

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7537690号  
(P7537690)

(45)発行日 令和6年8月21日(2024.8.21)

(24)登録日 令和6年8月13日(2024.8.13)

(51)国際特許分類 F I  
G 0 2 B 27/28 (2006.01) G 0 2 B 27/28 A

請求項の数 20 (全27頁)

(21)出願番号	特願2023-506707(P2023-506707)	(73)特許権者	300073919 ギガフォトン株式会社 栃木県小山市大字横倉新田400番地
(86)(22)出願日	令和3年3月19日(2021.3.19)	(73)特許権者	504261077 大学共同利用機関法人自然科学研究機構 東京都三鷹市大沢二丁目21番1号
(86)国際出願番号	PCT/JP2021/011550	(74)代理人	100083116 弁理士 松浦 憲三
(87)国際公開番号	WO2022/195895	(72)発明者	田丸 裕基 栃木県小山市大字横倉新田400番地 ギガフォトン株式会社内
(87)国際公開日	令和4年9月22日(2022.9.22)	(72)発明者	三浦 泰祐 栃木県小山市大字横倉新田400番地 ギガフォトン株式会社内
審査請求日	令和6年2月5日(2024.2.5)	(72)発明者	安原 亮

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光アイソレータ、紫外線レーザー装置及び電子デバイスの製造方法

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

紫外線波長の直線偏光の入射光に対する規格化透過率が0.9以上の透過軸となるように配置される第1の偏光子と、

前記第1の偏光子を透過した光の偏光方向を磁場によって回転させるファラデー材料を含むファラデー回転子と、

前記ファラデー回転子を透過した前記入射光に対する規格化透過率が0.9以上の透過軸となるように配置される第2の偏光子とを備えた光アイソレータであって、

前記ファラデー材料はフッ化カルシウム結晶であり、

前記フッ化カルシウム結晶の結晶軸である[001]の方向をa軸、[100]の方向をb軸、[010]の方向をc軸とすると、前記a軸、前記b軸及び前記c軸の3軸が、前記c軸を中心に第1の角度回転し、前記第1の角度回転した前記b軸を中心に第2の角度回転した軸をそれぞれx軸、y軸及びz軸とする場合に、

前記第1の角度は40度以上50度以下であり、

前記第2の角度は45度以上75度以下であり、

前記z軸は、前記第1の偏光子から前記フッ化カルシウム結晶に入射する光の伝搬方向と平行であり、

前記第1の偏光子の透過軸と前記x軸との角度差が0度以上45度以下の範囲になるように、前記フッ化カルシウム結晶が配置される、

光アイソレータ。

10

20

## 【請求項 2】

請求項 1 に記載の光アイソレータであって、  
第 2 の角度は、54 度以上 66 度以下である、  
光アイソレータ。

## 【請求項 3】

請求項 1 に記載の光アイソレータであって、  
第 2 の角度は、58 度以上 62 度以下である、  
光アイソレータ。

## 【請求項 4】

請求項 1 に記載の光アイソレータであって、  
前記第 1 の偏光子から前記ファラデー材料に入射して前記ファラデー材料の媒質中を伝搬する光の偏光方向がファラデー効果により、前記ファラデー材料の媒質内で前記 x 軸と平行になるように、前記フッ化カルシウム結晶が配置される、  
光アイソレータ。

10

## 【請求項 5】

請求項 1 に記載の光アイソレータであって、  
前記入射光の偏光方向と、前記第 1 の偏光子の透過軸との角度差は、17.5 度以内であり、  
前記ファラデー回転子を透過した前記入射光の偏光方向と、前記第 2 の偏光子の透過軸との角度差は、17.5 度以内である、  
光アイソレータ。

20

## 【請求項 6】

請求項 1 に記載の光アイソレータであって、  
前記第 2 の偏光子から前記ファラデー回転子を透過して前記第 1 の偏光子に入射する戻り光の偏光方向は、前記第 1 の偏光子の透過軸と 90 度 ± 17.5 度以内の角度で交差ししており、前記戻り光は前記第 1 の偏光子によって反射される、  
光アイソレータ。

## 【請求項 7】

請求項 1 に光アイソレータであって、  
前記入射光の波長が ArF エキシマレーザの発振波長又は KrF エキシマレーザの発振波長である、  
光アイソレータ。

30

## 【請求項 8】

請求項 1 に記載の光アイソレータであって、  
前記ファラデー回転子に印加される磁場の磁束密度は、0.5 T 以上 3.0 T 以下である、  
光アイソレータ。

## 【請求項 9】

請求項 8 に記載の光アイソレータであって、  
前記入射光の波長が ArF エキシマレーザの発振波長である場合に、前記ファラデー材料の光軸方向の厚さは、6 mm 以上 40 mm 以下である、  
光アイソレータ。

40

## 【請求項 10】

請求項 8 に記載の光アイソレータであって、  
前記入射光の波長が KrF エキシマレーザの発振波長である場合に、前記ファラデー材料の光軸方向の厚さは、13 mm 以上 83 mm 以下である、  
光アイソレータ。

## 【請求項 11】

請求項 1 に記載の光アイソレータであって、  
前記ファラデー材料は、複数に分割されて構成される、

50

光アイソレータ。

【請求項 1 2】

請求項 1 に記載の光アイソレータであって、  
前記ファラデー回転子は、ヒータと、温度センサとを備え、前記ファラデー材料の温度が許容温度範囲に保たれるように制御される、  
光アイソレータ。

【請求項 1 3】

請求項 1 に記載の光アイソレータであって、  
前記ファラデー回転子を前記 y 軸の回りに回転させる回転ステージを備える、  
光アイソレータ。

10

【請求項 1 4】

紫外線レーザ装置であって、  
紫外線波長の直線偏光のパルスレーザ光を出力する発振段レーザと、  
前記パルスレーザ光を増幅して出力する増幅器と、  
前記発振段レーザと前記増幅器との間の光路上に配置される光アイソレータと、を備え、  
前記光アイソレータは、

紫外線波長の直線偏光の入射光に対する規格化透過率が 0.9 以上の透過軸となるように配置される第 1 の偏光子と、

前記第 1 の偏光子を透過した光の偏光方向を磁場によって回転させるファラデー材料を含むファラデー回転子と、

20

前記ファラデー回転子を透過した前記入射光に対する規格化透過率が 0.9 以上の透過軸となるように配置される第 2 の偏光子とを備え、

前記ファラデー材料はフッ化カルシウム結晶であり、

前記フッ化カルシウム結晶の結晶軸である  $[001]$  の方向を a 軸、 $[100]$  の方向を b 軸、 $[010]$  の方向を c 軸とすると、前記 a 軸、前記 b 軸及び前記 c 軸の 3 軸が、前記 c 軸を中心に第 1 の角度回転し、前記第 1 の角度回転した前記 b 軸を中心に第 2 の角度回転した軸をそれぞれ x 軸、y 軸及び z 軸とする場合に、

前記第 1 の角度は 40 度以上 50 度以下であり、

前記第 2 の角度は 45 度以上 75 度以下であり、

前記 z 軸は、前記第 1 の偏光子から前記フッ化カルシウム結晶に入射する光の伝搬方向と平行であり、

30

前記第 1 の偏光子の透過軸と前記 x 軸との角度差が 0 度以上 45 度以下の範囲になるように、前記フッ化カルシウム結晶が配置される、

紫外線レーザ装置。

【請求項 1 5】

請求項 1 4 に記載の紫外線レーザ装置であって、  
前記ファラデー回転子に配置されたヒータと、  
前記ファラデー回転子の温度を検出する温度センサと、  
前記温度センサからの情報に基づき、前記ファラデー材料の温度変化を抑制するように、  
前記ヒータを制御するプロセッサと、を備える、  
紫外線レーザ装置。

40

【請求項 1 6】

請求項 1 4 に記載の紫外線レーザ装置であって、  
前記ファラデー回転子を前記 y 軸の回りに回転させる回転ステージを備える、  
紫外線レーザ装置。

【請求項 1 7】

請求項 1 4 に記載の紫外線レーザ装置であって、  
前記第 2 の偏光子と前記増幅器との間に、少なくとも 2 軸の調整機構を含む光軸調整機構を備える、

紫外線レーザ装置。

50

## 【請求項 18】

請求項 14 に記載の紫外線レーザー装置であって、  
前記発振段レーザーと前記増幅器とのそれぞれは、レーザーガスが充填されるチャンバを備える、  
紫外線レーザー装置。

## 【請求項 19】

請求項 14 に記載の紫外線レーザー装置であって、  
前記発振段レーザーは紫外線固体レーザーである、  
紫外線レーザー装置。

## 【請求項 20】

電子デバイスの製造方法であって、  
紫外線波長の直線偏光のパルスレーザー光を出力する発振段レーザーと、  
前記パルスレーザー光を増幅して出力する増幅器と、  
前記発振段レーザーと前記増幅器との間の光路上に配置される光アイソレータと、を備え、  
前記光アイソレータは、

紫外線波長の直線偏光の入射光に対する規格化透過率が 0.9 以上の透過軸となるように配置される第 1 の偏光子と、

前記第 1 の偏光子を透過した光の偏光方向を磁場によって回転させるファラデー材料を含むファラデー回転子と、

前記ファラデー回転子を透過した前記入射光に対する規格化透過率が 0.9 以上の透過軸となるように配置される第 2 の偏光子とを備え、

前記ファラデー材料はフッ化カルシウム結晶であり、

前記フッ化カルシウム結晶の結晶軸である  $[001]$  の方向を a 軸、 $[100]$  の方向を b 軸、 $[010]$  の方向を c 軸とすると、前記 a 軸、前記 b 軸及び前記 c 軸の 3 軸が、前記 c 軸を中心に第 1 の角度回転し、前記第 1 の角度回転した前記 b 軸を中心に第 2 の角度回転した軸をそれぞれ x 軸、y 軸及び z 軸とする場合に、

前記第 1 の角度は 40 度以上 50 度以下であり、

前記第 2 の角度は 45 度以上 75 度以下であり、

前記 z 軸は、前記第 1 の偏光子から前記フッ化カルシウム結晶に入射する光の伝搬方向と平行であり、

前記第 1 の偏光子の透過軸と前記 x 軸との角度差が 0 度以上 45 度以下の範囲になるように、前記フッ化カルシウム結晶が配置される紫外線レーザー装置を用いて前記増幅器により増幅されたレーザー光を生成し、前記増幅されたレーザー光を露光装置に出力し、

電子デバイスを製造するために、前記露光装置内で感光基板上に前記レーザー光を露光すること

を含む、電子デバイスの製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本開示は、光アイソレータ、紫外線レーザー装置及び電子デバイスの製造方法に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

近年、半導体露光装置においては、半導体集積回路の微細化及び高集積化につれて、解像力の向上が要請されている。このため、露光用光源から放出される光の短波長化が進められている。例えば、露光用のガスレーザー装置としては、波長約 248 nm のレーザー光を出力する KrF エキシマレーザー装置、ならびに波長約 193 nm のレーザー光を出力する ArF エキシマレーザー装置が用いられる。

## 【0003】

KrF エキシマレーザー装置及び ArF エキシマレーザー装置の自然発振光のスペクトル線幅は、350 ~ 400 pm と広い。そのため、KrF 及び ArF レーザ光のような紫外線

10

20

30

40

50

を透過する材料で投影レンズを構成すると、色収差が発生してしまう場合がある。その結果、解像力が低下し得る。そこで、ガスレーザー装置から出力されるレーザー光のスペクトル線幅を、色収差が無視できる程度となるまで狭帯域化する必要がある。そのため、ガスレーザー装置のレーザー共振器内には、スペクトル線幅を狭帯域化するために、狭帯域化素子（エタロンやグレーティング等）を含む狭帯域化モジュール（Line Narrow Module：LNM）が備えられる場合がある。以下では、スペクトル線幅が狭帯域化されるガスレーザー装置を狭帯域化ガスレーザー装置という。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

10

【文献】特開2006-73921号公報

【文献】特開昭61-141189号公報

【文献】特開2011-225400号公報

【非特許文献】

【0005】

【文献】Vyatkin, Anton & Snetkov, Ilya & Palashov, Oleg & Khazanov, Efim. "Specificity of Thermally Induced Depolarization in CaF<sub>2</sub>." 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2013. 10.1364/CLEO\_SI.2013.CTu1O.5.

【概要】

【0006】

20

本開示の一観点に係る光アイソレータは、紫外線波長の直線偏光の入射光に対する規格化透過率が0.9以上の透過軸となるように配置される第1の偏光子と、第1の偏光子を透過した光の偏光方向を磁場によって回転させるファラデー材料を含むファラデー回転子と、ファラデー回転子を透過した入射光に対する規格化透過率が0.9以上の透過軸となるように配置される第2の偏光子とを備えた光アイソレータであって、ファラデー材料はフッ化カルシウム結晶であり、フッ化カルシウム結晶の結晶軸である[001]の方向をa軸、[100]の方向をb軸、[010]の方向をc軸とするとき、a軸、b軸及びc軸の3軸が、c軸を中心に第1の角度回転し、第1の角度回転したb軸を中心に第2の角度回転した軸をそれぞれx軸、y軸及びz軸とする場合に、第1の角度は40度以上50度以下であり、第2の角度は45度以上75度以下であり、z軸は、第1の偏光子からフッ化カルシウム結晶に入射する光の伝搬方向と平行であり、第1の偏光子の透過軸とx軸との角度差が0度以上45度以下の範囲になるように、フッ化カルシウム結晶が配置される。

30

【0007】

本開示の他の一観点に係る紫外線レーザー装置は、紫外線波長の直線偏光のパルスレーザー光を出力する発振段レーザーと、パルスレーザー光を増幅して出力する増幅器と、発振段レーザーと増幅器との間の光路上に配置される光アイソレータと、を備え、光アイソレータは、紫外線波長の直線偏光の入射光に対する規格化透過率が0.9以上の透過軸となるように配置される第1の偏光子と、第1の偏光子を透過した光の偏光方向を磁場によって回転させるファラデー材料を含むファラデー回転子と、ファラデー回転子を透過した入射光に対する規格化透過率が0.9以上の透過軸となるように配置される第2の偏光子とを備え、ファラデー材料はフッ化カルシウム結晶であり、フッ化カルシウム結晶の結晶軸である[001]の方向をa軸、[100]の方向をb軸、[010]の方向をc軸とするとき、a軸、b軸及びc軸の3軸が、c軸を中心に第1の角度回転し、第1の角度回転したb軸を中心に第2の角度回転した軸をそれぞれx軸、y軸及びz軸とする場合に、第1の角度は40度以上50度以下であり、第2の角度は45度以上75度以下であり、z軸は、第1の偏光子からフッ化カルシウム結晶に入射する光の伝搬方向と平行であり、第1の偏光子の透過軸とx軸との角度差が0度以上45度以下の範囲になるように、フッ化カルシウム結晶が配置される。

40

【0008】

50

本開示の他の一観点に係る電子デバイスの製造方法は、紫外線波長の直線偏光のパルスレーザー光を出力する発振段レーザーと、パルスレーザー光を増幅して出力する増幅器と、発振段レーザーと増幅器との間の光路上に配置される光アイソレータと、を備え、光アイソレータは、紫外線波長の直線偏光の入射光に対する規格化透過率が0.9以上の透過軸となるように配置される第1の偏光子と、第1の偏光子を透過した光の偏光方向を磁場によって回転させるファラデー材料を含むファラデー回転子と、ファラデー回転子を透過した入射光に対する規格化透過率が0.9以上の透過軸となるように配置される第2の偏光子とを備え、ファラデー材料はフッ化カルシウム結晶であり、フッ化カルシウム結晶の結晶軸である $[001]$ の方向をa軸、 $[100]$ の方向をb軸、 $[010]$ の方向をc軸とするとき、a軸、b軸及びc軸の3軸が、c軸を中心に第1の角度回転し、第1の角度回転したb軸を中心に第2の角度回転した軸をそれぞれx軸、y軸及びz軸とする場合に、第1の角度は40度以上50度以下であり、第2の角度は45度以上75度以下であり、z軸は、第1の偏光子からフッ化カルシウム結晶に入射する光の伝搬方向と平行であり、第1の偏光子の透過軸とx軸との角度差が0度以上45度以下の範囲になるように、フッ化カルシウム結晶が配置される紫外線レーザー装置を用いて増幅器により増幅されたレーザー光を生成し、増幅されたレーザー光を露光装置に出力し、電子デバイスを製造するために、露光装置内で感光基板上にレーザー光を露光することを含む。

10

【図面の簡単な説明】

【0009】

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

20

【図1】図1は、比較例に係る紫外線レーザー装置の構成を概略的に示す側面図である。

【図2】図2は、比較例に係る紫外線レーザー装置の課題を示す図である。

【図3】図3は、戻り光を抑制する比較例に係る光アイソレータの構成を概略的に示す。

【図4】図4は、実施形態1に係る光アイソレータの構成を概略的に示す。

【図5】図5は、結晶軸を回転させたx軸、y軸及びz軸の定義と回転角及び回転角の説明図である。

【図6】図6は、ファラデー材料の好ましい配置条件の例を示す斜視図である。

【図7】図7は、第1の偏光子の透過軸とファラデー材料の結晶軸との関係を示す模式図である。

30

【図8】図8は、図7において入射光の伝搬する方向に見た場合の第1の偏光子の透過軸とファラデー材料のx軸及びy軸との関係を示す。

【図9】図9は、非特許文献1から転記したグラフであり、CaF<sub>2</sub>結晶に入射した光の全入射パワーに対する透過光の、入射光の偏光方向に直交する偏光成分の割合である偏光解消度と回転角との関係を示すグラフである。

【図10】図10は、入射光の波長が193nmである場合の偏光解消度と回転角との関係を推定したグラフである。

【図11】図11は、ファラデー回転子に印加される磁場とファラデー材料の厚さの好ましい範囲を示す図表である。

【図12】図12は、偏光子の透過軸とパルスレーザー光の偏光方向との角度差と消光比との関係を示すグラフ及び消光比を規格化透過率に換算したグラフである。

40

【図13】図13は、実施形態2に係る光アイソレータの構成を概略的に示す。

【図14】図14は、実施形態2に適用されるファラデー回転子の正面図である。

【図15】図15は、図14の15-15線における断面図である。

【図16】図16は、実施形態3に係る光アイソレータの構成を概略的に示す。

【図17】図17は、実施形態4に係る紫外線レーザー装置の構成を概略的に示す。

【図18】図18は、実施形態5に係る紫外線レーザー装置の構成を概略的に示す。

【図19】図19は、実施形態6に係る紫外線レーザー装置の構成を概略的に示す。

【図20】図20は、実施形態7に係る紫外線レーザー装置の構成を概略的に示す。

【図21】図21は、実施形態7に適用される増幅段レーザーの構成を概略的に示す上面図

50

である。

【図 2 2】図 2 2 は、露光装置の構成例を概略的に示す。

【実施形態】

【 0 0 1 0 】

- 目次 -

1 . 用語の説明	
2 . 比較例に係る紫外線レーザ装置の概要	
2 . 1 構成	
2 . 2 動作	
3 . 課題	10
4 . 実施形態 1	
4 . 1 構成	
4 . 2 第 1 の偏光子の透過軸とファラデー材料の結晶軸との関係	
4 . 3 回転角 及び回転角 について	
4 . 4 磁場及びファラデー材料の厚さの好ましい範囲	
4 . 5 偏光子の透過軸とレーザ光の偏光方向との許容角度差	
4 . 6 動作	
4 . 7 作用・効果	
4 . 8 結晶軸の検証方法	
4 . 9 変形例	20
5 . 実施形態 2	
5 . 1 構成	
5 . 2 動作	
5 . 3 作用・効果	
6 . 実施形態 3	
6 . 1 構成	
6 . 2 動作	
6 . 3 作用・効果	
7 . 実施形態 4	
7 . 1 構成	30
7 . 2 動作	
7 . 3 作用・効果	
7 . 4 変形例	
8 . 実施形態 5	
8 . 1 構成	
8 . 2 動作	
8 . 3 作用・効果	
9 . 実施形態 6	
9 . 1 構成	
9 . 2 動作	40
9 . 3 作用・効果	
10 . 実施形態 7	
10 . 1 構成	
10 . 2 動作	
10 . 3 作用・効果	
11 . 電子デバイスの製造方法について	
12 . 光アイソレータの他の応用例	
13 . その他	

以下、本開示の実施形態について、図面を参照しながら詳しく説明する。以下に説明される実施形態は、本開示のいくつかの例を示すものであって、本開示の内容を限定するも

のではない。また、各実施形態で説明される構成及び動作の全てが本開示の構成及び動作として必須であるとは限らない。なお、同一の構成要素には同一の参照符号を付して、重複する説明を省略する。

#### 【 0 0 1 1 】

##### 1. 用語の説明

「偏光子」とは、特定の偏光方向（透過軸方向）の光とそれと偏光方向が直交する光を分離する光学素子をいう。

#### 【 0 0 1 2 】

本明細書において「平行」という用語は、文脈から明らかな場合を除き、明記がない限り、厳密に平行である場合に限らず、技術的意義が失われることのない実用上許容される角度差の範囲を含む略平行の概念が含まれる。また、本明細書における「直交」又は「垂直」という用語についても、文脈から明らかな場合を除き、明記がない限り、厳密に直交又は垂直である場合に限らず、技術的意義が失われることのない実用上許容される角度差の範囲を含む略直交又は略垂直の概念が含まれる。

10

#### 【 0 0 1 3 】

##### 2. 比較例に係る紫外線レーザー装置の概要

##### 2.1 構成

図1は、比較例に係る紫外線レーザー装置20の構成を概略的に示す側面図である。本開示の比較例とは、出願人のみによって知られていると出願人が認識している形態であって、出願人が自認している公知例ではない。

20

#### 【 0 0 1 4 】

紫外線レーザー装置20は、マスターオシレータ(MO)22と、MOビームステアリングユニット24と、パワーオシレータ(PO)26とを含むエキシマレーザー装置である。MO22は、狭帯域化モジュール(LNM)30と、チャンバ32と、出力結合ミラー34とを含む。

#### 【 0 0 1 5 】

LNM30は、スペクトル幅を狭帯域化するためのプリズムエキスパンダ36と、グレーティング38とを含む。プリズムエキスパンダ36とグレーティング38とは入射角度と回折角度とが一致するリトロ配置とされる。出力結合ミラー34は、反射率が40%~60%の部分反射ミラーである。出力結合ミラー34は、LNM30と共に光共振器を構成するように配置される。

30

#### 【 0 0 1 6 】

チャンバ32は、光共振器の光路上に配置される。チャンバ32は、一对の放電電極40a, 40bと、レーザー光が透過する2枚のウインドウ42, 44とを含む。チャンバ32内には、レーザーガスが充填される。レーザーガスは、レアガスと、ハロゲンガスと、バッファガスとを含む。レアガスは、例えばアルゴン(Ar)又はクリプトン(Kr)ガスであってよい。ハロゲンガスは、例えばフッ素(F<sub>2</sub>)ガスであってよい。バッファガスは、例えばネオン(Ne)ガスであってよい。放電電極40a, 40b間には図示しない電源によって電圧が印加される。電源は、スイッチと充電コンデンサとを含むパルスパワーモジュール(PPM)であってよい。

40

#### 【 0 0 1 7 】

MOビームステアリングユニット24は、高反射ミラー50と高反射ミラー52とを含み、MO22から出力されたレーザー光がPO26に入射するように配置される。

#### 【 0 0 1 8 】

高反射ミラー50と高反射ミラー52との間に、MOパルスエネルギーモニタ54が配置される。MOパルスエネルギーモニタ54は、ビームスプリッター(BS)55と、光センサ56とを含む。BS55は、MO22から出力されるパルスレーザー光の光路上に配置され、BS55の反射光は光センサ56に入射するように配置される。

#### 【 0 0 1 9 】

PO26は、リアミラー60と、チャンバ62と、出力結合ミラー64とを含む増幅段

50



レーザである。リアミラー 60 と出力結合ミラー 64 とは光共振器を構成し、この光共振器の光路上にチャンバ 62 が配置される。

#### 【0020】

チャンバ 62 の構成は、チャンバ 32 と同様であってもよい。チャンバ 62 は、一对の放電電極 70a, 70b と、2 枚のウインドウ 72, 74 とを含む。チャンバ 62 内には、レーザガスが充填される。リアミラー 60 は、例えば、反射率 50% ~ 90% の部分反射ミラーであってよい。出力結合ミラー 64 は、反射率 10% ~ 30% の部分反射ミラーであってよい。

#### 【0021】

##### 2.2 動作

図示しない電源より高電圧パルスがチャンバ 32 内の放電電極 40a, 40b 間に印加される。チャンバ 32 内の放電電極 40a, 40b 間で放電が発生すると、レーザガスが励起され、出力結合ミラー 34 と LNM30 とで構成される光共振器によって狭帯域化された、波長が 150nm から 380nm の紫外線波長のパルスレーザ光が出力結合ミラー 34 から出力される。

#### 【0022】

出力結合ミラー 34 から出力されたパルスレーザ光のエネルギーは、MO パルスエネルギーモニタ 54 で計測される。また、このパルスレーザ光は MO ビームステアリングユニット 24 によって PO26 のリアミラー 60 にシード光として入射する。

#### 【0023】

リアミラー 60 を透過したシード光がチャンバ 62 に入射するタイミングで、図示しない電源より高電圧パルスがチャンバ 62 内の放電電極 70a, 70b 間に印加される。チャンバ 62 内の放電電極 70a, 70b 間で放電が発生すると、レーザガスが励起され、出力結合ミラー 64 とリアミラー 60 とで構成されるファブリーペロー型の光共振器によって、シード光が増幅され、増幅されたパルスレーザ光が出力結合ミラー 64 から出力レーザ光として出力される。

#### 【0024】

##### 3. 課題

図 2 は、比較例に係る紫外線レーザ装置 20 の課題を示す図である。PO26 からの戻り光が MO22 まで戻るとレーザ性能が悪化する。ここでいう「戻り光」とは、MO 戻り光と、PO 抜け光との 2 種類の光の和を指す。MO22 より出射された光は、PO26 へと入射されるが、PO26 内のリアミラー 60 は部分反射ミラー（反射率 50% ~ 90%）であるため、リアミラー 60 に入射する光の一部は PO26 内部へ向かわずにそのまま MO22 側へ戻ってしまう。PO26 のチャンバ 62 内に進むことなく、リアミラー 60 によって反射されて MO22 側へと戻る光を「MO 戻り光」という。

#### 【0025】

一方、MO22 より PO26 へ入射され、リアミラー 60 を透過した光は、PO26 内で共振・増幅されて出力される。前述のとおり、PO26 内のリアミラー 60 は部分反射ミラーであるため、PO26 のチャンバ 62 に入射して増幅された光の一部は MO22 へ戻ってしまう。PO26 で増幅された光のうちリアミラー 60 を透過して MO22 へと戻る光を「PO 抜け光」という。

#### 【0026】

戻り光は、LNM30 などの熱負荷となり、線幅の安定性や、パルスエネルギーの安定性等が悪化する原因となり得る。MO22 に進入する戻り光を抑制するために、MO22 と PO26 との間に光アイソレータを配置する方法がある。

#### 【0027】

図 3 は、戻り光を抑制する比較例に係る光アイソレータ 80 の構成例を示す。図 3 の上段には、MO22 から PO26 へと向かって進むパルスレーザ光（MO 注入光：行きの光）に対する光アイソレータ 80 の動作を示す。図 3 の下段には、PO26 から MO22 へと向かって進むレーザ光（戻りの光）に対する光アイソレータ 80 の動作を示す。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 2 8 】

光アイソレータ 8 0 は、M O 2 2 の側から、第 1 の偏光子 8 3 と、ファラデー回転子 8 4 と、第 2 の偏光子 8 8 とがこの順に配置される。ファラデー回転子 8 4 は、ファラデー材料 8 5 と磁石 8 6 とを含む。なお、図 3 において、ファラデー回転子 8 4 中に示す右向きの矢印は、磁石 8 6 による磁場の方向を表している。図中の破線円内に示す両向き矢印は、パルスレーザー光が進む方向に視線を合わせたときのパルスレーザー光の偏光面の方向、すなわち偏光方向を表している。

## 【 0 0 2 9 】

図 3 の上段に示すように、M O 2 2 から水平方向に偏光した直線偏光のパルスレーザー光が出力される。M O 2 2 から出力されたパルスレーザー光は、1 / 2 波長板 8 1 によって偏光方向が反時計回り方向に 4 5 度回転する。第 1 の偏光子 8 3 は、その透過軸が 1 / 2 波長板 8 1 から出力されたパルスレーザー光の偏光方向と平行に配置されており、1 / 2 波長板 8 1 から出力されたパルスレーザー光は、第 1 の偏光子 8 3 を透過する。

10

## 【 0 0 3 0 】

第 1 の偏光子 8 3 を透過したパルスレーザー光は、磁場が印加されたファラデー回転子 8 4 により偏光方向が時計回り方向に 4 5 度回転する。これにより、ファラデー回転子 8 4 から出力されたパルスレーザー光は水平偏光となる。第 2 の偏光子 8 8 は、その透過軸がファラデー回転子 8 4 から出力されたパルスレーザー光の偏光方向と平行に配置されており、ファラデー回転子 8 4 から出力されたパルスレーザー光は、第 2 の偏光子 8 8 を透過した後、P O 2 6 に入射する。

20

## 【 0 0 3 1 】

1 / 2 波長板 8 1 は、M O 2 2 から出力されたパルスレーザー光の偏光方向と P O 2 6 に入射するパルスレーザー光の偏光方向とが同じになるように、M O 2 2 からのパルスレーザー光の偏光方向を調整する。これにより、偏光方向に依存する他のモジュールを変更しないで済む。

## 【 0 0 3 2 】

一方、P O 2 6 からの戻り光は、図 3 の下段に示すように、P O 2 6 への入射光と同じ偏光方向で第 2 の偏光子 8 8 を透過し、磁場が印加されたファラデー回転子 8 4 により偏光方向が時計回り方向に 4 5 度回転する。ファラデー回転子 8 4 を通過した戻り光の偏光方向は第 1 の偏光子 8 3 の透過軸と直交しており、戻り光は第 1 の偏光子 8 3 で反射されて M O 2 2 に入射しない。

30

## 【 0 0 3 3 】

ここで、波長約 1 9 3 n m のエキシマレーザーのような、波長の短い光の戻り光を抑制する場合、ファラデー回転子 8 4 のファラデー材料 8 5 としてフッ化カルシウム ( C a F <sub>2</sub> ) 結晶が用いられる。

## 【 0 0 3 4 】

C a F <sub>2</sub> 結晶に高出力のレーザー光、例えば 1 0 W 以上のレーザー光が入射した場合、熱屈折の影響が無視できなくなり、偏光純度が悪化する。この偏光純度の悪化により、第 1 の偏光子 8 3 で反射される戻りの光の割合が低下し、光アイソレータ 8 0 のアイソレーション比が劣化する。

40

## 【 0 0 3 5 】

## 4 . 実施形態 1

## 4 . 1 構成

図 4 は、実施形態 1 に係る光アイソレータ 1 2 0 の構成を概略的に示す。図 4 に示す構成について、図 3 と異なる点を説明する。光アイソレータ 1 2 0 は、図 3 のファラデー回転子 8 4 に代えて、ファラデー材料 1 3 5 を含むファラデー回転子 1 1 2 を備える。ファラデー材料 1 3 5 は、C a F <sub>2</sub> 結晶であり、実施形態 1 では、ファラデー材料 1 3 5 の透過前後でレーザー光の偏光純度の悪化が少なくなるようにファラデー回転子 1 1 2 が配置される点で、図 3 の構成と異なる。

## 【 0 0 3 6 】

50

具体的には、ファラデー材料 1 3 5 の結晶軸と、入射する光の伝搬方向が以下の関係になるようにファラデー回転子 1 1 2 が配置される。すなわち、ファラデー材料 1 3 5 が  $\text{CaF}_2$  結晶である場合、図 5 に示すように、結晶軸である  $[0 0 1]$  の方向を a 軸、 $[1 0 0]$  の方向を b 軸、 $[0 1 0]$  の方向を c 軸としたとき、a 軸、b 軸及び c 軸の 3 軸が、c 軸を中心に回転し、回転した b 軸を中心に回転した軸をそれぞれ x 軸、y 軸及び z 軸とする。回転角  $\theta$  と回転角  $\phi$  については後述する。

【0 0 3 7】

そして、図 6 に示すように、ファラデー材料 1 3 5 の z 軸がレーザー光の伝搬方向と平行で、かつファラデー材料 1 3 5 の媒質長の概ね中心でレーザー光の偏光方向が x 軸と平行になるように、ファラデー材料 1 3 5 を配置する。他の構成は、図 3 と同様であってよい。

10

【0 0 3 8】

#### 4. 2 第 1 の偏光子の透過軸とファラデー材料の結晶軸との関係

図 7 は、第 1 の偏光子 8 3 の透過軸 T A 1 とファラデー材料 1 3 5 の x 軸及び y 軸との関係を概略的に示す側面図である。図 8 は、入射する光が伝搬する方向 ( z 軸 ) に見た場合の第 1 の偏光子 8 3 の透過軸 T A 1 とファラデー材料 1 3 5 の x 軸及び y 軸との関係を示す。第 1 の偏光子 8 3 を透過してファラデー回転子 1 1 2 に入射する光の偏光方向は x 軸と平行である。また、入射光の偏光方向がファラデー回転子 1 1 2 によって回転する方向は、図 8 において時計回り方向である。第 1 の偏光子 8 3 の透過軸 T A 1 と、入射光の偏光方向との角度差  $\alpha$  の好ましい範囲は、入射光の偏光方向がファラデー回転子 1 1 2 によって回転する方向に、0 度以上 4 5 度以下である。

20

【0 0 3 9】

#### 4. 3 回転角 $\theta$ 及び回転角 $\phi$ について

図 9 は、非特許文献 1 に記載されている Fig. 1 を転記したグラフである。図 9 には、 $\text{CaF}_2$  結晶に入射した光の全入射パワーに対する透過光の、入射光の偏光方向に対して直交した偏光成分の割合である偏光解消度  $\eta$  の回転角  $\theta$  の依存性が示されている。図 9 において回転角  $\theta$  は 4 5 度である。図 9 中の実線で示すグラフから、 $\eta$  が 5 0 度から 6 0 度のときに、偏光方向の変化する割合が小さく、偏光純度の悪化が小さい。

【0 0 4 0】

この図 9 は、入射光の波長が 1 0 7 4 nm である場合のグラフであるため、入射光の波長が 1 9 3 nm である場合についての  $\eta$  の値と回転角  $\theta$  の関係を推定すると、図 1 0 に示すようになる。図 1 0 の縦軸は、 $\eta$  が 0 度のときの  $\eta$  の値を「1」として規格化した。

30

【0 0 4 1】

図 1 0 によれば、 $\eta$  の好ましい範囲は、4 5 度 ~ 7 5 度、さらに好ましい範囲は、5 4 度 ~ 6 6 度、最も好まし範囲は 5 8 度 ~ 6 2 度である。図 1 0 のグラフから、好ましい回転角は、 $\eta$  が 4 5 度のとき、 $\theta$  が 4 5 度 ~ 7 5 度と推定される。また、 $\eta$  の許容範囲は 4 5 度  $\pm$  5 度である。なお、「4 5 度 ~ 7 5 度」等の数値範囲を示す表記は、「~」の前後に示す数値を含む範囲を示しており、例えば「4 5 度 ~ 7 5 度」の表記は「4 5 度以上 7 5 度以下」を意味する。回転角  $\theta$  は本開示における「第 1 の角度」の一例であり、回転角  $\phi$  は本開示における「第 2 の角度」の一例である。

【0 0 4 2】

40

図 1 0 は、入射光の波長が 1 9 3 nm である場合のグラフであるが、入射光の波長が 2 4 8 nm など他の紫外線波長の場合も、図 1 0 のグラフから僅かなズレはあるものの、概ね図 1 0 のグラフと同様のグラフとなり得る。よって、図 1 0 から把握される回転角  $\theta$ 、 $\phi$  についての上述の好ましい範囲は、2 4 8 nm など他の紫外線波長の入射光についても適用される。

【0 0 4 3】

#### 4. 4 磁場及びファラデー材料の厚さの好ましい範囲

ファラデー材料 1 3 5 が  $\text{CaF}_2$  結晶であるときの磁場及びファラデー材料 1 3 5 の厚さの好ましい範囲を、入射光の波長が 1 9 3 nm の場合と 2 4 8 nm の場合とについて図 1 1 に示す。Ar F エキシマレーザの発振波長には波長 1 9 3 nm が含まれる。Kr F エ

50

キシマレーザの発振波長には波長 248 nm が含まれる。

【0044】

好ましい範囲は、磁場の実現しやすさを基に選定した。最も好ましい範囲の磁場は、磁力の強いネオジウム磁石等を使用した場合の磁束密度である。ファラデー材料 135 の厚さは、選択した材料及び磁場の磁束密度と、ヴェルデ定数とを基に、ファラデー効果による偏光面の回転が 45 度となる厚さを算出した値である。

【0045】

ファラデー材料 135 が  $\text{CaF}_2$  結晶であって、入射光の波長が ArF エキシマレーザの発振波長である 193 nm である場合、ファラデー回転子 112 に印加する磁場とファラデー材料 135 の光軸方向の厚さの選択可能範囲は、図 11 に示すように、0.5 T ~ 3.0 T と 6 mm ~ 40 mm とである。さらに好ましくは、0.75 T ~ 2.9 T と 10 mm ~ 30 mm とであり、最も好ましくは、0.8 T ~ 1.5 T と 15 mm ~ 25 mm とである。

10

【0046】

また、入射光の波長が KrF エキシマレーザの発振波長である 248 nm である場合、ファラデー回転子 112 に印加する磁場とファラデー材料 135 の光軸方向の厚さの選択可能範囲は、0.5 T ~ 3.0 T と 13 mm ~ 83 mm とである。さらに好ましくは、0.75 T ~ 2.9 T と 20 mm ~ 55 mm とであり、最も好ましくは、0.8 T ~ 1.5 T と 30 mm ~ 50 mm とである。

【0047】

ファラデー回転子 112 は、ファラデー回転子 112 に組み込む  $\text{CaF}_2$  結晶を加工する段階で、結晶軸の方向や光軸方向の厚さなど、定められたパラメータに基づいて、作製される。

20

【0048】

なお、ファラデー材料 135 は、複数個に分割して、これらの合計で上記の厚さを満たしてもよい。分割される個数は、例えば、2 個や 3 個や 4 個などでもよい。

【0049】

4.5 偏光子の透過軸とレーザ光の偏光方向との許容角度差

第 1 の偏光子 83 及び第 2 の偏光子 88 のそれぞれの透過軸と、各偏光子に入射させるパルスレーザ光の偏光方向とは平行であることが最も好ましいが、厳密に平行である場合に限らず、実用上目的の機能を果たすことができる範囲で、両者の角度差が許容される。

30

【0050】

図 12 は、偏光子の透過軸とパルスレーザ光の偏光方向との角度差と消光比 (dB) との関係を示すグラフ及び消光比を規格化透過率に換算したグラフを示す。図 12 の左側の縦軸は消光比を表し、右側の縦軸は規格化透過率を表す。規格化透過率は、角度差が 0 度の際の透過率が 1.0 になるように規格化した値である。

【0051】

MO22 から出力されたパルスレーザ光を透過する第 1 の偏光子 83 と、ファラデー回転子 112 から出力されたパルスレーザ光を透過する第 2 の偏光子 88 のそれぞれにおいて、入射するパルスレーザ光に対する規格化透過率が 0.9 以上であれば、実用的に十分有効に機能し得る。したがって、図 12 によれば、第 1 の偏光子 83 又は第 2 の偏光子 88 の透過軸とパルスレーザ光の偏光方向との角度差の好ましい許容範囲は、規格化透過率が 0.9 以上になる  $\pm 17.5$  度の範囲である。

40

【0052】

4.6 動作

MO22 から出力された第 1 の偏光子 83 を透過した直線偏光のパルスレーザ光は、磁場が印加されたファラデー回転子 112 により、ファラデー回転子 112 の透過の前後で偏光方向が時計回り方向に 45 度回転する。第 2 の偏光子 88 は、その透過軸がファラデー回転子 112 から出力されたパルスレーザ光の偏光方向と平行に配置されており、ファラデー回転子 112 から出力されたパルスレーザ光は、第 2 の偏光子 88 を透過した後、P

50

026に入射する。

【0053】

一方、PO26からの戻り光は、第2の偏光子88を透過し、磁場が印加されたファラデー回転子112により偏光方向が時計回り方向に45度回転する。ファラデー回転子112を透過した戻り光の偏光方向は第1の偏光子83の透過軸と直交しており、戻り光は第1の偏光子83で反射される。こうして、PO26からの戻りの光は、ファラデー回転子112を透過後に第1の偏光子83によって反射され、MO22への入射が抑制される。

【0054】

図6を用いて説明した「ファラデー材料135の中心でレーザー光の偏光方向がx軸と平行になる」という条件は、好ましい条件の1つである。厳密にファラデー材料135の媒質長における中心の位置で偏光方向がx軸と平行になるようにファラデー回転子112を配置することまでは要求されない。ファラデー材料135に入射した光は、ファラデー効果により偏光面が回転するため、ファラデー材料135の媒質中を進む光の光路の途中で（ファラデー材料135の媒質中のどこかで）偏光方向がx軸と平行になれば、偏光純度の悪化の抑制効果が高くなる。ファラデー材料135の厚みの中心付近で偏光方向がx軸と平行になるように、ファラデー回転子112を配置することにより、偏光純度の悪化抑制の効果がアブレイジングされる点で特に好ましい。

10

【0055】

4.7 作用・効果

実施形態1に係る光アイソレータ120によれば、高出力のレーザー光がファラデー回転子112に入射しても、熱複屈折の影響による偏光純度の悪化が抑制され、高いアイソレーション比を維持することができる。

20

【0056】

ファラデー回転子112を上述の条件を満たして配置にすることにより、光弾性効果によるひずみも小さくなり、同じ入熱量でも熱複屈折の影響を抑えることが可能になる。

【0057】

4.8 結晶軸の検証方法

実施形態1で説明した条件を満たす光アイソレータの構成であるか否かを検証する方法として、例えば、次のような方法がある。

【0058】

[手順1]ファラデー回転子112に入っているファラデー材料(CaF<sub>2</sub>結晶)135について、背面反射ラウエ法や透過ラウエ法により結晶方位解析を行い、ファラデー材料135の結晶軸を特定する。

30

【0059】

[手順2]第1の偏光子83の透過軸を、第1の偏光子83に刻印されているマークから特定する。または、直線偏光のレーザー光を用いて透過軸の方向を測定する。

【0060】

上記の手順1、2により、ファラデー材料135の結晶軸と、入射光の伝搬方向との関係がわかる。また、ファラデー材料135の結晶軸と第1の偏光子83の透過軸との関係がわかる。

40

【0061】

4.9 変形例

実施形態1では、第1の偏光子83を透過してファラデー回転子112に入射する行きの光の偏光方向がファラデー回転子112の透過の前後で維持され、第2の偏光子88を透過してファラデー回転子112に入射する戻り光の偏光方向がファラデー回転子112の透過の前後で90度回転する例を説明したが、この例に限らず、実用上目的の機能を果たすことができる範囲で、ファラデー回転子112の透過の前後における偏光方向の角度差が許容される。図12によれば、第1の偏光子83を透過してファラデー回転子112に入射する行きの光の偏光方向は、ファラデー回転子112の透過の前後で17.5度以内の角度差に維持され、第2の偏光子88を透過してファラデー回転子112に入射する

50

戻り光の偏光方向は、ファラデー回転子 1 1 2 の透過の前後で  $90 \text{ 度} \pm 17.5 \text{ 度}$  以内の角度回転するように構成されてよい。第 1 の偏光子 8 3 に入射する行き光の偏光方向と、P O 2 6 から戻る戻り光がファラデー回転子 1 1 2 を透過して第 1 の偏光子 8 3 に入射するときの偏光方向とが  $90 \text{ 度} \pm 17.5 \text{ 度}$  以内の角度で交差する構成により、戻り光は第 1 の偏光子 8 3 で反射され、M O 2 2 への入射が抑制される。

【 0 0 6 2 】

## 5 . 実施形態 2

### 5 . 1 構成

図 1 3 は、実施形態 2 に係る光アイソレータ 1 2 2 の構成を概略的に示す。図 1 3 に示す構成について、図 3 及び図 4 と異なる点を説明する。実施形態 2 に係る光アイソレータ 1 2 2 は、実施形態 1 におけるファラデー回転子 1 1 2 に代えて、温度調整が可能なファラデー回転子 1 1 3 が用いられ、ファラデー回転子 1 1 3 を一定の温度に温度制御する構成を備えている点で実施形態 1 の構成と異なる。

10

【 0 0 6 3 】

図 1 4 は、ファラデー回転子 1 1 3 の構成を概略的に示す正面図であり、図 1 5 は、図 1 4 の 1 5 - 1 5 線における断面図である。ファラデー材料 1 3 5 はホルダ 1 3 7 に保持され、中空構造の磁石 1 3 6 の内部に配置される。ファラデー回転子 1 1 3 は、ヒータ 1 3 8 a , 1 3 8 b と、温度センサ 1 3 9 とを含む。ヒータ 1 3 8 a , 1 3 8 b 及び温度センサ 1 3 9 は、ホルダ 1 3 7 に取り付けられている。ヒータ 1 3 8 a , 1 3 8 b は、ファラデー材料 1 3 5 を挟んで対称的な位置に、光軸方向と平行に延在するように配置される構成が好ましい。温度センサ 1 3 9 は、ファラデー回転子 1 1 3 の温度を検出する。

20

【 0 0 6 4 】

光アイソレータ 1 2 2 は、ヒータ電源 1 4 2 と、ファラデー回転子 1 1 3 の温度を制御するプロセッサ 1 4 4 とを備える（図 1 3 参照）。ヒータ電源 1 4 2 は、ヒータ 1 3 8 a , 1 3 8 b に電力を供給する。

【 0 0 6 5 】

プロセッサ 1 4 4 は、温度センサ 1 3 9 から得られる情報を基に、ファラデー回転子 1 1 3 の温度を一定に保つようにヒータ電源 1 4 2 を制御する。なお、「一定に保つ」という記載には、許容される範囲内に保つことが含まれる。プロセッサ 1 4 4 は、ファラデー材料 1 3 5 の温度変化を抑制するように、ヒータ電源 1 4 2 を介してヒータ 1 3 8 a , 1 3 8 b を制御する。プロセッサ 1 4 4 は、制御プログラムが記憶された記憶装置と、制御プログラムを実行する CPU (Central Processing Unit) とを含む処理装置である。

30

【 0 0 6 6 】

他の構成は、実施形態 1 と同様であってよい。ファラデー回転子 1 1 3 は、図 5 ~ 図 1 1 で説明した条件等を満たして配置される。

【 0 0 6 7 】

### 5 . 2 動作

プロセッサ 1 4 4 は、ヒータ電源 1 4 2 を介してヒータ 1 3 8 a , 1 3 8 b を駆動し、ファラデー回転子 1 1 3 の温度センサ 1 3 9 によって温度を監視し、所定の温度に保つようにファラデー回転子 1 1 3 を温調する。所定の温度は、例えば、 $100$  以下で室温が好ましい。また、好ましい温度の制御範囲は  $\pm 1$  である。他の動作は実施形態 2 と同様である。

40

【 0 0 6 8 】

### 5 . 3 作用・効果

図 1 0 に示す好ましい の角度は温度依存性があるので、実施形態 2 に係る光アイソレータ 1 2 2 によれば、温度を一定に制御することにより、好ましい が変化することによる偏光純度の悪化を抑制することができ、高いアイソレーション比を維持することができる。

【 0 0 6 9 】

また、実施形態 2 の構成によれば、温度を一定に制御することにより、温度変化による

50

光路長の変化が抑制され、偏光の回転角を一定に保つことができ、アイソレーション比の悪化を抑制することができる。

#### 【 0 0 7 0 】

##### 6 . 実施形態 3

##### 6 . 1 構成

図 1 6 は、実施形態 3 に係る光アイソレータ 1 2 3 におけるファラデー回転子 1 1 2 の部分の構成を概略的に示す。なお、光アイソレータ 1 2 3 は、図 4 の光アイソレータ 1 2 0 と同様に、図 1 6 には示されていない、第 1 の偏光子 8 3 及び第 2 の偏光子 8 8 を含む。図 1 6 に示す構成について、図 4 と異なる点を説明する。

#### 【 0 0 7 1 】

実施形態 3 に係る光アイソレータ 1 2 3 は、ファラデー回転子 1 1 2 を y 軸の回りに回転させる回転ステージ 1 5 0 を有する。他の構成は、図 4 と同様であってよい。

#### 【 0 0 7 2 】

##### 6 . 2 動作

回転ステージ 1 5 0 を動かすことにより、ファラデー回転子 1 1 2 は y 軸の回りに回転する。b 軸が c 軸を中心に回転した y 軸を中心にファラデー回転子 1 1 2 を回転させることにより、 の回転角を維持しつつ、 の回転角を調整できる。

#### 【 0 0 7 3 】

##### 6 . 3 作用・効果

実施形態 3 に係る光アイソレータ 1 2 3 によれば、 の回転角を、ファラデー回転子 1 1 2 の透過前後で偏光純度の悪化が少ない角度に調整することができる。その結果、アイソレーション比を高くすることができる。

#### 【 0 0 7 4 】

##### 7 . 実施形態 4

##### 7 . 1 構成

図 1 7 は、実施形態 4 に係る紫外線レーザー装置 1 0 0 の構成例を概略的に示す。図 1 7 に示す構成について、図 1 と異なる点を説明する。紫外線レーザー装置 1 0 0 は、MO 2 2 と PO 2 6 との間の光路上に 1 / 2 波長板 8 1 と光アイソレータ 1 2 0 とが配置される点で図 1 の構成と異なる。光アイソレータ 1 2 0 の構成は、実施形態 1 で説明した構成と同様であり、第 1 の偏光子 8 3 と、ファラデー回転子 1 1 2 と、第 2 の偏光子 8 8 とを含み、ファラデー回転子 1 1 2 は、実施形態 1 で説明したように、CaF<sub>2</sub> 結晶の結晶軸を特定の条件を満たすように配置した構成となっている。

#### 【 0 0 7 5 】

光アイソレータ 1 2 0 は、さらに戻り光終端用のダンパー 1 1 6 を含む。ダンパー 1 1 6 は、第 1 の偏光子 8 3 によって反射された戻り光がダンパー 1 1 6 に入射するように配置される。他の構成は、図 1 及び図 4 と同様であってよい。

#### 【 0 0 7 6 】

図 1 7 においては、MO 2 2 と PO 2 6 との間の光路上の a 点、b 点、c 点及び d 点で示す各箇所におけるパルスレーザー光の偏光方向も示す。図 1 7 には、MO 2 2 から PO 2 6 の方向に伝搬するパルスレーザー光についての a 点 ~ d 点の各箇所での偏光方向と、PO 2 6 から MO 2 2 の方向に進む戻り光についての d 点及び c 点の各箇所での偏光方向を示す。

#### 【 0 0 7 7 】

##### 7 . 2 動作

1 / 2 波長板 8 1 及び光アイソレータ 1 2 0 の動作は、図 3 及び実施形態 1 と同様である。MO 2 2 から出力され、特定の方向に偏光したパルスレーザー光 ( a 点 ) は 1 / 2 波長板 8 1 によって偏光方向が反時計回り方向に 4 5 度回転する ( b 点 ) 。

#### 【 0 0 7 8 】

第 1 の偏光子 8 3 は、その透過軸が 1 / 2 波長板 8 1 から出力されたパルスレーザー光の偏光方向と平行になるように配置されているため、1 / 2 波長板 8 1 により偏光方向が回

10

20

30

40

50

転したパルスレーザー光は第1の偏光子83を透過する(c点)。

【0079】

第1の偏光子83を透過したパルスレーザー光はファラデー回転子112に入射し、ファラデー回転子112により偏光方向が時計回り方向に45度回転する(d点)。第2の偏光子88は、その透過軸がファラデー回転子112により偏光方向が回転したパルスレーザー光の偏光方向と平行になるように配置されているため、ファラデー回転子112により偏光方向が回転したパルスレーザー光は第2の偏光子88を透過する。MO22からPO26に進むパルスレーザー光のa点の偏光方向とe点の偏光方向とは同じである。

【0080】

図17中のe点において、MO22からPO26の方向に伝搬するパルスレーザー光の偏光方向と、PO26からMO22の方向に戻るパルスレーザー光(戻り光)の偏光方向とは同じである。このため、PO26からMO22の方向に進む戻り光は、第2の偏光子88を透過する。

10

【0081】

第2の偏光子88を透過した戻り光は、次に、ファラデー回転子112により偏光方向が時計回りに45度回転する(c点)。c点において、MO22からPO26の方向に伝搬するパルスレーザー光の偏光方向と、PO26からMO22の方向に戻るパルスレーザー光の偏光方向とは直交する。このため、PO26からMO22の方向に戻るパルスレーザー光は、第1の偏光子83により反射されて、ダンパー116に入射する。ダンパー116は、第1の偏光子83で反射された光を吸収し遮断する。

20

【0082】

### 7.3 作用・効果

実施形態4に係る紫外線レーザー装置100によれば、高出力のレーザー光がファラデー回転子112に入射しても、熱複屈折の影響による偏光純度の悪化が抑制され、高いアイソレーション比を維持することができる。

【0083】

また、実施形態4の構成によれば、MO22の方向に戻るパルスレーザー光は、第1の偏光子83によって反射され、MO22への入射が抑制されるため、MO22への熱負荷が軽減され、エネルギー安定性や線幅安定性などが比較例の構成(図1)よりも向上する。

【0084】

### 7.4 変形例

MOパルスエネルギーモニタ54の配置については、光アイソレータ120の上流側又は下流側のいずれにも配置することが可能であるが、図17のように、光アイソレータ120の上流側に配置する構成が好ましい。

【0085】

## 8. 実施形態5

### 8.1 構成

図18は、実施形態5に係る紫外線レーザー装置105の構成を概略的に示す。図18に示す構成について、図17と異なる点を説明する。図18に示す紫外線レーザー装置105は、第2の偏光子88とPO26との間の光路上に、2軸調整可能な平行平面基板202と、2軸調整可能な高反射ミラー52とが配置される点で、図17に示す構成と異なる。平行平面基板202は、直交する2軸のそれぞれを回転軸として角度の調整が可能な2軸角度調整ホルダ204に保持される。

40

【0086】

平行平面基板202は、第2の偏光子88と高反射ミラー52との間の光路上に配置される。平行平面基板202はフッ化カルシウムの基板であってよい。2軸角度調整ホルダ204は、例えば、図18の紙面に垂直な軸と、平行平面基板202の基板面及び図18の紙面に平行な軸とのそれぞれを回転軸として角度調整が可能なホルダであってよい。

【0087】

高反射ミラー52は、直交する2軸のそれぞれを回転軸として角度の調整が可能な2軸

50



角度調整ホルダ 208 に保持される。2軸角度調整ホルダ 208 は、例えば、図 18 の紙面に垂直な軸と、高反射ミラー 52 の反射面及び図 18 の紙面に平行な軸とのそれぞれを回転軸として角度調整が可能なホルダであってよい。

【0088】

#### 8.2 動作

光軸の調整は、2軸調整可能な平行平面基板 202 と、2軸調整可能な高反射ミラー 52 とを調整することにより、MO22 からのパルスレーザー光が PO26 に最も効率的に入射されるように行われる。

【0089】

2軸調整可能な平行平面基板 202 は、MO22 からのパルスレーザー光を進行方向と平行にシフトすることにより、PO26 に最も効率的にパルスレーザー光が入射されるように調整される。

10

【0090】

2軸調整可能な高反射ミラー 52 は、MO22 からのパルスレーザー光が PO26 に入射される角度を変更することにより、PO26 に最も効率的にパルスレーザー光が入射されるように調整される。

【0091】

2軸角度調整ホルダ 204 及び2軸角度調整ホルダ 208 のそれぞれは本開示における「光軸調整機構」の一例である。2軸調整可能な平行平面基板 202 と、2軸調整可能な高反射ミラー 52 とを両方備える構成は好ましい形態であるが、これらのうち1つのみを備える構成も可能である。

20

【0092】

#### 8.3 作用・効果

実施形態 5 に係る紫外線レーザー装置 105 によれば、実施形態 4 と同様の効果が得られる。さらに、実施形態 5 の構成によれば、PO26 に入射させる注入光の光軸調整が実施形態 4 の構成に比べて容易になる。

【0093】

#### 9. 実施形態 6

##### 9.1 構成

図 19 は、実施形態 6 に係る紫外線レーザー装置 106 の構成を概略的に示す。図 19 に示す構成について、図 17 と異なる点を説明する。図 19 に示す紫外線レーザー装置 106 は、図 17 における MO22 の代わりに、発振段レーザーとして紫外線固体レーザー装置 232 を備え、PO26 の代わりに、エキシマ増幅器 236 を備える。他の構成は、図 17 に示す構成と同様であってよい。

30

【0094】

紫外線固体レーザー装置 232 は、例えば、近赤外帯（波長 780 nm ~ 波長 2500 nm）を基本波とする固体レーザーの第 4 倍波、第 5 倍波又は第 6 倍波（波長 150 nm ~ 波長 380 nm の範囲）を出力する。例えば、紫外線固体レーザー装置 232 は、約 193 nm の波長のシード光を出力し、シード光がエキシマ増幅器 236 に入射するように配置される。

40

【0095】

一例として、紫外線固体レーザー装置 232 は、半導体レーザーシステムと、チタンサファイヤ増幅器と、波長変換システムとを含む構成であってよい。半導体レーザーシステムは、波長約 773.6 nm の CW レーザ光を出力する分布帰還型（Distributed Feedback：DFB）の半導体レーザーと、CW レーザ光をパルス化する半導体光増幅器（Semiconductor Optical Amplifier：SOA）とを含む構成であってよい。波長変換システムは、複数の非線形光学結晶を含み、入射したパルスレーザー光を波長変換して 4 倍高調波のパルスレーザー光を出力する。波長変換システムは、例えば、LBO 結晶と、KBBF 結晶とを含む。LBO 結晶は化学式  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  で表される非線形光学結晶である。KBBF 結晶は、化学式  $\text{KB}_2\text{BO}_3\text{F}_2$  で表される非線形光学結晶である。

50

## 【 0 0 9 6 】

エキシマ増幅器 2 3 6 は、チャンバ 2 4 2 と、凸面シリンドリカルミラー 2 4 4 と、凹面シリンドリカルミラー 2 4 6 とを含む。

## 【 0 0 9 7 】

チャンバ 2 4 2 は、1 対の放電電極 2 5 0 a , 2 5 0 b と、レーザ光が透過する 2 枚のウインドウ 2 5 2 , 2 5 4 とを含む。放電電極 2 5 0 a , 2 5 0 b は放電空間 2 5 6 を挟んで対向して配置される。放電電極 2 5 0 a , 2 5 0 b の間の空間が放電空間 2 5 6 となる。放電電極 2 5 0 a , 2 5 0 b が放電空間 2 5 6 を挟んで対向する方向が放電方向に相当する。チャンバ 2 4 2 には、図 1 で説明したレーザガスと同様のレーザガスが充填される。

10

## 【 0 0 9 8 】

凸面シリンドリカルミラー 2 4 4 の凸曲面及び凹面シリンドリカルミラー 2 4 6 の凹曲面にはそれぞれ波長約 1 9 3 n m に対する高反射膜がコートされている。

## 【 0 0 9 9 】

凸面シリンドリカルミラー 2 4 4 と凹面シリンドリカルミラー 2 4 6 とは、紫外線固体レーザ装置 2 3 2 からのシード光が、エキシマ増幅器 2 3 6 の放電空間 2 5 6 を 3 回通過することによって、放電方向にビーム拡大され、増幅されるように配置される。

## 【 0 1 0 0 】

## 9 . 2 動作

紫外線固体レーザ装置 2 3 2 から出力されたシード光は、光アイソレータ 1 2 0 を透過して、エキシマ増幅器 2 3 6 に入射する。エキシマ増幅器 2 3 6 に入射した波長約 1 9 3 n m のシード光は、凸面シリンドリカルミラー 2 4 4 及び凹面シリンドリカルミラー 2 4 6 で反射することにより、放電電極 2 5 0 a , 2 5 0 b の間の放電空間 2 5 6 を 3 回通過する。これにより、シード光のビームが拡大されて増幅される。エキシマ増幅器 2 3 6 は本開示における「マルチパス増幅器」の一例である。3 パスのエキシマ増幅器 2 3 6 に限らず、各種のマルチパス増幅器を適用可能である。

20

## 【 0 1 0 1 】

光アイソレータ 1 2 0 の動作は、実施形態 1 と同様である。光アイソレータ 1 2 0 は、エキシマ増幅器 2 3 6 で発生した自然放射増幅光 ( Amplified Spontaneous Emission : A S E ) 等が紫外線固体レーザ装置 2 3 2 に入射するのを抑制する。

30

## 【 0 1 0 2 】

## 9 . 3 作用・効果

実施形態 6 に係る紫外線レーザ装置 1 0 6 によれば、エキシマ増幅器 2 3 6 から紫外線固体レーザ装置 2 3 2 の方向に戻る光は紫外線固体レーザ装置 2 3 2 に入射しないため、紫外線固体レーザ装置 2 3 2 への熱負荷が軽減され、エネルギー安定性や線幅安定性などが比較例の構成よりも向上する。

## 【 0 1 0 3 】

## 1 0 . 実施形態 7

## 1 0 . 1 構成

図 2 0 は、実施形態 7 に係る紫外線レーザ装置 1 0 7 の構成を概略的に示す。図 2 0 に示す構成について、図 1 7 と異なる点を説明する。実施形態 7 に係る紫外線レーザ装置 1 0 7 は、実施形態 4 の構成に対して、増幅段レーザの構成及び M O 2 2 からのレーザ光を増幅段レーザに導入する高反射ミラーの構成が異なる。

40

## 【 0 1 0 4 】

図 1 7 に示す実施形態 4 の増幅段レーザは、リアミラー 6 0 と出力結合ミラー 6 4 とで構成されるファブリーペロー型の光共振器を有する P O 2 6 であるのに対し、図 2 0 に示す実施形態 7 の増幅段レーザは、リング共振器 2 7 0 を有する P O 2 6 6 である点が異なる。

## 【 0 1 0 5 】

図 2 1 は、実施形態 7 に適用される P O 2 6 6 の構成を概略的に示す上面図である。リ

50

ング共振器 270 は、高反射ミラー 284、高反射ミラー 285、高反射ミラー 286 及び部分反射ミラー 290 を含んで構成される。

#### 【0106】

紫外線レーザ装置 107 は、MO22 から出力され高反射ミラー 50 と高反射ミラー 52 とにより反射されたレーザ光をリング共振器 270 に導入するため、高反射ミラー 283 が配置される。高反射ミラー 283 は、高反射ミラー 52 で反射されたレーザ光を部分反射ミラー 290 に入射させるように、高反射ミラー 52 と部分反射ミラー 290 との間の光路上に配置される。

#### 【0107】

##### 10.2 動作

MO22 から出力されたレーザ光は、高反射ミラー 50、高反射ミラー 52 及び高反射ミラー 283 で順次反射された後、部分反射ミラー 290 からリング共振器 270 に入射する。

#### 【0108】

部分反射ミラー 290 を透過したレーザ光は、高反射ミラー 284 で反射された後にチャンバ 62 に入射して増幅され、その後、高反射ミラー 285 及び高反射ミラー 286 で反射され、再び、チャンバ 62 に入射して増幅される。そして、チャンバ 62 から出力されたレーザ光は部分反射ミラー 290 によって一部は透過し、他の一部は反射されてリング共振器 270 で再び増幅される。

#### 【0109】

部分反射ミラー 290 を透過した増幅パルスレーザ光は、紫外線レーザ装置 107 から出力される。

#### 【0110】

光アイソレータ 120 は、PO266 からの戻り光が MO22 に入射するのを抑制する。1/2 波長板 81 及び光アイソレータ 120 の動作は、図 3 及び図 17 で説明した実施形態 4 と同様である。

#### 【0111】

##### 10.3 作用・効果

実施形態 7 に係る紫外線レーザ装置 107 によれば、実施形態 4 と同様の効果が得られる。

#### 【0112】

##### 11. 電子デバイスの製造方法について

図 22 は、露光装置 300 の構成例を概略的に示す。露光装置 300 は、照明光学系 304 と投影光学系 306 とを含む。照明光学系 304 は、紫外線レーザ装置 100 から入射したレーザ光によって、レチクルステージ RT 上に配置された図示しないレチクルのレチクルパターンを照明する。投影光学系 306 は、レチクルを透過したレーザ光を、縮小投影してワークピーステーブル WT 上に配置された図示しないワークピースに結像させる。ワークピースはフォトリソが塗布された半導体ウエハ等の感光基板である。

#### 【0113】

露光装置 300 は、レチクルステージ RT とワークピーステーブル WT とを同期して平行移動させることにより、レチクルパターンを反映したレーザ光をワークピースに露光する。以上のような露光工程によって半導体ウエハにレチクルパターンを転写後、複数の工程を経ることで半導体デバイスを製造できる。半導体デバイスは本開示における「電子デバイス」の一例である。紫外線レーザ装置 100 に代えて、実施形態 5 ~ 7 で説明した紫外線レーザ装置 105、106 又は 107 を用いてレーザ光を生成してもよい。

#### 【0114】

##### 12. 光アイソレータの他の応用例

実施形態 1 ~ 7 において例示した光アイソレータ 120、122 及び 123 は、紫外線レーザ装置に限らず、様々な用途に適用可能である。例えば、光アイソレータ 120 への入射光は、パルスレーザ光に限らず、CWレーザ光であってもよいし、放射光であっても

10

20

30

40

50

よい。例えば、光アイソレータ 1 2 0 は、加速器における放射光の出口に配置されてもよい。また、光アイソレータ 1 2 0 は、重水素ランプを用いた分光器における紫外域の波長の迷光を抑制するために配置されてもよい。光アイソレータ 1 2 2 及び 1 2 3 についても同様である。

【 0 1 1 5 】

1 3 . その他

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

【 0 1 1 6 】

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

10

20

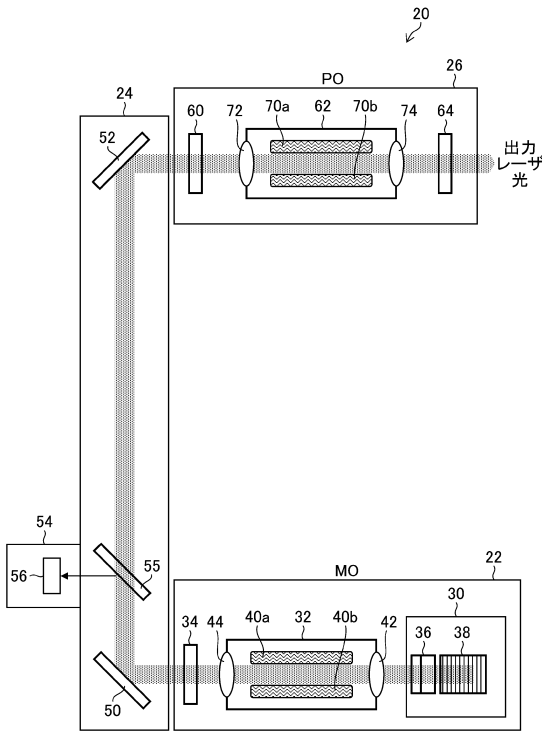
30

40

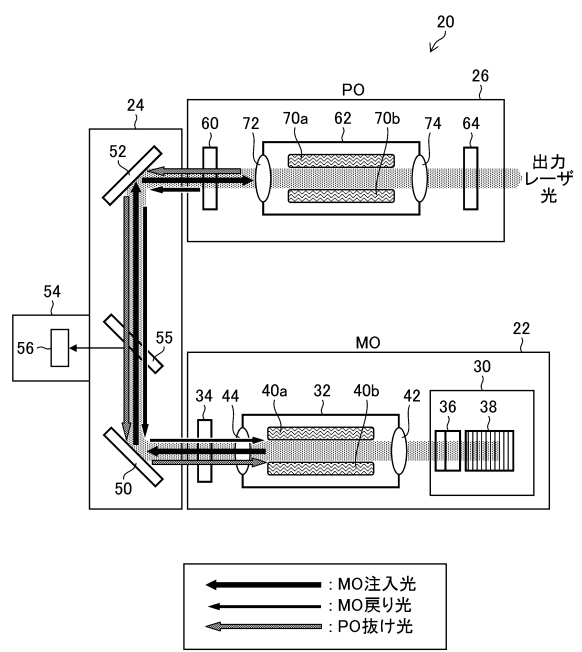
50

【図面】

【図 1】



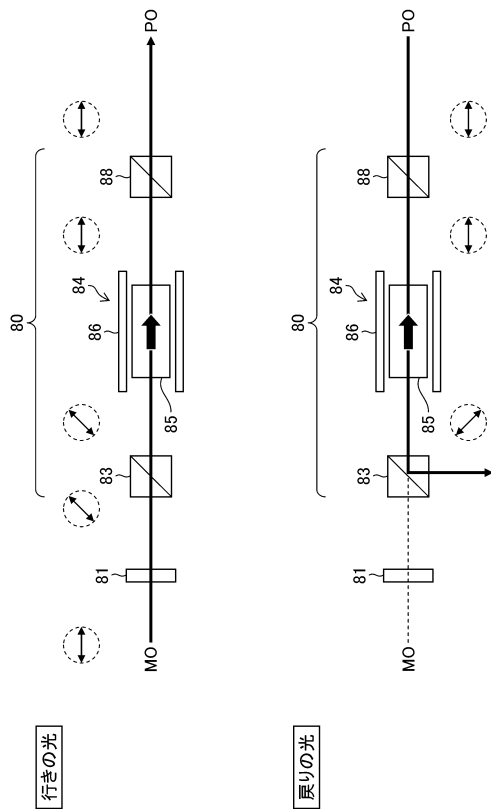
【図 2】



10

20

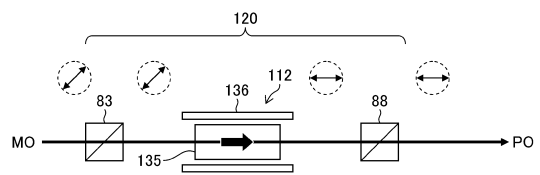
【図 3】



行き光

戻り光

【図 4】

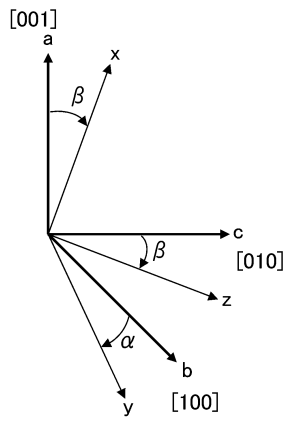


30

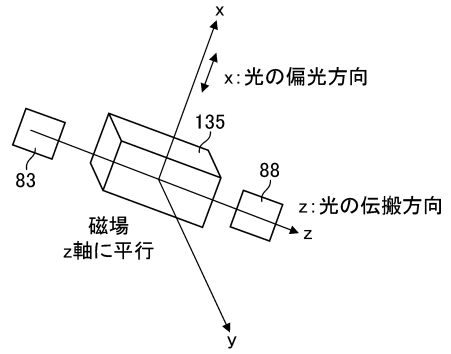
40

50

【図5】

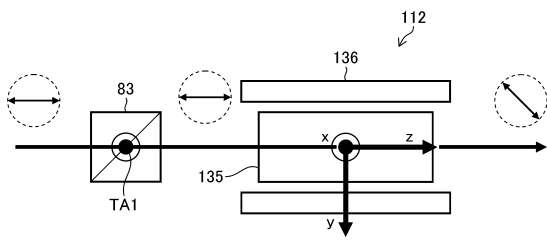


【図6】

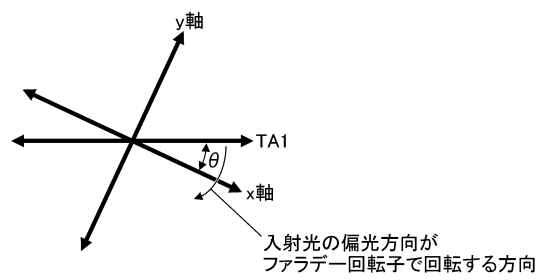


10

【図7】



【図8】



20

30

40

50

【 図 9 】

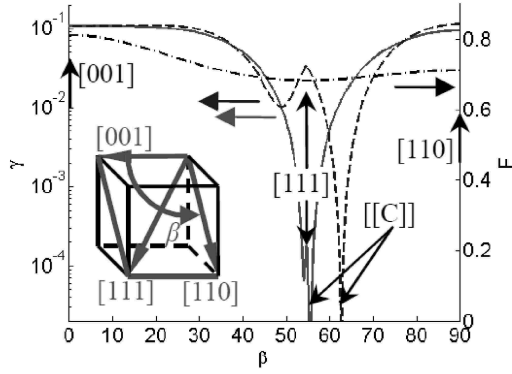
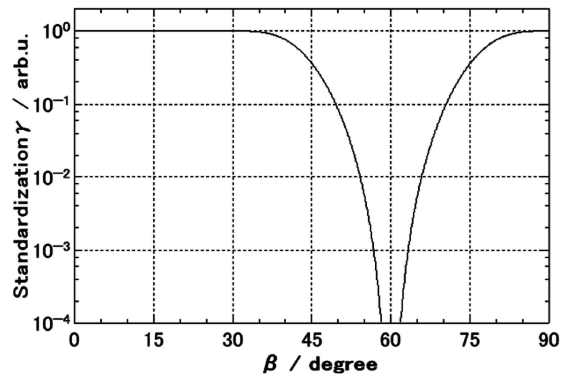


Fig. 1  $F$  for  $\text{CaF}_2$  (dash dot) and calculated minimal integral depolarization degrees in a  $\text{CaF}_2$  disk (solid) and rod (dash) at  $p = 10$  as functions of the Euler angle  $\beta$  (see inset).

【 図 1 0 】



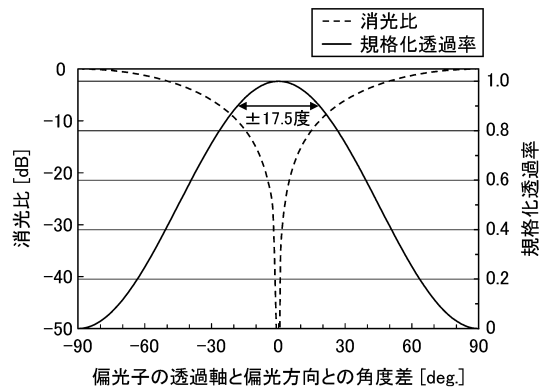
10

【 図 1 1 】

波長	193 nm		248 nm	
ヴェルデ定数	40.1 rad/Tm		19.0 rad/Tm	
項目	磁場 (T)	厚さ (mm)	磁場 (T)	厚さ (mm)
選択可能範囲	0.5 - 3.0	6 - 40	0.5 - 3.0	13 - 83
好ましい範囲	0.75 - 2.9	10 - 30	0.75 - 2.9	20 - 55
最も好ましい範囲	0.8 - 1.5	15 - 25	0.8 - 1.5	30 - 50

20

【 図 1 2 】

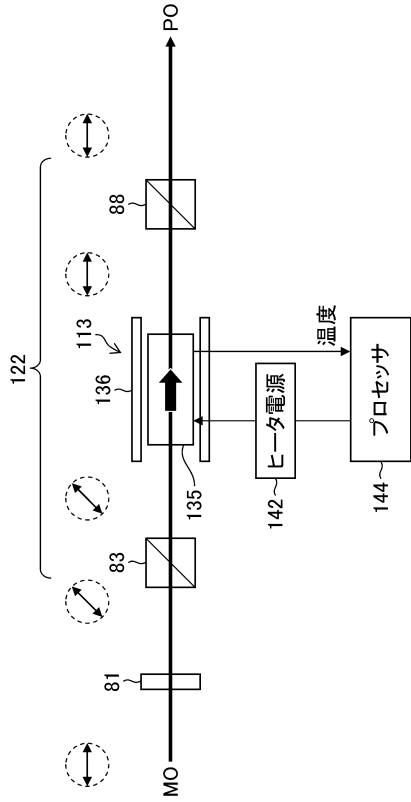


30

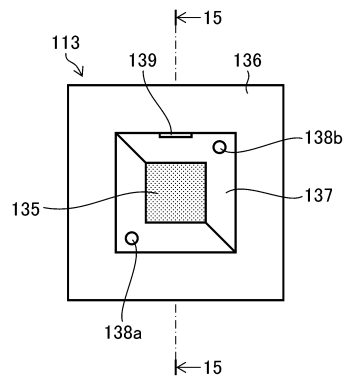
40

50

【図 1 3】



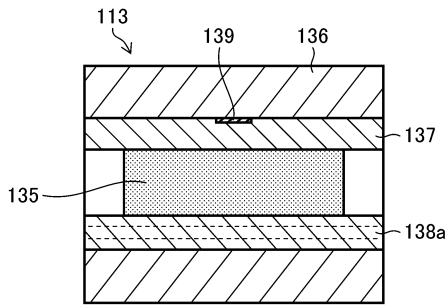
【図 1 4】



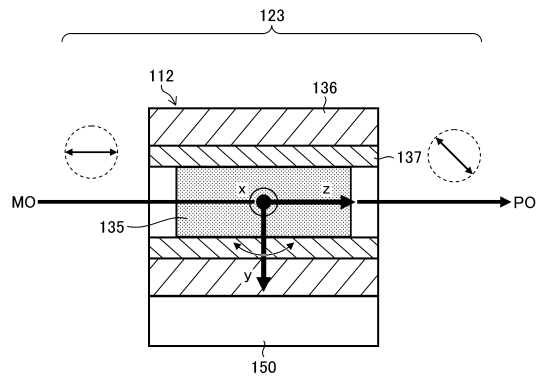
10

20

【図 1 5】



【図 1 6】



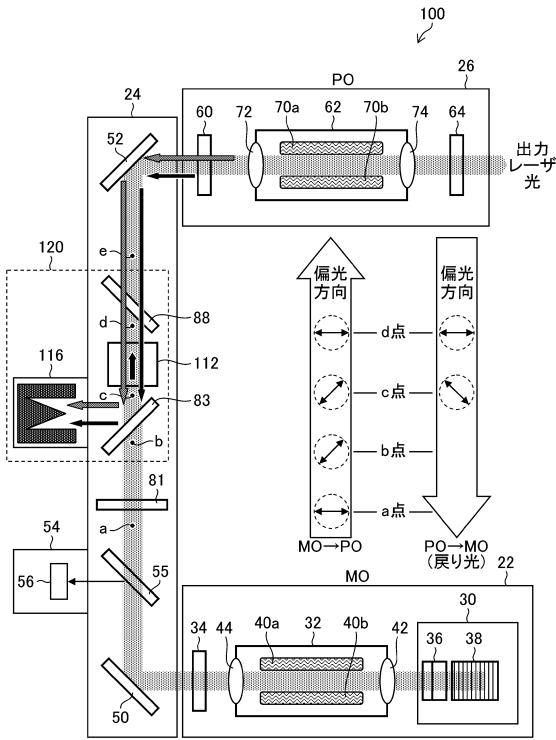
30

40

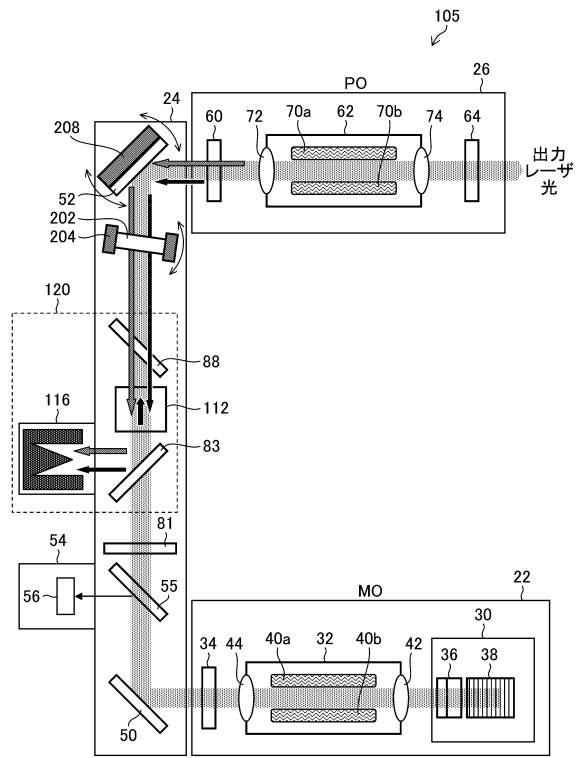
50



【図17】



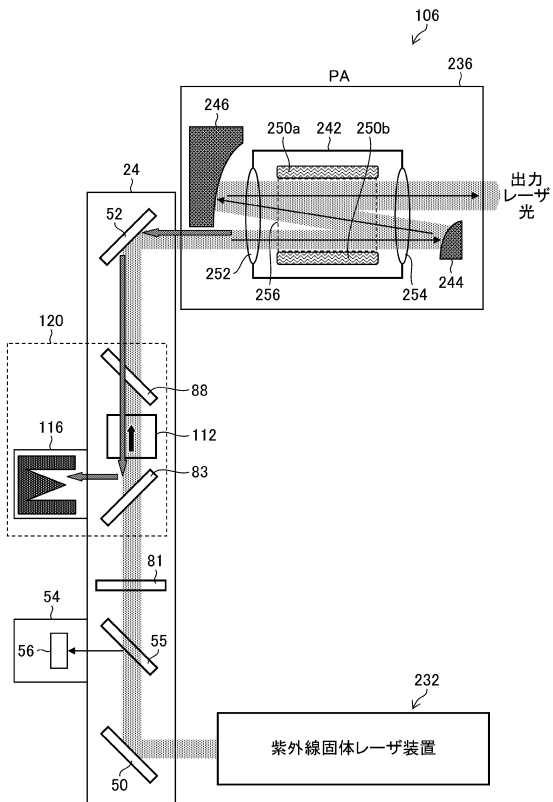
【図18】



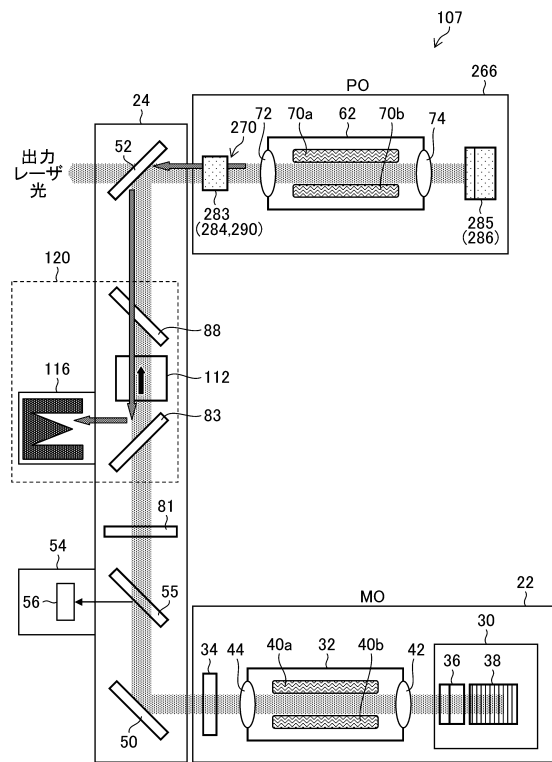
10

20

【図19】



【図20】

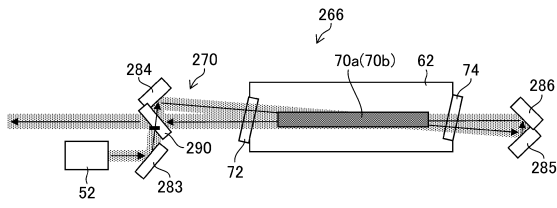


30

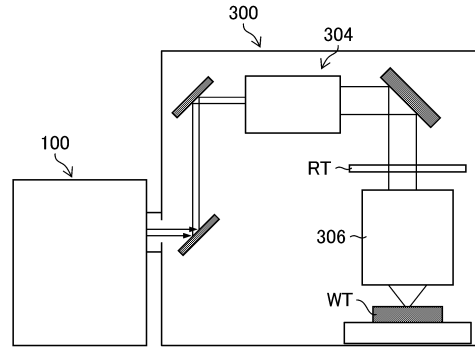
40

50

【 図 2 1 】



【 図 2 2 】



10

20

30

40

50

## フロントページの続き

岐阜県土岐市下石町 3 2 2 - 6 大学共同利用機関法人自然科学研究機構 核融合科学研究所内

審査官 横井 亜矢子

- (56)参考文献 国際公開第 2 0 0 4 / 0 4 9 0 3 9 ( W O , A 1 )  
特開 2 0 1 5 - 2 0 0 6 4 5 ( J P , A )  
特開昭 6 1 - 1 4 1 1 8 9 ( J P , A )  
特開 2 0 1 1 - 2 2 5 4 0 0 ( J P , A )  
特開 2 0 0 4 - 3 0 2 4 1 2 ( J P , A )  
米国特許出願公開第 2 0 1 4 / 0 2 1 8 7 9 5 ( U S , A 1 )
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)  
G 0 2 B 2 7 / 2 8  
H 0 1 S 3 / 2 3  
G 0 2 F 1 / 0 9 - 1 / 0 9 5  
J S T P l u s / J M E D P l u s / J S T 7 5 8 0 ( J D r e a m I I I )