

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5755068号
(P5755068)

(45) 発行日 平成27年7月29日 (2015. 7. 29)

(24) 登録日 平成27年6月5日 (2015. 6. 5)

(51) Int. Cl. F I
 HO 1 S 3/137 (2006. 01) HO 1 S 3/137
 HO 1 L 21/027 (2006. 01) HO 1 L 21/30 5 1 5 B
 HO 1 S 3/134 (2006. 01) HO 1 S 3/134

請求項の数 6 (全 39 頁)

(21) 出願番号	特願2011-163945 (P2011-163945)	(73) 特許権者	000001236 株式会社小松製作所 東京都港区赤坂二丁目3番6号
(22) 出願日	平成23年7月27日 (2011. 7. 27)	(73) 特許権者	000102212 ウシオ電機株式会社 東京都千代田区大手町二丁目6番1号
(62) 分割の表示	特願2006-276422 (P2006-276422) の分割	(74) 代理人	110000383 特許業務法人 エビス国際特許事務所
原出願日	平成18年10月10日 (2006. 10. 10)	(72) 発明者	若林 理 神奈川県平塚市万田1200
(65) 公開番号	特開2011-249832 (P2011-249832A)	(72) 発明者	鈴木 徹 栃木県小山市横倉新田400
(43) 公開日	平成23年12月8日 (2011. 12. 8)	(72) 発明者	熊▲崎▼ 貴仁 栃木県小山市横倉新田400
審査請求日	平成23年8月1日 (2011. 8. 1)		
審判番号	不服2014-7859 (P2014-7859/J1)		
審判請求日	平成26年4月28日 (2014. 4. 28)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 狭帯域化レーザーのスペクトル幅調整装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

狭帯域化したレーザー光を連続してパルス発振するバースト期間と発振休止する発振休止期間とを交互に繰り返して動作する狭帯域化レーザーに、

レーザー光のスペクトル幅を変化させるスペクトル幅調整機構と、
前記スペクトル幅調整機構の動作を制御するレーザーコントローラと、
発振休止期間の長さを計測する休止期間計測部と、

スペクトル幅と当該スペクトル幅が得られるような前記スペクトル幅調整機構の動作指令値とを互いに対応付け、さらにそのスペクトル幅と動作指令値とを発振休止期間の長さ
と対応付けて記憶する指令値記憶部と、

を備えた狭帯域化レーザーのスペクトル幅調整装置において、

前記レーザーコントローラは、発振休止期間中においてもスペクトル幅調整機構の動作を制御し、発振休止期間中にスペクトル幅を制御し、

前記レーザーコントローラは、バースト期間の初期の不安定期間に、

前記指令値記憶部が記憶している情報のうちから、

記憶されている発振期間の長さと、前記休止期間計測部で計測した発振休止期間の長さと一致又は近似し、かつ、

記憶されているスペクトル幅と、スペクトル幅の目標値とが一致又は近似する
情報に対応する動作指令値を読み出し、

読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、

求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペクトル幅調整機構の動作を制御することによって、

スペクトル幅を制御し、

前記レーザコントローラは、前記不安定期間の後、フィードバック制御することを特徴とする狭帯域化レーザのスペクトル幅調整装置。

【請求項 2】

前記レーザコントローラは、発振休止期間中に、

前記指令値記憶部が記憶している情報のうちから、

記憶されている発振期間の長さ、前記休止期間計測部で計測した発振休止期間の長さ、と一致又は近似し、かつ、

記憶されているスペクトル幅と、スペクトル幅の目標値とが一致又は近似する情報に対応する動作指令値を読み出し、

読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、

求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペクトル幅調整機構の動作を制御する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の狭帯域化レーザのスペクトル幅調整装置。

【請求項 3】

前記指令値記憶部は、スペクトル幅と動作指令値とをさらに狭帯域化レーザの繰り返し周波数と対応付けて記憶し、

前記レーザコントローラは、発振休止期間中に、

前記指令値記憶部が記憶している情報のうちから、

記憶されている繰り返し周波数と、繰り返し周波数と一致又は近似し、かつ

記憶されている発振期間の長さ、直前の前記休止期間計測部で計測した発振休止期間の長さ、と一致又は近似し、かつ

記憶されているスペクトル幅と、スペクトル幅の目標値とが一致又は近似する情報に対応する動作指令値を読み出し、

読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、

求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペクトル幅調整機構の動作を制御する

ことを特徴とする請求項 2 に記載の狭帯域化レーザのスペクトル幅調整装置。

【請求項 4】

狭帯域化したレーザ光を連続してパルス発振するバースト期間と発振休止する発振休止期間とを交互に繰り返して動作する狭帯域化レーザに、

レーザ光のスペクトル幅を変化させるスペクトル幅調整機構と、

前記スペクトル幅調整機構の動作を制御するレーザコントローラと、

発振休止期間の長さを計測する休止期間計測部と、

スペクトル幅と当該スペクトル幅が得られるような前記スペクトル幅調整機構の動作指令値とを互に対応付け、さらにそのスペクトル幅と動作指令値とを発振休止期間の長さに対応付けて記憶する指令値記憶部と、

を備えた狭帯域化レーザのスペクトル幅調整装置において、

前記レーザコントローラは、バースト期間の初期の不安定期間に、

前記指令値記憶部が記憶している情報のうちから、

記憶されている発振期間の長さ、前記休止期間計測部で計測した発振休止期間の長さ、と一致又は近似し、かつ、

記憶されているスペクトル幅と、スペクトル幅の目標値とが一致又は近似する情報に対応する動作指令値を読み出し、

読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、

求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペクトル幅調整機構の動作を制御することによって、

スペクトル幅を制御し、

10

20

30

40

50

前記レーザコントローラは、前記不安定期間の後、フィードバック制御することを特徴とする狭帯域化レーザのスペクトル幅調整装置。

【請求項 5】

スペクトル幅と当該スペクトル幅が得られるような前記スペクトル幅調整機構の動作指令値とを互いに対応付け、さらにそのスペクトル幅と動作指令値とを、パルス番号と対応付けて記憶する指令値記憶部と、

レーザ光のスペクトル幅を検出するスペクトル幅検出部と、を備え、

前記レーザコントローラは、1バースト期間の最初のパルスから所定のパルスまでの各パルス毎又は複数パルス毎に、

前記指令値記憶部から、その時点のパルス番号に一致し、スペクトル幅の目標値と一致又は近似するスペクトル幅およびそのスペクトル幅に対応する動作指令値を読み出し、読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、

求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペクトル幅調整機構の動作を制御すると共に、

前記スペクトル幅検出部で検出されたスペクトル幅と前記レーザコントローラで求められた動作指令値とを互いに対応付け、さらにそのスペクトル幅と動作指令値とをその時点のパルス番号と対応付けて前記指令値記憶部に記憶させる

ことを特徴とする請求項 4 記載の狭帯域化レーザのスペクトル幅調整装置

【請求項 6】

発振休止期間の長さを計測する休止期間計測部を備え、

前記指令値記憶部は、スペクトル幅と動作指令値とをさらに狭帯域化レーザの繰り返し周波数と発振休止期間の長さに対応付けて記憶し、

前記レーザコントローラは、1バースト期間の最初のパルスから所定のパルスまでの各パルス毎又は複数パルス毎に、

前記指令値記憶部から、その時点のパルス番号と狭帯域化レーザの繰り返し周波数と前記休止期間計測部で計測した直前の発振休止期間の長さとは一致又は近似し、スペクトル幅の目標値と一致又は近似するスペクトル幅およびそのスペクトル幅に対応する動作指令値を読み出し、

読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、

求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペクトル幅調整機構の動作を制御すると共に、

前記スペクトル幅検出部で検出されたスペクトル幅と前記レーザコントローラで求められた動作指令値とを互いに対応付け、さらにそのスペクトル幅と動作指令値とをその時点のパルス番号と狭帯域化レーザの繰り返し周波数と前記休止期間計測部で計測した直前の発振休止期間の長さに対応付けて前記指令値記憶部に記憶させる

ことを特徴とする請求項 5 記載の狭帯域化レーザのスペクトル幅調整装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、狭帯域化したレーザ光を連続してパルス発振するバースト期間と発振休止する発振休止期間とを交互に繰り返して動作する狭帯域化レーザのスペクトル幅を調整する狭帯域化レーザのスペクトル幅調整方法に関し、特に1バースト期間のうちの初期期間のスペクトル幅を安定させる装置である。

【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（以下、「露光装置」という）においては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。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の紫外線を放出するKrFエキシマレーザならびに、波長193nmの紫外線を放出するArFエキ

10

20

30

40

50

シマレーザが用いられている。

【0003】

次世代の露光技術としては、露光装置側の露光用レンズとウエハ間を液体で満たして、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研究されている。ArFエキシマレーザを露光用光源とし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（又はArF液浸リソグラフィ）という。

【0004】

次々世代の露光用光源としてはEUV光源があり、またF2レーザを露光用光源として液浸技術が行われる可能性もある。この場合は、ウエハには波長115nmの紫外光が照射されることになる。

【0005】

KrF、ArFエキシマレーザの自然発振幅は約350～400pmと広いため、これらの投影レンズが使用されると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放出されるレーザ光のスペクトル線幅（スペクトル幅）を狭帯域化する必要がある。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（エタロンやグレーティング等）を有する狭帯域化モジュール（Line Narrow Module）が設けられ、スペクトル幅の狭帯域化が実現されている。このようにスペクトル幅が狭帯域化されるレーザを狭帯域化レーザという。一般的に、レーザのスペクトル幅は半値全幅で表される。図32（a）で示すように、半値全幅（FWHM）とは、レーザ光のスペクトルのうち光強度がピーク値の半分となる部分のスペクトル幅のことをいう。

【0006】

露光装置の結像性能を精密に評価するには露光装置の光学システムデータとレーザのスペクトルプロファイルから光学シミュレーション計算により行うことができる。この光学シミュレーション計算結果から、露光装置の結像性能は、レーザ光のスペクトルの半値全幅だけでなく、スペクトルの裾野成分によって大きく影響を受けることが知られている。そこで、E95幅（スペクトル純度幅ともいわれる）という新たなスペクトル幅の定義が考え出された。図32（b）で示すように、E95幅とは、レーザ光のスペクトルの面積のうちエネルギーの95%が集中する面積のスペクトル幅を示す指標である。このE95幅と露光装置の光学システムの結像性能の関係には相関があり、集積回路の品質を保証するためには、E95幅を例えば0.5pm以下に抑えることが要求されている。

【0007】

E95幅や半値全幅等のスペクトル幅は、例えばレーザ光の波面を変えることによって変化させることができる。レーザ光の波面を変える技術の一つとして、特許文献1にはグレーティングの曲率を変化させる装置が開示されている。

【0008】

一部の狭帯域化レーザは、例えば特許文献1で開示されるようなレーザ光のスペクトル幅を調整するスペクトル幅調整機構と、レーザ光のスペクトル幅を検出するスペクトル幅検出部と、スペクトル幅検出部で検出したスペクトル幅に基づき次に出力するレーザ光のスペクトル幅を目標値に近づけるようにスペクトル幅調整機構の動作を制御するレーザコントローラと、を有し、これらの構成を利用してフィードバック制御が行われている。

【0009】

特許文献2には特許文献1で開示されるようなスペクトル幅調整機構を利用したE95幅の調整方法の一例が開示されている。この方法では予め定めたE95幅の変動モデルを用いてフィードフォワード制御によってグレーティングの曲率を変化させて、熱負荷に起因するE95幅の変動を抑制している。

【0010】

ウエハの露光の際には、露光装置は所謂ステップアンドリピートまたはステップアンドスキャンを行いながら、露光とステージの移動とを交互に繰り返すように運転される。この運転に合わせて狭帯域化レーザは、露光に合わせて狭帯域化したパルスレーザ光を連続

10

20

30

40

50

して発振するバースト期間と、ステージの移動に合わせて発振休止する発振休止期間とを交互に繰り返すバーストモードで運転される。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0011】

【特許文献1】特開2000-312048号公報(図4)

【特許文献2】米国特許出願公開第2006/0114958号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

バーストモードで狭帯域化レーザが運転されると、1バースト期間のうちの最初のパルスから所定のパルスまでの期間で、レーザ光のスペクトル幅が許容範囲から外れるといった現象が発生する。この現象について考察する。

【0013】

図33はパルスの経過に応じたスペクトル幅の変化を示す図である。ここでは一例として繰り返し周波数を6kHzとし、スペクトル幅としてE95幅を採用し、スペクトル幅の目標値を0.4pmとし、許容できる範囲を±0.05pmとしている。図33に示すように、発振休止期間直後の1パルスから約150パルスまではE95幅は大きく変動し許容範囲から外れることが多いが、約150パルス以降はE95幅は許容範囲内でほぼ安定している。E95幅の時定数は $150/6000 = 0.025s$ と非常に短く、フィードバック制御ではE95幅を高精度に安定化できない。

【0014】

本明細書では、1バースト期間のうちの最初のパルスから所定のパルスまでのスペクトル幅が安定しない期間(図33の1パルスから150パルスまでの期間)を不安定期間と称し、1バースト期間のうちの所定のパルスから最後のパルスまでの期間(図33の150パルス以降の期間)を安定期間と称する。

【0015】

不安定期間でレーザ光のスペクトル幅が許容範囲から外れるといった現象が発生するのは、次のような原因によるものと推定されている。

(1) 放電空間における光波面の変化

(2) 光学素子における光波面の変化

(3) 共振器中のパージガスの温度分布発生による光波面の変化

上記(1)~(3)の原因について説明する。

【0016】

図34はレーザチャンバの構造を示す図であり、図34(a)は狭帯域化レーザの上面図であり、図34(b)は狭帯域化レーザの側面図である。また図34(c)は図34(b)のA-A断面図である。

【0017】

レーザチャンバ20の内部には互いに対向する放電電極21、22が設けられ、さらにレーザガスが封入されている。レーザチャンバ20のリア側には、筐体35内にプリズム32、33やグレーティング31等のレーザ光を狭帯域化する光学素子を有する狭帯域化モジュール30が設けられ、レーザチャンバ20のフロント側には筐体55に収容された出力カプラ50が設けられる。

【0018】

レーザチャンバ20と狭帯域化モジュール30の筐体35との間の光路上にはスリット90rが設けられ、さらにその光路はベローズタイプの管状部材92で外気から遮断されている。筐体35にはパージガス(N₂)の供給口35inが設けられ、ベローズタイプの管状部材92にはパージガス(N₂)の排出口92outが設けられている。筐体35とベローズタイプの管状部材92は連通しており、このため供給口35inから供給されたパージガスは、筐体35およびベローズタイプの管状部材92の内部を流れ、排出口9

10

20

30

40

50

2 o u t から排出される。

【 0 0 1 9 】

同様に、レーザチャンバ 2 0 と出力カプラ 5 0 を備えた筐体 5 5 との間の光路上にはスリット 9 0 f が設けられ、さらにその光路はベローズタイプの管状部材 9 3 で外気から遮断されている。筐体 5 5 にはパージガス (N 2) の供給口 5 5 i n が設けられ、ベローズタイプの管状部材 9 3 にはパージガス (N 2) の排出口 9 3 o u t が設けられている。筐体 5 5 とベローズタイプの管状部材 9 3 は連通しており、このため供給口 5 5 i n から供給されたパージガスは、筐体 5 5 およびベローズタイプの管状部材 9 3 の内部を流れ、排出口 9 3 o u t から排出される。

【 0 0 2 0 】

(1) 放電空間における光波面の変化

図 3 4 (c) に示すように、放電電極 2 1、2 2 間の空間のことを放電空間という。放電空間における光波面の変化の原因としては、(1 . 1) 音響波による放電空間内のガス密度の変化、(1 . 2) 放電空間内の放電位置の変化、が考えられる。

【 0 0 2 1 】

(1 . 1) 音響波による放電空間内のガス密度の変化

放電空間で放電を発生させると音響波が生ずる。音響波は放電空間の周囲に伝搬するが、一部成分はレーザチャンバ内の構造物やレーザチャンバの内壁等で反射して放電空間に戻る。音響波の反射波が放電空間に達するタイミングで放電を発生させると、放電空間内のレーザガス密度に粗の部分と密の部分とが発生しているため、放電空間内のレーザガス密度の粗密にともない放電空間における光軸方向の光波面が歪み、レーザ光のスペクトル幅が変化する。

【 0 0 2 2 】

このスペクトル幅の変化の程度は、放電時に音響波の反射波が放電空間にどの程度存在するかに応じて変わる。すなわち、音響波の反射波が放電空間に戻るタイミング (特定の繰り返し周波数) で放電が発生するとレーザ共振器内の光の波面が歪み、これにともなって発振するレーザのスペクトルプロファイルが歪む。このようにして、スペクトル幅の変化の程度は音響波の速度 (音速) とレーザの繰り返し周波数とに影響を受けることになる。図 3 5 に示すように、スペクトル幅 (ここでは E 9 5 幅) はレーザの繰り返し周波数に依存する。図 3 5 では、約 2 5 0 0 H z 以降で E 9 5 幅の変化が大きくなっているが、これは約 1 0 0 0 ~ 2 5 0 0 H z ではパルス間隔が長く、次回放電時には音響波が放電空間を通過したか又は消滅したためであると考えられる。また、音速はレーザガスの温度によって変化するため、レーザガスの温度の変化によって音響波の伝搬速度は変化し、音響波の伝搬速度の変化にともないスペクトル幅も変化する。

【 0 0 2 3 】

このように、音響波による放電空間内のガス密度の変化に応じてレーザ共振器内の放電空間内で光波面が歪み、それにともないスペクトル形状が歪みスペクトル幅が変化する。

【 0 0 2 4 】

(1 . 2) 放電空間内の放電位置の変化

一般に、放電による光の波面は電子密度分布にも依存している。放電エネルギーが高い放電空間では電子密度が高くなり放電の光の進む速度が早くなる。一方、放電エネルギーが低い放電空間では放電エネルギーが高い空間に比べて電子密度が低くなり放電の光の進む速度が遅くなる。したがって、中央部の放電エネルギーが高く、中央部から離れるにつれて放電エネルギーが低くなるようなエネルギー分布をもつ放電空間に光を透過させると、光の波面は凸面状となる。仮に放電空間を光学素子に例えると、近似的にシリンドリカル状の凹レンズの機能を果たすことになる。

【 0 0 2 5 】

そこで、次のような原因が推測される。例えばバースト期間初期の不安定期間で放電方向が傾いてアノード電極とカソード電極の両中央部からずれて放電した状態は、シリンドリカル凹レンズの凹面の極小部を結んだ線がグレーティングの分散方向に対して傾いた状

10

20

30

40

50

態と同等になる。このような場合は、グレーティングの分散方向に対して凹レンズが傾くと、ビームは同様にグレーティングの分散方向に対して傾いて広がる。さらに、レーザのゲイン分布がグレーティングの分散方向に対して傾いていることにより、スペクトル形状が変化し、その結果、スペクトル幅は広くなる。このときの放電空間の状態をマッハツエング干渉計で干渉縞を観測すると、図36(a)に示すような干渉縞となる。そして、1バースト期間のうちの安定期間で放電方向が垂直に戻った場合、放電方向がグレーティングの分散方向に対して垂直となった状態で光が広がることと、ゲイン分布がグレーティングの分散方向に対して垂直なことによって、スペクトル幅は狭くなる。このときの放電空間の状態をマッハツエング干渉計で干渉縞を観測すると、図36(b)に示すような干渉縞となる。

10

【0026】

このように、放電空間内の放電位置の変化に応じてレーザ共振器内のレーザ光の光波面とゲイン分布が変化し、それにともないスペクトル形状が変化しスペクトル幅が変化する。

【0027】

(2) 光学素子における光波面の変化

図37はプリズムを透過する光の波面が変化の様子を示す図である。プリズム32、33の斜面32a、33aまたは垂直面32b、33bには反射防止(AR)膜がコーティングされており、この膜に光の吸収が発生すると、プリズム32、33の表面に不均一な温度分布が発生する。こうした現象によって、例えば平面波の光がプリズムを透過すると、波面が歪められた透過光が出力される。また、プリズム32、33の母材に光の吸収が発生しても、同様にプリズム32、33の表面に不均一な温度分布が発生するため、波面が歪められた透過光が出力される。さらに、光の吸収によってグレーティング31に不均一な温度分布が発生すると、波面が歪められた回折光が出力される。

20

【0028】

このように、光学素子に不均一な温度分布が発生するに応じてレーザ共振器内のレーザ光の光波面が変化し、それにともないスペクトル形状が変化しスペクトル幅が変化する。

【0029】

(3) 共振器中のパージガスの温度分布発生による光波面の変化

図38はレーザ光がスリットを通過の様子を示す図である。図38に示すように、レーザ光がスリット90rを通過する際にスリット90rのエッジ部が熱せられ、エッジ部周辺のパージガスの温度が高くなる。するとスリット90rの開口内のパージガスに、開口中央よりも開口周縁の方が高温となるような不均一な温度分布が発生する。またレーザ発振とともに開口内のパージガスの密度分布が変化する。こうした現象によって、例えば平面波の光がスリット90rを透過すると、凹形状に波面が歪められた透過光が出力される。

30

【0030】

このように、共振器中のパージガスの温度分布発生に応じてレーザ共振器内のレーザ光の光波面が変化し、それにともないスペクトル形状が変化しスペクトル幅が変化する。

【0031】

また、上述した(1)~(3)の原因の他に、次のような現象によって、バースト期間初期の不安定期間で出力されるレーザ光のスペクトル幅が目標値と一致しなくなり、レーザ光のスペクトル幅が許容範囲から外れることがある。

40

【0032】

図39は一般的な狭帯域化レーザにおけるスペクトル幅制御システムのブロック図である。モタモジュール60は出力カプラ50から出力されたレーザ光のスペクトル幅を検出する。レーザ共振器は、出力カプラ50、レーザチャンバ20、スペクトル幅調整機構40及びスペクトル線幅を狭くするために波長分散素子が配置された狭帯域化モジュール40により構成される。レーザコントローラ80はモタモジュール60で検出された出力レーザ光のスペクトル幅を目標値にするようにスペクトル幅調整機構40の動作指令値に

50

じた動作信号をドライバ10に出力する。ドライバ10は入力された動作指令値に応じてスペクトル幅調整機構40を動作させる。

【0033】

発振停止期間中にレーザ共振器内の状態（例えばレーザチャンバ20内の温度やガスの状態、または光学素子及びパージガスの温度）の変化によって、スペクトル幅は徐々にずれていく。但し、現実には発振停止期間中にレーザ発振は行われなため、発振停止期間中にレーザ光自体が出力されず、当然の如くスペクトル幅も検出されない。ここでいう発振停止期間中のスペクトル幅というのは、仮に発振停止期間中の各時点でレーザ発振された場合に検出されるであろうレーザ光のスペクトル幅のことを意味する。

【0034】

図40は従来技術における時間経過に応じたスペクトル幅の変化とバーストON・OFFの変化とスペクトル幅調整機構の動作量の変化とを示す図である。

【0035】

図40(b)に示すように、時刻t1以前の期間および時刻t2以降の期間がバーストON状態であり、この期間がバースト期間である。また、時刻t1から時刻t2までの期間がバーストOFF状態であり、この期間が発振休止期間である。

【0036】

時刻t1までのバースト期間では、図39に示すモニタモジュール60はレーザ光のE95幅E95を検出し、検出値E95に応じた信号をレーザコントローラ80に送る。レーザコントローラ80は次回パルスの動作指令値Vを求め、動作指令値Vに応じたスペクトル幅調整機構40の動作信号をドライバ10に送る。ドライバ10は動作信号に従いスペクトル幅調整機構40を操作する。こうしてスペクトル幅調整機構40のフィードバック制御が行われる。ここでは図40(a)に示すようにE95幅が安定した状態でフィードバック制御が行われており、図40(c)に示すようにスペクトル幅調整機構40の動作指令値Vの変動は小さくなる。

【0037】

次に、時刻t1から時刻t2までの発振休止期間では、スペクトル幅は検出できないので、スペクトル幅調整機構40に動作指令値に応じた動作信号は送られず、スペクトル幅調整機構40は直前のバースト期間における最後の動作位置を維持する。ここでは、スペクトル幅調整機構40を動作させないので、図40(c)に示すようにスペクトル幅調整機構40の動作量は一定を維持する。一方、この間にレーザチャンバ20内の状態は変化し、図40(a)に示すように検出されるであろうスペクトル幅は徐々に一方向（ここでは太くなる方向）に変化する。

【0038】

そして、時刻t2直後のバースト期間では、発振休止期間中にずれた分だけに最初のパルスのスペクトル幅が太くなり、目標値より太い値が検出される。この検出値に基づいてスペクトル幅調整機構40に動作指令値に応じた動作信号が送られ、スペクトル幅調整機構40を制御するフィードバック制御が行われる。しかし、検出したスペクトル幅と目標値との開きが大きいと、スペクトル幅調整機構40の動作量を大きくしなければならないため、次のパルスまでにスペクトル幅調整機構40の動作が終了しない場合がある。この場合、次のパルスのレーザ光のスペクトル幅は目標値に達しない。このような状態でフィードバック制御が行われ、徐々にスペクトル幅が安定していく。

【0039】

以上のように様々な原因によって、バースト期間の1パルス目から所定パルスまでの不安定期間でレーザ光のスペクトル幅は許容範囲から外れる。すると、集積回路パターンの品質が悪化し、デバイスの製作ができなくなる。このことを防止するためには、不安定期間のパルス発振分を露光に使用しなければよいのであるが、そのようにすると十分な露光量を得るために1バーストのパルス数を増やさなければならず、生産効率の低下を招くことになる。

【0040】

10

20

30

40

50

本発明はこうした実状に鑑みてなされたものであり、バースト期間初期の不安定期間に出力されるレーザ光のスペクトル幅を目標値近くに安定させ、レーザ光のスペクトル幅を許容範囲内に収めることによって、集積回路パターンの品質悪化や生産効率の低下を防止することを目的とするものである。

【課題を解決するための手段】

【0041】

第1発明は、

狭帯域化したレーザ光を連続してパルス発振するバースト期間と発振休止する発振休止期間とを交互に繰り返して動作する狭帯域化レーザに、

レーザ光のスペクトル幅を変化させるスペクトル幅調整機構と、

前記スペクトル幅調整機構の動作を制御するレーザコントローラと、

発振休止期間の長さを計測する休止期間計測部と、

スペクトル幅と当該スペクトル幅が得られるような前記スペクトル幅調整機構の動作指令値とを互に対応付け、さらにそのスペクトル幅と動作指令値とを発振休止期間の長さに対応付けて記憶する指令値記憶部と、

を備えた狭帯域化レーザのスペクトル幅調整装置において、

前記レーザコントローラは、発振休止期間中においてもスペクトル幅調整機構の動作を制御し、発振休止期間中にスペクトル幅を制御し、

前記レーザコントローラは、バースト期間の初期の不安定期間に、

前記指令値記憶部が記憶している情報のうちから、

記憶されている発振期間の長さと、前記休止期間計測部で計測した発振休止期間の長さとは一致又は近似し、かつ、

記憶されているスペクトル幅と、スペクトル幅の目標値とが一致又は近似する

情報に対応する動作指令値を読み出し、

読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、

求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペクトル幅調整機構の動作を制御することによって、

スペクトル幅を制御し、

前記レーザコントローラは、前記不安定期間の後、フィードバック制御する

ことを特徴とする。

【0042】

第2発明は、第1発明において、

前記レーザコントローラは、発振休止期間中に、

前記指令値記憶部が記憶している情報のうちから、

記憶されている発振期間の長さと、前記休止期間計測部で計測した発振休止期間の長さとは一致又は近似し、かつ、

記憶されているスペクトル幅と、スペクトル幅の目標値とが一致又は近似する

情報に対応する動作指令値を読み出し、

読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、

求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペクトル幅調整機構の動作を制御する

ことを特徴とする。

第3発明は、第2発明において、

前記指令値記憶部は、スペクトル幅と動作指令値とをさらに狭帯域化レーザの繰り返し周波数と対応付けて記憶し、

前記レーザコントローラは、発振休止期間中に、

前記指令値記憶部が記憶している情報のうちから、

記憶されている繰り返し周波数と、繰り返し周波数とは一致又は近似し、かつ

記憶されている発振期間の長さと、直前の前記休止期間計測部で計測した発振休止期間の長さとは一致又は近似し、かつ

10

20

30

40

50

記憶されているスペクトル幅と、スペクトル幅の目標値とが一致又は近似する情報に対応する動作指令値を読み出し、
読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、
求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペクトル幅調整機構の動作を制御する
ことを特徴とする。

【0043】

第1、第2、第3発明は発振休止期間中に発振休止期間の長さに応じてスペクトル幅の変動を抑制することによって、不安定期間のレーザー光のスペクトル幅を安定させる装置に関する。

10

【0044】

狭帯域化したレーザー光を連続してパルス発振するバースト期間と発振休止する発振休止期間とを交互に繰り返して動作する狭帯域化レーザーは、レーザーチャンバから出力されたレーザー光のスペクトル幅（例えばE95幅）をアクチュエータの動作によって調整するスペクトル幅調整機構と、そのアクチュエータの動作指令値を出力するレーザーコントローラと、その動作指令値を記憶する指令値記憶部と、発振休止期間の長さを計測する休止期間計測部と、を備える。

【0045】

指令値記憶部は、動作指令値とスペクトル幅とを互いに対応付けて記憶しており、また互いに対応付けられた動作指令値とスペクトル幅とを、発振休止期間の長さと狭帯域化レーザーの繰り返し周波数と対応付けて記憶する。

20

【0046】

レーザーコントローラは、発振休止期間中に、休止期間計測部で計測される休止期間と繰り返し周波数と一致又は近似し、スペクトル幅の目標値と一致又は近似するスペクトル幅と、そのスペクトル幅に対応付けられている動作指令値とを指令値記憶部から読み出す。そして読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、求めた動作指令値に応じた動作信号をスペクトル幅調整機構に送信する。なお、スペクトル幅の目標値と一致するスペクトル幅が指令値記憶部にあれば、その際に読み出した動作指令値と求めた動作指令値は一致することになるが、スペクトル幅の目標値と一致するスペクトル幅が指令値記憶部になければ、その際に読み出した動作指令値と求めた動作指令値は一致する場合もあれば相違する場合もある。

30

【0047】

スペクトル幅調整機構のアクチュエータはレーザーコントローラから送信された動作信号に従って動作する。こうして発振休止期間の経過と共にスペクトル幅調整機構は制御される。

【0048】

なお、繰り返し周波数を一定にして動作する狭帯域化レーザーの場合は、指令値記憶部に繰り返し周波数を記憶させなくてもよい。

【0049】

第4の発明は、
狭帯域化したレーザー光を連続してパルス発振するバースト期間と発振休止する発振休止期間とを交互に繰り返して動作する狭帯域化レーザーに、
レーザー光のスペクトル幅を変化させるスペクトル幅調整機構と、
前記スペクトル幅調整機構の動作を制御するレーザーコントローラと、
発振休止期間の長さを計測する休止期間計測部と、
スペクトル幅と当該スペクトル幅が得られるような前記スペクトル幅調整機構の動作指令値とを互いに対応付け、さらにそのスペクトル幅と動作指令値とを発振休止期間の長さ
と対応付けて記憶する指令値記憶部と、
を備えた狭帯域化レーザーのスペクトル幅調整装置において、
前記レーザーコントローラは、バースト期間の初期の不安定期間に、

40

50

前記指令値記憶部が記憶している情報のうちから、
 記憶されている発振期間の長さ、前記休止期間計測部で計測した発振休止期間の
 長さ一致又は近似し、かつ、
 記憶されているスペクトル幅と、スペクトル幅の目標値とが一致又は近似する
 情報に対応する動作指令値を読み出し、
 読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、
 求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペ
 クトル幅調整機構の動作を制御することによって、
 スペクトル幅を制御し、
 前記レーザコントローラは、前記不安定期間の後、フィードバック制御する
 ことを特徴とする。

10

【0050】

第5の発明は、第4の発明において、
 スペクトル幅と当該スペクトル幅が得られるような前記スペクトル幅調整機構の動作指
 令値とを互いに対応付け、さらにそのスペクトル幅と動作指令値とを、パルス番号と対応
 付けて記憶する指令値記憶部と、
 レーザ光のスペクトル幅を検出するスペクトル幅検出部と、を備え、
 前記レーザコントローラは、1バースト期間の最初のパルスから所定のパルスまでの各
 パルス毎又は複数パルス毎に、
 前記指令値記憶部から、その時点のパルス番号に一致し、スペクトル幅の目標値と一
 致又は近似するスペクトル幅およびそのスペクトル幅に対応する動作指令値を読み出し、
 読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、
 求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペ
 クトル幅調整機構の動作を制御すると共に、
 前記スペクトル幅検出部で検出されたスペクトル幅と前記レーザコントローラで求め
 られた動作指令値とを互いに対応付け、さらにそのスペクトル幅と動作指令値とをその時
 点のパルス番号と対応付けて前記指令値記憶部に記憶させる
 ことを特徴とする。

20

第6の発明は、第5の発明において、
 発振休止期間の長さを計測する休止期間計測部を備え、
 前記指令値記憶部は、スペクトル幅と動作指令値とをさらに狭帯域化レーザの繰り返し
 周波数と発振休止期間の長さに対応付けて記憶し、
 前記レーザコントローラは、1バースト期間の最初のパルスから所定のパルスまでの各
 パルス毎又は複数パルス毎に、
 前記指令値記憶部から、その時点のパルス番号と狭帯域化レーザの繰り返し周波数と
 前記休止期間計測部で計測した直前の発振休止期間の長さ一致又は近似し、スペクトル
 幅の目標値と一致又は近似するスペクトル幅およびそのスペクトル幅に対応する動作指令
 値を読み出し、
 読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、
 求めた動作指令値に応じた動作信号を前記スペクトル幅調整機構に出力して当該スペク
 トル幅調整機構の動作を制御すると共に、
 前記スペクトル幅検出部で検出されたスペクトル幅と前記レーザコントローラで求め
 られた動作指令値とを互いに対応付け、さらにそのスペクトル幅と動作指令値とをその時
 点のパルス番号と狭帯域化レーザの繰り返し周波数と前記休止期間計測部で計測した直前
 の発振休止期間の長さに対応付けて前記指令値記憶部に記憶させる
 ことを特徴とする。

30

40

【0051】

第4、第5、第6発明は前回以前のバースト期間の際のデータに基づいて不安定期間の
 スペクトル幅制御を行うことによって、バースト期間初期の不安定期間におけるレーザ光
 のスペクトル幅を安定させる装置に関する。

50

【 0 0 5 2 】

狭帯域化したレーザ光を連続してパルス発振するバースト期間と発振休止する発振休止期間とを交互に繰り返して動作する狭帯域化レーザは、レーザチャンバから出力されたレーザ光のスペクトル幅（例えばE95幅）をアクチュエータの動作によって調整するスペクトル幅調整機構と、そのアクチュエータの動作指令値を出力するレーザコントローラと、その動作指令値を記憶する指令値記憶部と、発振休止期間の長さを計測する休止期間計測部と、レーザ光のスペクトル幅を検出するスペクトル幅検出部と、を備える。

【 0 0 5 3 】

指令値記憶部は、動作指令値とスペクトル幅とを互いに対応付けて記憶しており、また互いに対応付けられた動作指令値とスペクトル幅とを、パルス番号と狭帯域化レーザの繰り返し周波数と直前の発振休止期間の長さに対応付けて記憶する。

10

【 0 0 5 4 】

レーザコントローラは、バースト期間初期の不安定期間中に、その時点のパルス番号と休止期間計測部で計測された直前の休止期間の長さとして繰り返し周波数と一致又は近似し、スペクトル幅の目標値と一致又は近似するスペクトル幅と、そのスペクトル幅に対応付けられている動作指令値とを指令値記憶部から読み出す。そして読み出した動作指令値に基づいて実際に使用する動作指令値を求め、求めた動作指令値に応じた動作信号をスペクトル幅調整機構に送信する。なお、スペクトル幅の目標値と一致するスペクトル幅が指令値記憶部にあれば、その際に読み出した動作指令値と求めた動作指令値は一致することになるが、スペクトル幅の目標値と一致するスペクトル幅が指令値記憶部になければ、その際に読み出した動作指令値と求めた動作指令値は一致する場合もあれば相違する場合もある。

20

【 0 0 5 5 】

スペクトル幅調整機構のアクチュエータはレーザコントローラから送信された動作信号に従って動作する。こうしてパルス毎に発振休止期間の経過と共にスペクトル幅調整機構は制御される。そしてレーザ光のスペクトル幅はスペクトル幅検出部で検出される。

【 0 0 5 6 】

レーザコントローラは、求めた動作指令値をスペクトル幅検出部で検出されたスペクトル幅と互いに対応付け、また互いに対応付けた動作指令値とスペクトル幅をその時点のパルス番号と狭帯域化レーザの繰り返し周波数と直前の発振休止期間の長さに対応付けて記憶させる。

30

【 0 0 5 7 】

なお、繰り返し周波数を一定にして動作する狭帯域化レーザの場合は、指令値記憶部に繰り返し周波数を記憶させなくてもよい。また、発振休止期間を一定にして動作する狭帯域化レーザの場合は、指令値記憶部に発振休止期間の長さを記憶させなくてもよい。

【 発明の効果 】

【 0 0 5 8 】

第1、第2発明によれば、発振休止期間の長さに応じて発振休止期間中にスペクトル幅制御を行うので、発振休止期間中のスペクトル幅の変動によって発生する不安定期間におけるスペクトル幅の目標値と計測値のずれが小さくなる。このため、不安定期間におけるスペクトル幅が1パルス目から比較的安定し許容範囲内に収まる。その結果、集積回路パターンの品質悪化を防止でき、またバースト1パルス目から露光に使用できるので生産効率の低下を防止できる。

40

【 0 0 5 9 】

第3、第4発明によれば、前回以前の不安定期間に計測されたスペクトル幅の計測値とそのときのスペクトル幅調整機構の動作指令値といった実績に基づいて不安定期間中にスペクトル幅制御を行うので、不安定期間におけるスペクトル幅の目標値と計測値のずれが小さくなる。このため、不安定期間におけるスペクトル幅が1パルス目から比較的安定し許容範囲内に収まる。その結果、集積回路パターンの品質悪化を防止でき、またバースト1パルス目から露光に使用できるので生産効率の低下を防止できる。

50

【図面の簡単な説明】

【0060】

【図1】狭帯域化レーザ装置のスペクトル幅を調整するための装置構成の一構成例を示す図。

【図2】第1の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成および出力カブラとスペクトル幅調整機構とレーザチャンバと狭帯域化モジュールの位置関係を示す図。

【図3】第2の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す図。

【図4】第2の形態に係るスペクトル幅調整機構を用いた場合の平凹シリンドリカルレンズ101の相対位置とE95幅およびレーザ出力相対値の関係を示す図。

【図5】第3の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成およびスペクトル幅調整機構とレーザチャンバと狭帯域化モジュールの位置関係を示す図。

10

【図6】スペクトル幅調整部がレーザチャンバのリア側に設けられた様子を示す図。

【図7】第4の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す図。

【図8】第4の形態に係るスペクトル幅調整部が狭帯域化モジュールに設けられた様子を示す図。

【図9】第5の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す図。

【図10】第5の形態に係るスペクトル幅調整部が狭帯域化モジュールに設けられた様子を示す図。

【図11】第6の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す図。

【図12】第7の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す図。

20

【図13】ダブルチャンバシステムのMOにE95幅調整部を設けられた様子を示す図。

【図14】第8の形態に係るスペクトル幅調整機構とレーザチャンバと狭帯域化モジュールの位置関係を示す図。

【図15】第8の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す図。

【図16】ダブルチャンバシステムのPOとMOの間にE95幅調整部を設けられた様子を示す図。

【図17】MOとPOの間にシリンドリカルレンズが配置された様子を示す図。

【図18】MOとPOの間にプリズムが配置された様子を示す図。

【図19】MOとPOの間にスリットが配置された様子を示す図。

【図20】第1のケースにおける時間経過に応じたE95幅の変化とバーストON・OFFの変化とスペクトル幅調整機構の動作動作指令値の変化とを示す図。

30

【図21】第2のケースにおける時間経過に応じたE95幅の変化とバーストON・OFFの変化とスペクトル幅調整機構の動作量の変化とを示す図。

【図22】第3のケースにおける時間経過に応じたE95幅の変化とバーストON・OFFの変化とスペクトル幅調整機構の動作量の変化とを示す図。

【図23】「メインルーチン」の処理フローを示す図。

【図24】「調整発振によるE95幅制御データ取得サブルーチン」の処理フローを示す図。

【図25】「E95幅制御サブルーチン」の処理フローを示す図。

【図26】「発振休止中スペクトル幅調整機構ドライブサブルーチン」の処理フローを示す図。

40

【図27】「不安定期間E95幅予測制御サブルーチン」の処理フローを示す図。

【図28】「記憶されたE95幅E95_k、f、Tと動作指令値V_k、f、Tを読み出すサブルーチン」の処理フローを示す図。

【図29】「E95に基づき使用する動作指令値V_k、f、Tを計算するサブルーチン」の処理フローを示す図。

【図30】「安定期間E95幅フィードバック制御サブルーチン」の処理フローを示す図。

。

【図31】各パルス毎および複数パルス毎にスペクトル幅調整機構を制御する場合のE95幅および動作指令値を時間経過と共に示す図。

50

- 【図32】FWHMおよびE95幅を説明するための図。
 【図33】パルスの経過に応じたスペクトル幅の変化を示す図。
 【図34】レーザチャンバの構造を示す図。
 【図35】繰り返し周波数とE95幅との関係を示す図。
 【図36】放電電極間の放電の様子と放電による光の透過面を示す図。
 【図37】プリズムを透過する光の波面が変化する様子を示す図。
 【図38】レーザ光がスリットを通過する様子を示す図。
 【図39】一般的な狭帯域化レーザにおけるスペクトル幅制御システムのブロック図。
 【図40】従来技術における時間経過に応じたスペクトル幅の変化とバーストON・OFFの変化とスペクトル幅調整機構の動作量の変化とを示す図。

10

【発明を実施するための形態】

【0061】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。なお、スペクトル幅にはFWHMやE95幅等があるが、本発明は如何なるスペクトル幅の場合にも適用可能である。以下の説明ではスペクトル幅の具体例として主にE95幅を用いている。

【0062】

本発明の特徴は、大きくは、発振休止期間中にスペクトル幅を制御する点と、不安定期間に予め記憶した動作指令値に応じてスペクトル幅を制御する点にある。何れか一方の制御を行うことによって不安定期間のスペクトル幅を安定させることが期待できるが、以下では両制御を共に行う実施形態を説明する。

20

【0063】

先ず、本実施形態の装置構成を図1を用いて説明する。

図1は狭帯域化レーザ装置のスペクトル幅を調整するための装置構成の一構成例を示す。

【0064】

図1に示すように、狭帯域化レーザ装置1においては、レーザチャンバ20のリア側(図面右側)の光路上にはスリット90rおよび狭帯域化モジュール30が配置され、レーザチャンバ20のフロント側(図面左側)の光路上にはスリット90fおよびスペクトル幅調整機構40が配置され、スペクトル幅調整機構40のフロント側(図面左側)の光路上には入射面にPR膜がコーティングされ出射面にAR膜がコーティングされた出力カプラ50と、モニタモジュール60とが配置されている。狭帯域化モジュール30と出力カプラ50は共振器を構成する。

30

【0065】

レーザチャンバ20の内部には、所定距離だけ離隔し、互いの長手方向が平行であって、かつ放電面が対向する一対の放電電極21、22が設けられている。また、レーザチャンバ20におけるレーザ光の光軸上にあつて、レーザ光出力部分には、ウインドウ23、24が設けられている。ウインドウ23、24は、レーザ光に対する透過性を有する材料、例えばCaF₂等によって構成されている。両ウインドウ23、24は、外側の面が互いに平行に配置され、また、レーザ光に対して反射損失を低減すべくブリュースタ角で設置される。

40

【0066】

レーザチャンバ20にはレーザ媒質としてレーザガスが封入される。F₂レーザの場合にレーザガスは、F₂ガスと、HeやNe等からなるバッファガスとの混合ガスである。KrFエキシマレーザの場合にレーザガスは、KrガスおよびF₂ガスと、HeやNe等からなるバッファガスの混合ガスである。ArFエキシマレーザの場合にレーザガスは、ArガスおよびF₂ガスと、HeやNe等からなるバッファガスの混合ガスである。各ガスは、図示しないガス供給・排出機構によって供給と排出が制御される。

【0067】

レーザチャンバ20に設けられた放電電極21、22は電源回路70によって高電圧が印加される。放電電極21、22間の電圧が所定電圧を越えると放電が発生する。すると

50

、レーザチャンバ20内のレーザガスは励起されて高エネルギー準位に移行した後に、低エネルギー準位に移行する。このとき光が放出される。

【0068】

狭帯域化モジュール30には、プリズムビームエキスパンダ(以下、「プリズム」という)32、33と波長分散素子であるグレーティング31等の光学素子が設けられている。図1には2つのプリズムが設けられているが、その数は自由である。グレーティング31やプリズム32、33は固定部材を介して狭帯域化モジュール30の筐体に固定されるが、回転自在にして固定される場合もある。この場合、プリズム32やグレーティング31は図示しない回転機構に固定される。回転機構の駆動によってグレーティング31やプリズム32、33に対するレーザ光の入射角度が変化する。また、狭帯域化モジュール30は、波長分散素子であるエタロンと全反射ミラー等の光学素子で構成される場合もある。

10

【0069】

スペクトル幅調整機構40はレーザ光のスペクトル幅を調整するための光学素子とこの光学素子を駆動するアクチュエータとを有する。図1ではレーザチャンバ20のフロント側にスペクトル幅調整機構40が設けられているが、この配置に限定する必要はない。単一のレーザチャンバを備えたレーザ装置であれば、共振器内にスペクトル幅調整機構40が配置されていればよい。また、複数のレーザチャンバを具えた所謂ダブルチャンバシステムのレーザ装置であれば、発振段レーザの共振器内又は発振段レーザと増幅段レーザの間にスペクトル幅調整機構40が配置されていればよい。スペクトル幅調整機構40の構成および配置には幾つかの形態が考えられるため、図2～図19を用いてまとめて後述する。

20

【0070】

モニタモジュール60にはビームスプリッタ61とモニタ62とが設けられている。モニタ62はE95幅や中心波長を検出するモニタと、レーザ光のエネルギーを検出するモニタとからなる。E95幅や中心波長を検出するモニタは、例えば、拡散板、エタロン、集光レンズ、ラインセンサ等を有するエタロン分光器を有する。モニタモジュール60に入射したレーザ光はビームスプリッタ61で分割され、一部がモニタ62に入射し、残りが外部に出射される。モニタ62では出力レーザ光のパルスエネルギー、中心波長及びスペクトル線幅が検出される。

30

【0071】

レーザコントローラ80は、電源回路70の充電電圧の指令値に応じた信号を出力してレーザのパルスエネルギーを制御する。また、レーザコントローラ80は、モニタモジュール60のモニタ62で検出された中心波長に基づいて、狭帯域化モジュール30内の各光学素子が固定されている回転機構を駆動するための指令値に応じた信号を出力してレーザの中心波長を制御する。また、レーザコントローラ80は、スペクトル幅の目標値、パルス番号、繰り返し周波数、発振休止時間といったパラメータを使用して、指令値記憶部11に記憶されているスペクトル幅とそのスペクトル幅に対応するスペクトル幅調整機構40の動作指令値を読み出し、この動作指令値に基づき実際にスペクトル幅調整機構40を制御するために使用する動作指令値を求め、求めた動作指令値に応じた動作信号をドライバ10に出力してスペクトル線幅を制御する。

40

【0072】

ドライバ10はスペクトル幅調整機構40に設けられた個々のアクチュエータ毎に設けられ、レーザコントローラ10から出力された動作指令値に応じて対応するアクチュエータを動作させる。

【0073】

指令値記憶部11は、1バースト期間の最初のパルスから所定のパルスまでの各パルス番号kと繰り返し周波数fと発振休止期間の長さT毎に、スペクトル幅とそのスペクトル幅が得られるようなスペクトル幅調整機構40の動作指令値とを互いに対応付けて記憶する。スペクトル幅として例えばE95幅を採用し、動作指令値として例えばアクチュエー

50

タの駆動電圧値 V を採用したとすると、記憶される情報は $E95_{k, f, T}$ 、 $V_{k, f, T}$ のように表される。これは「繰り返し周波数が f で直前の発振休止期間の長さが T である k パルス目の動作指令値を $V_{k, f, T}$ としたときに $E95$ 幅は $E95_{k, f, T}$ となる」ことを示している。すなわち $E95$ 幅と動作指令値との対応関係は、 $E95 - V$ 曲線としても表される。情報の記憶方法はこれに限るものでなく、例えば、スペクトル幅 $E95$ 、動作指令値 V 、パルス番号 k 、繰り返し周波数 f 、発振休止期間の長さ T を相互に対応させたテーブルを用意してもよい。

【0074】

また、指令値記憶部11は、1バースト期間の所定のパルスから最後のパルスまでに関しては、スペクトル幅例えば $E95$ 幅 $E95$ と動作指令値例えば駆動電圧値 V との対応関係を示す $E95 - V$ 曲線を記憶する。

10

【0075】

なお、繰り返し周波数を一定にして動作する狭帯域化レーザの場合は、指令値記憶部11に繰り返し周波数 f を記憶させなくてもよい。また、発振休止期間を一定にして動作する狭帯域化レーザの場合は、指令値記憶部11に発振休止期間の長さ T を記憶させなくてもよい。

【0076】

休止期間計測部12は、バースト期間の最後のパルス発振時に露光装置2から狭帯域化レーザ装置1に出力されるレーザ発振トリガを検出した時点から、次のバースト期間の最初のパルス発振時に露光装置2から狭帯域化レーザ装置1に出力されるレーザ発振トリガを検出する時点までの経過時間、すなわち発振休止期間の長さ T を計測する。

20

【0077】

露光装置2は、狭帯域化レーザ装置1にステップアンドリピートまたはステップアンドスキップの動作に応じてレーザ発振トリガを出力し、また、次のバースト期間で目標とする繰り返し周波数を指示する信号を出力する。

【0078】

シャッタ3は、狭帯域化レーザ装置1の出射口に設けられており、狭帯域化レーザ装置1のレーザコントローラ80から出力される開閉指令に応じて開閉動作する。

【0079】

次に、図1に示すスペクトル幅調整機構40の具体的な構成および配置の形態について、図2～図19を用いて説明する。

30

【0080】

図2は第1の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成および出力カブラとスペクトル幅調整機構とレーザチャンバと狭帯域化モジュールの位置関係を示す。図2(a)は上面図であり、図2(b)は側面図である。第1の形態は二つのレンズの間隔を変化させて光の波面を調整するものである。光の波面はシリンダリカル形状であり、そのシリンダリカル形状の頂点を結ぶ直線をレーザ共振器内の波長選択素子(グレーティング)の波長分散面に対して略垂直にし、シリンダリカル状の光の波面の曲率を変化させることにより、レーザの $E95$ 幅を変化させることができる。波長分散面とは、図2において、グレーティング31の回折面に形成された多数の溝に直交する方向を x 軸とし、グレーティング31の回折面に形成された多数の溝と平行する方向を y 軸とし、グレーティング31の回折面に直交する方向を z 軸とした場合の xz 平面と一致する。

40

【0081】

図2に示すスペクトル幅調整機構40は、互いに離隔して対向し離隔距離が調整自在であるシリンダリカル凹レンズ41およびシリンダリカル凸レンズ42を有する。シリンダリカル凹レンズ41およびシリンダリカル凸レンズ42は、中心軸がレーザ共振器内の光路上に位置するように、また機械軸がグレーティング31の波長分散面に対して略垂直になるように配置される。シリンダリカル凹レンズ41およびシリンダリカル凸レンズ42の中心軸とは、シリンダリカル面の曲率半径の中心を結ぶ直線である。シリンダリカル凹レンズ41の機械軸とは、当該レンズの凹部の最も凹んだ位置を結ぶ直線である。シリン

50

ドリカル凸レンズ42の機械軸とは、当該レンズの凹部の最も高い位置を結ぶ直線である。シリンドリカル凹レンズ41は移動プレート43の上面に固定される。移動プレート43は1軸ステージ44に形成されたりニアガイド45に沿って移動自在である。1軸ステージ44はリニアガイド45の延在方向が光軸と平行になるように配置される。

【0082】

移動プレート43の一側面には凸状に突き出た凸部43aが形成されており、凸部43aの正面にはPZT素子48の一端が当接し、凸部43aの背面には突起部47の頭部が当接している。PZT素子48の他端にはパルスモータ46の頭部が当接している。パルスモータ46およびPZT素子48はリニアガイド45の延在方向に伸縮自在であり、伸張によって凸部43aに対して突起部47方向の押圧力を与える。また、突起部47はリニアガイド45の延在方向に伸縮自在のバネが頭部に接続されており、このバネによって凸部43aに対してパルスモータ46およびPZT素子48方向の付勢力を与える。したがって、パルスモータ46およびPZT素子48はコントローラ80からドライバ10を介して送信される指令値に応じた動作信号を入力することによって伸縮し、それにとまない移動プレート43はリニアガイド45に沿って移動する。

10

【0083】

なお、図2ではパルスモータ46およびPZT素子48が設けられる例を示しているが、何れか一方のみが設けられていてもよい。パルスモータ46は駆動範囲が大きいというメリットを有する反面、応答性があまり良くないというデメリットを有する。PZT素子48は応答性が良いというメリットを有する反面、駆動範囲が小さいというデメリットを有する。そこで、この両者を設ければ互いのデメリットをカバーしあい、駆動範囲が大きく且つ応答性が良い機構を得ることができる。以下で説明する他の形態においても同様のことがいえる。

20

【0084】

スペクトル幅調整機構40とレーザチャンバ20と狭帯域化モジュール30は図2に示すような向きに配置される。すなわち、狭帯域化モジュール30に設けられたシリンドリカル凹レンズ41およびシリンドリカル凸レンズ42の各シリンドリカル面の曲率半径中心がレーザ光軸上にあり、かつシリンドリカル凹レンズ41およびシリンドリカル凸レンズ42の各機械軸がグレーティング31の回折面に形成された多数の溝と平行となるように、スペクトル幅調整機構40とレーザチャンバ20と狭帯域化モジュール30が配置される。

30

【0085】

図3は第2の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す。図3(a)は上面図であり、図3(b)は側面図である。本実施形態では、図2に示すシリンドリカル凹レンズ41の代わりに平凹シリンドリカルレンズ101が設けられ、図2に示すシリンドリカル凸レンズ42の代わりに平凸シリンドリカルレンズ102が設けられている。平凹シリンドリカルレンズ101および平凸シリンドリカルレンズ102を除いた他の構成は図2に示す第1の形態と同一である。本実施形態の場合は、平凸シリンドリカルレンズ102が出力カプラの機能を有するため、図1に示す出力カプラ50は不要である。平凸シリンドリカルレンズ102の入射面(レーザチャンバに近い側の面)には反射防止(AR)膜がコーティングされ、出射面(レーザチャンバから遠い側の面)には部分反射(PR)膜がコーティングされている。平凹シリンドリカルレンズ101は両面に反射防止(AR)膜がコーティングされている。平凹シリンドリカルレンズ101および平凸シリンドリカルレンズ102の曲率半径中心がレーザ光軸上にあり、かつ平凹シリンドリカルレンズ101および平凸シリンドリカルレンズ102の各機械軸がグレーティング31の回折面に形成された多数の溝と平行となる点も図2に示す構成と同様である。

40

【0086】

図4は第2の形態に係るスペクトル幅調整機構を用いた場合の平凹シリンドリカルレンズ101の相対位置とE95幅およびレーザ出力相対値の関係を示す。図4においては、平凹シリンドリカルレンズ101と平凸シリンドリカルレンズ102とが所定距離だけ離

50

れた状態を相対位置の「1」としている。また、平凹シリンダリカルレンズ101の相対位置が増加すると共に、平凹シリンダリカルレンズ101が平凸シリンダリカルレンズ102から離れていくものとする。

【0087】

図4に示されるように、平凹シリンダリカルレンズ101の相対位置が増加するに伴い、E95幅は0.23μmから1.2μmまで単調増加した。一方、平凹シリンダリカルレンズ101の相対位置が1から9まで増加するに伴い、レーザ出力の相対値は0.42から1.63まで単調増加し、平凹シリンダリカルレンズ101の相対位置が9から11まで増加するに伴い、レーザ出力は1.63から1.2まで単調減少した。

【0088】

例えば、E95幅の目標値を0.4μmとする場合は、平凹シリンダリカルレンズ101の相対位置が4.2になるように調整する。この状態におけるレーザの出力の相対値は0.95となる。

【0089】

平凹シリンダリカルレンズ101の相対位置のうち、PZT素子48で駆動可能な範囲は±1程度であり、この範囲をE95幅に換算すると±0.1μm以上となる。つまり、PZT素子48で制御できるE95幅は±0.1μm程度であり、この値を超えて制御する必要がある場合は、パルスモータ46で平凹シリンダリカルレンズ101を駆動する。

【0090】

図5は第3の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成およびスペクトル幅調整機構とレーザチャンバと狭帯域化モジュールの位置関係を示す。図5は上面図である。第3の形態はシリンダリカルミラーの曲率を変化させて光の波面を調整するものである。

【0091】

図5に示すスペクトル幅調整機構40は、曲率が調整自在であるシリンダリカルミラー111を有する。本実施形態の場合は、シリンダリカルミラー111とレーザチャンバ20との間にはビームスプリッタ117が配置される。ここでビームスプリッタ117は出力カプラの機能を果たしている。シリンダリカルミラー111の背面の両端には二つのロッド112の一端が接続され、シリンダリカルミラー111の背面の中央にはPZT素子116を介してバネ113の一端が接続される。二つのロッド112の他端はシリンダリカルミラー111の背後に配置されたプレート114に接続され、バネ113の他端はシリンダリカルミラー111の背後に配置されたパルスモータ115の頭部に接続される。パルスモータ115はプレート114に対して固定される。パルスモータ115とPZT素子116の伸縮方向を同一である。

【0092】

シリンダリカルミラー111は、シリンダリカル面の曲率半径中心がレーザ光軸上にあり、かつシリンダリカル面の機械軸がグレーティング31の回折面に形成された多数の溝と平行になるように（つまり波長分散面に対して略垂直となるように）配置される。シリンダリカル面の機械軸の定義は、前記したシリンダリカル凹レンズ41等の機械軸の定義と同じである。

【0093】

パルスモータ115又はPZT素子116が伸張するとシリンダリカルミラー111の中央が押され、パルスモータ115又はPZT素子116が縮退するとシリンダリカルミラー111の中央が引っ張られる。こうしてシリンダリカルミラー111のシリンダリカル面の曲率が調整される。

【0094】

ここまではスペクトル幅調整機構をレーザチャンバのフロント側に配置する形態について説明した。しかし、図6に示すように、スペクトル幅調整機構40をレーザチャンバ20のリア側に配置してスペクトル幅を調整することも可能である。次にこの形態について説明する。

【0095】

10

20

30

40

50

図7は第4の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す。図7(a)、(b)は同一のスペクトル幅調整機構において、それぞれ異なるパターンの波面調整をした様子を示している。図7(a)、(b)に示すスペクトル幅調整機構40の構成は、多くの点で図2に示すスペクトル幅調整機構40と一致する。異なるのはシリンダカル凹レンズ121が移動プレートに固定されるのではなく、シリンダカル凸レンズ122が移動プレートに固定されている点である。

【0096】

図7に示すスペクトル幅調整機構40は、互いに離隔して対向し離隔距離が調整自在であるシリンダカル凹レンズ121およびシリンダカル凸レンズ122を有する。シリンダカル凹レンズ121とシリンダカル凸レンズ122は両面に反射防止(AR)膜がコーティングされている。シリンダカル凸レンズ122は、シリンダカル面の曲率半径中心がレーザ光軸上にあり、かつシリンダカル面の機械軸がグレーティング31の回折面に形成された多数の溝と平行になるように(つまり、機械軸が波長分散面と略直交するように)レーザチャンバ20のリア側に配置され、シリンダカル凹レンズ121はシリンダカル面の曲率半径中心がレーザ光軸上にあり、かつシリンダカル面の機械軸がグレーティング31の回折面に形成された多数の溝と平行になるように(つまり、機械軸が波長分散面と略直交するように)シリンダカル凸レンズ122のリア側に配置される。シリンダカル凸レンズ122は移動プレート123の上面に固定される。移動プレート123は1軸ステージ124に形成されたりニアガイド125に沿って移動自在である。1軸ステージ124はリニアガイド125の延在方向が光軸と平行になるように配置される。

【0097】

移動プレート123の一側面には凸状に突き出た凸部123aが形成されており、凸部123aの正面にはPZT素子128の一端が当接し、凸部123aの背面には突起部127の頭部が当接している。PZT素子128の他端にはパルスモータ126の頭部が当接している。パルスモータ126およびPZT素子128はリニアガイド125の延在方向に伸縮自在であり、伸張によって凸部123aに対して突起部127方向の押圧力を与える。また、突起部127はリニアガイド125の延在方向に伸縮自在のパネが頭部に接続されており、このパネによって凸部123aに対してパルスモータ126およびPZT素子128方向の付勢力を与える。したがって、パルスモータ126およびPZT素子128はコントローラ80からドライバ10を介して送信される指令値に応じた動作信号を入力することによって伸縮し、それとともに移動プレート123はリニアガイド125に沿って移動する。

【0098】

なお、図8に示すように、図7に示すスペクトル幅調整機構40を狭帯域化モジュール30に設けられたプリズム33とグレーティング31との間に設けても良い。

【0099】

図9は第5の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す。図9(a)、(b)は同一のスペクトル幅調整機構において、それぞれ異なるパターンの波面調整をした様子を示している。図9(a)、(b)に示すスペクトル幅調整機構40の構成は、多くの点で図5に示すスペクトル幅調整機構40と一致する。異なるのはビームスプリッタが存在しない点と、光の入射方向と反射方向とが異なるという点である。

【0100】

図9に示すスペクトル幅調整機構40は、曲率が調整自在であるシリンダカルミラー131を有する。シリンダカルミラー131の背面の両端には二つのロッド132の一端が接続され、シリンダカルミラー131の背面の中央にはPZT素子136を介してパネ133の一端が接続される。二つのロッド132の他端はシリンダカルミラー131の背後に配置されたプレート134に接続され、パネ133の他端はシリンダカルミラー131の背後に配置されたパルスモータ135の頭部に接続される。パルスモータ135はプレート134に対して固定される。パルスモータ135とPZT素子136の

伸縮方向を同一である。

【 0 1 0 1 】

シリンドリカルミラー 1 3 1 は、レーザ光の入射方向と反射方向とが異なるような向きにして配置される。シリンドリカルミラー 1 3 1 は、シリンドリカル面の機械軸がグレーティング 3 1 の回折面に形成された多数の溝と平行になるように配置される。シリンドリカル面の機械軸の定義は、前記したシリンドリカル凹レンズ 4 1 等の機械軸の定義と同じである。

【 0 1 0 2 】

パルスモータ 1 3 5 又は P Z T 素子 1 3 6 が伸張するとシリンドリカルミラー 1 3 1 の中央が押され、パルスモータ 1 3 5 又は P Z T 素子 1 3 6 が縮退するとシリンドリカルミラー 1 3 1 の中央が引っ張られる。こうしてシリンドリカルミラー 1 3 1 のシリンドリカル面の曲率が調整される。

10

【 0 1 0 3 】

なお、図 1 0 に示すように、図 9 に示すスペクトル幅調整機構 4 0 を狭帯域化モジュール 3 0 に設けられたプリズム 3 2 とプリズム 3 3 との間に設けても良い。

【 0 1 0 4 】

図 1 1 は第 6 の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す。第 6 の形態は狭帯域化モジュールに設けられたグレーティングの曲率を変化させて光の波面を調整するものであり、第 3、第 5 の形態に使用されるパルスモータ等の構造をグレーティングの曲率調整に適用するものである。

20

【 0 1 0 5 】

グレーティング 3 1 の背面の両端には二つのロッド 1 4 2 の一端が接続され、グレーティング 3 1 の背面の中央には P Z T 素子 1 4 6 を介してバネ 1 4 3 の一端が接続される。二つのロッド 1 4 2 の他端はグレーティング 3 1 の背後に配置されたプレート 1 4 4 に接続され、バネ 1 4 3 の他端はグレーティング 3 1 の背後に配置されたパルスモータ 1 4 5 の頭部に接続される。パルスモータ 1 4 5 はプレート 1 4 4 に対して固定される。

【 0 1 0 6 】

パルスモータ 1 4 5 又は P Z T 素子 1 4 6 が伸張するとグレーティング 3 1 の中央が押され、パルスモータ 1 4 5 又は P Z T 素子 1 4 6 が縮退するとグレーティング 3 1 の中央が引っ張られる。こうしてグレーティング 3 1 の多数の溝を直線状に維持した状態で回折面の曲率が調整される。

30

【 0 1 0 7 】

図 1 2 は第 7 の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示す。第 7 の形態は狭帯域化モジュールに設けられたプリズムの回転角度を変化させてグレーティング 3 1 に入射するビームの拡大倍率を調整するものである。入射するビームをグレーティング 3 1 の波長分散面と垂直な方向に拡大するとビーム広がり角度が小さくなるため、スペクトル幅が狭くなる。

【 0 1 0 8 】

プリズム 3 2 は回転プレート 1 5 1 に固定され、回転プレート 1 5 1 は回転ステージ 1 5 2 に軸支される。回転プレート 1 5 1 の側面には凸状に突き出た凸部 1 5 1 a が形成されており、凸部 1 5 1 a の正面には P Z T 素子 1 5 5 の一端が当接し、凸部 1 5 1 a の背面には突起部 1 5 4 の頭部が当接している。P Z T 素子 1 5 5 の他端にはパルスモータ 1 5 3 の頭部が当接している。パルスモータ 1 5 3 又は P Z T 素子 1 5 5 は伸張によって凸部 1 5 1 a に対して突起部 1 5 4 方向の押圧力を与える。また、突起部 1 5 4 は伸縮自在のバネが頭部に接続されており、このバネによって凸部 1 5 1 a に対してパルスモータ 1 5 3 および P Z T 素子 1 5 5 方向の付勢力を与える。したがって、パルスモータ 1 5 3 又は P Z T 素子 1 5 5 の伸縮によって回転プレート 1 5 1 は回転する。

40

【 0 1 0 9 】

プリズム 3 3 は回転プレート 1 5 6 に固定されているが、その構造はプリズム 3 2 が回転プレート 1 5 1 に固定される構造と同一であるため、説明を省略する。

50

【 0 1 1 0 】

スペクトル幅を調整する場合は、レーザの発振波長が変化しないようにしつつ、パルスモータ 1 5 3 又は P Z T 素子 1 5 5 を調整して回転プレート 1 5 1 およびプリズム 3 2 を回転させ、またパルスモータ 1 5 8 又は P Z T 素子 1 6 0 を調整して回転プレート 1 5 6 およびプリズム 3 3 を回転させる。この際、回転プレート 1 5 1 およびプリズム 3 2 の回転方向と回転プレート 1 5 6 およびプリズム 3 3 の回転方向を逆方向にし、さらにそれぞれの回転角度を一致させる。すると、プリズム 3 2、3 3 によるビーム拡大倍率が変化する。倍率が小さくなるとスペクトル幅は広くなり、倍率が大きくなるとスペクトル幅は狭くなる。

【 0 1 1 1 】

ところで、図 1 3 に示すように、本発明は二つのレーザチャンバを有する狭帯域化レーザ装置、所謂ダブルチャンバシステムにおいて E 9 5 幅を調整することも適用対象としている。次にダブルチャンバシステムにおけるスペクトル幅調整機構の形態について説明する。

【 0 1 1 2 】

例えば、ダブルチャンバシステムは、シードレーザ光を発生させる M O (発振段レーザ) 2 0 0 と、M O 2 0 0 から出力されたレーザ光を増幅する P O (増幅段レーザ) 3 0 0 とを有する。M O 2 0 0 においては、レーザチャンバ 2 2 0 のリア側に狭帯域化モジュール 2 3 0 が配置され、フロント側に出力カブラ 2 5 0 が配置される。狭帯域化モジュール 2 3 0 には、グレーティング 2 3 1 とプリズム 2 3 2、2 3 3 とが設けられる。P O 3 0 0 においては、レーザチャンバ 3 2 0 のリア側にリアミラー 3 3 1 が配置され、フロント側に出力カブラ 3 5 0 が配置される。この実施例ではリアミラー 3 3 1 は部分反射 (P R) 膜がコーティングされており、この膜の反射率は例えば 8 0 ~ 9 0 % となっている。

【 0 1 1 3 】

この実施例では M O 2 0 0 は出力カブラ 2 5 0 とスペクトル幅調整機構とレーザチャンバ 2 2 0 と狭帯域化モジュール 2 3 0 を有する。M O 2 0 0 から出力されたスペクトル幅が狭いレーザ光はミラー 5 0 1、5 0 2 で反射され、P O 3 0 0 に注入される。P O 3 0 0 内ではリアミラー 3 3 1 に裏面からシードレーザ光が注入され、一部はこのリアミラー 3 3 1 を透過し、増幅段のレーザのリアミラー 3 3 1 とレーザチャンバ 3 2 0 と出力カブラ 3 5 0 の間でシード光が共振して増幅され、レーザ発振する。P O 3 0 0 から出力されたレーザ光はビームスプリッタ 5 0 3 で分離され、一方のレーザ光は外部に出力され、他方のレーザ光はモニタモジュール 5 6 0 に入力される。モニタモジュール 5 6 0 では、ビームスプリッタ 5 6 1 でレーザ光が分離され、波長モニタ 5 6 2 でスペクトル幅や中心波長が検出され、エネルギーモニタ 5 6 3 でパルスエネルギーが検出される。

【 0 1 1 4 】

前述した第 1 ~ 第 7 の形態を M O 2 0 0 に設けられているレーザチャンバ 2 2 0 のフロント側又はリア側に設けてもよい。図 1 3 はダブルチャンバシステムに第 1 ~ 第 3 の形態を適用する場合の配置を示している。

【 0 1 1 5 】

図 1 4 は第 8 の形態に係るスペクトル幅調整機構とレーザチャンバと狭帯域化モジュールの位置関係を示す。図 1 5 は第 8 の形態に係るスペクトル幅調整機構の構成を示し、図 1 4 に示す A 方向からみたスペクトル幅調整機構を示している。第 8 の形態はスリットの間隔を調整するものである。

【 0 1 1 6 】

スペクトル幅調整機構 2 4 0 は、グレーティング 2 3 1 の分散方向に移動自在の 2 枚のブレード 4 0 1、4 0 2 によってスリットを形成する。ブレード 4 0 1 およびブレード 4 0 2 は図示しないリニアガイドレールに移動自在に取り付けられている。ブレード 4 0 1 はバネが内蔵されたプランジャネジ 4 0 3 によってブレード 4 0 2 方向の付勢力を受け、ブレード 4 0 2 はバネが内蔵されたプランジャネジ 4 0 4 によってブレード 4 0 1 方向の付勢力を受ける。ブレード 4 0 1 とブレード 4 0 2 の間には三角部材 4 0 5 の頭部が挿入

10

20

30

40

50

される。三角部材 405 はブレード 401、402 と同程度の厚みを持つ板状部材であり、レーザチャンバ 220 の放電方向と平行する方向に移動自在である。三角部材 405 の側面はブレード 401、402 に対して摺動自在に接し、三角部材 405 の底面は PZT 素子 407 の一端に接し、PZT 素子 407 の他端はパルスモータ 406 の頭部に接する。

【0117】

図 15 (b) に示すように、パルスモータ 406 又は PZT 素子 407 が伸張すると、三角部材 405 がブレード 401、402 間を進む。すると三角部材 405 の側面に沿ってブレード 401、402 が離隔する方向に移動する。図 15 (a) に示すように、パルスモータ 406 又は PZT 素子 407 が縮退すると、三角部材 405 がブレード 401、402 間から退く。すると三角部材 405 の側面に沿ってブレード 401、402 が接近する方向に移動する。このようにしてスリット間隔が変化する。

10

【0118】

グレーティング 231 が角度分散素子なので、分散方向に対して MO200 のレーザ発振する領域を調整することにより、MO200 のスペクトル幅を調整することができる。なお、図 14 の構成では第 8 の形態に係るスペクトル幅調整機構 240 をレーザチャンバ 220 のフロント側に配置しているが、第 8 の形態に係るスペクトル幅調整機構 240 をレーザチャンバ 220 のリア側や狭帯域化モジュール 230 の内部に配置してもよい。

【0119】

図 16 に示すように、ダブルチャンバシステムにおいては、MO200 と PO300 の間の光路にスペクトル幅調整機構 410 を配置してもよい。

20

【0120】

図 17 は MO と PO の間にシリンダリカルレンズが配置された様子を示す。

MO200 と PO300 の間の光路には平凸シリンダリカルレンズ 411 と平凹シリンダリカルレンズ 412 とが互いに対向して配置されている。平凸シリンダリカルレンズ 411 と平凹シリンダリカルレンズ 412 の何れかは光軸に沿って移動自在にされている。移動機構としては例えば図 2 に示す機構と同一のものを用いればよい。また、平凸シリンダリカルレンズ 411 と平凹シリンダリカルレンズ 412 の代わりに、シリンダリカル凸レンズとシリンダリカル凹レンズを用いてもよい。

【0121】

一般に分散素子をレーザ共振器内に配置すると、出力されるレーザビームの波長分布は、分散素子の分散方向に沿って分布する。例えば、図 17 において、紙面を含む平面の方向が発振段レーザの分散方向であるとすると、出力されたビームの波長分布はビームの位置に比例して発生する。そこで、平凸シリンダリカルレンズ 411 と平凹シリンダリカルレンズ 412 の間隔を調整すると、MO200 に搭載される分散素子 (グレーティング 231) の分散方向のビームのうち PO300 のレーザ共振器に有効に注入されるビームを調整することができる。結果として PO300 で増幅発振されるレーザ光のスペクトル幅を変化させることができる。平凸シリンダリカルレンズ 411 と平凹シリンダリカルレンズ 412 の間隔を調整することによってビームを分散方向に対して広げると、スペクトル幅は狭くなる。これに対して、平凸シリンダリカルレンズ 411 と平凹シリンダリカルレンズ 412 の間隔を調整することによってビームをグレーティング 231 の分散方向に対して狭めると、スペクトル幅は広くなる。

30

40

【0122】

図 18 は MO と PO の間にプリズムが配置された様子を示す。

MO200 と PO300 の間の光路には二つのプリズム 421、422 が配置されている。二つのプリズム 421、422 は回転自在にされている。回転機構としては例えば図 12 に示す機構と同一のものを用いればよい。

【0123】

プリズム 421 の回転方向とプリズム 422 の回転方向を逆方向にし、さらにそれぞれの回転角度を一致させる。すると、プリズム 421、422 によるビーム拡大倍率が変化

50

する。ビーム拡大倍率を調整することによって、P O 3 0 0 に注入されるビーム幅のうち、M O 2 0 0 に搭載される分散素子（グレーティング 2 3 1）の分散方向のビーム幅を調整することができ、P O 3 0 0 のレーザ共振器に注入されるスペクトル幅を変化させることができる。結果としてP O 3 0 0 で増幅発振されるレーザ光のスペクトル幅を変化させることができる。プリズム 4 2 1、4 2 2 の回転角度を調整することによってビームの拡大倍率を大きくすると、スペクトル幅は狭くなる。これに対して、プリズム 4 2 1、4 2 2 の回転角度を調整することによってグレーティング 2 3 1 の分散方向に対してビームの拡大倍率を小さくすると、スペクトル幅は広くなる。

【 0 1 2 4 】

図 1 9 は M O と P O の間にスリットが配置された様子を示す。

M O 2 0 0 と P O 3 0 0 の間の光路にはスリット 4 3 1 が配置されている。スリット 4 3 1 としては例えば図 1 5 と同一のものをいれればよい。

【 0 1 2 5 】

スリット 4 3 1 の間隔を調整することによって、P O 3 0 0 のレーザ共振器に注入されるスペクトル幅を変化させることができる。結果としてP O 3 0 0 で増幅発振されるレーザ光のスペクトル幅を変化させることができる。スリット 4 3 1 の間隔を広げると、スペクトル幅は広くなる。これに対して、スリット 4 3 1 の間隔を狭めると、スペクトル幅は狭くなる。P O 3 0 0 において、放電幅よりも狭いビームが注入されても、ビームに広がり角があれば、P O 3 0 0 の光共振器を光が往復することによって出力レーザ光は広がる

ことが可能である。

【 0 1 2 6 】

なお、本発明は三以上のレーザチャンバを有する狭帯域化レーザ装置に適用することも可能である。この場合もスペクトル幅調整機構を M O に設けたり、各段の間に設けたりすればよい。さらに、実施例ではダブルチャンバシステムとして M O P O 方式の例を示したが、本発明は、増幅段にレーザ共振器が設置されず、シード光をそのまま増幅する M O P A 方式のダブルチャンバシステムにも適用可能である。

【 0 1 2 7 】

次に、発振休止期間中にスペクトル幅調整機構 4 0 を制御した場合の動作指令値 V の変化と E 9 5 幅 E 9 5 の変化を、図 2 0 ~ 図 2 2 に示す 3 つケースのタイミングチャートを用いて説明する。なお、図 2 0 ~ 図 2 2 に示す形態では、レーザ発振中すなわちバースト期間のスペクトル幅調整機構 4 0 の制御は全て従来のフィードバック制御が行われているものとする。

【 0 1 2 8 】

第 1 のケースとして、基本的な動作すなわち発振休止期間中に E 9 5 幅の目標値 E 9 5 t や繰り返し周波数 f を一定にする場合の動作を説明する。

図 2 0 は第 1 のケースにおける時間経過に応じた E 9 5 幅の変化とバースト O N ・ O F F の変化とスペクトル幅調整機構の動作指令値の変化とを示す図である。

【 0 1 2 9 】

図 2 0 (b) に示すように、時刻 t 1 以前の期間および時刻 t 2 以降の期間がバースト O N 状態であり、この期間がバースト期間である。また、時刻 t 1 から時刻 t 2 までの期間がバースト O F F 状態であり、この期間が発振休止期間である。

【 0 1 3 0 】

時刻 t 1 までのバースト期間では、図 1 に示すモニタモジュール 6 0 はレーザ光の E 9 5 幅 E 9 5 を検出し、検出値 E 9 5 に応じた信号をレーザコントローラ 8 0 に送る。レーザコントローラ 8 0 は次回パルスの動作指令値 V を求め、動作指令値 V に応じたスペクトル幅調整機構 4 0 の動作信号をドライバ 1 0 に送る。ドライバ 1 0 は動作信号に従いスペクトル幅調整機構 4 0 を操作する。こうしてスペクトル幅調整機構 4 0 のフィードバック制御が行われる。ここでは図 2 0 (a) に示すように E 9 5 幅が安定した状態でフィードバック制御が行われており、図 2 0 (c) に示すようにスペクトル幅調整機構 4 0 の動作指令値 V の変動は小さくなる。

10

20

30

40

50

【 0 1 3 1 】

時刻 t_1 から時刻 t_2 までの発振休止期間では、休止期間計測部 12 は前回バースト期間の最後のレーザ発振トリガを検出した時を基点として経過時間 T を計測し、その計測値に応じた信号を常時又は一定期間毎にレーザコントローラ 80 に送る。レーザコントローラ 80 は計測された経過時間 T に基づいてスペクトル幅調整機構 40 の動作指令値 V を求め、その動作指令値 V に応じた動作信号をドライバ 10 に送る。ドライバ 10 は動作指令値 V に従いスペクトル幅調整機構 40 を操作する。図 20 (c) に示すように発振休止期間中もスペクトル幅調整機構 40 の動作指令値 V は常時調整されており、その結果、図 20 (a) に示すように発振休止期間中でも E 95 幅 E 95 は目標値 E 95 t と略一致する。なお前述したように、発振休止期間中の E 95 幅 E 95 というのは、仮に発振停止期間中の各時点でレーザ発振された場合に検出されるであろうレーザ光の E 95 幅 E 95 のことを意味する。

10

【 0 1 3 2 】

時刻 t_2 直後のバースト期間では、時刻 t_1 までのバースト期間と同様にスペクトル幅調整機構 40 のフィードバック制御が行われる。発振休止期間中にスペクトル幅調整機構 40 が操作されるため、発振休止期間直後の最初のパルス時にモニタモジュール 60 で検出されるレーザ光の E 95 幅 E 95 は目標値 E 95 t に近くなる。したがって、図 20 (a) に示すようにバースト期間の初期から E 95 幅 E 95 は比較的安定する。図 20 (c) に示すようにバースト期間の最初の数パルスはスペクトル幅調整機構 40 の動作指令値 V の変動は大きいですが、フィードバック制御が繰り返されるうちに変動は小さくなっていく。

20

【 0 1 3 3 】

第 2 のケースとして、発振休止期間中に E 95 幅の目標値 E 95 t を変更する場合の動作を説明する。

図 21 は第 2 のケースにおける時間経過に応じた E 95 幅の変化とバースト ON・OFF の変化とスペクトル幅調整機構の動作量の変化とを示す図である。

【 0 1 3 4 】

時刻 t_1 までのバースト期間では、図 20 を用いて説明した第 1 のケースの時刻 t_1 までのバースト期間と同様にスペクトル幅調整機構 40 のフィードバック制御が行われる。

【 0 1 3 5 】

時刻 t_1 から時刻 t_{a1} までの発振休止期間では、図 20 を用いて説明した第 1 のケースの時刻 t_1 から時刻 t_2 までの発振休止期間と同様に休止期間計測部 12 の計測値 T に応じてスペクトル幅調整機構 40 の制御が行われる。

30

【 0 1 3 6 】

発振休止期間中の時刻 t_{a1} で目標とする E 95 幅が E 95 t_1 から E 95 t_2 に変更されたとする。E 95 t_1 と E 95 t_2 の差が小さい場合は P Z T 素子の制御のみで対応できるが、E 95 t_1 と E 95 t_2 の差が大きい場合は P Z T 素子の制御のみでは対応できない。そこで、レーザコントローラ 80 は E 95 幅を目標値 E 95 t_2 まで大まかに近づけるための動作指令値 V_1 を求め、その動作指令値 V_1 に応じた動作信号をパルスモータのドライバに送る。パルスモータのドライバは動作指令値 V_1 に従いパルスモータを介してスペクトル幅調整機構 40 を操作する。時刻 t_{a2} でパルスモータの制御が終了したら、レーザコントローラ 80 は時刻 t_{a2} からの経過時間に基づいてスペクトル幅調整機構 40 の動作指令値 V_2 を求め、その動作指令値 V_2 に応じた動作信号を P Z T 素子のドライバに送る。P Z T 素子のドライバは動作指令値 V_2 に従い P Z T 素子を介してスペクトル幅調整機構 40 を操作する。

40

【 0 1 3 7 】

時刻 t_2 直後のバースト期間では、図 20 を用いて説明した第 1 のケースの時刻 t_2 直後のバースト期間と同様にスペクトル幅調整機構 40 のフィードバック制御が行われる。発振休止期間中に目標値 E 95 t が変更されても、スペクトル幅調整機構 40 が操作されるため、発振休止期間直後の最初のパルス時にモニタモジュール 60 で検出されるレーザ光

50

の E 9 5 幅 E 9 5 は目標値 E 9 5 t に近くなる。したがって、図 2 1 (a) に示すようにバースト期間の初期から E 9 5 幅 E 9 5 は比較的安定する。図 2 1 (c) に示すようにバースト期間の最初の数パルスはスペクトル幅調整機構 4 0 の動作指令値 V の変動は大きい、フィードバック制御が繰り返されるうちに変動は小さくなっていく。

【 0 1 3 8 】

第 3 のケースとして、発振休止期間中に繰り返し周波数 f を変更する場合の動作を説明する。

図 2 2 は第 3 のケースにおける時間経過に応じた E 9 5 幅の変化とバースト ON ・ OFF の変化とスペクトル幅調整機構の動作量の変化とを示す図である。

【 0 1 3 9 】

時刻 t 1 までのバースト期間では、図 2 0 を用いて説明した第 1 のケースの時刻 t 1 までのバースト期間と同様にスペクトル幅調整機構 4 0 のフィードバック制御が行われる。

【 0 1 4 0 】

時刻 t 1 から時刻 t a 1 までの発振休止期間では、図 2 0 を用いて説明した第 1 のケースの時刻 t 1 から時刻 t 2 までの発振休止期間と同様に休止期間計測部 1 2 の計測値 T に応じてスペクトル幅調整機構 4 0 の制御が行われる。

【 0 1 4 1 】

発振休止期間中の時刻 t a 1 で繰り返し周波数が f 1 から f 2 に変更されたとする。この場合、レーザコントローラ 8 0 は、図 3 5 に示すような E 9 5 幅の周波数特性に基づいて、繰り返し周波数 f 1 における E 9 5 幅 E 9 5 f 1 と繰り返し周波数 f 2 における E 9 5 幅 E 9 5 f 2 との差 $E 9 5 (= E 9 5 f 2 - E 9 5 f 1)$ を求め、E 9 5 幅が E 9 5 だけ変化するような動作指令値 V 1 を求め、その動作指令値 V 1 に応じた動作信号を P Z T 素子のドライバに送る。P Z T 素子のドライバは動作指令値 V 1 に従い P Z T 素子を介してスペクトル幅調整機構 4 0 を操作する。P Z T 素子は高速で動作するので、P Z T 素子の制御開始時刻 t a 1 と制御終了時刻 t a 1 はほぼ一致する。P Z T 素子の制御が終了したら、レーザコントローラ 8 0 は時刻 t a 1 からの経過時間に基づいてスペクトル幅調整機構 4 0 の動作指令値 V 2 を求め、その動作指令値 V 2 に応じた動作信号を P Z T 素子のドライバに送る。P Z T 素子のドライバは動作指令値 V 2 に従い P Z T 素子を介してスペクトル幅調整機構 4 0 を操作する。

【 0 1 4 2 】

時刻 t 2 直後のバースト期間では、図 2 0 を用いて説明した第 1 のケースの時刻 t 2 直後のバースト期間と同様にスペクトル幅調整機構 4 0 のフィードバック制御が行われる。発振休止期間中に繰り返し周波数 f が変更されても、スペクトル幅調整機構 4 0 が操作されるため、発振休止期間直後の最初のパルス時にモタモジュール 6 0 で検出されるレーザ光の E 9 5 幅 E 9 5 は目標値 E 9 5 t に近くなる。したがって、図 2 2 (a) に示すようにバースト期間の初期から E 9 5 幅 E 9 5 は比較的安定する。図 2 2 (c) に示すようにバースト期間の最初の数パルスはスペクトル幅調整機構 4 0 の動作指令値 V の変動は大きい、フィードバック制御が繰り返されるうちに変動は小さくなっていく。

【 0 1 4 3 】

次に、図 1 に示す構成を用いて発振休止期間中にスペクトル幅を制御した場合および不安定期間に予め記憶したスペクトル幅と動作指令値の実績に応じてスペクトル幅を制御する場合の処理フローを、図 2 3 ~ 図 3 0 に示すフローチャートを用いて説明する。

【 0 1 4 4 】

図 2 3 は「メインルーチン」の処理フローである。

「メインルーチン」は、実露光前に行われる「調整発振による E 9 5 幅制御データ取得サブルーチン」(ステップ 1 0 1) と、実露光中に行われる「E 9 5 幅制御サブルーチン」(ステップ 1 0 2) とからなる。1 バースト期間が終了する毎に E 9 5 幅が許容範囲を超えたか否かの判断が行われ(ステップ 1 0 3)、E 9 5 幅が許容範囲を超えていれば、改めて「調整発振による E 9 5 幅制御データ取得サブルーチン」(ステップ 1 0 1) が行われる(ステップ 1 0 3 判断 Y)。E 9 5 幅が許容範囲を超えていなければ、引き続き「

10

20

30

40

50

「E 9 5 幅制御サブルーチン」(ステップ 1 0 2)が行われる(ステップ 1 0 3 判断 N)。
【0 1 4 5】

「調整発振による E 9 5 幅制御データ取得サブルーチン」(ステップ 1 0 1)は、シャッタ 3 を閉じて調整発振を行いながら各バースト毎に繰り返し周波数 f や発振休止時間 T を変えていき、動作指令値記憶部 1 1 に記憶する E 9 5 幅 E 9 5 と動作指令値 V の初期情報を取得するサブルーチンである。

【0 1 4 6】

「E 9 5 幅制御サブルーチン」(ステップ 1 0 2)は、発振休止期間とバースト期間に E 9 5 幅を制御するサブルーチンである。

【0 1 4 7】

図 2 4 は図 2 3 に示される「調整発振による E 9 5 幅制御データ取得サブルーチン」の処理フローである。

このサブルーチンに入ると、レーザコントローラ 8 0 からシャッタ 3 にシャッタ閉を指令する露光禁止信号が送られ、シャッタ 3 が閉められる(ステップ 2 0 1)。

【0 1 4 8】

後のステップ(ステップ 2 0 4 ~ 2 0 8)で、レーザコントローラ 8 0 は動作指令値記憶部 1 1 にパルス番号 k と繰り返し周波数 f と発振休止期間の長さ T の各パラメータ毎の E 9 5 幅 $E 9 5_{k, f, T}$ と動作指令値 $V_{k, f, T}$ の初期値が記憶されるが、その前に各パラメータの範囲すなわち繰り返し周波数 f の範囲(最小値 f_{min} 、最大値 f_{max})およびこの範囲の刻み間隔 Δf と、発振休止期間の範囲(最小値 T_{min} 、最大値 T_{max})およびこの範囲の刻み間隔 ΔT と、不安定期間の最後のパルス番号(n)とを設定する(ステップ 2 0 2)。そして、各パラメータの初期値として、繰り返し周波数 $f = f_{min}$ 、発振休止期間 $T = T_{min}$ 、パルス番号 $k = 1$ を設定する(ステップ 2 0 3)。

【0 1 4 9】

その後、「E 9 5 幅制御サブルーチン」では、シャッタ 3 が閉じた状態で 1 バースト(発振休止期間 + バースト期間)のパルス発振が行われる。各パルスでレーザコントローラ 8 0 は動作指令値記憶部 1 1 に、動作指令値 $V_{1 \sim n, f, T}$ とそのときに検出された E 9 5 幅 $E 9 5_{1 \sim n, f, T}$ とを動作指令値記憶部 1 1 に記憶させる(ステップ 2 0 4)。1 バーストが終了すると、次の繰り返し周波数 $f = f + \Delta f$ を設定し、「E 9 5 幅制御サブルーチン」が行われる(ステップ 2 0 5)。レーザコントローラ 8 0 は、ステップ 2 0 4 ~ 2 0 5 の処理を繰り返し周波数 f が最大値 f_{max} を超えるまで繰り返し、動作指令値 $V_{1 \sim n, f_{min} \sim f_{max}, T}$ とそのときに検出された E 9 5 幅 $E 9 5_{1 \sim n, f_{min} \sim f_{max}, T}$ とを動作指令値記憶部 1 1 に記憶させる(ステップ 2 0 6 判断 N)。繰り返し周波数 f が最大値 f_{max} を超えたら(ステップ 2 0 6 の判断 Y)、次の発振休止期間 $T = T + \Delta T$ を設定し、「E 9 5 幅制御サブルーチン」が行われる(ステップ 2 0 7)。レーザコントローラ 8 0 は、ステップ 2 0 4 ~ 2 0 7 の処理を発振休止期間 T が最大値 T_{max} を超えるまで繰り返し、動作指令値 $V_{1 \sim n, f_{min} \sim f_{max}, T_{min} \sim T_{max}}$ とそのときに検出された E 9 5 幅 $E 9 5_{1 \sim n, f_{min} \sim f_{max}, T_{min} \sim T_{max}}$ とを動作指令値記憶部 1 1 に記憶させる(ステップ 2 0 7 判断 N)。

【0 1 5 0】

こうして、繰り返し周波数 f および発振休止期間 T がそれぞれ変更されて、各繰り返し周波数 f および各発振休止期間 T に対応するパルス毎の動作指令値 $V_{k, f, T}$ が、計測された E 9 5 幅 $E 9 5_{k, f, T}$ と共に記憶されていく。そして、発振休止期間 T が最大値 T_{max} を超えたら(ステップ 2 0 8 の判断 Y)、動作指令値の初期値は全て取得されたことになるので、レーザコントローラ 8 0 からシャッタ 3 にシャッタ開を指令する露光 OK 信号が送られ、調整発振は終了する(ステップ 2 0 9)。

【0 1 5 1】

図 2 5 は図 2 3、図 2 4 に示される「E 9 5 幅制御サブルーチン」の処理フローである。「E 9 5 幅制御サブルーチン」は、発振休止期間中に行われる「発振休止中スペクトル幅調整機構ドライブルーチン」(ステップ 3 0 1)と、バースト期間の不安定期間中に

10

20

30

40

50

行われる「不安定期間 E 9 5 幅予測制御サブルーチン」(ステップ 3 0 3)と、バースト期間の安定期間中に行われる「安定期間 E 9 5 幅フィードバック制御サブルーチン」(ステップ 3 0 4)とからなる。「発振休止中 E 9 5 幅調整機構ドライブサブルーチン」(ステップ 3 0 1)は、露光装置 2 から送られるレーザ発振トリガを狭帯域化レーザ装置 1 のレーザコントローラ 8 0 が受け取るまで続けられる(ステップ 3 0 2)。また「安定期間 E 9 5 幅フィードバック制御サブルーチン」(ステップ 3 0 4)はバースト期間が終了するまで続けられる(ステップ 3 0 5)。

【0152】

図 2 6 は図 2 5 に示される「発振休止中スペクトル幅調整機構ドライブサブルーチン」の処理フローである。

10

露光装置 2 で半導体の露光が行われる前に、露光装置 2 は狭帯域化レーザ装置 1 のレーザコントローラ 8 0 に、次回露光の繰り返し周波数 f と E 9 5 幅の目標値 $E 9 5 t$ を示す信号を送信する(ステップ 4 0 1)。休止期間計測部 1 2 は発振休止期間の長さ T を継続的に計測し、計測した長さ T を信号化してレーザコントローラ 8 0 に送信する(ステップ 4 0 2)。

【0153】

発振休止期間中のパルス番号 k はバースト 1 パルス目とみなせる。そこでレーザコントローラ 8 0 は、 $k = 1$ を設定した後(ステップ 4 0 3)、「記憶された E 9 5 幅 $E 9 5_k$ 、 f 、 T と動作指令値 V_k 、 f 、 T を読み出すサブルーチン」で、バースト 1 パルス目の制御のために、指令値記憶部 1 1 に記憶された E 9 5 幅 $E 9 5_k$ 、 f 、 T と動作指令値 V_k 、 f 、 T とを読み出す(ステップ 4 0 4)。

20

【0154】

次に、レーザコントローラ 8 0 は読み出された E 9 5 幅 $E 9 5_k$ 、 f 、 T とその時点の E 9 5 幅の目標値 $E 9 5 t$ との差 $E 9 5 = E 9 5_k$ 、 f 、 $T} - E 9 5 t$ を計算する(ステップ 4 0 5)。そして、「 $E 9 5$ に基づき使用する動作指令値 V_k 、 f 、 T を計算するサブルーチン」で、 $E 9 5$ と読み出された動作指令値 V_k 、 f 、 T とに基づいて、実際に使用する動作指令値 V_k 、 f 、 T を求め(ステップ 4 0 6)、求めた動作指令値 V_k 、 f 、 T に応じた動作信号をドライバ 1 0 に送信する(ステップ 4 0 7)。この動作信号に応じてスペクトル幅調整機構 4 0 は調整される。

【0155】

30

図 2 7 は図 2 5 に示される「不安定期間 E 9 5 幅予測制御サブルーチン」の処理フローである。

モニタモジュール 6 0 は 1 パルスのレーザ発振毎にレーザ光の E 9 5 幅を検出し、レーザコントローラ 8 0 に送信する(ステップ 5 0 1)。検出された E 9 5 幅 $E 9 5$ およびそのときのスペクトル幅調整機構 4 0 の動作指令値 V は、そのときのパルス番号 k 、繰り返し周波数 f 、直前の発振休止期間の長さ T と対応づけられて $E 9 5_k$ 、 f 、 T 、 V_k 、 f 、 T とされる。この $E 9 5_k$ 、 f 、 T 、 V_k 、 f 、 T は互いに対応付けられて、指令値記憶部 1 1 に記憶される(ステップ 5 0 2)。

【0156】

レーザコントローラ 8 0 は、次のパルス番号 $k = k + 1$ を設定した後(ステップ 5 0 3)、「記憶された E 9 5 幅 $E 9 5_k$ 、 f 、 T と動作指令値 V_k 、 f 、 T を読み出すサブルーチン」で、次のパルス発振時の制御のために、指令値記憶部 1 1 に記憶された E 9 5 幅 $E 9 5_k$ 、 f 、 T と動作指令値 V_k 、 f 、 T とを読み出す(ステップ 5 0 4)。

40

【0157】

次に、レーザコントローラ 8 0 は、読み出された E 9 5 幅 $E 9 5_k$ 、 f 、 T とその時点の E 9 5 幅の目標値 $E 9 5 t$ との差 $E 9 5 = E 9 5_k$ 、 f 、 $T} - E 9 5 t$ を計算する(ステップ 5 0 5)。そして、「 $E 9 5$ に基づき使用する動作指令値 V_k 、 f 、 T を計算するサブルーチン」で、 $E 9 5$ と読み出された動作指令値 V_k 、 f 、 T とに基づいて、実際に使用する動作指令値 V_k 、 f 、 T を求め(ステップ 5 0 6)、その動作指令値 V_k 、 f 、 T に応じた動作信号をドライバ 1 0 に送信する(ステップ 5 0 7)。この動作信号に

50

応じてスペクトル幅調整機構 40 は調整される。

【0158】

ステップ 501 ~ 507 の処理は、パルス番号 k が n を超えるまで、すなわち不安定期間が終了するまで繰り返される (ステップ 508)。

【0159】

図 28 は図 26、図 27 に示される「記憶された E95 幅 $E_{95k, f, T}$ と動作指令値 $V_{k, f, T}$ を読み出すサブルーチン」の処理フローである。

レーザコントローラ 80 は、その時点の繰り返し周波数 f と直前の発振休止期間の長さ T とを読み込む (ステップ 601)。

【0160】

そして、レーザコントローラ 80 は、その時点のパルス番号 k 、読み出した繰り返し周波数 f 、直前の発振休止期間の長さ T に基づいて、指令値記憶部 11 に記憶された情報の中から E95 幅の目標値 E_{95t} と一致するか又は近似する $E_{95k, f, T}$ と、その $E_{95k, f, T}$ と共に記憶されている $V_{k, f, T}$ を読み出す (ステップ 602)。なお、読み出した繰り返し周波数 f 及び直前の発振休止期間の長さ T は、 $E_{95k, f, T}$ 及び $V_{k, f, T}$ のパラメータである繰り返し周波数 f 及び発振休止期間の長さ T と完全に一致していなくてもよく、近似していればよい。ここで読み出された $E_{95k, f, T}$ と $V_{k, f, T}$ は、それぞれ $E_{95k, f, T}$ 、 $V_{k, f, T}$ とされる (ステップ 603)。

【0161】

図 29 は図 26、図 27 に示される「E95 に基づき使用する動作指令値 $V_{k, f, T}$ を計算するサブルーチン」の処理フローである。

指令値記憶部 11 に記憶された E95 幅 E_{95} と動作指令値 V との間には E95 - V 曲線がある。そこで、レーザコントローラ 80 はこの曲線のうち、図 28 に示される「記憶された E95 幅 $E_{95k, f, T}$ と動作指令値 $V_{k, f, T}$ を読み出すサブルーチン」の処理で求めた動作指令値 $V_{k, f, T}$ における勾配 $(dV/dE_{95}) =$ を計算する (ステップ 701)。なお、勾配の求め方は、指令値記憶部 11 に記憶された E95 - V 曲線から求めるのではなく、予め動作指令値 V と E95 幅 E_{95} の関係の微分曲線を記憶しておき、その微分曲線から直接勾配を求めるようにしてもよい。

【0162】

ステップ 701 に続き、レーザコントローラ 80 は、求めた勾配と、図 26 に示される「発振休止中スペクトル幅調整機構ドライブサブルーチン」の処理又は図 27 に示される「不安定期間 E95 幅予測制御サブルーチン」の処理で求めた E_{95} と、図 28 に示される「記憶された E95 幅 $E_{95k, f, T}$ と動作指令値 $V_{k, f, T}$ を読み出すサブルーチン」の処理で求めた動作指令値 $V_{k, f, T}$ とを用いて、実際に使用する動作指令値 $V_{k, f, T} =$ $\cdot E_{95} + V_{k, f, T}$ を求める (ステップ 702)。

【0163】

なお、ここで求める動作指令値 $V_{k, f, T}$ は、図 28 に示される「記憶された E95 幅 $E_{95k, f, T}$ と動作指令値 $V_{k, f, T}$ を読み出すサブルーチン」の処理のステップ 602 で、指令値記憶部 11 に目標値 E_{95t} と一致する $E_{95k, f, T}$ があつた場合は、結果としてその $E_{95k, f, T}$ と共に記憶されている $V_{k, f, T}$ に一致することになる。

【0164】

図 30 は図 25 に示される「安定期間 E95 幅フィードバック制御サブルーチン」の処理フローである。

モニタモジュール 60 は 1 パルスのレーザ発振毎にレーザ光の E95 幅を検出し、レーザコントローラ 80 に送信するとともに、レーザコントローラ 80 はそのときに使用した動作指令値 V を読み出す (ステップ 801)。

【0165】

次に、レーザコントローラ 80 は、検出された E95 幅 E_{95} とその時点の E95 幅の

10

20

30

40

50

目標値 E_{95t} との差 $E_{95} = E_{95} - E_{95t}$ を計算する (ステップ 802)。

【0166】

レーザコントローラ 80 は指令値記憶部 11 に記憶されている $E_{95} - V$ 曲線のうち、ステップ 801 で読み出した動作指令値 V における勾配 $(dV/dE_{95}) =$ を計算する (ステップ 803)。

【0167】

レーザコントローラ 80 は、求めた勾配 と、 E_{95} 幅の検出値 E_{95} と、ステップ 801 で読み出した動作指令値 V とを用いて、実際に使用する動作指令値 $V = \cdot E_{95} + V$ を求める (ステップ 804)。

【0168】

そして、レーザコントローラ 80 は、求めた動作指令値 V に応じた動作信号をドライバ 10 に送信する (ステップ 805)。この動作信号に応じてスペクトル幅調整機構 40 は調整される。

【0169】

スペクトル幅調整機構 40 が調整されると次のパルス発振が行われ (ステップ 806)、モニタモジュール 60 で検出された E_{95} 幅 E_{95} およびそのときのスペクトル幅調整機構 40 の動作指令値 V は互いに対応付けられて、指令値記憶部 11 に記憶される (ステップ 807)。

【0170】

以上、図 23 ~ 図 30 の処理は各パルス毎にスペクトル幅調整機構 40 を制御する形態について説明した。しかし、各パルス毎ではなく複数パルス毎にスペクトル幅調整機構 40 を制御するようにしてもよい。

【0171】

図 31 (a) は各パルス毎に検出される E_{95} 幅と検出される E_{95} 幅を複数パルス毎に平均化した E_{95} 幅とを時間経過と共に示す図であり、図 31 (b) は各パルス毎にスペクトル幅調整機構を制御する場合の動作指令値と複数パルス毎にスペクトル幅調整機構を制御する場合の動作指令値とを時間経過と共に示す図である。

【0172】

複数パルス毎にスペクトル幅調整機構 40 を制御する場合の処理フローは、パルス毎にスペクトル幅調整機構 40 を制御する場合の処理フロー (図 23 ~ 図 30) と大筋で一致し、各パルス毎にスペクトル幅調整機構 40 を制御するのではなく、複数パルス毎にスペクトル幅調整機構 40 を制御するようにすればよい。また、 E_{95} 幅をパルス毎の E_{95k} 、 f 、 T から複数パルスの平均値 $E_{av95k, f, T}$ に置き換えればよい。例えば p パルス毎の平均値 $E_{av95k, f, T}$ は、

$$E_{av95k, f, T} = (E_{95k-(p-1), f, T} + E_{95k-(p-2), f, T} + \dots + E_{95k-(p-p), f, T}) / p$$

という式で表される。

【0173】

ところで、 p パルス毎にスペクトル幅調整機構 40 を制御する場合は、バースト期間の 1 パルス目から $p - 1$ パルス目までの期間ではスペクトル幅調整機構 40 が制御されないことになる。しかし、このような場合であっても図 26 に示される「発振休止中スペクトル幅調整機構ドライブサブルーチン」が行われれば、発振休止中にもスペクトル幅調整機構 40 が制御されるので、バースト期間の 1 パルス目から $p - 1$ パルス目までの期間に検出される E_{95} 幅の目標値に対するずれは小さくなる。

【0174】

また、複数パルス毎に E_{95} 幅を平均化することにより、ノイズの影響を少なくすることができる。

【0175】

本実施形態によれば、発振休止期間の長さに応じて発振休止期間中にスペクトル幅制御を行うので、発振休止期間中のスペクトル幅の変動によって発生する不安定期間における

10

20

30

40

50

スペクトル幅の目標値と計測値のずれが小さくなる。このため、不安定期間におけるスペクトル幅が1パルス目から比較的安定し許容範囲内に収まる。その結果、集積回路パターン品質の品質悪化を防止でき、またバースト1パルス目から露光に使用できるので生産効率の低下を防止できる。

【0176】

また、本実施形態によれば、前回以前の不安定期間に計測されたスペクトル幅の計測値とそのときのスペクトル幅調整機構の動作指令値といった実績に基づいて不安定期間中にスペクトル幅制御を行うので、不安定期間におけるスペクトル幅の目標値と計測値のずれが小さくなる。このため、不安定期間におけるスペクトル幅が1パルス目から比較的安定し許容範囲内に収まる。その結果、集積回路パターン品質の品質悪化を防止でき、またバースト1パルス目から露光に使用できるので生産効率の低下を防止できる。

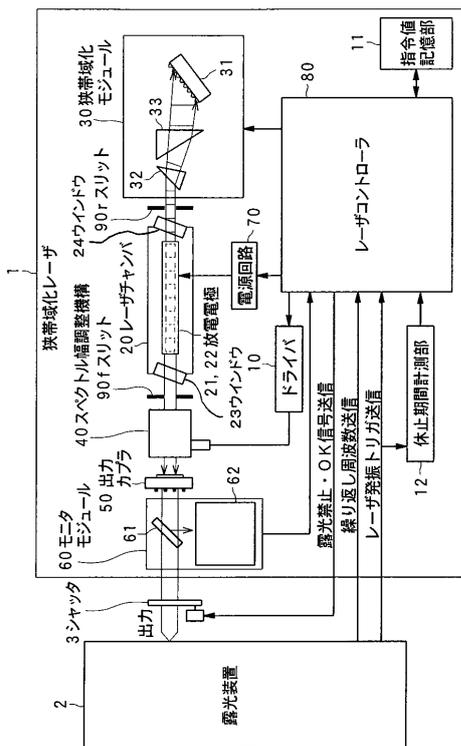
10

【符号の説明】

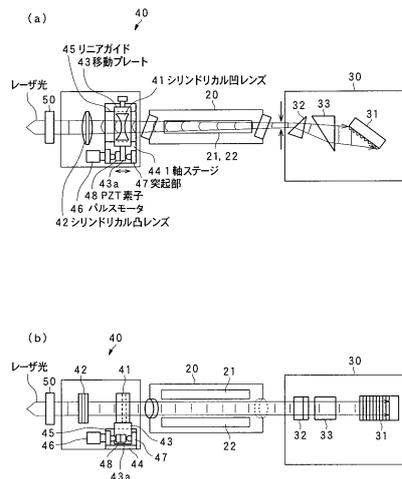
【0177】

- 1...狭帯域化レーザ 11...指令値記憶部 12...休止期間計測部
- 40...スペクトル幅調整機構 60...モナモジュール 80...レーザコントローラ

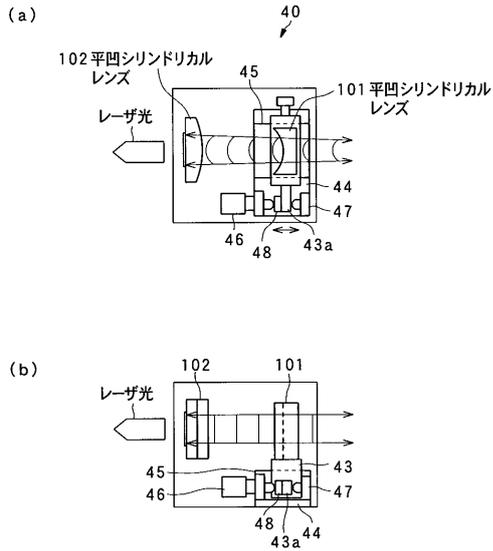
【図1】



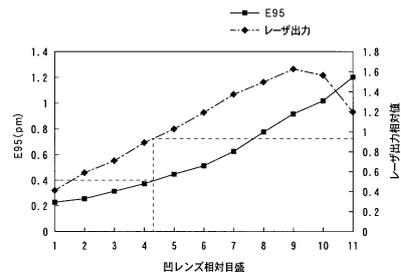
【図2】



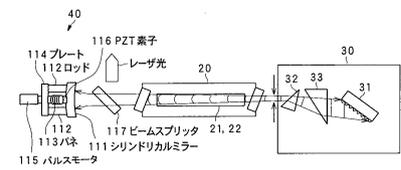
【図3】



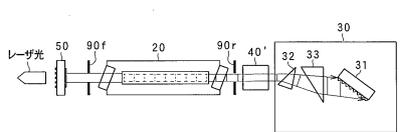
【図4】



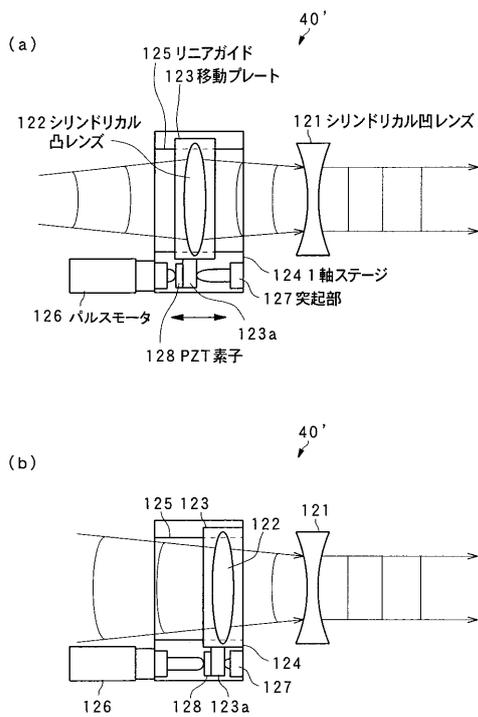
【図5】



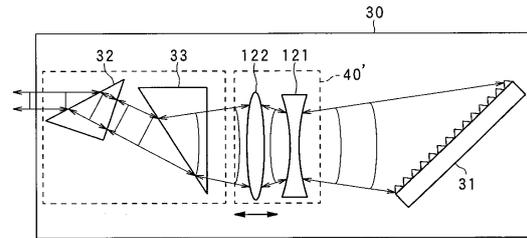
【図6】



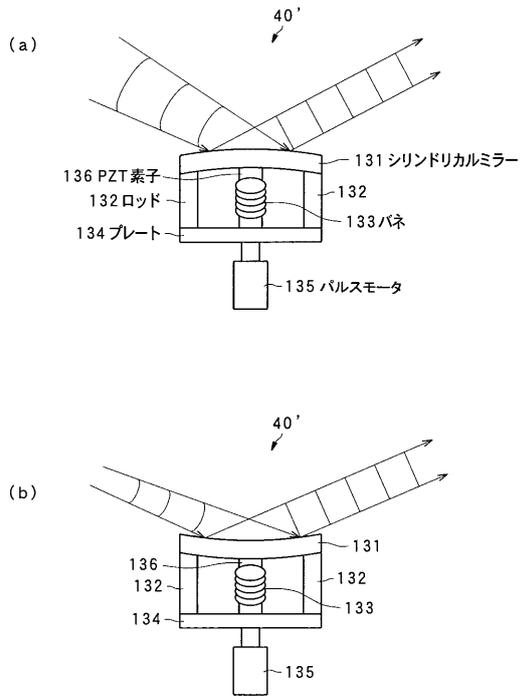
【図7】



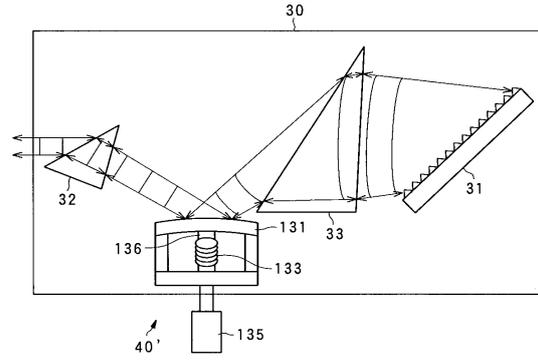
【図8】



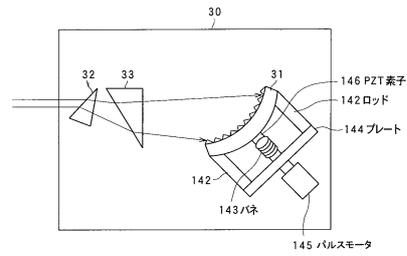
【図9】



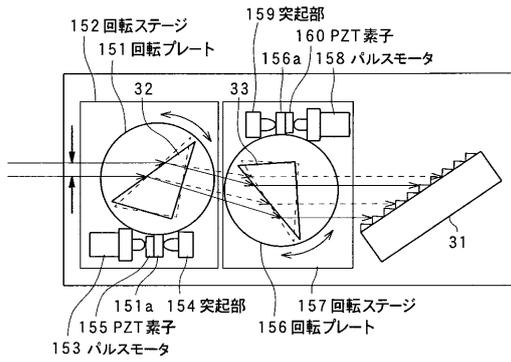
【図10】



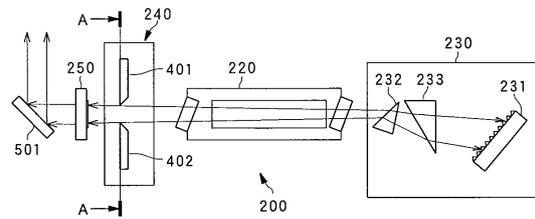
【図11】



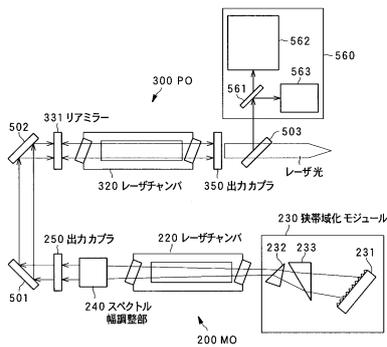
【図12】



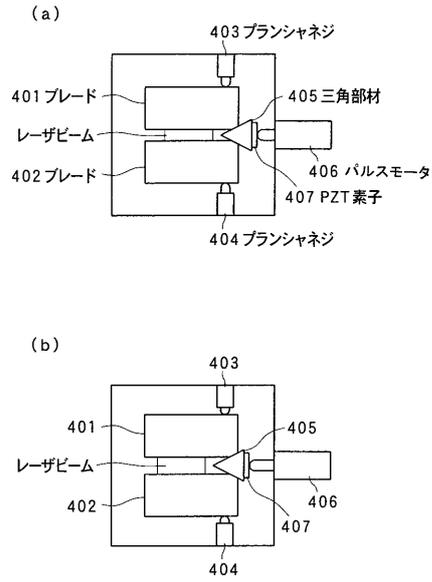
【図14】



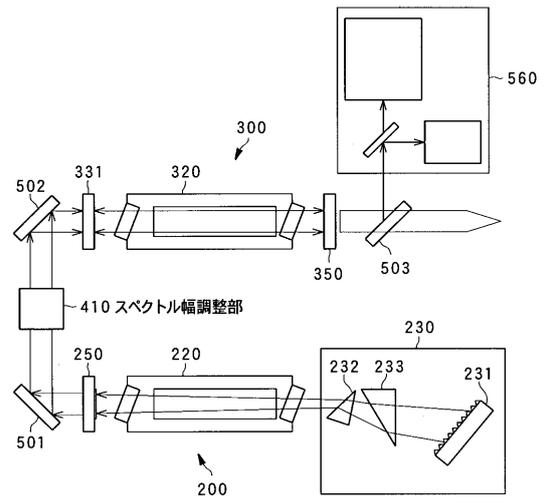
【図13】



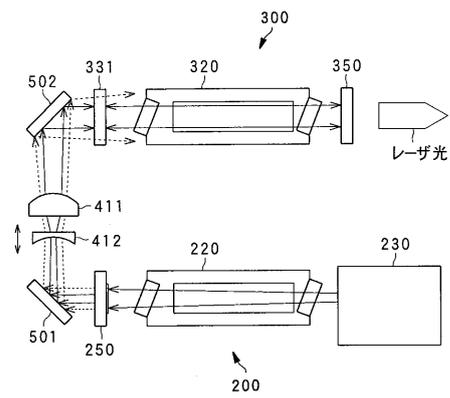
【図15】



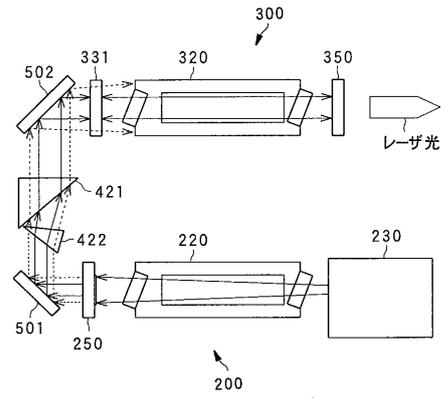
【図16】



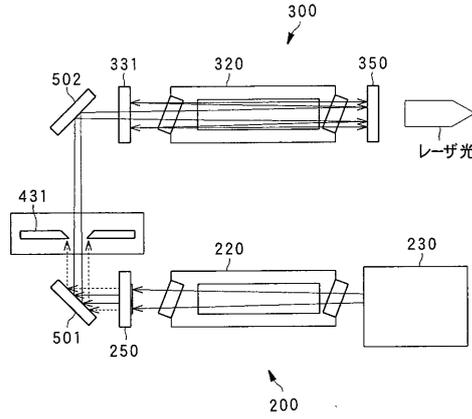
【図17】



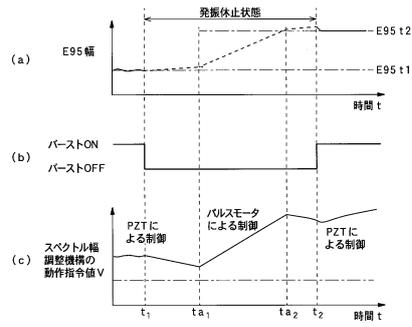
【図18】



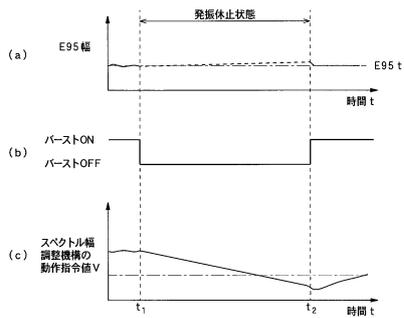
【図19】



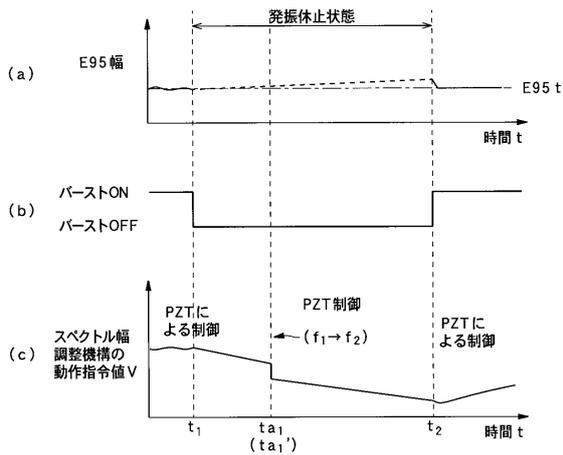
【図21】



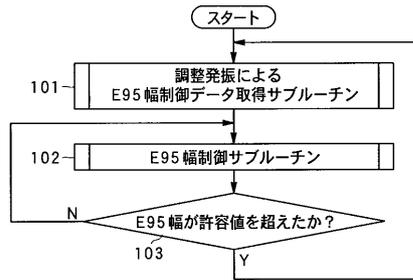
【図20】



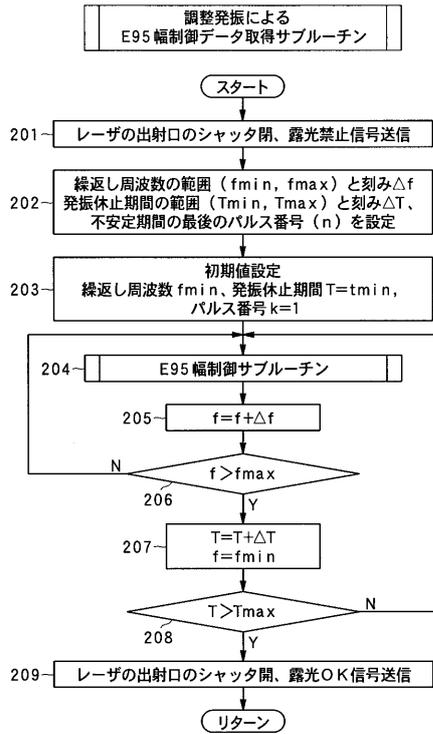
【図22】



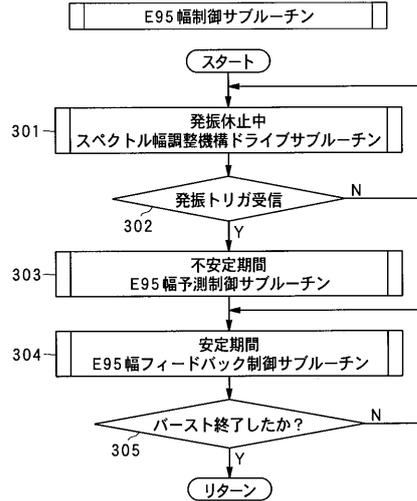
【図23】



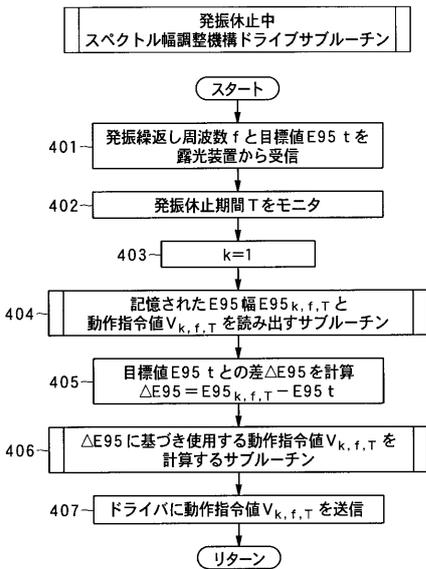
【図24】



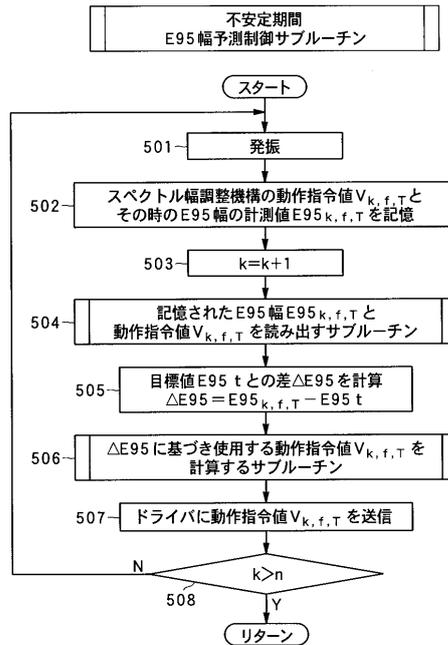
【図25】



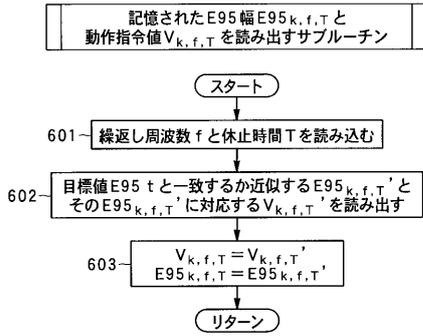
【図26】



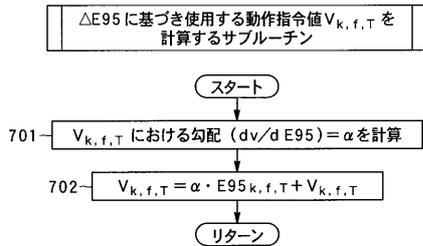
【図27】



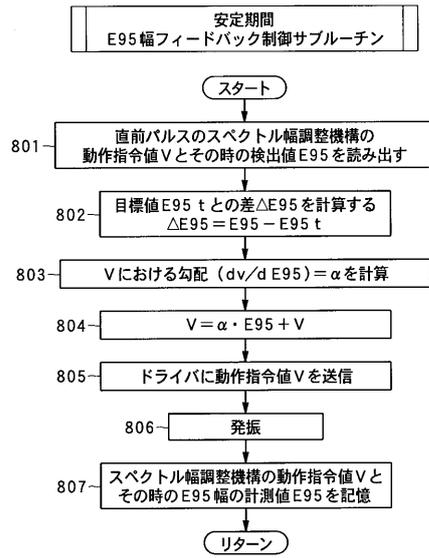
【図 28】



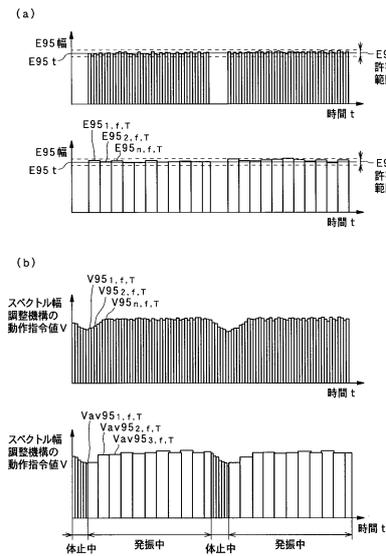
【図 29】



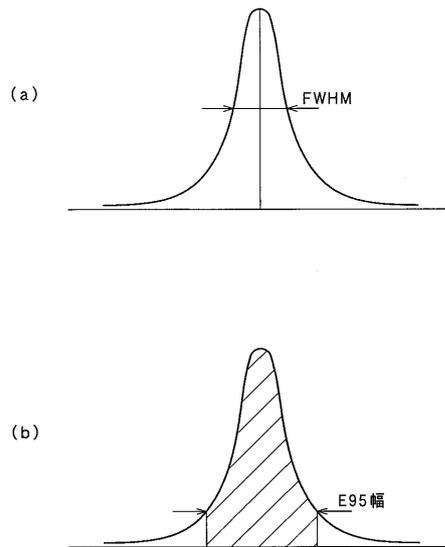
【図 30】



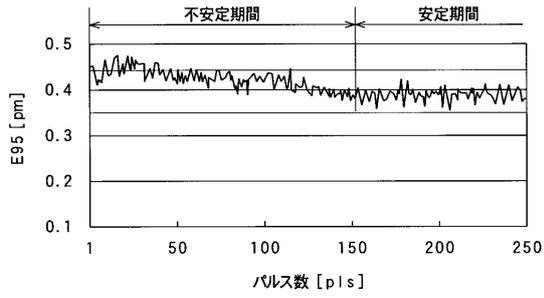
【図 31】



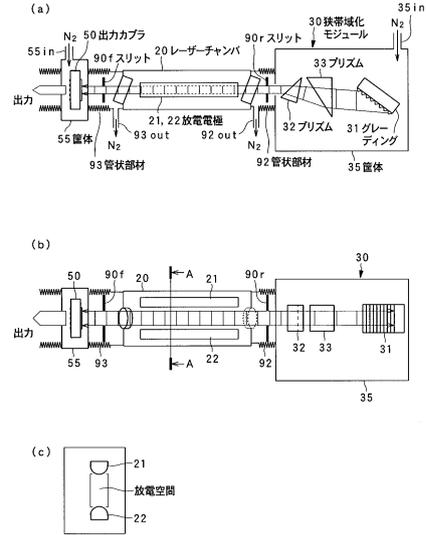
【図 32】



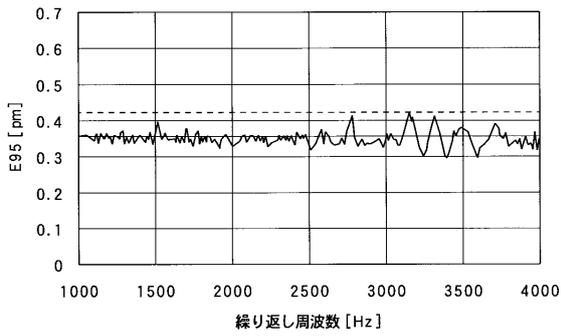
【図 3 3】



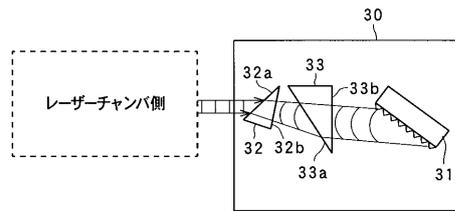
【図 3 4】



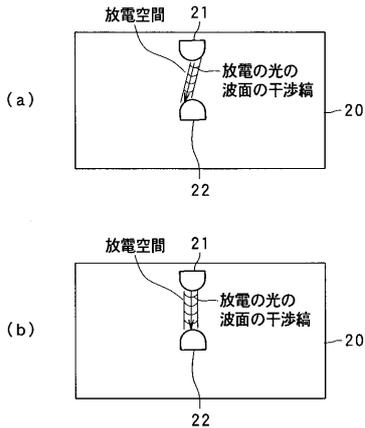
【図 3 5】



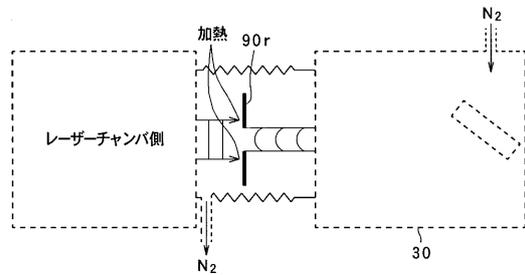
【図 3 7】



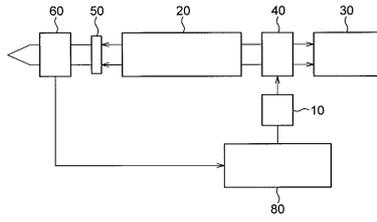
【図 3 6】



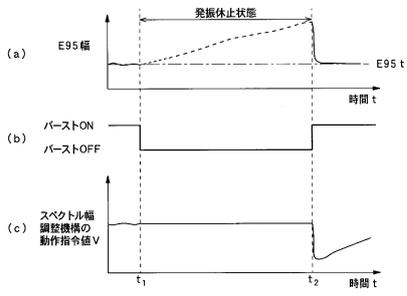
【図 3 8】



【図39】



【図40】



フロントページの続き

(72)発明者 新堀 真史
栃木県小山市横倉新田400

合議体

審判長 吉野 公夫

審判官 小松 徹三

審判官 近藤 幸浩

(56)参考文献 米国特許出願公開第2006/0114958(US, A1)
特表2004-526313(JP, A)
特開2001-196679(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01S 3/00 - 3/30