

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4437006号  
(P4437006)

(45) 発行日 平成22年3月24日(2010.3.24)

(24) 登録日 平成22年1月8日(2010.1.8)

(51) Int.Cl.	F 1
HO 1 L 21/027	(2006.01)
GO 3 F 7/207	(2006.01)
HO 1 S 3/137	(2006.01)
HO 1 S 3/139	(2006.01)
	HO 1 L 21/30 5 1 4 C
	HO 1 L 21/30 5 1 6 A
	HO 1 L 21/30 5 1 5 B
	GO 3 F 7/207 H
	HO 1 S 3/137

請求項の数 5 (全 29 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2002-590463 (P2002-590463)
(86) (22) 出願日	平成14年4月19日 (2002.4.19)
(65) 公表番号	特表2005-501399 (P2005-501399A)
(43) 公表日	平成17年1月13日 (2005.1.13)
(86) 國際出願番号	PCT/US2002/012396
(87) 國際公開番号	W02002/093700
(87) 國際公開日	平成14年11月21日 (2002.11.21)
審査請求日	平成17年4月19日 (2005.4.19)
(31) 優先権主張番号	09/854,097
(32) 優先日	平成13年5月11日 (2001.5.11)
(33) 優先権主張国	米国(US)
(31) 優先権主張番号	09/918,773
(32) 優先日	平成13年7月27日 (2001.7.27)
(33) 優先権主張国	米国(US)

(73) 特許権者	598013024 サイマー, インコーポレイテッド C y m e r, l n c. アメリカ合衆国 カリフォルニア 921 27-1712, サンディエゴ, ビ ア デル カンポ コート 16750 16750 V i a D e l C a m p o Court, San Diego, California 92127-17 12 U. S. A.
(74) 代理人	100082005 弁理士 熊倉 賢男
(74) 代理人	100067013 弁理士 大塚 文昭

前置審査

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】リソグラフィ処理のためのレーザスペクトルエンジニアリング

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

選択された数のパルスを含むパルスのバーストでレーザ出力光パルスを与えるガス放電レーザであって、ラインナローイングを実行するラインナローイングパッケージを有する高繰返し率短パルス短持続時間ガス放電レーザを利用して、リソグラフィ用の露光を行う方法であって、

所望のレーザスペクトルを近似する、パルスバーストに対する積分スペクトルを得るために、該パルスバーストのレーザパルスの中心波長をパルスごとに調節する高速応答同調機構を前記ラインナローイングパッケージ内で利用する段階を含み、

前記積分スペクトルは、第一及び第二のスペクトルピークを含み、さらに、

前記高速応答同調機構は、波長 1 に対応する第一の位置と波長 2 (= 波長 1 + 2 ~ 4 pm) に対応する第二の位置の間の調節範囲内の調節を可能とし、前記第一のスペクトルピークと第二のスペクトルピークとの間に分離が含まれるよう調節することを特徴とする方法。

## 【請求項 2】

選択された数のパルスを含むパルスのバーストでレーザ出力光パルスを与えるガス放電レーザであって、ラインナローイングを実行するラインナローイングパッケージを有する高繰返し率短パルス短持続時間ガス放電レーザを利用して、リソグラフィ用の露光を行う方法であって、

所望のレーザスペクトルを近似する、パルスバーストに対する積分スペクトルを得るた

10

20

めに、該パルスバーストのレーザパルスの中心波長をパルスごとに調節する高速応答同調機構であって、ビームが回折格子を照明する角度を変えることによって調節する高速応答同調機構を利用する段階を含み、

前記積分スペクトルは、第一及び第二のスペクトルピークを含み、さらに、

前記高速応答同調機構は、波長1に対応する第一の位置と波長2（＝波長1+2～4pm）に対応する第二の位置の間の調節範囲内の調節を可能とし、前記第一のスペクトルピークと第二のスペクトルピークとの間に分離が含まれるよう調節することを特徴とする方法。

#### 【請求項3】

選択された数のパルスを含むパルスのバーストでレーザ出力光パルスを与えるガス放電レーザであって、ラインナローイングを実行するラインナローイングパッケージを有する高繰返し率短パルス短持続時間ガス放電レーザを利用して、リソグラフィ用の露光を行う方法であって、

所望のスペクトルを得るために、パルスバーストのレーザパルスの中心波長をパルス毎に調節する高速応答同調機構であって、ビームが回折格子を照明する角度を変えることによって調節する高速応答同調機構を利用する段階を含み、

前記所望のスペクトルは、第一及び第二のスペクトルピークを含み、さらに、

前記高速応答同調機構は、波長1に対応する第一の位置と波長2（＝波長1+2～4pm）に対応する第二の位置の間の調節範囲内の調節を可能とし、前記第一のスペクトルピークと第二のスペクトルピークとの間に分離が含まれるよう調節することを特徴とする方法。

#### 【請求項4】

選択された数のパルスを含むパルスのバーストでレーザ出力光パルスを与えるガス放電レーザであって、ラインナローイングを実行するラインナローイングパッケージを有する高繰返し率短パルス短持続時間ガス放電レーザを利用して、リソグラフィ用の露光を行う方法であって、

所望の多重ピーク照射スペクトルを得るために、該パルスバーストのレーザパルスの中心波長をパルス毎に調節する高速応答同調機構であって、ビームが回折格子を照明する角度を変えることによって調節する高速応答同調機構を利用する段階を含み、

前記所望の多重ピーク照射スペクトルは、第一及び第二のスペクトルピークを含み、さらに、

前記高速応答同調機構は、波長1に対応する第一の位置と波長2（＝波長1+2～4pm）に対応する第二の位置の間の調節範囲内の調節を可能とし、前記第一のスペクトルピークと第二のスペクトルピークとの間に分離が含まれるよう調節することを特徴とする方法。

#### 【請求項5】

選択された数のパルスを含むパルスのバーストでレーザ出力光パルスを与えるガス放電レーザであって、ラインナローイングを実行するラインナローイングパッケージを有する高繰返し率短パルス短持続時間ガス放電レーザを利用して、リソグラフィ用の露光を行う方法であって、

所望のスペクトルを得るために、該パルスバーストのレーザパルスの中心波長をパルス毎に調節する高速応答同調機構を前記ラインナローイングパッケージ内で利用する段階を含み、

前記所望のスペクトルは、第一及び第二のピークを含み、さらに、

前記高速応答同調機構は、波長1に対応する第一の位置と波長2（＝波長1+2～4pm）に対応する第二の位置の間の調節範囲内の調節を可能とし、前記第一のスペクトルピークと第二のスペクトルピークとの間に分離が含まれるよう調節することを特徴とする方法。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【技術分野】

10

20

30

40

50

## 【0001】

本出願は、2001年7月27日出願の米国特許出願一連番号第09/918,773号、2001年5月11日出願の米国特許出願一連番号第09/854,097号、2000年6月30日出願の米国特許出願一連番号第09/608,543号、2000年2月9日出願の米国特許出願一連番号第09/501,160号、現在は米国特許第6,078,599号である1997年7月22日出願の米国特許出願一連番号第08/898,630号の一部継続出願であった2000年6月19日出願の米国特許出願一連番号第09/597,812号に対する優先権を主張する。本発明はレーザに関し、特に出力ビームの帯域幅を制御する技術に関する。

## 【背景技術】

10

## 【0002】

波長制御

レーザは、多くの用途に使用されている。例えば、KrFエキシマレーザ及びArFエキシマレーザのようなレーザは、半導体ウェーハ製造工程においてフォトレジストを選択的に露光させるためのステッパ及びスキャナ機器で使用されている。このような製造工程において、ステッパ及びスキャナの光学器械は、レーザの特定の波長を対象にして設計される。レーザ波長は、経時に変動する恐れがあり、従って、一般的に、フィードバックネットワークを使用してレーザの波長を検出し、必要に応じて波長を補正する。

## 【0003】

20

レーザの波長を検出して調節するのに使用される1つの種類のフィードバックネットワークにおいて、エタロンは、レーザから放射された光の一部を受光する。エタロンは、レーザ光による弱め合う干渉及び強め合う干渉による明暗レベルの同心状の帯を有する干渉パターンを作る。同心状の帯は、中央の明るい部分を取り囲む。エタロンによって生成された光の輪の直径は、0.01~0.03pm以内のようなレーザ波長を細かい程度まで判断するために使用される。光の輪の幅は、レーザ出力のスペクトル幅を判断するために使用される。通常、干渉パターンは、縞パターンという。また、回折格子分光計は、従来技術の装置において波長を比較的粗い程度で測定するのに使用される。縞パターン及び格子信号は、敏感な光検出器アレーによって光学的に検出することができる。従来技術による波長計の詳細な説明は、本明細書において引用により組み込まれる米国特許第5,978,394号において開示されている。

30

## 【0004】

レーザの波長同調に関しては、様々な方法が公知である。一般的に、同調は、ラインナローイングモジュール又はラインナローイングパッケージ(LNP)という素早く交換可能なモジュール装置において行われる。エキシマレーザのラインナローイング及び同調に使用される一般的な技術は、レーザビームの一部分がLNPに入る際に通過する、放電チャンバの背部のウィンドウを設けることである。ビームの一部分は、ビーム拡大器において拡大されて回折格子に向けられ、回折格子は、レーザの自然な幅広いスペクトルの選択された狭い部分を反射させて放電チャンバに戻し、そこでその部分が増幅される。レーザは、一般的に、ビームが回折格子を照明する角度を変えることによって調節される。これは、回折格子の位置を調節するか、又は、ビーム経路におけるピボット回転ミラーでミラー調節をもたらすことによって行うことができる。回折格子の位置又はミラーの位置の調節は、レーザ波長調節機構と称する機構によって行うことができる。

40

## 【0005】

従来技術では、一般的なフィードバックネットワークは、公称波長を所望の範囲に維持するように構成される。一般的な仕様では、この範囲は、「パルスウィンドウ」という一連のパルスの波長の平均に適用される時のKrFレーザに対する例えば248,327.1pmのような目標波長の±0.05pmなどの値に確立することができる。一般的なパルスウィンドウは、30パルスと考えられる。別の一般的な仕様は、一連のパルス(30個のパルスなど)に対する測定波長値の標準偏差である。この値は、波長シグマといい、標準偏差の標準的な公式を使用して計算される。時には、仕様はまた、単に測定標準偏

50

差の3倍である3 $\mu$ mを用いることもある。一般的な3 $\mu$ m仕様は、0.15 $\mu$ mとすることができる。

【0006】

248nm及び193nmの波長における深紫外線での使用に関して許容される光学レンズ材料は、石英ガラスとフッ化カルシウムに限定されているが、これは、KrF及びArFリソグラフィ用映写レンズが、波長変動変化に対してほとんど補正することができないことを意味している。いかなる光学材料もその屈折率は波長で変化するので色収差が現れ、従って、レンズの撮像特性も波長で変化する。

【0007】

補正されていないレンズについての色収差の有害な影響は、非常に狭い範囲の波長を有する光源を使用することによって緩和することができる。深紫外線リソグラフィの場合、スペクトルラインナロードエキシマレーザがこの目的に供している。これまでには、レーザ仕様は、FWHM帯域幅が0.5 $\mu$ mのような指定された値を下回る必要があったが、帯域幅に下限値はなかった。仕様はまた、95%積分帯域幅に向けられる。典型的な95%積分仕様は、1.2 $\mu$ mを下回るであろう。しかし、近年、集積回路製造業者は、集積回路の品質が光学系の設計対象であった帯域幅よりもかなり狭い約0.35 $\mu$ mFWHMのような帯域幅の悪影響を受ける可能性があることを認めた。

【0008】

「FLEX」(「焦点範囲強化照射」の略)というリソグラフィ技術では、異なる焦点設定値を有する同一フィールドの多重照射通過を利用することにより、焦点深度が改善されることがわかっている(シミュレーション及び実験を通じて)。また、この技術は、フォトレジストフィルムの物理的厚みが、増分的焦点設定値において多重通過で照射されることから、一般的にフォーカスドリーリングという。フォトレジスト内の画像は、多重照射通過の合成により形成される。

【0009】

ステップ及びスキャンの両方と、同じくステップ及び反復照射の実施によるこの「FLEX」法から幾つかの問題が生じている。多重通過照射は、付加的な重複(画像配置)誤差及び画像ボケをもたらす。これには、多重照射が多重撮像通過を必要とすることから、処理範囲、焦点反復性、及び、ウェーハ処理能力に関する更に別の意味合いがある。

【0010】

【特許文献1】米国特許出願一連番号第09/918,773号

【特許文献2】米国特許出願一連番号第09/854,097号

【特許文献3】米国特許出願一連番号第09/608,543号

【特許文献4】米国特許出願一連番号第09/501,160号

【特許文献5】米国特許第6,078,599号

【特許文献6】米国特許出願一連番号第08/898,630号

【特許文献7】米国特許出願一連番号第09/597,812号

【特許文献8】米国特許第5,978,394号

【特許文献9】米国特許第5,025,455号

【特許文献10】米国特許第5,025,446号

【特許文献11】米国特許第6,005,879号

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

必要とされるのは、品質が向上した集積回路リソグラフィック照射を提供するより良い技術である。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明は、放電レーザの帯域幅制御のための本出願人がスペクトルエンジニアリングと称する集積回路リソグラフィ技術を提供する。好ましい方法においては、コンピュータモ

10

20

30

40

50

デルを使用してリソグラフィパラメータをモデリングし、所望のリソグラフィの結果を得るために必要とされる所望のレーザスペクトルを判断する。次に、高速応答同調機構を使用して、パルスバースト内のレーザパルスの中心波長を調節し、所望のレーザスペクトルを近似するパルスバーストに対する積分スペクトルを得る。レーザビーム帯域幅は、フォトトレジストフィルムでのパターン解像度を改善させるために、少なくとも2つのスペクトルピークを有する効果的なビームスペクトルを生成するように制御される。ラインナローリング機器が設けられ、それは、少なくとも1つの圧電駆動装置と、約2.0ミリ秒よりも短い時間応答を有する高速帯域幅検出制御システムとを有する。好ましい実施形態においては、レーザの繰返し率と同位相の毎秒500ディザーを上回るディザー率で波長同調ミラーがディザーリングされる。1つの場合においては、圧電駆動装置は、方形波信号で駆動され、第2の場合においては、正弦波信号で駆動される。別の実施形態においては、一連のパルスに対して、2つのピークを有する所望の平均スペクトルを生成するために、最大変位がレーザパルスと一対一ベースで照合される。他の好ましい実施形態は、3つの別々のピークを有するスペクトルを生成する3つの別々の波長同調位置を利用する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

シミュレーション

波長及び帯域幅変化の影響のシミュレーションが本出願人ににより行われた。色補正のないレンズの場合の照射波長を変更する主な影響は、焦点面の位置の変化である。波長のかなり広い範囲に亘って、焦点のこの変化は、公称波長（照射スペクトルの中心波長）の変化についてはほぼ直線的である。レンズの波長応答は、レーザの中心波長を手で変更し、ステッパーの撮像センサを使用して得られる焦点のずれをモニタすることにより実験的に判断することができる。図1Aは、このような測定の例を示す。

【0014】

波長の変化に伴う焦点の変化が与えられると、広帯域照射スペクトルの使用は、スペクトル内の各波長が、異なる最良の焦点を有する架空画像を生み出すことになることを意味する。全体架空画像は、照射スペクトル内の各波長の相対強度により重み付けされた各焦点位置での架空画像の合計になる。この技術は、多重焦点面照射に基づくものである。コンピュータプログラム「P R O L I T H / 2」（米国テキサス州オースチン所在のK L A・テンカーから販売）の最新バージョンには、この種の効果が組み込まれている。レーザスペクトルを表すために、様々な市販のレーザで測定された実際のレーザスペクトルがこの作業で使用された。図1Bは、KrFレーザスペクトルの3つの例を示す。

【0015】

色収差が行われる場合のリソグラフィ工程に及ぼすレーザ帯域幅の影響を理解するためには、本出願人は、180nm隔離ラインの架空画像の調査から開始した。図3は、特定の組の条件下で帯域幅の変化が架空画像に影響を与える様子を示す。（画像寸法は、通常、0.3画像強度値に対応すると仮定される。）これらのシミュレーションでは、NA = 0.6、 $\lambda = 0.75$ 、 $\Delta\lambda = 248.3271\text{nm}$ という入力パラメータを使用した。FWHMで0.5pm、1.2pm、及び2.1pmの帯域幅を有するレーザスペクトル、及び単色光源をこのシミュレーション研究で使用し、色収差焦点応答0.225μm/pmを仮定した。図3でわかるように、帯域幅の変化により、画像強度分布の顕著な変化が生じる。

【0016】

大きさが異なる隔離ラインの限界寸法(CD)変動に及ぼすレーザ帯域幅の影響は、架空画像閾値モデルを使用して評価した。この研究において、 $\lambda = 0.75$ 、 $\Delta\lambda = 248.3271\text{nm}$ 、30%での架空画像閾値NA = 0.6、0.7、及び0.8というリソグラフィ入力パラメータ設定値を使用した。240nmから140nmの範囲の隔離ラインについてシミュレーションを行った。色収差応答は、0.225μm/pmと仮定した。図4A、図4B、及び図4Cに示すように、帯域幅が変化すると（増加又は減少のいずれか）、結果的に、特に開口数値が高くなるほど集積回路ラインの限界寸法が大幅に変化

10

20

30

40

50

する可能性がある。図4 A から図4 C に示すように、帯域幅が最小（即ち、0.35 pm）であると、マスク寸法の関数としての限界寸法の変化は最も小さい。このデータから、リソグラフィシステムはできるだけ小さい帯域幅を対象として設計すべきであると結論づけられるかもしれない。その手法に関する問題は、現在の技術では、光源の耐用年数に亘って帯域幅を常に0.35 pmに維持することは、非常に難しくかつ経費が掛かると思われることである。従って、通常の実施方法は、約0.5 pmのような、可能な最小帯域幅よりも多少大きい帯域幅において最良の性能が得られるようにリソグラフィシステムを設計することである。しかし、リソグラフィシステムが0.5 pmで最良の性能が得られるように設計された場合、0.35 pmまで低くレーザ帯域幅が「改良」されたとしても、多くの場合、限界寸法の悪化及び集積回路の品質低下をもたらすことになる。

10

#### 【0017】

##### 所望の波長をシミュレートするディザー同調ミラー

以下に詳細に説明する波長及び帯域幅モニタリング機器と波長同調機器とにより、レーザビームの帯域幅制御が可能になる。第1の実施形態において、同調ミラーは、狭すぎる帯域幅を所望の値を有する効果的な帯域幅に基本的に広げるために、所望の周波数及び振幅でディザリングされる。

#### 【0018】

この技術は、図5及び図6に示す波長計104による帯域幅のモニタリングを伴う。帯域幅が所望の帯域幅を下回る場合、パルスのウインドウ上の平均積分スペクトルが、所望の波長を近似する帯域幅を有する一定のスペクトルをほぼシミュレートするように、波長制御機器を利用して図5に示すミラー14に頻繁な間隔でディザリングし、パルス間でスペクトルの非常に僅かなズレを生じさせる。

20

#### 【0019】

例えば、スキャナ用光学機器が帯域幅0.4 pmで、フッ素濃度減少のために個々のパルスの帯域幅が0.3 pmである場合、約0.05 pmの公称波長にプラスマイナスのズレを生み出すためにミラー14をその公称位置の周りにディザリングし、それによって0.1 pmの実質的な増加により同じ公称波長を維持することができる。先に論じた種類の一般的な市販のエキシマレーザの場合、0.05 pmの波長のズレを生み出すために、ミラー14のピボット位置の約2 nmの変化が必要である。このミラー位置の変化は、アイテム80として図5 Aに示す上述の圧電駆動装置により簡単に得られる。一般的に、集積回路製造においては、ウェーハ上の各スポットは、各ダイスポットがディザーの両側からパルスのほぼ等しい部分を受けるようにディザー率が十分であるために、通常約30パルスから150パルスの範囲の多くのパルスで照射される。

30

#### 【0020】

すなわち、スポットを照射するパルスの数が30パルスである場合、ディザー率は、パルス繰返し率の少なくとも約1/4とすべきである。従って、パルス繰返し率が2000 Hzの場合、ディザー率は、好ましくは、少なくとも500 Hzであろう。これは、先に言及した機器及びソフトウェアに関しては全く問題ではない。

#### 【0021】

##### スペクトルエンジニアリング

40

図2 Aは、約0.35 pmのFWHM帯域幅を有するラインナロードKrF光源を使用する最新の0.6 NAステッパ型リソグラフィに関する中心線波長による焦点変動を示す。また、図2 Aは、正規化された強度対中心線波長からの偏りとしてプロットされたレーザスペクトルのプロットを含む。このシステムの焦点対中心線波長の勾配は、-0.23  $\mu$ m / pmである。

#### 【0022】

本出願人は、リソグラフィック撮像の実質的な改良は、本出願人により開発されたスペクトルエンジニアリング技術を用いて行うことができることを示した。本出願人は、この技術を、「レーザスペクトル調節式照射による解像度強化」の頭文字を取って「RELA X」と称している。これらの技術において、ウェーハは、单一の照射期間中に2つ又はそ

50

れ以上の特定の狭帯域中心線波長で照射される。これにより、先に言及したディザーテchniqueを凌ぐより良い結果が得られる。これらの結果は、本明細書の背景技術の節で論じた「F L E X」技術と似通っているが、本出願人の技術では、リソグラフィ機器の位置決めは1回しか行われないことから「F L E X」を凌ぐ大きな改良点となっている。従って、この機器の調節に付随する誤差が回避されている。

#### 【0023】

##### 2重モード照射

本出願人が行ったシミュレーションの結果は、フォトレジストフィルム内の解像度を改善させるための2重モード照射スペクトルの使用に関する概念を証明するものである。この2重モードシミュレーション作業において、本出願人は、200 nm隔離、半濃密(1:2)、及び濃密(1:1)コンタクトホールパターンに対する処理パラメータをシミュレートした。バイナリ(ガラス上のクロム)レチクルパターン、及びKrF照射中心波長( $\lambda_0 = 248.385 \text{ nm}$ )での従来の照射(例えば、0.7の数値開口度NA及び0.75シグマを有するステップシステム)をこのシミュレーションでモデリングした。フォトレジストは、撮像パターンの得られた解像度強化を定量化するために、AR2底部反射防止被覆上のUV6、5200 Å成型厚みとしてモデリングされた。シミュレーション入力として使用された2重モードスペクトルを図2Bに示す。この場合、スペクトルは、単一モード(公称)スペクトル(帯域幅: FWHM = 0.45 pm、E95% = 1.86 pm)と、4 pmの波長オフセットを有するそのコピーとの加え合わせにより発生される。S(λ)が公称(0.45 pm / 1.86 pm FWHM / E95%)スペクトルのスペクトル密度関数を表す場合、2重ピーク「RELAX」スペクトル[S<sub>RELAX</sub>(λ)]のスペクトル密度は、S<sub>RELAX</sub>(λ) = S(λ) + S(λ + 4 pm)と表すことができる。このようなスペクトル特性を実際に発生させるための技術については、次の節で論じる。このモデルで使用された縦方向焦点面対中心波長の勾配は、図2Aに示す-0.225 μm / pmである。

#### 【0024】

2重ピーク「RELAX」技術のこのシミュレーションの結果は、図2Cにおいて、単色ビームとFWHM帯域幅0.45 pm及び95%積分帯域幅1.86 pmを有する従来の単一ピークスペクトルとの類似のシミュレーションと比較されている。焦点及び線量に対する限界寸法応答は、(1)単色照射、(2)従来のレーザスペクトル、及び(3)図2Bに示すスペクトル(即ち、中心線が4.0 pmだけ分離された2つの0.45 pm FWHMスペクトル帯域)を有する4 pm 2重モード「RELAX」照射という3つの照射スペクトル分布に対する1;1濃密コンタクトホールに関して呈示されている。

#### 【0025】

図2Dは、200 nmの目標直径をホールの深さの関数として有するホールのレジスト形態幅のプロットを表す。数値は、単色の例では17 j / cm<sup>2</sup>から26 j / cm<sup>2</sup>、「RELAX」の例では25 j / cm<sup>2</sup>から32 j / cm<sup>2</sup>の範囲の幾つかの線量についてプロットされている。この縦軸は形態幅であり、横軸は標識を付けた焦点であるが、実際には、ゼロを中心線波長の焦点面として取ったミクロン単位の形態深さを表す。「理想的な」グラフは、照射線量による幅の重要でない変動はあるものの、少なくとも1.0ミクロンの深さに亘って200 nmでは直線であろう。図1Dのプロットは、「RELAX」に関するシミュレーションでは、従来又は単色照射の例のいずれよりもはるかに「理想的な」グラフに近い一組のプロットが得られることを示している。

#### 【0026】

図2Dは、図2Cのプロットで使用されたのと同一のデータから作った別の組のグラフである。この場合、本出願人は、これらの各例のプロットを選択し、その照射に対して、目標幅200 nmを有するホールの深さの関数として照射許容範囲(即ち、線量の割合は、限界寸法を目標値から10%を超えて変動させることなく変えることができる)をプロットした。ここでもまた、これらの3つのグラフは、「RELAX」技術の使用から生じる性能の大幅な改善を示している。

10

20

30

40

50

## 【0027】

「RELAX」手法により限界寸法を10%以内に制御することができる深度の劇的な改善は明白である。焦点深度の改善は、濃密コンタクトの場合の単色照射及び従来の照射の結果と比較すると、5%の照射許容範囲レベルにおいて4倍を超える大きさである。2重モードスペクトルを使用すると、ある程度の照射許容範囲の損失が観察される。照射許容範囲のこの損失は、最良の焦点（即ち、0.0の焦点深度）近傍で最も顕著である。従来のスペクトルの例と比較して、従来の照射の例と比較した「RELAX」技術の場合の目標線量の若干の増加（約25mJ/cm<sup>2</sup>から約29mJ/cm<sup>2</sup>へ）に注意すべきである。

## 【0028】

先に言及した他のパターン構成についてのシミュレーション結果が検査され、その結果、2ピーク「RELAX」技術により、検査した全ての例について単色照射及び従来のスペクトルの両方と比較してより良いパターン解像度が得られた。従って、フォーカスドーリングに対して「RELAX」を適用すると（4pmモード分離を有する2重モードスペクトルを使用して）、処理ウインドウ区域全体において劇的な改善が得られると結論づけられる。焦点深度改善と照射許容範囲の損失との間のトレードオフが実現されているが、焦点深度（DOF）は、照射許容範囲の減少よりも大きな割合で増加する。線及び空間の他の多くの撮像用途と同様に、特にコンタクトホール撮像においては、DOFは、制限的処理性能因子である。隔離された線、及び線/空間パターンはまた、変更された照射スペクトルに対して処理ウインドウの変化を示すことが予想される。

## 【0029】

2つの中心線波長を使用する例

本出願人は、図2E及び図2Fに示すように、このスペクトルエンジニアリングに必要とされる波長制御の技術の実行可能性を実証した。図5Aに示すPZT駆動装置80は、各パルスを4.0pmのプラス又はマイナスの段階で調節するために、120Hzで作動するKrfレーザの波長を制御するようにプログラムされた。図6に示す波長計フォトダイオードアレー180に記録された積算強度値は、図2Eにプロットされている。このプロットは、4.0pmの中心線波長軸に対応するピクセル450及び618において鋭いピークを示している。

## 【0030】

類似の結果を図2Fに示すが、PZT駆動装置は、120Hzのレーザパルス繰返し率の半分の周波数において波長を約2pmだけ変化させるために正弦波で駆動される。

## 【0031】

レーザスペクトルの最適化

スペクトルエンジニアリングの背景にある基本的な概念は、リソグラフィシミュレーションを用いて、所定のパラメータの最大限の改善をもたらすことになる最適スペクトル形状を判断することである。特定の例においては、リソグラフィシミュレーションは、図2G1、図2G2、及び図2G3に示す2つの2モード照射スペクトル及び3つの3モード照射スペクトルに対してもたらされる。これらの例において、最大化されるパラメータは、150nm濃密ラインに対する焦点深度である。図2H1から、2つの2重ピークスペクトル（3pm及び4pm分離）は、焦点ボケに対する感度が最も低く、従って最大焦点深度を有することが分る。焦点深度は変化するので、スペクトルの変更（単色から3モード又は2モード照射スペクトルへの変更）は、DOFの大幅な（最大2×）改善をもたらすように見える。このことだけから、3pm又は4pmのいずれかの2重モード照射は、これらの形態の撮像に最適なようである。

## 【0032】

照射許容範囲（EL）と焦点深度との間の妥協点を異なる照射スペクトル（図2H2に示す）の関数とみなした場合、最良の焦点において12%を下回る照射許容範囲の低下を防止するために、1.5pmオフセットの50%重み付け3モード照射を用いることを選ぶことができる。3モードスペクトルは、依然として焦点深度のかなりの増加をもたらす

10

20

30

40

50

。更に、3モードスペクトル(1.5pmのピーク分離を有する)は、図2H3に示すように、単色の場合からのコントラスト損失の最小量をもたらす。

#### 【0033】

この150nm濃密ラインの例から、他のパラメータに対して最低のコストで撮像パラメータの部分集合の恩典を最大にするために、「RELAX」の実施には非常に入念なトレードオフの設計が必要であることが明らかである。従って、「RELAX」の適用は、単一パラメータが全体的な処理限界(処理許容範囲)を制限する場合に最も成功することになる。その場合、制限的処理パラメータは、製造可能性の全体的処理限界を改善するために改善(緩和)することができる。総合的なリソグラフィ処理エンジニアリング及び最大の恩典のために、「RELAX」と共に光学近接補正(レチクル形態補正を用いるOPC-解像度強化技術)を用いることができる。

10

#### 【0034】

理論的な選択から連続して、「RELAX」スペクトル照射の同調は、リソグラフィシミュレーション及び反復最適化アルゴリズムを用いて行うことができる。また、シミュレーションによる予測は、実験的方法(実験計画法-DOEなど)を用いて確認及び微調整する必要がある。いずれの手法も、以前(05/25/01開示のIV-B節)に更に詳細に説明されている。図2Iは、S( )スペクトル最適化のみに関して、又は、「RELAX」を用いる総合的なリソグラフィ処理最適化(可変リソグラフィ入力)に関して、シミュレーション及び実験(DOE)の融合を示している。

#### 【0035】

20

##### スペクトル修正に関する他の技術

レーザ供給源の照射スペクトルの同調可能性を達成するために、2つの手法が試験され、実証され、また、以前(05/25/01開示のV節)に検討されている。他の概念もまた、1)複数のラインナローイングモジュール又はレーザチャンバの使用、2)単一LN Mパッケージ内での複数の分散性回折格子要素の使用、及び、3)圧電起動及び他の手法を用いるLN M反射性格子面の変更に基づいて提案されている。これらの違いは、波長の使用という趣旨に沿ったものである。

#### 【0036】

##### 高速制御アルゴリズムを有する超高速波長計

##### パルスエネルギー、波長、及び帯域幅の制御

30

従来技術による装置においては、パルスエネルギーのフィードバック制御は、パルス間ベースであり、即ち、得られたデータがすぐ次のパルスのエネルギーを制御するために制御アルゴリズムで使用することができるよう、各パルスのパルスエネルギーが十分迅速に測定された。1,000Hzシステムの場合、これは、測定と次のパルスの制御との所要時間が、1/1000秒よりも短くなければならないことを意味する。4000Hzシステムの場合、その4倍の速さである必要がある。中心波長の制御と波長及び帯域幅測定に対する技術は、「レーザビーム波長を制御するシステム及び方法」と題した米国特許第5,025,455号、及び、「エキシマレーザに対する波長及びシステム」と題した米国特許第5,978,394号で説明されている。これらの特許は、本明細書において引用により組み込まれる。

40

#### 【0037】

波長及び帯域幅は、パルス毎にパルス間ベースで測定されてきたが、一般的に、レーザのフィードバック制御は、中心波長を制御する従来技術の所要時間が数ミリ秒であるために約7ミリ秒掛かる。従って、より速い制御が必要である。

#### 【0038】

##### ビームパラメータの高速測定及び制御の好ましい実施形態

本発明の好ましい実施形態は、ArFレーザビームパラメータの超高速測定、及び、パルスエネルギー及び中心波長の超高速制御により4,000Hzから6,000Hzの範囲の作動が可能なエキシマレーザシステムである。このレーザのビームパラメータの測定及び制御について以下で説明する。

50

## 【0039】

本実施形態で使用される波長計は、米国特許第5,978,394号で説明されているものと非常に類似のものであり、以下の説明の一部は、その特許から抜粋されている。

## 【0040】

ビームパラメータの測定

図6は、好ましい波長計ユニット104、絶対波長基準較正ユニット190、及び波長計プロセッサ197の配置を示す。

これらのユニット内の光学機器は、パルスエネルギー、波長、及び帯域幅を測定する。これらの測定は、パルスエネルギー及び波長を所望の限界値内に維持するために、フィードバック回路と共に使用される。この機器は、レーザシステム制御プロセッサからの指令で原子基準ソースを参照して自己較正する。図6に示すように、レーザ出力ビームは、出力ビーム33としてビームエネルギーの約95.5%を通過し、パルスエネルギー、波長、及び帯域幅測定のために約4.5%を反射する部分反射ミラー170と交差する。

## 【0041】

パルスエネルギー

反射されたビームの約4%は、4,000パルス/秒の繰返し数で発生する個々のパルスのエネルギーを測定することができる超高速フォトダイオード69を備えたエネルギー検出器172にミラー171によって反射される。典型的なArFエキシマレーザに対するパルスエネルギーは、約5mJであり、検出器69の出力は、コンピュータコントローラに供給され、コンピュータコントローラは、レーザ充電電圧を調節する専用アルゴリズムを使用し、個々のパルスのエネルギーとパルスのバーストの積算エネルギーとの変動を制限するために、保存されたパルスエネルギーデータに基づいてその後のパルスエネルギーを正確に制御する。

## 【0042】

線形フォトダイオードアレー

フォトダイオードアレー180は、図6Aに示すように、1024個の個別のフォトダイオード集積回路、及び、付随するサンプル及びホールド読み出し回路を備えた集積回路チップである。フォトダイオードは、全長25.6mm(約1インチ)となるように、25マイクロメートルピッチで配置される。各フォトダイオードは、500マイクロメートル長である。

## 【0043】

このようなフォトダイオードアレーは、幾つかの供給元から販売されている。好ましい供給業者は、ハママツである。好ましい実施形態においては、1024ピクセルの走査を漏れなく4,000Hz又はそれ以上の速度で読み取ることができるFIFO方式で最大 $4 \times 10^6$ ピクセル/秒までの速度で読み取ることができる「モデルS3903-1024Q」を使用する。PDAは、 $2 \times 10^6$ ピクセル/秒で作動するように設計されているが、本出願人は、はるかに高速、即ち、最大 $4 \times 10^6$ ピクセル/秒で作動するようにオーバークロックすることを見出した。4,000Hzを上回るパルス繰返し数の場合、本出願人は、同じPDAを使用することができるが、通常は、毎回の走査で読み取られるピクセル数がそのうちの一部(60%など)だけである。

## 【0044】

粗い波長測定

ミラー171を通るビームの約4%は、ミラー173により、スリット177を介してミラー174、ミラー175、及び再度ミラー174に、また、エシェル格子176に反射される。ビームは、458.4mmの焦点距離を有するレンズ178によって平行化される。格子176から反射した光は、レンズ178を通して戻され、再びミラー174及び175、及び再度174から反射され、その後、ミラー179から反射されて、図6Bの上部に示すように、ピクセル600からピクセル950の領域にある1024ピクセル線形フォトダイオードアレー180の左側上に集束される(ピクセル0から599は、精密波長測定及び帯域幅用に保留されている)。フォトダイオードアレー上のビームの空

10

20

30

40

50

間的位置は、出力ビームの相対的な公称波長のおおざっぱな目安である。例えば、図 6 B に示すように、約 193.350 pm の波長範囲の光であれば、ピクセル 750 及び隣接するピクセル上に集束されるであろう。

#### 【 0 0 4 5 】

##### 粗い波長の計算

波長計モジュール 120 の粗波長光学器械は、フォトダイオードアレー 180 の左側に約 0.25 mm × 3 mm の矩形の画像を生成する。10 個又は 11 個のフォトダイオードに光が当った場合、受けた照明（図 6 C に示すように）の強度に比例して信号が発生し、信号は、波長計コントローラ 197 内のプロセッサによって読み取られてデジタル化される。この情報及び補間アルゴリズムを使用して、コントローラ 197 は、画像の中心位置を算出する。

#### 【 0 0 4 6 】

この位置（ピクセル単位で測定）は、2 つの較正係数を用い、また、位置と波長の直線的な関係を仮定して粗波長値に変換される。これらの較正係数は、先に説明したような原子波長基準ソースを参照して判断される。例えば、画像位置と波長の関係は、以下のアルゴリズムになるであろう。

$$= (2.3 \text{ pm} / \text{ピクセル}) P + 191, 625 \text{ pm}$$

ここで、P = 粗い画像中心位置である。

代替的に、必要に応じて、「 $+ ( ) P^2$ 」のような 2 次項を追加することによって更なる精度を追加することができるであろう。

#### 【 0 0 4 7 】

##### 精密な波長測定

図 6 に示すミラー 173 を通るビームの約 95 % は、ミラー 182 から反射されてレンズ 183 を通り、エタロンアセンブリ 184 に対する入力部の拡散器（好ましくは「改良エタロン」と題した以下の区域で説明する回折拡散器）上に至る。エタロン 184 を出るビームは、エタロンアセンブリ内の 458.4 mm 焦点距離レンズによって集束され、図 6 に示す 2 つのミラーから反射した後に線形フォトダイオードアレー 180 の中央及び右側で干渉縞を生成する。

#### 【 0 0 4 8 】

分光計は、実質的にリアルタイムで波長及び帯域幅を測定しなければならない。レーザ繰返し率は、4,000 Hz から 6,000 Hz と考えられるので、経済的かつ小型の処理電子工学装置で所望の性能を達成するために、正確ではあるが計算の面では負荷が大きくないアルゴリズムを使用する必要がある。従って、計算アルゴリズムでは、浮動少数点演算に対して整数が使用されることが好ましく、数学的演算は、好ましくは、計算効率が高いものであるべきである（平方根、正弦、対数などは使用しない）。

#### 【 0 0 4 9 】

ここで、この好ましい実施形態で使用される好ましいアルゴリズムの特定の詳細について説明する。図 6 D は、線形フォトダイオードアレー 180 によって測定された一般的なエタロン縞信号を表す、図示の 5 つのピークを有する曲線である。中央のピークは、他のピークよりも高さとしては低い位置に描かれている。光の異なる波長がエタロンに入ると、中央のピークが上下することになり、ゼロになることもある。この特徴のために、中央のピークは、波長測定には不適切なものとなる。他のピークは、波長の変化に応答して移動し、中央のピークに向かうか又は離れていく、それで、これらのピーク位置を波長を判断するために使用することができ、一方、その幅によって、レーザの帯域幅が測定される。データウィンドウと各々記されている 2 つの領域を図 6 D に示す。データウィンドウは、中央のピークに最も近い縞が一般的に分析に使用されるように位置する。しかし、波長が変化して縞を移動させ、中央のピークに接近し過ぎた時（歪及び結果的に起こる誤差の原因になる）、第 1 のピークはウィンドウの外側にあるが、中央のピークに 2 番目に接近しているピークはウィンドウの内側になり、ソフトウェアは、制御モジュール 197 のプロセッサに第 2 のピークを使用させる。逆に、波長がずれて現在のピークをデータウィン

10

20

30

40

50

ドウの外側に移動させ、中央のピークから離れてしまった時、ソフトウェアは、データウィンドウ内の内側の縞に飛ぶことになる。データウィンドウは、図 6 B にも示されている。

【 0 0 5 0 】

最大  $4,000\text{ Hz}$  から  $6,000\text{ Hz}$  の範囲までの繰返し率で行われる各パルスの帯域幅超高速計算については、好ましい実施形態は、図 15 で特定されるハードウェアを使用する。このハードウェアには、米国アリゾナ州フェニックス所在のモトローラによって供給される「モデル MPC 823」であるマイクロプロセッサ 400、米国カリフォルニア州サンホセ所在のアルテラによって供給される「モデル E P 6016 Q C 240」であるプログラム可能論理装置 402、管理及びデータメモリバンク 404、表形式のフォトダイオードアレーデータの一時記憶用専用超高速 RAM 406、メモリバッファとして作動する第 3 の  $4 \times 1024$  ピクセル RAM メモリバンク 408、及び、アナログ / デジタル変換器 410 が含まれる。

【 0 0 5 1 】

米国特許第 5,025,446 号及び米国特許第 5,978,394 号で説明されているように、従来技術による装置は、中心線波長及び帯域幅を判断するために、エタロン 184 及びフォトダイオード 180 によって生成された干渉縞を表す大量の PDA データピクセル輝度データを分析することが必要であった。これは、毎回の波長及び帯域幅の計算のためにエタロン縞を捜して記述するのに約 400 個のピクセル輝度値を分析しなければならなかつたために、コンピュータプロセッサを使用しても比較的時間の掛かる処理であった。本発明の好ましい実施形態は、波長情報を計算するプロセッサと並行して作動する重要な縞を見つけるためのプロセッサを設置することにより、この処理を大幅に高速化するものである。

【 0 0 5 2 】

基本的な技術は、ピクセルデータが生成される時に縞データ表を PDA ピクセルデータから連続的に生成するために、プログラム可能論理装置 402 を使用することである。また、論理装置 402 は、縞データの組のどれが当該の縞データを表すかを識別する。その後、中央波長及び帯域幅の計算が必要とされた時には、マイクロプロセッサは、単に、そのデータを識別された当該のピクセルから拾って中央波長及び帯域幅の必要とされる値を計算するだけである。この処理によって、マイクロプロセッサの計算時間が約 10 倍ほど短縮される。

【 0 0 5 3 】

中心波長及び帯域幅を計算する処理の特定の段階は、以下の通りである。

1) PDA 180 が  $2.5\text{ MHz}$  で作動するようにクロック調節された状態で、PDA 180 は、 $4,000\text{ Hz}$  の走査速度で 1 ピクセルから 600 ピクセルでデータを収集し、 $100\text{ Hz}$  の速度で 1 ピクセルから 1028 ピクセルを読み取るようにプロセッサ 400 によって指令される。

【 0 0 5 4 】

2) PDA 180 によって生成されたアナログピクセル輝度データは、アナログ / デジタル変換器 410 によってアナログ輝度値からデジタル 8 ビット値 (0 から 255) に変換され、デジタルデータは、フォトダイオードアレー 180 の各ピクセルにおける輝度を表す 8 ビット値として RAM バッファ 408 に一時的に記憶される。

【 0 0 5 5 】

3) プログラム可能論理装置 402 は、ほとんどリアルタイムで RAM バッファ 408 を通って連続的に出てくるデータを分析して縞を捜し、全てのデータを RAM メモリ 406 に記憶し、各パルスについて全ての縞を識別し、各パルスについて縞表を生成して RAM 406 に全ての表を記憶し、更なる分析のために、各パルスについて 2 つの縞からなる 1 つの最良の組を識別する。論理装置 402 によって使用される技術は、以下の通りである。

【 0 0 5 6 】

10

20

30

40

50

A) P L D 4 0 2 は、バッファ 4 0 8 を通って来る各ピクセル値を分析して、最小ピクセル輝度値を追跡しながら輝度閾値を超えているか判断する。閾値を超えていた場合、これは、縞ピークが来つつあることを示すものである。P L D は、閾値を超える第1のピクセルを「立上り」ピクセル数と特定し、「立上り」ピクセルより前のピクセルの最小ピクセル値を保存する。このピクセルの輝度値は、縞の「最小」として特定される。

【0057】

B) P L D 4 0 2 は、その後、後続のピクセル輝度をモニタして縞のピークを捜す。これは、輝度が閾値輝度を下回るまで最高輝度値を追跡することによりこれを行う。

【0058】

C) 閾値を下回る値を有するピクセルが見つかると、P L D は、それを立下りピクセル数と識別して最大値を保存する。その後、P L D は、立下りピクセル数から立上りピクセル数を引くことによって縞の「幅」を計算する。 10

【0059】

D) 立上りピクセル数、最大縞輝度、最小縞輝度、及び縞の幅という4つの値は、R A Mメモリバンク 4 0 6 の縞区域の円形表に記憶される。大半のパルスは、2つのウィンドウに2つから5つの縞を生成するにすぎないが、各パルスについて最大15個までの縞を表すデータを記憶することができる。

【0060】

E) P L D 4 0 2 はまた、各パルスについて、各パルスの「最良の」2つの縞を識別するようにプログラムされる。それは、完全に0から199のウィンドウ内で最終縞を、また、完全に400から599のウィンドウ内で第1の縞を識別することによってこれを行う。 20

【0061】

(1) ピクセルデータの収集、及び、(2) パルスに対する縞の円形表の形成に関して、パルス後に必要とされる全時間は、わずか約200マイクロ秒である。時間節約に関するこの技術の主たる利点は、縞の検索が、縞データの読み取り、デジタル化、及び記憶が行われている時に行われるということである。特定のパルスについて2つの最良の縞が識別されると、マイクロプロセッサ 4 0 0 は、R A Mメモリバンク 4 0 6 から2つの縞の領域に生ピクセルデータを確保し、そのデータから帯域幅及び中心波長を計算する。計算は、以下の通りである。 30

【0062】

エタロン縞の一般的な形状を図 6 D に示す。P L D 4 0 2 の先の作業に基づいて、約ピクセル 180 に最大値を有する縞、及び、約ピクセル 450 に最大値を有する縞が、マイクロプロセッサ 4 0 0 に対して特定されることになる。これらの2つの最大値を取り囲むピクセルデータは、縞の形状及び位置を定義するためにマイクロプロセッサ 4 0 0 によって分析される。これは、以下のように行われる。

【0063】

すなわち、縞最大値から縞最小値を引き、その差を2で割ってその結果を縞最小値に加えることにより、最大値の半値を求める。2つの縞の各立上り及び各立下りに対して、2つのピクセルは、最大値の半値を上回る最も近い値、及び最大値の半値を下回る最も近い値を有する。次に、マイクロプロセッサは、各場合において2つのピクセル値間で外挿し、図 6 D に示すように、1/32ピクセルの正確さでD 1 及びD 2 という終点を形成する。これらの値から、円形縞の内径D 1 及び外径D 2 が判断される。 40

【0064】

精密な波長計算

精密な波長計算は、粗波長測定値とD 1 及びD 2 の測定値とを使用して行われる。

波長の基本方程式は、以下の通りである。

$$= (2 * n * d / m) \cos (R / f) \quad (1)$$

ただし、

は、ピコメートル単位の波長であり、

10

20

30

40

50

$n$  は、エタロンの内部屈折率で約 1.0003 であり、

$d$  は、エタロン間隔で、KrF レーザの場合は約 1542  $\mu\text{m}$ 、ArF レーザの場合は約 934  $\mu\text{m}$  であって、 $\pm 1 \mu\text{m}$  に制御され、

$m$  は、次数であって縞ピークでの波長の整数、約 12440 であり、

$R$  は、縞半径で、1ピクセルを 25 ミクロンとすると、130 から 280 PDA ピクセルであり、

$f$  は、レンズから PDA 面までの焦点距離である。

$\cos$  項を展開して無視できるほど小さい高次の項を捨てると、以下を得る。

$$= (2^* n^* d / m) [1 - (1/2) (R/f)^2] \quad (2)$$

直径  $D = 2^* R$  を用いて方程式を書き直すと、

$$= (2^* n^* d / m) [1 - (1/8) (D/f)^2] \quad (3)$$

#### 【0065】

波長計の主な仕事は、 $D$  から  $f$  を計算することである。これには、 $f$ 、 $n$ 、 $d$ 、及び  $m$  が分っていることが必要である。 $n$  及び  $d$  は、共にエタロン固有のものであることから、これを組み合わせて  $ND$  という単一の較正定数にしている。 $f$  は、純粋な比が得られるよう  $D$  の単位に合わせたピクセルの単位を有する  $FD$  という別の較正定数とみなされる。整数次数  $m$  は、波長及び縞の対が選ばれたかに依存して変動する。 $m$  は、粗い縞波長値を使用して判断されるが、粗い縞波長値は、この目的には十分に正確なものである。

#### 【0066】

これらの方程式の幾つかの良い点は、全ての大きな数は、正の値であるということである。WCM のマイクロコントローラは、ほぼ 32 ビットの正確さを維持してこれを計算することができる。括弧付きの項を  $Frac$  と呼ぶことにする。

$$Frac = [1 - (1/8) (D/FD)^2] \quad (4)$$

#### 【0067】

内部的には、 $Frac$  は、基底点が最上位ビットの左にある符号なしの 32 ビット値として表される。 $Frac$  は、常に 1 をほんのわずかだけ下回るので、そこで最大の精度が得られる。 $Frac$  は、{560 ~ 260} ピクセルの  $D$  範囲については、[1 - 120 E - 6] から [1 - 25 E - 6] の範囲である。

#### 【0068】

$ND$  較正を入力すると、波長計は、フェムトメートル ( $fm$ ) =  $10^{-15}$  メートル = 0.001  $\mu\text{m}$  という内部波長単位を有する  $2ND = 2^* ND$  という内部符号なし 64 ビット値を計算する。内部的には、波長  $l$  は、やはり  $fm$  単位で精密な波長に対して  $FWL$  と表される。これらの変数を用いて方程式を書き直すと以下を得る。

$$FWL = Frac^* 2ND / m \quad (5)$$

#### 【0069】

算術的に  $Frac$  の基底点移動が処理され、 $FWL$  が  $fm$  を用いてもたらされる。方程式を移項し、やはり  $fm$  単位の  $CWL$  という既知の粗波長を代入することにより、 $m$  について解くと以下を得る。

$$m = \text{最も近い整数} (Frac^* 2ND / CWL) \quad (6)$$

#### 【0070】

最も近い整数を取ることは、古い方法で粗波長に最も近い精密な波長に到達するまで  $FSR$  を加算又は減算することと同等のことである。方程式 (4)、次に方程式 (6)、及びその後に方程式 (5) を解くことによって波長を計算する。内径及び外径については、個別に  $WL$  を計算する。平均値がライン中心波長、また、その差がライン幅である。

#### 【0071】

##### 帯域幅の計算

レーザの帯域幅は、 $(\omega_2 - \omega_1) / 2$  として計算される。真のレーザ帯域幅に追加されるエタロンピークの固有幅を説明するために、固定補正係数が適用される。数学的には、逆重畠アルゴリズムが、エタロン固有幅を測定された幅から除外する形式的な方法であるが、これは、あまりも計算負荷が大きいと考えられるので、固定補正を差し引くこ

10

20

30

40

50

とになり、これは十分な精度をもたらす。従って、帯域幅は、以下のようになる。

$$= ((D_2 - D_1) / 2) -$$

は、エタロン仕様及び真のレーザ帯域幅の両方に依然する。それは、一般的に、本明細書で説明する用途では、0.1~1pmの範囲内である。

#### 【0072】

##### 改良エタロン

この実施形態は、改良エタロンを利用する。従来のエタロン装着法では、一般的に、光学要素を周囲構造体に取り付け、光学要素の位置を制限するが光学要素に掛かる力を最小限に抑えるためにエラストマーが使用される。このために一般的に使用される合成物は、室温加硫シリコーン(RTV)である。しかし、これらのエラストマーから放出される様々な有機蒸気は、光学面上に堆積し、その結果、その性能が落ちる可能性がある。エタロン性能寿命を長引かせるために、いかなるエラストマー合成物も含まない密封筐体にエタロンを取り付けることが望ましい。

10

#### 【0073】

好ましい実施形態は、図6及び図6Eにおいて184で示す改良エタロンアセンブリを含む。図6Gに示す溶融シリカエタロン79自体は、フランジ81を有する上部プレート80と、下部プレート82とで構成され、上部プレート及び下部プレートは、共に高級な溶融シリカから成る。エタロンは、1.003の屈折率及び25に等しいか又はそれ以上のフィネスを有するガスで囲まれた時に、193.35nmで20.00pmの自由スペクトル範囲を有する縞を生成するように設計される。極めて低い熱膨張を有する3つの溶融シリカスペーサ83は、これらのプレートを分離し、934マイクロメートル±1マイクロメートル厚である。これらは、光学器械製造技術において公知の技術を用いる光学接觸により協働してエタロンを保持する。エタロンの内面の反射率は、各々、約88%であり、外面は、反射防止コーティングされている。エタロンの透過率は、約50%である。

20

#### 【0074】

エタロン79は、重力と、始端部85によって示された半径方向の位置にあるフランジ81の下縁の下の図示していないが120°中心上に位置する3つのパッドに対してフランジを押し付ける3つの低力ばね86とによってのみ、アルミニウムハウジング84内で所定の位置に保持される。87にあるフランジ81の上縁に沿ったわずか0.004インチのクリアランスによって、エタロンが確実にほぼ適正な位置のままとなる。この狭い公差による装着によって、衝撃又はインパルスが取り付け部を介してエタロンシステムに伝達された場合に、光学器械とハウジング接点との間の相対速度が、確実に最小限に保たれることになる。エタロンアセンブリ184の他の光学器械には、拡散器88、ウィンドウ89、及び焦点距離458.4mmの集束レンズ90が含まれる。

30

#### 【0075】

拡散器88は、エタロンの適正な作動に必要とされる様々な入射角度を生み出すためにエタロンの上流側に一般的に使用される標準的な従来技術による拡散器とすることができます。従来技術による拡散器に関する問題は、拡散器を貫通する光の約90%は有益な角度になっておらず、その結果、フォトダイオードアレー上に集束されないということである。しかし、この浪費された光は、光学系の温度上昇に付加的に寄与し、光学面の劣化に一因になる可能性がある。はるかに好ましい実施形態において、回折レンズアレーが拡散器88として使用される。この種類の拡散器を用いて、光を十分に、但し約5°の角度内のみで散乱させるパターンが回折レンズアレーに生成される。その結果、エタロンに当たる光の約90%が有益な角度で入射し、エタロンに入射する光のそれよりもはるかに大きな部分が最終的にフォトダイオードアレーによって検出される。その結果、エタロンに入射する光を大幅に低減させることができ、これによって、光学器械の寿命が大幅に延びる。本出願人は、入射光は、従来技術による値の5%又は10%よりも少ない値まで低減させることができ、フォトダイオードアレー上も同等な光になると推定する。

40

#### 【0076】

##### 回折拡散器を用いるより良い平行化

50

図 6 H は、エタロンを貫通する光の強度をより一層低減させる好ましい実施形態の特徴を示す。この実施形態は、先に論じた実施形態と類似のものである。ミラー 182 からサンプルビーム 182 (約 15 mm × 3 mm) は、集光レンズ 400 を上方に通過し、次に、レンズ 402 によって再平行化される。ここで平行化されて寸法的に約 5 mm × 1 mm に低減されたサンプルビームは、エタロンハウジングウンドウ 404 を通過し、次に、この場合 (ArF レーザに対して)、米国アラバマ州ハンツビル所在のメムズ・オプティカル・インコーポレーテッドによって供給される回折拡散要素である回折拡散要素 406 を通過する。回折拡散要素は、部品番号 D023-193 であり、任意の断面構成を有するいかなる到来平行化ビーム内の実質的に全ての 193 nm の光を、2° の第 1 の方向で、また、第 1 の方向に垂直な 4° の第 2 の方向で拡大するビームに変換する。次に、レンズ 410 は、拡大しているビームを図 6 に示すフォトダイオードアレー 180 を覆う矩形のパターン上に「集束させる」。フォトダイオードアレーの活性区域は、約 0.5 mm 幅 × 25.6 mm 長であり、レンズ 410 によって形成されたスポットパターンは、約 15 mm × 30 mm である。回折拡散要素は、ビームの空間成分を十分に混合させるが、エタロンを貫通する光を実質的に低減させて効率的に利用することができるよう、ビームエネルギーの実質的に全てを 2° 及び 4° の限界値内に維持する。エタロンを貫通するビームエネルギーの更なる低減は、フォトダイオードアレーの短い寸法方向のスポットパターンを低減すれば実現できることが認識されるべきである。しかし、15 mm よりも小さくなる低減ば、光学的位置合わせが更に難しいものになる。従って、設計担当者は、スポットパターンの大きさは、妥協点の問題であると考えるべきである。

#### 【0077】

約 248.327 nm で作動する KrF レーザ用に設計された別のシステムにおいては、波長の調節を伴う類似の設計が提供される。この実施形態において、レンズ 400 は、約 50 mm の焦点距離を有する。(レンズは、メレス・グリオット・コーポレーションの部品番号 OILQP001 である。) 平行化レンズ 402 は、-20 mm の焦点距離を有する (EVI・レーザ・コーポレーションの部品番号 PLCC-10.0-UV)。回折拡散要素 406 は、メムズ・オプティカル・コーポレーションの部品番号 D023-248 である。この実施形態において、また、ArF に関する実施形態において、2 つのレンズの間隔は、スペーサ 416 で適切に決めることができる。本出願人は、2000 Hz で作動するレーザに関してエタロンを貫通するビームのエネルギーは、約 10 mW であり、エタロンにおける重大な熱に関する問題を引き起すほどのものではないと推定する。

#### 【0078】

他の好ましい実施形態において、ビームは、レンズ 400 及び 402 の間に集束させることができるであろう。適切なレンズは、この場合、公知の光学的技術を用いて選択されると考えられる。

#### 【0079】

##### パルスエネルギー及び波長のフィードバック制御

上述の通り、各パルスのパルスエネルギーの測定結果に基づいて、その後のパルスのパルスエネルギーは、本明細書において引用により組み込まれる、「エキシマレーザのパルスエネルギー制御」と題した米国特許第 6,005,879 号で全て説明されているように、所望のパルスエネルギーと、特定数のパルスの所望の総積算線量も維持するように制御される。

#### 【0080】

レーザの波長は、波長の測定値と、本明細書において引用により組み込まれる、「エキシマレーザに対する波長システム」と題した米国特許第 5,978,394 号で説明されている技術などの従来技術における公知の技術とを用いてフィードバック構成で制御することができる。本出願人は、近年、同調ミラーの超高速運動をもたらすために圧電ドライバを利用する波長同調用の種々の技術を開発した。これらの技術の一部は、本明細書において引用により組み込まれる、2000 年 6 月 30 日出願の「レーザ用帯域幅制御技術」と題した米国特許出願一連番号第 608,543 号で説明されている。図 8 A 及び図 8 B

は、その出願から抜粋されたものであり、この技術の主要要素を示す。超高速ミラー調節には圧電スタックが使用され、より大きくよりゆっくりとした調節は、レバーアームを作動させる従来技術によるステッパモータによって行われる。この圧電スタックは、レバーアームの支点の位置を調節するものである。

【0081】

組合せ P Z T / ステッパモータ駆動式同調ミラーを有する新しい L N P

圧電ドライブを使用した詳細設計

図 8 は、出力レーザビームの波長及びパルスエネルギーを制御するために重要なレーザシステムの特徴を示すブロック図である。示されているのは、3点プリズムビーム拡大器と、同調ミラー 14 と、回折格子とを含むラインナローライングモジュール 15K である。波長計 104 は、出力ビーム波長をモニタし、以下に説明するステッパモータ及び P Z T スタックの作動によって同調ミラー 14 の位置を制御する L N P プロセッサ 106 にフィードバック信号を供給する。作動波長は、レーザコントローラ 102 によって選択することができる。また、パルスエネルギーは、波長計 104 において測定され、波長計は、先に説明したフィードバック構成でパルスエネルギーを制御するためにコントローラ 102 によって使用される信号を供給する。図 8A は、P Z T スタック 80 、ステッパモータ 82 、ミラー 14 、及びミラーマウント 86 を示すブロック図である。

【0082】

図 8B1 は、本発明の好ましい実施形態の詳細な特徴を示す図である。ミラー 14 の位置の大きな変化が、26.5 : 1 のレバーアーム 84 を介してステッパモータによって生み出される。この場合、圧電ドライブ 80 端部のダイヤモンドパッド 41 は、レバーアーム 86 の支点で球形工作ボールに接触するように設置されている。レバーアーム 84 上部とミラーマウント 86 との接触は、レバーアーム上の円筒形ドエルピン及び 85 で示すミラーマウント上に取り付けられた 4 つの球形ボールベアリング（そのうちの 2 つのみを図示）でもたらされる。圧電ドライブ 80 は、圧電マウント 80A で L N P フレーム上に取り付けられ、ステッパモータは、ステッパモータマウント 82A でフレームに取り付けられている。ミラー 14 は、3 つのアルミニウム球体を使用する 3 点マウントでミラーマウント 86 内に取り付けられており、そのうちの 1 つのみが図 8B1 に示されている。3 つのばね 14A は、球体に対してミラーを保持する圧縮力を付加する。

【0083】

図 8B2 は、図 8B1 に示すものとは若干異なる好ましい実施形態である。この実施形態は、圧電ドライブを L N P 内の環境から隔離するためにベローズ 87 を含む。この隔離によって、圧電要素の紫外線による損傷が防止され、圧電材料からの気体放出によって引き起こされる汚染の可能性が回避される。

【0084】

試験結果

図 8C は、図 8B2 の実施形態が装備されたレーザからの実際の試験データを示す。グラフは、平均 30 個のパルスウインドウの目標波長からのずれをプロットしたものである。このずれは、約 0.05 pm から約 0.005 pm に低減される。

【0085】

この実施形態は、先に説明したステッパモータ駆動システムと比較すると、大きなスピードアップであるが、パルス間の調節に対して十分な速さであるというわけではない。ミラー位置決めの以前の方法では、ミラー 14 を移動させるのに約 7 ms が必要であり、2000 Hz でのパルス間の波長補正を問題外にする。この以前の技術においては、レバーアームは、ステッパ位置の動きと比較してミラーの動きを 1 : 26.5 に低減させるためにピボット軸回りに回転していた。従来技術によるステッパは、1 / 2 インチ (12.7 mm) の総移動量と 6000 ステップとを有し、そのために、各ステップは、約 2 ミクロノンの距離であった。1 : 26.5 の低減を用いると、1 つのステップで、ミラーは約 7.5 nm 移動し、これによって、一般的にレーザ波長の波長が約 0.1 pm 变化する。図 12A に示す速く作用する技術においては、圧電スタック 80 が、レバーアームのピボット位

10

20

30

40

50

置に追加されている。好ましい圧電スタックは、ドイツのワルドブロン所在のフィジク・インストルメンテ・GmbHによって供給される「モデルP-840.10」である。このスタックであれば、20ボルトの駆動電圧の変化で約3.0ミクロンの直線的な調節を生み出すことになる。この範囲は、ステッパモータの約±20ステップと同等である。

【0086】

スタックは、1マイクロ秒未満内で制御信号に応答し、システムは、4000Hzの周波数で、更新された信号に容易に応答することができる。好ましい実施形態において、4000Hzのパルス繰返し数での各パルスの制御は、十分な時間の波長計算を可能にするために、前のパルスではなく前のパルスの前のパルスに基づいている。しかし、この実施形態は、7ミリ秒の待ち時間を有する従来技術の設計に対して7倍の改善をもたらす。従って、はるかに速いフィードバック制御を行うことができる。1つの好ましいフィードバック制御アルゴリズムを図8Dに説明する。このアルゴリズムにおいて、波長は、各パルスについて測定され、最後の4つ及び最後の2つのパルスの平均波長が計算される。平均値のいずれかの目標波長からのずれが0.02pmよりも短い場合、調節は行われない。両方の平均値の目標からのずれが0.02pmを上回る場合、波長補正をもたらすために、圧電スタック80によってミラーアセンブリに対して調節が行われる。2つの平均値のいずれが使用されるかは、最後の調節からどのくらいの時間が経過したかによって決まる。圧電スタックは、スタックがその範囲の30%及び70%に近づく時に（又は、より利用可能な範囲が得られるように、30%及び70%の範囲の値ではなく、45%及び55%を使用することができるであろう）、ステッパモータのステップを進めることによって制御範囲内に維持される。ステッパモータでは、1つの段階を完了するのに約7msが必要であることから、このアルゴリズムは、ステッパモータの1ステップ中に幾つかの圧電調節を行うことができる。

10

20

30

【0087】

本発明の特定の実施形態を示して説明したが、本発明のより広い態様において、本発明から逸脱することなく種々の変更及び修正を為し得ることが当業者には明らかであろう。例えば、帯域幅が複数のプリズムでラインナローイングされ、ビームが同調ミラーにより反射される部分的ラインナロードレーザである。この技術は、同調ミラーのディザリングを伴うであろう。ピーク分離は、示された例とは異なることができる。しかし、通常は、ピークは、少なくとも0.5pmオフセットされるであろう。リソグラフィにおいては、パルスのバーストは、通常、約20から400パルスを包含する。大半のリソグラフィユニットは、現在、1000Hz又はそれ以上で作動する。これらのディザリング技術は、干渉性に関する問題を解消することを助けていることも認識すべきである。従って、特許請求の範囲は、本発明の真の精神及び範囲に該当するような変更及び修正の全てをその範囲内に包含するものとする。

【図面の簡単な説明】

【0088】

【図1A】波長による最良の焦点の変動を示すグラフである。

【図1B】一般的な狭帯域ガス放電レーザスペクトルを示す図である。

【図2A】本発明の好ましい実施形態の特徴を明らかにする図である。

40

【図2B】本発明の好ましい実施形態の特徴を明らかにする図である。

【図2C】本発明の好ましい実施形態の特徴を明らかにする図である。

【図2D】本発明の好ましい実施形態の特徴を明らかにする図である。

【図2E】本発明の好ましい実施形態の特徴を明らかにする図である。

【図2F】本発明の好ましい実施形態の特徴を明らかにする図である。

【図2G】本発明の好ましい実施形態の特徴を明らかにする図である。

【図2H】本発明の好ましい実施形態の特徴を明らかにする図である。

【図2I】本発明の好ましい実施形態の特徴を明らかにする図である。

【図3】帯域幅による架空画像強度の変動を示す図である。

【図4A】帯域幅による限界寸法の変動を示す図である。

50

【図4B】帯域幅による限界寸法の変動を示す図である。

【図4C】帯域幅による限界寸法の変動を示す図である。

【図5】狭帯域レーザシステムの図である。

【図5A】同調機構の特徴を示す図である。

【図5B】同調機構の特徴を示す図である。

【図6】波長計の図である。

【図6A】波長及び帯域幅の計算方法を示す図である。

【図6B】波長及び帯域幅の計算方法を示す図である。

【図6C】波長及び帯域幅の計算方法を示す図である。

【図6D】波長及び帯域幅の計算方法を示す図である。

10

【図6E】好ましいエタロンの特徴及び詳細を示す図である。

【図6F】好ましいエタロンの特徴及び詳細を示す図である。

【図6G】好ましいエタロンの特徴及び詳細を示す図である。

【図6H】好ましいエタロンの特徴及び詳細を示す図である。

【図7】好ましい波長制御システムで使用される電子機器及びプロセッサを示す図である

。

【図8A】PZT駆動装置を有する波長制御システムの特徴を示す図である。

【図8B1】PZT駆動装置を有する波長制御システムの特徴を示す図である。

【図8B2】PZT駆動装置を有する波長制御システムの特徴を示す図である。

【図8C】PZT制御の効果を示す図である。

20

【図8D】制御アルゴリズムを示す図である。

【図8E】制御アルゴリズムを示す図である。

【図1A】

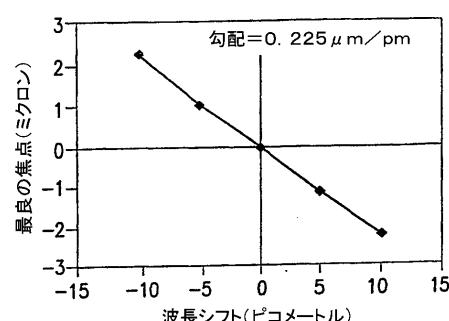


FIG.1A

【図2A】

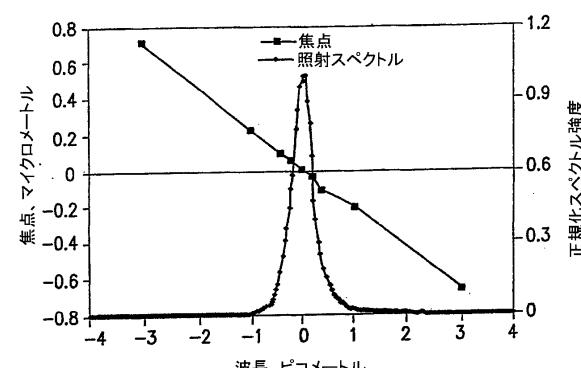


FIG.2A

【図1B】

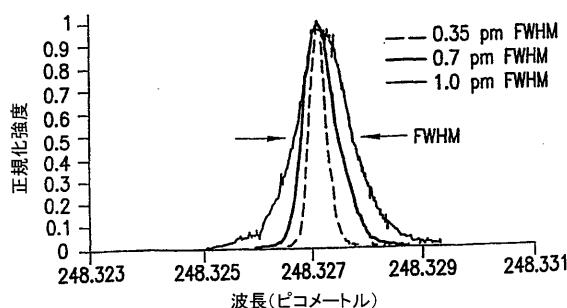


FIG.1B

【図 2 B】

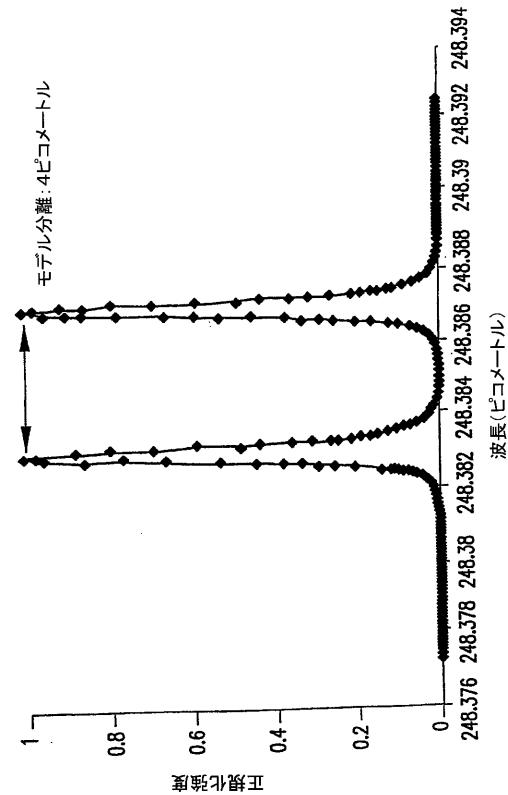


FIG.2B

【図 2 C 1】

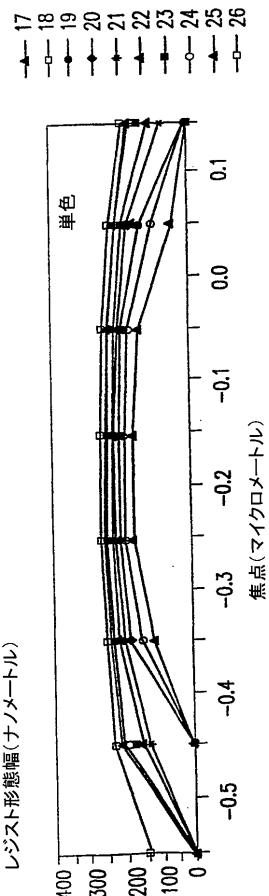


FIG.2C1

【図 2 C 2】

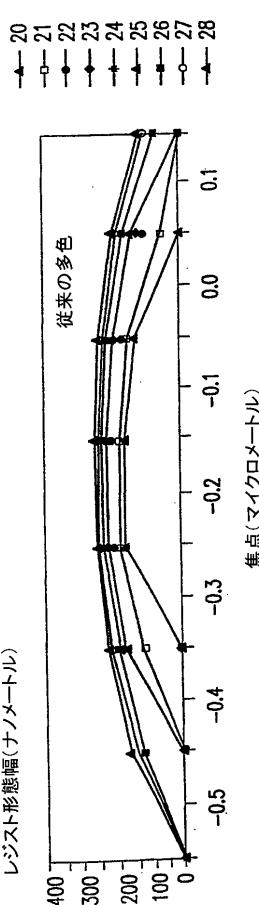


FIG.2C2

【図 2 C 3】

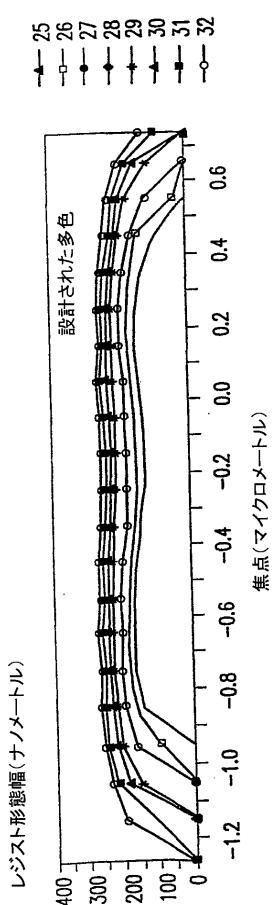
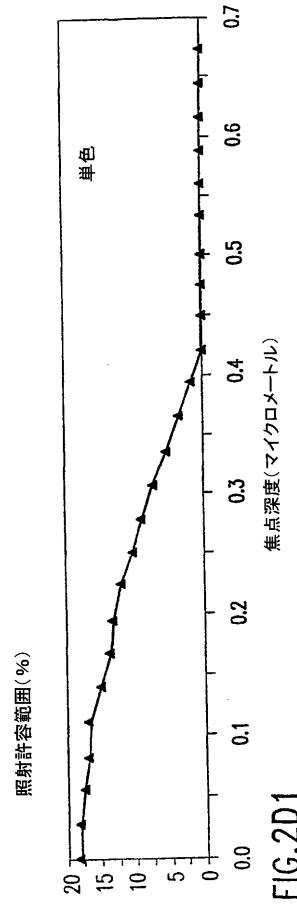
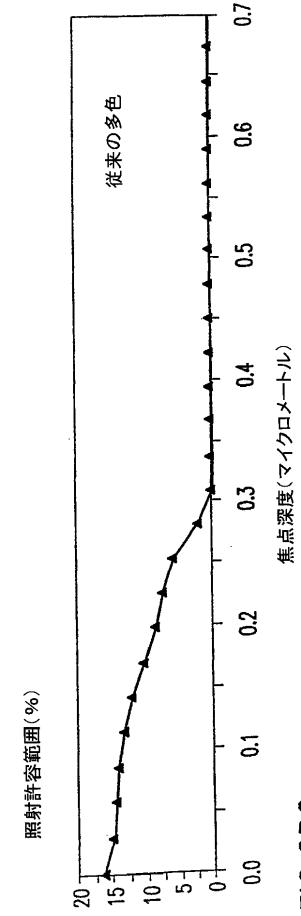


FIG.2C3

【図 2 D 1】



【図 2 D 2】



【図 2 D 3】

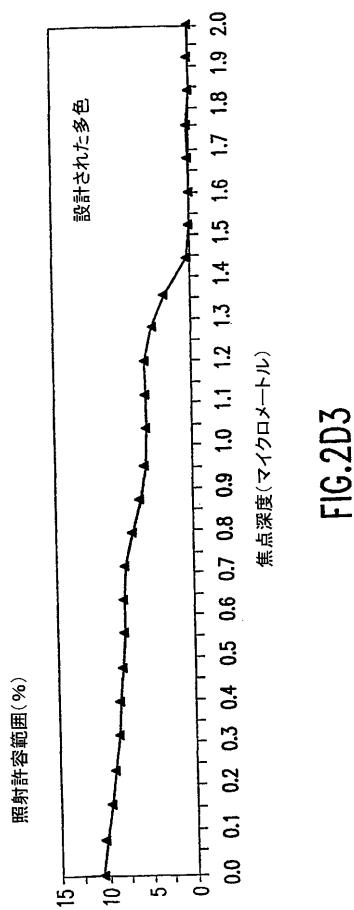


FIG.2D3

【図 2 E】

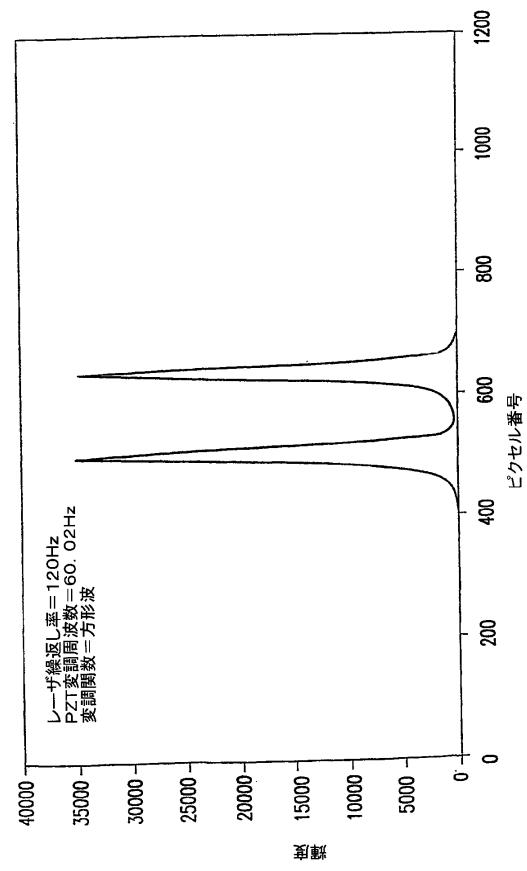
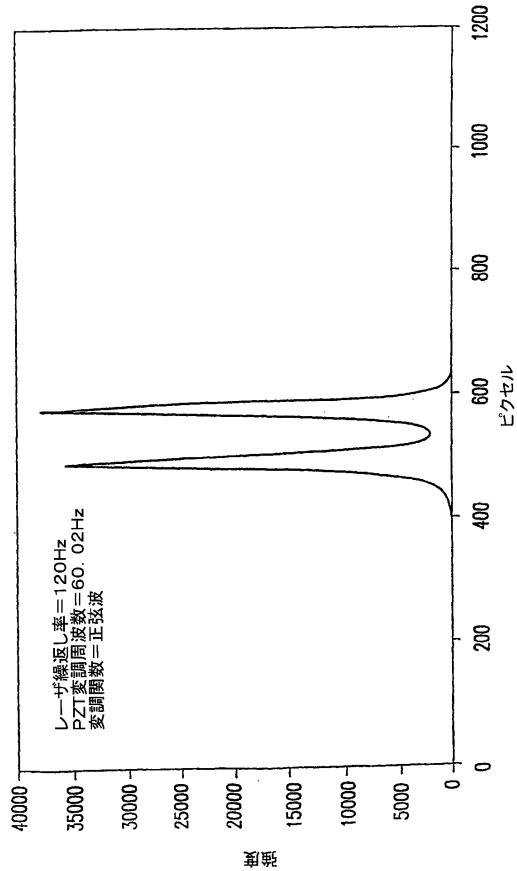


FIG.2E

【図2F】



【図2G1】

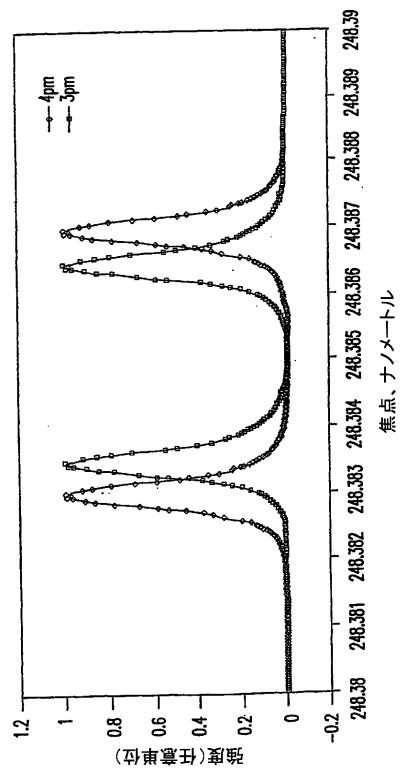


FIG.2G1

FIG.2F

【図2G2】

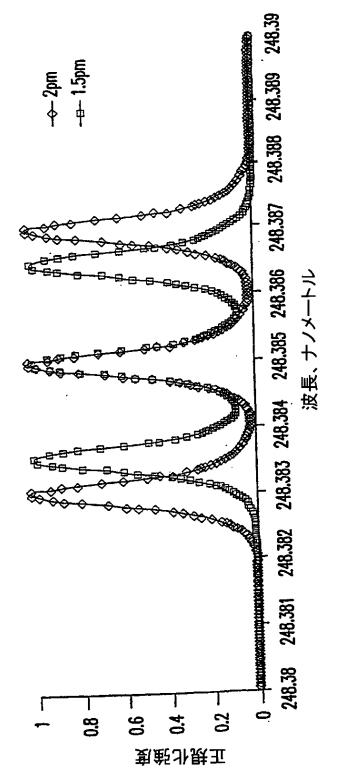


FIG.2G2

【図2G3】

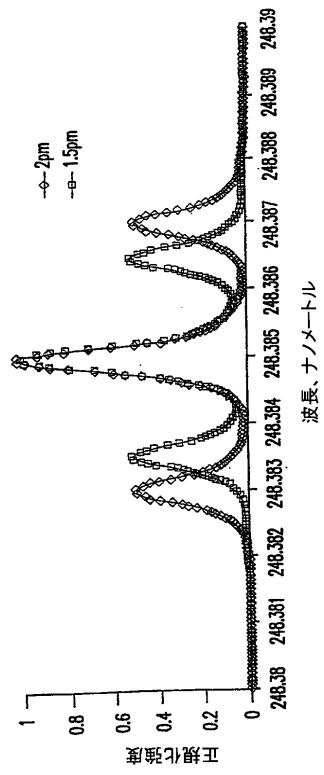
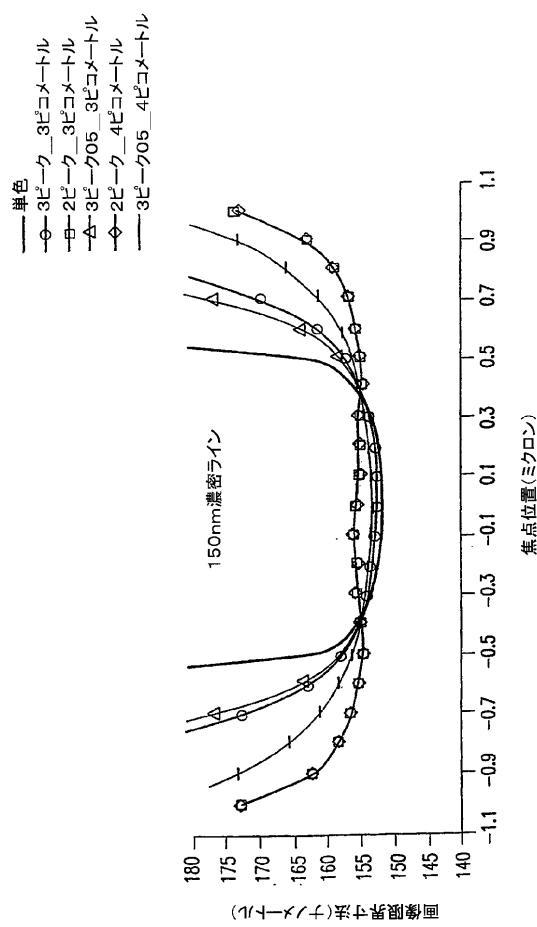


FIG.2G3

【図2H1】



【図2H3】

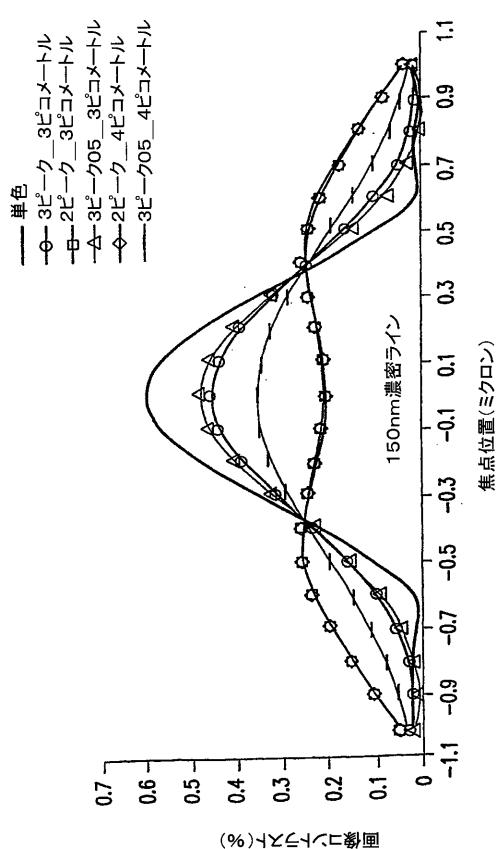


FIG.2H1

【図2H2】

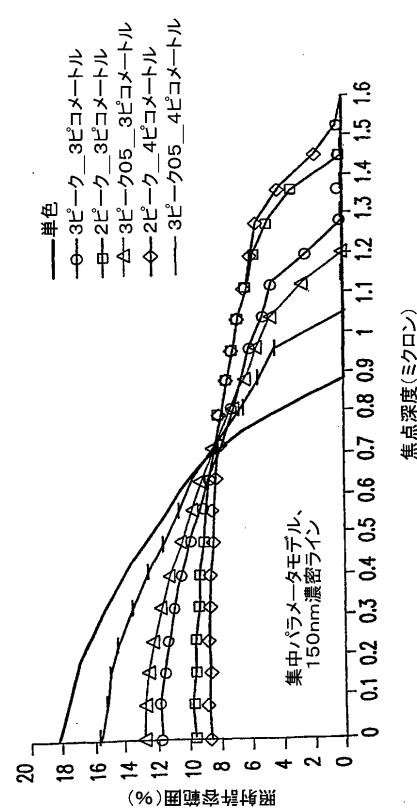


FIG.2H2

【図2I】

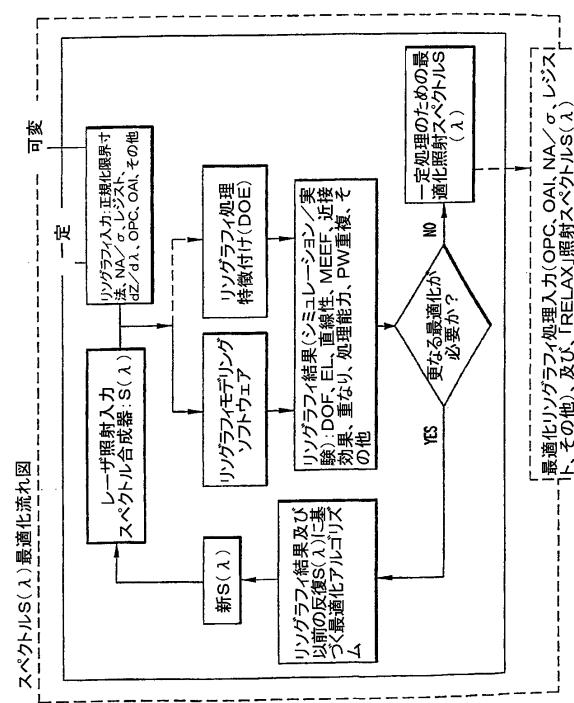


FIG.2I

【図3】

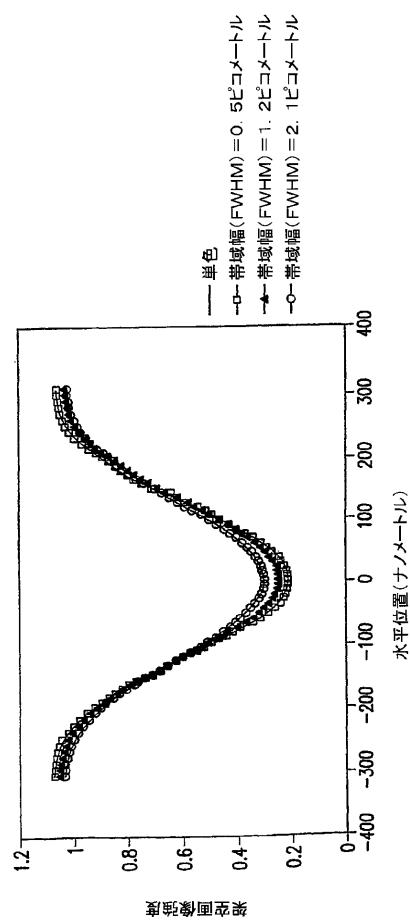


FIG.3

【図4A】

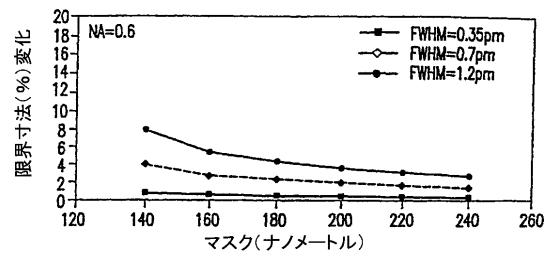


FIG.4A

【図4B】

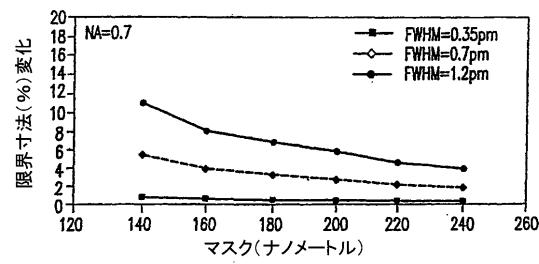


FIG.4B

【図4C】

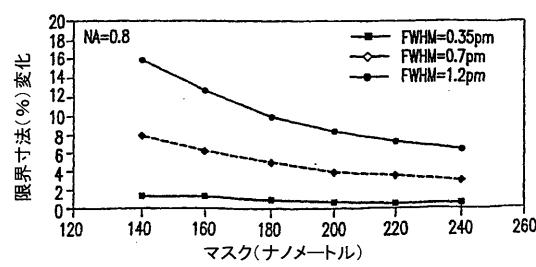


FIG.4C

【図5】

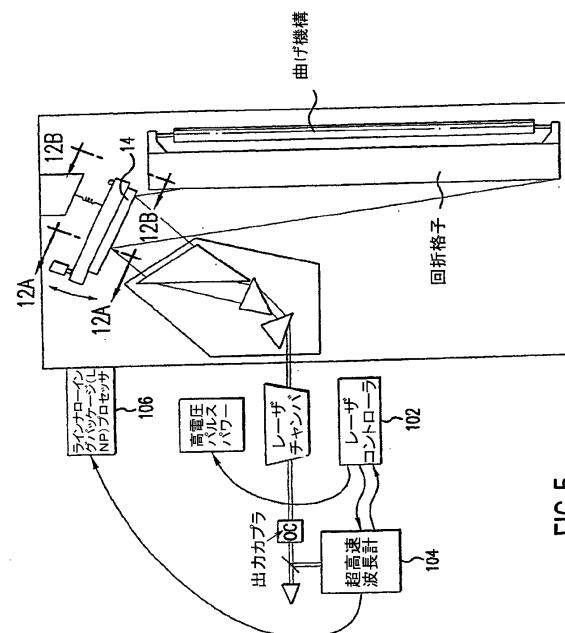


FIG.5

【図5A】

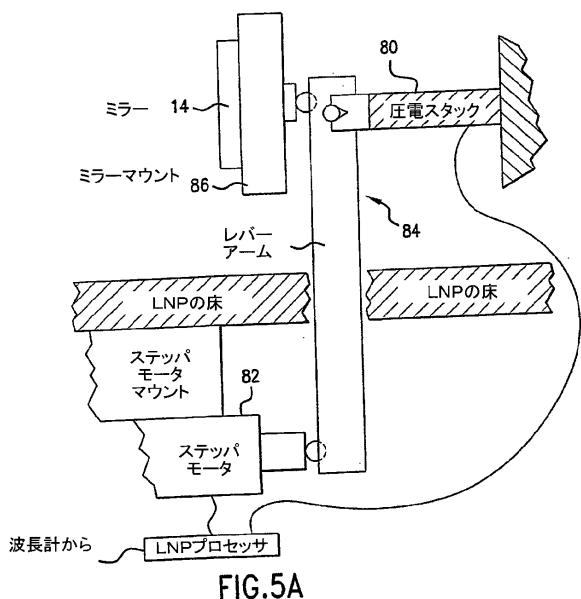


FIG.5A

【図5B】

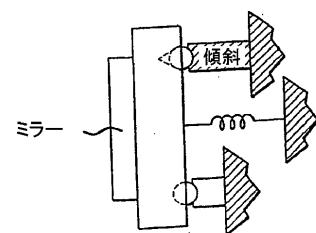


FIG.5B

【図6】

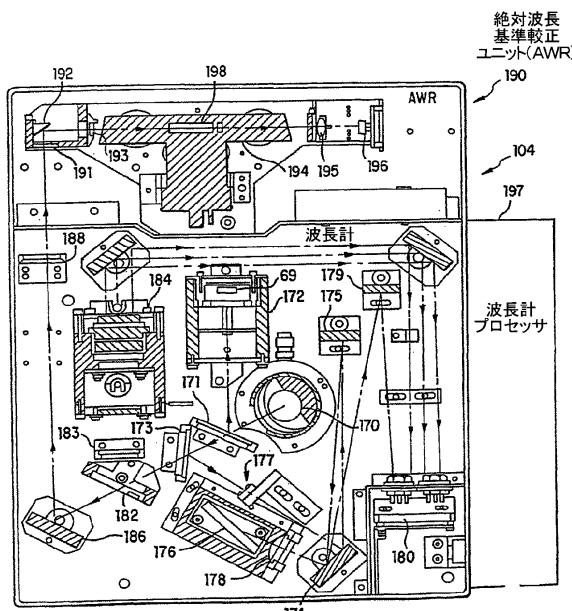


FIG.6

【図6A】

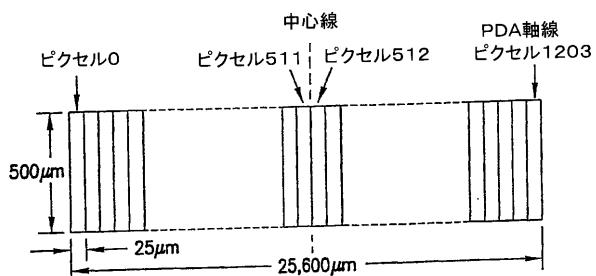
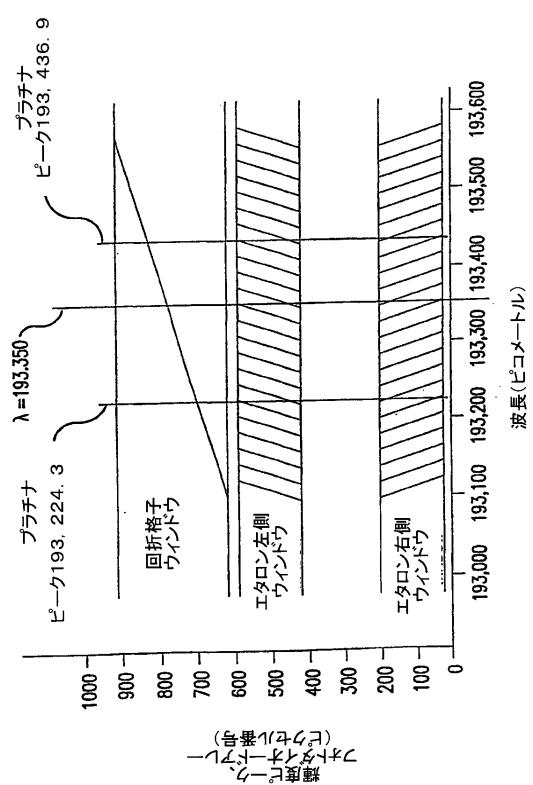


FIG.6A

【図 6 B】



【図 6 C】

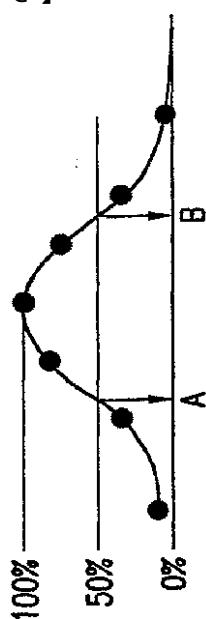


FIG.6C

FIG.6B

【図 6 D】

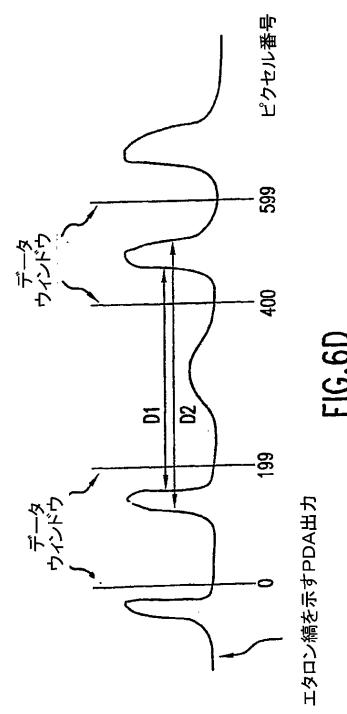


FIG.6D

【図 6 E】

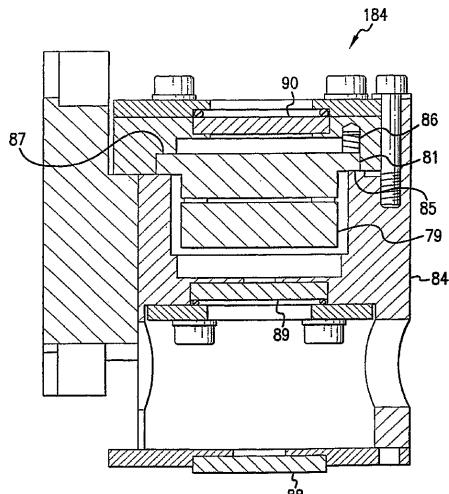


FIG.6E

【図 6 F】

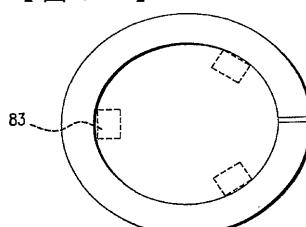


FIG.6F

【図 6 G】

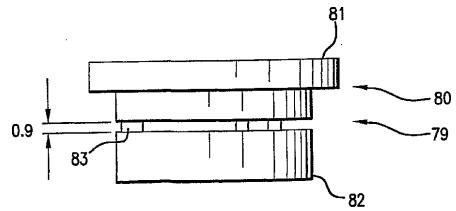


FIG.6G

【図 6 H】

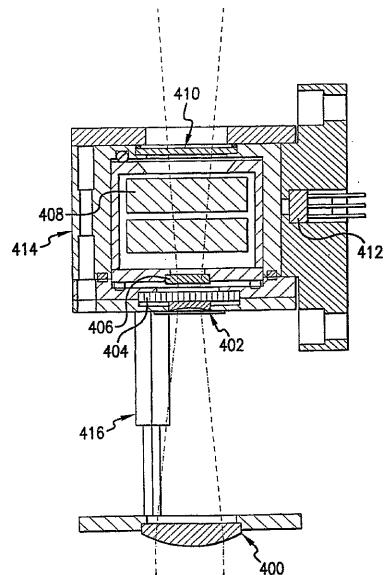


FIG.6H

【図 7】

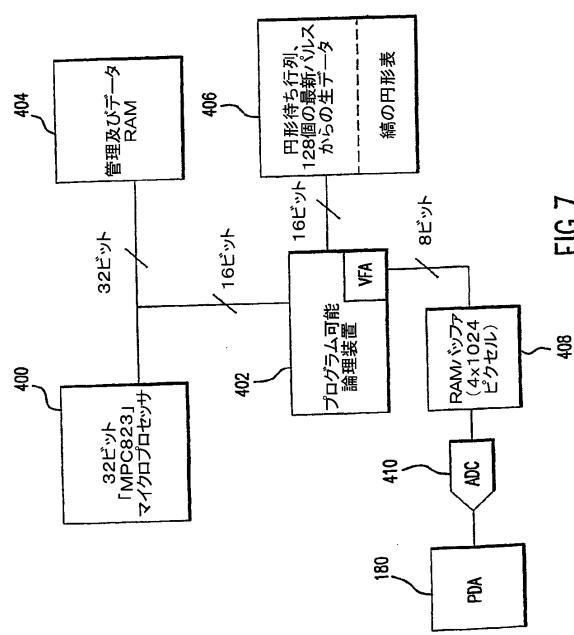


FIG.7

【図 8 A】

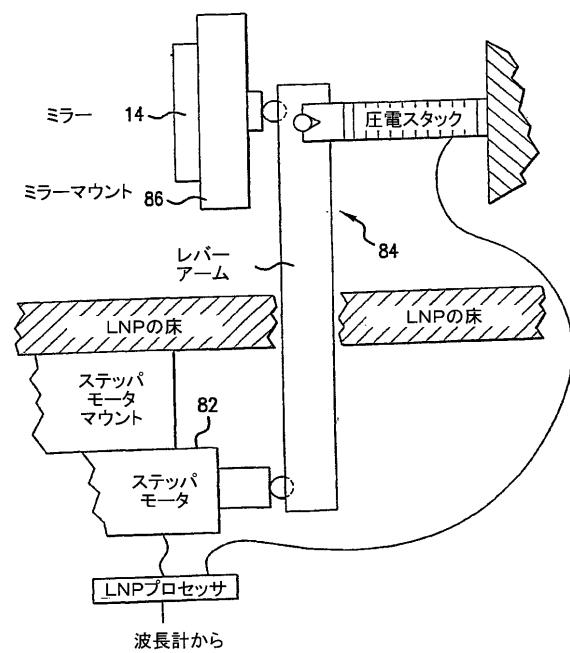


FIG.8A

【図 8 B 1】

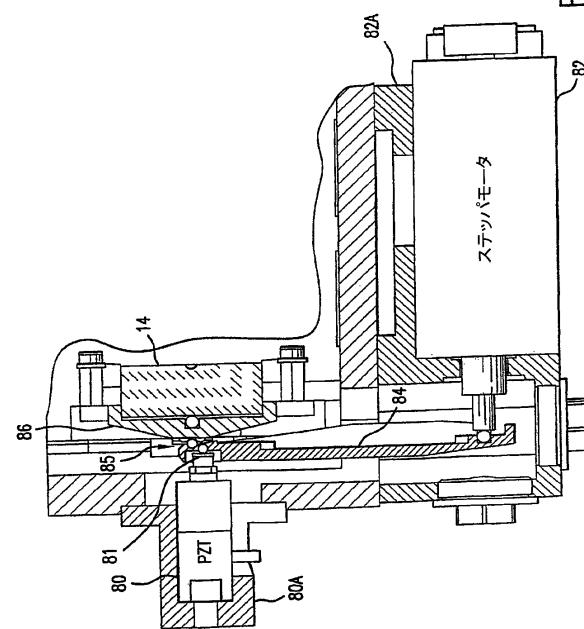


FIG.8B1

【図 8 B 2】

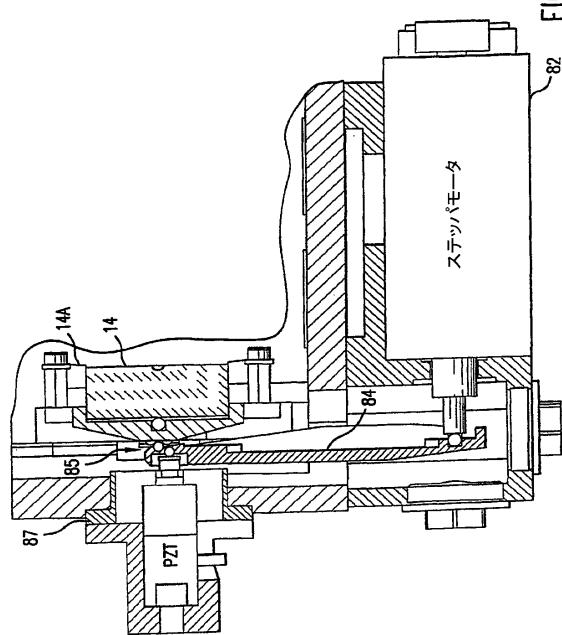


FIG.8B2

【図 8 C】

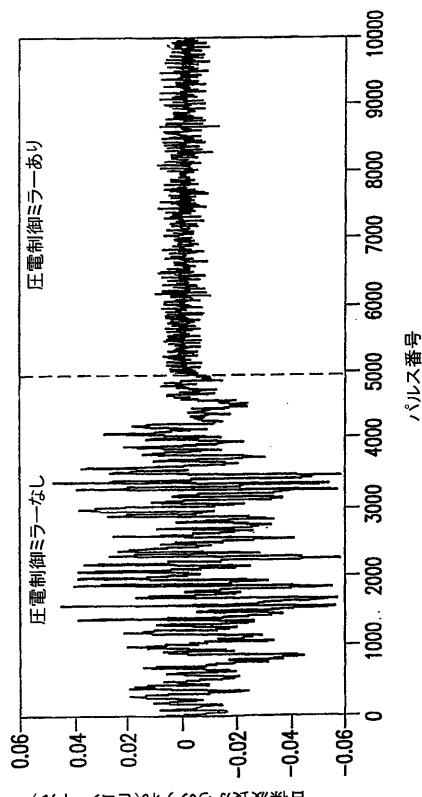


FIG.8C

【図 8 D】

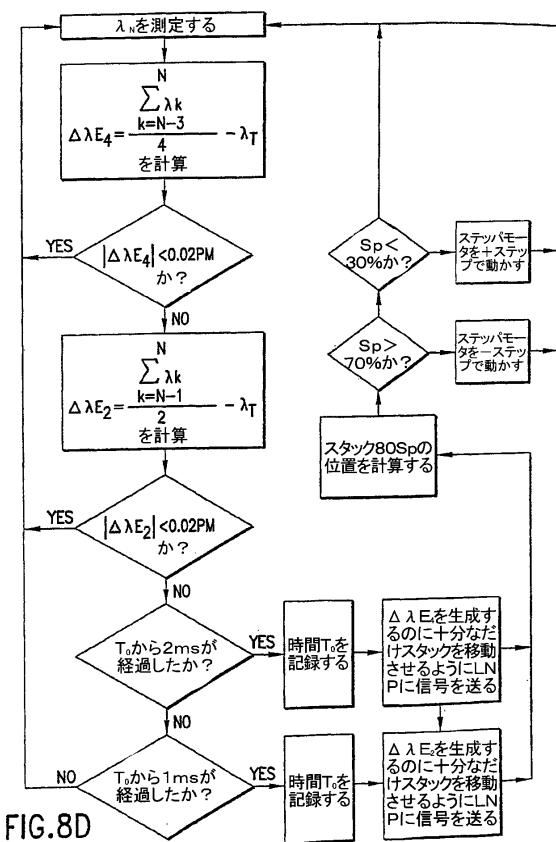


FIG.8D

【図 8 E】

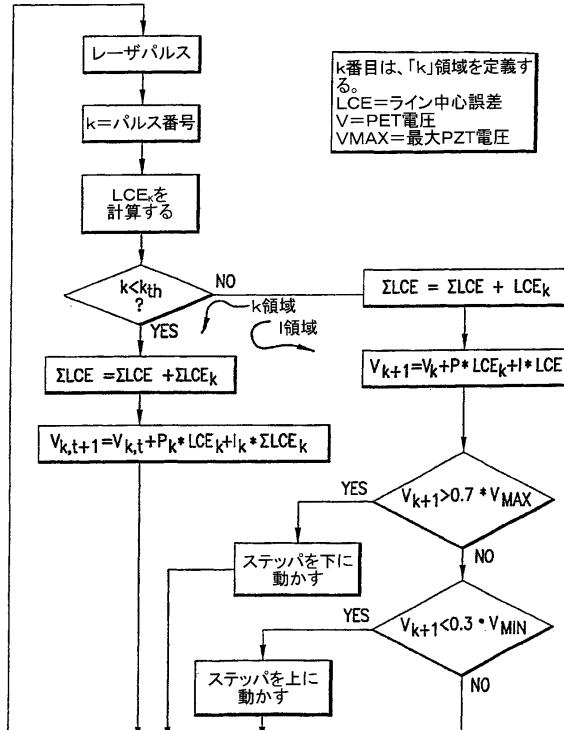


FIG.8E

## フロントページの続き

(51)Int.Cl.

F I

H01S 3/139

(74)代理人 100086771

弁理士 西島 孝喜

(72)発明者 クロヤン アーメン

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 92122 サン デイエゴ アギー ストリート 619  
4 #57

(72)発明者 ラロヴィック イヴァン

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 92122 サン デイエゴ ノーベル ドライヴ 395  
6 ユニット #104

(72)発明者 フォメンコフ イゴー

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 92129 サン デイエゴ ジャナル ウェイ 1439  
0

(72)発明者 ダス パラッシュ ピー

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 92084 ヴィスタ パセオ デ アンザ 2029

(72)発明者 サンドストロム リチャード エル

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 92024 エンシニタス ブリドゥーン テラス 410

(72)発明者 アルゴツ ディジョン エム

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 92131 サン デイエゴ ハンドリッチ ドライヴ 1  
1795

(72)発明者 アーメド クールシッド

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 92122 サン デイエゴ ジェネシー アヴェニュー  
8148 #77

審査官 佐藤 海

(56)参考文献 特表2004-537176 (JP, A)

特開2001-267673 (JP, A)

特開平11-261148 (JP, A)

特開平11-298084 (JP, A)

特開2006-216949 (JP, A)

特開2009-010231 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G03F 7/20-7/24

H01L 21/027

H01S 3/00