

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2023年12月21日(21.12.2023)



(10) 国際公開番号

WO 2023/243473 A1

- (51) 国際特許分類:
G02B 27/28 (2006.01) G02F 1/09 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2023/020916
- (22) 国際出願日: 2023年6月6日(06.06.2023)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2022-095172 2022年6月13日(13.06.2022) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人大阪大学 (OSAKA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 Osaka (JP).
- (72) 発明者: 吉田 英次 (YOSHIDA, Hidetsugu); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 時田 茂樹 (TOKITA, Shigeki); 〒5650871 大阪府吹

田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 河仲 準二 (KAWANAKA, Junji); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 椿本 孝治 (TSUBAKIMOTO, Koji); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP).

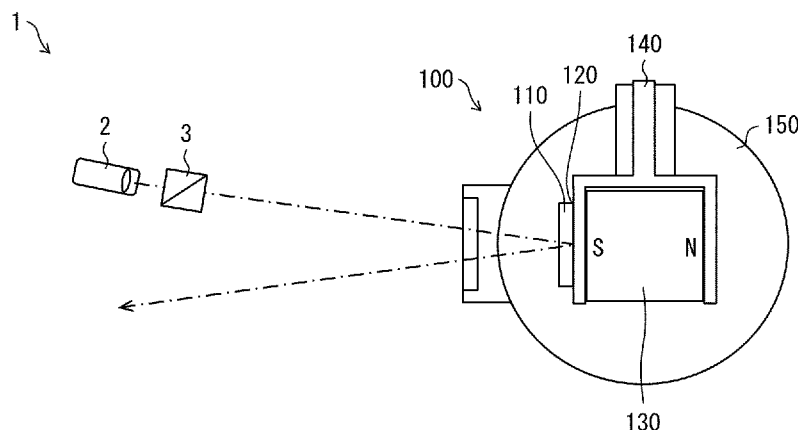
(74) 代理人: 弁理士法人 H A R A K E N Z O W O R L D P A T E N T & T R A D E M A R K (HARAKENZO WORLD PATENT & TRADEMARK); 〒5300041 大阪府大阪市北区天神橋2丁目北2番6号 大和南森町ビル Osaka (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC,

(54) Title: OPTICAL ELEMENT

(54) 発明の名称: 光学素子

図 1



(57) Abstract: The purpose of the present invention is to realize a Faraday rotator that is small, inexpensive, and can withstand high-output and high-repetition laser radiation. An optical element (100) includes: a reflective Faraday rotation element (110) that rotates the polarization plane of reflected light with respect to the polarization plane of incident light; a magnet (130) provided on the opposite side of the plane onto which the incident light falls with respect to the Faraday rotation element; and a coolant circulation unit (140) and/or a cryostat (150) that cools the Faraday rotation element.

(57) 要約: 小型で安価な、高出力・高繰り返しレーザに耐え得るファラデー回転子を実現する。光学素子(100)は、入射光の偏光面に対し反射光の偏光面を回転させる反射型のファラデー回転素子(110)と、ファラデー回転素子に対し入射光が入射する面の反対側に設けられた磁石(130)と、ファラデー回転素子を冷却する冷媒循環部140および/またはクライオスタット(150)と、を備える。

EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,
KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU,
LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY,
MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK,
SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

明 細 書

発明の名称： 光学素子

技術分野

[0001] 本発明は光学素子に関する。

背景技術

[0002] 特許文献1では、ファラデー回転素子に対して熱伝導率が高く、複屈折を有しない放熱基板をファラデー回転素子に接合させ、ファラデー回転素子の熱を放熱している。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：日本国公開特許公報特開2010-134066号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] ここで、高出力・高繰り返し回のレーザに耐え得るファラデー回転子は大型で高コストになる傾向がある。そのため、ファラデー回転子が高出力・高繰り返し回のレーザ開発における大きな障害の一つとなっている。

[0005] 本発明の一態様は、小型で安価な、高出力・高繰り返し回のレーザに耐え得るファラデー回転子を実現することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0006] 上記の課題を解決するために、本発明の一態様に係る光学素子は、入射光の偏光面に対し反射光の偏光面を回転させる反射型のファラデー回転素子と、前記ファラデー回転素子に対し前記入射光が入射する面の反対側に設けられた磁石と、前記ファラデー回転素子と前記磁石との間に設けられた冷却部と、を備え、前記冷却部は、前記ファラデー回転素子を冷却する。

発明の効果

[0007] 本発明の一態様によれば、小型で安価な、高出力・高繰り返し回のレーザに

耐え得るファラデー回転子を実現できる。

図面の簡単な説明

[0008] [図1]実施形態1に係る光学素子を含む、光学系の要部の構成を示す構成図である。

[図2]磁石の中心からの距離（横軸）に応じた、磁束密度（縦軸）の測定結果である。

[図3]温度を変化させたときにおける偏光面の回転角度の遷移を示す実験結果である。

[図4]偏光角度ごとのパワー強度の分布を示す実験結果である。

[図5]レーザスポットの半径方向における回転角度の分布を示す実験結果である。

[図6]温度（K）に対するTGGのベルデ定数（rad/Tm）を示す。

[図7]実施形態2に係る光学素子を含む光学系の要部の構成を示す構成図である。

[図8]実施形態2に係る光学素子を含む別の光学系の要部の構成を示す構成図である。

[図9]実施形態3に係る光学素子を含む、光学系の要部の構成を示す構成図である。

[図10]実施形態4に係る光学素子を含む、光学系の要部の構成を示す構成図である。

[図11]比較例に係る光学素子の構成を示す概略断面図である。

発明を実施するための形態

[0009] [実施形態1]

本発明の実施形態1の説明に先立ち、比較例をまず説明する。

[0010] (比較例)

図11は、比較例に係る光学素子200の構成を示す概略断面図である。光学素子200は、ドーナツ状の磁石230と、磁石230の磁場が集中する中央部にファラデー回転素子210とが設けられた光学素子である。光学

素子 200 への入射光は、磁石 230 の磁場がファラデー回転素子 210 に作用することによって、当該入射光の偏光面を回転させたうえで、光学素子 200 を透過していく。光学素子 200 は常温で用いられる。

[0011] 光学素子 200 の一例としては、直径 236 mm で高さ 240 mm ほどの円柱形状をしており、重量としては 80 kg ほどある。重量のうち、大部分が中心部において 1.5 T の磁力を生成する磁石 230 の重量である。そのため、非常に大きく重いため、コストがかかる。ここで、300 K におけるベルデ定数は 35 rad/Tm である。

[0012] さらに、光学素子 200 は、熱が籠りやすい構造をしている。このため、入射したレーザによって熱を蓄熱し、大きな熱レンズ効果と大きな熱複屈折効果とが生じる。そのため、光学素子 200 は、連続使用に適していない。また、レーザを透過させながら偏光面を回転させるため、1 光路につき、光学素子 200 が 1 個必要になる。

[0013] (光学系 1 の構成)

以下、本発明の一実施形態について、図 1 ～ 6 を参照し、詳細に説明する。

[0014] 図 1 は、実施形態 1 に係る光学素子 100 を含む、光学系 1 の要部の構成を示す構成図である。光学系 1 は、レーザ光源 2 と偏光板 3 と、光学素子 100 とを備える。

[0015] レーザ光源 2 は、高出力・高繰り返し回のレーザ光源であり、例えば 1 パルス当たりのエネルギー 100 J、パルス頻度 100 Hz のレーザ（波長 1030 nm）を出射するレーザ光源（YAG）である。偏光板 3 は、レーザ光源 2 から出射された出射光を特定方向の偏光のみを通過させることで、出射光の偏光状態を良質にするための光学素子である。

[0016] 光学素子 100 は、反射型のファラデー回転素子 110 を含む光学素子である。光学素子 100 は、入射光の偏光面に対し、反射光の偏光面を回転させる機能を有する。

[0017] (光学素子 100 の構成)

光学素子100は、ファラデー回転素子110と、ミラー120と、磁石130と、冷媒循環部140（冷却部）と、クライオスタット150（冷却部）と、を備える。

[0018] ファラデー回転素子110は、透過する光の偏光面を、印加されている磁場に応じて回転させる。ファラデー回転素子110は、光学素子100に入射した光を入射させる。ファラデー回転素子110としては、TGG（ $Tb_3Ga_5O_{12}$ ：Terbium Gallium Garnet）単結晶を用いてもよく、他のファラデー回転を生じる物体、例えば、TAG（ $Tb_3Al_5O_{12}$ ）、TSAG（ $Tb_3Sc_2Al_3O_{12}$ ）、ガラス材料のFR-5（HOYA）、およびFR25N等が挙げられる。

[0019] また、ミラー120は、光を反射するミラーであり、ファラデー回転素子110に対し入射光が入射する面の反対側の面（背面）にミラーコートされている。そのため、ミラー120は、ファラデー回転素子110への入射光を反射し、再度ファラデー回転素子を通して反射光とする。ミラー120は、ファラデー回転素子110の一面（入射光が入射する面の反対面）に金属を蒸着した薄膜層であってもよい。または、ミラー120は、ファラデー回転素子110の一面に積層された SiO_2 または ZrO_2 等の無機酸化物の多層膜であってもよい。

[0020] つまり、光学素子100に入射した光は、ミラー120による反射によって、2度ファラデー回転素子110を透過する。そのため、光学素子100は、ただファラデー回転素子に入射させ透過させた場合よりも偏光面を2倍回転させることができる。

[0021] 磁石130は、ファラデー回転素子に対し入射光が入射する面の反対側に設けられている磁石である。磁石130は、いわゆるスラブ型の磁石であり、S極の面とN極の面とを有する。磁石130のS極またはN極の面が、ファラデー回転素子における入射光が入射する面と平行になるように磁石130は配置される。すなわち、ファラデー回転素子において、磁石130による磁場は、ファラデー回転素子110における入射光が入射する面に対して

垂直に向いている。磁石130の一例としては、 50×50 （ファラデー回転素子110に対して平行な面の大きさ） $\times 48$ （厚さ）mmのブロック状の磁石であり、0.4 Tの磁力を有する。光の光路において均一な磁場を生成するために、磁石130の磁極を有する面は、ビーム口径より大きくてもよい。さらに、磁石130の磁極を有する面は、ファラデー回転素子110における入射光が入射する面より大きくてもよい。

[0022] 冷媒循環部140は、ファラデー回転素子110と磁石130との間に設けられる。冷媒循環部140は、ミラー120に接している。冷媒循環部140は、内部に冷媒を通し循環させる配管を有する。冷媒循環部140は、ミラー120を介してファラデー回転素子110の熱を吸収し、ファラデー回転素子110を冷却する役割をもつ。冷媒としては、液体窒素または液体ヘリウムを用いることが好ましい。冷媒循環部140としては熱伝導率が高い材質、例えば銅、サファイア、または他の金属を用いることが好ましい。

[0023] クライオスタット150は、光学素子100の他の構成要素を全て含む容器であり、その中を冷却している。クライオスタットの冷却方法は特に限定されない。クライオスタット150には、レーザを入射および／または出射するための光を透過する窓が設けられている。クライオスタット150としては、液体窒素または液体ヘリウムを用いるものであってもよい。

[0024] （磁力計測結果）

図2は、磁石130の中心からの距離（横軸）に応じた、磁束密度（縦軸）の測定結果である。つまり、図2では、磁石130の面（S極またはN極）からの距離Zを変化させ、平面上の磁束密度の分布を計測している。光学素子100におけるファラデー回転素子110の厚さが5 mm厚の場合、ファラデー回転素子110における入射光が入射する面の幅20 mmの領域において、略均一な約0.45 Tの磁束密度が得られる。ファラデー回転素子110の厚さが10 mm厚の場合、ファラデー回転素子110における入射光が入射する面の幅20 mmの領域において、略均一な約0.35 Tの磁束密度が得られる。

[0025] 以降、本実施形態に係る光学素子 100 における、この磁場環境下でのファラデー回転の効果を確認していく。

[0026] (偏光面の回転角度の検証)

入射光に対する反射光の偏光面の回転角度を検証するにあたり、反射光の出口側に、第 2 の偏光板 (図示省略) と、その 2 次側にパワーメータ (図示省略) とを設けた。パワーメータによる反射光のパワーの計測値が最大になるように、第 2 の偏光板の偏光面を操作し、パワーの計測値が最大になったときの第 2 の偏光面の角度を計測する。また、偏光板 3 の角度を計測する。これらの角度差から、入射光の偏光面に対し、反射光の偏光面がどれだけ回転したかがわかる。

[0027] 図 3 は、温度を変化させたときにおける偏光面の回転角度の遷移を示す実験結果である。図 3 において、横軸は温度 (K)、縦軸は偏光面の回転角度 (°) である。図 3 に示すように、実験はファラデー回転素子 110 の厚さが 5 mm のものと 10 mm のもので行った。また、ファラデー回転素子 110 に対する光の入射角は 5° とした。

[0028] 図 3 に示すようにファラデー回転素子 110 の厚さが 5 mm の場合は、130 K で 22.5° 回転しており、75 K で 45° 回転するであろうことがわかった。また、ファラデー回転素子 110 の厚さが 10 mm の場合は、200 K で 22.5° 回転しており、110 K で 45° 回転していることがわかった。それゆえ、光学素子 100 は、アイソレータ等として好適に用いることができる。

[0029] ここで、22.5° の結果をも計測した理由は、実施形態 2 において 22.5° 回転させた場合での実施形態を説明しているからである。詳細は後述する。

[0030] (偏光角度ごとの強度分布の検証)

次に、偏光角度ごとの強度分布を検証した。検証は、第 2 の偏光板を回転させながら、パワーメータによるパワーの計測値の変化を計測した。その上で、パワーの計測値の最大値に対して正規化した値で考える。

[0031] 図4は、偏光角度ごとのパワー強度の分布を示す実験結果である。図4において、横軸は偏光面の回転角度(°)、縦軸はパワー強度(a.u.)の計測値である。実験は、ファラデー回転素子10mmのもので行い、ファラデー回転素子110の温度は300Kと110Kとで計測した。図4に示すように、正弦波が得られている。

[0032] (ファラデー回転素子110の半径方向における回転角度の検証)

さらに、ファラデー回転素子110に対するビームの入射位置に応じた回転角度の分布を検証した。具体的には、小さい口径のレーザービームをファラデー回転素子110に対し入射させ、当該ビームをファラデー回転素子110に対し平行な平面で平行移動させることによって、ファラデー回転素子110の半径方向における、回転角度の分布を検証した。

[0033] 図5は、レーザスポットの半径方向における回転角度の分布を示す実験結果である。図5において、横軸はレーザスポットの磁石130の中心(ファラデー回転素子110の中心)からの距離(mm)、縦軸は偏光面の回転角度(°)である。実験は、ファラデー回転素子10mmのものを110K環境で行ったものと、ファラデー回転素子の厚さ5mmのものを110K環境および300K環境で行ったものがある。

[0034] どの結果でも、ファラデー回転素子110の中心に対する距離が-10~10mmの場合(ファラデー回転素子有効領域)では、ほぼ一定の回転角度を得られることが分かった。そのため、ファラデー回転素子有効領域において、均一に偏光面を回転させることができる。すなわち、有益なファラデー回転素子110だといえる。

[0035] また、ファラデー回転素子110の厚さが5mmにおける110Kと300Kとの結果を比較することによって、低温下における回転角度が高いことが明確にわかる。

[0036] (ベルデ定数)

上述したように、ファラデー回転素子110は、ファラデー効果によって、入射光の偏光面に対して、反射光の偏光面を回転させる。この際の回転角

度を求める比例定数としてベルデ定数が知られている。

[0037] 図6は、温度（K）に対するTGGのベルデ定数（rad/Tm）を示す。図6に示すようにベルデ定数は、絶対温度に反比例する関係がある。例えば、ベルデ定数の一例として、300Kでは35 rad/Tmであるが、200Kでは60 rad/Tmになり、100Kでは110 rad/Tmになり、70Kでは165 rad/Tmになる。したがって、ファラデー回転素子110を冷却することは重要である。

[0038] （小括）

ファラデー回転素子110を、冷媒循環部140および／またはクライオスタット150によって冷却することによって、ベルデ定数を高め、低磁力の磁石130でも必要な角度だけ偏光面を回転させる光学素子100を示した。

[0039] 実施形態1に係る光学素子100は、比較例に係る光学素子200よりも、重量が約1/60であり、磁力が約1/2～1/3なため、小型で安価である。その結果、光学素子100は、冷却部によって強制冷却することができる。また、冷却しているため、比較例と異なり、レーザによる熱が滞留せずに、熱レンズ効果および熱複屈折効果も少ない特徴がある。そのため、高出力・高繰り返しでの使用が可能である。特に冷媒循環部140は、薄膜であるミラー120を介してファラデー回転素子110と面で接続されている。そのため、冷媒循環部140は、レーザによる多量の熱を迅速にファラデー回転素子110から奪うことができる。それゆえ、光学素子100は、高出力・高繰り返しでの使用が可能である。

[0040] 〔実施形態2〕

本発明の他の実施形態について、以下に説明する。なお、説明の便宜上、上記実施形態にて説明した部材と同じ機能を有する部材については、同じ符号を付記し、その説明を繰り返さない。

[0041] 図7は、実施形態2に係る光学素子100aを含む光学系1aの要部の構成を示す構成図である。また、図8は、実施形態2に係る光学素子100a

を含む別の光学系 1 b の要部の構成を示す構成図である。光学素子 1 0 0 a は、ファラデー回転素子 1 1 0 a、1 1 0 b と、ミラー 1 2 0 a、1 2 0 b と、磁石 1 3 0 と、冷媒循環部 1 4 0 と、クライオスタット 1 5 0 と、を備える。

[0042] 実施形態 1 に係る光学素子 1 0 0 では、磁石 1 3 0 における S 極または N 極のどちらかに面するようにファラデー回転素子 1 1 0 を 1 個配置した。対して、実施形態 2 では、ファラデー回転素子 1 1 0 を 2 個配置するために、S 極および N 極のそれぞれに 1 個ずつ、ファラデー回転素子 1 1 0 a、1 1 0 b を配置する。

[0043] 図 7 では、異なるレーザ光源 2 a および 2 b が出射したレーザが、偏光板 3 a または 3 b を経て、ファラデー回転素子 1 1 0 a および 1 1 0 b に入射しており、その反射光をそれぞれ利用している。このように、1 個の磁石 1 3 0 に対し、2 つのレーザの偏光面を同時に回転させることができる。そのため、共通して利用できる磁石 1 3 0、冷媒循環部 1 4 0、およびクライオスタット 1 5 0 の分だけコストダウン効果が得られる。この場合、各ファラデー回転素子 1 1 0 a および 1 1 0 b の透過時の回転角度は 45° であることが望ましい。

[0044] また、図 8 では、光学素子 1 0 0 a に対して、複数のミラー 1 6 0 a、1 6 0 b を設ける。単一のレーザ光源 2 が出射したレーザが偏光板 3 を経て、ファラデー回転素子 1 1 0 a に入射し、その反射光がミラー 1 6 0 a で反射され、またさらにミラー 1 6 0 a による反射光がミラー 1 6 0 b によって、反射される。その後、ミラー 1 6 0 b による反射光がファラデー回転素子 1 1 0 b に入射し、反射されて光学素子 1 0 0 a を出ていく。結果的に、単一のレーザ光源 2 から出射されたレーザは、2 個のファラデー回転素子 1 1 0 a および 1 1 0 b によって回転されることになっている。そのため、必要な回転角度に対するファラデー回転素子 1 1 0 a、1 1 0 b の厚さを小さくすることができる。その結果、光学系 1 b を安価に構築できる。この場合、各ファラデー回転素子 1 1 0 a および 1 1 0 b の透過時の回転角度は 22.5

°（２個のファラデー回転素子で合計して４５°）であることが望ましい。

[0045] 〔実施形態３〕

図９は、実施形態３に係る光学素子１００ｂを含む、光学系１ｃの要部の構成を示す構成図である。図９に示すように、実施形態３に係る光学素子１００ｂでは、光学素子１００と異なり、冷媒循環部１４０を加熱する加熱部１７０を備える点が、実施形態１と異なる。

[0046] 加熱部１７０は、冷媒循環部１４０を加熱する機能を備える。つまり、冷媒を通す配管が形成された銅のブロックに対し、ヒータなどの加熱部１７０が固定されている。その結果、冷媒によって冷媒の温度まで単調に温度低下していくファラデー回転素子１１０を加熱することも可能になる。そのため、温度を所定の温度に一定に制御（固定）することが可能になる。

[0047] 加熱部１７０による温度調整機能によって、ファラデー回転素子１１０の温度は一定に保たれるため、所望のベルデ定数を維持することができる。それゆえに、偏光面を目的とした回転角度で回転させることができるようになる。従って、精度よく偏光面を回転させることができる光学素子１００ｂを得ることができる。

[0048] 〔実施形態４〕

図１０は、実施形態４に係る光学素子１００ｃを含む、光学系１ｄの要部の構成を示す構成図である。図１０に示すように、実施形態４に係る光学素子１００ｃでは、光学素子１００と異なり、ファラデー回転素子１１０から放熱する放熱部１８０を備える点が、実施形態１と異なる。

[0049] 放熱部１８０は、ファラデー回転素子１１０における入射光が入射する面に接し、ファラデー回転素子１１０の熱を放出する放熱板である。放熱部１８０としては、サファイアなどを用いることができる。

[0050] 放熱部１８０によって、ファラデー回転素子１１０の冷却能力を向上することができ、容易にファラデー回転素子１１０の温度を低温に保つことができる。そのため、高いベルデ定数を有するファラデー回転素子を実現することができる。

[0051] 〔変形例〕

実施形態 1 から 4 では、冷媒循環部 140 とクライオスタット 150 とを共に備える例を示したが、どちらか一方だけであってもよい。すなわち、少なくとも冷媒循環部 140 またはクライオスタット 150 でもって、ファラデー回転素子 110 を冷却することができればよい。

[0052] また、波長は光学素子 100 に入射させる波長は特に制限されない。当然、波長が異なる場合、ベルデ定数も異なることになる。そのため、実施形態 1 で示した各種実験結果に、温度およびファラデー回転素子の厚さ等は制限されない。

[0053] 〔まとめ〕

上記の課題を解決するために、本発明の態様 1 に係る光学素子は、入射光の偏光面に対し反射光の偏光面を回転させる反射型のファラデー回転素子と、前記ファラデー回転素子に対し前記入射光が入射する面の反対側に設けられた磁石と、前記ファラデー回転素子と前記磁石との間に設けられた冷却部と、を備え、前記冷却部は、前記ファラデー回転素子を冷却する。

[0054] 上記の構成によれば、ファラデー回転素子を冷却する冷却部をファラデー回転素子と磁石との間に設けることによって、高ベルデ定数を実現したファラデー回転子（光学素子）を得ることができる。また、反射型のファラデー回転子であるため、入射時と反射時とに分けて偏光面を回転させることができるため、従来型の半分の長さで良くなり、磁石を小体積にし、ファラデー回転子を薄型化することができ、光学素子の小型化を実現することができる。

[0055] 本発明の態様 2 に係る光学素子は、上記態様 1 において、前記冷却部は、液体窒素を通すことで冷却してもよい。また、前記冷却部は、クライオスタットであってもよい。

[0056] 上記の構成によれば、冷却部は冷媒として液体窒素を用いた冷却か、クライオスタットを用いることができ、ファラデー回転素子を十分に冷却することができる。

- [0057] 上記の課題を解決するために、本発明の態様3に係る光学素子は、入射光の偏光面に対し反射光の偏光面を回転させる反射型のファラデー回転素子と、前記ファラデー回転素子に対し前記入射光が入射する面の反対側に設けられた磁石と、前記ファラデー回転素子を200K以下に冷却する冷却部と、を備える。
- [0058] 上記の構成によれば、ファラデー回転素子を200K以下に冷却することができ、高ベルデ定数を実現したファラデー回転子を得ることができる。また、反射型のファラデー回転子であるため、入射時と反射時とに分けて偏光面を回転させることができるため、磁石を小容量にすることができ、光学素子の小型化を実現することができる。
- [0059] 本発明の態様4に係る光学素子は、上記態様1から3のいずれかにおいて、前記冷却部は、前記ファラデー回転素子を130K以下に冷却してもよい。また、前記冷却部は、前記ファラデー回転素子を110K以下に冷却してもよい。
- [0060] 上記の構成によれば、さらにファラデー回転素子のベルデ定数を上げることができる。
- [0061] 本発明の態様5に係る光学素子は、上記態様1から4のいずれかにおいて、冷却部は、前記ファラデー回転素子を、所定の温度に制御してもよい。
- [0062] 上記の構成によれば、冷却部はファラデー回転素子を所定の温度に制御（固定）することができるため、ベルデ定数を一定に保つことができ、偏光面の回転角を一定に保つことができる。そのため、低損失の光学系を構成することができるようになる。
- [0063] 本発明の態様6に係る光学素子は、上記態様1から5のいずれかにおいて、前記ファラデー回転素子を加熱する加熱部をさらに備えてもよい。
- [0064] 上記の構成によれば、冷却部で冷却し、加熱部によって加熱することで、所望のベルデ定数を得ることができる温度に、ファラデー回転素子を容易に制御（固定）することができる。そのため、低損失の光学系を構成することができるようになる。

[0065] 本発明の態様7に係る光学素子は、上記態様1から6のいずれかにおいて、前記ファラデー回転素子における前記入射光が入射する面に接し、前記ファラデー回転素子の熱を放出させる放熱部をさらに備えてもよい。

[0066] 上記の構成によれば、放熱部によってファラデー回転素子の冷却能力を向上することができ、高いベルデ定数を有するファラデー回転素子を実現することができる。

[0067] 本発明の態様8に係る光学素子は、上記態様1から7のいずれかにおいて、前記ファラデー回転素子を第1ファラデー回転素子と称し、前記磁石に対して前記第1ファラデー回転素子の反対側に設けられた、入射光の偏光面に対し反射光の偏光面を回転させる反射型の第2ファラデー回転素子をさらに備えてもよい。

[0068] 上記の構成によれば、1個の磁石に対し、2個のファラデー回転素子を配置することができ、光学系の小型化および低コスト化を実現することができる。

[0069] 本発明の態様9に係る光学素子は、上記態様8において、前記第1ファラデー回転素子からの前記反射光を、反射または屈折させて、前記第2ファラデー回転素子への前記入射光とする素子を備えてもよい。

[0070] 上記の構成によれば、1個の磁石に対し、2個のファラデー回転素子を配置し、当該2個のファラデー回転素子をもって、偏光面を2度にわけて所定の角度分だけ回転させるため、ファラデー回転素子1個あたりの回転角度を小さくすることができる。そのため、ファラデー回転素子自体の厚さの低減、またはベルデ定数を小さくする（ファラデー回転素子の温度を高温にする）ことができ、低コスト化・低エネルギー化することができる。

[0071] [付記事項]

本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。

符号の説明

- [0072] 1、1 a、1 b、1 c、1 d 光学系
- 2、2 a、2 b レーザ光源
- 3、3 a、3 b 偏光板
- 100、100 a、100 b、100 c、200 光学素子
- 110、110 a、110 b、210 ファラデー回転素子
- 120、120 a、120 b、160 a、160 b ミラー
- 130、230 磁石
- 140 冷媒循環部（冷却部）
- 150 クライオスタット（冷却部）
- 170 加熱部
- 180 放熱部

請求の範囲

- [請求項1] 入射光の偏光面に対し反射光の偏光面を回転させる反射型のファラデー回転素子と、
前記ファラデー回転素子に対し前記入射光が入射する面の反対側に設けられた磁石と、
前記ファラデー回転素子と前記磁石との間に設けられた冷却部と、
を備え、
前記冷却部は、前記ファラデー回転素子を冷却する、光学素子。
- [請求項2] 前記冷却部は、液体窒素を通すことで冷却する、請求項1に記載の光学素子。
- [請求項3] 前記冷却部は、クライオスタットである、請求項1に記載の光学素子。
- [請求項4] 入射光の偏光面に対し反射光の偏光面を回転させる反射型のファラデー回転素子と、
前記ファラデー回転素子に対し前記入射光が入射する面の反対側に設けられた磁石と、
前記ファラデー回転素子を200K以下に冷却する冷却部と、を備える、光学素子。
- [請求項5] 前記冷却部は、前記ファラデー回転素子を130K以下に冷却する、請求項4に記載の光学素子。
- [請求項6] 前記冷却部は、前記ファラデー回転素子を110K以下に冷却する、請求項4に記載の光学素子。
- [請求項7] 冷却部は、前記ファラデー回転素子を、所定の温度に制御する、請求項1から6のいずれか1項に記載の光学素子。
- [請求項8] 前記ファラデー回転素子を加熱する加熱部をさらに備える、請求項1から6のいずれか1項に記載の光学素子。
- [請求項9] 前記ファラデー回転素子における前記入射光が入射する面に接し、前記ファラデー回転素子の熱を放出させる放熱部をさらに備える、請

求項 1 から 6 のいずれか 1 項に記載の光学素子。

[請求項10]

前記ファラデー回転素子を第 1 ファラデー回転素子と称し、

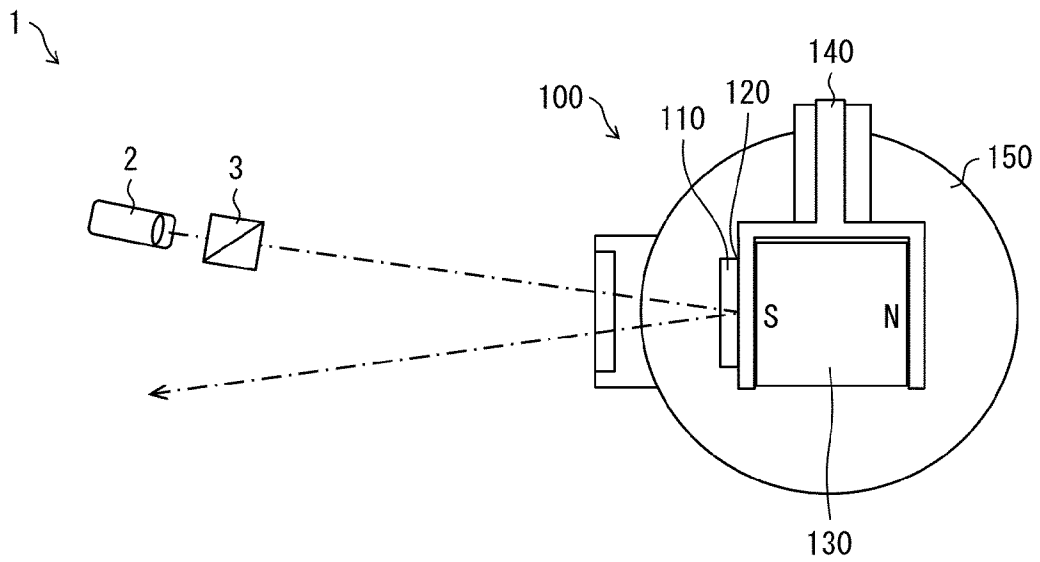
前記磁石に対して前記第 1 ファラデー回転素子の反対側に設けられた、入射光の偏光面に対し反射光の偏光面を回転させる反射型の第 2 ファラデー回転素子をさらに備える請求項 1 から 6 のいずれか 1 項に記載の光学素子。

[請求項11]

前記第 1 ファラデー回転素子からの前記反射光を、反射または屈折させて、前記第 2 ファラデー回転素子への前記入射光とする素子を備える、請求項 10 に記載の光学素子。

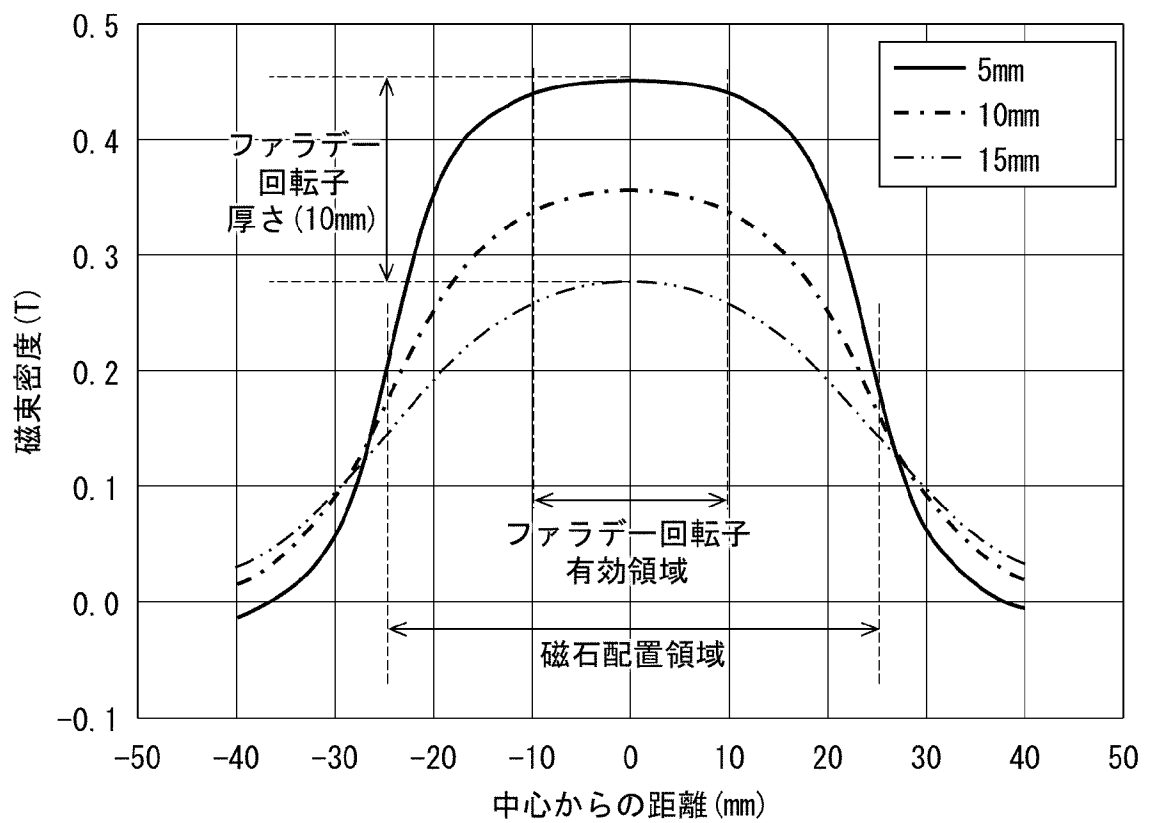
[図1]

図 1



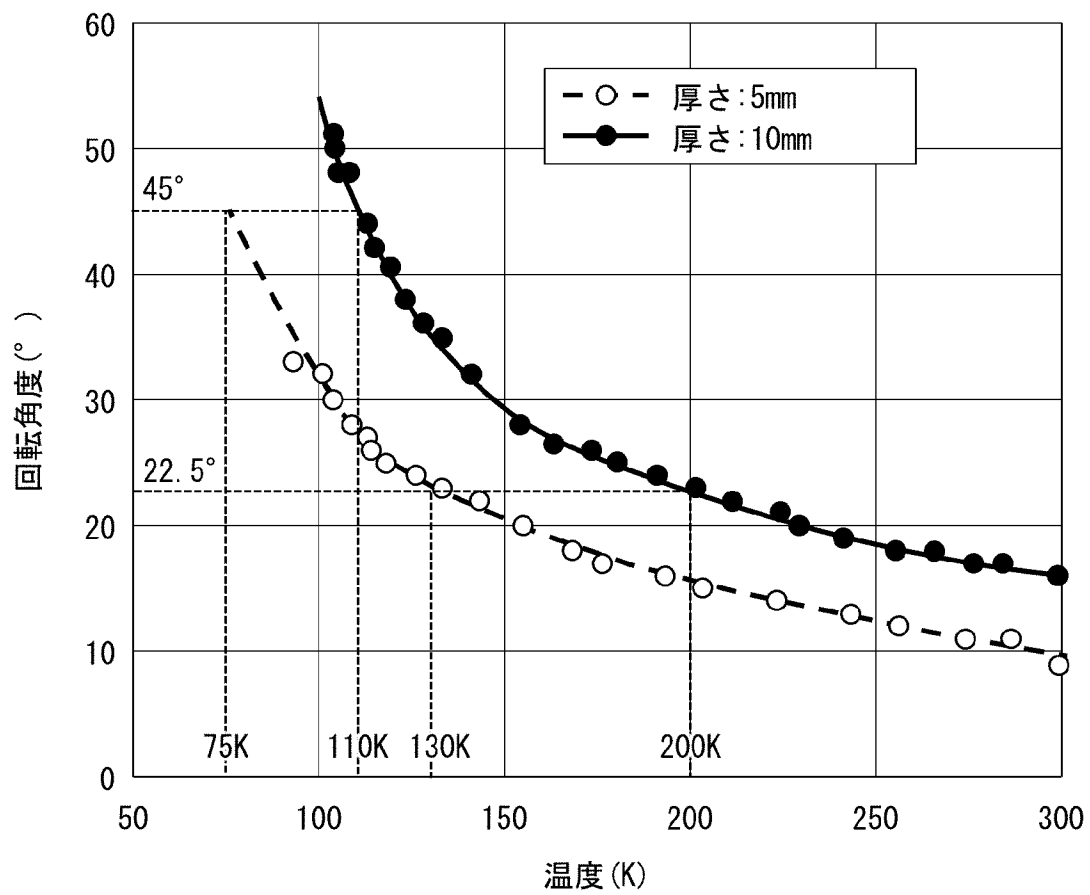
[図2]

図 2



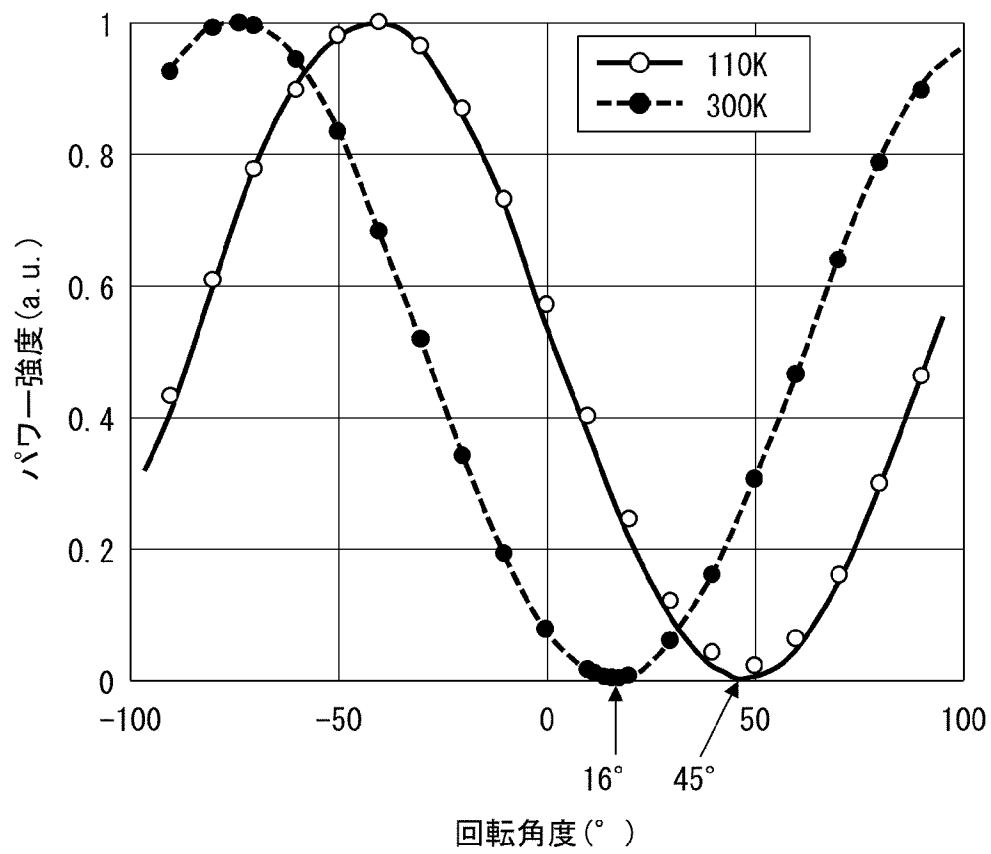
[図3]

図 3



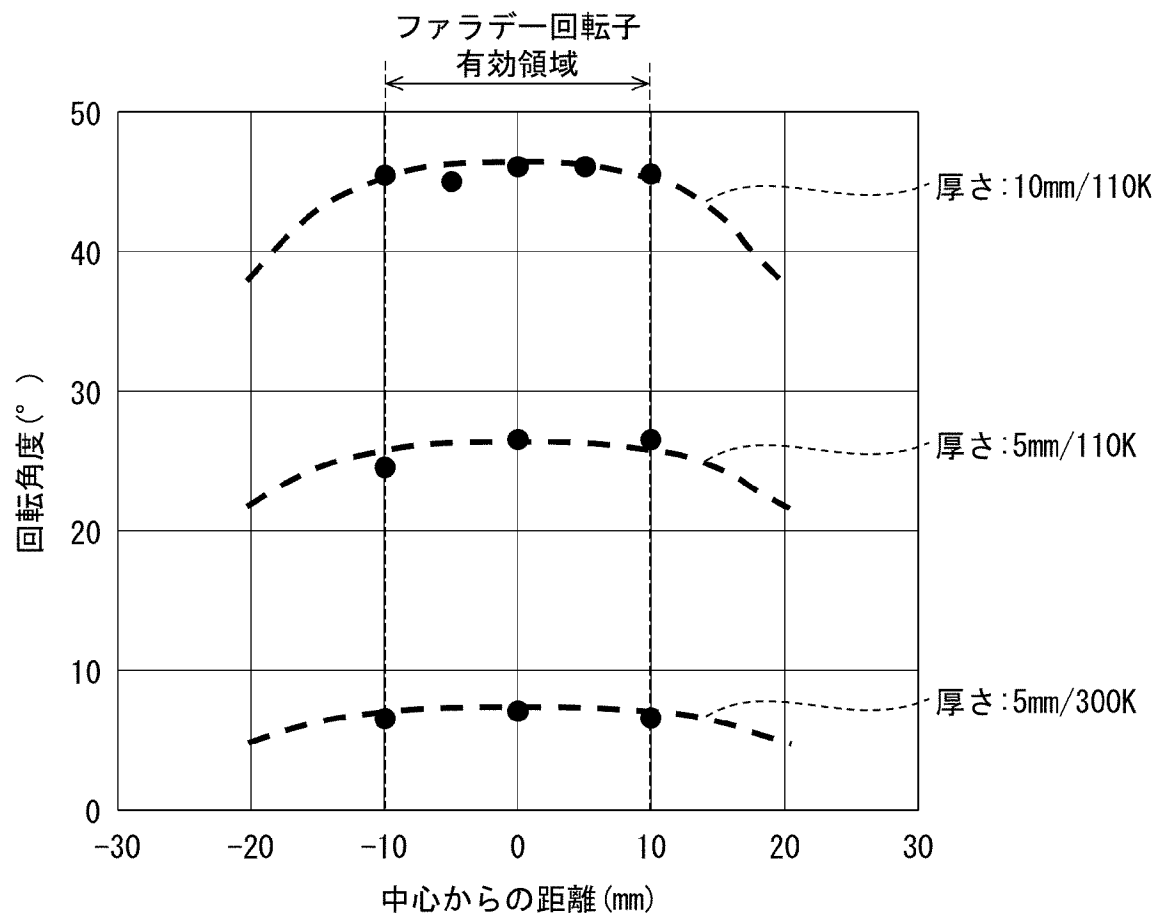
[図4]

図 4



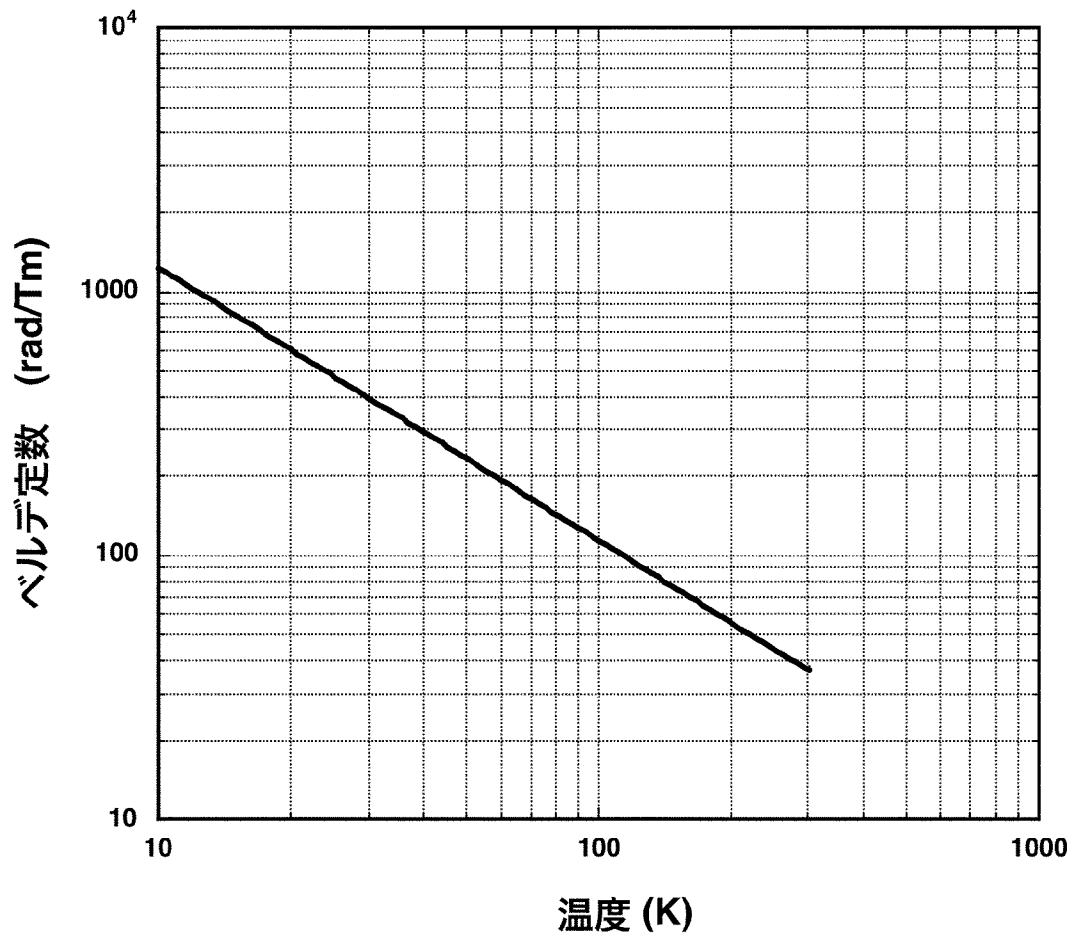
[図5]

図 5



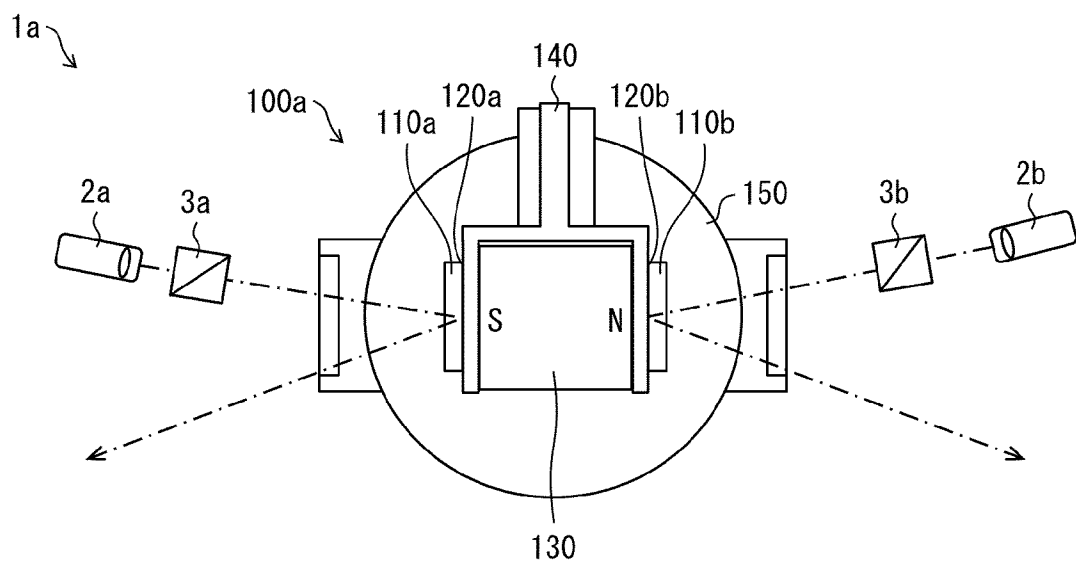
[図6]

図 6



[図7]

図 7



[図8]

図 8

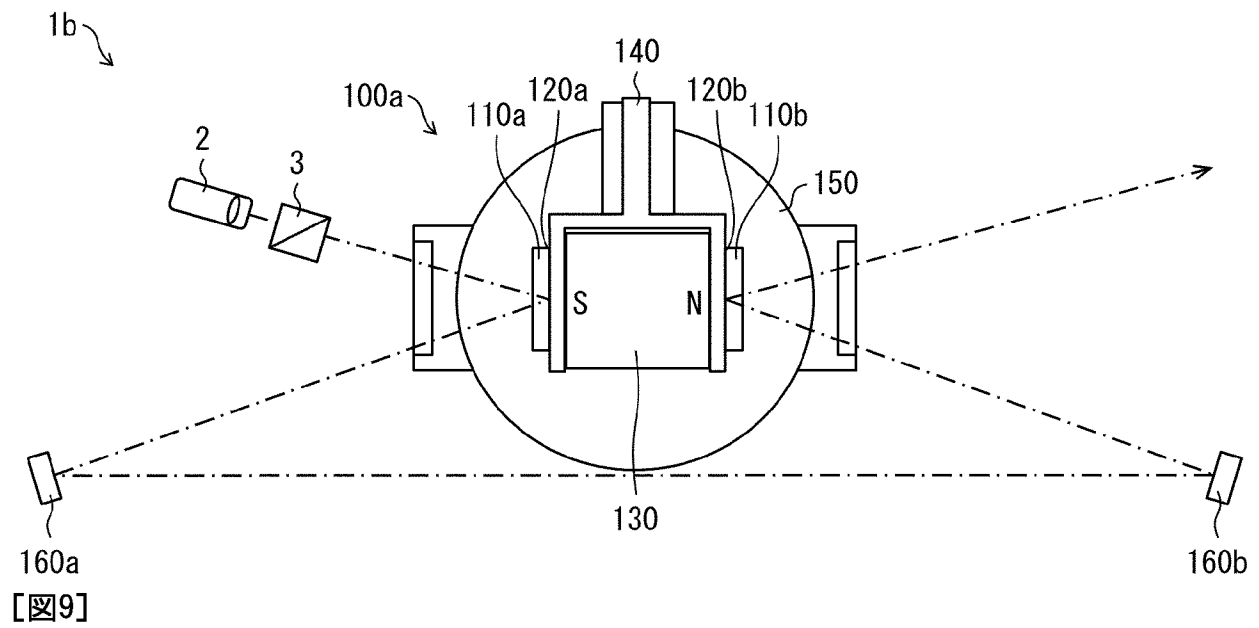
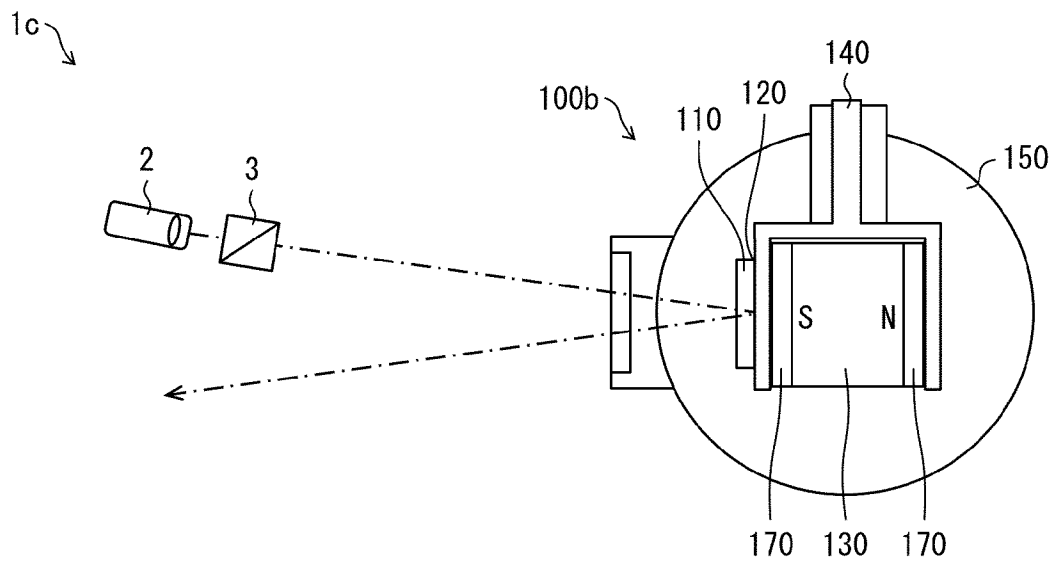
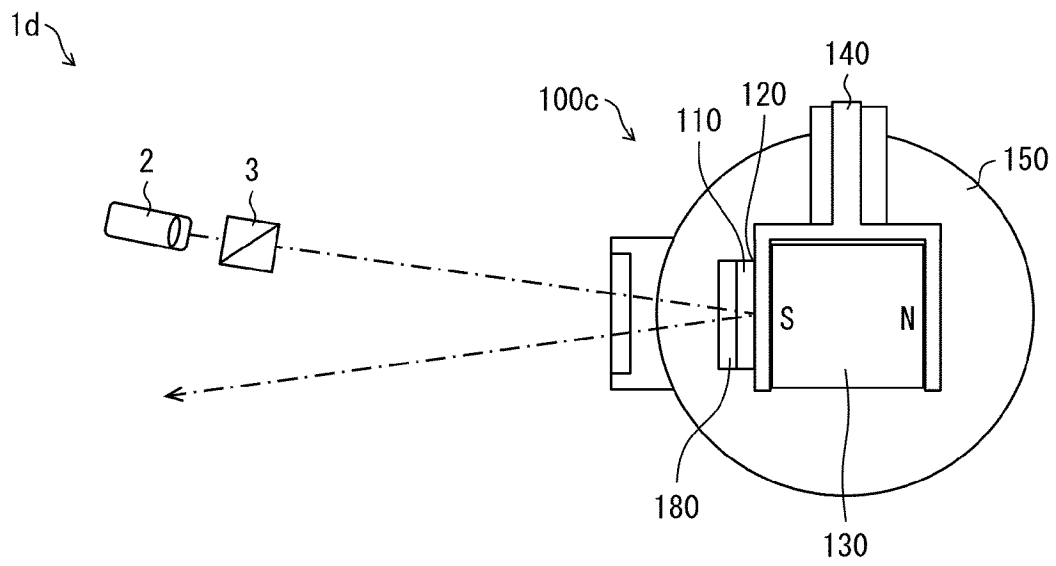


図 9



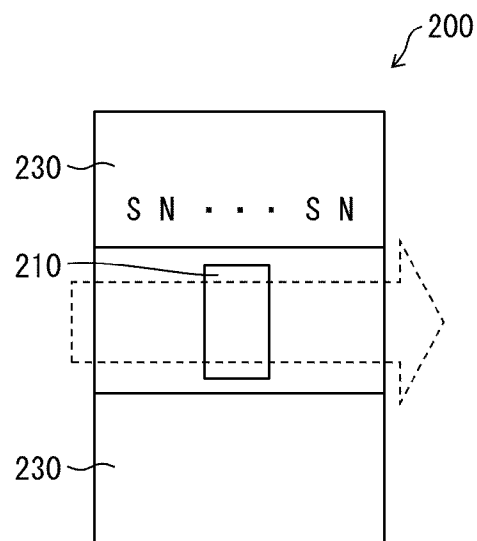
[図10]

図 10



[図11]

図 11



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/020916

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**G02B 27/28**(2006.01)i; **G02F 1/09**(2006.01)i

FI: G02B27/28 A; G02F1/09 505

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B27/28; G02F1/09

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2023
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2023
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2023

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	DE 102010028213 A1 (JT OPTICAL ENGINE GMBH) 27 October 2011 (2011-10-27)	1-9
A	paragraphs [0049], [0051], [0075], fig. 1	10-11
Y	JP 2014-517504 A (ECOLE POLYTECHNIQUE) 17 July 2014 (2014-07-17)	1-9
	paragraphs [0004], [0057], [0110], [0130], [0133], [0136]-[0137], [0241]-[0242], fig. 2	
Y	US 5115340 A (TIDWELL, Steve C.) 19 May 1992 (1992-05-19)	1-9
A	paragraph [0041], fig. 7-8	10-11



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date
 “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 “&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

26 June 2023

Date of mailing of the international search report

15 August 2023

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)
 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915
 Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2023/020916

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
DE	102010028213	A1	27 October 2011	(Family: none)	
JP	2014-517504	A	17 July 2014	US 2014/0036946 A1 paragraphs [0004], [0074], [0174], [0209], [0212], [0215]- [0216], [0330]-[0331], fig. 2	
				WO 2012/172213 A1	
				EP 2700131 A1	
				FR 2974251 A1	
				CN 103636082 A	
US	5115340	A	19 May 1992	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G02B 27/28(2006.01)i; G02F 1/09(2006.01)i FI: G02B27/28 A; G02F1/09 505										
B. 調査を行った分野										
調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） G02B27/28; G02F1/09										
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922 - 1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971 - 2023年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2023年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2023年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2023年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2023年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2023年
日本国実用新案公報	1922 - 1996年									
日本国公開実用新案公報	1971 - 2023年									
日本国実用新案登録公報	1996 - 2023年									
日本国登録実用新案公報	1994 - 2023年									
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）										
C. 関連すると認められる文献										
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号								
Y	DE 102010028213 A1 (JT OPTICAL ENGINE GMBH) 27.10.2011 (2011 - 10 - 27) [0049]、[0051]、[0075]、図1	1-9								
A		10-11								
Y	JP 2014-517504 A (エコー ル ポリテクニク) 17.07.2014 (2014 - 07 - 17) [0004]、[0057]、[0110]、[0130]、[0133]、 [0136] - [0137]、[0241] - [0242]、図2	1-9								
Y	US 5115340 A (TIDWELL, Steve C.) 19.05.1992 (1992 - 05 - 19) [0041]、図7-8	1-9								
A		10-11								
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。										
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技术水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 </td> <td> “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献 </td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技术水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献						
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技术水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献									
国際調査を完了した日 26.06.2023	国際調査報告の発送日 15.08.2023									
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 井 亀 諭 2L 3613 電話番号 03-3581-1101 内線 3295									

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2023/020916

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
DE	102010028213	A1	27.10.2011	(ファミリーなし)	
JP	2014-517504	A	17.07.2014	US 2014/0036946 A1 [0004], [0074], [0174], [0209], [0212], [0215]- [0216], [0330]-[0331], figure 2 WO 2012/172213 A1 EP 2700131 A1 FR 2974251 A1 CN 103636082 A	
US	5115340	A	19.05.1992	(ファミリーなし)	