

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4822285号
(P4822285)

(45) 発行日 平成23年11月24日(2011.11.24)

(24) 登録日 平成23年9月16日(2011.9.16)

(51) Int. Cl. F I
 HO 1 S 3/034 (2006.01) HO 1 S 3/03 G
 HO 1 L 21/027 (2006.01) HO 1 L 21/30 5 1 5 B

請求項の数 4 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2007-250865 (P2007-250865)	(73) 特許権者	300073919
(22) 出願日	平成19年9月27日(2007.9.27)		ギガフォトン株式会社
(65) 公開番号	特開2009-81363 (P2009-81363A)		東京都千代田区大手町2-6-1 朝日東海ビル
(43) 公開日	平成21年4月16日(2009.4.16)	(74) 代理人	100139103
審査請求日	平成22年4月1日(2010.4.1)		弁理士 小山 卓志
		(74) 代理人	100139114
			弁理士 田中 貞嗣
		(74) 代理人	100088041
			弁理士 阿部 龍吉
		(74) 代理人	100095980
			弁理士 菅井 英雄
		(74) 代理人	100094787
			弁理士 青木 健二

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ガスレーザ用光学素子及びそれを用いたガスレーザ装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

入射平面と射出平面を備え、紫外線が入射平面から入射し、射出平面から射出するフッ化カルシウム結晶からなる紫外線ガスレーザ用光学素子において、少なくとも入射平面と射出平面のどちらか一方の平面がフッ化カルシウム結晶の(111)結晶面に平行であり、

入射平面から入射したレーザ光が
 [111]軸と[001]軸を含む面内で、[111]軸と[001]軸との間、
 [111]軸と[010]軸を含む面内で、[111]軸と[010]軸との間、
 又は、[111]軸と[100]軸を含む面内で、[111]軸と[100]軸との間、
 を通過し、射出平面から射出され、

10

前記レーザ光の入射平面への入射角度は、 24.9° から 68.73° の角度範囲内であり、

前記フッ化カルシウム結晶は、[111]軸を中心に回転され、真性複屈折が極小となる領域に設置されることを特徴とするガスレーザ用光学素子。

【請求項2】

レーザチャンバと、レーザチャンバの一方の側とその反対側に設置された光共振器と、レーザチャンバ内部に封入されたレーザガスと、そのレーザガスを励起する手段と、励起されたレーザガスから発生する光がレーザチャンバ外部へ出射するためにレーザチャンバに設けられた2つのウィンドウとを有し、前記ウィンドウが前記光共振器の光軸上に沿っ

20

て配置されているガスレーザー装置において、前記各ウィンドウは前記ガスレーザー用光学素子からなることを特徴とする請求項1に記載のガスレーザー用光学素子を用いたガスレーザー装置。

【請求項3】

レーザーチャンバと、レーザーチャンバの一方の側とその反対側に設置された光共振器と、レーザーチャンバ内部に封入されたレーザーガスと、そのレーザーガスを励起する手段と、励起されたレーザーガスから発生する光がレーザーチャンバ外部へ出射するためにレーザーチャンバに設けられた2つのウィンドウと、レーザー光を分割するビームスプリッタとを有し、前記ウィンドウが前記光共振器の光軸上に沿って配置されているガスレーザー装置において、前記ビームスプリッタは前記ガスレーザー用光学素子からなることを特徴とする請求項1に記載のガスレーザー用光学素子を用いたガスレーザー装置。

10

【請求項4】

レーザーチャンバと、レーザーチャンバの一方の側とその反対側に設置された光共振器と、レーザーチャンバ内部に封入されたレーザーガスと、そのレーザーガスを励起する手段と、励起されたレーザーガスから発生する光がレーザーチャンバ外部へ出射するためにレーザーチャンバに設けられた2つのウィンドウと、ビーム拡大光学系と、を有するガスレーザー装置において、前記ビーム拡大光学系のウェッジ基板は前記ガスレーザー用光学素子からなることを特徴とする請求項1に記載のガスレーザー用光学素子を用いたガスレーザー装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

20

【0001】

本発明は、ガスレーザー用光学素子及びそれを用いたガスレーザー装置に関し、特に、エキシマレーザーやフッ素分子レーザー等の半導体露光装置で使用される紫外線ガスレーザー用光学素子及びそれを用いたガスレーザー装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

(露光用光源)

半導体集積回路の微細化、高集積化につれて、半導体露光装置においては解像力の向上が要請されている。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おり、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ー装置が用いられている。現在の露光用ガスレーザー装置としては、波長248nmの深紫外光を放出するKrFエキシマレーザー装置、並びに、波長193nmの真空紫外光を放出するArFエキシマレーザー装置が用いられている。次世代の露光技術として、露光用レンズとウエハー間を液体で満たして屈折率を変えることによって、露光光源の見かけの波長を短波長化する液浸技術をArFエキシマレーザー露光に適用しようとしている。ArFエキシマレーザー液浸では、純水を液浸液にした場合134nmの波長になる。また、次々世代の露光用光源として、波長157nmの真空紫外光を放出するF₂(フッ素分子)レーザー装置によるF₂レーザー液浸露光が採用される可能性もある。F₂レーザー液浸では、115nmの波長になると言われている。

30

【0003】

(露光用光学素子と色収差)

多くの半導体露光装置の光学系には、投影光学系が採用されている。投影光学系では、異なる屈折率を有するレンズ等の光学素子が組み合わされて色収差補正が行われる。現在、露光用光源であるレーザー波長の248nm~157nmの波長(紫外線)域では、投影光学系のレンズ材料として使用に適する光学材料は、合成石英とCaF₂以外にはない。このため、KrFエキシマレーザー用の投影レンズとしては、合成石英のみで構成された全屈折タイプの単色レンズが採用され、ArFエキシマレーザー用の投影レンズとしては、合成石英とCaF₂で構成された全屈折タイプの部分色消しレンズが採用されている。ところが、KrFエキシマレーザー、ArFエキシマレーザーの自然発振スペクトル線幅は約350~400pmと広いために、これらの投影レンズを使用すると、色収差が発生して解像

40

50

力が低下する。そこで、色収差が無視できるまでに、これらのガスレーザー装置から放出されるレーザー光のスペクトル線幅を狭帯域化する必要がある。このため、これらのガスレーザー装置には狭帯域化素子（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がレーザー共振器内に設けられ、スペクトル線幅の狭帯域化が実現されている。

【0004】

（液浸リソグラフィーと偏光照明）

上記したように、ArFエキシマレーザー液浸リソグラフィーの場合、媒体としてH₂Oを使用したとき、屈折率が1.44になるため、屈折率に比例するレンズ開口数NAは原理的に従来の開口数に対して1.44倍に増やすことができる。NAが高くなるにつれ、光源であるレーザー光の偏光純度の影響が大きくなる。偏光の向きがマスクパターンの方向に平行であるTE偏光の場合は影響がないが、それが直交するTM偏光の場合は、像のコントラストが低くなってしまふ。これは、後者の場合、ウエハー上の焦点における電界のベクトルが異なる方向であるため、ウエハーへの入射角が大きくなるに従い、電界のベクトルが同一である前者に比べ、強度が弱くなってしまふためである。この影響はNAが1.0に近づくか超える場合に強くなり、ArFエキシマレーザー液浸はこの場合に該当する。そのため、以上のように露光装置の照明系では、所望の偏光状態を制御する必要がある。この偏光照明の制御には、露光装置の照明系に入力されるレーザーの偏光状態が直線偏光であることが要求されている。偏光純度は、直線偏光と非直線偏光の割合であり、レーザーの偏光は、偏光純度が高く維持されることが要求されている。

【0005】

（偏光純度を高めるための従来技術）

レーザー光の偏光純度を高めるための技術として、これまでに特許文献1と特許文献2に記載の技術がある。

【0006】

特許文献1に記載のものは、ビームエキスパンダプリズムやフロントミラー等のレーザーに使用する光学素子のフッ化カルシウム結晶の劈開面(111)に垂直にレーザー光が透過するようにして、光学素子内部を光が通過するときに受ける複屈折による偏光純度の悪化を防ぐ方法である。

【0007】

特許文献2に記載のものは、レーザーに使用する光学素子のフッ化カルシウム結晶の(100)面に垂直にレーザー光の光軸が透過するようにして、光学素子内部を光が通過するときに受ける真性複屈折による偏光純度の悪化を防ぐ方法である。

【0008】

しかしながら、上記の従来技術には、次に述べるような問題がある。

【0009】

特許文献1に記載のものでは、実際に光学素子としてウィンドウの(111)面に光軸が垂直に通過し、かつ、その表面がブリュースタ角になるようにするための具体的手段の記載がなく、両者を達成するためには、フッ化カルシウム結晶をウィンドウにカットする面は表面がある程度硬い結晶方位面でなくなるため、表面粗さが小さな高精度研磨ができなくなる。表面粗さが小さな研磨ができない場合には、研磨表面からサブミクロン以内の領域に潜傷と呼ばれる傷が残る。この潜傷は、レーザー照射によりレーザー光を吸収して、結晶の表面を損傷させたり、フッ素が抜ける欠陥が発生して、実際にレーザーチャンバのウィンドウとして使用することができないという問題点がある。

【0010】

特許文献2に記載のものでは、光学素子の(100)面に垂直にレーザー光が透過するように配置することによって、真性複屈折による偏光純度の悪化を防いでいるが、応力を与えたときに発生する応力複屈折は、(100)面に垂直な[100]方向が最も大きく、チャンバウィンドウとして使用する場合、ウィンドウのホールド時の応力やチャンバ内の数気圧のガスによる圧力、また、レーザー照射による発熱応力等によって応力複屈折が発生する可能性がある問題があった。また、カット面は(111)面と17.58°または2

10

20

30

40

50

6.76°をなす角度でカットして、このカット面をチャンバウィンドウの両面としているため以下の2つの課題が発生していた。一つは、このカット面を表面荒さが小さな高精度研磨ができないため、レーザ照射による表面損傷の閾値が低くなっていた。二つ目は、レーザチャンバウィンドウとして使用する場合、約4000 hPaのガス圧力がかかるため、例えば、壁界しやすい(111)面で、破損する可能性があった。さらに、カット面を(111)面と17.58°でカットした場合には、チャンバウィンドウと光軸とのなす角度は、70°となり、P偏光とS偏光のフレネル反射がそれぞれ4.2%と30.0%なり、このウィンドウを透過することにより、P偏光成分は選択されるが、P偏光のフレネル反射が大きいいため、レーザの出力を確保することができないという問題があった。

【0011】

10

そこで、特許文献4のように、2つの平面を備えて紫外線がその1つの平面2から入射し、他の平面から射出するフッ化カルシウム結晶からなるウィンドウ等の紫外線ガスレーザ用光学素子において、少なくとも一方の平面がフッ化カルシウム結晶の(110)結晶面に平行である紫外線ガスレーザ用光学素子により、真性複屈折及び応力複屈折による偏光純度の悪化を防止すると共に、カット面を平滑にしてレーザ照射により割れや欠陥の発生を防止する技術が開示されている。

【特許文献1】特開平11-177173号公報

【特許文献2】米国特許出願公開第2003/219056号明細書

【特許文献3】特開2002-353545号公報

【特許文献4】特開2006-73921号公報

20

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

しかしながら、特許文献4に示す技術では、真性複屈折及び応力複屈折による偏光純度の悪化を防止すると共に、フッ化カルシウム結晶のカット面を(110)面することにより、ある程度の表面粗さの小さな高精度研磨を行うことにより、レーザ照射によるフッ化カルシウム結晶の表面損傷をある程度防止していた。

【0013】

本発明は従来技術のこのような問題点に鑑みてなされたものであり、その目的は、もっとも硬い結晶面(111)面でフッ化カルシウム結晶をカットし、この結晶面を表面粗さの小さな高精度研磨を行うことにより、潜傷を少なくし、レーザ照射によるフッ化カルシウム結晶の表面損傷を防止する。そして、P偏光のフレネル反射率を小さくし、真性複屈折による偏光純度の悪化を防止するフッ化カルシウム結晶を用いたプリュースタウィンドウやビームエキスパンダプリズム等のガスレーザ用光学素子及びそれを用いたガスレーザ装置を提供することである。

30

【課題を解決するための手段】

【0014】

そのために、本発明のガスレーザ用光学素子は、入射平面と射出平面を備え、紫外線が入射平面から入射し、射出平面から射出するフッ化カルシウム結晶からなる紫外線ガスレーザ用光学素子において、少なくとも入射平面と射出平面のどちらか一方の平面がフッ化カルシウム結晶の(111)結晶面に平行であり、入射平面から入射したレーザ光が[111]軸と[001]軸を含む面内で、[111]軸と[001]軸との間、[111]軸と[010]軸を含む面内で、[111]軸と[010]軸との間、又は、[111]軸と[100]軸を含む面内で、[111]軸と[100]軸との間、を通過し、射出平面から射出され、前記レーザ光の入射平面への入射角度は、24.9°から68.73°の角度範囲内であり、前記フッ化カルシウム結晶は、[111]軸を中心に回転され、真性複屈折が極小となる領域に設置されることを特徴とする。

40

【0017】

さらに、本発明のガスレーザ用光学素子を用いたガスレーザ装置は、レーザチャンバと、レーザチャンバの一方の側とその反対側に設置された光共振器と、レーザチャンバ内部

50

に封入されたレーザガスと、そのレーザガスを励起する手段と、励起されたレーザガスから発生する光がレーザチャンバ外部へ出射するためにレーザチャンバに設けられた2つのウィンドウとを有し、前記ウィンドウが前記光共振器の光軸上に沿って配置されているガスレーザ装置において、前記各ウィンドウは前記ガスレーザ用光学素子からなることを特徴とする。

【0018】

さらに、本発明のガスレーザ用光学素子を用いたガスレーザ装置は、レーザチャンバと、レーザチャンバの一方の側とその反対側に設置された光共振器と、レーザチャンバ内部に封入されたレーザガスと、そのレーザガスを励起する手段と、励起されたレーザガスから発生する光がレーザチャンバ外部へ出射するためにレーザチャンバに設けられた2つのウィンドウと、レーザ光を分割するビームスプリッタとを有し、前記ウィンドウが前記光共振器の光軸上に沿って配置されているガスレーザ装置において、前記ビームスプリッタは前記ガスレーザ用光学素子からなることを特徴とする。

10

さらに、本発明のガスレーザ用光学素子を用いたガスレーザ装置は、レーザチャンバと、レーザチャンバの一方の側とその反対側に設置された光共振器と、レーザチャンバ内部に封入されたレーザガスと、そのレーザガスを励起する手段と、励起されたレーザガスから発生する光がレーザチャンバ外部へ出射するためにレーザチャンバに設けられた2つのウィンドウと、ビーム拡大光学系と、を有するガスレーザ装置において、前記ビーム拡大光学系のウェッジ基板は前記ガスレーザ用光学素子からなることを特徴とする。

【発明の効果】

20

【0019】

本発明のガスレーザ用光学素子は、結晶表面を(111)面とすることにより、表面粗さが小さな高精度研磨が可能となり、潜傷によるレーザ照射により光の吸収を防ぎ表面損傷を防止することができる。そして、結晶をP偏光によるフレネル反射を小さくすることと、真性複屈折が極小になるように配置することにより、出力レーザ光の偏光純度の悪化を防止することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0020】

以下、本発明に係る実施形態の紫外線ガスレーザ用光学素子及び紫外線ガスレーザ装置について説明する。

30

【0021】

図1は、 CaF_2 の結晶格子を示す。本実施形態では、 CaF_2 の結晶は、結晶方位に合わせて(111)面でカットされる。 CaF_2 結晶は、図1に示すような、面心立方格子で構成されている。

【0022】

図2に示すように、 CaF_2 結晶の軸[001]、[100]に対する光の進行方向Lの角度 θ を定義すると、図2の $\theta = 45^\circ$ 、 $\theta = 54.74^\circ$ の方向が[111]軸方向となる。(111)面の表面は他の結晶軸表面よりも、一番硬いため、表面粗さが小さく、潜傷が少ない研磨が可能となる。

【0023】

図3は、本実施形態による CaF_2 (フッ化カルシウム)を用いたウィンドウ1の断面を示す。

40

【0024】

ウィンドウ1は、光学素子への入射角度が0よりも大きい角度で入射され、 CaF_2 の結晶内で屈折する光軸が[111]軸と[110]軸を含む面内で、且つ、[111]軸と[001]軸とのなす角の間を透過するように CaF_2 結晶を配置したものである。

【0025】

CaF_2 結晶からなるウィンドウ1は、(111)面に対して、平行な面で表面2及び2'で研磨されている。そして、例えばブリースタ角度 56.34° の入射角度 θ で CaF_2 結晶基板に対してP偏光でレーザビームが入射すると、表面2において、光がスネ

50

ルの法則にしたがって、 33.65° の屈折角度で屈折する。この時、 CaF_2 内部の屈折光軸が CaF_2 結晶の $[111]$ 軸と $[110]$ 軸を含む面内で、且つ、 $[111]$ 軸と $[001]$ 軸のなす角度の間($0^\circ < < 54.74^\circ$)を透過するように、 CaF_2 結晶を配置する。そして、 CaF_2 結晶内を透過して、面2'で再び、面2と同様にスネルの法則にしたがって、レーザー光は屈折して、再びガス中に光が伝播する。

【0026】

次に、プリュースタ角と偏光の関係について説明する。一般的に、ガスレーザー共振器内に使用されるチャンパウィンドウは、光軸に対してプリュースタ角の角度で配置されることが多い。これは、プリュースタ角にすることによって、ウィンドウに入射する光のP偏光成分のウィンドウ表面におけるフレネル反射が零になり、結晶の内部吸収は非常に小さく、略100%透過するため、ウィンドウ通過におけるレーザー光の損失がなくなり、出力エネルギーが減少しなくなるためである。

10

【0027】

レーザー光は共振器内を数～十数回往復して出力されるため、所謂偏光素子であるプリュースタウィンドウを数回通過する間に、S偏光成分はフレネル反射を受け減衰するのに対し、P偏光成分は減衰されることなく透過し、レーザー媒質内を通過することによって増幅されていく。これによりレーザー光は、概ねP偏光方向の直線偏光で出力される。

【0028】

狭帯域化レーザーでは、スペクトル線幅を狭帯域化するために、プリズムでビームを拡大し波長分散素子であるグレーティングに入射させている。拡大プリズムはビームの拡大率を大きくするために、プリズムの入射角度を大きくして、複数個使用することにより、トータルの拡大率を大きくしている。この理由は、レーザーのスペクトル線幅と拡大率はおおむね反比例の関係にあるからである。この拡大プリズムの斜面には、高い(プリュースタ角よりも大きい)入射角度でも反射損失が小さくなるようにP偏光に対して反射防止膜がコートされている。この反射防止膜はS偏光に対しては反射率が高い膜であるために、結果としてレーザー発振することによりP偏光成分が生き残り出力レーザー光の偏光純度は非常に高くなる。そして、レーザーチャンパのウィンドウはこのプリズムにより選択されたP偏光成分の反射損失が小さくなるように、傾けて設置される。プリュースタ角で設置した場合は、前述のようにウィンドウでのP偏光の反射損失が0%となるので、十分なレーザー出力が得られる。ArFエキシマレーザー(波長 193.368nm)では、20においてフッ化カルシウムの屈折率 n が 1.501958 となるため、プリュースタ角度は、 56.336° になる。また、 F_2 レーザー(波長 157.63nm)では、20においてフッ化カルシウムの屈折率 n が 1.559261 となるため、プリュースタ角度は、 57.3° になる。

20

30

【0029】

次に、複屈折による偏光の変化を説明する。一般に、結晶内を伝播する光は、互いに直交する2つの直線偏波状態の波の線形結合であり、それぞれの位相速度と振幅の大きさで、偏光状態と偏光方向が決まる。結晶内に複屈折が発生すると、結晶中を伝播する光ビームの位相速度がその偏波方向に依存してずれていく。これにより、直線偏光であった光ビームは、複屈折物質を通過することによって、互いに直交する2つの波の位相がずれ、直線偏光でなくなる(概ね楕円偏光になる)。このため、結晶内に複屈折が発生すると、P偏光で入射した光は結晶内部を透過することにより、P偏光純度が悪くなり、P偏光成分の光強度が減少する。偏光純度を高めるためには、複屈折の影響を受けないように配置するか、又は、最小にすることが必要となる。

40

【0030】

ここで、 CaF_2 の結晶方位による複屈折の大きさの分布を説明する。結晶における複屈折には、外乱のない理想的な結晶にも本来的に存在する真性複屈折(intrinsic birefringence)と、外部から力学的・熱的な力が加わって生じる応力複屈折(stress birefringence)の2つがある。最近になって、等軸結晶であるフッ化カルシウムでも、真性複屈折が生じることが分かってきた。真性複屈折は、結晶を構成する原子間隔に光の波長が近

50

づく、その影響が大きくなる。よって、ArFエキシマレーザやF₂レーザの短波長領域で使用する場合、真性複屈折の影響が大きくなり、無視できなくなってきた。真性複屈折及び応力複屈折の両者共、結晶方位による複屈折の大きさの違いがあり、計算によって求められている。

【0031】

図4に、結晶方位によるCaF₂の真性複屈折の大きさの分布を示す。CaF₂結晶の軸[001]、[100]に対する光の進行方向Lの角度 θ と ϕ を図2のように定義すると、真性複屈折は図4(a)、(b)のようになる。図4(a)の実線は、 ϕ を45°に保ったまま進行方向Lの軸[001]に対する角度 θ を0°から90°の間で変化させた場合であり、図4(a)の点線は、 θ を0°に保ったまま進行方向Lの軸[001]に対する角度 θ を0°から90°の間で変化させた場合であり、また、図4(b)の実線は、 ϕ を90°に保ったまま進行方向Lの軸[100]に対する角度 θ を0°から90°の間で変化させた場合である。図4(a)、(b)から明らかなように、結晶方位[111]、[100]、[010]、[001]の方向では、真性複屈折は零になり、逆に、[110]、[011]、[101]の結晶方位の方向では、最大となることが分かる。

10

【0032】

CaF₂結晶は、図1に示すような、面心立法格子で構成されている。図1の $\alpha = 45^\circ$ 、 $\beta = 90^\circ$ の方向が[110]軸方向であり、 $\alpha = 45^\circ$ 、 $\beta = 54.74^\circ$ の方向が[111]軸方向となる。本発明においては、 $\alpha = 45^\circ$ 、 $0 < \beta < 54.74^\circ$ にレーザ光軸を通過させることにより、真性複屈折を小さくしている。いいかえれば、図4(a)の1点鎖線の領域にCaF₂結晶を配置することにより、真性複屈折による偏光純度の悪化を極力防止している。

20

【0033】

次に、CaF₂結晶表面に入射する角度とP偏光の反射率の関係について説明する。図5は、CaF₂結晶表面に入射する角度とP偏光の反射率の関係を示す。

【0034】

空気中から屈折率nの透明媒質に入射角 θ で光が入射するときのP偏光の反射率R_pとS偏光の反射率R_sは式(1)のフレネル式で求められる。

【0035】

【数1】

$$R_p = \frac{\tan^2(\phi - \chi)}{\tan^2(\phi + \chi)}$$

$$R_s = \frac{\sin^2(\phi - \chi)}{\sin^2(\phi + \chi)} \quad \dots (1)$$

30

ここで、 $\sin \chi = n \cdot \sin \theta$ (Snell's law: スネルの法則) である。

【0036】

図5に示すように、例えば、193nmの波長でCaF₂結晶の屈折率を1.501958とすると、P偏光成分の光のフレネル反射率は、入射角度0度(垂直入射)では、4.02%であり、P偏光のフレネル反射が3%となる入射角度は、24.90度となる。その後、入射角度がブリュースタ角(56.34度)までは、フレネル反射率は単調に減少する。そして、このブリュースタ角度では、P偏光の反射率は0%となる。続いて、入射角度がブリュースタ角度よりも大きくなるとフレネル反射は単調に増加する。P偏光のフレネル反射が3%となる入射角度は68.73度である。

40

【0037】

例えば、レーザチャンバにウィンドウの両面でフレネル反射するCaF₂結晶のウィンドウを装着する場合、もっともレーザ共振器のロスが小さくなるのが、P偏光の反射率が0となるブリュースタ角度(56.34°)で設置した場合である。

50

【 0 0 3 8 】

このレーザの出力が維持できる共振器口の許容範囲のP偏光のレーザウィンドウの1面当たりのフレネル反射を3%と仮定するとCaF₂ウィンドウへの入射角度は24.9°から68.73°の間が好ましいこととなる。

【 0 0 3 9 】

図6は、CaF₂ウィンドウへの入射角度を24.9°及び68.73°とした時の光軸とCaF₂結晶の軸の関係を示す。CaF₂結晶1は(111)面に対して、平行な面の表面2及び2'で研磨されている。(111)面の表面は他の結晶軸表面よりも、一番硬いため、表面粗さが小さく、潜傷が少ない研磨が可能となる。

【 0 0 4 0 】

図6(a)は入射角度を24.90°とした場合を示す。CaF₂結晶の光学素子に24.90°の入射角度でP偏光のレーザビームが入射すると、表面2において光がスネルの法則にしたがって、屈折角度 = 16.28°でCaF₂結晶内部で屈折する。この時、このCaF₂内部の屈折光軸は、CaF₂結晶の[111]軸と[001]軸を含む面内で透過するように、CaF₂結晶が配置されている。そして、レーザ光は、CaF₂結晶内を透過して、面2'で再び、面2と同様にスネルの法則にしたがって、屈折して、再びガス中に伝播する。

【 0 0 4 1 】

図6(b)は入射角度を68.73°とした場合を示す。CaF₂結晶の光学素子に68.73°の入射角度でP偏光のレーザビームが入射すると、表面2において光がスネルの法則にしたがって、屈折角度 = 38.24°でCaF₂結晶内部で屈折する。この時、このCaF₂内部の屈折光軸は、CaF₂結晶の[111]軸と[001]軸を含む面内で透過するように、CaF₂結晶が配置されている。そして、レーザ光は、CaF₂結晶内を透過して、面2'で再び、面2と同様にスネルの法則にしたがって、屈折して、再びガス中に伝播する。

【 0 0 4 2 】

本発明のウィンドウ1をレーザチャンバに取り付けるときは、ウィンドウ1を構成するCaF₂結晶内でのレーザ光の光軸が[111]軸と[001]軸を含む面内で、両結晶方向のなす角の間を略通過するように、ウィンドウ1の取り付け位置をその面内で回転調整しなければならない。図7にその様子を示す。図8は、実際のレーザウィンドウに入射角56.34°(ブルースタ角度)で193nmの光を入射させながら、図7に示すように、[111]軸の周りでウィンドウ1を回転させた時の、計測波長193nmの複屈折計測装置により計測した結果を示す。この図8から明らかのように、1回転の中で3回(図では0°と約120°と約240°)、真性複屈折が極小となる。

【 0 0 4 3 】

このため、ウィンドウ1をレーザチャンバに取り付けるときは、ウィンドウ1を面方位[111]軸で回転させて真性複屈折が最小となる(透過後のp偏光強度が最大となる)位置で取り付けることが好ましい。

【 0 0 4 4 】

または、ウィンドウ1を取り付ける前に、X線回折分析を行い、結晶方位を予め計測しておくようにしてもよい。ウィンドウ1の[001]または[100]または[010]軸方向の側面に印を付けておき、その印に従って取り付けるとすると効率が良い。

【 0 0 4 5 】

図9にCaF₂結晶ウィンドウ1に入射角度を24.9°、45°、68.73°の場合のウィンドウ1を[111]軸で回転させたときに計測したそれぞれの真性複屈折の相対値変化を示す。

【 0 0 4 6 】

P偏光のフレネル反射損失が3%以下における入射角度24.9°から68.73°の範囲では、真性複屈折が極小となる角度が0度付近、120度付近、240度付近に真性複屈折が極小となる領域が観測された。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 7 】

図 9 (a)、(b)、(c) から、入射角度が大きくなるにつれて、真性複屈折の極小値は小さくなり、極大値は大きくなった。

【 0 0 4 8 】

以上のように、 CaF_2 結晶の (1 1 1) 面をウィンドウの表面とし、P 偏光のフレネル反射が小さくなるように CaF_2 結晶の入射角度 24.90° から 68.73° の角度範囲で CaF_2 結晶に入射させ、[1 1 1] 軸で CaF_2 結晶を回転させ、真性複屈折が極小となるような領域で、 CaF_2 結晶を設置することにより、偏光純度の高いレーザの出力光を得ることができる。

【 0 0 4 9 】

以上、本実施形態の紫外線ガスレーザ用光学素子をウィンドウとして使用する場合について説明したが、これは、レーザ装置の他の部位で使用することもできる。その例を説明するために、図 1 0 に、2 ステージレーザシステムの主として光学系の概略の構成と、その中で本発明による紫外線ガスレーザ用光学素子の配置例を示す。

【 0 0 5 0 】

2 ステージレーザシステムは、発振用レーザ 1 0 とその発振用レーザ 1 0 から発振されたレーザ光 (シード光) を入射させて増幅する増幅用レーザ 2 0 とからなるもので、特に狭帯域で 4 0 W 以上の高出力が必要な露光用の Ar F エキシマレーザ装置や F_2 レーザ装置に期待されているものである。

【 0 0 5 1 】

発振用レーザ 1 0 にはレーザガスが封入されるレーザチャンバ 1 1 と、共振器を構成する狭帯域化モジュール 1 4 及び出力鏡としての部分反射ミラー 1 5 とが含まれ、さらに、図示していないレーザガス励起システムや制御系、さらには、冷却系、ガス交換システム等が含まれる。

【 0 0 5 2 】

レーザチャンバ 1 1 には、前記のように、光軸上に 2 つのウィンドウ 1 2 と 1 3 が取り付けられている。また、狭帯域化モジュール 1 4 には、ビーム拡大光学系を構成する単数あるいは複数のビーム拡大プリズム 1 6 (図では 2 個) と、狭帯域化素子としてのグレーティング 1 7 (又はエタロン) が含まれる。

【 0 0 5 3 】

増幅用レーザ 2 0 も、レーザガスが封入されるレーザチャンバ 2 1 と、共振器を構成する部分反射ミラー 2 4、2 5 とが含まれ、さらに、図示していないレーザガス励起システムや制御系、さらには、冷却系、ガス交換システム等が含まれる。

【 0 0 5 4 】

レーザチャンバ 2 1 には、光軸上に 2 つのウィンドウ 2 2 と 2 3 が取り付けられている。なお、図 1 0 においては、発振用レーザ 1 0 から発振されたレーザ光は、ミラー 1 8 と 1 9 でそれぞれ反射されて増幅用レーザ 2 0 に入射するように構成されている。レーザウィンドウは発振段及び増幅段レーザの共振器内に配置されているので、レーザ光が多数往復する。

【 0 0 5 5 】

したがって、 CaF_2 結晶の表面を (1 1 1) 面で研磨し、かつ、真性複屈折が小さくなるように結晶方位を合わせて配置することにより、偏光純度の悪化を防ぐことができる。

【 0 0 5 6 】

そして、レーザチャンバ 1 1、2 1 に取り付けるウィンドウ 1 2、1 3、2 2、2 3 を本発明による紫外線ガスレーザ用光学素子で構成することが望ましいのは上記の通りであるが、

また、発振用レーザ 1 0 の共振器を構成する部分反射ミラー 1 5、増幅用レーザ 2 0 の部分反射ミラー 2 4、2 5 は、複屈折を最小にすべく、(1 1 1) 面に沿ってカットして、 CaF_2 結晶内部を透過するレーザ光の光軸が (1 1 1) 面に垂直となるようにするこ

10

20

30

40

50

とが望ましい。

【0057】

また、増幅用レーザ20の部分反射ミラー24、25を取り外したMOPA (Master Oscillator Power Amplifier) システムに本発明を適用しても同様の効果がある。

【0058】

また、このレーザシステムのビームをサンプルするための、ビームスプリッタに適用できる。このビームスプリッタの表面には、片面ARコート、片面部分反射コートが施されたり、フレネル反射を利用して、サンプルする場合は、ノーコートのCaF₂結晶基板を使用する。

【0059】

この例では、発振段レーザパワーモニタ30のビームサンプル用の第1ビームスプリッタ31と、増幅後のレーザのエネルギー及びスペクトルを計測するためのモニターモジュール40のビームサンプル用の第2ビームスプリッタ41に適用している。

【0060】

さらに、光学パルスストレッチャ50に使用される第3ビームスプリッタ51に本発明を適用できる。片面ARコート、片面部分反射コート(約R=60%)を施こされている。

【0061】

これらビームスプリッタの場合は、通常入射角度 = 45°入射なので、CaF₂結晶内での屈折角度 = 28.09°となる。

【0062】

図11は、2枚のウェッジ基板の組み合わせによるビーム拡大光学系91、91'を増幅段レーザの共振器内に配置した例を示す。図11(a)は、出力側のみにビーム拡大光学系91'を配置した例、図11(b)は、リア側及び出力側にビーム拡大光学系91、91'を配置した例である。

【0063】

増幅段レーザの共振器中に、ビーム拡大光学系91、91'を配置する場合は、何回もレーザ発振により光が往復するので、ビーム拡大光学系91、91'の真性複屈折を考慮せずに設置すると偏光純度が悪化する。そこで、本発明のように、真性複屈折が小さくなるようなCaF₂結晶軸配置にすることにより、偏光純度の悪化を防ぐことができる。

【0064】

図12は、各ビーム拡大光学系91、91'中に2枚のウェッジ基板92、93を使用して構成した場合の配置例である。2枚目のウェッジ基板93は1枚目のウェッジ基板92に対して上下反転させて「八」の字型に配置して、ビーム入射角が同一になるように配置している。このように配置することによって、ビーム拡大光学系91、91'出射後のレーザ光軸をビーム拡大光学系91、91'入射前のレーザ光軸と平行にする(偏角 = 0°)ことができる。この原理を、図12を用いて説明する。図12は、2枚のウェッジ基板92、93にレーザ光が入射した場合のレーザ光路を示している。2枚目のウェッジ基板93上のビーム光路の角度は、図示するように、5、6、7、8とし、1個目のウェッジ基板92からの出射光のビーム偏角を1、2個目のウェッジ基板93からの出射光のビーム偏角を2とすると、

1 = 1 - 2 + 3 - 4 . . . (11)

2 = 1 - 5 + 6 - 7 + 8 . . . (12)

となる。いま、2個目のウェッジ基板93は1個目のウェッジ基板92と形状が同じで、上下反転させて入射角を同じ(5 = 1)という条件にすると、

5 = 1 . . . (13)

6 = 2 . . . (14)

7 = 3 . . . (15)

8 = 4 . . . (16)

1 = 2 . . . (17)

10

20

30

40

50

が成り立つ。これらの(13)~(17)式を(12)式に代入してやると、

$$2 = 0 \quad \dots (18)$$

となる。

【0065】

つまり、上述の条件にすれば、偏角を0にして、出射されるレーザー光の光軸をチャンバ3内のレーザー光軸と平行にすることができる。このような2枚のウェッジ基板の組み合わせによるビームエキスパンダは、波長変化によるレーザービームの出射角度の依存性が小さく、増幅段レーザーの共振器内や増幅後のビームを広げるためのビームエキスパンダとして使用される。

このウェッジ基板92、93の入射角は、そのP偏光反射率が0になるブリュースタ角(ArFレーザー波長193.368nmの場合は、56.34°よりも大きくなることが多い。この場合は、その入射角においてP偏光反射率が無視できる程度にする反射防止膜を表面に付けることが必要である。

【0066】

例えば、ビーム拡大率2.0倍のビーム拡大光学系を設計した場合、入射角68.7°、ウェッジ角4.4°となる。また、ウェッジ基板裏面の入射角は60.0°となる。60.0°の入射角のフレネル反射のP偏光反射率は0.2%なので、この面は反射防止膜を付ける必要はないが、第1面は68.7°であるので、反射防止膜を付ける必要がある。

【0067】

図12(a)では、このウェッジ基板の入射側の面の方位を(111)面と平行に製作し、入射角度68.7°で入射したレーザー光は、スネルの法則により、CaF₂結晶内で38.34°で屈折し、出射側の面で屈折する。この光軸は、面方位[111]軸と[001]軸を含む面内で、かつ、これらの結晶軸のなす角度の間になるようにウェッジ基板を設置している。そして、このウェッジ基板の出射面において屈折角度60.0度で出射する。

【0068】

さらに、第2のウェッジ基板においても同様に、光軸と結晶軸との関係が同様になるように配置している。このように配置することにより、真性複屈折を小さくできるので、レーザーの偏光純度が悪化しなくなる。また、入射面を(111)面と平行となるように研磨しているため、表面荒さが小さく、潜傷の少ない表面が得られるため、反射防止膜のレーザー照射による損傷閾値が向上する。

【0069】

図12(b)では、ウェッジ基板の出射側の面方位を(111)面と平行に製作し、CaF₂内部を通過する光軸が、面方位[111]軸と面方位[001]軸を含む面において、両軸のなす角の間になるようにウェッジ基板を設置している。

【0070】

ここで、入射側の面のエネルギー密度が高い場合は図12(b)に比べて図12(a)の配置の方が、エネルギー密度の高い面が(111)面となるため、膜のレーザー耐性が向上する。

【0071】

以上、本発明の紫外線ガスレーザー用光学素子及び紫外線ガスレーザー装置を実施例に基づいて説明したが、本発明はこれら実施例に限定されず種々の変形が可能である。

【図面の簡単な説明】

【0072】

【図1】CaF₂の結晶格子を示す図である。

【図2】CaF₂結晶の軸[001]、[100]に対する光の進行方向Lの角度と定義を示す図である。

【図3】本発明によるCaF₂を用いたウィンドウの断面図である。

【図4】結晶方位によるCaF₂の真性複屈折の大きさの分布を示す図である。

10

20

30

40

50

【図5】 CaF_2 結晶表面に入射する角度とP偏光の反射率の関係を示す図である。

【図6】 CaF_2 ウィンドウへの入射角度を 24.9° 及び 68.73° とした時の光軸と CaF_2 結晶の軸の関係を示す図である。

【図7】図3のウィンドウをレーザチャンバに取り付けるときの調整方法を説明するための図である。

【0073】

【図8】 CaF_2 結晶ウィンドウに入射角度を 56.34° の場合のウィンドウを $[111]$ 軸で回転させたときに計測したそれぞれの真性複屈折の相対値変化を示す図である。

【図9】 CaF_2 結晶ウィンドウに入射角度を 24.9° 、 45° 、 68.73° の場合のウィンドウを $[111]$ 軸で回転させたときに計測したそれぞれの真性複屈折の相対値変化を示す図である。

10

【図10】本発明の紫外線ガスレーザ用光学素子をレーザシステムに適用する場合の断面図である。

【図11】2枚のウェッジ基板の組み合わせによるビーム拡大光学系を増幅段レーザの共振器内に配置した例を示す図である。

【図12】2枚のウェッジ基板にレーザ光が入射した場合のレーザ光路を示す図である。

【符号の説明】

【0074】

1 ... ウィンドウ

2、2' ... 表面 (カット面)

20

3 ... レーザ光

4 ... 射出光

10 ... 発振用レーザ

11 ... レーザチャンバ

12、13 ... ウィンドウ

14 ... 狭帯域化モジュール

15 ... 出力鏡 (部分反射ミラー)

16 ... ビーム拡大プリズム

17 ... グレーティング

18、19 ... ミラー 1

30

20 ... 増幅用レーザ

21 ... レーザチャンバ

22、23 ... ウィンドウ

24、25 ... 部分反射ミラー

30 ... 発振段レーザパワーモニタ

31 ... 第1ビームスプリッタ

40 ... モニターモジュール

41 ... 第2ビームスプリッタ

50 ... 光学パルスストレッチャ

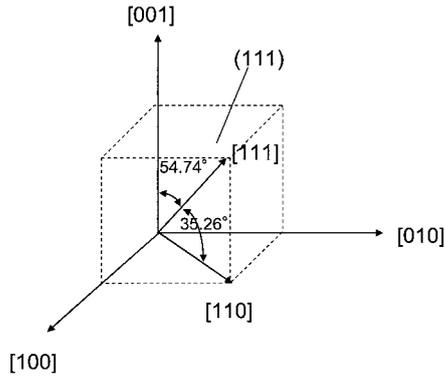
51 ... 第3ビームスプリッタ

40

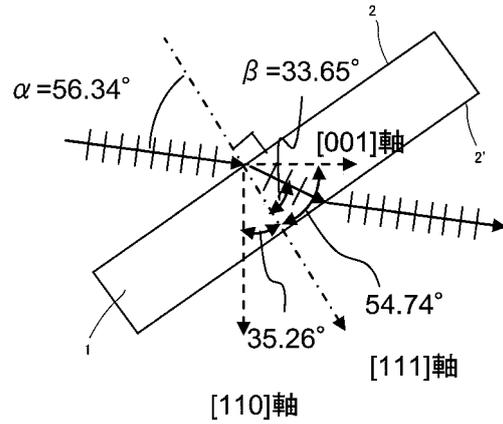
91、91' ... ビーム拡大光学系

92、93 ... ウェッジ基板

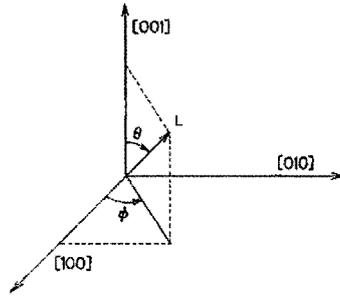
【 図 1 】



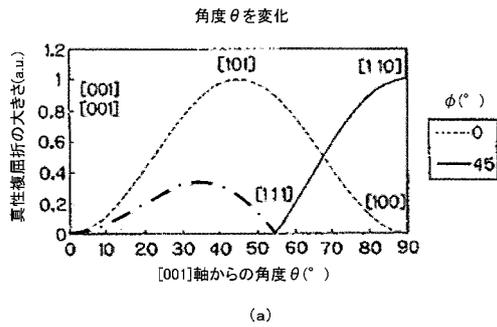
【 図 3 】



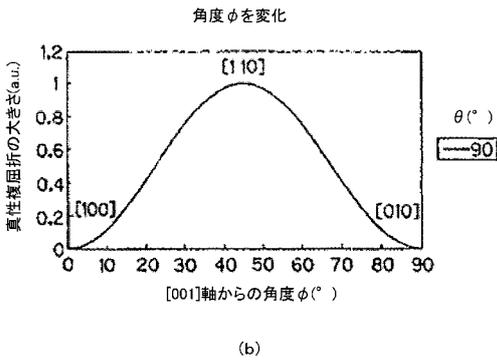
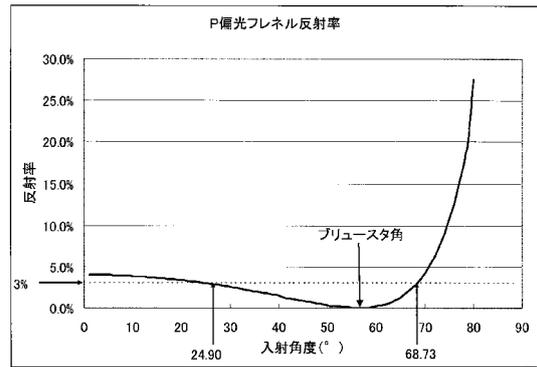
【 図 2 】



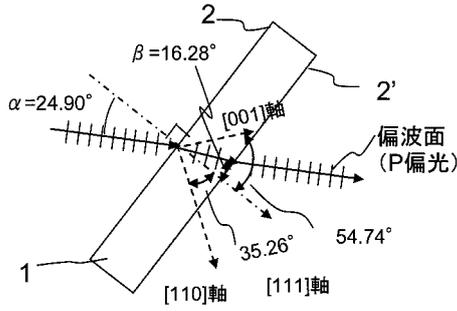
【 図 4 】



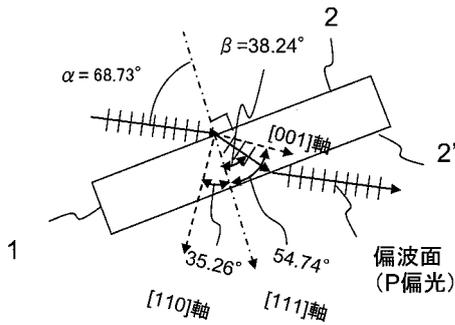
【 図 5 】



【図6】

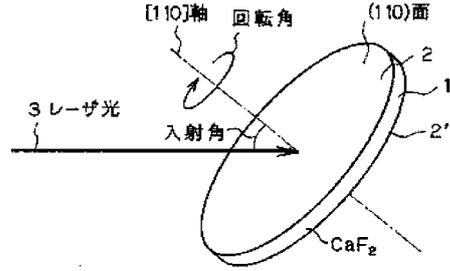


(a)

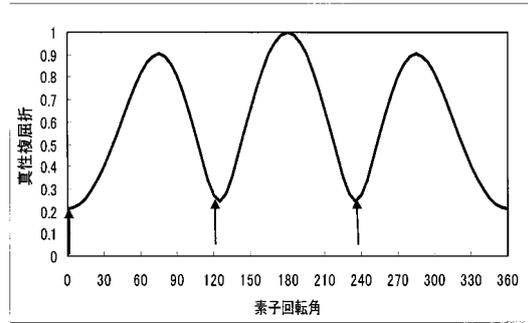


(b)

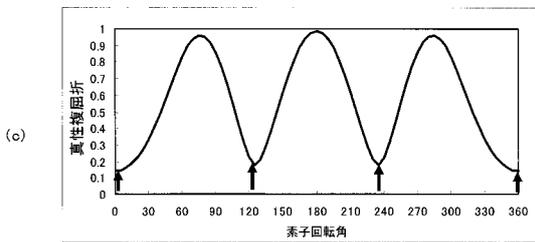
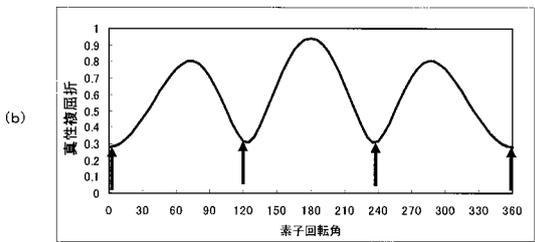
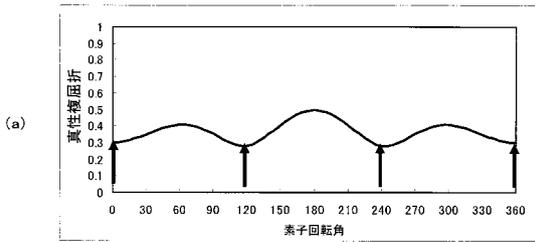
【図7】



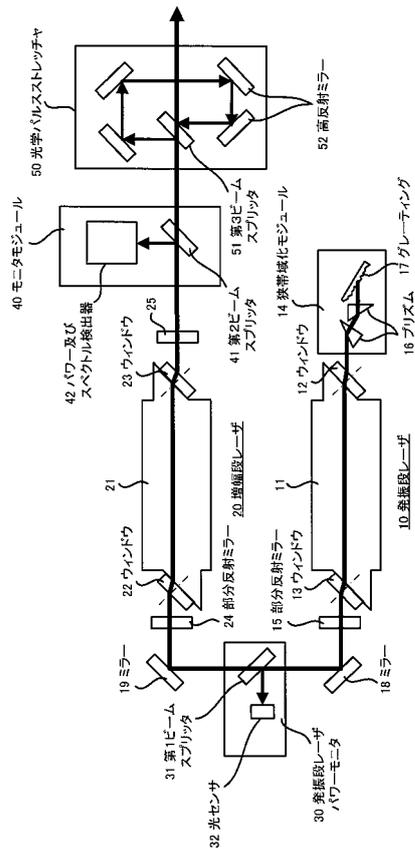
【図8】



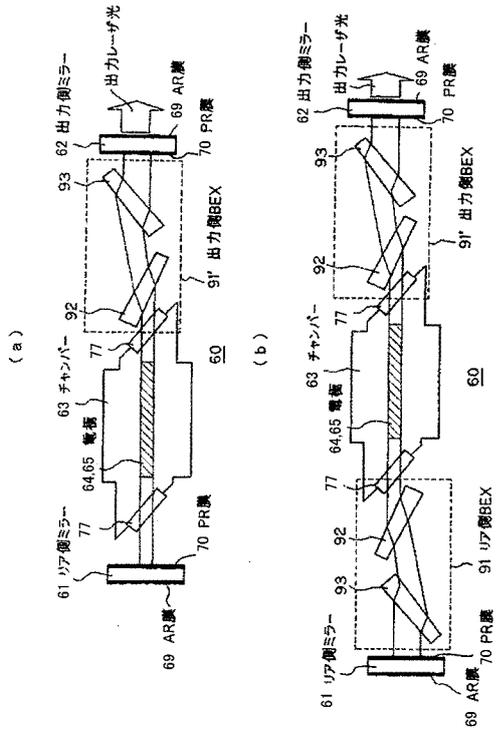
【図9】



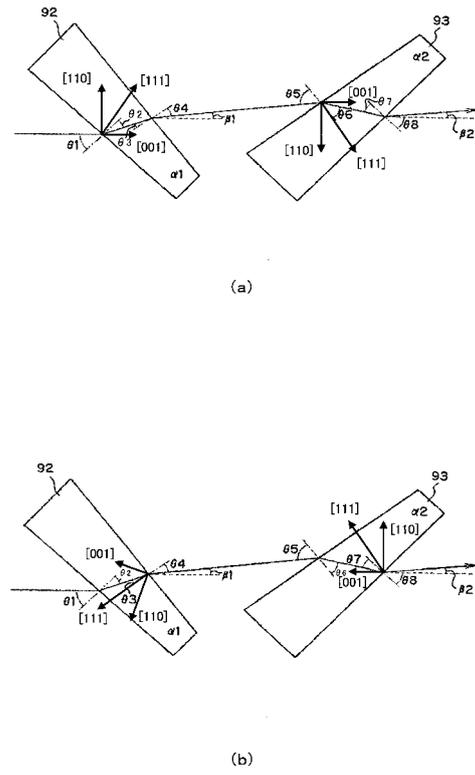
【図10】



【図 11】



【図 12】



フロントページの続き

- (74)代理人 100097777
弁理士 荻澤 弘
- (74)代理人 100091971
弁理士 米澤 明
- (74)代理人 100119220
弁理士 片寄 武彦
- (72)発明者 若林 理
神奈川県平塚市万田1200 ギガフォトン株式会社内
- (72)発明者 永井 伸治
神奈川県平塚市万田1200 ギガフォトン株式会社内
- (72)発明者 納富 良一
栃木県小山市横倉新田400 ギガフォトン株式会社内

審査官 杉田 翠

- (56)参考文献 特開2003-347627(JP,A)
特開2006-073921(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01L21/027
21/30
21/46
H01S3/00-4/00