

(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
2019年12月19日(19.12.2019)



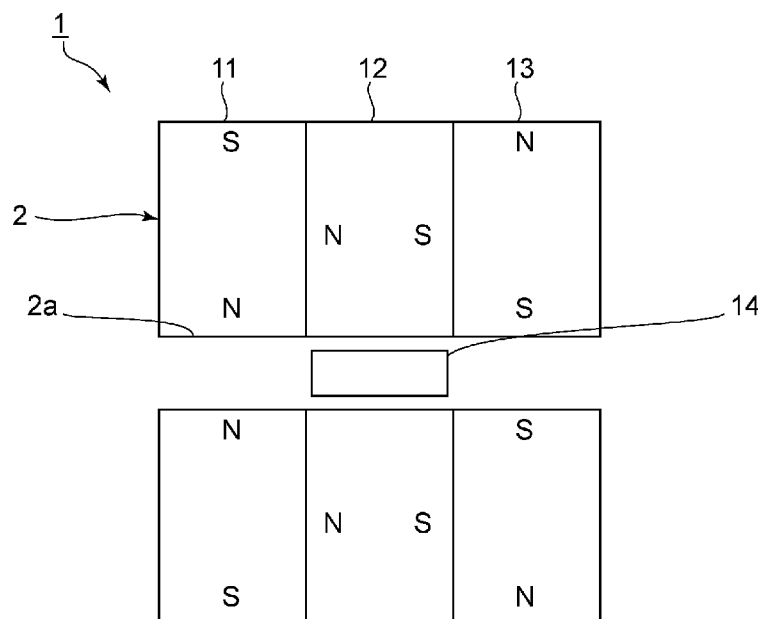
(10) 国際公開番号

WO 2019/239696 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/JP2019/015274
- (22) 国際出願日: 2019年4月8日(08.04.2019)
- (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 2018-113445 2018年6月14日(14.06.2018) JP
- (71) 出願人: 日本電気硝子株式会社(NIPPON ELECTRIC GLASS CO., LTD.) [JP/JP]; 〒5208639 滋賀県大津市晴嵐二丁目7番1号 Shiga (JP).
- (72) 発明者: 鈴木 太志(SUZUKI, Futoshi); 〒5208639 滋賀県大津市晴嵐二丁目7番1号 日本電気硝子株式会社内 Shiga (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人 宮▲崎▼・目次特許事務所(MIYAZAKI & METSUGI); 〒5400028 大阪府大阪市中央区常盤町1丁目3番8号 中央大通F N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, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,

(54) Title: FARADAY ROTATOR AND MAGNETO-OPTICAL ELEMENT

(54) 発明の名称: ファラデー回転子及び磁気光学素子



(57) Abstract: Provided are a Faraday rotator and magneto-optical element, with which an angle of rotation of 45 ° is stably obtained and which are furthermore small in size. The present invention is characterised by comprising: a magnetic circuit (2) that has first to third magnetic bodies (11-13) that are each provided with a through-hole through which light passes; and a Faraday element (14) that is positioned in the through-hole (2a) and is composed of a light-transmitting paramagnetic body, wherein: when the direction in which light passes through the through-hole (2a) is set to the optical axis direction, the first magnetic body (11) is magnetised in the direction perpendicular to the optical axis direction and

MA, MD, ME, MG, MK, MN, 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,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, 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, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, 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)）

such that the through-hole side becomes the N pole, the second magnetic body (12) is magnetised in the direction parallel to the optical axis direction and such that the first magnetic body (11) side becomes the N pole, and the third magnetic body (13) is magnetised in the direction perpendicular to the optical axis direction and such that the through-hole side becomes the S pole; the length of the second magnetic body (12) in the optical axis direction is 0.5 or more times the length of the Faraday element (14) in the optical axis direction; and the first and third magnetic bodies (11, 13) are shorter than the second magnetic body (12) in the optical axis direction.

(57) 要約：安定して 45° の回転角が得られ、さらに小型なファラデー回転子及び磁気光学素子を提供する。光が通過する貫通孔がそれぞれ設けられた第1～第3の磁石体（11～13）を有する磁気回路（2）と、貫通孔（2a）内に配置され、かつ光が透過する常磁性体からなるファラデー素子（14）とを備え、光が貫通孔（2a）を通過する方向を光軸方向としたときに、第1の磁石体（11）は光軸方向に垂直な方向に、かつ貫通孔側がN極となるように着磁されており、第2の磁石体（12）は光軸方向に平行な方向に、かつ第1の磁石体（11）側がN極となるように着磁されており、第3の磁石体（13）は光軸方向に垂直な方向に、かつ貫通孔側がS極となるように着磁されており、第2の磁石体（12）の光軸方向に沿う長さがファラデー素子（14）の光軸方向に沿う長さの0.5倍以上であり、第1、第3の磁石体（11、13）が第2の磁石体（12）の光軸方向より短いことを特徴とする。

明 細 書

発明の名称： ファラデー回転子及び磁気光学素子

技術分野

[0001] 本発明は、ファラデー回転子及び磁気光学素子に関する。

背景技術

[0002] 光アイソレータは、光を一方向だけに伝搬し、反射して戻る光を阻止する磁気光学素子である。光アイソレータは、光通信システムやレーザー加工システム等に用いられるレーザー発振器に使用される。

[0003] 従来、光通信システムで使用される波長域は主に1300nm～1700nmであり、光アイソレータにおけるファラデー回転子のファラデー素子には、希土類鉄ガーネットが用いられていた。

[0004] 一方で、レーザー加工等に用いられる波長は光通信帯域よりも短波長であり、主に1000nm付近である。この波長域においては、上記希土類鉄ガーネットは光吸収が大きいため、使用することができない。そのため、一般的には常磁性体結晶からなるファラデー素子が使われており、特にテルビウム・ガリウム・ガーネット（TGG）が広く知られている。

[0005] 光アイソレータとして用いるためには、ファラデー回転による回転角（ θ ）が45°である必要がある。このファラデー回転角は、ファラデー素子の長さ（L）、ベルデ定数（V）、光軸と平行な磁束密度（H）と下記の式（1）の関係にある。

[0006] $\theta = V \cdot H \cdot L$ 式（1）

[0007] このうち、ベルデ定数は材料に依存する特性である。そのため、ファラデー回転角を調整するためには、ファラデー素子の長さや、ファラデー素子に加わる光軸と平行な磁束密度を変化させる必要がある。特に、近年はデバイスの小型化が求められていることから、ファラデー素子や磁石の大きさを調整するのではなく、磁石の構造を変えることで、ファラデー回転子に加わる磁束密度の向上が図られている。

[0008] 例えば、下記の特許文献1には、第1～第3の磁石により構成された磁気回路と、ファラデー素子とを備えるファラデー回転子が開示されている。第1の磁石は、光軸と垂直の方向であり、かつ光軸に向かう方向に磁化されている。第2の磁石は、光軸と垂直の方向であり、かつ光軸から離れる方向に磁化されている。これらの間に第3の磁石が配置されている。第3の磁石は、光軸と平行な方向であり、かつ第2の磁石から第1の磁石に向かう方向に磁化されている。この磁気回路では、第1の磁石と第2の磁石の光軸方向に沿う長さを L_2 、第3の光軸方向に沿う長さを L_3 としたとき、 $L_2/10 \leq L_3 \leq L_2$ の関係が成立するように構成されている。

先行技術文献

特許文献

[0009] 特許文献1：特開2009-229802号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] 特許文献1に記載の構成で磁気回路を形成すると、第1の磁石と第3の磁石の接着部、第2の磁石と第3の磁石の接着部付近で最も磁束密度の大きい領域が形成される。さらに、その両領域を繋ぐ第3の磁石と同等の長さの内部空間に、磁束密度が大きく、かつ、安定した領域が形成される。

[0011] ところで、特許文献1では、上記領域を超える大きさのファラデー素子が用いられている。これは、TGGのような常磁性体結晶はベルデ定数が小さいため、所望のファラデー回転角を得るためには、ファラデー素子の長さも重要となるためである。ところが、上記のように安定した磁束密度を示す領域より大きな素子を用いると、ファラデー回転子の作製時にファラデー素子の位置がずれた場合、ファラデー素子に加わる磁束密度に偏りが生じ得る。その結果、ファラデー回転角のばらつきが顕著になり、所望のファラデー回転角を安定して得ることが難しくなるという問題があった。

[0012] 本発明は上記課題に鑑みてなされたものであり、安定して 45° のファラ

デー回転角が得られるファラデー回転子及び磁気光学素子を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0013] 本発明のファラデー回転子は、光が通過する貫通孔がそれぞれ設けられた第1～第3の磁石体を有する磁気回路と、貫通孔内に配置されており、かつ光が透過する常磁性体からなるファラデー素子とを備え、磁気回路は、第1～第3の磁石体が前後方向に同軸上にこの順序で配置されてなり、光が磁気回路の貫通孔を通過する方向を光軸方向としたときに、第1の磁石体は、光軸方向に垂直な方向に、かつ貫通孔側がN極となるように着磁されており、第2の磁石体は光軸方向に平行な方向に、かつ第1の磁石体側がN極となるように着磁されており、第3の磁石体は、光軸方向に垂直な方向に、かつ貫通孔側がS極となるように着磁されており、第2の磁石体の光軸方向に沿う長さが、ファラデー素子の光軸方向に沿う長さの0.5倍以上であり、第1の磁石体及び第3の磁石体の光軸方向に沿う長さが、第2の磁石体の光軸方向に沿う長さより短いことを特徴とする。上記のような構成によれば、第1の磁石体と第2の磁石体の接着部、第2の磁石体と第3の磁石体の接着部付近で最も磁束密度の大きい領域が形成される。そして、第1の磁石体と第3の磁石体の光軸方向に沿う長さを第2の磁石体の光軸方向に沿う長さよりも短くすることで、第2の磁石体が相対的に長くなる。よって、磁束密度が大きく、かつ、安定した領域が増加する。そのため、組み立て時にファラデー素子の位置がずれにくくなり、ファラデー回転角の変動を抑制することができる。

[0014] 本発明のファラデー回転子では、常磁性体がガラス材であることが好ましい。

[0015] 本発明のファラデー回転子では、ガラス材が、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tmから選択される少なくとも1種の希土類元素を含有することが好ましい。特にTbを含有することが好ましい。

- [0016] 本発明のファラデー回転子では、ガラス材が、モル％の酸化物換算で Tb_2O_3 を40％より多く含有し、全 Tb に対する Tb^{3+} の割合が、モル％で55％以上であることが好ましい。このようなガラス材は、ベルデ定数が $0.2 \text{ min/Oe} \cdot \text{cm}$ 以上であり、従来のTGGのベルデ定数($0.13 \text{ min/Oe} \cdot \text{cm}$)よりも大きいことから、より小型のファラデー素子を作製しやすくなる。
- [0017] 本発明のファラデー回転子は、磁気回路における貫通孔の断面積が、 100 mm^2 以下であることが好ましい。貫通孔の断面積を 100 mm^2 以下にすることで、磁束密度が大きくなりやすいため、小型化しやすくなる。
- [0018] 本発明の磁気光学素子は、上記ファラデー回転子と、ファラデー回転子の磁気回路の光軸方向における一方端に配置されている第1の光学部品及び他方端に配置されている第2の光学部品とを備え、磁気回路の貫通孔を通過する光が、第1の光学部品及び第2の光学部品を通過することを特徴とする。
- [0019] 本発明の磁気光学素子では、第1の光学部品及び第2の光学部品が偏光子であってもよい。

発明の効果

- [0020] 本発明によれば、安定して 45° のファラデー回転角が得られるファラデー回転子及び磁気光学素子を提供することができる。

図面の簡単な説明

- [0021] [図1]図1は、本発明のファラデー回転子の構造の一例を示す模式的断面図である。
- [図2]図2は、本発明における第1の磁石体の構造の一例を示す図である。
- [図3]図3は、本発明における第2の磁石体の構造の一例を示す図である。
- [図4]図4は、本発明における第3の磁石体の構造の一例を示す図である。
- [図5]図5は、本発明の磁気光学素子の構造の一例を示す模式的断面図である。

発明を実施するための形態

- [0022] 以下、本発明の好ましい実施形態について説明する。但し、以下の実施形

態は単なる例示であり、本発明は以下の実施形態に限定されるものではない。また、各図面において、実質的に同一の機能を有する部材は同一の符号で参照する場合がある。

[0023] (ファラデー回転子)

図1は、本発明のファラデー回転子の構造の一例を示す模式的断面図である。なお、図1中のN及びSの文字は磁極を示す。後述する他の図面においても同様である。

[0024] ファラデー回転子1は、光アイソレータや光サーキュレータ等の磁気光学素子に用いられる装置である。ファラデー回転子1は、光が通過する貫通孔2aが設けられた磁気回路2と、上記貫通孔2a内に配置されたファラデー素子14とを備える。ファラデー素子14は、光を透過する常磁性体からなる。

[0025] 磁気回路2は、それぞれ貫通孔が設けられた第1の磁石体11、第2の磁石体12及び第3の磁石体13を有する。磁気回路2は、第1の磁石体11、第2の磁石体12及び第3の磁石体13が前後方向に同軸上にこの順序で配置されてなる。なお、同軸上に配置されるとは、光軸方向から見て、各磁石体の中央付近が重なるように配置されることをいう。本実施形態では、第1の磁石体11、第2の磁石体12及び第3の磁石体13の貫通孔が連結されることにより、磁気回路2の貫通孔2aが構成されている。

[0026] 磁気回路2において、第1の磁石体11と第3の磁石体13は光軸方向と垂直な方向に磁化され、互いに着磁方向が対向している。具体的には、第1の磁石体11は、光軸方向と垂直な方向に、かつ貫通孔側がN極となるように着磁されている。第3の磁石体13は、光軸方向と垂直な方向に、かつ貫通孔側がS極となるように着磁されている。第2の磁石体12は光軸方向に平行な方向に、かつ第1の磁石体11側がN極となるように着磁されている。

[0027] ファラデー回転子1には、光を第1の磁石体11側から入射させてもよく、第3の磁石体13側から入射させてもよい。

[0028] 本発明のファラデー回転子 1 は、以下の構成を有することを特徴としている。1) 上記第 2 の磁石体 1 2 の光軸方向に沿う長さが、配置されるファラデー素子 1 4 の長さに対して 0.5 倍以上であること。2) 第 1 の磁石体 1 1 及び第 3 の磁石体 1 3 の光軸方向に沿う長さが第 2 の磁石体 1 2 の光軸方向に沿う長さよりも短いこと。なお、以下においては、光軸方向に沿う長さを単に長さとして記載することがある。

[0029] 第 2 の磁石体 1 2 の長さは、ファラデー素子 1 4 の長さに対して 0.5 倍以上であり、0.55 倍以上であることが好ましく、0.6 倍以上、0.7 倍以上、特に 0.8 倍以上であることが好ましい。図 1 のような磁気回路 2 を形成すると、第 2 の磁石体 1 2 の中空部分に磁束密度が大きく、かつ安定した領域が広く形成される。そのため、第 2 の磁石体 1 2 の長さをファラデー素子 1 4 の長さに対して一定以上、特に同等程度にすることで、ファラデー素子 1 4 を磁束密度の大きな領域に配置することができる。よって、組み立て時にファラデー素子 1 4 の位置がずれてもファラデー回転角の変動を抑制することができる。さらに、ファラデー素子 1 4 全体に効率良く磁場が印加されるため、短いファラデー素子 1 4、もしくは小さな磁気回路 2 を用いても大きなファラデー回転角を得ることができる。また、第 2 の磁石体 1 2 の長さを、ファラデー素子 1 4 の長さに対して一定以下にすれば、磁気回路 2 を小型化することができる。具体的には、1.5 倍以下であることが好ましく、1.3 倍以下、特に 1.2 倍以下であることが好ましい。なお、以下、ファラデー回転角を回転角として記載することがある。

[0030] さらに、ファラデー回転子 1 においては、第 1 の磁石体 1 1 及び第 3 の磁石体 1 3 が第 2 の磁石体 1 2 よりも短い。それによって、磁気回路 2 全体を短くすることができる。従って、ファラデー回転子 1 及びそれを用いた磁気光学素子のさらなる小型化が可能となる。

[0031] 磁気回路 2 の貫通孔 2 a の断面積は 100 mm^2 以下であることが好ましい。貫通孔 2 a の断面積が大きくなりすぎると十分な磁束密度が得られず、小さすぎるとファラデー素子 1 4 を貫通孔 2 a 内に配置しにくくなる。貫通孔

2 a の断面積は、好ましくは $3 \text{ mm}^2 \sim 80 \text{ mm}^2$ 、 $4 \text{ mm}^2 \sim 70 \text{ mm}^2$ 、 $5 \text{ mm}^2 \sim 60 \text{ mm}^2$ 、特に好ましくは $7 \text{ mm}^2 \sim 50 \text{ mm}^2$ である。

[0032] 磁気回路 2 の貫通孔 2 a の断面形状は特に限定されず、矩形や円形であってもよい。組み立てを容易にする点では矩形が好ましく、均一な磁界を付与する点では円形が好ましい。ファラデー素子 1 4 の断面形状と磁気回路 2 の貫通孔 2 a の断面形状は必ずしも一致させなくともよいが、均一な磁界を与えるという観点では、一致させることが好ましい。

[0033] 図 2 は、第 1 の磁石体の構造の一例を示す図である。図 3 は、第 2 の磁石体の構造の一例を示す図である。図 4 は、第 3 の磁石体の構造の一例を示す図である。

[0034] 図 2 に示す第 1 の磁石体 1 1 は、4 個の磁石片を組み合わせて構成されている。なお、第 1 の磁石体 1 1 を構成する磁石片の個数は上記に限定されない。例えば、第 1 の磁石体 1 1 は 6 個もしくは 8 個等の磁石片を組み合わせて構成されていてもよい。複数の磁石片を組み合わせて第 1 の磁石体 1 1 を構成することにより、磁場を効果的に大きくすることができる。もっとも、第 1 の磁石体 1 1 は、単体磁石からなってもよい。

[0035] 図 3 に示す第 2 の磁石体 1 2 は、1 個の単体磁石からなる。なお、第 2 の磁石体 1 2 は、2 個以上の磁石片を組み合わせて構成されていてもよい。

[0036] 図 4 に示す第 3 の磁石体 1 3 は、第 1 の磁石体 1 1 と同様に、4 個の磁石片を組み合わせて構成されている。なお、第 3 の磁石体 1 3 は、6 個もしくは 8 個等の磁石片を組み合わせて構成されていてもよく、単体磁石からなってもよい。

[0037] 本発明の第 1 の磁石体 1 1、第 2 の磁石体 1 2 及び第 3 の磁石体 1 3 は永久磁石によって構成される。上記永久磁石としては、特に希土類磁石が好ましく、その中でもサマリウム-コバルト ($\text{Sm}-\text{Co}$) を主成分とする磁石や、ネオジム-鉄-ホウ素 ($\text{Nd}-\text{Fe}-\text{B}$) を主成分とする磁石が好ましい。

[0038] 本発明のファラデー素子 1 4 には、常磁性体を用いることができる。中で

もガラス材を用いることが好ましい。ガラス材からなるファラデー素子は、単結晶材料のような欠陥等によるベルデ定数の変動や消光比の低下が少なく、接着剤からの応力の影響も少ないため、安定したベルデ定数と高い消光比を保つことができる。なお、ファラデー素子14には、ガラス材以外の常磁性体を用いることもできる。

[0039] 本発明のファラデー素子14に用いられるガラス材は、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tmから選択される少なくとも1種の希土類元素を含有することが好ましい。特にTbを含有することが好ましい。

[0040] 本発明のファラデー素子14に用いられるガラス材は、モル%の酸化物換算で、 Tb_2O_3 を40%より多く含有することが好ましく、45%以上、48%以上、49%以上、特に50%以上であることが好ましい。このように Tb_2O_3 の含有量を多くすることにより、良好なファラデー効果が得られやすくなる。なお、ガラス中においてTbは3価や4価の状態で存在するが、本明細書ではこれら全てを Tb_2O_3 として表す。

[0041] 本発明のガラス材において、全Tbに対する Tb^{3+} の割合は、モル%で55%以上であることが好ましく、60%以上、70%以上、80%以上、90%以上、特に95%以上であることが好ましい。全Tbに対する Tb^{3+} の割合が少なすぎると、波長300nm～1100nmにおける光透過率が低下しやすくなる。

[0042] さらに、本発明のファラデー素子14には下記の成分を含有させることができる。なお、以下の各成分の含有量の説明において、特に断りのない限り「%」は「モル%」を意味する。

[0043] SiO_2 はガラス骨格となり、ガラス化範囲を広げる成分である。ただし、ベルデ定数の向上に寄与しないため、その含有量が多すぎると十分なファラデー効果が得られにくくなる。従って、 SiO_2 の含有量は0%～50%、特に1%～35%であることが好ましい。

[0044] B_2O_3 はガラス骨格となり、ガラス化範囲を広げる成分である。ただし、

B_2O_3 はベルデ定数の向上に寄与しないため、その含有量が多すぎると十分なファラデー効果が得られにくくなる。従って、 B_2O_3 の含有量は0%～50%、特に1%～40%であることが好ましい。

[0045] P_2O_5 はガラス骨格となり、ガラス化範囲を広げる成分である。ただし、 P_2O_5 はベルデ定数の向上に寄与しないため、その含有量が多すぎると十分なファラデー効果が得られにくくなる。従って、 P_2O_5 の含有量は0%～50%、特に1%～40%であることが好ましい。

[0046] Al_2O_3 はガラス形成能を高める成分である。ただし、 Al_2O_3 はベルデ定数の向上に寄与しないため、その含有量が多すぎると十分なファラデー効果が得られにくくなる。従って、 Al_2O_3 の含有量は0%～50%、特に0%～30%であることが好ましい。

[0047] La_2O_3 、 Gd_2O_3 、 Y_2O_3 にはガラス化を安定にする効果がある。ただし、その含有量が多すぎると、かえってガラス化しにくくなる。よって、 La_2O_3 、 Gd_2O_3 、 Y_2O_3 の含有量は各々10%以下、特に5%以下であることが好ましい。

[0048] Dy_2O_3 、 Eu_2O_3 、 Ce_2O_3 はガラス化を安定にするとともに、ベルデ定数の向上にも寄与する。ただし、その含有量が多すぎると、かえってガラス化しにくくなる。よって、 Dy_2O_3 、 Eu_2O_3 、 Ce_2O_3 の含有量は各々15%以下、特に10%以下であることが好ましい。なお、ガラス中に存在するDy、Eu、Ceは3価や4価の状態で存在するが、本明細書ではこれら全てをそれぞれ Dy_2O_3 、 Eu_2O_3 、 Ce_2O_3 として表す。

[0049] MgO 、 CaO 、 SrO 、 BaO にはガラス化を安定にする効果、また化学的耐久性を高める効果がある。ただし、ベルデ定数の向上に寄与しないため、その含有量が多すぎると十分なファラデー効果が得られにくくなる。従って、これらの成分の含有量は各々0%～10%、特に0%～5%であることが好ましい。

[0050] GeO_2 はガラス形成能を高める成分である。ただし、 GeO_2 はベルデ定数の向上に寄与しないため、その含有量が多すぎると十分なファラデー効果

が得られにくくなる。従って、 GeO_2 の含有量は0%～15%、0%～10%、特に0%～9%であることが好ましい。

[0051] Ga_2O_3 はガラス形成能を高め、ガラス化範囲を広げる効果を有する。ただし、その含有量が多すぎると失透しやすくなる。また、 Ga_2O_3 はベルデ定数の向上に寄与しないため、その含有量が多すぎると十分なファラデー効果が得られにくくなる。従って、 Ga_2O_3 の含有量は0%～6%、特に0%～5%であることが好ましい。

[0052] フッ素はガラス形成能を高め、ガラス化範囲を広げる効果を有する。ただし、その含有量が多すぎると熔融中に揮発して組成変動を引き起こし、ガラス化に悪影響を及ぼすおそれがある。また、脈理を増加させやすい。従って、フッ素の含有量 (F_2 換算) は0%～10%、0%～7%、特に0%～5%であることが好ましい。

[0053] 還元剤として Sb_2O_3 を添加することができる。ただし、着色を避けるため、あるいは環境への負荷を考慮して、その含有量は0.1%以下であることが好ましい。

[0054] 本発明のファラデー素子14は、波長300nm～1100nmの範囲で良好な光透過性を示す。具体的には、波長1064nmにおける光路長1mmでの透過率は60%以上、70%以上、特に80%以上であることが好ましい。また、波長633nmにおける光路長1mmでの透過率は30%以上、50%以上、70%以上、特に80%以上であることが好ましい。さらに、波長533nmにおける光路長1mmでの透過率は30%以上、50%以上、70%以上、特に80%以上であることが好ましい。

[0055] 本発明のファラデー素子14の断面形状は特に限定されないが、均一なファラデー効果を有するために、円状であることが好ましい。ファラデー素子14の直径は、10mm以下であることが好ましく、8mm以下、5mm以下、特に3.5mm以下であることが好ましい。ファラデー素子14の直径が大きすぎると、ファラデー素子14を磁気回路2の貫通孔2a内に配置できなくなる。あるいは、磁気回路2を大きくする必要があり、ファラデー回

転子 1 の小型化が難しくなる。ファラデー素子 1 4 の直径の下限は特に限定されないが、現実的には 0.5 mm 以上である。

[0056] 本発明のファラデー素子 1 4 の長さは 2 mm～25 mm、3 mm～20 mm、4 mm～15 mm、5 mm～14 mm、5.5 mm～12 mm、特に 6 mm～11 mm であることが好ましい。ファラデー素子 1 4 が短すぎると、 45° の回転角を得るために磁場を大きくする、つまり、磁気回路 2 を大きくする必要があるため、ファラデー回転子 1 を小型化しにくくなる。一方、ファラデー素子 1 4 が長すぎると、第 2 の磁石体 1 2 を長くする必要があるため、ファラデー回転子 1 を小型化しにくくなる。

[0057] 本発明のファラデー回転子 1 は波長 350 nm～1300 nm で用いられることが好ましく、450 nm～1200 nm、500 nm～1200 nm、800 nm～1100 nm、900 nm～1100 nm の範囲で用いられることが特に好ましい。

[0058] (磁気光学素子)

図 5 は、本発明の磁気光学素子の構造の一例を示す模式的断面図である。

[0059] 図 5 に示す磁気光学素子 2 0 は光アイソレータである。光アイソレータは、レーザー光の反射戻り光を遮断する装置である。磁気光学素子 2 0 は、図 1 に示したファラデー回転子 1 と、磁気回路 2 の光軸方向における一方端に配置されている第 1 の光学部品 2 5 及び他方端に配置されている第 2 の光学部品 2 6 とを備える。第 1 の光学部品 2 5 及び第 2 の光学部品 2 6 は、本実施形態では偏光子である。第 2 の光学部品 2 6 の光透過軸は、第 1 の光学部品 2 5 の光透過軸に対して 45° 傾けられている。

[0060] 磁気光学素子 2 0 に入射する光は、第 1 の光学部品 2 5 を通過し、直線偏光となって、ファラデー素子 1 4 に入射する。入射した光はファラデー素子 1 4 により 45° 回転し、第 2 の光学部品 2 6 を通過する。第 2 の光学部品 2 6 を通過した光の一部が反射戻り光となり、偏光面が 45° の角度で第 2 の光学部品 2 6 を通過する。第 2 の光学部品 2 6 を通過した反射戻り光は、ファラデー素子 1 4 により、さらに 45° 回転される。これにより、反射戻

り光の偏光面は、第1の光学部品25の光透過軸に対して90°の直交偏光面となる。そのため、反射戻り光は第1の光学部品25を透過できず、遮断される。

[0061] 本発明の磁気光学素子20は、図1に示した本発明のファラデー回転子1を有するため、安定して45°のファラデー回転角が得られ、かつ小型にすることができる。

[0062] 図5に示す磁気光学素子20は光アイソレータであるが、磁気光学素子20は、光サーキュレータであってもよい。この場合には、第1の光学部品25及び第2の光学部品26は、波長板やビームスプリッタであればよい。なお、磁気光学素子20は、光アイソレータ及び光サーキュレータ以外の磁気光学素子であってもよい。

[0063] <実施例>

以下、本発明を実施例に基づいて説明するが、本発明はこれらの実施例に限定されるものではない。

[0064] 本実施例では、波長1064nmでのファラデー回転子を実施例として挙げるが、本発明は、この波長に限定されるものではない。

[0065] (実施例1)

実施例1のファラデー素子は次のようにして作製した。まず原料をプレス成型し、700℃～1400℃で6時間焼結することによりガラス原料塊を作製した。本実施例におけるガラス原料塊は、55Tb₂O₃－10Al₂O₃－35B₂O₃のガラス組成が得られるように作製した。

[0066] 次に、乳鉢を用いてガラス原料塊を粗粉碎し小片とした。得られたガラス原料塊の小片を用いて、無容器浮遊法によってガラス材を作製した。なお、熱源としては100W CO₂レーザー発振器を用いた。また、ガラス原料塊を浮遊させるためのガスとして窒素ガスを用い、流量1L／分～30L／分で供給した。

[0067] 得られたガラス材について、800℃で10時間、4％－H₂／N₂雰囲気中で熱処理を行った。

[0068] 全 Tb に対する Tb³⁺ の割合は、X 線光電子分光分析装置 (XPS) を用いて測定した。具体的には、得られたガラス材について、XPS を用いて測定された各 Tb イオンのピーク強度比から、全 Tb に対する Tb³⁺ の割合を算出した。その結果、Tb³⁺ の割合は 99% 以上であった。

[0069] 得られたガラス材について、ベルデ定数を測定した。ベルデ定数は回転検光子法を用いて測定した。具体的には、得られたガラス材を 1 mm の厚さとなるよう研磨加工し、10 kOe の磁場中で波長 1064 nm でのファラデー回転角を測定し、ベルデ定数を算出した。測定したベルデ定数は 0.204 min/Oe · cm ~ 0.212 min/Oe · cm であった。

[0070] 次に、得られたガラスを切削、研磨等により直径 Φ3 mm、長さ 12 mm の円柱状のファラデー素子を得た。消光比は 42 dB であった。なお、実施例及び比較例において、長さとはファラデー回転子における光軸方向に沿う長さをいう。

[0071] 第 1 ~ 第 3 の磁石体を構成する永久磁石には、Sm-Co 磁石を用いた。第 1 ~ 第 3 の磁石体の外径を Φ32 mm、貫通孔の直径を Φ4 mm とした。第 1 の磁石体の長さを 11.5 mm とし、第 2 の磁石体の長さを 12 mm とし、第 3 の磁石体の長さを 11.5 mm とした。

[0072] 上記において得られたファラデー素子を第 1 ~ 第 3 の磁石体と組み合わせ、ファラデー回転子とした。

[0073] (実施例 2)

第 1 の磁石体の長さを 8 mm とし、第 2 の磁石体の長さを 9 mm とし、第 3 の磁石体の長さを 8 mm とし、ファラデー素子の長さを 13.5 mm とした以外は、実施例 1 と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0074] (実施例 3)

第 1 の磁石体の長さを 12 mm とし、第 2 の磁石体の長さを 12.5 mm とし、第 3 の磁石体の長さを 12 mm とし、ファラデー素子の長さを 18 mm とした以外は、実施例 1 と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0075] (実施例 4)

第1～第3の磁石体を構成する永久磁石にNd-Fe-B磁石を用い、ファラデー素子の長さを10mmとした以外は、実施例1と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0076] (実施例5)

第1の磁石体の長さを13mmとし、第2の磁石体の長さを13.2mmとし、第3の磁石体の長さを13mmとし、ファラデー素子の長さを9.6mmとした以外は、実施例4と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0077] (実施例6)

第1の磁石体の長さを10mmとし、第2の磁石体の長さを10.5mmとし、第3の磁石体の長さを10mmとし、ファラデー素子の長さを7.9mmとした以外は、実施例4と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0078] (実施例7)

第1の磁石体の長さを13mmとし、第2の磁石体の長さを13.2mmとし、第3の磁石体の長さを13mmとし、ファラデー素子の長さを10mmとした以外は、実施例1と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0079] (実施例8)

第1の磁石体の長さを10mmとし、第2の磁石体の長さを10.1mmとし、第3の磁石体の長さを10mmとし、ファラデー素子の長さを10.2mmとした以外は、実施例1と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0080] (実施例9)

第1の磁石体の長さを10.2mmとし、第2の磁石体の長さを10.3mmとし、第3の磁石体の長さを10.2mmとし、ファラデー素子の長さを10.1mmとした以外は、実施例1と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0081] (実施例10)

第1の磁石体の長さを11mmとし、第2の磁石体の長さを12mmとし、第3の磁石体の長さを11mmとし、ファラデー素子の長さを15mmとした以外は、実施例1と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0082] (実施例 1 1)

第 1 の磁石体の長さを 1 1 m m とし、第 2 の磁石体の長さを 1 1 . 1 m m とし、第 3 の磁石体の長さを 1 1 m m とし、ファラデー素子の長さを 9 . 7 m m とした以外は、実施例 1 と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0083] (比較例 1)

ファラデー素子の長さを 2 5 m m とした以外は、実施例 1 と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0084] (比較例 2)

ファラデー素子にチョクラルスキー法によって作製した T G G 単結晶を用いた以外は、比較例 1 と同様にしてファラデー回転子を作製した。なお、ファラデー素子のベルデ定数を測定したところ、 $0.125 \text{ min/Oe} \cdot \text{cm}$ ~ $0.134 \text{ min/Oe} \cdot \text{cm}$ であった。

[0085] (比較例 3)

第 1 ~ 第 3 の磁石体を構成する永久磁石に N d - F e - B 磁石を用いた以外は、比較例 2 と同様にしてファラデー回転子を作製した。

[0086] 回転角のばらつきは、各ファラデー回転子を 1 0 個ずつ作製し、測定することにより求めた。回転角のばらつきを測定した結果を下記の表 1 に示す。なお、表 1 において、第 1 の磁石体の長さを a、第 2 の磁石体の長さを b、第 3 の磁石体の長さを c、ファラデー素子の長さを L、波長 1 0 6 4 n m のベルデ定数を V とする。

[0087]

[表1]

	第1～第3の磁石体				ファラデー回転素子		b/L	回転角のばらつき (°)
	磁石の種類	a (mm)	b (mm)	c (mm)	L (mm)	V (min/Oe・cm)		
実施例1	Sm-Co	11.5	12	11.5	12	0.204-0.212	1	±0.6
実施例2	Sm-Co	8	9	8	13.5	0.204-0.212	0.67	±0.8
実施例3	Sm-Co	12	12.5	12	18	0.204-0.212	0.69	±0.8
実施例4	Nd-Fe-B	11.5	12	11.5	10	0.204-0.212	1.2	±0.6
実施例5	Nd-Fe-B	13	13.2	13	9.6	0.204-0.212	1.38	±0.4
実施例6	Nd-Fe-B	10	10.5	10	7.9	0.204-0.212	1.33	±0.4
実施例7	Sm-Co	13	13.2	13	10	0.204-0.212	1.32	±0.4
実施例8	Sm-Co	10	10.1	10	10.2	0.204-0.212	0.99	±0.6
実施例9	Sm-Co	10.2	10.3	10.2	10.1	0.204-0.212	1.02	±0.6
実施例10	Sm-Co	11	12	11	15	0.204-0.212	0.8	±0.7
実施例11	Sm-Co	11	11.1	11	9.7	0.204-0.212	1.14	±0.5
比較例1	Sm-Co	11.5	12	11.5	25	0.204-0.212	0.48	±1.3
比較例2	Sm-Co	11.5	12	11.5	25	0.125-0.134	0.48	±1.8
比較例3	Nd-Fe-B	11.5	12	11.5	25	0.125-0.134	0.48	±1.9

[0088] 実施例1～実施例11において、回転角のばらつきが±0.8°以内となり、角度ばらつきの少ないファラデー回転子が得られた。

[0089] 比較例1では、回転角のばらつきは±1.3°であり、実施例1～実施例11よりも大きくばらついていた。

[0090] 比較例2の回転角のばらつきは±1.8°であり、比較例3の回転角のばらつきは±1.9°であった。このように、比較例2及び比較例3においては、回転角が大きくばらついていた。これは、ファラデー素子及び第1～第3の磁石体を組み合わせたときのファラデー素子の位置ずれと、TGG単結晶のベルデ定数のばらつきによるものである。

[0091] なお、比較例2及び比較例3は、実施例1及び実施例4と第1～第3の磁石体の大きさが同じであるが、ベルデ定数が小さいため、45°の回転角に達しなかった。一方、実施例1及び実施例4は、回転角は45°に達していた。

符号の説明

[0092] 1…ファラデー回転子

2…磁気回路

2a…貫通孔

- 1 1 …第 1 の磁石体
- 1 2 …第 2 の磁石体
- 1 3 …第 3 の磁石体
- 1 4 …ファラデー素子
- 2 0 …磁気光学素子
- 2 5 …第 1 の光学部品
- 2 6 …第 2 の光学部品

請求の範囲

- [請求項1] 光が通過する貫通孔がそれぞれ設けられた第1～第3の磁石体を有する磁気回路と、
- 前記貫通孔内に配置されており、かつ光が透過する常磁性体からなるファラデー素子とを備え、
- 前記磁気回路は、前記第1～第3の磁石体が前後方向に同軸上にこの順序で配置されてなり、
- 光が前記磁気回路の前記貫通孔を通過する方向を光軸方向としたときに、前記第1の磁石体は、前記光軸方向に垂直な方向に、かつ前記貫通孔側がN極となるように着磁されており、
- 前記第2の磁石体は前記光軸方向に平行な方向に、かつ前記第1の磁石体側がN極となるように着磁されており、
- 前記第3の磁石体は、前記光軸方向に垂直な方向に、かつ前記貫通孔側がS極となるように着磁されており、
- 前記第2の磁石体の前記光軸方向に沿う長さが、前記ファラデー素子の前記光軸方向に沿う長さの0.5倍以上であり、
- 前記第1の磁石体及び前記第3の磁石体の前記光軸方向に沿う長さが、前記第2の磁石体の前記光軸方向に沿う長さより短いことを特徴とする、ファラデー回転子。
- [請求項2] 前記常磁性体がガラス材であることを特徴とする、請求項1に記載のファラデー回転子。
- [請求項3] 前記ガラス材が、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tmから選択される少なくとも1種の希土類元素を含有することを特徴とする、請求項2に記載のファラデー回転子。
- [請求項4] 前記ガラス材が、Tbを含有することを特徴とする、請求項3に記載のファラデー回転子。
- [請求項5] 前記ガラス材が、モル%の酸化物換算で Tb_2O_3 を40%より多

く含有し、全 Tb に対する Tb³⁺の割合が、モル%で55%以上であることを特徴とする、請求項2に記載のファラデー回転子。

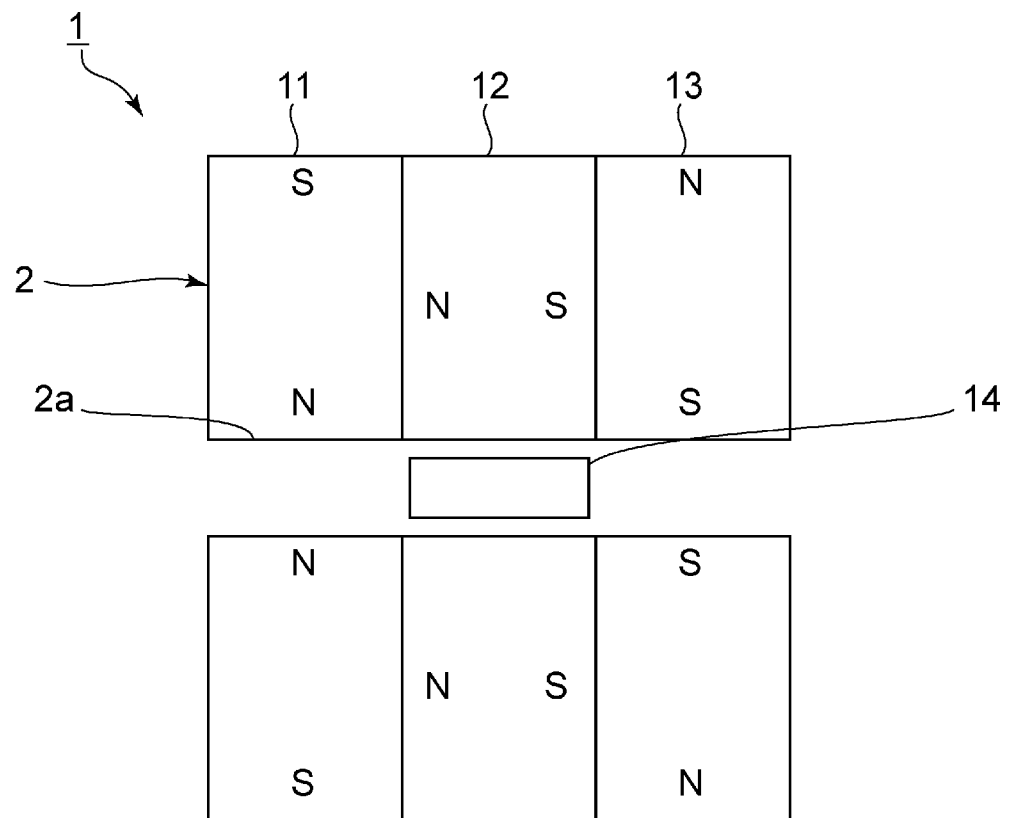
[請求項6] 前記磁気回路における前記貫通孔の断面積が、100mm²以下であることを特徴とする、請求項1～5のいずれか一項に記載のファラデー回転子。

[請求項7] 請求項1～6のいずれか一項に記載のファラデー回転子と、
前記ファラデー回転子の前記磁気回路の前記光軸方向における一方端に配置されている第1の光学部品及び他方端に配置されている第2の光学部品とを備え、

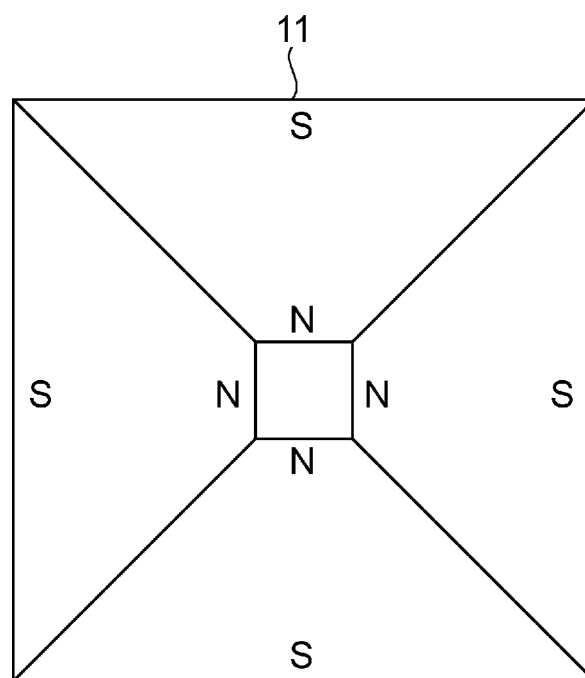
前記磁気回路の前記貫通孔を通過する光が、前記第1の光学部品及び前記第2の光学部品を通過する、磁気光学素子。

[請求項8] 前記第1の光学部品及び前記第2の光学部品が偏光子である、請求項7に記載の磁気光学素子。

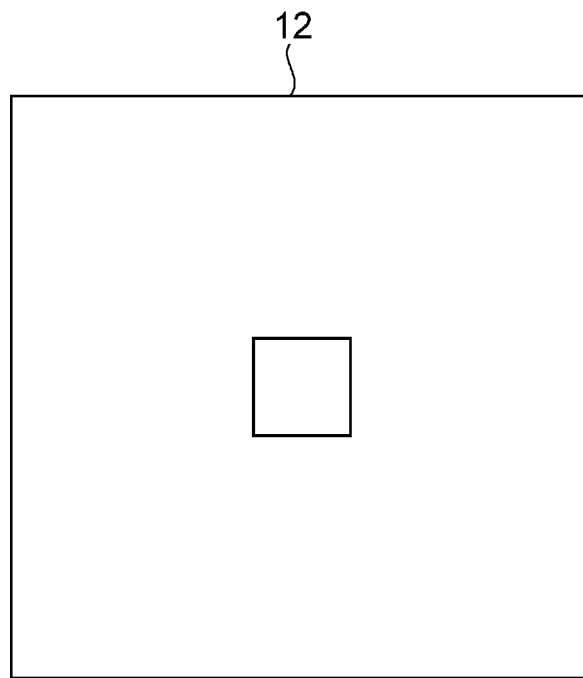
[図1]



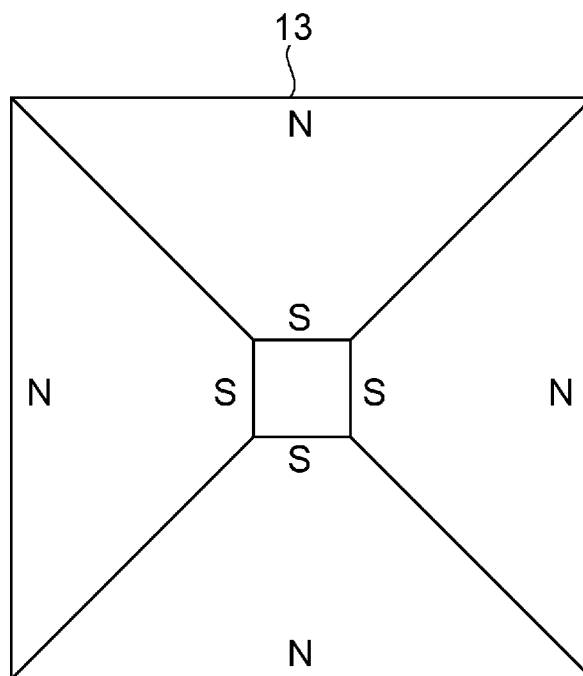
[図2]



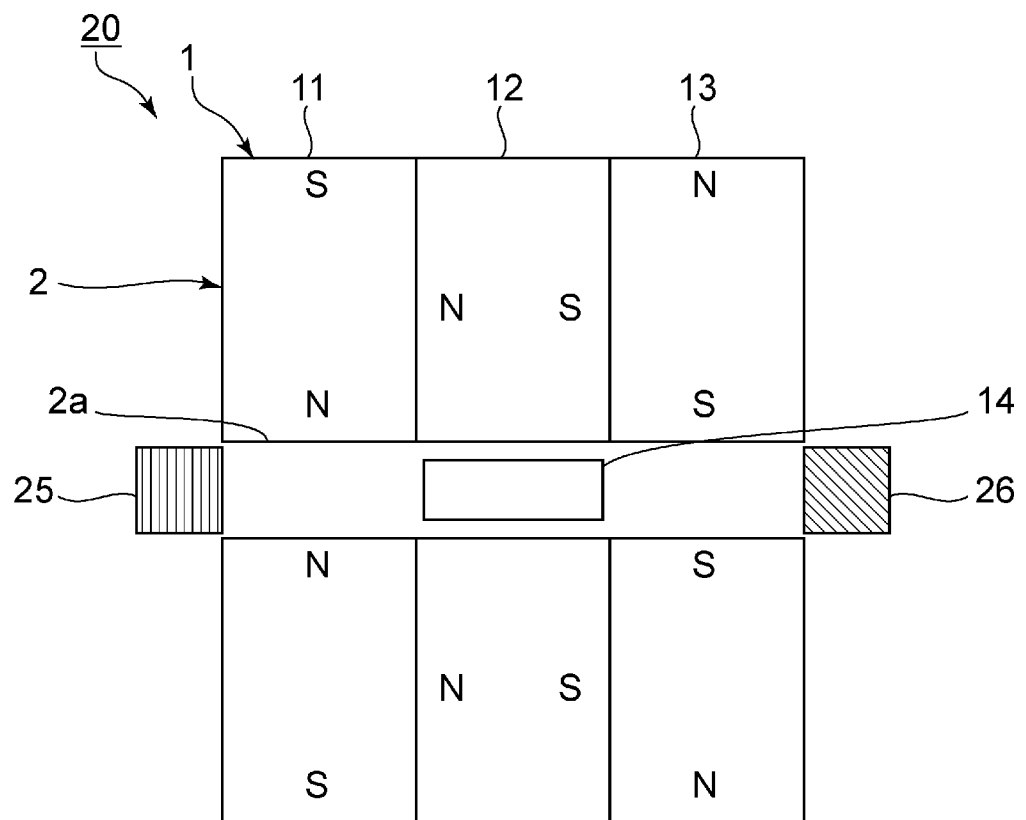
[図3]



[図4]



[図5]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/015274

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G02B27/28 (2006.01) i, G02F1/09 (2006.01) i

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)

Int. Cl. 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 1971-2019

Registered utility model specifications of Japan 1996-2019

Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

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.
X Y	US 2005/0225831 A1 (FEHN, Thomas) 13 October 2005, paragraphs [0001]-[0029], fig. 1a-3 & WO 2005/019914 A1 & EP 1660931 A1	1, 6-8 2-5
X Y	JP 2016-51105 A (FUJIKURA LTD.) 11 April 2016, paragraphs [0029]-[0060], fig. 1-9 (Family: none)	1, 6-8 2-5
X Y	JP 2012-68598 A (FDK CORP.) 05 April 2012, paragraphs [0019]-[0029], fig. 1-4 (Family: none)	1, 6-8 2-5
Y	JP 2016-145143 A (NIPPON ELECTRIC GLASS CO., LTD.) 12 August 2016, paragraphs [0009]-[0030] & US 2017/0226002 A1, paragraphs [0010]-[0031] & WO 2016/121655 A1 & CN 107207321 A	2-5



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
12.06.2019

Date of mailing of the international search report
25.06.2019

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORTInternational application No.
PCT/JP2019/015274

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2017-61389 A (NIPPON ELECTRIC GLASS CO., LTD.) 30 March 2017, paragraphs [0007]-[0039] & US 2018/0186683 A1, paragraphs [0008]-[0040] & WO 2017/051685 A1 & CN 108025948 A	2-5
A	US 2015/0198823 A1 (COHERENT LASERSYSTEMS GMBH & CO. KG) 16 July 2015, entire text, all drawings (Family: none)	1-8

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B27/28(2006.01)i, G02F1/09(2006.01)i

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））

Int.Cl. 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

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019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
X Y	US 2005/0225831 A1 (FEHN, Thomas) 2005.10.13, 段落[0001]-[0029], 図 1a-3 & WO 2005/019914 A1 & EP 1660931 A1	1, 6-8 2-5
X Y	JP 2016-51105 A (株式会社フジクラ) 2016.04.11, 段落[0029]-[0060], 図 1-9 (ファミリーなし)	1, 6-8 2-5
X Y	JP 2012-68598 A (FDK株式会社) 2012.04.05, 段落[0019]-[0029], 図 1-4 (ファミリーなし)	1, 6-8 2-5

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。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「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矛盾するものではなく、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

12.06.2019

国際調査報告の発送日

25.06.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

堀部 修平

2 L

9215

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

C (続き) . 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	JP 2016-145143 A (日本電気硝子株式会社) 2016. 08. 12, 段落[0009]-[0030] & US 2017/0226002 A1, 段落[0010]-[0031] & WO 2016/121655 A1 & CN 107207321 A	2-5
Y	JP 2017-61389 A (日本電気硝子株式会社) 2017. 03. 30, 段落[0007]-[0039] & US 2018/0186683 A1, 段落[0008]-[0040] & WO 2017/051685 A1 & CN 108025948 A	2-5
A	US 2015/0198823 A1 (COHERENT LASERSYSTEMS GMBH & CO. KG) 2015. 07. 16, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-8