

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-208402

(P2005-208402A)

(43) 公開日 平成17年8月4日(2005.8.4)

(51) Int.Cl.⁷

G02F 1/09

F I

G02F 1/09 505

テーマコード (参考)

2H079

審査請求 未請求 請求項の数 17 O L (全 45 頁)

(21) 出願番号 特願2004-15851 (P2004-15851)
 (22) 出願日 平成16年1月23日 (2004.1.23)

(71) 出願人 000003067
 T D K 株式会社
 東京都中央区日本橋 1 丁目 1 3 番 1 号
 (74) 代理人 100101214
 弁理士 森岡 正樹
 (72) 発明者 岩塚 信治
 東京都中央区日本橋一丁目 1 3 番 1 号 T
 D K 株式会社内
 Fターム(参考) 2H079 AA03 BA01 BA02 CA04 CA05
 DA12 EA11 EB18 GA01 KA05
 KA17

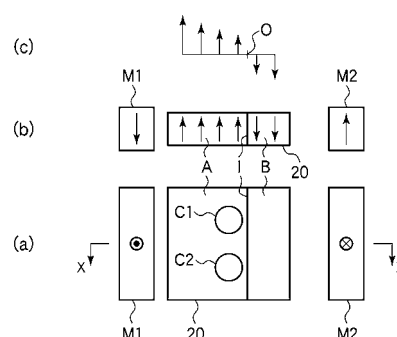
(54) 【発明の名称】 磁気光学光部品

(57) 【要約】

【課題】本発明は、光通信システムに用いられる可変光アッテネータや光変調器、あるいは光スイッチなどの磁気光学光部品に関し、小型、低消費電力で、かつ高速な可変光アッテネータ、光変調器、光スイッチ等の磁気光学光部品を提供することを目的とする。

【解決手段】光入出射面に垂直な方向の磁化により構成される磁区 A と、磁区 A の磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区 B と、磁区 A 及び磁区 B の境界となる平面状の磁壁 I と、進行方向の同じ複数の光がそれぞれ透過し、磁壁 I との間の距離がほぼ等しい 2 つの光透過領域 C 1、C 2 とを備えた少なくとも 1 枚のファラデー回転子 20 と、ファラデー回転子 20 に可変磁界を印加して磁壁 I の位置を可変とする磁界印加機構とを有するように構成する。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光入射面に平行でない方向の磁化により構成される磁区 A と、前記磁区 A の磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区 B と、前記磁区 A 及び磁区 B の境界となる平面状の磁壁と、進行方向の同じ複数の光ビームがそれぞれ透過する複数の光透過領域とを備えた少なくとも 1 枚の磁気光学素子と、

前記磁気光学素子に可変磁界を印加して前記磁壁の位置を可変とする磁界印加機構とを有することを特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 2】

請求項 1 記載の磁気光学光部品であって、
前記複数の光ビームと前記磁壁との距離がほぼ等しいこと
を特徴とする磁気光学光部品。

10

【請求項 3】

請求項 2 記載の磁気光学光部品であって、
少なくとも 2 枚の複屈折板をさらに有し、
前記複屈折板の軸ずれ方向は、前記磁壁にほぼ平行であるとともに、
前記磁気光学素子は、第 1 の前記複屈折板と第 2 の前記複屈折板との間に配置されていること
を特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 4】

請求項 3 記載の磁気光学光部品であって、
前記第 1 の複屈折板で分離され前記磁気光学素子を透過した 2 つの光のうち前記第 2 の複屈折板で合波されない偏光成分を吸収する偏光板と、
前記第 2 の複屈折板で合波された光の一部を取り出す光学素子と、
前記光学素子で取り出された光を受光して強度を検出する受光部とをさらに有することを特徴とする磁気光学光部品。

20

【請求項 5】

請求項 2 記載の磁気光学光部品であって、
少なくとも 3 枚の複屈折板をさらに有し、
第 1 の前記磁気光学素子は第 1 の前記複屈折板と第 2 の前記複屈折板との間に配置され、
第 2 の前記磁気光学素子は前記第 2 の複屈折板と第 3 の前記複屈折板との間に配置され、
前記第 1 及び第 2 の磁気光学素子の磁壁は互いにほぼ平行であり、
前記第 1 乃至第 3 の複屈折板の軸ずれ方向は、前記第 1 及び第 2 の磁気光学素子の磁壁にほぼ平行であること
を特徴とする磁気光学光部品。

30

【請求項 6】

請求項 5 記載の磁気光学光部品であって、
前記第 1 の磁気光学素子の有する第 1 の前記磁壁と前記複数の光ビームとの間の距離と、
前記第 2 の磁気光学素子の有する第 2 の前記磁壁と前記複数の光ビームとの間の距離とは互いに異なること
を特徴とする磁気光学光部品。

40

【請求項 7】

請求項 6 記載の磁気光学光部品であって、
前記第 1 の磁壁と前記複数の光ビームとの間の距離と、前記第 2 の磁壁と前記複数の光ビームとの間の距離との差は、光のビーム径の 0.8 倍以上であること
を特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 8】

請求項 5 乃至 7 のいずれか 1 項に記載の磁気光学光部品であって、

50

前記第 1 の複屈折板の軸ずれ量と前記第 3 の複屈折板の軸ずれ量との和は、前記第 2 の複屈折板の軸ずれ量にほぼ等しいこと

を特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 9】

光入出射面に平行でない方向の磁化により構成される磁区 A と、前記磁区 A の磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区 B と、前記磁区 A 及び磁区 B の境界となる平面状の磁壁と、所定方向に進む複数の第 1 の光ビームがそれぞれ透過する複数の第 1 の光透過領域と、前記所定方向とほぼ逆方向に進む複数の第 2 の光ビームがそれぞれ透過する複数の第 2 の光透過領域とを備えた少なくとも 1 枚の磁気光学素子と、

前記複数の第 1 の光ビームを前記複数の第 2 の光ビームとしてそれぞれ反射する反射部と、

前記磁気光学素子に可変磁界を印加して前記磁壁の位置を可変とする磁界印加機構とを有することを特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 10】

請求項 9 記載の磁気光学光部品であって、

前記複数の第 1 の光ビームと前記磁壁との距離がほぼ等しく、

前記複数の第 2 の光ビームと前記磁壁との距離がほぼ等しいこと

を特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 11】

請求項 10 記載の磁気光学光部品であって、

前記磁気光学素子における前記第 1 の光ビームと前記第 2 の光ビームとの距離は、光のビーム径の 0.8 倍以上であること

を特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 12】

請求項 9 乃至 11 のいずれか 1 項に記載の磁気光学光部品であって、

外部から入射した光を互いに直交する偏光成分に分離して前記複数の第 1 の光ビームとして出射する第 1 の複屈折板と、

前記複数の第 1 の光ビームの偏光方位を一致させて前記磁気光学素子に入射させる少なくとも 1 枚の 1/2 波長板と、

前記磁気光学素子を通過した前記複数の第 2 の光ビームを合波して外部に出射する第 2 の複屈折板と

をさらに有することを特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 13】

少なくとも 2 本の光導波機構と、

前記光導波機構からの光が入射する、光入出射面に平行でない方向の磁化により構成される磁区 A と、前記磁区 A の磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区 B と、前記磁区 A 及び磁区 B の境界となる平面状の磁壁とを備えた少なくとも 1 枚の磁気光学素子と、

前記磁気光学素子に可変磁界を印加して前記磁壁の位置を可変とする磁界印加機構とを有することを特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 14】

請求項 13 記載の磁気光学光部品であって、

前記光導波機構が、光ファイバと、前記光ファイバの先端にそれぞれ直接固定されたレンズとを有すること

を特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 15】

請求項 13 記載の磁気光学光部品であって、

前記光導波機構が、先端近傍にコア拡大領域を備える光ファイバを有すること

を特徴とする磁気光学光部品。

【請求項 16】

10

20

30

40

50

少なくとも２本の光導波機構と、

前記光導波機構からの光が入射する光入出射面に平行でない方向の磁化により構成される磁区Ａと、前記磁区Ａの磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区Ｂと、前記磁区Ａ及び磁区Ｂの境界となる平面状の磁壁とを備えた少なくとも１枚の磁気光学素子と、

前記光導波機構に沿って延びるヨークと、前記ヨークに巻き回されたコイルとを備えた電磁石を含み、前記磁気光学素子に可変磁界を印加して前記磁壁の位置を可変とする磁界印加機構と

を有することを特徴とする磁気光学光部品。

【請求項１７】

10

少なくとも２本の光導波機構をそれぞれ備える複数の光導波機構対と、

前記光導波機構からの光が入射する光入出射面に平行でない方向の磁化により構成される磁区Ａと、前記磁区Ａの磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区Ｂと、前記光導波機構対に対応して形成され、前記磁区Ａ及び磁区Ｂの境界となる平面状の磁壁とを備えた少なくとも１枚の磁気光学素子と、

前記光導波機構に沿って延びるヨークと、前記ヨークに巻き回されたコイルとを備えた電磁石を含み、前記磁気光学素子に可変磁界を印加して前記磁壁の位置を可変とする磁界印加機構と

を有することを特徴とする磁気光学光部品。

【発明の詳細な説明】

20

【技術分野】

【０００１】

本発明は、光通信システムに用いられる可変光アッテネータや光変調器、あるいは光スイッチなどの磁気光学光部品に関する。

【背景技術】

【０００２】

光通信システムに用いられる磁気光学光部品の１つとして、可変光アッテネータがある。可変光アッテネータとして、印加した磁界の強度によりファラデー回転角を変化させて光の減衰量を制御するいわゆる磁気光学型可変光アッテネータが知られている。磁気光学型可変光アッテネータは、機械的な可動部がないため信頼性が高く、また小型化し易いという利点を有している。磁気光学型可変光アッテネータは、磁気光学素子（磁気光学結晶）と、磁気光学素子に磁界を印加する電磁石とを有している。電磁石のコイルに流す電流量を変化させて磁気光学素子に印加する磁界の強度を制御することにより、磁気光学素子の磁化の強さを変化させてファラデー回転角を制御できるようになっている。

30

【０００３】

磁気光学素子に印加する磁界を制御する方法は、例えば特許文献１に開示されている。図４３を用いて当該磁界制御方法について説明する。図４３（ａ）は可変光アッテネータを示しており、当該可変光アッテネータはファラデー回転子（磁気光学素子）１１３と偏光子１１２とを備えている。また、当該可変光アッテネータは、ファラデー回転子１１３に対して互いに直交する方向に磁界を印加する永久磁石１１４及び電磁石１１５と、電磁石１１５に駆動電流を与える可変電流源１１６とを有している。

40

【０００４】

永久磁石１１４によりファラデー回転子１１３に印加される磁界の方向はファラデー回転子１１３における光ビーム１１７の透過方向と平行であり、電磁石１１５によりファラデー回転子１１３に印加される磁界の方向はファラデー回転子１１３における永久磁石１１４による磁界印加方向及び光ビーム１１７の透過方向に垂直である。

【０００５】

図４３（ｂ）において、矢印１０２、１０５はファラデー回転子１１３内の磁化方向とその大きさを表すベクトルであり、矢印１０１、１０４、１０３は外部から印加される印加磁界の方向と大きさを表すベクトルである。図中Ｚ方向はファラデー回転子１１３中の

50

光の伝播方向であり、X方向はZ方向に直交している。ファラデー回転子113は、外部永久磁石114による垂直磁界101により飽和磁化102の状態となる。次に電磁石115による水平磁界103を印加すると外部磁界は合成磁界104となり、ファラデー回転子113は磁化105の状態になる。この磁化105の大きさは飽和磁化102の大きさと同じである。したがってファラデー回転子113は飽和磁化の状態にある。

【0006】

このように、永久磁石114によりファラデー回転子113に垂直磁界を予め印加してファラデー回転子113を飽和磁化の状態にしておいて、さらにファラデー回転子113の面内方向に配置した電磁石115で水平磁界を印加する。そして、2つの磁界の合成磁界104によりファラデー回転子113の磁化の方向を磁化102から磁化105まで角度だけ回転させてZ方向の磁化成分106の大きさを制御している。この磁化成分106の大きさに依存してファラデー回転角は変化する。この方法の場合には、ファラデー回転子113は常に飽和磁化領域で使用されるためヒステリシスが生じることがなく、再現性よくファラデー回転角を変化させることができるという特徴を有する。

10

【0007】

しかしながら、特許文献1に開示された磁界印加方法では、永久磁石114による垂直方向の磁界を印加した状態で磁化を一様に回転させるために、電磁石115により印加する面内方向磁界を強くする必要がある。このため、大型の電磁石115を用いるか、あるいは電磁石115のコイルに大電流を流す必要がある。したがって、磁気光学光部品の小型化、低消費電力化が困難であるという問題が生じている。また、磁気光学光部品の小型化が困難なため、複数の磁気光学光部品を配列するアレイ化が極めて困難であるという問題が生じる。

20

【特許文献1】特許第2815509号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

本発明の目的は、小型、低消費電力で、かつ高速な可変光アッテネータ、光変調器、光スイッチ等の磁気光学光部品を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記目的は、光入出射面に平行でない方向の磁化により構成される磁区Aと、前記磁区Aの磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区Bと、前記磁区A及び磁区Bの境界となる平面状の磁壁と、進行方向の同じ複数の光ビームがそれぞれ透過する複数の光透過領域とを備えた少なくとも1枚の磁気光学素子と、前記磁気光学素子に可変磁界を印加して前記磁壁の位置を可変とする磁界印加機構とを有することを特徴とする磁気光学光部品によって達成される。

30

【0010】

上記本発明の磁気光学光部品であって、前記複数の光ビームと前記磁壁との距離がほぼ等しいことを特徴とする。

【0011】

上記本発明の磁気光学光部品であって、少なくとも2枚の複屈折板をさらに有し、前記複屈折板の軸ずれ方向は、前記磁壁にほぼ平行であるとともに、前記磁気光学素子は、第1の前記複屈折板と第2の前記複屈折板との間に配置されていることを特徴とする。

40

【0012】

上記本発明の磁気光学光部品であって、前記第1の複屈折板で分離され前記磁気光学素子を透過した2つの光のうち前記第2の複屈折板で合波されない偏光成分を吸収する偏光板と、前記第2の複屈折板で合波された光の一部を取り出す光学素子と、前記光学素子で取り出された光を受光して強度を検出する受光部とをさらに有することを特徴とする。

【0013】

上記本発明の磁気光学光部品であって、少なくとも3枚の複屈折板をさらに有し、第1

50

の前記磁気光学素子は第1の前記複屈折板と第2の前記複屈折板との間に配置され、第2の前記磁気光学素子は前記第2の複屈折板と第3の前記複屈折板との間に配置され、前記第1及び第2の磁気光学素子の磁壁は互いにほぼ平行であり、前記第1乃至第3の複屈折板の軸ずれ方向は、前記第1及び第2の磁気光学素子の磁壁にほぼ平行であることを特徴とする。

【0014】

上記本発明の磁気光学光部品であって、前記第1の磁気光学素子の有する第1の前記磁壁と前記複数の光ビームとの間の距離と、前記第2の磁気光学素子の有する第2の前記磁壁と前記複数の光ビームとの間の距離とは互いに異なることを特徴とする。

【0015】

上記本発明の磁気光学光部品であって、前記第1の磁壁と前記複数の光ビームとの間の距離と、前記第2の磁壁と前記複数の光ビームとの間の距離との差は、光のビーム径の0.8倍以上であることを特徴とする。

【0016】

上記本発明の磁気光学光部品であって、前記第1の複屈折板の軸ずれ量と前記第3の複屈折板の軸ずれ量との和は、前記第2の複屈折板の軸ずれ量にほぼ等しいことを特徴とする。

【0017】

また、上記目的は、光入出射面に平行でない方向の磁化により構成される磁区Aと、前記磁区Aの磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区Bと、前記磁区A及び磁区Bの境界となる平面状の磁壁と、所定方向に進む複数の第1の光ビームがそれぞれ透過する複数の第1の光透過領域と、前記所定方向とほぼ逆方向に進む複数の第2の光ビームがそれぞれ透過する複数の第2の光透過領域とを備えた少なくとも1枚の磁気光学素子と、前記複数の第1の光ビームを前記複数の第2の光ビームとしてそれぞれ反射する反射部と、前記磁気光学素子に可変磁界を印加して前記磁壁の位置を可変とする磁界印加機構とを有することを特徴とする磁気光学光部品によって達成される。

【0018】

上記本発明の磁気光学光部品であって、前記複数の第1の光ビームと前記磁壁との距離がほぼ等しく、前記複数の第2の光ビームと前記磁壁との距離がほぼ等しいことを特徴とする。

【0019】

上記本発明の磁気光学光部品であって、前記磁気光学素子における前記第1の光ビームと前記第2の光ビームとの距離は、光のビーム径の0.8倍以上であることを特徴とする。

【0020】

上記本発明の磁気光学光部品であって、外部から入射した光を互いに直交する偏光成分に分離して前記複数の第1の光ビームとして出射する第1の複屈折板と、前記複数の第1の光ビームの偏光方位を一致させて前記磁気光学素子に入射させる少なくとも1枚の1/2波長板と、前記磁気光学素子を通過した前記複数の第2の光ビームを合波して外部に出射する第2の複屈折板とをさらに有することを特徴とする。

【0021】

また、上記目的は、少なくとも2本の光導波機構と、前記光導波機構からの光が入射する、光入出射面に平行でない方向の磁化により構成される磁区Aと、前記磁区Aの磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区Bと、前記磁区A及び磁区Bの境界となる平面状の磁壁とを備えた少なくとも1枚の磁気光学素子と、前記磁気光学素子に可変磁界を印加して前記磁壁の位置を可変とする磁界印加機構とを有することを特徴とする磁気光学光部品によって達成される。

【0022】

上記本発明の磁気光学光部品であって、前記光導波機構が、光ファイバと、前記光ファイバの先端にそれぞれ直接固定されたレンズとを有することを特徴とする。

10

20

30

40

50

【0023】

上記本発明の磁気光学光部品であって、前記光導波機構が、先端近傍にコア拡大領域を備える光ファイバを有することを特徴とする。

【0024】

さらに、上記目的は、少なくとも2本の光導波機構と、前記光導波機構からの光が入射する光入出射面に平行でない方向の磁化により構成される磁区Aと、前記磁区Aの磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区Bと、前記磁区A及び磁区Bの境界となる平面状の磁壁とを備えた少なくとも1枚の磁気光学素子と、前記光導波機構に沿って延びるヨークと、前記ヨークに巻き回されたコイルとを備えた電磁石を含み、前記磁気光学素子に可変磁界を印加して前記磁壁の位置を可変とする磁界印加機構とを有することを特徴とする磁気光学光部品によって達成される。

【0025】

また、上記目的は、少なくとも2本の光導波機構をそれぞれ備える複数の光導波機構対と、前記光導波機構からの光が入射する光入出射面に平行でない方向の磁化により構成される磁区Aと、前記磁区Aの磁化方向とは逆向きの方向の磁化により構成される磁区Bと、前記光導波機構対に対応して形成され、前記磁区A及び磁区Bの境界となる平面状の磁壁とを備えた少なくとも1枚の磁気光学素子と、前記光導波機構に沿って延びるヨークと、前記ヨークに巻き回されたコイルとを備えた電磁石を含み、前記磁気光学素子に可変磁界を印加して前記磁壁の位置を可変とする磁界印加機構とを有することを特徴とする磁気光学光部品によって達成される。

【発明の効果】

【0026】

本発明によれば、小型、低消費電力で、かつ高速な可変光アッテネータ、光変調器、光スイッチ等の磁気光学光部品を実現できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0027】

〔第1の実施の形態〕

本発明の第1の実施の形態による磁気光学光部品について図1乃至図8を用いて説明する。まず、本実施の形態による磁気光学光部品の動作原理について図1乃至図3を用いて説明する。図1乃至図3は、磁気光学素子であるファラデー回転子20にそれぞれ条件を変えて磁界を印加している状態を示している。図1(a)、図2(a)、及び図3(a)は、ファラデー回転子20を光入出射面に垂直な方向に見た状態を示している。ここで、光学では「光入射面」を入射光線と境界面の法線を含む面と定義する場合があるが、本明細書での「光入出射面」は、この定義ではなく、ファラデー回転子20（あるいは他の光学素子）において光が入射／出射する面のことを意味する。ファラデー回転子20の中央付近の2つの円でそれぞれ囲んだ図中上下方向に配列する2つの領域は、進行方向が同じ2つの光ビームが透過する光透過領域C1、C2である。例えば互いに直交する偏光方位を有し、紙面手前から紙面後方に向かって進む2つの直線偏光の光は、ファラデー回転子20の光透過領域C1、C2にそれぞれ入射し、偏光方位を所定角度回転させられて紙面後方に射出する。ファラデー回転子20は、例えば液相エピタキシャル（LPE）法により育成され、膜成長面に垂直な方向に磁化容易軸が現れる垂直磁化性を備えた磁性ガーネット単結晶膜で形成されている。ファラデー回転子20の両側には、後述する電磁石とともに磁界印加機構を構成する永久磁石M1、M2が配置されている。2つの永久磁石M1、M2は、例えばほぼ同一の磁力を有しており、互いの磁極は逆向き（着磁の方向が正反対）に配置されている。例えば永久磁石M1内部の磁束は紙面後方から手前に向いており、永久磁石M2内部の磁束は紙面手前から後方に向いている。また、永久磁石M1より永久磁石M2の方が、ファラデー回転子20の光透過領域C1、C2から遠い位置に配置されている。

【0028】

図1(b)、図2(b)、及び図3(b)は、図1(a)、図2(a)、及び図3(a)

10

20

30

40

50

）のそれぞれに示した X - X 線で切断したファラデー回転子 20 の断面での磁区構造を模式的に示している。図 1（b）、図 2（b）、及び図 3（b）において、永久磁石 M1 内部の磁束は下向きであり、永久磁石 M2 内部の磁束は上向きである。

【0029】

図 1（c）、図 2（c）、及び図 3（c）は、光軸に平行な方向（ファラデー回転子 20 の光入出射面に垂直な方向）に印加される磁界の向きと強さを矢印の向きと長さで模式的に表している。図示において、横方向はファラデー回転子 20 の断面の横方向の位置に対応し、縦方向は光軸に平行な方向を表している。

【0030】

さて、図 1（a）～（c）は、永久磁石 M1、M2 だけでファラデー回転子 20 に磁界を印加している状態を示している。図 1（c）に示すように、ファラデー回転子 20 の永久磁石 M1 に近い左側部分では磁界は図中上向きに（つまり、図 1（a）において紙面後方に向かって）印加されている。一方、永久磁石 M2 に近い右側部分では磁界は図中下向きに（つまり、図 1（a）において紙面手前に向かって）印加される。ファラデー回転子 20 に印加される磁界成分は、光入出射面内の所定方向で単調に変化している。図 1（b）のファラデー回転子 20 内の矢印で示すように、ファラデー回転子 20 内の磁化の向きは、永久磁石 M1 と永久磁石 M2 によりファラデー回転子 20 に印加される磁界の向きと同じになる。永久磁石 M1、M2 はほぼ等しい磁力を有しているが、互いに磁極が逆向きであってファラデー回転子 20 からの距離は永久磁石 M1 の方が近いため、ファラデー回転子 20 内部では図 1（c）に示すように上向きの磁界、つまり光の進行方向と同方向の磁界が支配的になる。飽和磁界以上の強さの磁界が印加された領域には、磁化を一様に一方向にした磁区が形成される。したがって、図 1（b）に示すように、ファラデー回転子 20 内部では、磁化を一様に上向き（光の進行方向と同方向）にした磁区 A の領域の方が、磁化を一様に下向き（光の進行方向と逆方向）にした磁区 B の領域より支配的になる。これにより、図 1（c）に示すように光入出射面に垂直方向の磁界が 0 となる位置 O において、図 1（a）、（b）に示すように磁区 A と磁区 B との平面状の境界（以下、「磁壁 I」という）が形成される。

【0031】

磁壁 I をほぼ平面状に維持するには、図 1（c）、図 2（c）、及び図 3（c）に示した光入出射面に対する垂直方向磁界が 0 となる位置 O 近傍での磁界強度の勾配が、十分大きければよい。また、位置 O が光入射面内で直線状になるように一様な垂直方向磁界を印加することにより、磁壁 I を再現性良く安定して移動させることができる。これにより、従来から問題とされている磁区構造のヒステリシスが生じない、繰り返し再現性に優れた磁気光学光部品を実現できる。

【0032】

光透過領域 C1、C2 は、共に磁区 A の領域内に完全に包含される。また光透過領域 C1 と磁壁 I との距離（光透過領域 C1 を透過する光ビームの中心位置と磁壁 I との距離）と、光透過領域 C2 と磁壁 I との距離（光透過領域 C2 を透過する光ビームの中心位置と磁壁 I との距離）とはほぼ等しくなっている。ここで、光透過領域 C1、C2 が磁区 A 領域内にあるときのファラデー回転角を $+f_s$ （飽和のファラデー回転角）とする。すなわち、紙面手前からファラデー回転子 20 に入射し、光透過領域 C1、C2 をそれぞれ透過した 2 つの直線偏光の光は、共に偏光方位を $+f_s$ だけ回転させられて紙面後方に射出する。

【0033】

ここでは、永久磁石 M1 を永久磁石 M2 よりファラデー回転子 20 に近づけることにより光透過領域 C1、C2 を磁区 A の領域内に入るようにしているが、例えば、永久磁石 M1 の磁力を永久磁石 M2 のそれより強くして、ファラデー回転子 20 に対して両者がほぼ等距離になるように配置して光透過領域 C1、C2 を磁区 A の領域内に入れるようにしてもよい。あるいは、永久磁石 M2 を用いずに永久磁石 M1 だけを用いて光透過領域 C1、C2 を磁区 A の領域内に入れるようにしてもよい。

【 0 0 3 4 】

次に、図 2 (a) ~ (c) では、不図示の電磁石に通電して、永久磁石 M 1、M 2 による磁界に加えて光の進行方向と逆方向の磁界をさらに印加して、光入出射面に垂直方向の磁界が 0 となる位置 O を図の左方向に移動させ、ファラデー回転子 2 0 のほぼ中央に位置させる。これにより図 2 (c) に示すように、ファラデー回転子 2 0 内部は左半分に図中上向き（光の進行方向と同方向）の磁界が印加され、右半分に下向き（光の進行方向と逆方向）の磁界が印加される状態となる。したがって、図 2 (b) に示すように、磁壁 I も図の左方向に移動してファラデー回転子 2 0 のほぼ中央に位置する。ファラデー回転子 2 0 には、磁化を一様に上向き（光の進行方向と同方向）にした磁区 A の領域と、磁化を一様に下向き（光の進行方向と逆方向）にした磁区 B の領域とが、中央の磁壁 I を境界として左右半々に形成される。これにより図 2 (b) に示すように、光透過領域 C 1、C 2 には、磁区 A の領域と磁区 B の領域とがほぼ半々に存在するようになり、両方の磁区が均等に含まれるためファラデー回転角 f は共に 0° となる。すなわち、紙面手前からファラデー回転子 2 0 に入射し、光透過領域 C 1、C 2 をそれぞれ透過した 2 つの直線偏光の光は、偏光方位を回転させられずに紙面後方に射出する。

10

【 0 0 3 5 】

次に、図 3 (a) ~ (c) では、不図示の電磁石のコイルにさらに大電流を流して光の進行方向と逆方向の磁界をさらに印加し、図 3 (c) に示すように、光入出射面に垂直方向の磁界が 0 となる位置 O をさらに図の左方向に移動させる。これにより図 3 (c) に示すように、ファラデー回転子 2 0 内部では図中下向き（光の進行方向と逆方向）の磁界が支配的になる。したがって、図 3 (b) に示すように、ファラデー回転子 2 0 には、磁化を一様に下向き（光の進行方向と逆方向）にした磁区 B の領域の方が、磁化を一様に上向き（光の進行方向と同方向）にした磁区 A の領域より支配的になる。これにより図 3 (c) に示すように、光透過領域 C 1、C 2 は、共に磁区 B の領域内に完全に包含される。光透過領域 C 1、C 2 が磁区 B の領域内にあるときのファラデー回転角は $-f_s$ となる。すなわち、紙面手前からファラデー回転子 2 0 に入射し、光透過領域 C 1、C 2 をそれぞれ透過した 2 つの直線偏光の光は、共に偏光方位を $-f_s$ だけ回転させられて紙面後方に射出する。

20

【 0 0 3 6 】

図 4 乃至図 6 は、本実施の形態による磁気光学光部品に対する比較例としての磁気光学光部品のファラデー回転子 2 0 にそれぞれ条件を変えて磁界を印加している状態を示している。図 4 (a) ~ (c) は図 1 (a) ~ (c) にそれぞれ対応し、永久磁石 M 1、M 2 だけでファラデー回転子 2 0 に磁界を印加している状態を示している。また、図 5 (a) ~ (c) は図 2 (a) ~ (c) にそれぞれ対応し、永久磁石 M 1、M 2 による磁界に加えて、電磁石により光の進行方向と逆方向の磁界を印加している状態を示している。図 6 (a) ~ (c) は図 3 (a) ~ (c) にそれぞれ対応し、光の進行方向と逆方向の磁界をさらに強く印加している状態を示している。図 4 乃至図 6 に示すように、ファラデー回転子 2 0 の光透過領域 C 1、C 2 は磁壁 I との間の距離が互いに異なり、図 4 (a) に示す状態では光透過領域 C 2 と磁壁 I との距離より光透過領域 C 1 と磁壁 I との距離の方が近くなっている。図 4 (a) ~ (c) に示す状態では、図 1 (a) ~ (c) に示す状態と同様に、光透過領域 C 1、C 2 には磁区 A の領域のみが存在している。ところが、図 5 (a) ~ (c) に示す状態では、光透過領域 C 1 には磁区 A の領域と磁区 B の領域との双方が存在しているのに対して、光透過領域 C 2 には磁区 A の領域だけが存在している。また、図 6 (a) ~ (c) に示す状態では、光透過領域 C 1 には磁区 B の領域だけが存在しているのに対して、光透過領域 C 2 には磁区 A の領域と磁区 B の領域との双方が存在している。

30

40

【 0 0 3 7 】

このように、光透過領域 C 1、C 2 と磁壁 I との間の距離が互いに異なる場合、光透過領域 C 1、C 2 をそれぞれ透過する 2 つの光ビームに対するファラデー回転角が互いに異なってしまう。したがって、磁気光学光部品の偏波依存性が大きくなってしまいうという問題がある。これに対し、図 1 乃至図 3 に示す本実施の形態では、光透過領域 C 1、C 2 を

50

それぞれ透過する２つの光ビームに対するファラデー回転角はどの状態でも同一であるため、磁気光学光部品の偏波無依存化を実現できる。

【 0 0 3 8 】

図 7 は、上記の動作原理を用いた本実施の形態による磁気光学光部品として透過型可変光アッテネータ 1 の構成を模式的に示している。図 7 (a) ~ (c) では、光の進行方向に Z 軸をとり、ファラデー回転子 2 0 の磁壁 I が Y Z 面に平行になるように Y 軸をとっている。また Y Z 面に直交する方向に X 軸をとっている。図 7 (a) は可変光アッテネータ 1 を - Y 方向に見た構成を示し、図 7 (b)、(c) は可変光アッテネータ 1 を + X 方向に見た構成を示している。図 7 (a)、(b) は 2 つの光透過領域が磁区 A の領域に完全に包含された状態（第 1 の状態）を示し、図 7 (c) は 2 つの光透過領域が磁区 B の領域に完全に包含された状態（第 2 の状態）を示している。

10

【 0 0 3 9 】

図 7 (a) ~ (c) に示すように、可変光アッテネータ 1 は、- Z 方向側に配置された光ファイバ 4 1 と、+ Z 方向側に配置された光ファイバ 4 2 とに接続されている。光ファイバ 4 1 の - Z 側の端部は、外部から光が入射する光入射ポート P 1（図では (1) と示している）になっている。光ファイバ 4 2 の + Z 側の端部は、外部に光が出射する光出射ポート P 2（図では (2) と示している）になっている。

【 0 0 4 0 】

光ファイバ 4 1 の + Z 方向には、光ファイバ 4 1 から出射した発散光を平行光に変換するレンズ 5 1 が配置されている。レンズ 5 1 の + Z 方向には、複屈折板 1 1、ファラデー回転子 2 0、1 / 2 波長板 2 4、複屈折板 1 2 がこの順に配置されている。複屈折板 1 1、1 2、1 / 2 波長板 2 4、及びファラデー回転子 2 0 は平行平板型の光学素子であり、X Y 面にほぼ平行な光入出射面を有している。複屈折板 1 2 の + Z 方向には、複屈折板 1 2 から出射した平行光を収束光に変換して光ファイバ 4 2 に入射させるレンズ 5 2 が配置されている。

20

【 0 0 4 1 】

Y Z 面に平行なファラデー回転子 2 0 の磁壁 I は、電磁石（図示せず）に流す電流を制御することにより ± X 方向に移動するようになっている。ファラデー回転子 2 0 の磁区 A のファラデー回転角（+ f s）は + 4 5 ° であり、磁区 B のファラデー回転角（- f s）は - 4 5 ° である。また 1 / 2 波長板 2 4 は、入射した光の偏光方位を + 4 5 ° 回転させるようになっている。すなわち、ファラデー回転子 2 0 の磁区 A に入射した偏光光は、ファラデー回転子 2 0 及び 1 / 2 波長板 2 4 を透過して偏光方位が 9 0 ° 回転させられて 1 / 2 波長板 2 4 から出射する。一方、ファラデー回転子 2 0 の磁区 B に入射した偏光光は、ファラデー回転子 2 0 及び 1 / 2 波長板 2 4 を透過して偏光方位が回転させられずに 1 / 2 波長板 2 4 から出射する。なお、本例では 1 / 2 波長板 2 4 がファラデー回転子 2 0 の + Z 方向側（ファラデー回転子 2 0 と複屈折板 1 2 の間）に配置されているが、1 / 2 波長板 2 4 をファラデー回転子 2 0 の - Z 方向側（複屈折板 1 1 とファラデー回転子 2 0 の間）に配置してもよい。

30

【 0 0 4 2 】

ここで、図 8 を用いて複屈折板 1 1、1 2 の光学軸について説明する。図 8 (a) は図 7 の X Y Z 座標系に複屈折板 B P を配置して + Z 方向に見た状態を示し、図 8 (b) は複屈折板 B P を + X 方向に見た状態を示している。図 8 (a)、(b) に示すように、複屈折板 B P の光学軸 O A は Y Z 面に平行に配置されている。光学軸 O A が Z 軸となす角度は、+ X 方向に見て X 軸について時計回りに約 4 5 ° になっている。+ Z 方向に進み、複屈折板 B P の光入出射面（本例では X Y 面に平行）B P a に垂直に入射した光は、常光と異常光とに分離して互いに異なる光路上に出射する。このとき、常光は直進し、異常光は常光に対して例えば図 8 (b) に示すように下方（- Y 方向）に所定の軸ずれ量だけ軸ずれする。図 8 (b) では、異常光の軸ずれ方向及び軸ずれ量を矢印 D の方向及び長さで表している。また - Z 方向に進む光が複屈折板 B P の光入出射面 B P b に垂直に入射した場合には、異常光は常光に対して上方（+ Y 方向）に上記の軸ずれ量と同じだけ軸ずれする。

40

50

以下、図 8 (a) のように複屈折板 B P を + Z 方向に見た図では、+ Z 方向に入射した光の異常光が下方 (- Y 方向) に軸ずれすることを下向きの片矢印 C で表すことにする。

【 0 0 4 3 】

図 7 に示す複屈折板 1 1 は、図 8 に示す複屈折板 B P と同じ方向に光学軸 (図 7 では光学軸の方向を両矢印で示している) を有している。したがって、複屈折板 1 1 に対して + Z 方向に入射した光は常光と異常光とに分離し、互いに異なる光路上に出射する。このとき、異常光は常光に対して - Y 方向に所定の軸ずれ量だけ軸ずれする。

【 0 0 4 4 】

複屈折板 1 2 は、複屈折板 1 1 と同じ方向に光学軸を有している。このため、複屈折板 1 2 の軸ずれ方向は、複屈折板 1 1 の軸ずれ方向と同一になっている。また、複屈折板 1 1、1 2 は、例えば同一の結晶から同一形状に切り出した同一仕様の素子である。このため、複屈折板 1 2 の軸ずれ量は、複屈折板 1 1 の軸ずれ量と同一になっている。複屈折板 1 1、1 2 を構成する結晶としては、ルチル (TiO_2) やイットリウム・バナデート (YVO_4) 等が用いられる。なお、複屈折性結晶の光学特性により、図 8 に示す光学軸 O A の配置で + Z 方向に進む光が + Y 方向に軸ずれする複屈折板 1 1、1 2 を組み合わせて用いるようにしてもよい。

【 0 0 4 5 】

また複屈折板 1 1、1 2 は、その軸ずれ方向がファラデー回転子 2 0 の磁壁 I にほぼ平行になるように配置されている。これにより、複屈折板 1 1 を常光として透過した光がファラデー回転子 2 0 を透過する光透過領域と磁壁 I との距離と、複屈折板 1 1 を異常光として透過して軸ずれした光がファラデー回転子 2 0 を透過する光透過領域と磁壁 I との距離とがほぼ等しくなる。

【 0 0 4 6 】

次に、本実施の形態による透過型可変光アッテネータ 1 の動作について説明する。まず、2つの光透過領域が磁区 A の領域に完全に包含された第 1 の状態について説明する。第 1 の状態は、電磁石に通電されず永久磁石 M 1、M 2 によってのみファラデー回転子 2 0 に磁界が印加されている状態である (図 1 参照)。図 7 (a)、(b) に示すように、光入射ポート P 1 (1) から入射した光は、光 L 1 0 として複屈折板 1 1 に入射する。複屈折板 1 1 に入射した光 L 1 0 は、常光 L 1 1 a と異常光 L 1 2 b とに分離する。すなわち常光成分の光 L 1 1 a は複屈折板 1 1 を直進し、異常光成分の光 L 1 1 b は複屈折板 1 1 で - Y 方向に所定の軸ずれ量だけ軸ずれする。複屈折板 1 1 から出射した 2 つの光 L 1 1 a、L 1 1 b は、ファラデー回転子 2 0 に入射する。ここで、複屈折板 1 1 を常光として透過した光 L 1 1 a がファラデー回転子 2 0 を透過する光透過領域と、複屈折板 1 1 を異常光として透過した光 L 1 1 b がファラデー回転子 2 0 を透過する光透過領域とは、共に磁区 A の領域に包含されている。このため、ファラデー回転子 2 0 に入射した 2 つの光 L 1 1 a、L 1 1 b は、ファラデー回転子 2 0 及び 1 / 2 波長板 2 4 を透過し、偏光方位を 90° 回転させられて 1 / 2 波長板 2 4 から出射して複屈折板 1 2 に入射する。複屈折板 1 2 の光学軸の方向は複屈折板 1 1 の光学軸の方向と同じであるため、複屈折板 1 1 を常光として透過して偏光方位が 90° 回転した光 L 1 1 a は複屈折板 1 2 を異常光として透過し、複屈折板 1 1 を異常光として透過して偏光方位が 90° 回転した光 L 1 1 b は複屈折板 1 2 を常光として透過することになる。したがって、光 L 1 1 a は複屈折板 1 2 で - Y 方向に所定の軸ずれ量だけ軸ずれし、光 L 1 1 b は複屈折板 1 2 を直進する。複屈折板 1 1 での軸ずれ量と複屈折板 1 2 での軸ずれ量とは等しいため、2つの光 L 1 1 a、L 1 1 b は合波して光 L 1 2 として複屈折板 1 2 から出射する。光 L 1 2 は光出射ポート P 2 (2) に入射して外部に出射する。第 1 の状態で光入射ポート P 1 (1) に入射した光は、偏光に依存せず全て光出射ポート P 2 (2) から出射することになる。したがって、第 1 の状態では光の減衰量は最小 (ほぼ 0) になる。

【 0 0 4 7 】

次に、2つの光透過領域が完全に磁区 B の領域に包含された第 2 の状態について説明する。第 2 の状態は、電磁石のコイルに大電流が流され、電磁石と永久磁石 M 1、M 2 とに

10

20

30

40

50

よってファラデー回転子 20 に磁界が印加されている状態である（図 3 参照）。図 7（c）に示すように、光入射ポート P 1（1）から入射した光は、光 L 13 として複屈折板 11 に入射する。複屈折板 11 に入射した光 L 13 は、常光 L 14 a と異常光 L 14 b とに分離して複屈折板 11 から出射する。すなわち常光成分の光 L 14 a は複屈折板 11 を直進し、異常光成分の光 L 14 b は複屈折板 11 で - Y 方向に所定の軸ずれ量だけ軸ずれする。複屈折板 11 から出射した 2 つの光 L 14 a、L 14 b は、ファラデー回転子 20 に入射する。ここで、複屈折板 11 を常光として透過した光 L 14 a がファラデー回転子 20 を透過する光透過領域と、複屈折板 11 を異常光として透過して軸ずれした光 L 14 b がファラデー回転子 20 を透過する光透過領域とは、共に磁区 B の領域に包含されている。このため、ファラデー回転子 20 に入射した 2 つの光 L 14 a、L 14 b は、ファラデー回転子 20 及び 1 / 2 波長板 24 を透過し、偏光方位を回転させられずに 1 / 2 波長板 24 から出射して複屈折板 12 に入射する。複屈折板 12 の光学軸の方向は複屈折板 11 の光学軸の方向と同じであるため、複屈折板 11 を常光として透過した光 L 14 a は複屈折板 12 も常光として透過し、複屈折板 11 を異常光として透過した光 L 14 b は複屈折板 12 も異常光として透過することになる。したがって、光 L 14 a は複屈折板 12 を直進し、光 L 14 b は複屈折板 12 で再び - Y 方向に所定の軸ずれ量だけ軸ずれする。このため、2 つの光 L 14 a、L 14 b は合波せずに複屈折板 12 から異なる光路上に出射する。これらの光 L 14 a、L 14 b は光出射ポート P 2（2）に入射せず、外部に出射しない。第 2 の状態で光入射ポート P 1（1）に入射した光は、偏光に依存せず光出射ポート P 2（2）から全く出射しないことになる。したがって、第 2 の状態では光の減衰量は最大になる。

【0048】

このように可変光アッテネータ 1 は、第 1 の状態では光の減衰量がほぼ 0 になり、第 2 の状態では光の減衰量が最大になる。また可変光アッテネータ 1 は、電磁石のコイルに流す電流を制御して磁壁 I を移動させ、光透過領域 C 1、C 2 内の磁区構造を第 1 の状態と第 2 の状態との間で徐々に変化させることによって光の減衰量を連続的に変化させることができる。

【0049】

本実施の形態のような磁壁移動方式では、ファラデー回転子 20 の磁化の方向が一様でなく面内方向で光学特性が異なるため、偏波依存性を小さくするのは困難とも考えられる。しかし、本実施の形態では複屈折板 11、12 での軸ずれ方向は Y 方向であり、磁壁 I は YZ 面に平行である。図 7（a）に示すように、磁壁 I に垂直な XZ 面に射影した 2 つの光 L 11 a、L 11 b の光路は一致している。図示していないが、第 2 の状態における 2 つの光 L 14 a、L 14 b を同様に射影しても 2 つの光路は一致している。複屈折板 11、12 での軸ずれ方向と磁壁 I とは平行であるため、分離された 2 つの光 L 11 a、L 11 b（L 14 a、L 14 b）はファラデー回転子 20 の同一の磁区を通り、同一の光学効果を受けるようになっていく。したがって、本実施の形態によれば偏波依存性の小さい可変光アッテネータ 1 を実現できる。また、光 L 11 a と光 L 11 b の光路長が等しくなっているので、偏波モード分散も非常に小さい。

【0050】

以上説明したように、本実施の形態による可変光アッテネータ 1 によれば、上述の特許文献 1 に開示されたような、磁気光学素子の磁化を一様に回転させる磁界印加方式ではなく、光透過領域 C 1、C 2 内の磁区構造を変化させる方式としたため、小型の電磁石でファラデー回転角を変化させることができ、小型の磁気光学光部品が実現できる。また、応答速度は、通常、電磁石の L（インダクタンス）により制限されており、電磁石が小型化できれば L を低減できるため、応答速度の高速化が実現できる。

【0051】

〔第 2 の実施の形態〕

次に、本発明の第 2 の実施の形態による磁気光学光部品について図 9 を用いて説明する。図 9 は、本実施の形態による磁気光学光部品として 2 段型の透過型可変光アッテネータ

2の構成を模式的に示している。図9(a)~(c)では、図7と同様に座標系をとっている。図9(a)は可変光アッテネータ2を-Y方向に見た構成を示し、図9(b)、(c)は可変光アッテネータ2を+X方向に見た構成を示している。図9(a)、(b)は光透過領域が磁区Aの領域に完全に包含された状態(第1の状態)を示し、図9(c)は光透過領域が磁区Bの領域に完全に包含された状態(第2の状態)を示している。

【0052】

図9(a)~(c)に示すように、可変光アッテネータ2は、-Z方向側に配置された光ファイバ41と、+Z方向側に配置された光ファイバ42とに接続されている。光ファイバ41の-Z側の端部は、外部から光が入射する光入射ポートP1(1)になっている。光ファイバ42の+Z側の端部は、光出射ポートP2(2)になっている。光ファイバ41の+Z方向には、光ファイバ41から出射した発散光を平行光に変換するレンズ51が配置されている。レンズ51の+Z方向には、複屈折板11、ファラデー回転子20、1/2波長板24、複屈折板12、ファラデー回転子21、1/2波長板25、及び複屈折板13がこの順に配置されている。複屈折板11、12、13、1/2波長板24、25、及びファラデー回転子20、21は平行平板型の光学素子であり、XY面にほぼ平行な光入射面を有している。複屈折板13の+Z方向には、複屈折板13から出射した平行光を収束光に変換して光ファイバ42に入射させるレンズ52が配置されている。

【0053】

ファラデー回転子20の磁壁Iとファラデー回転子21の磁壁Iは、共にYZ面にほぼ平行であり、例えば同一平面内に配置されている。ファラデー回転子20の磁壁Iとファラデー回転子21の磁壁Iは、電磁石(図示せず)に流す電流を制御することにより±X方向に移動するようになっている。ファラデー回転子20、21の磁区Aのファラデー回転角(+fs)は+45°であり、磁区Bのファラデー回転角(-fs)は-45°である。また1/2波長板24、25は、入射した光の偏光方位を+45°回転させるようになっている。すなわち、ファラデー回転子20の磁区Aに入射した偏光光は、ファラデー回転子20及び1/2波長板24を透過して偏光方位が90°回転させられて1/2波長板24から出射する。同様に、ファラデー回転子21の磁区Aに入射した偏光光は、ファラデー回転子21及び1/2波長板25を透過して偏光方位が90°回転させられて1/2波長板25から出射する。一方、ファラデー回転子20の磁区Bに入射した偏光光は、ファラデー回転子20及び1/2波長板24を透過して偏光方位が回転させられずに1/2波長板24から出射する。同様に、ファラデー回転子21の磁区Bに入射した偏光光は、ファラデー回転子21及び1/2波長板25を透過して偏光方位が回転させられずに1/2波長板25から出射する。なお、本例では1/2波長板24がファラデー回転子20の+Z方向側(ファラデー回転子20と複屈折板12の間)に配置されているが、1/2波長板24をファラデー回転子20の-Z方向側(複屈折板11とファラデー回転子20の間)に配置してもよい。また本例では1/2波長板25がファラデー回転子21の+Z方向側(ファラデー回転子21と複屈折板13の間)に配置されているが、1/2波長板25をファラデー回転子21の-Z方向側(複屈折板12とファラデー回転子21の間)に配置してもよい。

【0054】

複屈折板11、12、13は、図8に示した複屈折板BPと同じ光学軸の方向を有している。このため、複屈折板11、12、13の軸ずれ方向は全て同一になっている。複屈折板11の軸ずれ量D1は、複屈折板13の軸ずれ量D3と同一になっている。すなわち複屈折板11、13は、同一の軸ずれ方向及び同一の軸ずれ量を有し、例えば同一の結晶から同一形状に切り出した同一仕様の素子が用いられる。また、複屈折板12の軸ずれ方向は複屈折板11、13の軸ずれ方向と同一であり、複屈折板12の軸ずれ量D2は複屈折板11、13の軸ずれ量D1、D3の2倍になっている(D1:D2:D3=1:2:1)。なお、軸ずれ量D1、D2、D3の関係は上記に限られず、軸ずれ量D1、D3の和と軸ずれ量D2とがほぼ等しければよい(D1+D3=D2)。

【0055】

10

20

30

40

50

また複屈折板 11、12、13は、その軸ずれ方向がファラデー回転子 20の磁壁 I 及びファラデー回転子 21の磁壁 I にほぼ平行になるように配置されている。これにより、ファラデー回転子 20の2つの光透過領域は、ファラデー回転子 20の磁壁 I との間の距離が互いにほぼ等しくなっている。同様に、ファラデー回転子 21の2つの光透過領域は、ファラデー回転子 21の磁壁 I との間の距離が互いにほぼ等しくなっている。

【0056】

次に、本実施の形態による透過型可変光アッテネータ 1の動作について説明する。まず、ファラデー回転子 20の2つの光透過領域とファラデー回転子 21の2つの光透過領域とが磁区 A の領域に完全に包含された第 1の状態について説明する。第 1の状態は、電磁石に通電されず永久磁石によってのみファラデー回転子 20、21に磁界が印加されている状態である。図 9(a)、(b)に示すように、光入射ポート P1(1)から入射した光は、光 L20として複屈折板 11に入射する。複屈折板 11に入射した光 L20は、常光 L21aと異常光 L21bとに分離して複屈折板 11から出射する。すなわち常光成分の光 L21aは複屈折板 11を直進し、異常光成分の光 L21bは複屈折板 11で -Y 方向に軸ずれ量 D1だけ軸ずれする。複屈折板 11から出射した2つの光 L21a、L21bは、ファラデー回転子 20に入射する。ここで、複屈折板 11を常光として透過した光 L21aがファラデー回転子 20を透過する光透過領域と、複屈折板 11を異常光として軸ずれして透過した光 L21bがファラデー回転子 20を透過する光透過領域とは、共に磁区 A の領域に包含されている。このため、ファラデー回転子 20に入射した2つの光 L21a、L21bは、ファラデー回転子 20及び 1/2波長板 24を透過し、偏光方位を 90°回転させられて 1/2波長板 24から出射して複屈折板 12にそれぞれ入射する。複屈折板 12の光学軸の方向は複屈折板 11の光学軸の方向と同じであるため、複屈折板 11を常光として透過して偏光方位が 90°回転した光 L21aは複屈折板 12を異常光として透過し、複屈折板 11を異常光として透過して偏光方位が 90°回転した光 L21bは複屈折板 12を常光として透過することになる。したがって、光 L21aは複屈折板 12で -Y 方向に軸ずれ量 D2だけ軸ずれし、光 L21bは複屈折板 12を直進する。

【0057】

複屈折板 12から出射した2つの光 L21a、L21bは、ファラデー回転子 21に入射する。ここで、複屈折板 12を異常光として透過した光 L21aがファラデー回転子 21を透過する光透過領域と、複屈折板 12を常光として透過した光 L21bがファラデー回転子 21を透過する光透過領域とは、共に磁区 A の領域に包含されている。このため、ファラデー回転子 21に入射した2つの光 L21a、L21bは、ファラデー回転子 21及び 1/2波長板 25を透過し、偏光方位を 90°回転させられて 1/2波長板 25から出射して複屈折板 13に入射する。複屈折板 13の光学軸の方向は複屈折板 11、12の光学軸の方向と同じであるため、複屈折板 12を異常光として透過して偏光方位が 90°回転した光 L21aは複屈折板 13を常光として透過し、複屈折板 12を常光として透過して偏光方位が 90°回転した光 L21bは複屈折板 13を異常光として透過することになる。したがって、光 L21aは複屈折板 13を直進し、光 L21bは複屈折板 13で -Y 方向に軸ずれ量 D3だけ軸ずれする。

【0058】

光 L21aは複屈折板 12で -Y 方向に軸ずれ量 D2だけ軸ずれしているのに対し、光 L21bは複屈折板 11で -Y 方向に軸ずれ量 D1だけ軸ずれし、さらに複屈折板 13で -Y 方向に軸ずれ量 D3だけ軸ずれしている。上述のように $D1 + D3 = D2$ であるため、2つの光 L21a、L21bは合波し、光 L22として複屈折板 13から出射する。光 L22は光出射ポート P2(2)に入射して外部に出射する。第 1の状態では光入射ポート P1(1)に入射した光は、偏光に依存せずに全て光出射ポート P2(2)から出射することになる。したがって、第 1の状態では光の減衰量は最小(ほぼ 0)になる。

【0059】

ここで、第 1の状態では光出射ポート P2(2)から光が入射した場合について説明する。光出射ポート P2(2)から入射した光は、複屈折板 13に入射する。複屈折板 13に

10

20

30

40

50

入射した光は、常光と異常光とに分離して複屈折板 1 3 から出射する。すなわち常光成分の光は複屈折板 1 3 を直進し、異常光成分の光は複屈折板 1 3 で + Y 方向に軸ずれ量 D_3 だけ軸ずれする。複屈折板 1 3 から出射した 2 つの光は、 $1/2$ 波長板 2 5 を透過してファラデー回転子 2 1 に入射する。ここで、複屈折板 1 3 を常光として透過した光がファラデー回転子 2 1 を透過する光透過領域と、複屈折板 1 3 を異常光として透過した光がファラデー回転子 2 1 を透過する光透過領域とは、共に磁区 A の領域に包含されている。ファラデー回転子 2 1 は非相反性を有しているので、ファラデー回転子 2 1 の光入出射面のいずれから光が入射しても上述の回転角の条件が保たれることを考慮すると、 $1/2$ 波長板 2 5 及びファラデー回転子 2 1 の磁区 A を透過した 2 つの光は、偏光方位を回転させられずにファラデー回転子 2 1 から出射する。ファラデー回転子 2 1 から出射した 2 つの光は、複屈折板 1 2 に入射する。複屈折板 1 2 の光学軸の方向は複屈折板 1 3 の光学軸の方向と同じであるため、複屈折板 1 3 を常光として透過した光は複屈折板 1 2 も常光として透過し、複屈折板 1 3 を異常光として透過した光は複屈折板 1 2 も異常光として透過する。したがって、複屈折板 1 3 を常光として透過した光は複屈折板 1 2 を直進し、複屈折板 1 3 を異常光として透過した光は複屈折板 1 2 で再び + Y 方向に軸ずれ量 D_2 だけ軸ずれする。

10

【0060】

複屈折板 1 2 から出射した 2 つの光は、 $1/2$ 波長板 2 4 を透過してファラデー回転子 2 0 に入射する。ここで、複屈折板 1 3、1 2 を常光として透過した光がファラデー回転子 2 0 を透過する光透過領域と、複屈折板 1 3、1 2 を異常光として透過した光がファラデー回転子 2 0 を透過する光透過領域とは、共に磁区 A の領域に包含されている。ファラデー回転子 2 0 は非相反性を有しているので、ファラデー回転子 2 0 の光入出射面のいずれから光が入射しても上述の回転角の条件が保たれることを考慮すると、 $1/2$ 波長板 2 4 及びファラデー回転子 2 0 の磁区 A を透過した 2 つの光は、偏光方位を回転させられずにファラデー回転子 2 0 から出射する。ファラデー回転子 2 0 から出射した 2 つの光は、複屈折板 1 1 に入射する。複屈折板 1 1 の光学軸の方向は複屈折板 1 3、1 2 の光学軸の方向と同じであるため、複屈折板 1 3、1 2 を常光として透過した光は複屈折板 1 1 も常光として透過し、複屈折板 1 3、1 2 を異常光として透過した光は複屈折板 1 1 も異常光として透過する。したがって、複屈折板 1 3、1 2 を常光として透過した光は複屈折板 1 1 を直進し、複屈折板 1 3、1 2 を異常光として透過した光は複屈折板 1 1 で再び + Y 方向に軸ずれ量 D_1 だけ軸ずれする。

20

30

【0061】

複屈折板 1 3 を常光として透過した光は、複屈折板 1 2、1 1 も常光として透過するので、複屈折板 1 3、1 2、1 1 を軸ずれせずに透過することになる。これに対し、複屈折板 1 3 を異常光として透過した光は、複屈折板 1 2、1 1 も異常光として透過するので、複屈折板 1 3、1 2、1 1 を透過することによって + Y 方向に軸ずれ量 ($D_3 + D_2 + D_1$) だけ軸ずれすることになる。したがって、複屈折板 1 3 から出射した 2 つの光は合波せず、またいずれの光も光入射ポート P 1 (1) に入射しない。光出射ポート P 2 (2) に入射した光は光入射ポート P 1 (1) から全く出射しないことになるので、可変光アッテネータ 2 が光アイソレータとして機能していることが分かる。

40

【0062】

次に、ファラデー回転子 2 0 の 2 つの光透過領域とファラデー回転子 2 1 の 2 つの光透過領域とが磁区 B の領域に完全に包含された第 2 の状態について説明する。第 2 の状態は、電磁石のコイルに大電流が流され、電磁石と永久磁石によってファラデー回転子 2 0、2 1 に磁界が印加されている状態である。図 9 (c) に示すように、光入射ポート P 1 (1) から入射した光は、光 L 2 3 として複屈折板 1 1 に入射する。複屈折板 1 1 に入射した光 L 2 3 は、常光 L 2 4 a と異常光 L 2 4 b とに分離して複屈折板 1 1 から出射する。すなわち常光成分の光 L 2 4 a は複屈折板 1 1 を直進し、異常光成分の光 L 2 4 b は複屈折板 1 1 で - Y 方向に軸ずれ量 D_1 だけ軸ずれする。複屈折板 1 1 から出射した 2 つの光 L 2 4 a、L 2 4 b は、ファラデー回転子 2 0 に入射する。ここで、複屈折板 1 1 を常光

50

として透過した光 L 2 4 a がファラデー回転子 2 0 を透過する光透過領域と、複屈折板 1 1 を異常光として軸ずれして透過した光 L 2 4 b がファラデー回転子 2 0 を透過する光透過領域とは、共に磁区 B の領域に包含されている。このため、ファラデー回転子 2 0 に入射した 2 つの光 L 2 4 a、L 2 4 b は、ファラデー回転子 2 0 及び 1 / 2 波長板 2 4 を透過し、偏光方位を回転させられずに 1 / 2 波長板 2 4 から出射して複屈折板 1 2 に入射する。複屈折板 1 2 の光学軸の方向は複屈折板 1 1 の光学軸の方向と同じであるため、複屈折板 1 1 を常光として透過した光 L 2 4 a は複屈折板 1 2 も常光として透過し、複屈折板 1 1 を異常光として透過した光 L 2 4 b は複屈折板 1 2 も異常光として透過することになる。したがって、光 L 2 4 a は複屈折板 1 2 を直進し、光 L 2 4 b は複屈折板 1 2 で - Y 方向に軸ずれ量 D 2 だけさらに軸ずれする。

10

【 0 0 6 3 】

複屈折板 1 2 から出射した 2 つの光 L 2 4 a、L 2 4 b は、ファラデー回転子 2 1 に入射する。ここで、複屈折板 1 2 を常光として透過した光 L 2 4 a がファラデー回転子 2 1 を透過する光透過領域と、複屈折板 1 2 を異常光として透過した光 L 2 4 b がファラデー回転子 2 1 を透過する光透過領域とは、共に磁区 B の領域に包含されている。このため、ファラデー回転子 2 1 に入射した 2 つの光 L 2 4 a、L 2 4 b は、ファラデー回転子 2 1 及び 1 / 2 波長板 2 5 を透過し、偏光方位を回転させられずに 1 / 2 波長板 2 5 から出射して複屈折板 1 3 に入射する。複屈折板 1 3 の光学軸の方向は複屈折板 1 1、1 2 の光学軸の方向と同じであるため、複屈折板 1 2 を常光として透過した光 L 2 4 a は複屈折板 1 3 も常光として透過し、複屈折板 1 2 を異常光として透過した光 L 2 4 b は複屈折板 1 3 も異常光として透過することになる。したがって、光 L 2 4 a は複屈折板 1 3 を直進し、光 L 2 4 b は複屈折板 1 3 で - Y 方向に軸ずれ量 D 3 だけさらに軸ずれする。

20

【 0 0 6 4 】

光 L 2 4 a は複屈折板 1 1、1 2、1 3 を軸ずれせずに透過するのに対し、光 L 2 4 b は複屈折板 1 1、1 2、1 3 を透過することによって - Y 方向に軸ずれ量 (D 1 + D 2 + D 3) だけ軸ずれすることになる。このため、2 つの光 L 2 4 a、L 2 4 b は合波せずに複屈折板 1 3 から異なる光路上に出射する。これらの光 L 2 4 a、L 2 4 b は光出射ポート P 2 (2) に入射せず、外部に出射しない。第 2 の状態で光入射ポート P 1 (1) に入射した光は、偏光に依存せず光出射ポート P 2 (2) から全く出射しないことになる。したがって、第 2 の状態では光の減衰量は最大になる。

30

【 0 0 6 5 】

このように可変光アッテネータ 2 は、第 1 の状態では光の減衰量がほぼ 0 になり、第 2 の状態では光の減衰量が最大になる。また可変光アッテネータ 2 は、電磁石のコイルに流す電流を制御して磁壁 I を移動させ、光透過領域内の磁区構造を第 1 の状態と第 2 の状態との間で徐々に変化させることによって光の減衰量を連続的に変化させることができる。

【 0 0 6 6 】

本実施の形態による可変光アッテネータ 2 によれば、上記第 1 の実施の形態と同様に光透過領域内の磁区構造を変化させる方式としたため、小型で高速な磁気光学光部品が実現できる。

【 0 0 6 7 】

また本実施の形態では、複屈折板 1 1、1 2、1 3 での軸ずれ方向は Y 方向であり、ファラデー回転子 2 0 の磁壁 I 及びファラデー回転子 2 1 の磁壁 I は Y Z 面に平行である。図 9 (a) に示すように、磁壁 I に垂直な X Z 面に射影した 2 つの光 L 2 1 a、L 2 1 b の光路は一致している。複屈折板 1 1、1 2、1 3 での軸ずれ方向と磁壁 I とは平行であるため、分離された 2 つの光 L 2 1 a、L 2 1 b はファラデー回転子 2 0、2 1 の同一の磁区を通り、同一の光学効果を受けるようになっていく。したがって、本実施の形態によれば偏波依存性の小さい可変光アッテネータ 2 を実現できる。また、光 L 2 1 a と光 L 2 1 b は、光路長が等しくなっており、偏波モード分散もない。さらに、図 9 の構成は、図 7 の構成を 2 段にしており、50 dB 以上の非常に高い減衰量が得られるので、光シャッタとしても使用できる。第 1 の実施の形態によれば、入射偏光が 90° 回転して出射され

40

50

るが、本実施の形態によれば、入射偏光は元の状態に戻されて出射されるので、入射光と出射光の偏光方向が保存される。

【 0 0 6 8 】

〔 第 3 の実施の形態 〕

次に、本発明の第 3 の実施の形態による磁気光学光部品について図 1 0 乃至図 1 3 を用いて説明する。図 1 0 は、本実施の形態の前提として、透過光量をモニタするモニタ P D (フォトダイオード) 3 2 を上記第 1 の実施の形態による可変光アッテネータ 1 に追加した構成を示している。図 1 0 では、図 7 と同様に座標系をとっている。図 1 0 に示すように、複屈折板 1 2 とレンズ 5 2 との間には、ガラス板 3 0 が配置されている。ガラス板 3 0 は、X Y 面を + X 方向に見て X 軸について時計回りに 4 5 ° 回転させた面に平行に配置され、+ Z 方向に進む光の一部を + Y 方向に反射させるようになっている。ガラス板 3 0 の + Y 方向には、ガラス板 3 0 で反射した光を受光するモニタ P D 3 2 が配置されている。モニタ P D 3 2 で光の強度を検出することにより、可変光アッテネータ 1 を透過する透過光量をモニタできるようになっている。

10

【 0 0 6 9 】

図 1 1 は、本実施の形態の前提として、モニタ P D 3 2 を上記第 2 の実施の形態による可変光アッテネータ 2 に追加した構成を示している。図 1 1 では、図 7 と同様に座標系をとっている。図 1 1 に示すように、複屈折板 1 3 とレンズ 5 2 との間にはガラス板 3 0 が配置されている。ガラス板 3 0 は、X Y 面を + X 方向に見て X 軸について時計回りに 4 5 ° 回転させた面に平行に配置され、+ Z 方向に進む光の一部を + Y 方向に反射させるようになっている。ガラス板 3 0 の + Y 方向には、ガラス板 3 0 で反射した光を受光するモニタ P D 3 2 が配置されている。モニタ P D 3 2 で光の強度を検出することにより、可変光アッテネータ 2 を透過する透過光量をモニタできるようになっている。

20

【 0 0 7 0 】

ところが、図 1 0 及び図 1 1 に示す構成では、光出射ポート P 2 (2) に結合する光 (図中実線で示す) だけでなく、光出射ポート P 2 (2) に結合しない光 (図中破線で示す) もモニタ P D 3 2 に入射してしまうため、透過光量を正しくモニタすることが困難であるという問題が生じる。光出射ポート P 2 (2) に結合する光のみをモニタ P D 3 2 に入射させるには、モニタ P D 3 2 の受光面やガラス板 3 0 を小さくし、さらにモニタ P D 3 2 やガラス板 3 0 を精密に位置調整する必要がある。このため、モニタ P D 3 2 を備えた可変光アッテネータ 2 を作製する工程が煩雑になってしまうという問題が生じる。

30

【 0 0 7 1 】

図 1 2 は、上記の問題を解決する本実施の形態による磁気光学光部品として可変光アッテネータ 3 の構成を模式的に示している。図 1 2 では、図 7 と同様に座標系をとっている。図 1 2 に示すように、可変光アッテネータ 3 は、複屈折板 1 1 と、複屈折板 1 1 の + Z 方向に配置された 2 枚の 1 / 2 波長板 2 6、2 7 とを有している。1 / 2 波長板 2 6 は複屈折板 1 1 を常光として透過した光の偏光方位を + 4 5 ° 回転させ、1 / 2 波長板 2 7 は複屈折板 1 1 を異常光として透過した光の偏光方位を - 4 5 ° 回転させるようになっている。これにより 1 / 2 波長板 2 6 を透過した光の偏光方位と 1 / 2 波長板 2 7 を透過した光の偏光方位とが一致する。なお 1 / 2 波長板は、複屈折板 1 1 を常光として透過した光の偏光方位と、複屈折板 1 1 を異常光として透過した光の偏光方位とを一致させるように配置すればよい。したがって、例えば複屈折板 1 1 を常光として透過した光の光路上に光の偏光方位を + 9 0 ° 回転させる 1 / 2 波長板 2 6 を配置すれば、複屈折板 1 1 を異常光として透過した光の光路上に 1 / 2 波長板 2 7 を配置しなくてもよい。1 / 2 波長板 2 6、2 7 の + Z 方向には、ファラデー回転子 2 0 が配置されている。ファラデー回転子 2 0 には、第 1 の実施の形態と同様に、不図示の磁界印加機構により所定の分布の磁界が印加され、磁区構造が形成されている。Y Z 面に平行な磁壁 I (図示せず) は、電磁石のコイルに流す電流を制御することにより ± X 方向に移動できるようになっている。ファラデー回転子 2 0 の光透過領域内の磁区構造を徐々に変化させることによって光の減衰量を連続的に変化させることができる。ファラデー回転子 2 0 の + Z 方向には、偏光板 (偏光ガラ

40

50

ス) 34 が配置されている。偏光板 34 は、光入射ポート P1 (1) からの光のうち、光出射ポート P2 (2) に結合しない偏光成分の光を吸収するようになっている。偏光板 34 の +Z 方向には 2 枚の 1/2 波長板 28、29 が配置され、1/2 波長板 28、29 の +Z 方向には複屈折板 12 が配置されている。1/2 波長板 28 は、偏光板 34 を透過した光が複屈折板 12 に異常光として入射するように偏光方位を回転させるようになっている。1/2 波長板 29 は、偏光板 34 を透過した光が複屈折板 12 に常光として入射するように偏光方位を回転させるようになっている。なお、複屈折板 12 の向きを調整すれば、1/2 波長板 28、29 はどちらか一方のみでも可能である。複屈折板 12 の +Z 方向には、光の一部を取り出す光学素子であるガラス板 30 が配置されている。ガラス板 30 は、XY 面を +X 方向に見て X 軸について時計回りに 45° 回転させた面に平行に配置され、+Z 方向に進む光の一部を +Y 方向に反射させるようになっている。ガラス板 30 の +Y 方向には、ガラス板 30 で反射した光を受光して強度を検出するモニタ PD (受光部) 32 が配置されている。モニタ PD 32 で光の強度を検出することにより、可変光アッテネータ 2 を透過する透過光量をモニタできるようになっている。

10

【0072】

本実施の形態による可変光アッテネータ 3 によれば、上記第 1 の実施の形態と同様に光透過領域内の磁区構造を変化させる方式としたため、小型で高速な磁気光学光部品が実現できる。

【0073】

また、本実施の形態では、光出射ポート P2 (2) に結合しない光は偏光板 34 で吸収される。したがって、複屈折板 12 から出射する光は全て光出射ポート P2 (2) に結合するようになっているため、可変光アッテネータ 3 の透過光量をモニタするのが容易になる。

20

【0074】

図 13 は、本実施の形態による磁気光学光部品の变形例として可変光アッテネータ 3' の構成を模式的に示している。図 13 では、図 7 と同様に座標系をとっている。図 13 に示すように、可変光アッテネータ 3' は、複屈折板 11 と、複屈折板 11 の +Z 方向に配置された 2 枚の 1/2 波長板 26、27 とを有している。1/2 波長板 26 は複屈折板 11 を常光として透過した光の偏光方位を +45° 回転させ、1/2 波長板 27 は複屈折板 11 を異常光として透過した光の偏光方位を -45° 回転させるようになっている。これにより、1/2 波長板 26 を透過した光の偏光方位と 1/2 波長板 27 を透過した光の偏光方位とが一致する。1/2 波長板 26、27 の +Z 方向には、ファラデー回転子 20、偏光板 34、ファラデー回転子 21、及び偏光板 35 がこの順に配置されている。偏光板 34、35 は、光入射ポート P1 (1) 側からの光のうち、光出射ポート P2 (2) に結合しない偏光成分の光を吸収するようになっている。偏光板 35 の +Z 方向には 2 枚の 1/2 波長板 28、29 が配置され、1/2 波長板 28、29 の +Z 方向には複屈折板 12 が配置されている。1/2 波長板 28 は、偏光板 35 を透過した光が複屈折板 12 に異常光として入射するように偏光方位を回転させるようになっている。1/2 波長板 29 は、偏光板 35 を透過した光が複屈折板 12 に常光として入射するように偏光方位を回転させるようになっている。複屈折板 12 の +Z 方向には、ガラス板 30 が配置されている。ガラス板 30 は、XY 面を +X 方向に見て X 軸について時計回りに 45° 回転させた面に平行に配置され、+Z 方向に進む光の一部を +Y 方向に反射させるようになっている。ガラス板 30 の +Y 方向には、ガラス板 30 で反射した光をモニタするモニタ PD 32 が配置されている。モニタ PD 32 で光の強度を検出することにより、可変光アッテネータ 2 を透過する透過光量をモニタできるようになっている。

30

40

【0075】

本变形例では、光出射ポート P2 (2) に結合しない光は偏光板 34、35 で吸収される。したがって、複屈折板 12 から出射する光は全て光出射ポート P2 (2) に結合するようになっているため、可変光アッテネータ 3' の透過光量をモニタするのが容易になる。

50

【 0 0 7 6 】

〔 第 4 の 実 施 の 形 態 〕

次に、本発明の第 4 の実施の形態による磁気光学光部品について図 1 4 乃至図 2 0 を用いて説明する。図 1 4 は、本実施の形態による磁気光学光部品として反射型可変光アッテネータ 4 の構成を模式的に示している。図 1 4 では、光の進行方向に Z 軸をとり、外部からの光が反射型可変光アッテネータ 4 の備える 2 面反射体（反射部）3 8 に向かう方向を + Z 方向としている。また、反射型可変光アッテネータ 4 の備えるファラデー回転子 2 0 の磁壁 I が Y Z 面に平行になるように Y 軸をとり、Y Z 面に直交する方向に X 軸をとっている。図 1 4 (a) は反射型可変光アッテネータを + Y 方向に見た構成を示し、図 1 4 (b) は反射型可変光アッテネータを - X 方向に見た構成を示している。

10

【 0 0 7 7 】

図 1 4 (a)、(b) に示すように、反射型可変光アッテネータ 4 は、2 本の光ファイバ 4 1、4 2 に接続されている。光ファイバ 4 1 の - Z 側の端部は、外部から光が入射する光入射ポート P 1 (1) になっている。光ファイバ 4 2 の + Z 側の端部は、外部に光を出射する光出射ポート P 2 (2) になっている。各光ファイバ 4 1、4 2 の + Z 方向には、光ファイバ 4 1、4 2 から出射した発散光を平行光に変換するレンズ 5 1、5 2 がそれぞれ配置されている。

【 0 0 7 8 】

レンズ 5 1 の + Z 方向には複屈折板 1 4 が配置され、レンズ 5 2 の + Z 方向には複屈折板 1 6 が配置されている。2 つの複屈折板 1 4、1 6 は X Y 面に平行に隣接配置されて、Z 軸に垂直な光入出射面を有している。複屈折板 1 4 の光学軸 O A 1 4 (不図示) の向き及び異常光の軸ずれ方向は、図 8 に示した複屈折板 B P のそれらと同じである。また、複屈折板 1 6 の光学軸 O A 1 6 (不図示) の向き及び異常光の軸ずれ方向は、複屈折板 1 4 を Z 軸回りに 1 8 0 ° 回転した状態に等しい。複屈折板 1 4、1 6 の + Z 方向であってレンズ 5 1 に対応する位置には 1 / 2 波長板 3 6 が配置され、レンズ 5 2 に対応する位置には 1 / 2 波長板 3 7 が配置されている。1 / 2 波長板 3 6、3 7 の + Z 方向には、ファラデー回転子 2 0 が配置されている。ファラデー回転子 2 0 には、不図示の磁界印加機構により所定の分布の磁界が印加され、磁区構造が形成されている。Y Z 面に平行な磁壁 I は、電磁石のコイルに流す電流を制御することにより ± X 方向 (図中矢印で示す) に移動できるようにになっている。

20

30

【 0 0 7 9 】

ファラデー回転子 2 0 の + Z 方向には、複屈折板 1 5 が配置されている。複屈折板 1 5 の光学軸 O A 1 5 (不図示) は X Z 面内にあり、X 軸とのなす角度は + Y 方向に見て Y 軸について反時計回りに約 4 5 ° になっている。複屈折板 1 5 の + Z 側には、例えば直角プリズム等の 2 面反射体 3 8 が配置されている。2 面反射体 3 8 は、2 面反射により光路を変更する機能を有する。2 面反射体 3 8 は、図 1 4 に示すような直角プリズム以外に、2 枚の反射鏡を組み合わせた構造でもよい。

【 0 0 8 0 】

複屈折板 1 4 により分離した 2 つの光がファラデー回転子 2 0 をそれぞれ透過する 2 つの光透過領域は、磁壁 I との間の距離が互いに等しくなっている。また、2 面反射体 3 8 で反射して光路が変更された 2 つの光が再度ファラデー回転子 2 0 を透過する 2 つの光透過領域も、磁壁 I との間の距離が互いに等しくなっている。

40

【 0 0 8 1 】

次に、本実施の形態による反射型可変光アッテネータ 4 の動作について説明する。図 1 5 乃至図 2 0 は、反射型可変光アッテネータ 4 を構成する各光学素子を通過する光の偏光状態を + Z 方向に見た図である。図 1 5 乃至図 2 0 の (a) は、図 1 4 に示すように、複屈折板 1 4、1 6 の - Z 側の光入出射面 Z 1 での光の偏光状態を示している。図 1 5 乃至図 2 0 の (b) は、複屈折板 1 4、1 6 の + Z 側の光入出射面 Z 2 での光の偏光状態を示している。図 1 5 乃至図 2 0 の (c) は、ファラデー回転子 2 0 の - Z 側の光入出射面 Z 3 での光の偏光状態を示している。図 1 5 乃至図 2 0 の (d) は、ファラデー回転子 2 0

50

の + Z 側の光入出射面 Z 4 での光の偏光状態を示している。図 15 乃至図 20 の (e) は、複屈折板 15 の + Z 側の光入出射面 Z 5 での光の偏光状態を示している。

【0082】

図 15 乃至図 20 では、理解を容易にするために、複屈折板 14、16、1/2 波長板 36、37、ファラデー回転子 20、及び複屈折板 15 を + Z 方向に見た状態と、2 面反射体 38 を - Y 方向に見た状態とを併せて模式的に図示している。また、各 (a) ~ (e) には各光の位置を示すために仮想方眼を示している。また、各光の偏光方位は両矢印で示している。

【0083】

まず、図 15 を用いて、不図示の磁界印加機構によりファラデー回転子 20 に磁区 A が形成されている状態（第 1 の状態）における光入射ポート P 1 (1) から入射した光の状態について説明する。図 15 は、光入射ポート P 1 (1) から入射して光出射ポート P 2 (2) から外部に出射する光を示している。図 15 (a) の左側に示すように、光入射ポート P 1 (1) から入射した光 L 3 1 は、複屈折板 14 に入射する。図 15 (b) の左側に示すように、複屈折板 14 に入射した光 L 3 1 は、常光 L 3 2 a と矢印 C 1 1 方向へ軸ずれした異常光 L 3 2 b とに分離し、複屈折板 14 から出射する。次いで、常光成分の光 L 3 2 a は 1/2 波長板 36 に入射し、異常光成分の光 L 3 2 b は 1/2 波長板 37 に入射する。図 15 (c) の左側に示すように、光 L 3 2 a は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 45° 回転した光 L 3 3 a として 1/2 波長板 36 から出射する。光 L 3 2 b は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について反時計回りに 45° 回転した光 L 3 3 b として 1/2 波長板 37 から出射する。光 L 3 3 a、L 3 3 b の偏光方位は同一になる。次に、光 L 3 3 a、L 3 3 b はファラデー回転子 20 の磁区 A に入射する。図 15 (d) の左側に示すように、光 L 3 3 a、L 3 3 b は、それぞれ偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 45° 回転した光 L 3 4 a、L 3 4 b となってファラデー回転子 20 から出射する。これにより、光 L 3 4 a、L 3 4 b の偏光方位は、光 L 3 4 a、L 3 4 b の進行方向に平行な直線と複屈折板 15 の光学軸に平行な直線とが交差して形成される平面に垂直になる。図 15 (e) の左側に示すように、光 L 3 4 a、L 3 4 b は、複屈折板 15 の一方の表面に入射して常光となって、共に軸ずれせずに直進して複屈折板 15 の他方の表面から光 L 3 5 a、L 3 5 b として出射する。光 L 3 5 a、L 3 5 b は 2 面反射体 38 で反射して、図 15 (e) の右側に示すように、それぞれ光路が変更された光 L 3 6 a、L 3 6 b として複屈折板 15 の他方の表面に入射する。

【0084】

図 15 (d) の右側に示すように、光 L 3 6 a、L 3 6 b は、軸ずれせずに直進して複屈折板 15 の他方の表面から光 L 3 7 a、L 3 7 b として出射する。光 L 3 7 a、L 3 7 b は、ファラデー回転子 20 の磁区 A に入射する。ここで、光 L 3 7 a の入射位置と図 15 (d) の左側に示す光 L 3 4 a の出射位置との距離、及び光 L 3 7 b の入射位置と図 15 (d) の左側に示す光 L 3 4 b の出射位置との距離は、光のビーム径の 0.8 倍以上になっている。図 15 (c) の右側に示すように、光 L 3 7 a、L 3 7 b は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 45° 回転した光 L 3 8 a、L 3 8 b としてファラデー回転子 20 から出射する。光 L 3 8 a は 1/2 波長板 36 に入射し、光 L 3 8 b は 1/2 波長板 37 に入射する。図 15 (b) の右側に示すように、光 L 3 8 a は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について反時計回りに 45° 回転した光 L 3 9 a として 1/2 波長板 36 から出射する。光 L 3 8 b は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 45° 回転した光 L 3 9 b として 1/2 波長板 37 から出射する。光 L 3 9 a は複屈折板 16 に入射して異常光となり、光 L 3 9 b は複屈折板 16 に入射して常光となる。図 15 (a) の右側に示すように、光 L 3 9 a は矢印 C 1 3 の逆方向に軸ずれして光 L 3 9 b と合波し、光 L 4 0 として複屈折板 16 から出射する。光 L 4 0 は、光出射ポート P 2 (2) に入射して外部に出射する。したがって、光入射ポート P 1 (1) に入射した光は、偏光に依存せずに全て光出射ポート P 2 (2) から出射することになる。

【0085】

次に、図 16 を用いて、不図示の磁界印加機構により、ファラデー回転子 20 の + X 側の領域に磁区 A が形成され、- X 側の領域に磁区 B が形成されている状態（第 2 の状態）における光入射ポート P 1（1）から入射した光の状態について説明する。図 16 は、光入射ポート P 1（1）から入射した光を示している。図 16（a）の左側に示すように、光入射ポート P 1（1）から入射した光 L 4 1 は、複屈折板 14 に入射する。図 16（b）の左側に示すように、光 L 4 1 は常光 L 4 2 a と矢印 C 1 1 方向へ軸ずれした異常光 L 4 2 b とに分離し、複屈折板 14 から出射する。次いで、常光成分の光 L 4 2 a は 1 / 2 波長板 36 に入射し、異常光成分の光 L 4 2 b は 1 / 2 波長板 37 に入射する。図 16（c）の左側に示すように、光 L 4 2 a は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 45° 回転した光 L 4 3 a として 1 / 2 波長板 36 から出射する。光 L 4 2 b は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について反時計回りに 45° 回転した光 L 4 3 b として 1 / 2 波長板 37 から出射する。光 L 4 3 a、L 4 3 b の偏光方位は同一になる。次に、光 L 4 3 a、L 4 3 b はファラデー回転子 20 の磁区 A に入射する。図 16（d）の左側に示すように、光 L 4 3 a、L 4 3 b は、それぞれ偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 45° 回転した光 L 4 4 a、L 4 4 b となってファラデー回転子 20 から出射する。これにより、光 L 4 4 a、L 4 4 b の偏光方位は、光 L 4 4 a、L 4 4 b の進行方向に平行な直線と複屈折板 15 の光学軸に平行な直線とが交差して形成される平面に垂直になる。図 16（e）の左側に示すように、光 L 4 4 a、L 4 4 b は、複屈折板 15 の一方の表面に入射して常光となって、共に軸ずれせずに直進して複屈折板 15 の他方の表面から光 L 4 5 a、L 4 5 b として出射する。光 L 4 5 a、L 4 5 b は 2 面反射体 38 で反射して、図 16（e）の右側に示すように、それぞれ光路が変更された光 L 4 6 a、L 4 6 b として複屈折板 15 の他方の表面に入射する。

【0086】

図 16（d）の右側に示すように、光 L 4 6 a、L 4 6 b は、軸ずれせずに直進して複屈折板 15 の他方の表面から光 L 4 7 a、L 4 7 b として出射する。光 L 4 7 a、L 4 7 b は、ファラデー回転子 20 の磁区 B に入射する。ここで、光 L 4 7 a の入射位置と図 16（d）の左側に示す光 L 4 4 a の出射位置との距離、及び光 L 4 7 b の入射位置と図 15（d）の左側に示す光 L 4 4 b の出射位置との距離は、光のビーム径の 0.8 倍以上になっている。図 16（c）の右側に示すように、光 L 4 7 a、L 4 7 b は、偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について反時計回りに 45° 回転した光 L 4 8 a、L 4 8 b としてファラデー回転子 20 から出射する。光 L 4 8 a は 1 / 2 波長板 36 に入射し、光 L 4 8 b は 1 / 2 波長板 37 に入射する。図 16（b）の右側に示すように、光 L 4 8 a は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について反時計回りに 45° 回転した光 L 4 9 a として 1 / 2 波長板 36 から出射する。光 L 4 8 b は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 45° 回転した光 L 4 9 b として 1 / 2 波長板 37 から出射する。光 L 4 9 a は複屈折板 16 に入射して常光となり、光 L 4 9 b は複屈折板 16 に入射して異常光となる。図 16（a）の右側に示すように、光 L 4 9 a は軸ずれせずに光 L 5 0 a として複屈折板 16 から出射し、光 L 4 9 b は矢印 C 1 3 の逆方向に軸ずれして光 L 5 0 b として複屈折板 16 から出射する。光 L 5 0 a、L 5 0 b は合波せず、いずれも光出射ポート P 2（2）に入射しない。したがって、光入射ポート P 1（1）に入射した光は、偏光に依存せずに光出射ポート P 2（2）から出射しないことになる。

【0087】

次に、図 17 を用いて、不図示の磁界印加機構により、ファラデー回転子 20 に磁区 B が形成されている状態（第 3 の状態）における光入射ポート P 1（1）から入射した光の状態について説明する。図 17 は、光入射ポート P 1（1）から入射した光を示している。図 17（a）の左側に示すように、光入射ポート P 1（1）から入射した光 L 5 1 は、複屈折板 14 に入射して、図 17（b）の左側に示すように、常光 L 5 2 a と矢印 C 1 1 方向へ軸ずれした異常光 L 5 2 b とに分離し、複屈折板 14 から出射する。次いで、常光成分の光 L 5 2 a は 1 / 2 波長板 36 に入射し、異常光成分の光 L 5 2 b は 1 / 2 波長板 37 に入射する。図 17（c）の左側に示すように、光 L 5 2 a は偏光方位が + Z 方向に

見てZ軸について時計回りに45°回転した光L53aとして1/2波長板36から出射する。光L52bは偏光方位が+Z方向に見てZ軸について反時計回りに45°回転した光L53bとして1/2波長板37から出射する。光L53a、L53bの偏光方位は同一になる。次に、光L53a、L53bはファラデー回転子20の磁区Bに入射する。図17(d)の左側に示すように、光L53a、L53bは、それぞれ偏光方位が+Z方向に見てZ軸について反時計回りに45°回転した光L54a、L54bとなってファラデー回転子20から出射する。これにより、光L54a、L54bの偏光方位は、光L54a、L54bの進行方向に平行な直線と複屈折板15の光学軸に平行な直線とが交差して形成される平面に平行になる。図17(e)の左側に示すように、光L54a、L54bは、複屈折板15の一方の表面に入射して異常光となって、矢印C12の方向に軸ずれして複屈折板15の他方の表面から光L55a、L55bとして出射する。光L55a、L55bは2面反射体38で反射して、図17(e)の右側に示すように、それぞれ光路が変更された光L56a、L56bとして複屈折板15の他方の表面に入射する。

10

【0088】

図17(d)の右側に示すように、光L56a、L56bは、矢印C12の逆方向に軸ずれして複屈折板15の他方の表面から光L57a、L57bとして出射する。光L57a、L57bはファラデー回転子20の磁区Bに入射する。図17(c)の右側に示すように、光L57a、L57bは偏光方位が+Z方向に見てZ軸について反時計回りに45°回転した光L58a、L58bとしてファラデー回転子20から出射する。光L58aは1/2波長板36に入射し、光L58bは1/2波長板37に入射する。図17(b)の右側に示すように、光L58aは偏光方位が+Z方向に見てZ軸について反時計回りに45°回転した光L59aとして1/2波長板36から出射する。光L58bは偏光方位が+Z方向に見てZ軸について時計回りに45°回転した光L59bとして1/2波長板37から出射する。光L59aは複屈折板16に入射して異常光となり、光L59bは複屈折板16に入射して常光となる。図17(a)の右側に示すように、光L59aは矢印C13の逆方向に軸ずれして光L59bと合波し、光L60として複屈折板16から出射する。光L60は、光出射ポートP2(2)に入射しない。したがって、光入射ポートP1(1)に入射した光は、偏光に依存せずに光出射ポートP2(2)から出射しないことになる。

20

【0089】

次に、図18を用いて、第1の状態における光出射ポートP2(2)から入射した光の状態について説明する。図18は、光出射ポートP2(2)から入射した光を示している。図18(a)の右側に示すように、光出射ポートP2(2)から入射した光L61は、複屈折板16に入射する。図18(b)の右側に示すように、光L61は常光L62aと矢印C13方向へ軸ずれした異常光L62bとに分離し、複屈折板16から出射する。次いで、常光成分の光L62aは1/2波長板37に入射し、異常光成分の光L62bは1/2波長板36に入射する。図18(c)の右側に示すように、光L62aは偏光方位が+Z方向に見てZ軸について反時計回りに45°回転した光L63aとして1/2波長板37から出射する。光L62bは、偏光方位が+Z方向に見てZ軸について時計回りに45°回転した光L63bとして1/2波長板36から出射する。光L63a、L63bの偏光方位は同一になる。次に、光L63a、L63bは、ファラデー回転子20の磁区Aに入射する。図18(d)の右側に示すように、光L63a、L63bは、それぞれ偏光方位が+Z方向に見てZ軸について時計回りに45°回転した光L64a、L64bとなってファラデー回転子20から出射する。これにより、光L64a、L64bの偏光方位は、光L64a、L64bの進行方向に平行な直線と複屈折板15の光学軸に平行な直線とが交差して形成される平面に平行になる。図18(e)の右側に示すように、光L64a、L64bは、複屈折板15の一方の表面に入射して異常光となって、矢印C12の方向に軸ずれして複屈折板15の他方の表面から光L65a、L65bとして出射する。光L65a、L65bは2面反射体38で反射して、図18(e)の左側に示すように、それぞれ光路が変更された光L66a、L66bとして複屈折板15の他方の表面に入射す

30

40

50

る。

【0090】

図18(d)の左側に示すように、光L66a、L66bは、矢印C12の逆方向に軸ずれして複屈折板15の他方の表面から光L67a、L67bとして出射する。光L67a、L67bは、ファラデー回転子20の磁区Aに入射する。図18(c)の左側に示すように、光L67a、L67bは、偏光方位が+Z方向に見てZ軸について時計回りに45°回転した光L68a、L68bとしてファラデー回転子20から出射する。光L68aは1/2波長板37に入射し、光L68bは1/2波長板36に入射する。図18(b)の左側に示すように、光L68aは偏光方位が+Z方向に見てZ軸について時計回りに45°回転した光L69aとして1/2波長板37から出射する。光L68bは、偏光方位が+Z方向に見てZ軸について反時計回りに45°回転した光L69bとして1/2波長板36から出射する。光L69aは複屈折板14に入射して異常光となり、光L69bは複屈折板14に入射して常光となる。図18(a)の左側に示すように、光L69aは矢印C11の逆方向に軸ずれして光L69bと合波し、光L70として複屈折板14から出射する。光L70は、光入射ポートP1(1)に入射しない。したがって、光出射ポートP2(2)に入射した光は、偏光に依存せずに光入射ポートP1(1)から出射しないことになる。

10

【0091】

次に、図19を用いて、第2の状態における光出射ポートP2(2)から入射した光の状態について説明する。図19は、光出射ポートP2(2)から入射した光を示している。図19(a)の右側に示すように、光出射ポートP2(2)から入射した光L71は、複屈折板16に入射する。図19(b)の右側に示すように、光L71は常光L72aと矢印C13方向へ軸ずれた異常光L72bとに分離し、複屈折板16から出射する。次いで、常光成分の光L72aは1/2波長板37に入射し、異常光成分の光L72bは1/2波長板36に入射する。図19(c)の右側に示すように、光L72aは偏光方位が+Z方向に見てZ軸について反時計回りに45°回転した光L73aとして1/2波長板37から出射する。光L72bは、偏光方位が+Z方向に見てZ軸について時計回りに45°回転した光L73bとして1/2波長板36から出射する。光L73a、L73bの偏光方位は同一になる。次に、光L73a、L73bはファラデー回転子20の磁区Bに入射する。図19(d)の右側に示すように、光L73a、L73bは、それぞれ偏光方位が+Z方向に見てZ軸について反時計回りに45°回転した光L74a、L74bとなってファラデー回転子20から出射する。これにより、光L74a、L74bの偏光方位は、光L74a、L74bの進行方向に平行な直線と複屈折板15の光学軸に平行な直線とが交差して形成される平面に垂直になる。図19(e)の右側に示すように、光L74a、L74bは、複屈折板15の一方の表面に入射して常光となって、軸ずれせずに複屈折板15の他方の表面から光L75a、L75bとして出射する。光L75a、L75bは2面反射体38で反射して、図19(e)の左側に示すように、それぞれ光路が変更された光L76a、L76bとして複屈折板15の他方の表面に入射する。

20

30

【0092】

図19(d)の左側に示すように、光L76a、L76bは、軸ずれせずに複屈折板15の他方の表面から光L77a、L77bとして出射する。光L77a、L77bは、ファラデー回転子20の磁区Aに入射する。図19(c)の左側に示すように、光L77a、L77bは、偏光方位が+Z方向に見てZ軸について時計回りに45°回転した光L78a、L78bとしてファラデー回転子20から出射する。光L78aは1/2波長板37に入射し、光L78bは1/2波長板36に入射する。図19(b)の左側に示すように、光L78aは偏光方位が+Z方向に見てZ軸について時計回りに45°回転した光L79aとして1/2波長板37から出射する。光L78bは、偏光方位が+Z方向に見てZ軸について反時計回りに45°回転した光L79bとして1/2波長板36から出射する。光L79aは複屈折板14に入射して常光となり、光L79bは複屈折板14に入射して異常光となる。図19(a)の左側に示すように、光L79aは矢印C11の逆方向

40

50

に軸ずれして光 L 8 0 a として複屈折板 1 4 から出射し、光 L 7 9 b は軸ずれせずに光 L 8 0 b として複屈折板 1 4 から出射する。光 L 8 0 a、L 8 0 b は合波せず、いずれも光入射ポート P 1 (1) に入射しない。したがって、光出射ポート P 2 (2) に入射した光は、偏光に依存せずに光入射ポート P 1 (1) から出射しないことになる。

【 0 0 9 3 】

次に、図 2 0 を用いて、第 3 の状態における光出射ポート P 2 (2) から入射した光の状態について説明する。図 2 0 は、光出射ポート P 2 (2) から入射した光を示している。図 2 0 (a) の右側に示すように、光出射ポート P 2 (2) から入射した光 L 8 1 は、複屈折板 1 6 に入射する。図 2 0 (b) の右側に示すように、光 L 8 1 は常光 L 8 2 a と矢印 C 1 3 方向へ軸ずれした異常光 L 8 2 b とに分離し、複屈折板 1 6 から出射する。次いで、常光成分の光 L 8 2 a は 1 / 2 波長板 3 7 に入射し、異常光成分の光 L 8 2 b は 1 / 2 波長板 3 6 に入射する。図 2 0 (c) の右側に示すように、光 L 8 2 a は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について反時計回りに 4 5 ° 回転した光 L 8 3 a として 1 / 2 波長板 3 7 から出射する。光 L 8 2 b は、偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 4 5 ° 回転した光 L 8 3 b として 1 / 2 波長板 3 6 から出射する。光 L 8 3 a、L 8 3 b の偏光方位は同一になる。次に、光 L 8 3 a、L 8 3 b はファラデー回転子 2 0 の磁区 B に入射する。図 2 0 (d) の右側に示すように、光 L 8 3 a、L 8 3 b は、それぞれ偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について反時計回りに 4 5 ° 回転した光 L 8 4 a、L 8 4 b となってファラデー回転子 2 0 から出射する。これにより、光 L 8 4 a、L 8 4 b の偏光方位は、光 L 8 4 a、L 8 4 b の進行方向に平行な直線と複屈折板 1 5 の光学軸に平行な直線とが交差して形成される平面に垂直になる。図 2 0 (e) の右側に示すように、光 L 8 4 a、L 8 4 b は、複屈折板 1 5 の一方の表面に入射して常光となって、軸ずれせずに複屈折板 1 5 の他方の表面から光 L 8 5 a、L 8 5 b として出射する。光 L 8 5 a、L 8 5 b は 2 面反射体 3 8 で反射して、図 2 0 (e) の左側に示すように、それぞれ光路が変更された光 L 8 6 a、L 8 6 b として複屈折板 1 5 の他方の表面に入射する。

【 0 0 9 4 】

図 2 0 (d) の左側に示すように、光 L 8 6 a、L 8 6 b は、軸ずれせずに複屈折板 1 5 の他方の表面から光 L 8 7 a、L 8 7 b として出射する。光 L 8 7 a、L 8 7 b は、ファラデー回転子 2 0 の磁区 B に入射する。図 2 0 (c) の左側に示すように、光 L 8 7 a、L 8 7 b は、偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について反時計回りに 4 5 ° 回転した光 L 8 8 a、L 8 8 b としてファラデー回転子 2 0 から出射する。光 L 8 8 a は 1 / 2 波長板 3 7 に入射し、光 L 8 8 b は 1 / 2 波長板 3 6 に入射する。図 2 0 (b) の左側に示すように、光 L 8 8 a は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 4 5 ° 回転した光 L 8 9 a として 1 / 2 波長板 3 7 から出射する。光 L 8 8 b は、偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について反時計回りに 4 5 ° 回転した光 L 8 9 b として 1 / 2 波長板 3 6 から出射する。光 L 8 9 a は複屈折板 1 4 に入射して異常光となり、光 L 8 9 b は複屈折板 1 4 に入射して常光となる。図 2 0 (a) の左側に示すように、光 L 8 9 a は矢印 C 1 1 の逆方向に軸ずれして光 L 8 9 b と合波し、光 L 9 0 として複屈折板 1 6 から出射する。光 L 9 0 は、光入射ポート P 1 (1) に入射して外部に出射する。したがって、光出射ポート P 2 (2) に入射した光は、偏光に依存せずに光入射ポート P 1 (1) から出射することになる。

【 0 0 9 5 】

+ Z の進行方向の部分 (図 1 5 ~ 図 2 0 の左側) と、- Z の進行方向の部分 (図 1 5 ~ 図 2 0 の右側) の 2 つに分けて考えると、図 1 5 の第 1 の状態では、両方とも透過状態 (光入射ポート P 1 に入射して光出射ポート P 2 から出射するための光路上を光が通っている状態) になっており、図 1 6 の第 2 の状態では、+ Z 方向では透過状態であるが、- Z 方向では非透過状態になっている。ここで、非透過状態であっても波長温度変化や作製誤差に起因する複屈折板、波長板、ファラデー回転子の角度ずれにより、図 1 5 と同じ光路を進む光が少しは存在する。図 1 7 の第 3 の状態では、+ Z 方向及び - Z 方向の両方で非透過状態になっており、非常に高い減衰量が得られる。

10

20

30

40

50

【0096】

このように、本実施の形態による可変光アッテネータ4によれば、磁界印加機構により磁壁Iを移動させ、ファラデー回転子20の磁区構造を第1の状態、第2の状態と第3の状態との間で徐々に変化させることによって、光入射ポートP1(1)に入射した光の減衰量を連続的に変化させることができる。また可変光アッテネータ4は、第1及び第2の状態では光出射ポートP2(2)に入射した光は光入射ポートP1(1)から出射しないため、光アイソレータとしての機能も有する。さらに可変光アッテネータ4は、第3の状態では非常に高い減衰量が得られるので、光シャッタとしての機能も有する。

【0097】

本実施の形態による可変光アッテネータ4によれば、上記第1の実施の形態と同様に光透過領域内の磁区構造を変化させる方式としたため、小型で高速な磁気光学光部品が実現できる。 10

また、図9に示す透過型の構成と比較して、1枚のファラデー回転子20のみで2段型の構成を実現するとともに、一方のみに光ファイバ41、42が配置されているので、小型化、低価格化が容易という特徴を有している。

【0098】

図21は、本実施の形態による磁気光学光部品の変形例として反射型可変光アッテネータ4'の構成を模式的に示している。図21では図14と同様に座標系をとっている。図21(a)は反射型可変光アッテネータ4'を+Y方向に見た構成を示し、図21(b)は反射型可変光アッテネータ4'を-X方向に見た構成を示している。図21(a)、(b)に示すように、本変形例では、図14に示す反射型可変光アッテネータ4と比較すると、複屈折板15に代えて偏光ガラス17が配置され、2面反射体38に代えて反射膜18が配置されている。反射膜18は、例えば偏光ガラス17の+Z側表面に成膜されている。また本変形例では、光ファイバ41、42が複屈折板14、16の光入出射面に対してXZ面内で斜めに配置され、光を斜め入射させるようになっている。 20

【0099】

図22乃至図27は、反射型可変光アッテネータ4'を構成する各光学素子を通過する光の偏光状態を+Z方向に見た図である。図22乃至図27の(a)は、図21に示す複屈折板14、16の-Z側の光入出射面Z1での光の偏光状態を示している。図22乃至図27の(b)は、複屈折板14、16の+Z側の光入出射面Z2での光の偏光状態を示している。図22乃至図27の(c)は、ファラデー回転子20の-Z側の光入出射面Z3での光の偏光状態を示している。図22乃至図27の(d)は、ファラデー回転子20の+Z側の光入出射面Z4での光の偏光状態を示している。図22乃至図27の(e)は、偏光ガラス17の+Z側の光入出射面Z5での光の偏光状態を示している。 30

図22乃至図27では、理解を容易にするために、複屈折板14、16、1/2波長板36、37、ファラデー回転子20、偏光ガラス17及び反射膜18を+Z方向に見た状態を併せて模式的に図示している。また、偏光ガラス17の透過軸の方向を両矢印で表している。

【0100】

図22を用いて、不図示の磁界印加機構によりファラデー回転子20に磁区Aが形成されている状態(第1の状態)における光入射ポートP1(1)から入射した光の状態について説明する。図22は、光入射ポートP1(1)から入射して光出射ポートP2(2)から外部に出射する光を示している。図22(a)の左側に示すように、光入射ポートP1(1)から入射した光L131は、複屈折板14に入射する。図22(b)の左側に示すように、複屈折板14に入射した光L131は、常光L132aと矢印C11方向へ軸ずれした異常光L132bとに分離し、複屈折板14から出射する。次いで、常光成分の光L132aは1/2波長板36に入射し、異常光成分の光L132bは1/2波長板37に入射する。図22(c)の左側に示すように、光L132aは偏光方位が+Z方向に見てZ軸について時計回りに45°回転した光L133aとして1/2波長板36から出射する。光L132bは偏光方位が+Z方向に見てZ軸について反時計回りに45°回転 40 50

した光 L 1 3 3 b として 1 / 2 波長板 3 7 から出射する。光 L 1 3 3 a、L 1 3 3 b の偏光方位は同一になる。次に、光 L 1 3 3 a、L 1 3 3 b はファラデー回転子 2 0 の磁区 A に入射する。図 2 2 (d) の左側に示すように、光 L 1 3 3 a、L 1 3 3 b は、それぞれ偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 4 5 ° 回転した光 L 1 3 4 a、L 1 3 4 b となってファラデー回転子 2 0 から出射する。これにより、光 L 1 3 4 a、L 1 3 4 b の偏光方位は、偏光ガラス 1 7 の透過軸に平行になる。図 2 2 (e) の左側に示すように、光 L 1 3 4 a、L 1 3 4 b は偏光ガラス 1 7 の一方の表面に入射し、偏光ガラス 1 7 で吸収されずに透過して、他方の表面から光 L 1 3 5 a、L 1 3 5 b として出射する。光 L 1 3 5 a、L 1 3 5 b は反射膜 1 8 で反射して、図 2 2 (e) の右側に示すように、それぞれ光路が変更された光 L 1 3 6 a、L 1 3 6 b として偏光ガラス 1 7 の他方の表面に入射する。 10

【 0 1 0 1 】

図 2 2 (d) の右側に示すように、光 L 1 3 6 a、L 1 3 6 b は、偏光ガラス 1 7 の他方の表面から光 L 1 3 7 a、L 1 3 7 b としてそのまま出射する。光 L 1 3 7 a、L 1 3 7 b は、ファラデー回転子 2 0 の磁区 A に入射する。ここで、光 L 1 3 7 a の入射位置と図 2 2 (d) の左側に示す光 L 1 3 4 a の出射位置との距離、及び光 L 1 3 7 b の入射位置と図 2 2 (d) の左側に示す光 L 1 3 4 b の出射位置との距離は、光のビーム径の 0 . 8 倍以上になっている。図 2 2 (c) の右側に示すように、光 L 1 3 7 a、L 1 3 7 b は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 4 5 ° 回転した光 L 1 3 8 a、L 1 3 8 b としてファラデー回転子 2 0 から出射する。光 L 1 3 8 a は 1 / 2 波長板 3 6 に入射し、光 L 1 3 8 b は 1 / 2 波長板 3 7 に入射する。図 2 2 (b) の右側に示すように、光 L 1 3 8 a は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について反時計回りに 4 5 ° 回転した光 L 1 3 9 a として 1 / 2 波長板 3 6 から出射する。光 L 1 3 8 b は偏光方位が + Z 方向に見て Z 軸について時計回りに 4 5 ° 回転した光 L 1 3 9 b として 1 / 2 波長板 3 7 から出射する。光 L 1 3 9 a は複屈折板 1 6 に入射して異常光となり、光 L 1 3 9 b は複屈折板 1 6 に入射して常光となる。図 2 2 (a) の右側に示すように、光 L 1 3 9 a は矢印 C 1 3 の逆方向に軸ずれして光 L 1 3 9 b と合波し、光 L 1 4 0 として複屈折板 1 6 から出射する。光 L 1 4 0 は、光出射ポート P 2 (2) に入射して外部に出射する。したがって、光入射ポート P 1 (1) に入射した光は、偏光に依存せずに全て光出射ポート P 2 (2) から出射することになる。 20 30

【 0 1 0 2 】

図 2 3 は、ファラデー回転子 2 0 の + X 側の領域に磁区 A が形成され、- X 側の領域に磁区 B が形成されている状態 (第 2 の状態) における光入射ポート P 1 (1) から入射した光の状態を示し、図 2 4 は、ファラデー回転子 2 0 に磁区 B が形成されている状態 (第 3 の状態) における光入射ポート P 1 (1) から入射した光の状態を示している。また、図 2 5 乃至図 2 7 は、第 1 乃至第 3 の状態における光出射ポート P 2 (2) から入射した光の状態をそれぞれ示している。

【 0 1 0 3 】

図 2 3 乃至図 2 7 に示す光の状態は、図 1 6 乃至図 2 0 に示す光の状態とほぼ同様であるので詳しい説明を省略する。例えば図 2 3 に示す第 2 の状態における光の状態は、図 1 6 に示す光の状態と同様であり、光入射ポート P 1 (1) に入射した光は、偏光に依存せずに光出射ポート P 2 (2) から出射しない。 40

また、図 2 4 (a) ~ (d) の左側に示す第 3 の状態における光の状態は、図 1 7 (a) ~ (d) の左側に示す光の状態と同様である。ここで、図 2 4 (d) の左側に示す光 L 1 5 4 a、L 1 5 4 b の偏光方位は、偏光ガラス 1 7 の透過軸に垂直になる。したがって、光 L 1 5 4 a、L 1 5 4 b は偏光ガラス 1 7 で吸収され、偏光ガラス 1 7 を透過しない。なお、ファラデー回転子 2 0 の作製誤差や温度波長変化に伴うファラデー回転角の角度ずれ、又は各光学素子の光学軸の角度ずれ等によって、光 L 1 5 4 a、L 1 5 4 b の偏光方位が偏光ガラス 1 7 の透過軸に垂直にならず、一部の光が偏光ガラス 1 7 を透過してしまうこともあり得る。しかし偏光ガラス 1 7 を透過した光は、光出射ポート P 2 (2) に 50

入射しないようになっている。したがって、光入射ポート P 1 (1) に入射した光は、偏光に依存せずに光出射ポート P 2 (2) から出射しない。

【 0 1 0 4 】

図 2 5 (a) ~ (d) の右側に示す第 1 の状態における光の状態は、図 1 8 (a) ~ (d) の右側に示す光の状態と同様である。ここで、図 2 5 (d) の右側に示す光 L 1 6 4 a、L 1 6 4 b の偏光方位は、偏光ガラス 1 7 の透過軸に垂直になる。したがって、光 L 1 6 4 a、L 1 6 4 b は偏光ガラス 1 7 で吸収され、偏光ガラス 1 7 を透過しない。上記と同様に一部の光が偏光ガラス 1 7 を透過してしまうこともあり得るが、偏光ガラス 1 7 を透過した光は、光入射ポート P 1 (1) に入射しないようになっている。したがって、光出射ポート P 2 (2) に入射した光は、偏光に依存せずに光入射ポート P 1 (1) から出射しない。

10

図 2 6 に示す第 2 の状態における光の状態は、図 1 9 に示す光の状態と同様であり、光出射ポート P 2 (2) に入射した光は、偏光に依存せずに光入射ポート P 1 (1) から出射しない。

図 2 7 に示す第 3 の状態における光の状態は、図 2 0 に示す光の状態と同様であり、光出射ポート P 2 (2) に入射した光は、偏光に依存せずに光入射ポート P 1 (1) から出射する。

【 0 1 0 5 】

本変形例によれば、2 面反射体 3 8 を用いる必要がないことに加え、複屈折板 1 5 より厚さの薄い偏光ガラス 1 7 を用いているため、図 1 4 に示す構成よりさらに小型化、低価格化が可能である。

20

【 0 1 0 6 】

〔 第 5 の実施の形態 〕

次に、本発明の第 5 の実施の形態による磁気光学光部品について図 2 8 乃至図 3 4 を用いて説明する。図 2 8 は、本実施の形態による磁気光学光部品として透過型可変光アッテネータ 5 の要部構成を模式的に示している。図 2 8 では図 7 と同様に座標系をとっている。また、光ビームの中心軸上を $X = 0$ としている。図 2 8 に示すように、可変光アッテネータ 5 は、外部から光の入射する光入射ポート P 1 (図示せず) 側から順に、偏光子 6 1、ファラデー回転子 2 0、偏光子 6 2、ファラデー回転子 2 1、及び偏光子 6 3 を有している。ファラデー回転子 2 0、2 1 には、不図示の磁界印加機構により所定の分布の磁界が印加され、磁区構造が形成されている。ファラデー回転子 2 0 は、例えば磁化の向きを一樣に + Z 方向にした磁区 A 1 と、磁化の向きを一樣に - X 方向にした磁区 B 1 と、磁区 A 1、B 1 の境界であり Y Z 面に平行な磁壁 I 1 とを有している。ファラデー回転子 2 1 は、磁化の向きを一樣に磁区 A 1 の磁化の向きと同一にした磁区 A 2 と、磁化の向きを一樣に磁区 B 1 の磁化の向きと同一にした磁区 B 2 と、磁区 A 2、B 2 の境界であり Y Z 面に平行な磁壁 I 2 とを有している。ファラデー回転子 2 0 の磁壁 I 1 とファラデー回転子 2 1 の磁壁 I 2 とは、電磁石のコイルに流す電流を制御することにより $\pm X$ 方向に移動できるようになっている。磁壁 I 1、I 2 は例えば同一平面内に配置されておらず、図 2 8 に示す構成では磁壁 I 1 を含む平面が磁壁 I 2 を含む平面よりも + X 方向に配置されている。

30

40

【 0 1 0 7 】

ここで、ファラデー回転子 2 0 の磁区 A のファラデー回転角は + f_1 とし、磁区 B のファラデー回転角は - f_1 とする。また、ファラデー回転子 2 1 の磁区 A のファラデー回転角は + f_2 とし、磁区 B のファラデー回転角は - f_2 とする。偏光子 6 1 の光学軸と偏光子 6 2 の光学軸との間の相対角度を θ_1 とし、偏光子 6 2 の光学軸と偏光子 6 3 の光学軸との間の相対角度を θ_2 とする。また、ファラデー回転子 2 0 の磁壁 I 1 の X 座標を X_1 とし、ファラデー回転子 2 1 の磁壁 I 2 の X 座標を X_2 とする。

【 0 1 0 8 】

偏光子 6 1、6 2、6 3 の消光比がファラデー回転子 2 0、2 1 の消光比 S より十分大きいとすると、磁区 A i を通過した光の順方向 (+ Z 方向) 透過率 F_{ai} 、及び磁区 A i

50

を通過した光の逆方向（-Z方向）透過率 B_{ai} は、次式のようにになる。

$$F_{ai} = (1 - S) \cos^2(\theta_i - \theta_{fi}) + S \sin^2(\theta_i - \theta_{fi})$$

$$B_{ai} = (1 - S) \cos^2(-\theta_i - \theta_{fi}) + S \sin^2(-\theta_i - \theta_{fi})$$

【0109】

一方、磁区 B_i を通過した光の順方向透過率 F_{bi} 、及び磁区 B_i を通過した光の逆方向透過率 B_{bi} は、次式のようにになる。

$$F_{bi} = (1 - S) \cos^2(\theta_i + \theta_{fi}) + S \sin^2(\theta_i + \theta_{fi})$$

$$B_{bi} = (1 - S) \cos^2(-\theta_i + \theta_{fi}) + S \sin^2(-\theta_i + \theta_{fi})$$

【0110】

ここで $i = 1 \text{ or } 2$ である。これらの式より、 $B_{ai} = F_{bi}$ 、 $B_{bi} = F_{ai}$ の関係が成り立つ。例えば、 $\theta_i = \theta_{fi} = 45^\circ$ 、 $S = 0.001$ の場合、 $F_{ai} = B_{bi} = 0.999$ であり、 $F_{bi} = B_{ai} = 0.001$ である。

【0111】

2つのファラデー回転子 20、21 を通過する光の透過率は、通過する各磁区の透過率の積になる。例えば磁区 A_1 、 A_2 を通過する光の順方向透過率は $F_{a1} \times F_{a2}$ 、磁区 A_1 、 B_2 を通過する光の順方向透過率は $F_{a1} \times F_{b2}$ というようになる。

ここで、光ビームをガウシアンビームと仮定し、磁壁 I_1 、 I_2 の位置（X座標）が互いの相対的位置を保ちつつ可変である可変光アッテネータの順方向損失と逆方向損失とを算出した。 $\theta_1 = \theta_{f1} = \theta_2 = \theta_{f2} = 45^\circ$ とし、ファラデー回転子 20、21 の消光比を 0.001 とした。

以下では、可変光アッテネータとして、順方向損失が 0 ~ 10 dB の範囲を光量調整で使用すると考え、また、光アイソレータの機能としては最低 15 dB 以上の逆方向損失が必要と考えた。

【0112】

図 29 は、磁壁 I_1 と光透過領域との間の距離と磁壁 I_2 と光透過領域との間の距離との差がビーム径の 1.5 倍である可変光アッテネータ（ $(X_1 - X_2) / (\text{ビーム径}) = 1.5$ ）の順方向損失及び逆方向損失を示すグラフである。グラフの横軸はビーム径で規格化した磁壁 I_1 の X 座標（ $X_1 / (\text{ビーム径})$ ）を表し、縦軸は損失（dB）を表している。図 29 に示すように、順方向損失が 0 ~ 10 dB の範囲において、逆方向損失は 30 dB 以上の値が維持されている。したがって、この可変光アッテネータは光アイソレータとして機能している。

【0113】

図 30 は、磁壁 I_1 と光透過領域との間の距離と磁壁 I_2 と光透過領域との間の距離との差がビーム径の 0.8 倍である可変光アッテネータ（ $(X_1 - X_2) / (\text{ビーム径}) = 0.8$ ）の順方向損失及び逆方向損失を示すグラフである。図 30 に示すように、順方向損失が 0 ~ 10 dB の範囲において、逆方向損失は約 15 dB 以上の値が維持されている。したがって、この可変光アッテネータは光アイソレータとして機能している。

【0114】

図 31 は、磁壁 I_1 と光透過領域との間の距離と磁壁 I_2 と光透過領域との間の距離との差が 0 である可変光アッテネータ（ $(X_1 - X_2) / (\text{ビーム径}) = 0$ ）の順方向損失及び逆方向損失を示すグラフである。図 31 に示すように、順方向損失が 10 dB のときの逆方向損失は 1 dB 以下になっている。したがって、この可変光アッテネータは光アイソレータとして機能していない。

このように、磁壁 I_1 と光透過領域との間の距離と磁壁 I_2 と光透過領域との間の距離との差がビーム径の 0.8 倍以上であれば、光アイソレータとして機能する可変光アッテネータが得られる。

【0115】

図 32 は、本実施の形態による透過型可変光アッテネータ 5 の構成を示している。図 32 に示すように、可変光アッテネータ 5 は、偏光子 61、ファラデー回転子 20、偏光子 62、ファラデー回転子 21、及び偏光子 63 がこの順に並んで配置された光学素子を有

10

20

30

40

50

している。偏光子 6 1、6 2、6 3 としては、例えば、偏光ガラス、くさび複屈折偏光子、複屈折板等を用いることができる。

【0116】

また、可変光アッテネータ 5 は、ファラデー回転子 2 0、2 1 に対し光軸に平行な方向に飽和磁界を印加する永久磁石 6 6、6 7、6 8、6 9 と、ファラデー回転子 2 0、2 1 に対し光軸に平行な方向に可変磁界を印加する電磁石 7 0 とを有している。電磁石 7 0 はコの字状のヨーク 7 1 とヨーク 7 1 に巻き回されたコイル 7 2 とを有している。ヨーク 7 1 の一端部（図中左方）のうち図中上方には永久磁石 6 6 が埋め込まれ、図中下方には永久磁石 6 7 が埋め込まれている。ヨーク 7 1 の他端部（図中右方）のうち図中上方には永久磁石 6 8 が埋め込まれ、図中下方には永久磁石 6 9 が埋め込まれている。永久磁石 6 6、6 8 の磁極の向きは図中右向きであり、永久磁石 6 7、6 9 の磁極の向きは図中左向きである。永久磁石 6 8 は光軸との距離が永久磁石 6 6 より近く、永久磁石 6 7 は光軸との距離が永久磁石 6 9 より近くなっている。各永久磁石 6 6、6 7、6 8、6 9 の位置を調整することにより、2 つのファラデー回転子 2 0、2 1 の磁壁 I 1、I 2 の位置を調整できる。

10

【0117】

電磁石 7 0 のヨーク 7 1 両端部には、光を透過させるための光導入窓 7 3 がそれぞれ設けられている。偏光子 6 1、ファラデー回転子 2 0、偏光子 6 2、ファラデー回転子 2 1、及び偏光子 6 3 は、ヨーク 7 1 の両端部間に位置している。ヨーク 7 1 の一端部の光導入窓 7 3 から入射した光は、各光学素子の光軸を通してヨーク 7 1 の他端部の光導入窓 7 3 から射出するようになっている。電磁石 7 0 のコイル 7 2 に通電することによりヨーク 7 1 及びヨーク 7 1 両端部間の光学素子を通る閉磁路が形成されて、予め光軸に平行に飽和磁界が印加されているファラデー回転子 2 0、2 1 に対し、光軸に平行な所望の磁界を印加できるようになっている。これにより、ファラデー回転子 2 0、2 1 の磁壁 I 1、I 2 を移動させることができる。

20

【0118】

図 3 3 は、本実施の形態による磁気光学光部品の変形例として可変光アッテネータ 5 ' の構成を模式的に示している。図 3 3 に示すように、永久磁石 6 6、6 7、6 8、6 9 は不図示の電磁石 7 0 のヨーク 7 1 から離して配置してもよい。また、電磁石 7 0 を設けず、永久磁石 6 6、6 7、6 8、6 9 の位置を可変にすることによりファラデー回転子 2 0、2 1 の磁壁 I 1、I 2 を移動させるようにしてもよい。

30

【0119】

図 3 4 は、本実施の形態による磁気光学光部品の他の変形例として可変光アッテネータ 5 ' ' の構成を模式的に示している。図 3 4 に示すように、偏光子 6 1、ファラデー回転子 2 0、偏光子 6 2、ファラデー回転子 2 1、及び偏光子 6 3 は、光入出射面が光路に対して斜めに傾くように配置されている。本例では、各光学素子は図中上方の端部が右側に傾くように配置され、それぞれの光入出射面は互いにほぼ平行になっている。光ビームは各光学素子に入射する度に屈折するため、徐々に図中下方に移動している。これにより、ファラデー回転子 2 0 には光入出射面中央の領域に光ビームが入射するのに対して、ファラデー回転子 2 1 には光入出射面中央より下方の領域に光ビームが入射する。ファラデー回転子 2 0、2 1 には、共通の永久磁石 6 6、6 7 により磁界が印加されているが、ファラデー回転子 2 0 の磁壁 I 1 と光透過領域との距離と、ファラデー回転子 2 1 の磁壁 I 2 と光透過領域との距離とが互いに異なっている。各光学素子の傾斜角度を調整することにより、磁壁 I 1 と光透過領域との距離と、磁壁 I 2 と光透過領域との距離との差を調整できる。また、各光学素子を光路に対して斜めに傾くように配置することで、各光学素子からの反射戻り光が光導波路などの光導波機構（不図示）に結合することを防止できる。なお、本例では各光学素子の光入出射面は互いにほぼ平行になっているが、各光学素子の傾斜方向及び傾斜角度をそれぞれ独立に設定してもよい。また、各光学素子の傾斜方向及び傾斜角度を調整して、入射光と出射光の光軸を一致させるようにしてもよい。このようにすると、各光学素子に光を入出射させる例えば 2 本の光導波機構を同軸に配置できる

40

50

ので、組み立てやすくなる。

【0120】

図14及び図21に示す反射型可変光アッテネータ4、4'では、図28に示す2枚のファラデー回転子20、21が1枚のファラデー回転子20で構成されていると考えることができる。この場合は、+Z方向に進む光のファラデー回転子20における光透過領域と、反射部で反射して-Z方向に進む光のファラデー回転子20における光透過領域との距離が、光のビーム径の0.8倍以上であればよい。例えば、図15では、光L33aと光L38aとの距離、及び光L33bと光L38bとの距離を、共に光のビーム径の0.8倍以上にすることにより、光アイソレータとして機能する可変光アッテネータが得られる。2つの光透過領域間の距離は、図14に示す反射型可変光アッテネータ4では2面反
10
射体38への光の入射位置を変化させることにより、調整できる。また、図21に示す反射型可変光アッテネータ4'では、反射膜18への光の入射角度や反射膜18とファラデー回転子20の距離を変化させることにより、2つの光透過領域間の距離を調整できる。

【0121】

本実施の形態による可変光アッテネータ5、5'、5''によれば、上記第1の実施の形態と同様に光透過領域内の磁区構造を変化させる方式としたため、小型で高速な磁気光学部品が実現できる。

【0122】

また本実施の形態によれば、磁壁I1と光透過領域との間の距離と磁壁I2と光透過領域との間の距離との差をビーム径の0.8倍以上にすることにより、光アイソレータとし
20
て機能する可変光アッテネータが得られる。

【0123】

〔第6の実施の形態〕

次に、本発明の第6の実施の形態による磁気光学部品について図35乃至図37を用いて説明する。一般に、可変の光学特性を有する磁気光学部品は、電磁石のコイルに流す電流を制御することにより、ファラデー回転子に可変磁界を印加するようになっている。このため、磁気光学部品の消費電力が大きくなってしまいうという問題が生じる。この問題を解決するために、本実施の形態では、ファラデー回転子に磁壁Iを形成し、可変磁界を印加して磁壁Iを移動させることにより光学特性を可変にする磁壁移動方式の可変光アッテネータにおいて、ファラデー回転子を透過する光ビームのビーム径を小さくするこ
30
とを特徴としている。

【0124】

光ビームのビーム径を異ならせたときの可変光アッテネータの減衰量とコイルに流れる電流との関係について説明する。図35は、減衰量と電流との関係の測定に用いた可変光アッテネータを示している。図35に示すように、可変光アッテネータは、偏光子61、ファラデー回転子20、偏光子63がこの順に並んで配置された光学素子を有している。

【0125】

また、可変光アッテネータは、ファラデー回転子20に対し光軸に平行な方向に飽和磁界を印加する永久磁石66、67、68、69と、ファラデー回転子20に対し光軸に平行な方向に可変磁界を印加する電磁石70とを有している。電磁石70はコの字状のヨーク71とヨーク71に巻き回されたコイル72とを有している。ヨーク71の一端部（図中左方）のうち図中上方には永久磁石66が埋め込まれ、図中下方には永久磁石67が埋め込まれている。ヨーク71の他端部（図中右方）のうち図中上方には永久磁石68が埋め込まれ、図中下方には永久磁石69が埋め込まれている。永久磁石66、68の磁極の向きは図中右向きであり、永久磁石67、69の磁極の向きは図中左向きである。
40

【0126】

電磁石70のヨーク71両端部には、光を透過させるための光導入窓73がそれぞれ設けられている。偏光子61、ファラデー回転子20、偏光子63は、ヨーク71の両端部に位置している。ヨーク71の一端部の光導入窓73から入射した光は、各光学素子の光軸を
50
通ってヨーク71の他端部の光導入窓73から射出するようになっている。電磁石

70のコイル72に通電することによりヨーク71及びヨーク71両端部間の光学素子を通る閉磁路が形成されて、予め光軸に平行に飽和磁界が印加されているファラデー回転子20に対し、光軸に平行な所望の磁界を印加できるようになっている。これにより、ファラデー回転子20の磁壁Iを移動させることができる。

【0127】

図36は、ビーム径の違いによる電流と減衰量との関係を示すグラフである。横軸はコイル72に流す電流(mA)を表し、縦軸は可変光アッテネータを透過した光の減衰量(dB)を表している。線Eはビーム径が62 μ mの場合の電流と減衰量との関係を示し、線Fはビーム径が340 μ mの場合の電流と減衰量との関係を示している。図36の線Fに示すように、ビーム径が340 μ mの場合には減衰量30dBにおける電流は75mAであり、消費電力は118mWであった。一方、線Eに示すように、ビーム径が62 μ mの場合には減衰量30dBにおける電流は21mAであり、消費電力は9mWであった。光ビームのビーム径を小さく(例えば100 μ m以下)すると磁壁Iの移動量を小さくできるため、可変光アッテネータの消費電力を大幅に低減できる。

10

【0128】

図37は、光ビームのビーム径を小さくするのに有効でかつ小型化が可能なマイクロコリメータを備えた光導波機構の構成例を示している。図37(a)に示すように、コア40aを備えるシングルモードの光ファイバ40の先端部には、光ファイバ40と同軸の円柱形状を有する屈折率分布レンズ(GI(Gradient Index)レンズ)50が融着されて直接固定されている。GIレンズ50は、シングルモードの光ファイバ40の直径の1倍(例えば125 μ m)から4倍程度の範囲の直径を有している。光ファイバ40及びGIレンズ50は、互いに一体化されてレンズ付き光ファイバとして機能する。GIレンズ50は、その円柱軸に垂直な端面50aを有している。光ファイバ40からGIレンズ50に入射した光は平行光もしくは収束光に変換され、端面50aから端面50aに垂直な方向(光ファイバ40及びGIレンズ50の円柱軸に平行な方向)に出射する。GIレンズ50は、球面レンズ等と比較して外径を小さくできる。

20

【0129】

図37(b)は、マイクロコリメータを備えた光導波機構の構成の変形例を示している。図37(b)に示すように、GIレンズ50'の端面50a'は、円柱軸に対して斜めに研磨されている。この構成では、光ファイバ40からGIレンズ50'に入射した光は平行光に変換され、端面50a'から光ファイバ40及びGIレンズ50'の円柱軸に対して斜め方向に出射する。このため、光を光学素子の光入出射面に対して斜めに入射させる場合には、GIレンズ50'はGIレンズ50よりさらに適している。すなわち、GIレンズ50'を用いれば、光ファイバ40を光学素子の光入出射面に対して垂直に配置しても、端面50a'から所望の斜め方向に光を出射できるようになる。

30

【0130】

図37(c)は、マイクロコリメータを備えた光導波機構の構成の他の変形例を示している。図37(c)に示すように、GIレンズ50の代わりに小型の球レンズ59を光ファイバ40に固着したレンズ付き光ファイバも本実施の形態に好適である。

【0131】

図37(d)は、マイクロコリメータを備えた光導波機構の構成のさらに他の変形例を示している。図37(d)に示すように、コア40aが拡大されてレンズと同様の機能を有するコア拡大領域40bを先端近傍に備えるコア拡大(TEC; Thermal Expansion Core)ファイバ40'を用いることもできる。

40

【0132】

図38は、上記以外の変形例の光導波機構を備えた磁気光学光部品の構成を模式的に示している。図38に示すように、光導波路基板80は、図中中央部に形成された溝部84と、溝部84を介して対向し、導波する光のスポットサイズを拡大する一対のスポットサイズ拡大部82aを備えた光導波路(SSC: Spot Size Converter)82とを有している。溝部84には、スポットサイズ拡大部82a間に配置する偏光子

50

61、ファラデー回転子20、偏光子63等の光学素子が埋め込まれている。ここで図38中のスポットサイズ拡大部82aは、物理的なコアを表しているのではなく、光のスポットサイズ(電磁界分布)を表している。スポットサイズ拡大部82aの物理的なコアの幅は、他の領域でのコアの幅よりも太くなっている場合もあれば、細くなっている場合もある。また図38では、磁界印加機構の図示は省略している。このように、SSCを光導波機構として用いることもできる。

【0133】

本実施の形態による可変光アッテネータによれば、上記第1の実施の形態と同様に光透過領域内の磁区構造を変化させる方式としたため、小型で高速な磁気光学光部品が実現できる。

10

【0134】

また本実施の形態によれば、光ビームのビーム径を小さくすることにより磁壁の移動量を小さくできるため、低消費電力の磁気光学光部品が得られる。なお、従来の磁化回転方式の磁気光学光部品では、光ビームのビーム径に関わらずファラデー回転子の磁化を一緒に回転させているため、ビーム径を小さくしても低消費電力化は実現できない。

【0135】

〔第7の実施の形態〕

次に、本発明の第7の実施の形態による磁気光学光部品について図39及び図40を用いて説明する。図39は、本実施の形態による磁気光学光部品として可変光アッテネータ7の構成を示している。図40は、可変光アッテネータ7の電磁石及び光ファイバの構成を示している。図39及び図40では、光の進行方向にZ軸をとり、Z軸に直交する面内で互いに直交する2方向にX軸及びY軸をとっている。図39及び図40に示すように、可変光アッテネータ7は、偏光子61、ファラデー回転子20、偏光子62、ファラデー回転子21、及び偏光子63がこの順に並んで配置され、ガラス基板45上に固定された光学素子を有している。本例では各光学素子はそれぞれの光入出射面が光軸に対して斜めになるように配置されている。偏光子61、ファラデー回転子20、及び偏光子62はそれぞれの光入出射面が互いに平行になるように配置されている。ファラデー回転子21及び偏光子63は、それぞれの光入出射面が互いに平行になり、偏光子61、ファラデー回転子20、及び偏光子62の光入出射面とは非平行になるように配置されている。各光学素子は、先端部にマイクロコリメータを備える入力光ファイバ43及び出力光ファイバ44(光導波機構)の両先端部間に配置されている。なお光学素子の構成は一例であり、上記以外にも種々の構成を適用できる。

20

30

【0136】

また、可変光アッテネータ7は、ファラデー回転子20、21に対し光軸に平行な方向に飽和磁界を印加する直方体状の永久磁石66、67、68、69と、ファラデー回転子20、21に対し光軸に平行な方向に可変磁界を印加する電磁石70(図39ではヨーク71の端部71b、71cのみを示している)とを有している。永久磁石66、69の磁極の向き(磁化方向)は例えば図中右向きであり、永久磁石67、68の磁極の向きは図中左向きである。永久磁石66は光軸との距離が永久磁石68より近く、永久磁石69は光軸との距離が永久磁石67より近くなっている。各永久磁石66、67、68、69の位置を調整することにより、2つのファラデー回転子20、21の磁壁Iの位置をそれぞれ調整できる。電磁石70は、コの字状のヨーク71とヨーク71に巻き回されたコイル72とを有している。ヨーク71は、コイル72が巻き回された中央部71aと、光学素子を挟んで対向する両端部71b、71cとを有している。ヨーク71の一方の端部71bは入力光ファイバ43に沿ってほぼ平行に延びており、他方の端部71cは出力光ファイバ44に沿ってほぼ平行延びている。また、ヨーク71の中央部71a及びコイル72も入力光ファイバ43及び出力光ファイバ44に沿ってほぼ平行に延びている。電磁石70のコイル72に通電することによりヨーク71とヨーク71両端部71b、71c間の光学素子とを通る閉磁路が形成されて、予め光軸に平行に飽和磁界が印加されているファラデー回転子20、21に対し、光軸に平行な所望の磁界を印加できるようになっている

40

50

。これにより、ファラデー回転子 20、21 の磁壁 I を移動させることができる。

【0137】

本実施の形態による可変光アッテネータ 7 によれば、上記第 1 の実施の形態と同様に光透過領域内の磁区構造を変化させる方式としたため、小型で高速な磁気光学光部品が実現できる。

【0138】

また本実施の形態による可変光アッテネータ 7 は、入力光ファイバ 43 及び出力光ファイバ 44 に沿って延びるヨーク 71 及びコイル 72 を有している。本実施の形態のような光ファイバ付き光部品の場合、入力光ファイバ 43 及び出力光ファイバ 44 のためのスペースは必ず必要になるため、入力光ファイバ 43 及び出力光ファイバ 44 に沿ってヨーク 71 やコイル 72 を配置するのは光部品全体としての小型化のために極めて有効である。本実施の形態では、可変光アッテネータ 7 の Z 方向の長さが 40 mm であり、Y 方向の幅が 3.8 mm である。また、本実施の形態は、例えば Y 方向に複数個の可変光アッテネータ 7 を配列するアレイ化にも適している。

【0139】

〔第 8 の実施の形態〕

次に、本発明の第 8 の実施の形態による磁気光学光部品について図 41 及び図 42 を用いて説明する。図 41 は、本実施の形態による磁気光学光部品として、アレイ化された可変光アッテネータ 8 の構成を模式的に示している。光の進行方向に Z 軸をとり、Z 軸に直交する面内で互いに直交する 2 方向に X 軸及び Y 軸をとっている。図 41 に示すように、可変光アッテネータ 8 は、第 7 の実施の形態による可変光アッテネータ 7 と同様の磁界印加機構を有する 4 つの可変光アッテネータ 8a ~ 8d をアレイ化した構成を有している。可変光アッテネータ 8 には、Y 方向に並列する 4 組の入力光ファイバ 43a ~ 43d 及び出力光ファイバ 44a ~ 44d (光ファイバ対 (43a, 44a) ~ (43d, 44d)) が接続されている。可変光アッテネータ 8 は、入力光ファイバ 43a ~ 43d の端部と出力光ファイバ 44a ~ 44d の端部との間に、1 枚の偏光子 61、1 枚のファラデー回転子 20、及び 1 枚の偏光子 62 がこの順に配置された光学素子を有している。各光学素子は、4 つの可変光アッテネータ 8a ~ 8d で共有されるようになっている。なお光学素子の構成は一例であり、上記以外にも種々の構成を適用できる。

【0140】

図 42 は、ファラデー回転子 20 の磁区構造を示している。図 42 に示すように、所定の向きの磁極を有する複数の永久磁石 66、67、68、69 と電磁石 70 (図示せず) とにより、ファラデー回転子 20 には所定の分布の磁界が印加されるようになっている。これによって、ファラデー回転子 20 には、磁区 A、磁区 B 及び磁壁 I (Ia ~ Id) が複数形成される多磁区構造 (図 42 では磁化の向きを太矢印で示している) が形成される。ここで、磁壁 Ia ~ Id は、4 つの可変光アッテネータ 8a ~ 8d に対応してそれぞれ形成される。各可変光アッテネータ 8a ~ 8d の電磁石 70 のコイル 72 に流す電流を制御することによって、各磁壁 Ia ~ Id を ± Y 方向に移動させることができるようになっている。また、永久磁石 66、67、68、69 は、隣り合う可変光アッテネータ 8a ~ 8d 間で共有されるようになっている。例えば + Y 側の永久磁石 69 は、可変光アッテネータ 8a、8b で共有されている。

【0141】

本実施の形態による可変光アッテネータ 8 によれば、上記第 1 の実施の形態と同様に光透過領域内の磁区構造を変化させる方式としたため、小型で高速な磁気光学光部品が実現できる。

【0142】

また本実施の形態によれば、複数の可変光アッテネータを単に組み合わせた構成と比較すると、各光学素子や永久磁石を複数の可変光アッテネータ 8a ~ 8d で共有できるため部品点数が減少し、可変光アッテネータの小型化及び低価格化が実現できる。

【0143】

10

20

30

40

50

本発明は、上記実施の形態に限らず種々の変形が可能である。

例えば、上記実施の形態では、磁気光学素子に対し、光入出射面に垂直な方向の磁界を印加する磁界印加機構として永久磁石を用いているが、本発明はこれに限られない。例えば、永久磁石に代えて、永久磁石より保磁力が小さく磁化を反転できる半硬質磁石を用いてももちろんよい。

【0144】

また、上記実施の形態では可変光アッテネータを例に挙げたが、本発明はこれに限らず、光変調器、光スイッチなどの他の磁気光学光部品にも適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0145】

10

【図1】本発明の第1の実施の形態による磁気光学光部品の動作原理を説明する図である。

【図2】本発明の第1の実施の形態による磁気光学光部品の動作原理を説明する図である。

【図3】本発明の第1の実施の形態による磁気光学光部品の動作原理を説明する図である。

【図4】本発明の第1の実施の形態による磁気光学光部品に対する比較例を示す図である。

【図5】本発明の第1の実施の形態による磁気光学光部品に対する比較例を示す図である。

20

【図6】本発明の第1の実施の形態による磁気光学光部品に対する比較例を示す図である。

【図7】本発明の第1の実施の形態による磁気光学光部品として透過型可変光アッテネータの構成を示す図である。

【図8】複屈折板の光学軸について説明する図である。

【図9】本発明の第2の実施の形態による磁気光学光部品として透過型可変光アッテネータの構成を示す図である。

【図10】本発明の第3の実施の形態の前提として、透過光量をモニタするモニタPDを本発明の第1の実施の形態による可変光アッテネータに追加した構成を示す図である。

【図11】本発明の第3の実施の形態の前提として、透過光量をモニタするモニタPDを本発明の第2の実施の形態による可変光アッテネータに追加した構成を示す図である。

30

【図12】本発明の第3の実施の形態による磁気光学光部品として可変光アッテネータの構成を示す図である。

【図13】本発明の第3の実施の形態による磁気光学光部品として可変光アッテネータの構成の変形例を示す図である。

【図14】本発明の第4の実施の形態による磁気光学光部品として反射型可変光アッテネータの構成を示す図である。

【図15】本発明の第4の実施の形態による第1の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通過する光の偏光状態を示す図である。

【図16】本発明の第4の実施の形態による第2の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通過する光の偏光状態を示す図である。

40

【図17】本発明の第4の実施の形態による第3の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通過する光の偏光状態を示す図である。

【図18】本発明の第4の実施の形態による第1の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通過する光の偏光状態を示す図である。

【図19】本発明の第4の実施の形態による第2の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通過する光の偏光状態を示す図である。

【図20】本発明の第4の実施の形態による第3の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通過する光の偏光状態を示す図である。

【図21】本発明の第4の実施の形態による磁気光学光部品の変形例として反射型可変光

50

アッテネータの構成を示す図である。

【図 2 2】本発明の第 4 の実施の形態の変形例による第 1 の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通しての光の偏光状態を示す図である。

【図 2 3】本発明の第 4 の実施の形態の変形例による第 2 の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通しての光の偏光状態を示す図である。

【図 2 4】本発明の第 4 の実施の形態の変形例による第 3 の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通しての光の偏光状態を示す図である。

【図 2 5】本発明の第 4 の実施の形態の変形例による第 1 の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通しての光の偏光状態を示す図である。

【図 2 6】本発明の第 4 の実施の形態の変形例による第 2 の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通しての光の偏光状態を示す図である。 10

【図 2 7】本発明の第 4 の実施の形態の変形例による第 3 の状態における反射型可変光アッテネータを構成する各光学素子を通しての光の偏光状態を示す図である。

【図 2 8】本発明の第 5 の実施の形態による磁気光学光部品として透過型可変光アッテネータの要部構成を示す図である。

【図 2 9】磁壁 I 1 と磁壁 I 2 との距離がビーム径の 1.5 倍である可変光アッテネータの順方向損失及び逆方向損失を示すグラフである。

【図 3 0】磁壁 I 1 と磁壁 I 2 との距離がビーム径の 0.8 倍である可変光アッテネータの順方向損失及び逆方向損失を示すグラフである。

【図 3 1】磁壁 I 1 と磁壁 I 2 とが同一平面内に存在する可変光アッテネータの順方向損失及び逆方向損失を示すグラフである。 20

【図 3 2】本発明の第 5 の実施の形態による磁気光学光部品として透過型可変光アッテネータの構成を示す図である。

【図 3 3】本発明の第 5 の実施の形態による磁気光学光部品の変形例として透過型可変光アッテネータの構成を示す図である。

【図 3 4】本発明の第 5 の実施の形態による磁気光学光部品の他の変形例として透過型可変光アッテネータの構成を示す図である。

【図 3 5】ビーム径の違いによる電流と減衰量との関係を測定した可変光アッテネータの構成を示す図である。

【図 3 6】ビーム径の違いによる電流と減衰量との関係を示すグラフである。 30

【図 3 7】光ビームのビーム径を小さくするのに有効でかつ小型化が可能なマイクロコリメータを備えた光導波機構の構成例を示す図である。

【図 3 8】光導波機構を備えた磁気光学光部品の構成を模式的に示す図である。

【図 3 9】本発明の第 7 の実施の形態による磁気光学光部品として透過型可変光アッテネータの構成を示す図である。

【図 4 0】本発明の第 7 の実施の形態による磁気光学光部品の電磁石及び光ファイバの構成を示す図である。

【図 4 1】本発明の第 8 の実施の形態による磁気光学光部品として、アレイ化された可変光アッテネータの構成を示す図である。

【図 4 2】ファラデー回転子の磁区構造を示す図である。 40

【図 4 3】従来の磁気光学光部品として可変光アッテネータの概略構造及び動作原理を説明する図である。

【符号の説明】

【0146】

1、2、3、3'、5、5'、5''、7、8 透過型可変光アッテネータ

4、4' 反射型可変光アッテネータ

11、12、13、14、15、16、BP 複屈折板

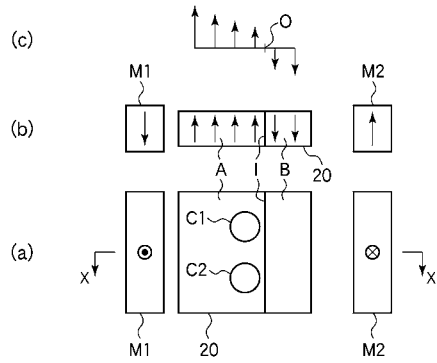
17 偏光ガラス

18 反射膜

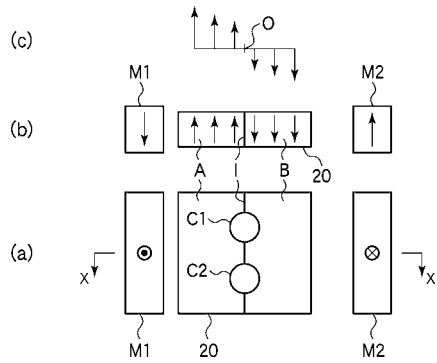
20、21 ファラデー回転子

2 4、2 5、2 6、2 7、2 8、2 9、3 6、3 7	1 / 2 波長板	
3 0	ガラス板	
3 2	モニタ P D	
3 4、3 5	偏光板	
3 8	2 面反射体	
4 0、4 1、4 2	光ファイバ	
4 0 a	コア	
4 0 b	コア拡大領域	
4 3	入力光ファイバ	
4 4	出力光ファイバ	10
4 5	ガラス基板	
5 0、5 0 '	G I レンズ	
5 0 a、5 0 a '	端面	
5 1、5 2	レンズ	
5 9	球レンズ	
6 1、6 2、6 3	偏光子	
6 6、6 7、6 8、6 9	永久磁石	
7 0	電磁石	
7 1	ヨーク	
7 1 a	中央部	20
7 1 b、7 1 c	端部	
7 2	コイル	
7 3	光導入窓	
8 0	光導波路基板	
8 2	光導波路	
8 2 a	スポットサイズ拡大部	
8 4	溝部	
B P a、B P b	光入出射面	

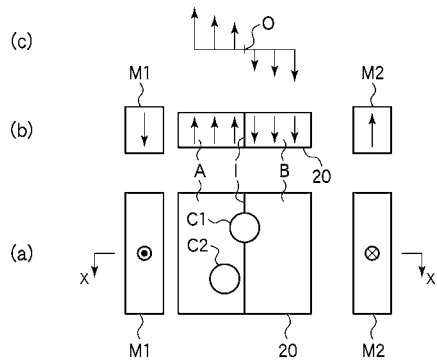
【図 1】



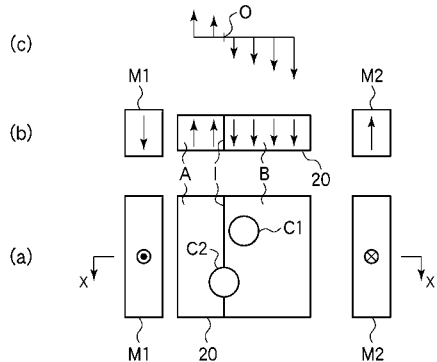
【図 2】



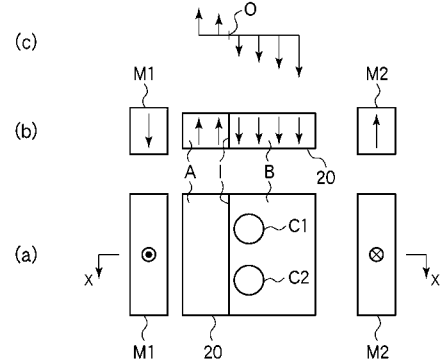
【図 5】



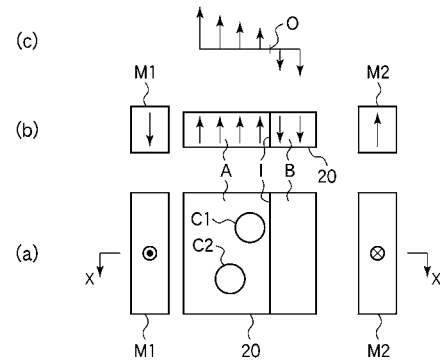
【図 6】



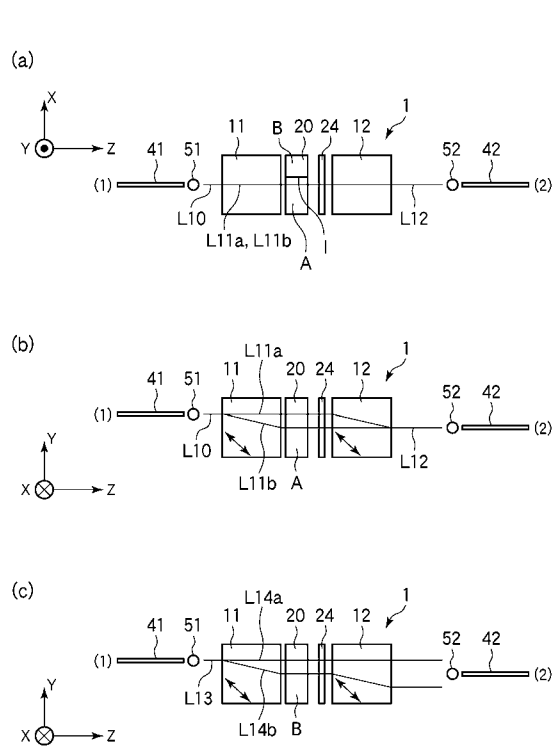
【図 3】



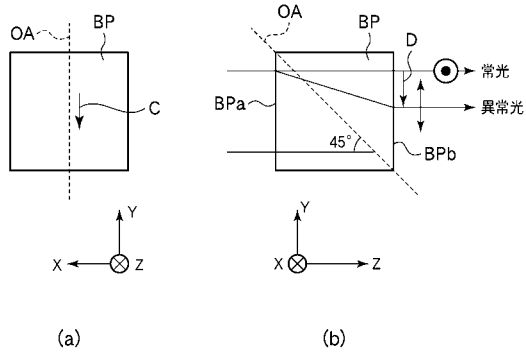
【図 4】



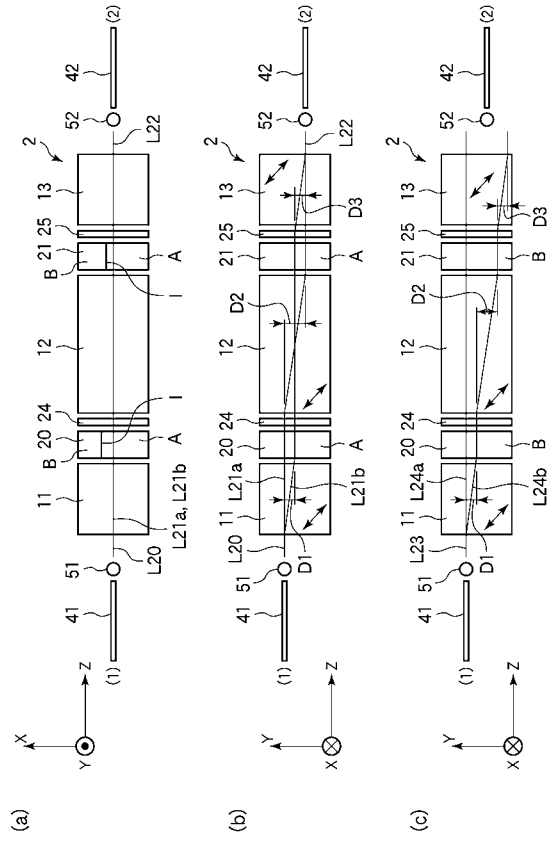
【図 7】



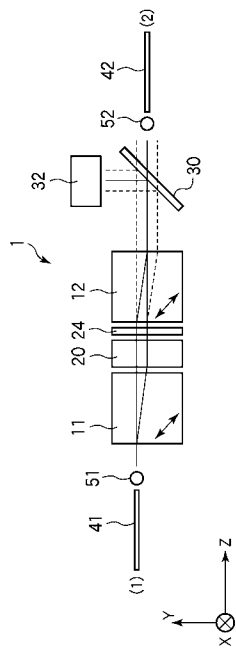
【図 8】



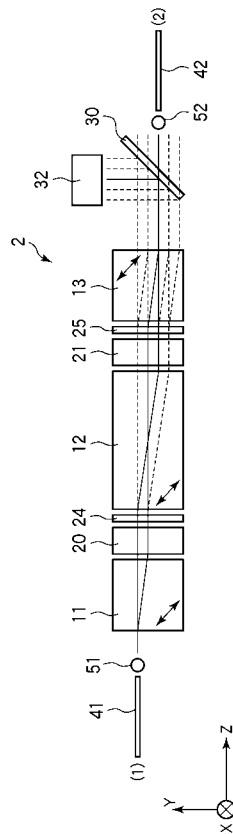
【図 9】



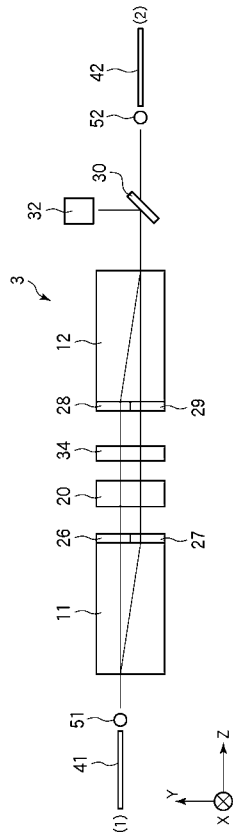
【図 10】



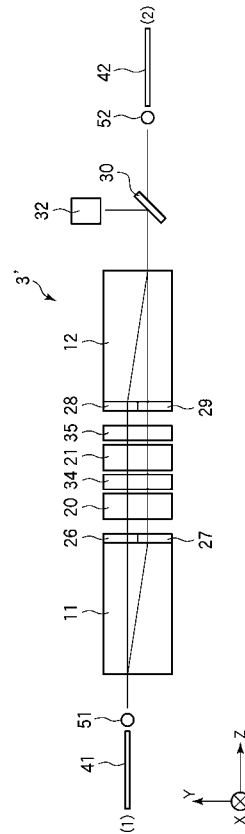
【図 11】



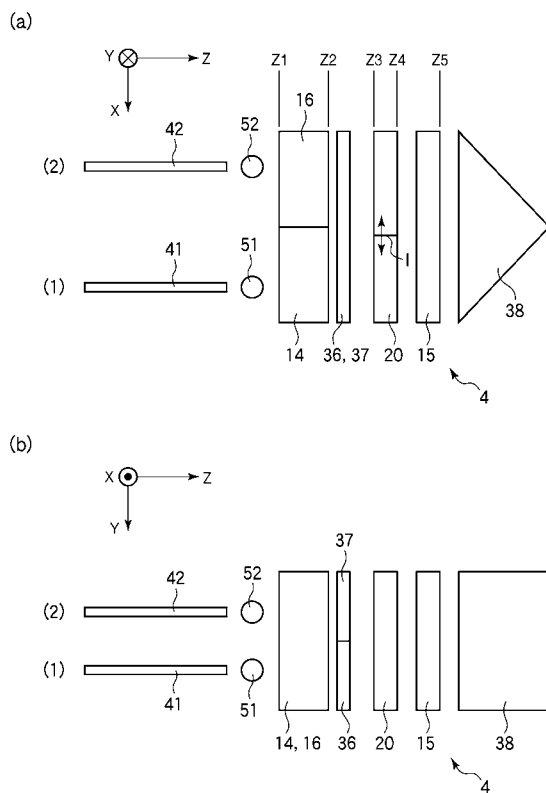
【図 1 2】



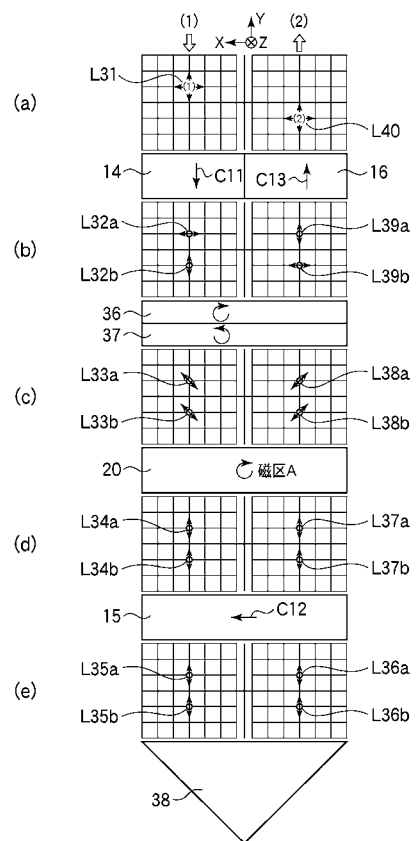
【図 1 3】



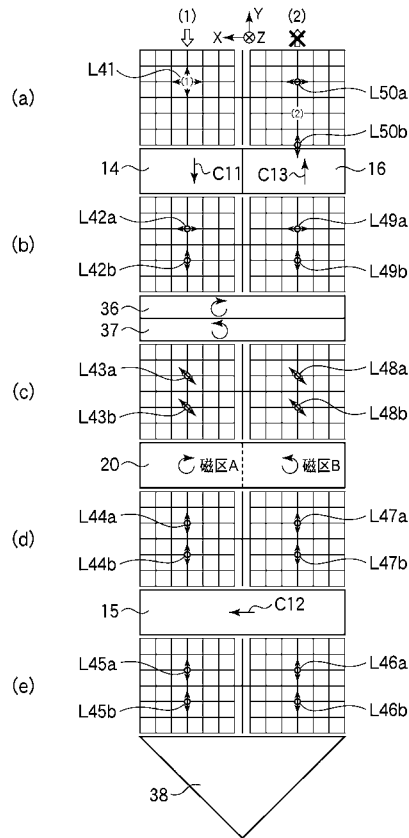
【図 1 4】



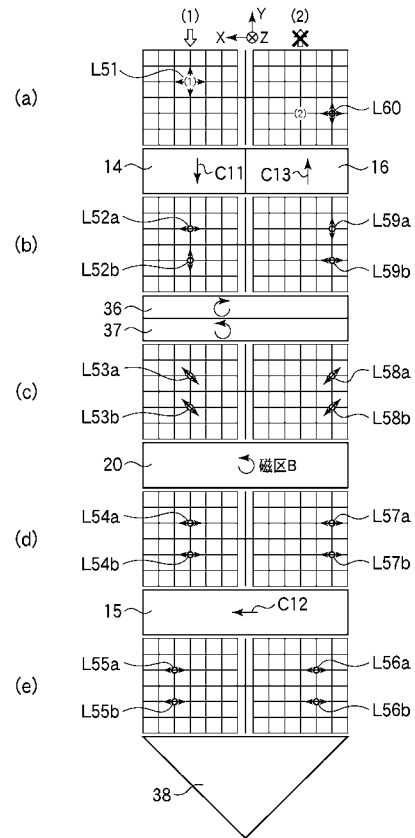
【図 1 5】



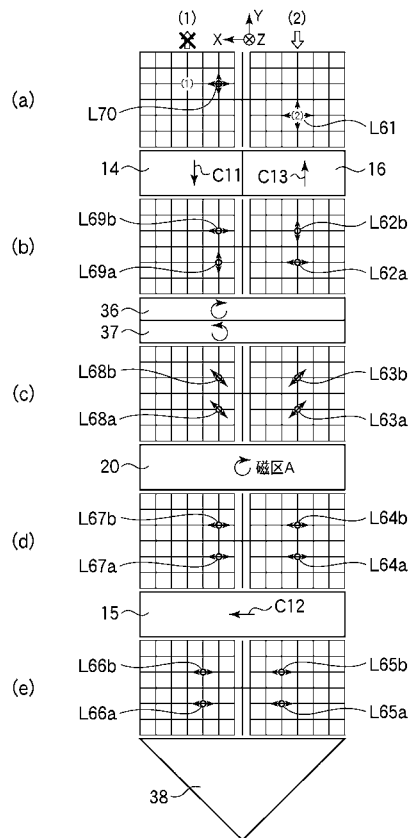
【図 16】



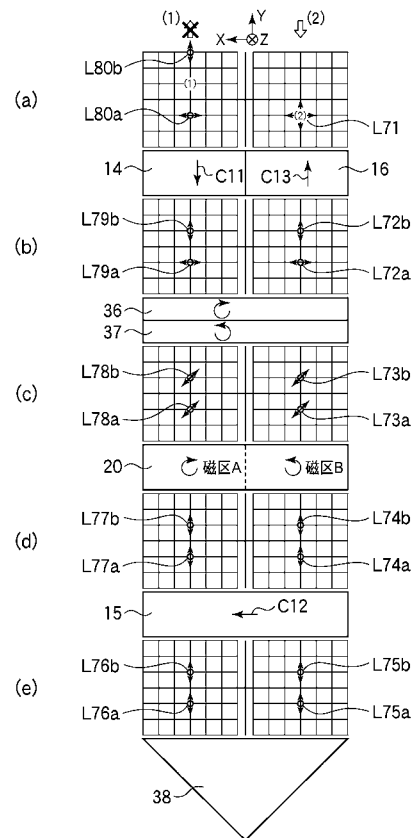
【図 17】



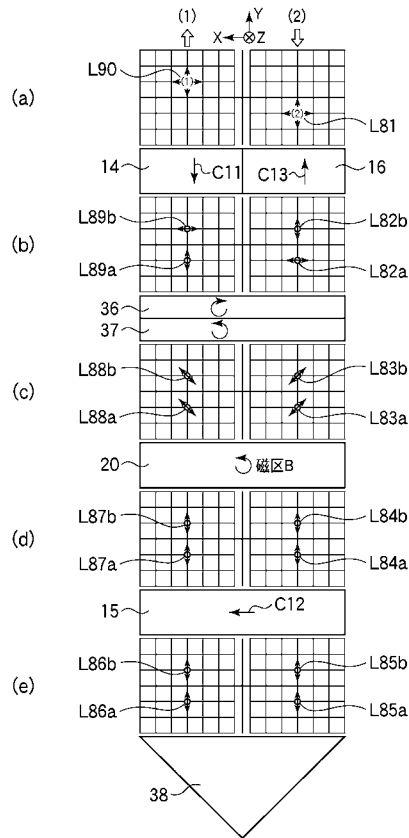
【図 18】



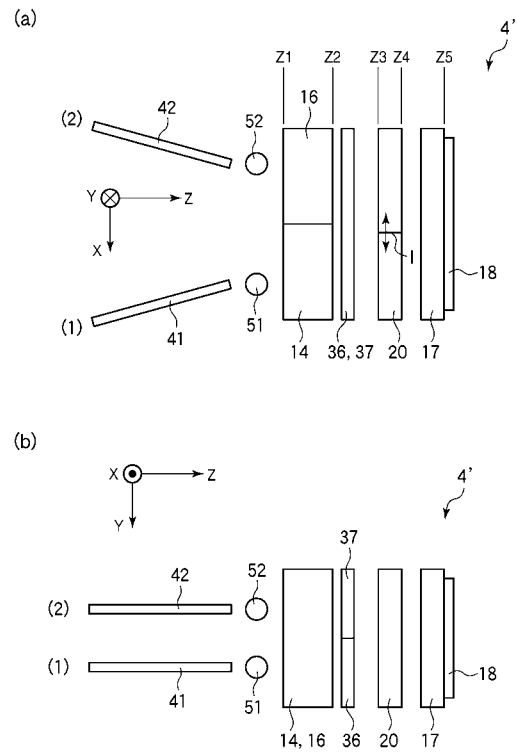
【図 19】



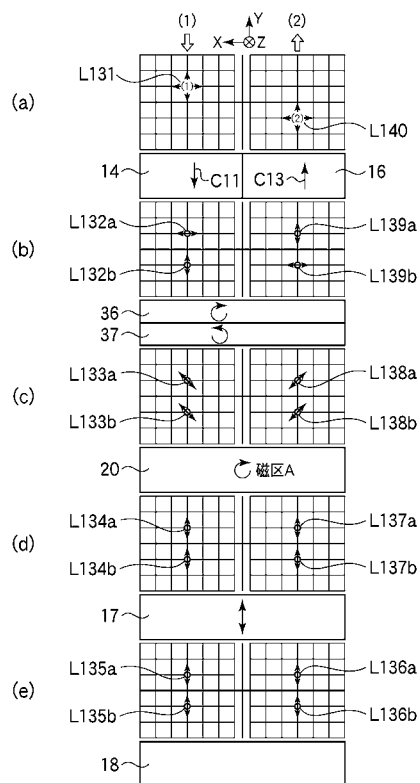
【図 20】



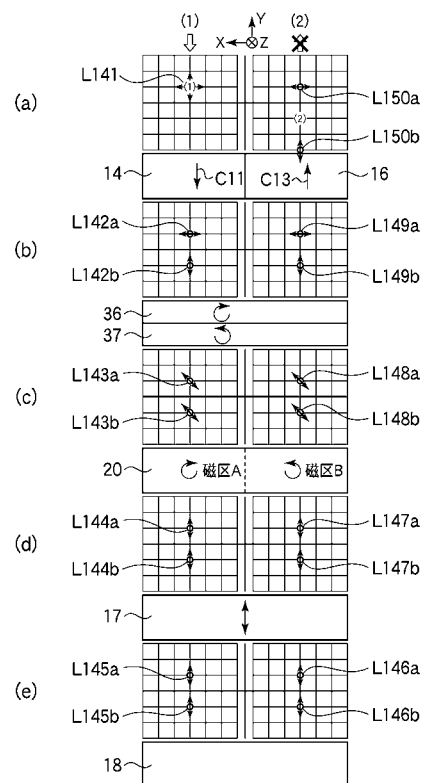
【図 21】



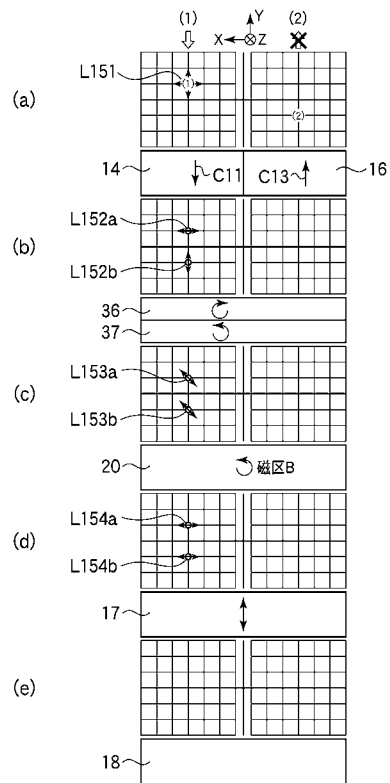
【図 22】



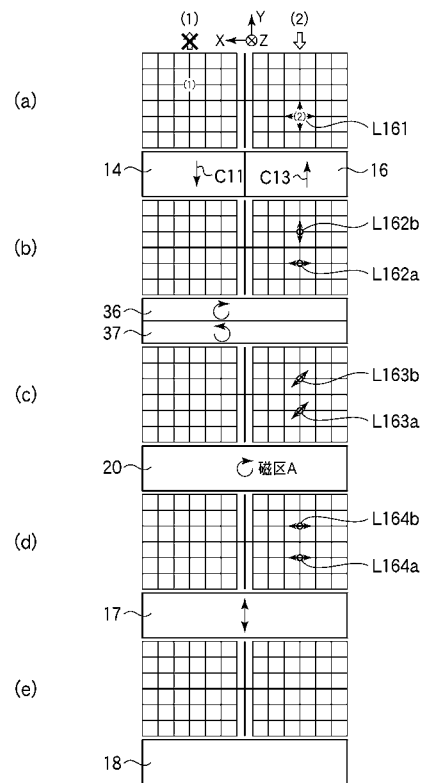
【図 23】



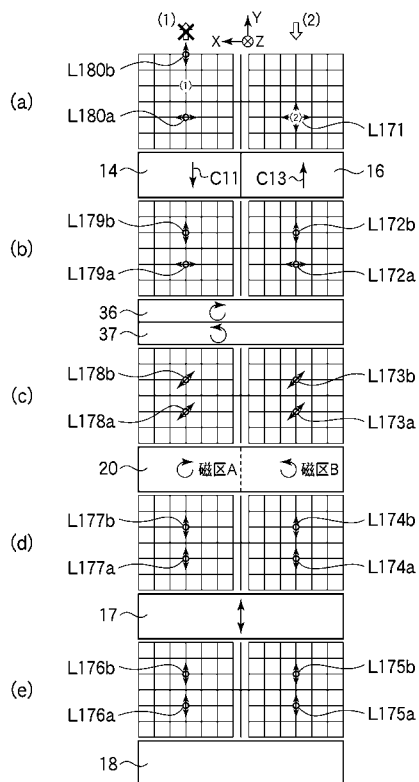
【図 2 4】



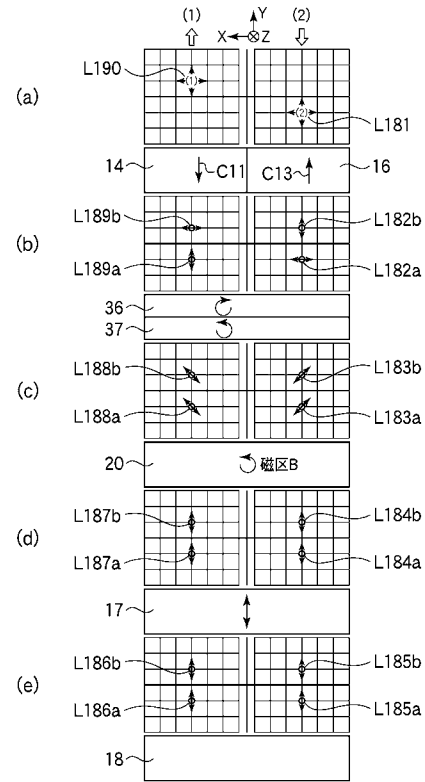
【図 2 5】



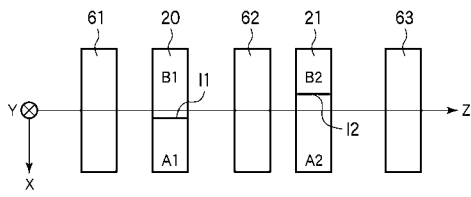
【図 2 6】



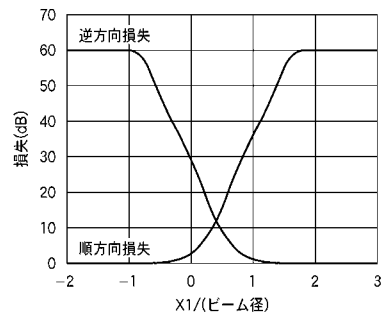
【図 2 7】



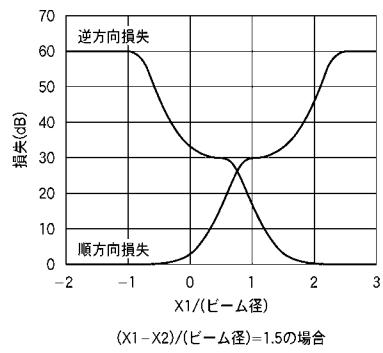
【図 28】



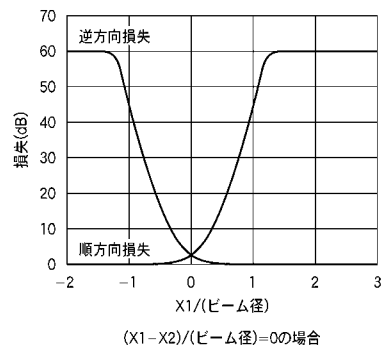
【図 30】



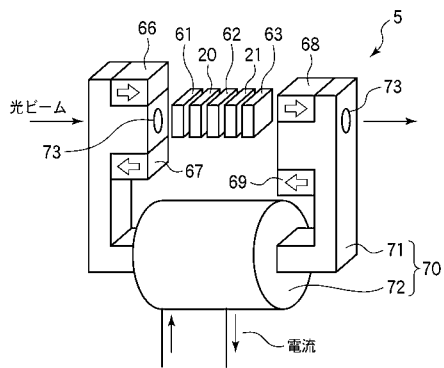
【図 29】



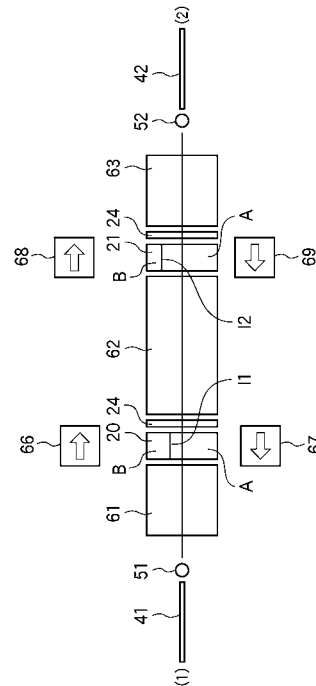
【図 31】



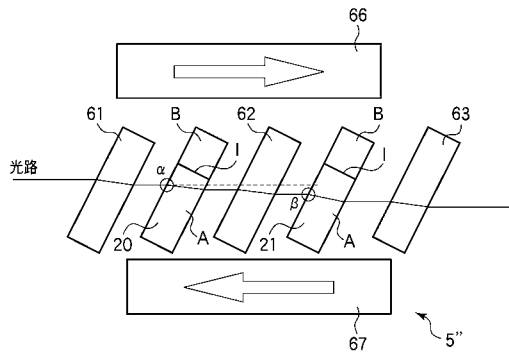
【図 32】



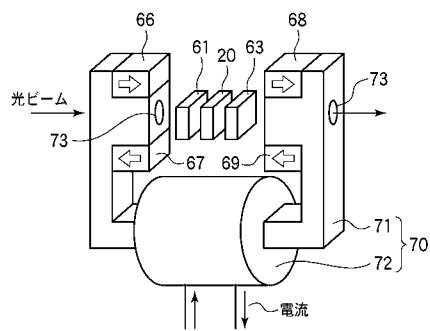
【図 33】



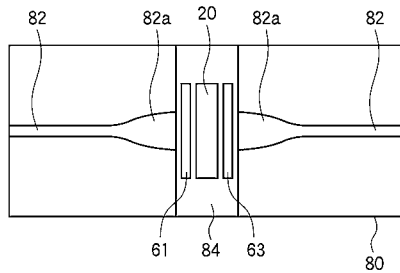
【図 3 4】



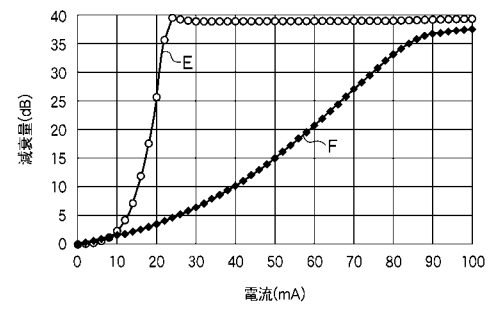
【図 3 5】



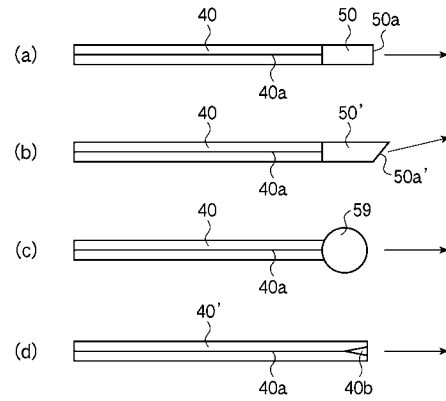
【図 3 8】



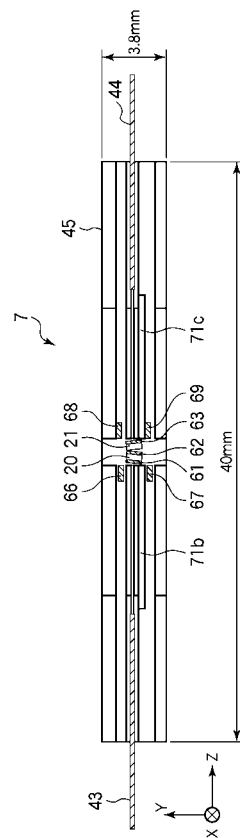
【図 3 6】



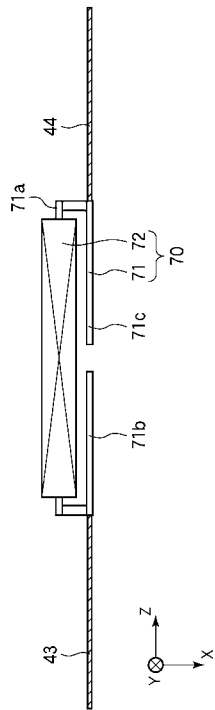
【図 3 7】



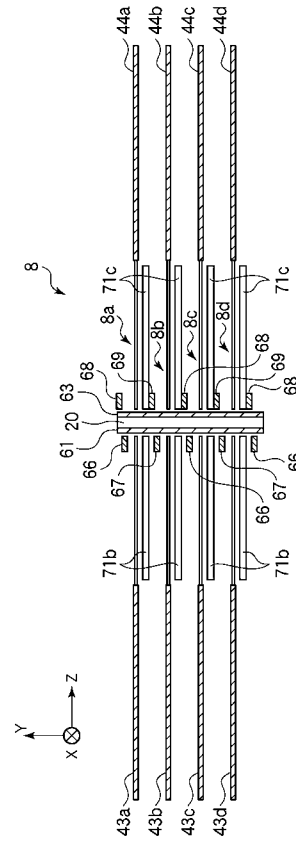
【図 3 9】



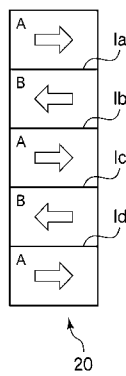
【図 40】



【図 41】



【図 42】



【図 43】

