様に、上から、繰返し周波数、遅延時間Ｄ、スペクトル幅及びパルスエネルギのそれぞれの値の推移を示すグラフＧ７Ａ～Ｇ７Ｄが共通の時間軸によって示されている。

【００５１】

繰返し周波数の切り替えに伴う急速なスペクトル幅変動を抑制するために、図３に示す特性を利用して、グラフＧ７Ｂに示すように、繰返し周波数の変更に合わせて、遅延時間Ｄをノミナル値ＤｔからΔＤだけ変更する制御が行われる。これにより、グラフＧ７Ｃに示すように、スペクトル幅は、繰返し周波数の切り替え後も所定の許容範囲に収まり得る。

【００５２】

ところが、ＭＯ放電タイミングとＰＯ放電タイミングとの間の遅延時間Ｄを変更すると（グラフＧ７Ｂ参照）、図３に示す特性によりパルスエネルギが変動する。この時同時に、図５に示す特性も遅延時間Ｄに伴って変化し、ＨＶ制御に用いるべきＨＶゲイン及びオフセットが変化してしまう（図８及び図９参照）。

【００５３】

図８の破線で示す特性曲線Ｃ１は、遅延時間Ｄがノミナル値Ｄｔである場合の特性の例であり、実線で示す特性曲線Ｃ２は、遅延時間ＤがＤｔ＋ΔＤである場合の特性の例である。例えば、図８の場合において、遅延時間Ｄ＝Ｄｔでパルスエネルギが目標範囲となるようにＨＶ制御が動作し、ＰＯ充電電圧がＶ０となったとする。ここで遅延時間ＤがＤｔからＤｔ＋ΔＤに変更されると、図３に示す特性によりパルスエネルギが低下し、ＰＯ充電電圧Ｖ０におけるパルスエネルギはΔＥだけ低下し、目標範囲を逸脱し得る（図７のグラフＧ７Ｄ参照）。

【００５４】

遅延時間Ｄの変更に伴う上記のパルスエネルギの低下量ΔＥを補うために、再度ＨＶ制

御が動作するが、このＨＶ制御においても遅延時間Ｄ＝ＤｔにおけるＨＶゲインα０やオフセットβ０が用いられる。

【００５５】

一方で、遅延時間ＤがＤｔ＋ΔＤに変更されると、レーザ装置１のＨＶゲイン及びオフセットは変化するため（図９参照）、ＨＶ制御が用いるＨＶゲイン及びオフセットと不整合を生じる。この不整合のためＨＶ制御の応答が過剰となり、パルスエネルギの制御が不安定になり得る。あるいはＨＶ制御の応答が不足となり、パルスエネルギの制御が目標範囲内に整定するまでより多くのパルス数を必要とし得る。

【００５６】

結果として、遅延時間Ｄを変更した際にパルスエネルギの制御が不安定になり、目標範囲を逸脱し得る（図７のグラフＧ７Ｄ）。

【００５７】

以上のように、露光装置７０の指示に対応して繰返し周波数の切り替えを行うとＨＶ制御が不安定になる場合があった。

【００５８】

３．実施形態１

３．１　構成

図１０は、実施形態１に係るレーザ装置１０１の構成を概略的に示す。図１０に示す構成について、図１と異なる点を説明する。

【００５９】

図１０に示すレーザ装置１０１は、エネルギ制御部３２とＰＯ充電器２６との間に充電電圧補正部３４を含む。充電電圧補正部３４はソフトウェアによって構成されてもよく、エネルギ制御部３２の機能の一部として実現されてもよい。あるいは、充電電圧補正部３４は、エネルギ制御部３２とは別のプロセッサを用いて構成されてもよい。

【００６０】

また、レーザ装置１０１は、図４で説明したテーブルに、遅延時間変更量ΔＤの関数であるＨＶ補正係数Ａ（ΔＤ），Ｂ（ΔＤ）を追加した図１１のようなテーブルを持つ。

【００６１】

ＨＶ補正係数Ａ（ΔＤ）とＨＶ補正係数Ｂ（ΔＤ）とのそれぞれは、例えば次の式（２），（３）に基づいて算出される。

【００６２】

Ａ（ΔＤ）＝α０／α（ΔＤ）　　（２）

Ｂ（ΔＤ）＝（β０－β（ΔＤ））／α（ΔＤ）　　（３）

式中のα０及びβ０は、遅延時間Ｄがノミナル値Ｄｔ（すなわちΔＤ＝０）である場合のＨＶゲイン及びオフセットである。α（ΔＤ）及びβ（ΔＤ）は、遅延時間変更量ΔＤの関数であるＨＶゲイン及びオフセットである。

【００６３】

３．２　動作

エネルギ制御部３２は、繰返し周波数の切り替え等運転条件の変化に応じて、遅延時間変更量ΔＤと、ΔＤに対応するＨＶ補正係数Ａ（ΔＤ），Ｂ（ΔＤ）とを決定する（図１２）。充電電圧補正部３４は、露光装置７０から受け取った充電電圧指令値ＨＶｃｍｄと、ＨＶ補正係数Ａ（ΔＤ），Ｂ（ΔＤ）とから、次式（４）により充電電圧補正値ＨＶｃｍｐを計算する。

【００６４】

ＨＶｃｍｐ＝Ａ（ΔＤ）＊ＨＶｃｍｄ＋Ｂ（ΔＤ）　　（４）

そして、充電電圧補正部３４は、充電電圧補正値ＨＶｃｍｐをＰＯ充電電圧を指令する指令値として出力する。ＰＯ充電器２６によってＰＯパルスパワーモジュール２５の充電コンデンサが充電され、ＰＯチャンバ２３内のレーザガスは、充電電圧補正値ＨＶｃｍｐに応じたＰＯ充電電圧により励起される。これにより、ＰＯ充電電圧に対応したパルスエネルギに増幅されたパルスレーザ光がパワーオシレータ２０から出力される。

【００６５】
パワーオシレータ２０は本開示における「増幅器」の一例であり、ＰＯチャンバ２３に収容されるレーザガスは本開示における「レーザ媒質」の一例である。ＭＯ放電タイミングは本開示における「第１の放電タイミング」の一例である。ＰＯ放電タイミングは本開示における「第２の放電タイミング」の一例である。繰返し周波数のＲＲ０は本開示における「第１の繰返し周波数」の一例であり、ＲＲは本開示における「第２の繰返し周波数」の一例である。繰返し周波数がＲＲ０であるときに設定されるノミナル遅延時間Ｄｔは本開示における「第１の遅延時間」の一例である。充電電圧補正部３４が行う補正の処理に用いられるＨＶ補正係数Ａ（ΔＤ），Ｂ（ΔＤ）は本開示における「補正係数」の一例である。充電電圧指令値ＨＶｃｍｄに乗算されるＨＶ補正係数Ａ（ΔＤ）は本開示における「第１の補正係数」の一例であり、ＨＶｃｍｄとＡ（ΔＤ）との積に加算されるＢ（ΔＤ）は本開示における「第２の補正係数」の一例である。
【００６６】
図１２は、実施形態１に係るレーザ装置１０１の制御例を示すフローチャートである。図１２のフローチャートは、エネルギ制御部３２及び／又は充電電圧補正部３４として機能するプロセッサがプログラムを実行することによって実現され得る。
【００６７】
ステップＳ１１において、エネルギ制御部３２は、繰返し周波数が変更されたか否かを判定する。繰返し周波数が変更され、ステップＳ１１の判定結果がＴｒｕｅ判定である場合、ステップＳ１２に進む。
【００６８】
ステップＳ１２において、エネルギ制御部３２は、遅延時間Ｄの変更の目標値としての遅延時間変更量ΔＤと、ＨＶ補正係数Ａ（ΔＤ），Ｂ（ΔＤ）とをテーブル（図１１）に基づいて更新する。ステップＳ１２の後、ステップＳ１３に進む。
【００６９】
また、ステップＳ１１の判定において、繰返し周波数が変更されておらず、ステップＳ１１の判定結果がＦａｌｓｅ判定である場合、エネルギ制御部３２及び充電電圧補正部３４は、ステップＳ１２をスキップして、ステップＳ１３に進む。
【００７０】
次いで、ステップＳ１３において、充電電圧補正部３４は、式（４）に従い、充電電圧補正値ＨＶｃｍｐを求め、算出された充電電圧補正値ＨＶｃｍｐをＰＯ充電電圧を指令する指令値としてＰＯ充電器２６に出力する。
【００７１】
ステップＳ１３の後、エネルギ制御部３２及び充電電圧補正部３４は図１２のフローチャートを終了する。
【００７２】
エネルギ制御部３２及び充電電圧補正部３４は、パルスごとに図１２のフローチャートの処理を繰返し実行し得る。
【００７３】
図１２のフローチャートによる処理を含むレーザ制御方法は本開示における「レーザ制御方法」の一例である。
【００７４】
３．３　作用・効果
実施形態１に係るレーザ装置１０１によれば、遅延時間変更量ΔＤで運転するとき、パルスエネルギＥｐは次式で近似される。
【００７５】
【数１】

$$Ep = \alpha(\Delta D) HV_{\mathrm{cmp}} + \beta(\Delta D)$$

$$= \alpha(\Delta D)\{A(\Delta D)\, HV_{\mathrm{cmd}} + B(\Delta D)\} + \beta(\Delta D)$$

$$= \alpha(\Delta D)\left\{\frac{\alpha_0}{\alpha(\Delta D)} HV_{\mathrm{cmd}} + \frac{\beta_0 - \beta(\Delta D)}{\alpha(\Delta D)}\right\} + \beta(\Delta D)$$

$$= \alpha_0\, HV_{\mathrm{cmd}} + \beta_0$$

【００７６】
すなわち、露光装置７０からの見かけ上、充電電圧指令値ＨＶｃｍｄに対するＨＶゲイン及びオフセットはノミナル値α０,β０となり、遅延時間変更量ΔＤの変更に伴う変動が抑制される。結果として、露光装置７０の指示に対応して繰返し周波数の切り替えを行ってもＨＶ制御が不安定になることが抑制される。
【００７７】
４．実施形態２
４．１　構成
図１３は、実施形態２に係るレーザ装置１０２の構成を概略的に示す。図１３の構成について、図１０と異なる点を説明する。実施形態２に係るレーザ装置１０２におけるＭＯ充電電圧は、ＰＯ充電電圧と同一である。充電電圧補正部３４とＭＯ充電器１６との間には充電電圧補正部３４からＰＯ充電電圧と同じＭＯ充電電圧の指令をＭＯ充電器１６に伝送する信号ラインが設けられる。その他の構成は実施形態１に係るレーザ装置１０１と同様であってよい。
【００７８】
ただし、ＭＯ充電電圧が実施形態１と異なることから、装置パラメータの値は実施形態１と異なり得る。例えば、α０とβ０とのそれぞれの数値は実施形態１と異なる値となり得る。同様に、α（ΔＤ），β（ΔＤ），Ａ（ΔＤ）及びＢ（ΔＤ）のそれぞれの値も実施形態１とは異なり得る。
【００７９】
４．２　動作
実施形態２に係るレーザ装置１０２の動作について、実施形態１に係るレーザ装置１０１と異なる点を説明する。実施形態２では、充電電圧補正部３４は、充電電圧補正値ＨＶｃｍｐをＰ０充電電圧ならびにＭＯ充電電圧として出力する。その他の動作は実施形態１と同様である。
【００８０】
４．３　作用・効果
実施形態２に係るレーザ装置１０２によれば、実施形態１と同様の作用・効果が得られる。
【００８１】
５．他の応用例
上記の各実施形態１、２では、繰返し周波数の変更を例に説明したが、これに限らず他の運転条件が変更されてもよい。また、スペクトル幅はレーザ光の特性の一例であって、他の特性の変動を抑制するために遅延時間Ｄを変更してもよい。本開示によるレーザ制御の技術は、「運転条件に応じて遅延時間Ｄを変更することで、レーザ光の特性変化（変動）を低減する」制御に応用することができる。運転条件の変更に合わせて遅延時間Ｄを変

更する際に、充電電圧を補正することにより、レーザ光の特性の目標範囲からの逸脱を抑制できる。

【００８２】

６．電子デバイスの製造方法について

図１４は、露光装置７０の構成例を概略的に示す。露光装置７０は、照明光学系７４と投影光学系７６とを含む。照明光学系７４は、レーザ装置１０１から入射したレーザ光によって、レチクルステージＲＴ上に配置された不図示のレチクルのレチクルパターンを照明する。投影光学系７６は、レチクルを透過したレーザ光を、縮小投影してワークピーステーブルＷＴ上に配置された不図示のワークピースに結像させる。ワークピースはフォトレジストが塗布された半導体ウエハ等の感光基板である。

【００８３】

露光装置７０は、レチクルステージＲＴとワークピーステーブルＷＴとを同期して平行移動させることにより、レチクルパターンを反映したレーザ光をワークピースに露光する。以上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を転写後、複数の工程を経ることで半導体デバイスを製造できる。半導体デバイスは本開示における「電子デバイス」の一例である。レーザ装置１０１に代えて、レーザ装置１０２を用いてもよい。

【００８４】

７．その他

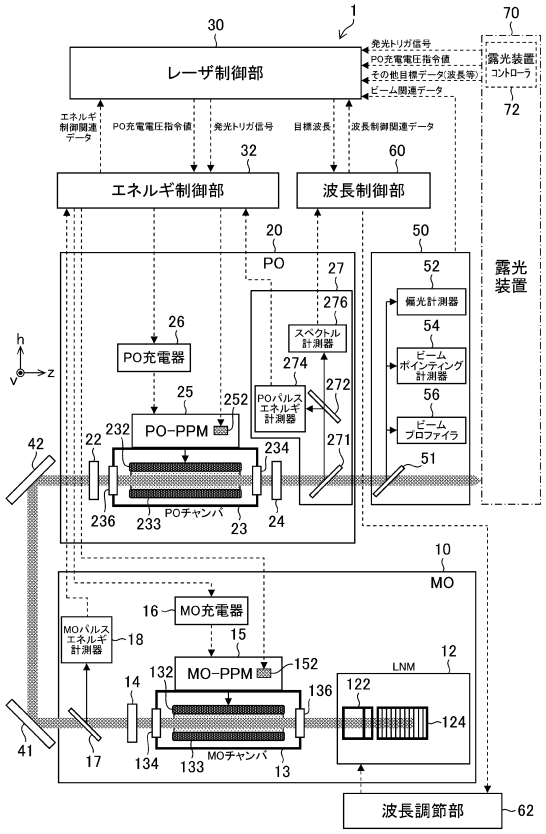
上記の説明は、制限ではなく単なる例示を意図している。従って、特許請求の範囲を逸脱することなく本開示の実施形態に変更を加えることができることは、当業者には明らかである。また、本開示の実施形態を組み合わせて使用することも当業者には明らかである。

【００８５】

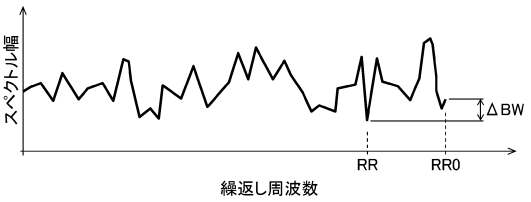
本明細書及び特許請求の範囲全体で使用される用語は、明記が無い限り「限定的でない」用語と解釈されるべきである。例えば、「含む」、「有する」、「備える」、「具備する」などの用語は、「記載されたもの以外の構成要素の存在を除外しない」と解釈されるべきである。また、修飾語「１つの」は、「少なくとも１つ」又は「１又はそれ以上」を意味すると解釈されるべきである。また、「Ａ、Ｂ及びＣの少なくとも１つ」という用語は、「Ａ」「Ｂ」「Ｃ」「Ａ＋Ｂ」「Ａ＋Ｃ」「Ｂ＋Ｃ」又は「Ａ＋Ｂ＋Ｃ」と解釈されるべきである。さらに、それらと「Ａ」「Ｂ」「Ｃ」以外のものとの組み合わせも含むと解釈されるべきである。

【図面】

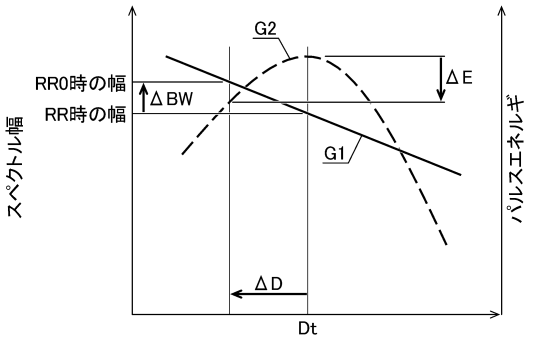
【図１】




【図２】




【図３】

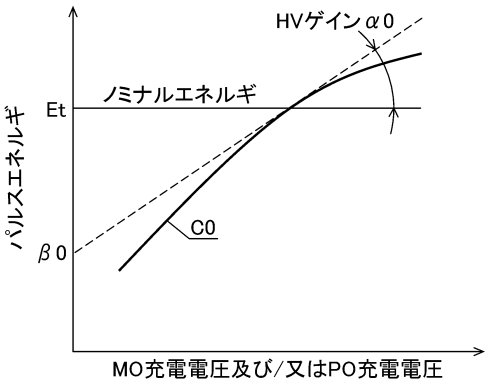



MO放電タイミングとPO放電タイミングとの間の遅延時間D

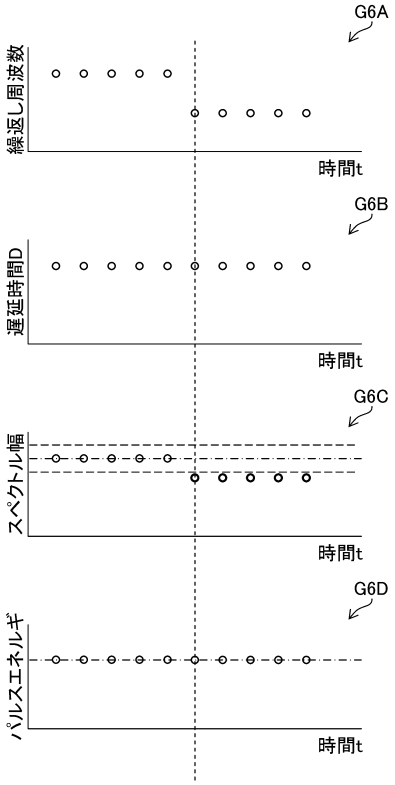
【図４】

| RR | ΔD |
|---|---|
| RR1 | ΔD1 |
| RR2 | ΔD2 |
| ⋮ | |

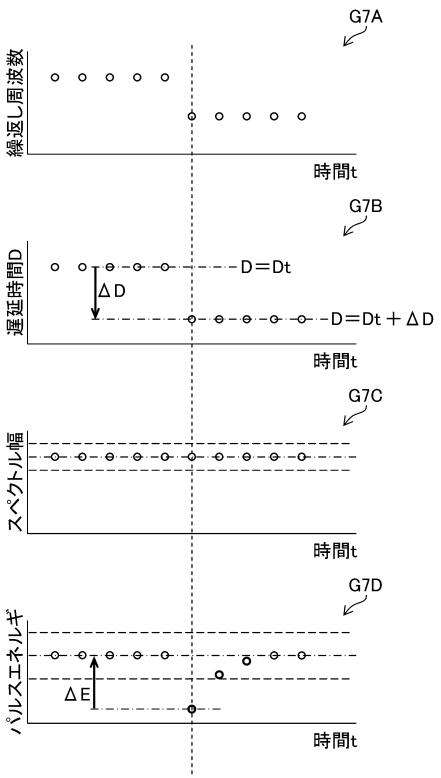
【図５】


HVゲインα0
ノミナルエネルギ
Et
パルスエネルギ
C0
β0
MO充電電圧及び/又はPO充電電圧

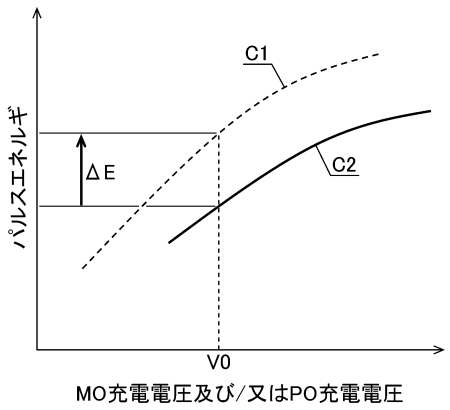
【図６】


G6A
繰返し周波数
時間t
G6B
遅延時間D
時間t
G6C
スペクトル幅
時間t
G6D
パルスエネルギ
時間t

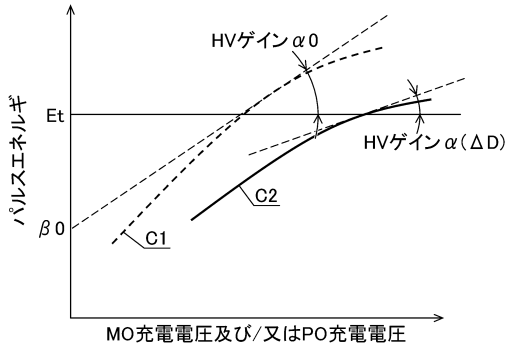
【図７】


G7A
繰返し周波数
時間t
G7B
遅延時間D
D＝Dt
ΔD
D＝Dt＋ΔD
時間t
G7C
スペクトル幅
時間t
G7D
パルスエネルギ
ΔE
時間t

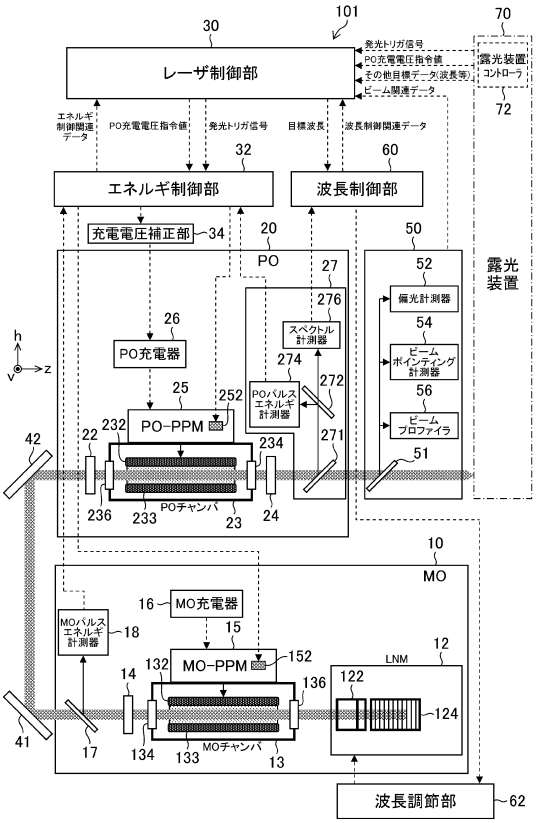
【図８】


C1
C2
ΔE
パルスエネルギ
V0
MO充電電圧及び/又はPO充電電圧

【図９】



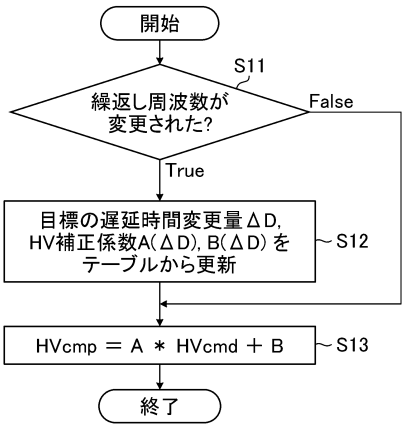

【図１０】



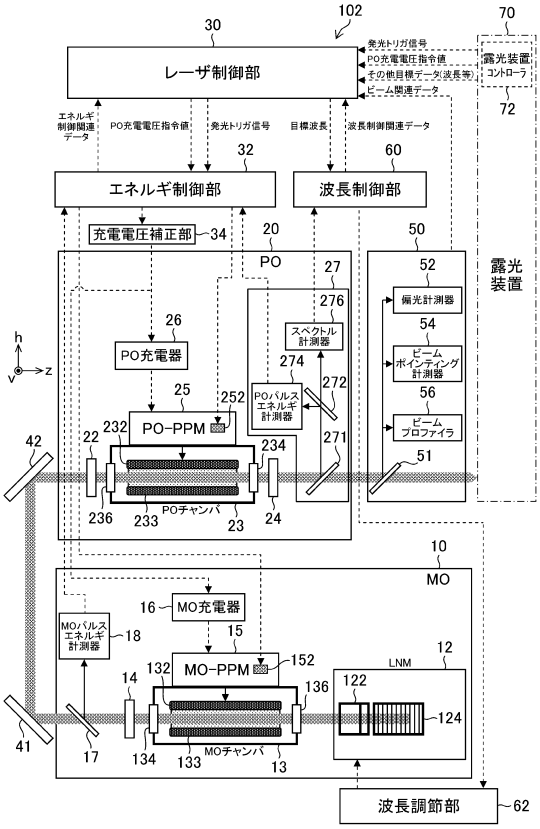

【図１１】

| RR | ΔD | A(ΔD) | B(ΔD) |
|---|---|---|---|
| RR1 | ΔD1 | A1 | B1 |
| RR2 | ΔD2 | A2 | B2 |
| ⋮ | | | |

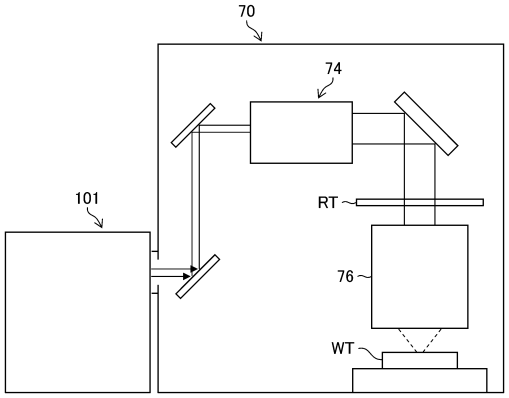
【図１２】



【図１３】


102
30
70
レーザ制御部
発光トリガ信号
PO充電電圧指令値
その他目標データ(波長等)
ビーム関連データ
露光装置コントローラ
72
エネルギ制御関連データ
PO充電電圧指令値
発光トリガ信号
目標波長
波長制御関連データ
32
60
エネルギ制御部
波長制御部
充電電圧補正部
34
20
PO
50
露光装置
27
276
52
偏光計測器
54
スペクトル計測器
ビームポインティング計測器
26
PO充電器
274
272
56
ビームプロファイラ
25
252
PO-PPM
POパルスエネルギ計測器
232
22
234
271
51
42
236
233
POチャンバ
23
24
10
MO
16
MO充電器
MOパルスエネルギ計測器
18
15
MO-PPM
152
LNM
12
14
132
136
122
124
41
17
134
133
MOチャンバ
13
波長調節部
62

【図１４】


70
74
101
RT
76
WT

フロントページの続き

(56)参考文献　国際公開第２０１８／１０５０８２（WO，Ａ１）
国際公開第２０１７／９９４５（WO，Ａ１）
特開２０００－１８８４３９（ＪＰ，Ａ）
特開平１１－２１４７８２（ＪＰ，Ａ）
国際公開第２０２０／９５４１８（WO，Ａ１）
特表２００６－５０５９６０（ＪＰ，Ａ）
特表２０１９－５０５９８１（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野　(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｓ　３／１０