

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7621597号
(P7621597)

(45)発行日 令和7年1月27日(2025.1.27)

(24)登録日 令和7年1月17日(2025.1.17)

(51)国際特許分類

F I

H 0 1 S 3/23 (2006.01)

H 0 1 S 3/23

G 0 2 B 27/28 (2006.01)

G 0 2 B 27/28

A

請求項の数 20 (全25頁)

(21)出願番号	特願2023-506706(P2023-506706)	(73)特許権者	300073919
(86)(22)出願日	令和3年3月19日(2021.3.19)		ギガフォトン株式会社
(86)国際出願番号	PCT/JP2021/011549		栃木県小山市大字横倉新田400番地
(87)国際公開番号	WO2022/195894	(73)特許権者	504261077
(87)国際公開日	令和4年9月22日(2022.9.22)		大学共同利用機関法人自然科学研究機構
審査請求日	令和6年2月5日(2024.2.5)		東京都三鷹市大沢二丁目21番1号
		(74)代理人	100083116
			弁理士 松浦 憲三
		(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
		(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
		(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回転させるファラデー材料が用いられた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、前記第1の偏光子から前記第2の偏光子へと進む前記入射光の偏光方向を磁場によって第1の回転方向に第1の回転量で回転させると共に、前記第1の偏光子から前記第2の偏光子へと進む前記入射光の偏光方向を光学活性もしくは複屈折によって前記第1の回転方向とは逆方向の第2の回転方向に第2の回転量で回転させ、

前記第1の回転量は45度±17.5度以内であり、

前記第2の回転量は、nを整数として、45度+(180×n)度±17.5度以内であり、

前記第1の偏光子から前記第2の偏光子へと進む前記入射光の偏光方向は、前記ファラデー回転子の透過の前後で17.5度以内の角度差に維持され、

前記第2の偏光子から前記第1の偏光子に向かって進む戻り光の偏光方向は、前記ファラデー回転子の透過の前後で90度±17.5度以内の角度回転し、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2】

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。

【請求項3】

請求項1に記載の光アイソレータであって、

前記ファラデー材料は、水晶又はフッ化マグネシウムである、

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。

【請求項5】

請求項1に記載の光アイソレータであって、

前記ファラデー回転子に印加される磁場の磁束密度は、0.5T以上3.0T以下である、

光アイソレータ。

【請求項6】

請求項5に記載の光アイソレータであって、

前記ファラデー材料がフッ化マグネシウムであり、

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、6mm以上42mm以下である、

光アイソレータ。

【請求項7】

請求項5に記載の光アイソレータであって、

前記ファラデー材料がフッ化マグネシウムであり、

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、13mm以上83mm以下である、

光アイソレータ。

【請求項8】

請求項5に記載の光アイソレータであって、

前記ファラデー材料が水晶であり、

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、3mm以上25mm以下である、

光アイソレータ。

【請求項9】

請求項5に記載の光アイソレータであって、

前記ファラデー材料が水晶であり、

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、8mm以上53mm以下である、

光アイソレータ。

【請求項10】

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、分割された複数の材料で構成される、

10

20

30

40

50

光アイソレータ。

【請求項 1 1】

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一定に保たれるように制御される、

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、

前記ファラデー材料は、中空構造の磁石の内部に配置されている、

光アイソレータ。

10

【請求項 1 3】

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、

前記発振段レーザから出力された前記パルスレーザ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前記パルスレーザ光の偏光方向を回転させるファラデー材料が用いられた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パルスレーザ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、前記第 1 の偏光子から前記第 2 の偏光子へと進む前記パルスレーザ光の偏光方向を磁場によって第 1 の回転方向に第 1 の回転量で回転させると共に、前記第 1 の偏光子から前記第 2 の偏光子へと進む前記パルスレーザ光の偏光方向を光学活性もしくは複屈折によって前記第 1 の回転方向とは逆方向の第 2 の回転方向に第 2 の回転量で回転させ、

前記第 1 の回転量は 45 度 ± 17.5 度以内であり、

前記第 2 の回転量は、n を整数として、45 度 + (180 × n) 度 ± 17.5 度以内であり、

30

前記第 1 の偏光子から前記第 2 の偏光子へと進む前記パルスレーザ光の偏光方向は、前記ファラデー回転子の透過の前後で 17.5 度以内の角度差に維持され、

前記第 2 の偏光子から前記第 1 の偏光子に向かって進む戻り光の偏光方向は、前記ファラデー回転子の透過の前後で 90 度 ± 17.5 度以内の角度回転し、前記戻り光は前記第 1 の偏光子によって反射される、

紫外線レーザ装置。

【請求項 1 4】

請求項 1 3 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、

40

紫外線レーザ装置。

【請求項 1 5】

請求項 1 3 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。

【請求項 1 6】

請求項 1 3 に記載の紫外線レーザ装置であって、

50

前記発振段レーザと前記増幅器とのそれぞれは、レーザガスが充填されるチャンバを備える、

紫外線レーザ装置。

【請求項 17】

請求項 13 に記載の紫外線レーザ装置であって、

前記発振段レーザは紫外線固体レーザである、

紫外線レーザ装置。

【請求項 18】

請求項 13 に記載の紫外線レーザ装置であって、

前記増幅器は、共振器を備える構成、又はマルチパス増幅器である、

紫外線レーザ装置。

【請求項 19】

請求項 15 に記載の紫外線レーザ装置であって、

前記光軸調整機構は、前記調整機構により 2 軸調整可能な平行平面基板であって、前記パルスレーザ光を透過する前記平行平面基板を備える、

紫外線レーザ装置。

【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、

前記発振段レーザから出力された前記パルスレーザ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前記パルスレーザ光の偏光方向を回転させるファラデー材料が用いられた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パルスレーザ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、前記第 1 の偏光子から前記第 2 の偏光子へと進む前記パルスレーザ光の偏光方向を磁場によって第 1 の回転方向に第 1 の回転量で回転させると共に、前記第 1 の偏光子から前記第 2 の偏光子へと進む前記パルスレーザ光の偏光方向を光学活性もしくは複屈折によって前記第 1 の回転方向とは逆方向の第 2 の回転方向に第 2 の回転量で回転させ、

前記第 1 の回転量は $45 \text{ 度} \pm 17.5 \text{ 度}$ 以内であり、

前記第 2 の回転量は、 n を整数として、 $45 \text{ 度} + (180 \times n) \text{ 度} \pm 17.5 \text{ 度}$ 以内であり、

前記第 1 の偏光子から前記第 2 の偏光子へと進む前記パルスレーザ光の偏光方向は、前記ファラデー回転子の透過の前後で 17.5 度 以内の角度差に維持され、

前記第 2 の偏光子から前記第 1 の偏光子に向かって進む戻り光の偏光方向は、前記ファラデー回転子の透過の前後で $90 \text{ 度} \pm 17.5 \text{ 度}$ 以内の角度回転し、前記戻り光は前記第 1 の偏光子によって反射される、紫外線レーザ装置を用いて前記増幅器により増幅されたレーザ光を生成し、

前記増幅されたレーザ光を露光装置に出力し、

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

を含む、電子デバイスの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

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

10

20

30

40

50

【背景技術】

【0002】

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

【0003】

KrFエキシマレーザ装置及びArFエキシマレーザ装置の自然発振光のスペクトル線幅は、350～400pmと広い。そのため、KrF及びArFレーザ光のような紫外線を透過する材料で投影レンズを構成すると、色収差が発生してしまう場合がある。その結果、解像力が低下し得る。そこで、ガスレーザ装置から出力されるレーザ光のスペクトル線幅を、色収差が無視できる程度となるまで狭帯域化する必要がある。そのため、ガスレーザ装置のレーザ共振器内には、スペクトル線幅を狭帯域化するために、狭帯域化素子（エタロンやグレーティング等）を含む狭帯域化モジュール（Line Narrow Module：LNM）が備えられる場合がある。以下では、スペクトル線幅が狭帯域化されるガスレーザ装置を狭帯域化ガスレーザ装置という。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【文献】特開平6-51242号公報

【文献】特開昭61-141189号公報

【文献】特開2015-64569号公報

【概要】

【0005】

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、磁場によって第1の回転方向に第1の回転量で回転させると共に、光学活性もしくは複屈折によって第1の回転方向とは逆方向の第2の回転方向に第2の回転量で回転させるファラデー材料が用いられた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、を備える。

【0006】

本開示の他の一観点に係る紫外線レーザ装置は、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、パルスレーザ光を増幅して出力する増幅器と、発振段レーザ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、発振段レーザから出力されたパルスレーザ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パルスレーザ光の偏光方向を、磁場によって第1の回転方向に第1の回転量で回転させると共に、光学活性もしくは複屈折によって第1の回転方向とは逆方向の第2の回転方向に第2の回転量で回転させるファラデー材料が用いられたファラデー回転子と、ファラデー回転子を透過したパルスレーザ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、を備える。

【0007】

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光を出力する発振段レーザと、パルスレーザ光を増幅して出力する増幅器と、発振段レーザ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、発振段レーザから出力されたパルスレーザ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パルスレーザ光の偏光方向を、磁場によって第1の回転方向に第1の回転量で回転させると共に、光学活

性もしくは複屈折によって第 1 の回転方向とは逆方向の第 2 の回転方向に第 2 の回転量で回転させるファラデー材料が用いられたファラデー回転子と、ファラデー回転子を透過したパルスレーザ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、を備える紫外線レーザ装置を用いて増幅器により増幅されたレーザ光を生成し、増幅されたレーザ光を露光装置に出力し、電子デバイスを製造するために、露光装置内で感光基板上にレーザ光を露光することを含む。

【図面の簡単な説明】

【0008】

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

【図 1】図 1 は、比較例に係る紫外線レーザ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、パルスレーザ光の波長が ArF エキシマレーザの発振波長の場合におけ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 6】図 6 は、パルスレーザ光の波長が KrF エキシマレーザの発振波長の場合におけ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 7】図 7 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。

【図 8】図 8 は、実施形態 2 に係る紫外線レーザ装置の構成を概略的に示す。

【図 9】図 9 は、実施形態 3 に係る紫外線レーザ装置の構成を概略的に示す。

【図 10】図 10 は、実施形態 3 に適用されるファラデー回転子の正面図である。

【図 11】図 11 は、図 10 の 11-11 線における断面図である。

【図 12】図 12 は、実施形態 4 に係る紫外線レーザ装置の構成を概略的に示す。

【図 13】図 13 は、実施形態 5 に係る紫外線レーザ装置の構成を概略的に示す。

【図 14】図 14 は、実施形態 6 に係る紫外線レーザ装置の構成を概略的に示す。

【図 15】図 15 は、実施形態 6 に適用される増幅段レーザの構成を概略的に示す上面図である。

【図 16】図 16 は、露光装置の構成例を概略的に示す。

【実施形態】

【0009】

－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

4. 実施形態 1

4.1 構成

4.2 動作

4.3 ファラデー材料、サイズ及び磁場の磁束密度の選定例

4.3.1 選定例 1

4.3.2 選定例 2

4.3.3 選定例 3

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 作用・効果

4.7 変形例

5. 実施形態 2

- 5. 1 構成
- 5. 2 動作
- 5. 3 作用・効果
- 5. 4 変形例
- 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
 - 7. 2 動作
 - 7. 3 作用・効果
- 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
 - 9. 3 作用・効果
- 10. 電子デバイスの製造方法について
- 11. 光アイソレータの他の応用例
- 12. その他

10

20

以下、本開示の実施形態について、図面を参照しながら詳しく説明する。以下に説明される実施形態は、本開示のいくつかの例を示すものであって、本開示の内容を限定するものではない。また、各実施形態で説明される構成及び動作の全てが本開示の構成及び動作として必須であるとは限らない。なお、同一の構成要素には同一の参照符号を付して、重複する説明を省略する。

【0010】

1. 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。

30

【0011】

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。

【0012】

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。

40

【0013】

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。

50

【0014】

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。

【0015】

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、一対の放電電極40a, 40bと、レーザ光が透過する2枚のウインドウ42, 44とを含む。チャンバ32内には、レーザガスが充填される。レーザガスは、レアガスと、ハロゲンガスと、バッファガスとを含む。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(F₂)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。

【0016】

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光がPO26に入射するように配置される。

【0017】

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(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。

【0018】

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。

【0019】

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、一対の放電電極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。

【0020】

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。

【0021】

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。

【0022】

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

10

20

30

40

50

ーザ光として出力される。

【0023】

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。

10

【0024】

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。

【0025】

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。

20

【0026】

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。光アイソレータ80は、MO22とPO26との間に配置される。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。

【0027】

光アイソレータ80は、MO22の側から、1/2波長板81と、第1の偏光子83と、ファラデー回転子84と、第2の偏光子88とがこの順に配置される。ファラデー回転子84は、ファラデー材料85と磁石86とを含む。なお、図3において、ファラデー回転子84中に示す右向きの矢印は、磁石86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、パルスレーザ光が進む方向に視線を合わせたときのパルスレーザ光の偏光面の方向、すなわち偏光方向を表している。図4においても同様である。

30

【0028】

図3の上段に示すように、MO22から水平方向に偏光した直線偏光のパルスレーザ光が出力される。MO22から出力された水平偏光のパルスレーザ光は、1/2波長板81によって偏光方向が反時計回り方向に45度回転する。第1の偏光子83は、その透過軸が1/2波長板81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、1/2波長板81から出力されたパルスレーザ光は、第1の偏光子83を透過する。

【0029】

第1の偏光子83を透過したパルスレーザ光は、磁場が印加されたファラデー回転子84により偏光方向が時計回り方向に45度回転する。これにより、ファラデー回転子84から出力されたパルスレーザ光は水平偏光となる。第2の偏光子88は、その透過軸がファラデー回転子84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84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、PO26に入射する。

40

【0030】

1/2波長板81は、MO22から出力されたパルスレーザ光の偏光方向とPO26に入射するパルスレーザ光の偏光方向とが同じになるように、MO22からのパルスレーザ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

50

で済む。

【0031】

一方、PO26からの戻り光は、図3の下段に示すように、PO26への入射光と同じ偏光方向で第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84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84を通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で反射されてMO22に入射しない。比較例に係る光アイソレータ80における1/2波長板81は、エキシマレーザのような短波長における耐久性が低く、長期間安定して使用することが難しい。

【0032】

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120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120は、図3で説明した1/2波長板81を用いておらず、MO22とPO26との間の光路上に、MO22の側から第1の偏光子83、ファラデー回転子112及び第2の偏光子88がこの順に配置される。

【0033】

第1の偏光子83は、その透過軸がMO22から出力された特定方向に偏光したパルスレーザ光の偏光方向と平行になるように配置される。

【0034】

ファラデー回転子112は、ファラデー材料135と磁石136とを含む。ファラデー材料135は、使用波長において透明で、かつ光学活性もしくは複屈折を持つ材料である。ファラデー材料135は、例えば、水晶やフッ化マグネシウム(MgF₂)である。磁石136は、中空構造であり、磁場の印加方向は光の伝搬方向と平行である。例えば、印加される磁場の方向は、図4においてファラデー回転子112中に示す矢印方向である。

【0035】

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PO26に向けて出力されたパルスレーザ光の偏光方向と平行となるように配置される。

【0036】

4.2 動作

ファラデー材料135は、光学活性もしくは複屈折を持つため、磁場を印加することによりファラデー効果で偏光面が回転し、かつ、光学活性もしくは複屈折によって偏光面が回転する。

【0037】

実施形態1に係る光アイソレータ120では、図4の上段に示すように、行きの光が、ファラデー材料135を透過することにより、ファラデー効果で偏光面が+45度（又は-45度）回転すると共に、光学活性もしくは複屈折によって偏光面が-45度（又は+45度）±(180×n)度回転するように、磁場の磁束密度及びファラデー材料135の厚みが選択される。ここでnは整数である。

【0038】

言い換えると、行きの光においては、ファラデー効果による偏光面の回転角と、光学活性もしくは複屈折による偏光面の回転角とが相殺されるように、印加する磁場の磁束密度及びファラデー材料135の厚みが選択される。このような条件を満たすファラデー回転子112が用いられると、ファラデー回転子112の透過前後で偏光方向は変わらない。

【0039】

図4に示す例では、MO22からPO26の方向にファラデー回転子112を透過する「行きの光」は、ファラデー効果による偏光面の回転（時計回り方向に45度回転）と、光学活性もしくは複屈折による偏光面の回転（反時計回り方向に45度回転）とが互いに逆方向の回転となって、互いに打ち消し合しあい、ファラデー回転子112の透過の前後で偏光方向が維持される。図4の上段のファラデー回転子112から出力されたパルスレ

10

20

30

40

50

ーザ光の偏光方向を示す図示において、破線円に沿って時計回り方向に45度回転する様子を示す太線の円弧矢印は、ファラデー効果による偏光面の回転を表している。また、同図示の反時計回り方向に45度回転する様子を示す細線の円弧矢印は、光学活性もしくは複屈折による偏光面の回転を表している。こうして、MO22から出力されたパルスレーザー光は、第1の偏光子83、ファラデー回転子112及び第2の偏光子88をそれぞれ透過してPO26に入射する。

【0040】

ファラデー効果は、偏光面の回転方向が光の伝搬方向によらず、磁場の印加方向によるため、光の進行方向に対して非相反性をもつ。一方、光学活性や複屈折による偏光面の回転方向は光の伝搬方向に依存するため、光の進行方向に対して相反性を持つ。

【0041】

このため、図4の下段に示すように、PO26からの戻り光は、ファラデー回転子112を透過後、偏光方向が時計回り方向に90度回転し、第1の偏光子83で反射される。図4に示す例では、PO26からの戻り光は、ファラデー効果による偏光面の回転(45度回転)と、光学活性もしくは複屈折による偏光面の回転(45度回転)とが同方向の回転となり、これらの回転角度が重なりあって、ファラデー回転子112の透過の前後で偏光方向が90度回転する。図4の下段のファラデー回転子112を透過した戻りのパルスレーザー光の偏光方向を示す図示において、破線円に沿って時計回り方向に45度回転する様子を示す太線の円弧矢印は、ファラデー効果による偏光面の回転を表している。また、同図示の時計回り方向に45度回転する様子を示す細線の円弧矢印は、光学活性もしくは複屈折による偏光面の回転を表している。こうして、PO26からの戻りのパルスレーザー光は、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。

【0042】

図4に示したファラデー回転子112のファラデー効果による偏光面の回転方向は本開示における「第1の回転方向」の一例である。また、第1の偏光子83から第2の偏光子88の方向に進むパルスレーザー光に対するファラデー材料135の光学活性もしくは複屈折による偏光面の回転方向は本開示における「第2の回転方向」の一例である。

【0043】

4.3 ファラデー材料、サイズ及び磁場の磁束密度の選定例

4.3.1 選定例1

ファラデー材料135としては、水晶といった光学活性を持つ材料や、 MgF_2 といった複屈折を持つ材料が選定される。例えば、パルスレーザー光の波長が193nmであって、ファラデー回転子112のファラデー材料135として水晶を選定した場合、比旋光度 ρ は331.85deg/mm、ヴェルデ定数 V は70.1rad/Tmである。

【0044】

光学活性によって偏光面が回転する量 θ_p は、式(1)で表される。

【0045】

$$\theta_p = \rho L \quad (1)$$

式中の L は媒質長であり、本例では水晶の長さ(光軸方向の厚さ)である。

【0046】

また、ファラデー効果によって偏光面が回転する量 θ_v は、式(2)で表される。

【0047】

$$\theta_v = V B L \quad (2)$$

式中の B は、印加する磁場の磁束密度である。

【0048】

例えば、水晶の長さを11.53mm、印加する磁場の磁束密度を0.97Tとすると、光学活性によって偏光面が回転する量 θ_p は、式(1)より、3825度(=45度+180度×21)となる。ファラデー効果によって偏光面が回転する量 θ_v は、式(2)より、45度となる。よって、光学活性によって偏光面が回転する方向に対してファラデー

一効果によって偏光面が回転する方向が逆になるように磁場を印加することにより、ファラデー回転子 1 1 2 の透過前後で偏光の方向が変わらないようにすることができる。

【0049】

ファラデー効果による偏光面の回転量として例示した 45 度は本開示における「第 1 の回転量」の一例である。また、光学活性による偏光面の回転量として例示した 3825 度は本開示における「第 2 の回転量」の一例である。

【0050】

4. 3. 2 選定例 2

パルスレーザ光の波長が 193 nm であって、ファラデー回転子 1 1 2 のファラデー材料 1 3 5 として MgF₂ を選定した場合、常光線と異常光線のそれぞれの屈折率は次のとおりである。

【0051】

$$N_o = 1.4277$$

$$N_e = 1.4414$$

N_o は常光線の屈折率であり、N_e は異常光線の屈折率である。

【0052】

複屈折による偏光の回転を与えるために、次の式 (3) において、 $\delta = 180 + m \times 360 \text{ deg}$ (m は整数) となるように、ファラデー材料 1 3 5 の厚み d を設定する。

【0053】

$$\delta(\lambda) = \Delta n(\lambda) \times d \times (360 / \lambda) \quad (3)$$

ここで、 $\Delta n = N_e - N_o$ である。 λ は波長である。

【0054】

180 度の位相差を与えることで、ファラデー材料 1 3 5 の光学軸を θ 回転させると偏光は 2θ 回転する。

【0055】

また、MgF₂ の波長 193 nm におけるヴェルデ定数 V は 38.1 rad/Tm である。よって、例えば、MgF₂ の光軸方向の厚さ (媒質長) L を 20.62 mm で、印加する磁場の磁束密度 B を 1.00 T とすることで、達成可能である。

【0056】

4. 3. 3 選定例 3

パルスレーザ光の波長が 248 nm であって、ファラデー回転子 1 1 2 のファラデー材料 1 3 5 として水晶を選定した場合、比旋光度 ρ は 157.45 deg/mm 、ヴェルデ定数 V は 30.4 rad/Tm である。

【0057】

例えば、水晶の長さを 26.58 mm、印加する磁場の磁束密度を 0.97 T とすると、光学活性によって偏光面が回転する量 θ_p は、式 (1) より、4185 度 ($= 45 \text{ 度} + 180 \text{ 度} \times 23$) となる。ファラデー効果によって偏光面が回転する量 θ_v は、式 (2) より、45 度となる。よって、光学活性によって偏光面が回転する方向に対してファラデー効果によって偏光面が回転する方向が逆になるように磁場を印加することにより、ファラデー回転子 1 1 2 の透過前後で偏光の方向が変わらないようにすることができる。

【0058】

4. 4 磁場及びファラデー材料の厚さの好ましい範囲

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、ファラデー材料 1 3 5 が MgF₂ の場合と、水晶の場合とについて、図 5 及び図 6 に示す。図 5 は、入射光の波長が 193 nm である場合の好ましい範囲を示し、図 6 は、入射光の波長が 248 nm である場合の好ましい範囲を示す。ArF エキシマレーザの発振波長には波長 193 nm が含まれる。KrF エキシマレーザの発振波長には波長 248 nm が含まれる。

【0059】

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 1 3 5 の厚さ

10

20

30

40

50

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と、光学活性もしくは複屈折による偏光面の回転とがそれぞれ45度となる厚さを算出した値である。

【0060】

図5に示すように、ファラデー材料135が MgF_2 であって、パルスレーザ光の波長がArFエキシマレーザの発振波長である193nm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、0.5T～3.0Tと6mm～42mmとである。さらに好ましくは、0.75T～2.9Tと7mm～30mmとであり、最も好ましくは、0.8T～1.5Tと13mm～26mmである。なお、「0.5T～3.0T」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「0.5T～3.0T」の表記は「0.5T以上3.0T以下」を意味する。

10

【0061】

ファラデー材料135が水晶であって、パルスレーザ光の波長がArFエキシマレーザの発振波長である193nm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、0.5T～3.0Tと3mm～25mmとである。さらに好ましくは、0.75T～2.9Tと6mm～20mmとであり、最も好ましくは、0.8T～1.5Tと8mm～15mmである。

【0062】

また、図6に示すように、ファラデー材料135が MgF_2 であって、パルスレーザ光の波長がKrFエキシマレーザの発振波長である248nm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、0.5T～3.0Tと13mm～83mmとである。さらに好ましくは、0.75T～2.9Tと14mm～55mmとであり、最も好ましくは、0.8T～1.5Tと27mm～52mmである。

20

【0063】

ファラデー材料135が水晶であって、パルスレーザ光の波長がKrFエキシマレーザの発振波長である248nm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、0.5T～3.0Tと8mm～53mmとである。さらに好ましくは、0.75T～2.9Tと10mm～40mmとであり、最も好ましくは、0.8T～1.5Tと15mm～32mmである。

30

【0064】

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。

【0065】

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。

【0066】

40

図7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7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度のときの透過率が1.0になるように規格化した値である。第1のファラデー回転子110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及び第2のファラデー回転子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7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±17.5度の範囲である。

50

【0067】

4.6 作用・効果

実施形態1に係る光アイソレータ120によれば、短波長における耐久性が低い1／2波長板81を用いなくても、光アイソレータ120の透過前後でパルスレーザ光の偏光方向を同じにできる。このため、他の偏光方向に依存するモジュールを変更することなく戻り光を抑制することができる。

【0068】

4.7 変形例

図4では、行きの光に対して、ファラデー材料135のファラデー効果によって偏光面が45度回転し、光学活性もしくは複屈折によって偏光面が逆方向に45度+ $(180 \times n)$ 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、両者の回転角の範囲が許容される。図7によれば、行きの光に対するファラデー材料135のファラデー効果による偏光面の回転量は、45度±17.5度以内であってよく、光学活性もしくは複屈折による偏光面の回転量は45度+ $(180 \times n)$ 度±17.5度以内であってよい。

【0069】

また、図4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7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に入射する戻り光の偏光方向は、ファラデー回転子112の透過の前後で90度±17.5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83に入射する行きの光の偏光方向と、PO26から戻る戻り光がファラデー回転子112を透過して第1の偏光子83に入射するときの偏光方向とが90度±17.5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83で反射され、MO22への入射が抑制される。

【0070】

5. 実施形態2

5.1 構成

図8は、実施形態2に係る紫外線レーザ装置100の構成例を概略的に示す。図8に示す構成について、図1と異なる点を説明する。紫外線レーザ装置100は、MO22とPO26との間の光路上に光アイソレータ120が配置される点で図1の構成と異なる。光アイソレータ120は、実施形態1で説明したとおり、第1の偏光子83と、ファラデー回転子112と、第2の偏光子88とを含む。

【0071】

光アイソレータ120は、さらに戻り光終端用のダンパー116を含む。ダンパー116は、第1の偏光子83によって反射された戻り光がダンパー116に入射するように配置される。他の構成は、図1と同様であってよい。

【0072】

図8においては、MO22とPO26との間の光路上のa点、b点及びc点で示す各箇所におけるパルスレーザ光の偏光方向も示す。図8には、MO22からPO26の方向に伝搬するパルスレーザ光についてのa点～c点の各箇所での偏光方向と、PO26からMO22の方向に戻る戻り光についてのc点及びb点の各箇所での偏光方向を示す。

【0073】

5.2 動作

光アイソレータ120の動作は、実施形態1と同様である。MO22から出力され、特定の方向に偏光したパルスレーザ光(a点)は、第1の偏光子83を透過する(b点)。

第1の偏光子83を透過したパルスレーザ光はファラデー回転子112に入射し、ファラデー回転子112の前後で偏光方向が維持されて、ファラデー回転子112から出力される(c点)。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を透過する。MO22からPO26に進むパルスレーザ光のa点の偏光方向とd点の偏光方向とは同じである。

【0074】

PO26からMO22の方向に戻る戻り光については、図4中のd点において、MO22からPO26の方向に伝搬するパルスレーザ光の偏光方向と、PO26からMO22の方向に戻るパルスレーザ光(戻り光)の偏光方向とは同じである。このため、PO26からMO22の方向に戻る戻り光は、第2の偏光子88を透過する(c点)。

10

【0075】

第2の偏光子88を透過した戻り光は、ファラデー回転子112により偏光方向が90度回転する(b点)。b点において、MO22からPO26の方向に伝搬するパルスレーザ光の偏光方向と、PO26からMO22の方向に戻るパルスレーザ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。

【0076】

5.3 作用・効果

実施形態2に係る紫外線レーザ装置100によれば、短波長における耐久性が低い1/2波長板81を用いなくても、光アイソレータ120の透過前後で偏光方向を同じにできる。このため、他の偏光方向に依存するモジュールを変更することなく戻り光を抑制することができる。

20

【0077】

また、実施形態2に係る紫外線レーザ装置100によれば、PO26からMO22の方向に戻るパルスレーザ光は第1の偏光子83によって反射されてダンパー116に吸収されることになり、MO22への入射が抑制される。これにより、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よりも向上する。

【0078】

5.4 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8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。

30

【0079】

6. 実施形態3

6.1 構成

図9は、実施形態3に係る紫外線レーザ装置103の構成を概略的に示す。図9に示す構成について、図8と異なる点を説明する。実施形態3に係る紫外線レーザ装置103は、実施形態2におけるファラデー回転子112に代えて、温度調整が可能なファラデー回転子113が用いられ、ファラデー回転子113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2の構成と異なる。

40

【0080】

図10は、ファラデー回転子113の構成を概略的に示す正面図であり、図11は、図10の11-11線における断面図である。ファラデー材料135はホルダ137に保持され、中空構造の磁石136の内部に配置される。ファラデー回転子113は、ヒータ138a、138bと、温度センサ139とを含む。ヒータ138a、138b及び温度センサ139は、ホルダ137に取り付けられている。ヒータ138a、138bは、ファラデー材料135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139は、ファラデー回転子113の温度を検出する。

【0081】

50

紫外線レーザ装置 103 は、ヒータ電源 142 と、ファラデー回転子 113 の温度を制御するプロセッサ 144 とを備える（図 9 参照）。ヒータ電源 142 は、ヒータ 138a, 138b に電力を供給する。

【0082】

プロセッサ 144 は、温度センサ 139 から得られる情報を基に、ファラデー回転子 113 の温度を一定に保つようにヒータ電源 142 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 144 は、ファラデー材料 135 の温度変化を抑制するように、ヒータ電源 142 を介してヒータ 138a, 138b を制御する。プロセッサ 144 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。

10

【0083】

6.2 動作

プロセッサ 144 は、ヒータ電源 142 を介してヒータ 138a, 138b を駆動し、ファラデー回転子 113 の温度センサ 139 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 113 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。他の動作は実施形態 2 と同様である。

【0084】

6.3 作用・効果

実施形態 3 に係る紫外線レーザ装置 103 によれば、実施形態 2 と同様の効果が得られる。さらに、実施形態 3 の構成によれば、ファラデー材料 135 が環境温度の変化やレーザ光の吸収などにより、温度が変化することを抑制できる。この結果、温度変化による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、偏光子での透過率の低下やアイソレーション比の悪化を抑制することができる。

20

【0085】

7. 実施形態 4

7.1 構成

図 12 は、実施形態 4 に係る紫外線レーザ装置 104 の構成を概略的に示す。図 12 に示す構成について、図 8 と異なる点を説明する。図 12 に示す紫外線レーザ装置 104 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 8 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。

30

【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 12 の紙面に垂直な軸と、平行平面基板 202 の基板面及び図 12 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 12 の紙面に垂直な軸と、高反射ミラー 52 の反射面及び図 12 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。

40

【0088】

7.2 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光が入射されるように

50

調整される。

【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。

【0092】

7.3 作用・効果

実施形態4に係る紫外線レーザ装置104によれば、実施形態2と同様の効果が得られる。さらに、実施形態4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2の構成に比べて容易になる。

【0093】

8. 実施形態5

8.1 構成

図13は、実施形態5に係る紫外線レーザ装置105の構成を概略的に示す。図13に示す構成について、図8と異なる点を説明する。図13に示す紫外線レーザ装置105は、図8におけるMO22の代わりに、発振段レーザとして紫外線固体レーザ装置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8に示す構成と同様であってよい。

【0094】

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

【0095】

一例として、紫外線固体レーザ装置232は、半導体レーザシステムと、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もよい。半導体レーザシステムは、波長約773.6nm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光を波長変換して4倍高調波のパルスレーザ光を出力する。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 LiB_3O_5 で表される非線形光学結晶である。KBBF結晶は、化学式 $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ で表される非線形光学結晶である。

【0096】

エキシマ増幅器236は、チャンバ242と、凸面シリンドリカルミラー244と、凹面シリンドリカルミラー246とを含む。

【0097】

チャンバ242は、1対の放電電極250a、250bと、レーザ光が透過する2枚のウィンドウ252、254とを含む。放電電極250a、250bは放電空間256を挟んで対向して配置される。放電電極250a、250bの間の空間が放電空間256となる。放電電極250a、250bが放電空間256を挟んで対向する方向が放電方向に相当する。チャンバ242には、図8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。

【0098】

凸面シリンドリカルミラー244の凸曲面及び凹面シリンドリカルミラー246の凹曲

10

20

30

40

50

面にはそれぞれ波長約 193 nm に対する高反射膜がコートされている。

【0099】

凸面シリンドリカルミラー 244 と凹面シリンドリカルミラー 246 とは、紫外線固体レーザ装置 232 からのシード光が、エキシマ増幅器 236 の放電空間 256 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。

【0100】

8.2 動作

紫外線固体レーザ装置 232 から出力されたシード光は、光アイソレータ 120 を透過して、エキシマ増幅器 236 に入射する。エキシマ増幅器 236 に入射した波長約 193 nm のシード光は、凸面シリンドリカルミラー 244 及び凹面シリンドリカルミラー 246 で反射することにより、放電電極 250 a, 250 b の間の放電空間 256 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 236 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 236 に限らず、各種のマルチパス増幅器を適用可能である。

【0101】

光アイソレータ 120 の動作は、図 8 で説明した実施形態 1 と同様である。光アイソレータ 120 は、エキシマ増幅器 236 で発生した自然放射増幅光 (Amplified Spontaneous Emission: ASE) 等が紫外線固体レーザ装置 232 に入射するのを抑制する。

【0102】

8.3 作用・効果

実施形態 5 に係る紫外線レーザ装置 105 によれば、短波長における耐久性が低い 1/2 波長板 81 を用いなくても、光アイソレータ 120 の透過前後で偏光方向を同じにできる。このため、他の偏光方向に依存するモジュールを変更することなく、戻り光を抑制することができる。

【0103】

実施形態 5 に係る紫外線レーザ装置 105 によれば、エキシマ増幅器 236 から紫外線固体レーザ装置 232 の方向に戻る光は紫外線固体レーザ装置 232 に入射しないため、紫外線固体レーザ装置 232 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。

【0104】

9. 実施形態 6

9.1 構成

図 14 は、実施形態 6 に係る紫外線レーザ装置 106 の構成を概略的に示す。図 14 に示す構成について、図 8 と異なる点を説明する。実施形態 6 に係る紫外線レーザ装置 106 は、実施形態 1 の構成に対して、増幅段レーザの構成及び MO22 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。

【0105】

図 8 に示す実施形態 2 の増幅段レーザは、リアミラー 60 と出力結合ミラー 64 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 PO26 であるのに対し、図 14 に示す実施形態 6 の増幅段レーザは、リング共振器 270 を有する PO266 である点異なる。

【0106】

図 15 は、実施形態 6 に適用される PO266 の構成を概略的に示す上面図である。リング共振器 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。

【0107】

紫外線レーザ装置 106 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。

10

20

30

40

50

【0108】

9.2 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。

【0109】

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。

10

【0110】

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106から出力される。

【0111】

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。光アイソレータ120の動作は図8で説明した実施形態2と同様である。

【0112】

9.3 作用・効果

実施形態6に係る紫外線レーザ装置106によれば、実施形態2と同様の効果が得られる。

20

【0113】

10. 電子デバイスの製造方法について

図16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。

【0114】

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3～6で説明した紫外線レーザ装置103、104、105又は106を用いてレーザ光を生成してもよい。

30

【0115】

11. 光アイソレータの他の応用例

実施形態1～6において例示した光アイソレータ120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、放射光であってもよい。例えば、光アイソレータ120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120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。

40

【0116】

12. 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使用することも当業者には明らかである。

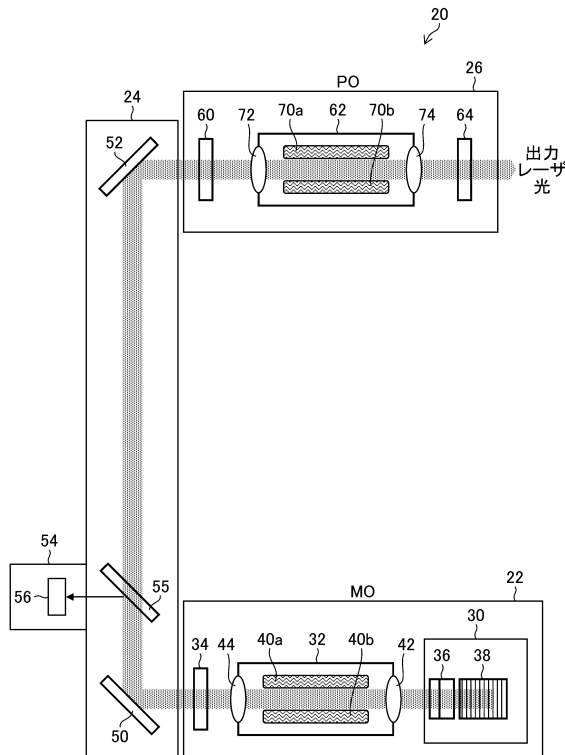
【0117】

50

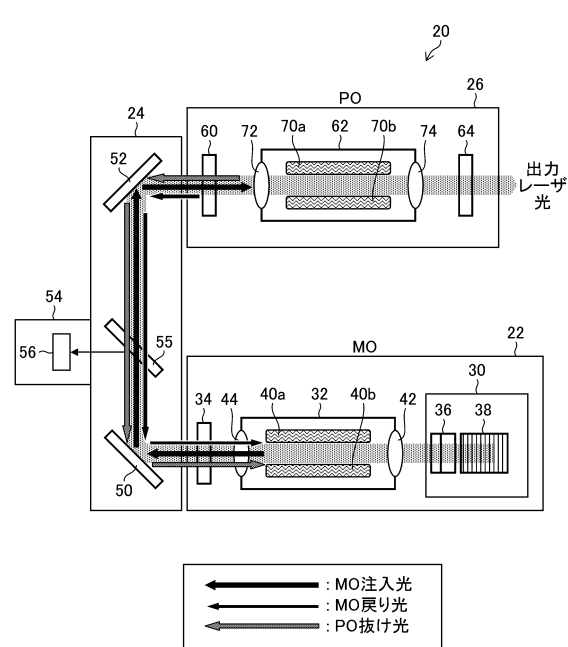
本明細書及び特許請求の範囲全体で使用される用語は、明記が無い限り「限定的でない」用語と解釈されるべきである。例えば、「含む」、「有する」、「備える」、「具備する」などの用語は、「記載されたもの以外の構成要素の存在を除外しない」と解釈されるべきである。また、修飾語「1つの」は、「少なくとも1つ」又は「1又はそれ以上」を意味すると解釈されるべきである。また、「A、B及びCの少なくとも1つ」という用語は、「A」「B」「C」「A+B」「A+C」「B+C」又は「A+B+C」と解釈されるべきである。さらに、それらと「A」「B」「C」以外のものとの組み合わせも含むと解釈されるべきである。

【図面】

【図 1】



【図 2】



10

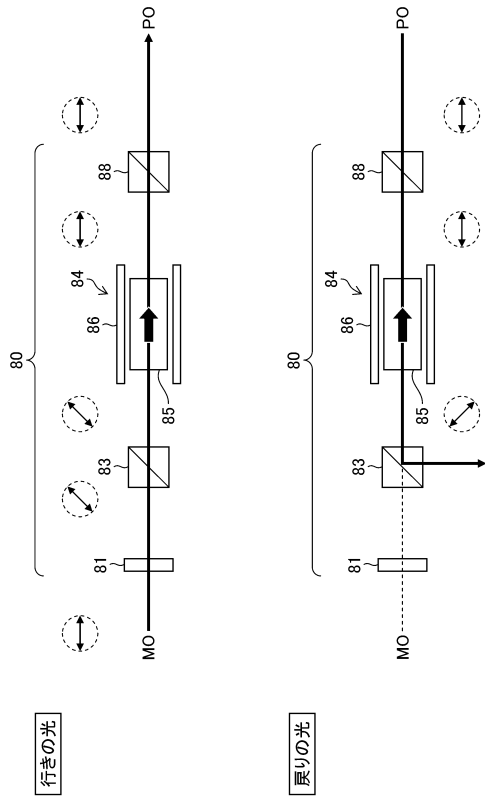
20

30

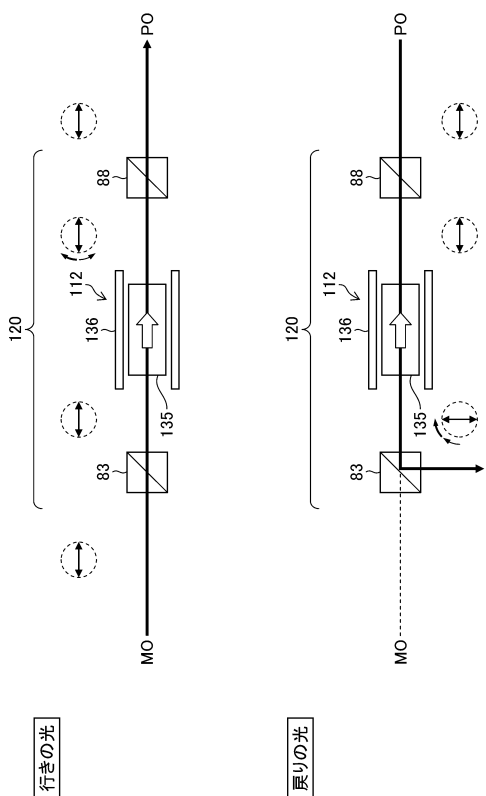
40

50

【図 3】



【図 4】



【図 5】

材料	MgF ₂		水晶	
ヴェルデ定数	38.1 rad/Tm		70.1 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 - 42	0.5 - 3.0	3 - 25
好ましい範囲	0.75 - 2.9	7 - 30	0.75 - 2.9	6 - 20
最も好ましい範囲	0.8 - 1.5	13 - 26	0.8 - 1.5	8 - 15

【図 6】

材料	MgF ₂		水晶	
ヴェルデ定数	19.1 rad/Tm		30.4 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	13 - 83	0.5 - 3.0	8 - 53
好ましい範囲	0.75 - 2.9	14 - 55	0.75 - 2.9	10 - 40
最も好ましい範囲	0.8 - 1.5	27 - 52	0.8 - 1.5	15 - 30

10

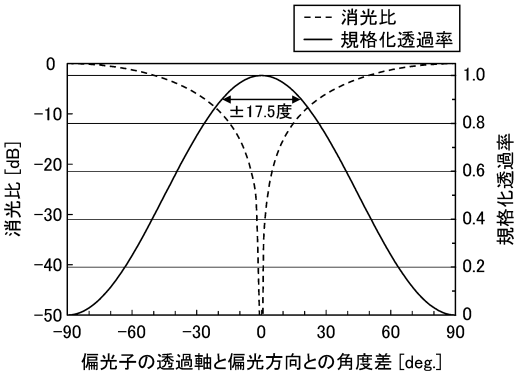
20

30

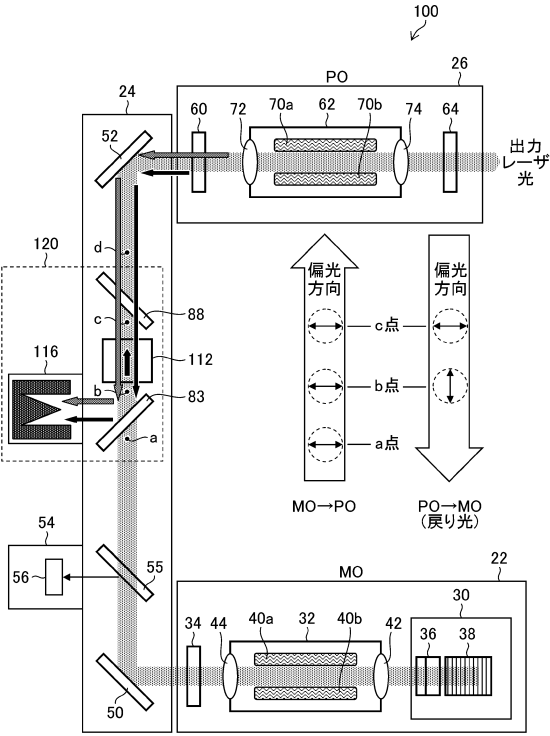
40

50

【図 7】



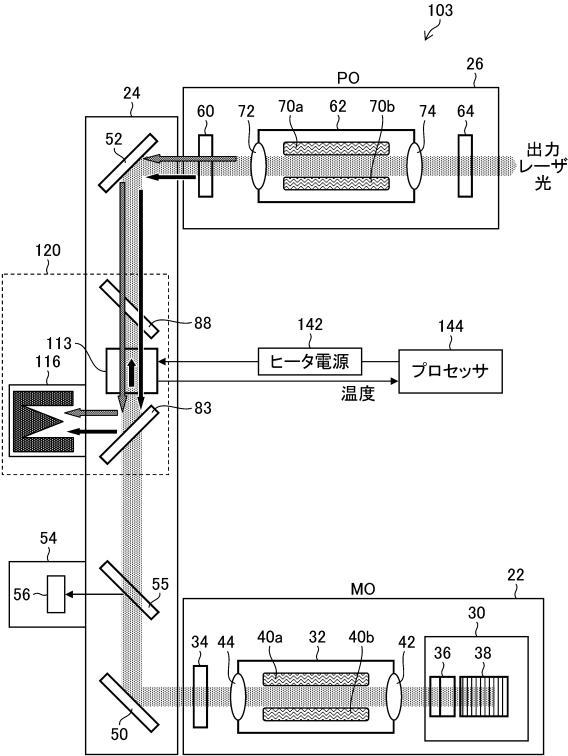
【図 8】



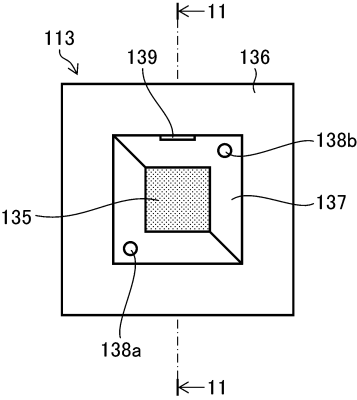
10

20

【図 9】



【図 10】

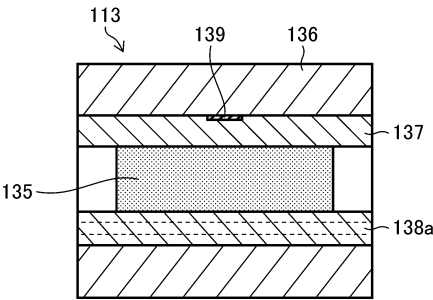


30

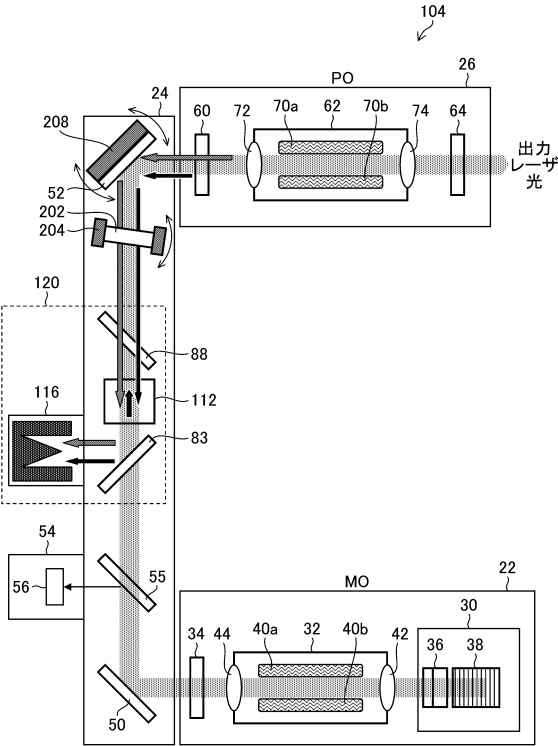
40

50

【図 1 1】



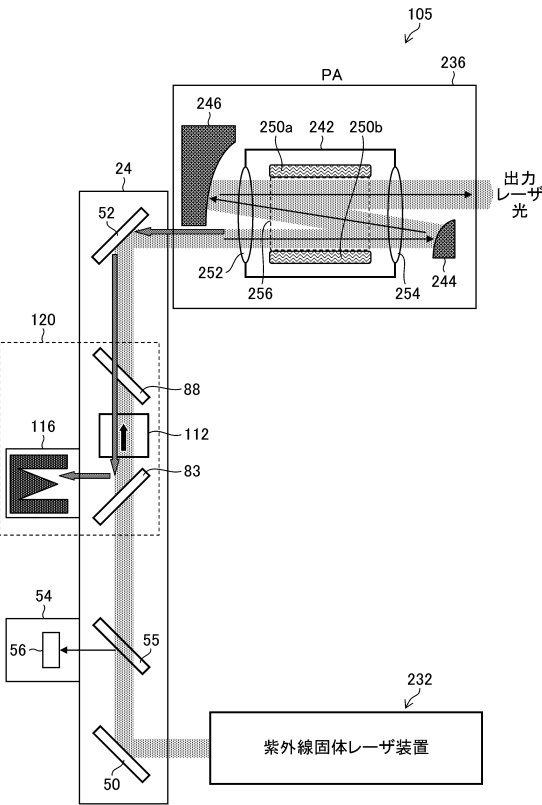
【図 1 2】



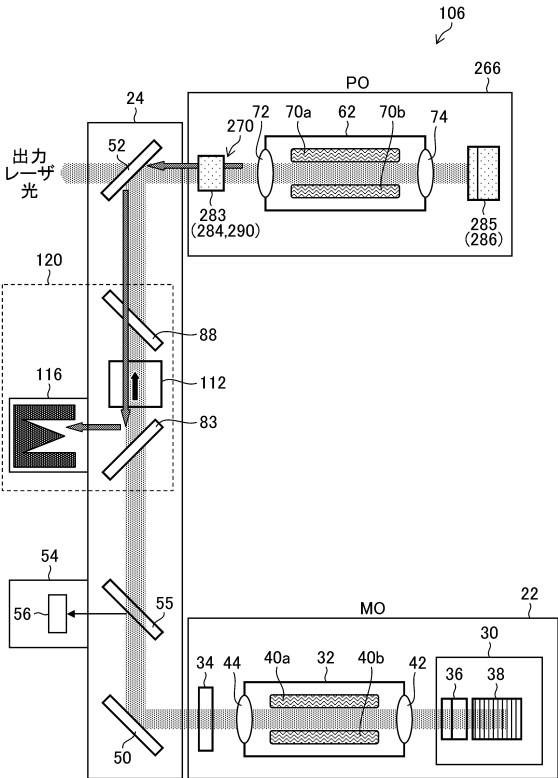
10

20

【図 1 3】



【図 1 4】

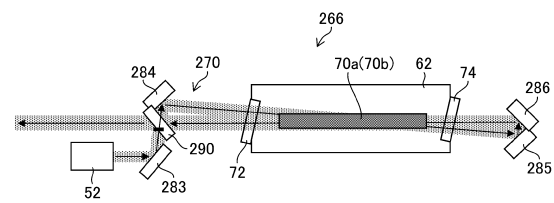


30

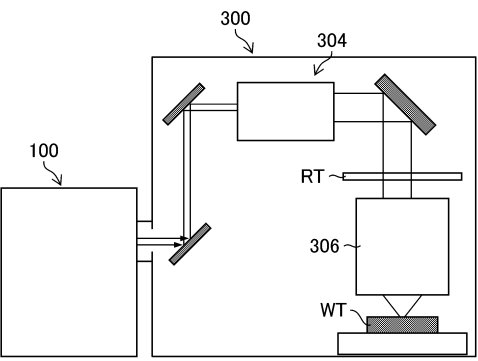
40

50

【図 15】



【図 16】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

岐阜県土岐市下石町322-6 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 特開昭54-078153 (JP, A)
特開2015-200645 (JP, A)
国際公開第2016/142995 (WO, A1)
米国特許出願公開第2016/0274305 (US, A1)
国際公開第2013/161760 (WO, A1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H01S 3/23
G02B 27/28
G02F 1/09-1/095
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)