

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3829962号
(P3829962)

(45) 発行日 平成18年10月4日(2006.10.4)

(24) 登録日 平成18年7月21日(2006.7.21)

(51) Int. Cl.

G02F 1/09 (2006.01)

F I

G02F 1/09 505

請求項の数 29 (全 27 頁)

(21) 出願番号	特願平10-10144	(73) 特許権者	000005223
(22) 出願日	平成10年1月22日(1998.1.22)		富士通株式会社
(65) 公開番号	特開平11-212043		神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(43) 公開日	平成11年8月6日(1999.8.6)	(74) 代理人	100075384
審査請求日	平成15年8月27日(2003.8.27)		弁理士 松本 昂
		(72) 発明者	福島 暢洋
			神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
		審査官	佐藤 宙子
		(56) 参考文献	特開平11-249089(JP, A)
			特開平09-321701(JP, A)
			特開平09-061612(JP, A)
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光アッテネータ並びに該光アッテネータを備えたシステム、光増幅器及び端局装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光路上でカスケード接続された第1及び第2のアッテネータユニットと、
 該第1及び第2のアッテネータユニットに接続される制御回路とを備え、
 上記第1及び第2のアッテネータユニットの各々は、上記光路上に配置され波長の関数として与えられるファラデー回転角を生じさせるためのファラデー回転子と、上記ファラデー回転角によって決定される減衰を上記光路について生じさせるための偏光手段とを含み、

上記制御回路は、上記第1のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性が上記第2のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性によって実質的に相殺されるように上記各ファラデー回転角を制御する手段を含む光アッテネータ。

【請求項2】

請求項1に記載の光アッテネータであって、

上記第1のアッテネータユニットの偏光手段は、上記第1のアッテネータユニットのファラデー回転子を挟むように上記光路上に設けられる第1及び第2の偏光子からなり、

上記第2のアッテネータユニットの偏光手段は、上記第2のアッテネータユニットのファラデー回転子を挟むように上記光路上に設けられる第3及び第4の偏光子からなり、

上記第1乃至第4の偏光子の各々は通過する偏光の偏波面を決定する軸を有している光アッテネータ。

【請求項3】

10

20

請求項 2 に記載の光アッテネータであって、

上記各ファラデー回転子は、上記光路が通過するように設けられる磁気光学結晶と、与えられた電流に応じた可変磁界を上記磁気光学結晶に印加するための電磁石とを含む光アッテネータ。

【請求項 4】

請求項 3 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 のアッテネータユニットは上記与えられた電流が増大するのに従って上記第 1 のアッテネータユニットによる減衰が増大するように設けられ、

上記第 2 のアッテネータユニットは上記与えられた電流が増大するのに従って上記第 2 のアッテネータユニットによる減衰が減少するように設けられる光アッテネータ。

10

【請求項 5】

請求項 3 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 及び第 2 の偏光子の軸は互いに直交しており、

上記第 3 及び第 4 の偏光子の軸は互いに平行であり、

上記各電磁石により印加される各可変磁界は上記光路に対して実質的に垂直であり、

上記各ファラデー回転子は、上記与えられた電流が零であるときに上記各ファラデー回転角が実質的に 90° になるように上記各磁気光学結晶に固定磁界を印加するための永久磁石を更に含む光アッテネータ。

【請求項 6】

請求項 3 に記載の光アッテネータであって、

20

上記第 1 及び第 2 の偏光子の軸は互いに直交しており、

上記第 3 及び第 4 の偏光子の軸は互いに直交しており、

上記第 1 のアッテネータユニットの電磁石により印加される磁界は上記光路に対して実質的に垂直であり、

上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転子は、上記与えられた電流が零であるときに上記ファラデー回転角が実質的に 90° になるように上記磁気光学結晶に固定磁界を印加するための永久磁石を更に含み、

上記第 2 のアッテネータユニットの電磁石により印加される磁界は上記光路に対して実質的に平行である光アッテネータ。

【請求項 7】

30

請求項 1 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 のアッテネータユニットの偏光手段は、上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転子を挟むように設けられる第 1 及び第 2 の複屈折結晶を含み、

上記第 2 のアッテネータユニットの偏光手段は、上記第 2 のアッテネータユニットのファラデー回転子を挟むように設けられる第 3 及び第 4 の複屈折結晶を含み、

上記光路は上記第 1 乃至第 4 の複屈折結晶の各々について定義される常光線及び異常光線によって提供され、

上記光路上に光を供給するための第 1 の光ファイバと、

上記各ファラデー回転角に応じた結合効率で上記第 1 の光ファイバに光学的に結合される第 2 の光ファイバとを更に備えた光アッテネータ。

40

【請求項 8】

請求項 7 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 乃至第 4 の複屈折結晶の各々は上記常光線及び上記異常光線を決定する主軸を有している光アッテネータ。

【請求項 9】

請求項 8 に記載の光アッテネータであって、

上記各ファラデー回転子は、上記光路が通過するように設けられる磁気光学結晶と、与えられた電流に応じた可変磁界を上記磁気光学結晶に印加するための電磁石とを含む光アッテネータ。

【請求項 10】

50

請求項 9 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 のアッテネータユニットは上記与えられた電流が増大するのに従って上記第 1 のアッテネータユニットによる減衰が増大するように設けられ、

上記第 2 のアッテネータユニットは上記与えられた電流が増大するのに従って上記第 2 のアッテネータユニットによる減衰が減少するように設けられる光アッテネータ。

【請求項 1 1】

請求項 9 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 及び第 2 の複屈折結晶の主軸は互いに直交しており、

上記第 3 及び第 4 の複屈折結晶の主軸は互いに平行であり、

上記各電磁石により印加される各可変磁界は上記光路に対して実質的に垂直であり、

上記各ファラデー回転子は、上記与えられた電流が零であるときに上記各ファラデー回転角が実質的に 90° になるように上記各磁気光学結晶に固定磁界を印加するための永久磁石を更に含む光アッテネータ。

【請求項 1 2】

請求項 9 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 及び第 2 の複屈折結晶の主軸は互いに直交しており、

上記第 3 及び第 4 の複屈折結晶の主軸は互いに直交しており、

上記第 1 のアッテネータユニットの電磁石により印加される磁界は上記光路に対して実質的に垂直であり、

上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転子は、上記与えられた電流が零であるときに上記ファラデー回転角が実質的に 90° になるように上記磁気光学結晶に固定磁界を印加するための永久磁石を更に含み、

上記第 2 のアッテネータユニットの電磁石により印加される磁界は上記光路に対して実質的に平行である光アッテネータ。

【請求項 1 3】

請求項 7 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 及び第 2 の複屈折結晶の各々は第 1 の平面上で定義されるくさび角を有するくさび板からなり、

上記第 3 及び第 4 の複屈折結晶の各々は第 2 の平面上で定義されるくさび角を有するくさび板からなる光アッテネータ。

【請求項 1 4】

請求項 1 3 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 及び第 2 の平面は互いに平行でない光アッテネータ。

【請求項 1 5】

請求項 1 3 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 及び第 2 の平面は互いに平行であり、

上記第 1 及び第 2 のアッテネータユニットを光学的に接続するための第 3 の光ファイバを更に備えた光アッテネータ。

【請求項 1 6】

請求項 1 に記載の光アッテネータであって、

上記各ファラデー回転子は、上記光路が通過するように設けられる磁気光学結晶と、互いに異なる方向の第 1 及び第 2 の磁界を上記磁気光学結晶に印加する磁界印加手段と、上記第 1 及び第 2 の磁界の少なくとも一方を変化させる磁界調整手段とを含み、

上記第 1 及び第 2 の磁界はこれらの合成磁界が上記磁気光学結晶の磁化を飽和させるのに十分な強さを有するように設定される光アッテネータ。

【請求項 1 7】

請求項 1 6 に記載の光アッテネータであって、

上記第 1 及び第 2 の磁界の方向は上記光路と平行な平面上で互いに直交する光アッテネータ。

【請求項 1 8】

請求項 16 に記載の光アッテネータであって、
上記磁界印加手段は上記第 1 及び第 2 の磁界をそれぞれ印加する電磁石及び永久磁石であり、

上記磁界調整手段は上記電磁石の駆動電流を調整する光アッテネータ。

【請求項 19】

請求項 18 に記載の光アッテネータであって、

上記第 2 の磁界の方向は上記光路と実質的に平行である光アッテネータ。

【請求項 20】

請求項 1 に記載の光アッテネータであって、

上記制御する手段は上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転角と上記第 2 のアッテネータユニットのファラデー回転角とが実質的に等しくなる条件の下で各ファラデー回転角を制御する光アッテネータ。

10

【請求項 21】

請求項 1 に記載の光アッテネータであって、

上記制御する手段は、上記光アッテネータの減衰が比較的大きい場合には上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転角と上記第 2 のアッテネータユニットのファラデー回転角とが実質的に等しくなる条件の下で各ファラデー回転角を制御し、上記光アッテネータの減衰が比較的小さい場合には上記第 1 のアッテネータユニットのファラデー回転角と上記第 2 のアッテネータユニットのファラデー回転角とが異なる条件の下で各ファラデー回転角を制御する光アッテネータ。

20

【請求項 22】

光路上でカスケード接続された第 1 及び第 2 のアッテネータユニットと、

該第 1 及び第 2 のアッテネータユニットに接続される制御回路とを備え、

上記第 1 及び第 2 のアッテネータユニットの各々は、上記光路上に配置され波長の関数として与えられるファラデー回転角を生じさせるためのファラデー回転子と、上記ファラデー回転角によって決定される減衰を上記光路について生じさせるための偏光手段とを含み、

上記制御回路は、上記第 1 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性と上記第 2 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性との和として与えられる波長特性が所望の傾斜を有するように上記各ファラデー回転角を制御する手段を含む光アッテネータ。

30

【請求項 23】

互いに異なる波長を有する複数の光信号を含む波長分割多重光が伝送される光伝送路と、

該光伝送路の途中に設けられ各々可変の減衰を与える第 1 及び第 2 のファラデー回転子をそれぞれ有する第 1 及び第 2 のアッテネータユニットとを備え、

該第 1 及び第 2 のファラデー回転子による回転角は、該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性と該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性を相殺する回転角であるシステム。

【請求項 24】

第 1 の光増幅ユニットと、

40

第 2 の光増幅ユニットと、

該第 1 及び第 2 の光増幅ユニットの間に設けられ各々可変の減衰を与える第 1 及び第 2 のファラデー回転子をそれぞれ有する第 1 及び第 2 のアッテネータユニットとを備え、

該第 1 及び第 2 のファラデー回転子による回転角は、該第 1 のアッテネータユニットの減衰の第 1 の波長特性と該第 2 のアッテネータユニットの減衰の第 2 の波長特性を相殺する回転角である光増幅器。

【請求項 25】

請求項 24 に記載の光増幅器であって、

上記第 1 及び第 2 の波長特性は上記第 2 の光増幅ユニットから出力される光の波長特性を実質的に打ち消す光増幅器。

50

【請求項 26】

光増幅ユニットと、

該光増幅ユニットの出力に接続される光アッテネータとを備え、

該光アッテネータは各々可変の減衰を与える第1及び第2のファラデー回転子をそれぞれ有する第1及び第2のアッテネータユニットを備えており、

該第1及び第2のファラデー回転子による回転角は、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性と該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性を相殺する回転角である光増幅器。

【請求項 27】

光増幅ユニットと、

該光増幅ユニットの入力に接続される光アッテネータとを備え、

該光アッテネータは各々可変の減衰を与える第1及び第2のファラデー回転子をそれぞれ有する第1及び第2のアッテネータユニットを備えており、

該第1及び第2のファラデー回転子による回転角は、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性と該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性を相殺する回転角である光増幅器。

【請求項 28】

異なる波長を有する光信号をそれぞれ出力する複数のE/O変換器と、

該複数のE/O変換器からの光信号のレベルを調整するための複数のレベル調整ユニットと、

該複数のレベル調整ユニットから出力された光信号を波長分割多重して波長分割多重光を得るための光マルチプレクサとを備え、

上記複数のレベル調整ユニットの各々は、各々可変の減衰を与える第1及び第2のファラデー回転子をそれぞれ有する第1及び第2のアッテネータユニットを備えており、

該第1及び第2のファラデー回転子による回転角は、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性と該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性を相殺する回転角である端局装置。

【請求項 29】

異なる波長を有する光信号をそれぞれ出力する複数のE/O変換器と、

該複数のE/O変換器からの光信号のレベルを調整するための複数のレベル調整ユニットと、

該複数のレベル調整ユニットから出力された光信号を波長分割多重して波長分割多重光を得るための光マルチプレクサと、

該光マルチプレクサから出力された波長分割多重光を増幅するための光増幅器とを備え、

該光増幅器は、光増幅ユニットと、該光増幅ユニットに接続される光アッテネータとを備えており、

該光アッテネータは、各々可変の減衰を与える第1及び第2のファラデー回転子をそれぞれ有する第1及び第2のアッテネータユニットを備えており、

該第1及び第2のファラデー回転子による回転角は、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性と該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性を相殺する回転角である端局装置。

【発明の詳細な説明】**【0001】****【発明の属する技術分野】**

本発明は2つのファラデー回転子を備えた光アッテネータに関し、特に光アッテネータ並びに該光アッテネータを備えたシステム、光増幅器及び端局装置に関する。

【0002】**【従来の技術】**

光通信システムを構築する場合、光増幅器等の光デバイスに供給される光のパワーを調節

10

20

30

40

50

するために、光アッテネータが使用されることがある。この種の光アッテネータとしては、従来、機械的な動作によって減衰を変化させるようにしたものがある。例えば、光路中に挿入される減衰膜の減衰に分布を持たせておき、この減衰膜を機械的に変位させることで減衰が調節される。

【 0 0 0 3 】

光アッテネータをその減衰が制御の対象となるようなシステムに組み込んで使用することが実用上要求される場合がある。例えば、エルビウムドープファイバ増幅器 (E D F A) においては、一定の出力レベルを維持するために、一旦増幅された光信号が、出力レベルのモニタ値によってフィードバック制御された減衰を与えるための光アッテネータに供給される。このような場合、機械的に減衰を調整する光アッテネータの使用は、システムの信頼性を高めるためには好ましいものではない。

10

【 0 0 0 4 】

この点に鑑み、本発明者は先に機械的可動部分を有しない実用性に優れた光アッテネータを提案した (例えば特願平 4 - 2 0 5 0 4 4 号) 。この光アッテネータは電磁石への印加電流の変化によりファラデー回転角が変化するファラデー回転子を備えており、減衰はファラデー回転角の調節により設定される。

【 0 0 0 5 】

【 発明が解決しようとする課題 】

光アッテネータは入力される光に対してその波長に係わらず一様な減衰を与えることが望ましい。しかし、ファラデー回転子が波長特性を有している場合、即ちファラデー回転角が波長に依存して変化する場合、波長に従って減衰が変化してしまい、減衰の波長特性が平坦でなくなる。減衰の波長特性が平坦でない光アッテネータを波長分割多重システムに適用すると、チャンネル毎に光信号の減衰が異なるものとなり、信号パワーのチャンネル間偏差等の不都合が生じる。また、例えば E D F A で生じる利得傾斜 (利得が波長に応じて変化する性質) をキャンセルするために、光アッテネータの減衰の波長特性を任意に設定し得るようにしたいという要求もある。

20

【 0 0 0 6 】

よって、本発明の目的は、減衰の波長特性が平坦な光アッテネータを提供することにある。

本発明の他の目的は、減衰の波長特性を調節し得る光アッテネータを提供することにある。

30

【 0 0 0 7 】

本発明の更に他の目的は、そのような光アッテネータを備えたシステム、光増幅器及び端局装置を提供することにある。

【 0 0 0 8 】

【 課題を解決するための手段 】

本発明の第 1 の側面によると、光路上でカスケード接続された第 1 及び第 2 のアッテネータユニットと、第 1 及び第 2 のアッテネータユニットに接続される制御回路とを備えた光アッテネータが提供される。第 1 及び第 2 のアッテネータユニットの各々は、光路上に配置されたファラデー回転子を含む。ファラデー回転子は、波長の関数として与えられるファラデー回転角を生じさせる。第 1 及び第 2 のアッテネータユニットの各々は、更に、ファラデー回転角によって決定される減衰を光路について生じさせるための偏光手段を含む。特に、本発明のこの側面による光アッテネータでは、制御回路は、第 1 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性が第 2 のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性によって実質的に相殺されるように各ファラデー回転角を制御する手段を含む。

40

【 0 0 0 9 】

この構成によると、各ファラデー回転子が波長の関数として与えられるファラデー回転角を生じさせているにも係わらず、制御回路が動作することにより、トータルの減衰の波長特性が実質的に平坦化される。

【 0 0 1 0 】

50

本発明の第2の側面による光アッテネータにおいては、制御回路は、第1のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性と第2のアッテネータユニットにおける減衰の波長特性との和として与えられる波長特性が所望の傾斜を有するように各ファラデー回転角を制御する手段を含む。これにより、減衰の波長特性を自由に調節し得るようになる。

【0011】

本発明の第3の側面によると、各々可変の減衰を与えるための第1及び第2のアッテネータユニットを備え、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性は該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性と異なる光アッテネータが提供される。

【0012】

本発明の第4の側面によると、互いに異なる波長を有する複数の光信号を含む波長分割多重光が伝送される光伝送路と、該光伝送路の途中に設けられ各々可変の減衰を与えるための第1及び第2のアッテネータユニットとを備え、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性は該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性と異なるシステムが提供される。

10

【0013】

本発明の第5の側面によると、第1の光増幅ユニットと、第2の光増幅ユニットと、該第1及び第2の光増幅ユニットの間に設けられ各々可変の減衰を与えるための第1及び第2のアッテネータユニットとを備え、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性は該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性と異なる光増幅器が提供される。

20

【0014】

本発明の第6の側面によると、光増幅ユニットと、該光増幅ユニットの出力に接続される光アッテネータとを備え、該光アッテネータは各々可変の減衰を与えるための第1及び第2のアッテネータユニットを備えており、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性は該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性と異なる光増幅器が提供される。

【0015】

本発明の第7の側面によると、光増幅ユニットと、該光増幅ユニットの入力に接続される光アッテネータとを備え、該光アッテネータは各々可変の減衰を与えるための第1及び第2のアッテネータユニットを備えており、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性は該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性と異なる光増幅器が提供される。

30

【0016】

本発明の第8の側面によると、異なる波長を有する光信号をそれぞれ出力する複数のE/O変換器と、該複数のE/O変換器からの光信号のレベルを調整するための複数のレベル調整ユニットと、該複数のレベル調整ユニットから出力された光信号を波長分割多重して波長分割多重光を得るための光マルチプレクサとを備え、上記複数のレベル調整ユニットの各々は、各々可変の減衰を与えるための第1及び第2のアッテネータユニットを備えており、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性は該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性と異なる端局装置が提供される。

40

【0017】

本発明の第9の側面によると、異なる波長を有する光信号をそれぞれ出力する複数のE/O変換器と、該複数のE/O変換器からの光信号のレベルを調整するための複数のレベル調整ユニットと、該複数のレベル調整ユニットから出力された光信号を波長分割多重して波長分割多重光を得るための光マルチプレクサと、該光マルチプレクサから出力された波長分割多重光を増幅するための光増幅器とを備え、該光増幅器は、光増幅ユニットと、該光増幅ユニットに接続される光アッテネータとを備えており、該光アッテネータは、各々可変の減衰を与えるための第1及び第2のアッテネータユニットを備えており、該第1のアッテネータユニットの減衰の第1の波長特性は該第2のアッテネータユニットの減衰の第2の波長特性と異なる端局装置が提供される。

50

【 0 0 1 8 】

【 発明の実施の形態 】

以下、添付図面を参照して本発明の望ましい実施の形態を詳細に説明する。全図を通して実質的に同一の部分には同一の符号が付されており、方向その他の特定が必要な場合には、互いに直交する X 軸、Y 軸及び Z 軸による三次元座標系が採用されている。

【 0 0 1 9 】

図 1 は本発明による光アッテネータの第 1 実施形態を示す図である。この光アッテネータは、Z 軸に平行な光路 O P 上でカスケード接続された 2 つのアッテネータユニット A U 1 及び A U 2 と、ユニット A U 1 及び A U 2 に接続される制御回路 2 とを備えている。

【 0 0 2 0 】

アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 の各々は、光路 O P に沿って伝搬する光に対して可変のファラデー回転角を与えるためのファラデー回転子 F R と、ファラデー回転角によって決定される減衰を生じさせるための偏光ユニット P U とを含んでいる。

【 0 0 2 1 】

特にこの実施形態では、アッテネータユニット A U 1 の偏光ユニット P U は、ファラデー回転子 F R を挟むように光路 O P 上に設けられる偏光子 4 及び 6 からなり、アッテネータユニット A U 2 の偏光ユニット P U は、ファラデー回転子 F R を挟むように光路 O P 上に設けられる偏光子 8 及び 10 からなる。偏光子 4, 6, 8 及び 10 は、各々通過する直線偏光の偏波面を決定する軸 4 A, 6 A, 8 A 及び 10 A をそれぞれ有している。ここでは、軸 4 A は Y 軸に平行であり、軸 6 A, 8 A 及び 10 A は X 軸に平行である。

【 0 0 2 2 】

図 1 の光アッテネータの動作をまず簡単に説明しておく。アッテネータユニット A U 1 のファラデー回転子 F R によって与えられるファラデー回転角が 90° であるときには、軸 4 A 及び 6 A が互いに直交していることから、アッテネータユニット A U 1 の減衰は最小になり、また、アッテネータユニット A U 2 のファラデー回転子 F R によって与えられるファラデー回転角が 0° であるときには、軸 8 A 及び 10 A が互いに平行であることから、アッテネータユニット A U 2 の減衰は最小になり、従って、この光アッテネータによるトータルの減衰は最小になる。

【 0 0 2 3 】

ここで、広義には、 90° のファラデー回転角というのは、 $90^\circ + n \cdot 180^\circ$ (n は整数) を含み、 0° のファラデー回転角というのは、 $m \cdot 180^\circ$ (m は整数) を含む。

【 0 0 2 4 】

アッテネータユニット A U 1 のファラデー回転子 F R によって与えられるファラデー回転角が 0° に近く、また、アッテネータユニット A U 2 のファラデー回転子 F R によって与えられるファラデー回転角が 90° に近いときには、この光アッテネータによるトータルの減衰は最大となる。

【 0 0 2 5 】

図 2 を参照すると、各ファラデー回転子 F R の具体的構成例が示されている。ファラデー回転子 F R は、光路 O P が通過するように設けられる磁気光学結晶 1 2 を有している。

【 0 0 2 6 】

一般に、磁気光学結晶 1 2 にある磁界を印加した状態で、即ち磁気光学結晶 1 2 をある磁場の中においた状態で、直線偏光が磁気光学結晶 1 2 内を通過すると、その偏光方向は、その伝搬方向にかかわらず常に同じ回転方向に回転される。

【 0 0 2 7 】

ここで、「偏光方向」は、直線偏光の電場ベクトルを含む平面の、伝搬方向と垂直な平面への投影で定義される。

この偏光方向が回転する現象はファラデー回転と称され、偏光方向の回転角の大きさ (ファラデー回転角) は、印加磁界により生じる磁気光学結晶 1 2 の磁化の方向及び強さ (大きさ) に依存する。具体的には、ファラデー回転角は、磁気光学結晶 1 2 の磁化の強さの光の伝搬方向の成分の大きさによって決定される。

10

20

30

40

50

【0028】

従って、磁気光学結晶12と結晶12に対して光の伝搬方向と同じ方向に磁界を印加する手段とを用いれば、その印加磁界を調節することによって一見するとファラデー回転角を有効に調整することができそうである。しかし、ここで考慮しておくべき点は、印加磁界の大きさが比較的小さい場合には、印加磁界による磁気光学結晶12の磁化が飽和状態に達せず、磁気光学結晶12内に多数の磁区が存在してしまうことである。

【0029】

このような多数の磁区が存在は、ファラデー回転角の再現性を悪化させるし、良好な再現性が確保されたとしてもファラデー回転角の連続な可変を困難にする。また、磁気光学結晶12内に多数の磁区が存在する場合には、磁区間の界面における光の散乱による減衰も生じ、実用上の不都合となる。

10

【0030】

そこで、この実施形態では、磁気光学結晶12に互いに異なる方向の第1及び第2の磁界を印加するようにし、第1及び第2の磁界の少なくとも一方を変化させることにより、得られるファラデー回転角が変化するようにし、第1及び第2の磁界をこれらの合成磁界が磁気光学結晶12の磁化の強さを飽和させるのに十分な強さを有するように設定している。

【0031】

磁気光学結晶12において磁化の強さが飽和した状態は、結晶12の磁区が1つになった状態として理解することができる。

20

磁気光学結晶12の磁化が飽和している状態で第1及び第2の磁界の少なくとも一方を変化させることにより、ファラデー回転角の連続な可変が可能になり、磁区間の界面における光の散乱に起因する損失の発生を防止することができる。また、ファラデー回転角の再現性も良好になる。

【0032】

望ましくは、ファラデー回転角の有効な可変を可能にするために、第1及び第2の磁界は、光路OPに平行な平面内で互いに直交する方向にそれぞれ印加される。

【0033】

図2の実施形態では、磁気光学結晶12にZ軸と平行な固定磁界FM(図1参照)を印加するために、一对の永久磁石14が磁気光学結晶12の上下面を挟むように設けられており、また、磁気光学結晶12にX軸と平行な可変磁界VM(図1参照)を印加するために、電磁石16が磁気光学結晶12の左右側面を挟むように設けられている。電磁石16のコイル18は可変電流源20に接続されている。可変電流源20により電磁石16に供給される駆動電流を調節することによって、磁気光学結晶12の磁化の方向が変化し、それに伴ってファラデー回転角が変化する。

30

【0034】

磁気光学結晶12としては、薄く切り出したYIG(イットリウム・鉄ガーネット)やエピタキシャル結晶成長させた $(\text{GdBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$ 等を用いることができる。

【0035】

40

図2の実施形態で、固定磁界FMを光路OPと平行に印加し、可変磁界VMを光路OPに垂直に印加しているのは、光路OPに平行な方向への磁界の印加と比較して光路OPに垂直な方向への磁界の印加が容易であり、容易な方に構成が複雑な電磁石16を適用したいという要求があるからである。

【0036】

図3は、図2に示されるファラデー回転子FRでファラデー回転角が変化する原理を説明するための図である。磁気光学結晶12に印加される磁界及び結晶12の磁化の方向及び強さをベクトル表示するために、図3の縦軸及び横軸はそれぞれZ軸及びX軸に対応している。

【0037】

50

今、電磁石 1 6 の駆動電流が実質的に 0 であり、永久磁石 1 4 のみによって磁気光学結晶 1 2 に固定磁界 F M が印加されている場合、結晶 1 2 の磁化は符号 2 2 で示されるように Z 軸に平行になる。固定磁界 F M の強さは、固定磁界 F M だけで結晶 1 2 の磁化が飽和するように設定されている。この実施形態では、固定磁界 F M のみが印加されているときに、ファラデー回転角が 90° になるようにされている。

【0038】

電磁石 1 6 による可変磁界 V M が X 軸と平行に印加されると、合成磁界は符号 2 4 で示されるように固定磁界 F M 及び可変磁界 V M の合成ベクトルで与えられる。この合成磁界 2 4 により磁気光学結晶 1 2 には符号 2 6 で示されるような磁化が生じる。磁化 2 6 の方向と合成磁界 2 4 の方向は互いに平行であり、磁気光学結晶 1 2 の磁化が飽和していること

10

【0039】

磁気光学結晶 1 2 の磁化の強さが一定であるからといって、結晶 1 2 におけるファラデー回転角への磁化の寄与度が同じではない。ファラデー回転角が当該磁化の方向と光の伝搬方向との関係にも依存するからである。

【0040】

即ち、磁化 2 2 が生じている状態と磁化 2 6 が生じている状態とを比較すると、磁化 2 2 の Z 軸成分（磁化 2 2 そのもの）に対して磁化 2 6 の Z 軸成分 2 8 が減少している分だけ、後者のファラデー回転角が小さくなるのである。

20

【0041】

具体的には、図 2 に示されるファラデー回転子 F R では、永久磁石 1 6 の駆動電流を 0 から最大値に変化させていくことによって、ファラデー回転角は 90° から 0° に向かって小さくなっていく。

【0042】

図 4 は、図 1 に示されるアッテネータユニット A U 1 及び A U 2 の各々における減衰と電磁石 1 6 の駆動電流との関係を示すグラフである。アッテネータユニット A U 1 においては、軸 4 A 及び 6 A が互いに垂直であり、また、電磁石 1 6 による可変磁界 V M が Z 軸と垂直な方向に印加されているので、駆動電流が増大するのに従って減衰は連続的に増大していく。

30

【0043】

一方、アッテネータユニット A U 2 においては、軸 8 A 及び 10 A が互いに平行であり、また、永久磁石 1 6 による可変磁界 V M が Z 軸と垂直に印加されているので、電磁石 1 6 の駆動電流が増大するのに従って減衰は連続的に減少していく。

【0044】

このような 2 つのアッテネータユニット A U 1 及び A U 2 の組み合わせにより減衰の波長特性が平坦になる原理を以下に説明する。

図 5 は、ある磁気光学結晶の磁化を飽和させたときのファラデー回転角の波長特性の一例を示すグラフである。縦軸はファラデー回転角（deg / cm）、横軸はファラデー回転角が与えられる光の波長（μm）を示している。この磁気光学結晶の例では、波長が長くなるに従って単位長さ当たりのファラデー回転角が減少している。

40

【0045】

図 6 を参照して、磁気光学結晶 1 2 が図 5 のような特性を有しているとして、図 1 の光アッテネータにおける各ファラデー回転角の波長特性の影響を説明する。今、アッテネータユニット A U 1 に供給される波長 λ_2 の光に与えられるファラデー回転角が 45° になるように電磁石 1 6 の駆動電流が設定されているとする。この場合、波長 λ_2 よりも長い波長 λ_1 の光に与えられるファラデー回転角は 45° よりも小さくなり、また、波長 λ_2 よりも短い波長 λ_3 の光に与えられるファラデー回転角は 45° よりも大きくなる。

【0046】

アッテネータユニット A U 1 においては、ファラデー回転角が 90° から 0° に近づくに

50

従って減衰は増大するので、波長 λ_1 、 λ_2 及び λ_3 の光に対するアッテネータユニットA U 1の減衰をそれぞれ a_1 (dB)、 a_2 (dB)及び a_3 (dB)とすると、 $a_3 < a_2 < a_1$ となる。

【0047】

これに対して、アッテネータユニットA U 2においては、ファラデー回転角が 90° から 0° に近づくに従って減衰が小さくなるので、ファラデー回転角の波長特性が実質的にリニアな範囲においては、波長 λ_1 、 λ_2 及び λ_3 の光に対するアッテネータユニットA U 2の減衰はそれぞれ a_3 (dB)、 a_2 (dB)及び a_1 (dB)となる。

【0048】

このように、ファラデー回転角の波長特性が図5に示されるように負の傾斜を有している場合には、電磁石16の駆動電流が増大するのに従って減衰が増大するようにされているアッテネータユニットA U 1においては、波長が長くなるに従って減衰が大きくなり、一方、電磁石16の駆動電流が増大するのに従って減衰が減少するようにされているアッテネータユニットA U 2においては、波長が長くなるに従って減衰が小さくなるのである。

【0049】

図7の(A)及び(B)は、それぞれ、アッテネータユニットA U 1及びA U 2における減衰の波長特性の変化を示す図である。アッテネータユニットA U 1にあっては、図7の(A)に示されるように、電磁石16の駆動電流が大きくなるに従って、減衰の波長特性が右上がりになる傾向が強くなっており、一方、アッテネータユニットA U 2にあっては、図7の(B)に示されるように、駆動電流が小さくなるに従って減衰の波長特性が右下がりになる傾向が強くなっている。

【0050】

アッテネータユニットA U 1におけるファラデー回転角を θ_{F1} とすると、アッテネータユニットA U 1の減衰(dB)は、

$$10 \cdot \log [\sin^2 \theta_{F1}]$$

で与えられる。従って、波長が $\Delta\lambda$ 増えたときの透過光パワーの変化は、

$$- \sin 2\theta_{F1} \sin(K\theta_{F1}\Delta\lambda)$$

となる。ここで、Kはファラデー回転角の波長特性を一次近似した場合における係数である。

【0051】

一方、アッテネータユニットA U 2におけるファラデー回転角を θ_{F2} とすると、アッテネータユニットA U 2の減衰(dB)は、

$$10 \cdot \log [\sin^2 (90^\circ - \theta_{F2})]$$

で与えられる。従って、波長が $\Delta\lambda$ 増えたときの透過光パワーの変化は、

$$\sin 2\theta_{F2} \sin(K\theta_{F2}\Delta\lambda)$$

となる。従って、次に示す方程式の解を与える(θ_{F1} 、 θ_{F2})の組み合わせの群は、アッテネータユニットA U 1における減衰の波長特性がアッテネータユニットA U 2における減衰の波長特性によって実質的に相殺される条件を与える。

【0052】

$\sin 2\theta_{F1} \sin(K\theta_{F1}\Delta\lambda) + \sin 2\theta_{F2} \sin(K\theta_{F2}\Delta\lambda) = 0$ 例えば、アッテネータユニットA U 1におけるファラデー回転角とアッテネータユニットA U 2におけるファラデー回転角とが実質的に等しくなる条件の下で各ファラデー回転角を制御することによって、図1に示される光アッテネータのトータルの減衰の波長特性を平坦にすることができる。

【0053】

或いは、トータルの減衰が比較的大きい場合、例えば図4に示される2つの曲線の交点よりも上の減衰の和がトータルの減衰となる場合には、アッテネータユニットA U 1におけるファラデー回転角とアッテネータユニットA U 2におけるファラデー回転角とが実質的に等しくなる条件の下で各ファラデー回転角を制御するようにし、一方、トータルの減衰が比較的小さい場合、例えば同交点よりも下の減衰の和がトータルの減衰となる場合には

10

20

30

40

50

、アッテネータユニットA U 1におけるファラデー回転角とアッテネータユニットA U 2におけるファラデー回転角とが異なる条件の下で各ファラデー回転角を制御するようにしてもよい。

【0054】

このような柔軟性に富んだ制御を行うのに適した制御回路2の構成例を図8に示す。

図8は制御回路2の実施形態を示すブロック図である。ここでは、制御回路2は、所望の減衰を与えるための制御入力に基づき各電磁石16の駆動電流を決定するための演算等を行うためのCPU(中央演算ユニット)30と、演算結果等に関するデータを一時的に記憶するためのRAM(ランダムアクセスメモリ)32と、演算に必要なプログラム及びデータ等が記憶されているROM(リードオンリーメモリ)34と、データの入出力のためのI/Oポート36とを備えている。CPU30, RAM32, ROM34及びI/Oポート36は、データバス38により相互に接続されている。

10

【0055】

ROM34には、予め得られた、前述の方程式の解の群と当該解により得られる減衰との関係を表すデータテーブルが格納されている。制御入力により所望のトータルの減衰が与えられると、その減衰を得るための解がCPU30により選択され、その解を満足するようにアッテネータユニットA U 1及びA U 2におけるファラデー回転角が設定される。具体的には、I/Oポート36から出力されたデジタルデータがD/A変換器40及び42によりそれぞれアナログの制御信号に変換され、各制御信号はアッテネータユニットA U 1及びA U 2の各々の可変電流源20に供給される。これにより、各電磁石16の駆動電流が設定され、所望の減衰が得られるようなファラデー回転角の組み合わせが実行される。

20

【0056】

例えば、トータルの減衰を小さくする場合には、アッテネータユニットA U 1におけるファラデー回転角が90°に近くなるような領域で電磁石16が駆動されると共に、アッテネータユニットA U 2におけるファラデー回転角が0°に近い領域で電磁石16が駆動される。

【0057】

このように、本実施形態によると、制御回路2が、アッテネータユニットA U 1における減衰の波長特性がアッテネータユニットA U 2における減衰の波長特性によって実質的に相殺されるように各ファラデー回転角を制御するようにしているので、トータルの減衰の波長特性を平坦にすることができる。

30

【0058】

図9は本発明による光アッテネータの第2実施形態を示す図である。この実施形態は、図1の第1実施形態におけるアッテネータユニットA U 2のファラデー回転子FR及び偏光子10に代えて、変更されたファラデー回転子FR'及び偏光子10'が用いられている点で特徴付けられる。ファラデー回転子FR'の内部構成は図示しないが、可変磁界VMが光路OPと平行に設定され、固定磁界FMが光路OPと垂直に設定されるように改変されている。また、偏光子10'はY軸に平行な軸10A'を有している。

この構成によっても、アッテネータユニットA U 2における電磁石の駆動電流が増大するのに従ってアッテネータユニットA U 2による減衰が減少するので、図1の第1実施形態におけるのと同様の原理に従って、アッテネータユニットA U 1における減衰の波長特性がアッテネータユニットA U 2における減衰の波長特性によって実質的に相殺され、トータルの減衰の波長特性を平坦にすることができる。

40

【0059】

図10は本発明による光アッテネータの第3実施形態を示す図である。この実施形態は、図1の第1実施形態におけるアッテネータユニットA U 2の偏光子10に代えて、変更された偏光子10'が用いられている点で特徴付けられる。偏光子10'はY軸に平行な軸10A'を有している。

【0060】

50

軸 8 A 及び 1 0 A ' は互いに直交しており、軸 4 A 及び 6 A も互いに直交しており、アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 のファラデー回転子 F R は同じであるので、アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 は同じように動作する。

【 0 0 6 1 】

即ち、アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 の各々において、電磁石 1 6 の駆動電流が増大するのに従って減衰が増大する。また、アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 の各々において、図 7 の (A) に示されるように、駆動電流が大きくなるに従って減衰の波長特性が右上がりになる傾向が強まる。

【 0 0 6 2 】

従って、制御回路 2 の動作を変更して、アッテネータユニット A U 1 における減衰の波長特性とアッテネータユニット A U 2 における減衰の波長特性との和として与えられる波長特性が所望の傾斜を有するような設定を行うことができる。つまり、この実施形態によると、トータルの減衰の波長特性を容易に調節し得るようになる。また、同じように動作する 2 つのアッテネータユニット A U 1 及び A U 2 がカスケード接続されているので、トータルの減衰の波長特性の調節のダイナミックレンジが大きくなる。

【 0 0 6 3 】

以上説明した実施形態では、アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 の構成及び動作の理解を容易にするために、偏光子 6 及び 8 が別部材として図示されているが、軸 6 A 及び 8 A は互いに平行であるから、偏光子 6 及び 8 の何れか一方を省略してもよい。また、光路 O P に沿って光がアッテネータユニット A U 1 及び A U 2 をこの順に通過するようにこの光アッテネータが使用される場合であって、アッテネータユニット A U 1 への入力光が Y Z 平面に平行な偏波面を有する直線偏光である場合には、偏光子 4 をも省略可能である。

【 0 0 6 4 】

以下、実用性に優れた本発明の望ましい幾つかの実施形態を説明する。ここでは、特定の複屈折結晶の組み合わせ及び光学的配置により、減衰が入力光の偏光状態に依存することが防止される。

【 0 0 6 5 】

図 1 1 は本発明による光アッテネータの第 4 実施形態を示す図である。この実施形態は、図 1 に示される偏光子 4 , 6 , 8 及び 1 0 に代えて各々複屈折結晶からなるくさび板 4 4 , 4 6 , 4 8 及び 5 0 がそれぞれ設けられている点で特徴付けられる。また、入力光ビームのための光ファイバ 5 2 及びレンズ 5 4 と、アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 を光学的に結合するためのレンズ 5 6 、光ファイバ 5 8 及びレンズ 6 0 と、出力光ビームのためのレンズ 6 2 及び光ファイバ 6 4 が付加的に設けられている。

【 0 0 6 6 】

光ファイバ 5 2 及び 5 8 間を結合する光路は、くさび板 4 4 及び 4 6 の各々について定義される常光線及び異常光線によって提供され、光ファイバ 5 8 及び 6 4 間を結合する光路は、くさび板 4 8 及び 5 0 の各々について定義される常光線及び異常光線によって提供される。

【 0 0 6 7 】

この構成によると、光ファイバ 5 2 及び 5 8 間を結合する光路における減衰は、アッテネータユニット A U 1 のファラデー回転子 F R におけるファラデー回転角によって決定され、また、光ファイバ 5 8 及び 6 4 間を結合する光路における減衰は、アッテネータユニット A U 2 のファラデー回転子 F R におけるファラデー回転角によって決定される。従って、出力用の光ファイバ 6 4 は入力用の光ファイバ 5 2 に対して各ファラデー回転角に応じた結合効率で光学的に結合されることとなり、所望のトータルの減衰が得られるようになる。

【 0 0 6 8 】

くさび板 4 4 及び 4 6 の各々は第 1 の平面上で定義されるくさび角を有しており、くさび板 4 8 及び 5 0 の各々は第 2 の平面上で定義されるくさび角を有している。特にこの実施形態では、第 1 及び第 2 の平面は Y Z 平面と平行である。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 9 】

くさび板 4 4 及び 4 6 は、各々常光線及び異常光線を決定するための主軸 4 4 A 及び 4 6 A をそれぞれ有している。また、くさび板 4 8 及び 5 0 は、各々常光線及び異常光線を決定するための主軸 4 8 A 及び 5 0 A をそれぞれ有している。特にこの実施形態では、主軸 4 4 A は X 軸と平行であり、主軸 4 6 A , 4 8 A 及び 5 0 A は Y 軸と平行である。

【 0 0 7 0 】

くさび板 4 4 及び 4 6 は同一形状であり、これらはくさび板 4 4 の頂部及び底部がそれぞれくさび板 4 6 の底部及び頂部に対向し且つ対応する面同士が互いに平行になるように配置されている。また、くさび板 4 8 及び 5 0 も同一形状であり、これらはくさび板 4 8 の頂部及び底部がそれぞれくさび板 5 0 の底部及び頂部に対向し且つ対応する面同士が互いに平行になるように配置されている。

10

【 0 0 7 1 】

光ファイバ 5 2 のファイバ端 5 2 A から放射された光は、レンズ 5 4 によりコリメートされて平行光ビームになる。このビームはビーム太さを無視して符号 1 0 2 で表される。ビーム 1 0 2 は、くさび板 4 4 においてその常光線に相当するビーム 1 0 4 と異常光線に相当するビーム 1 0 6 とに分離される。

【 0 0 7 2 】

ビーム 1 0 4 及び 1 0 6 はファラデー回転子 F R で同じファラデー回転角だけ同じ向きにファラデー回転されそれぞれビーム 1 0 8 及び 1 1 0 になる。

ビーム 1 0 8 は、くさび板 4 6 においてその常光線に相当するビーム 1 1 2 と異常光線に相当するビーム 1 1 4 とに分離される。ビーム 1 1 0 は、くさび板 4 6 においてその異常光線に相当するビーム 1 1 6 と常光線に相当するビーム 1 1 8 とに分離される。

20

【 0 0 7 3 】

ビーム 1 1 2 , 1 1 4 , 1 1 6 及び 1 1 8 がそれぞれ受けてきた屈折の履歴並びにくさび板 4 4 及び 4 6 の形状及び配置形態を考慮すると、ビーム 1 1 2 及び 1 1 6 は互いに平行であり、ビーム 1 1 4 及び 1 1 8 は互いに平行でない。

【 0 0 7 4 】

従って、互いに平行なビーム 1 1 2 及び 1 1 6 をレンズ 5 6 により収束させて光ファイバ 5 8 にその一方のファイバ端 5 8 A から入射させることができ、このとき互いに平行でないビーム 1 1 4 及び 1 1 8 は光路から逸れてファイバ端 5 8 A には入射しない。

30

【 0 0 7 5 】

さて、アッテネータユニット A U 1 における減衰は、ビーム 1 1 2 及び 1 1 6 のトータルパワーのビーム 1 0 2 のパワーに対する比に対応している。例えば、ファラデー回転子 F R のファラデー回転角が 90° であるときには、ビーム 1 0 4 のパワーは原理的に全部 1 1 2 のパワーに移行し、ビーム 1 0 6 のパワーは原理的に全部ビーム 1 1 6 のパワーに移行するので、アッテネータユニット A U 1 の減衰は最も小さくなる。また、ファラデー回転子 F R のファラデー回転角が 0° である場合には、ビーム 1 0 4 のパワーは原理的には全部ビーム 1 1 4 のパワーに移行し、ビーム 1 0 6 のパワーは原理的には全部ビーム 1 1 8 のパワーに移行するので、アッテネータユニット A U 1 の減衰は最も大きくなる。従って、アッテネータユニット A U 1 においては、ファラデー回転角 F R のファラデー回転角に応じた減衰が得られることとなる。

40

【 0 0 7 6 】

一方、ファラデー回転角が一定であれば、ビーム 1 0 2 の偏光状態に係わらずビーム 1 1 2 及び 1 1 6 のトータルパワーは一定であるので、アッテネータユニット A U 1 における減衰はビーム 1 0 2 (即ち入力ビーム)の偏光状態には依存しない。

【 0 0 7 7 】

続いて、光ファイバ 5 8 のファイバ端 5 8 A に入射した光は、光ファイバ 5 8 の他方のファイバ端 5 8 B から放射され、この光はレンズ 6 0 によりコリメートされて平行光ビームになる。このビームはビーム太さを無視して符号 1 2 2 で表される。

【 0 0 7 8 】

50

ビーム 1 2 2 は、くさび板 4 8 においてその常光線に相当するビーム 1 2 4 と異常光線に相当するビーム 1 2 6 とに分離される。

ビーム 1 2 4 及び 1 2 6 は、アッテネータユニット A U 2 のファラデー回転子 F R において同じファラデー回転角で同じ向きにファラデー回転されそれぞれビーム 1 2 8 及び 1 3 0 になる。

【 0 0 7 9 】

ビーム 1 2 8 は、くさび板 5 0 においてその常光線に相当するビーム 1 3 2 と異常光線に相当するビーム 1 3 4 とに分離される。ビーム 1 3 0 は、くさび板 5 0 においてその異常光線に相当するビーム 1 3 6 と常光線に相当するビーム 1 3 8 とに分離される。

【 0 0 8 0 】

アッテネータユニット A U 1 におけるのと同じように考えると、ビーム 1 3 2 及び 1 3 6 は光ファイバ 6 4 のファイバ端 6 4 A に入射し、ビーム 1 3 4 及び 1 3 8 は光路から逸れてファイバ端 6 4 A には入射しない。

【 0 0 8 1 】

アッテネータユニット A U 1 におけるのと同じように、アッテネータユニット A U 2 による減衰は入力ビーム（ビーム 1 2 2）の偏光状態には依存しない。しかしながら、主軸 4 4 A 及び 4 6 A が互いに垂直であるのに対して主軸 4 8 A 及び主軸 5 0 A は互いに平行であるから、アッテネータユニット A U 2 におけるファラデー回転角の増減に対する減衰の増減の傾向は、アッテネータユニット A U 1 における同傾向と逆である。

【 0 0 8 2 】

例えば、アッテネータユニット A U 2 におけるファラデー回転角が 90° であるときには、ビーム 1 2 4 のパワーは原理的には全部ビーム 1 3 4 のパワーに移行し、ビーム 1 2 6 のパワーは原理的には全部ビーム 1 3 8 のパワーに移行するので、アッテネータユニット A U 2 による減衰は最も大きくなり、また、アッテネータユニット A U 2 におけるファラデー回転角が 0° であるときには、ビーム 1 2 4 のパワーは原理的には全部ビーム 1 3 2 のパワーに移行し、ビーム 1 2 6 のパワーは原理的には全部ビーム 1 3 6 のパワーに移行するので、アッテネータユニット A U 2 による減衰は最も小さくなる。

【 0 0 8 3 】

従って、図 1 の第 1 実施形態におけるのと同じように制御回路 2 が動作することによって、アッテネータユニット A U 1 における減衰の波長特性がアッテネータユニット A U 2 における減衰の波長特性によって実質的に相殺され、この光アッテネータにおけるトータルの減衰の波長特性は平坦になる。このように、本実施形態によると、減衰の波長特性が平坦であり、且つ、減衰が入力ビームの偏光状態に依存しない偏光無依存の光アッテネータの提供が可能になる。

【 0 0 8 4 】

図 1 1 の第 4 実施形態において、アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 間を光学的に接続するために光ファイバ 5 8 並びにレンズ 5 6 及び 6 0 を用いているのは、次の理由による。即ち、光ファイバ 5 8 並びにレンズ 5 6 及び 6 0 を用いずに空間ビームによりアッテネータユニット A U 1 及び A U 2 を光学的に接続した場合、この光アッテネータではビーム 1 1 2 及び 1 1 6 のパワーの一部又は全部がビーム 1 3 2 及び 1 3 6 のパワーに移行することが予定されているのに対して、一旦光路から逸れたビーム 1 1 4 又は 1 1 8 のパワーがビーム 1 3 2 及び 1 3 6 のパワーに移行して所要の減衰が得られない恐れがあるからである。この不所望な再結合の主たる原因は、くさび板 4 4 及び 4 6 のくさび角が定義される第 1 の平面とくさび板 4 8 及び 5 0 のくさび角が定義される第 2 の平面とが互いに平行であるところにある。従って、第 1 及び第 2 の平面の一方を他方に対して Z 軸を中心に回転させた関係にして、第 1 及び第 2 の平面が互いに平行でないようにすることにより、光ファイバ 5 8 並びにレンズ 5 6 及び 6 0 を省略して、光アッテネータの挿入損失を小さく抑えることができる。例えば、第 1 及び第 2 の平面は互いに垂直である。具体的には次の通りである。

【 0 0 8 5 】

図 1 2 は本発明による光アッテネータの第 5 実施形態を示す図である。この実施形態は、図 1 1 の第 4 実施形態と対比して、アッテネータユニット A U 1 のくさび板 4 4 及び 4 6 がそれぞれ Z 軸の周りに 90° 回転させられて配置されると共に、これにより図 1 1 に示される光ファイバ 5 8 並びにレンズ 5 6 及び 6 0 の省略が可能になっている点で特徴付けられる。

【 0 0 8 6 】

従って、くさび板 4 8 及び 5 0 のくさび角が定義される平面が Y Z 平面に平行であるのに対して、くさび板 4 4 及び 4 6 のくさび角が定義される平面は X Z 平面と平行である。また、主軸 4 4 A は Y 軸と平行であり、主軸 4 6 A は X 軸と平行である。

【 0 0 8 7 】

アッテネータユニット A U 1 及び A U 2 の各々における減衰が各ファラデー回転角により決定されることを含む光アッテネータの動作原理の詳細は図 1 1 の第 4 実施形態における動作原理に準じて理解することができるので、その説明は省略する。

【 0 0 8 8 】

図 1 2 の第 5 実施形態によっても、減衰の波長特性が平坦であり、且つ、減衰が入力ビームの偏光状態に依存しない偏光無依存の光アッテネータの提供が可能になる。また、図 1 2 の第 5 実施形態によると、図 1 1 の第 4 実施形態における光ファイバ 5 8 並びにレンズ 5 6 及び 6 0 が省略されている分だけ光アッテネータの挿入損失が小さくなる。

【 0 0 8 9 】

図 1 3 は、図 1 2 に示されるアッテネータユニット A U 1 における減衰の波長特性の測定結果を示す図である。縦軸は減衰の偏差 (d B)、横軸は波長 (n m) である。

【 0 0 9 0 】

アッテネータユニット A U 1 においては、主軸 4 4 A 及び 4 6 A が互いに垂直であり、ファラデー回転子 F R の電磁石 1 6 (図 2 参照) の駆動電流を 0 から増大させていくのに従って得られるファラデー回転角は 90° から 0° に近づいていくので、駆動電流を増大させていくのに従って減衰は大きくなるべきである。駆動電流を 0 m A , 5 m A , 10 m A , 15 m A , 20 m A , 25 m A 及び 30 m A に設定して、それぞれ波長 1545 n m に対する減衰を測定した結果、1.3 d B , 2.0 d B , 7.1 d B , 13.4 d B , 17.3 d B , 21.8 d B 及び 27.1 d B となった。また、駆動電流を増大させるのに従って、減衰の波長特性の右上がりの傾斜が次第に大きくなっていった。この測定結果は、図 7 の (A) で説明した減衰の波長特性に一致するものである。

【 0 0 9 1 】

図示はしないが、図 1 2 に示されるアッテネータユニット A U 2 においては、図 1 3 の波長特性と逆の波長特性が得られることが判明した。

図 1 4 の (A) ~ (D) は図 1 2 の実施形態の光アッテネータにおけるトータルの減衰の波長特性の測定結果を示すグラフである。各測定では、与えられた波長帯域 (1530 n m - 1560 n m) において実質的に白色光源となる L E D からの光を光アッテネータに入力し、光アッテネータの出力光を光スペクトラムアナライザに入力し、減衰の波長特性が測定された。

【 0 0 9 2 】

図 1 4 の (A) はアッテネータユニット A U 1 における駆動電流 I_1 を 10.5 m A に設定しアッテネータユニット A U 2 における駆動電流 I_2 を 7.9 m A に設定したときの測定結果である。得られた減衰は 10 d B であり、減衰の波長特性は十分に平坦であった。

【 0 0 9 3 】

図 1 4 の (B) は $I_1 = 20.0$ m A , $I_2 = 6.7$ m A に設定したときの測定結果である。得られた減衰は 15 d B であり、減衰の波長特性は十分に平坦であった。

【 0 0 9 4 】

図 1 4 の (C) は $I_1 = 25.8$ m A , $I_2 = 6.2$ m A に設定したときの測定結果である。得られた減衰は 20 d B であり、減衰の波長特性は十分に平坦であった。

【 0 0 9 5 】

10

20

30

40

50

図14の(D)は $I_1 = 29.1 \text{ mA}$ 、 $I_2 = 5.5 \text{ mA}$ に設定したときの測定結果である。得られた減衰は25 dBであり、減衰の波長特性は十分に平坦であった。

【0096】

図15は本発明による光アッテネータの第6実施形態を示す図である。図12の第5実施形態では、アッテネータユニットAU2のファラデー回転子FRにおいて、駆動電流を増大させるのに従って可変磁界VMが増大し、ファラデー回転角は 90° から 0° に近づいていくように減少していくが、図15の第6実施形態では、可変磁界VM及び固定磁界FMの印加方向が逆であるファラデー回転子FR'が用いられている。従って、ファラデー回転子FR'における駆動電流を0から大きくしていくことによって、ファラデー回転角は 0° から 90° に向かって増大していく。

10

【0097】

また、図15の第6実施形態では、くさび板48の主軸48Aに直交する主軸50A'を有するくさび板50'が用いられている。主軸50A'はX軸に平行である。

【0098】

この変更されたアッテネータユニットAU2においては、ファラデー回転子FR'の駆動電流が0であるときには、ファラデー回転角は 0° であり、アッテネータユニットAU2の減衰は最も大きくなり、駆動電流を増やしていくと、ファラデー回転角は 90° に近づいていくので、アッテネータユニットAU2の減衰は小さくなっていく。

【0099】

従って、図9の第2実施形態及び図12の第5実施形態の原理に準じて理解されるように、図15の第6実施形態によると、減衰の波長特性が平坦であり、且つ、減衰が入力ビームの偏光状態に依存しない偏光無依存の光アッテネータの提供が可能になる。

20

【0100】

図16は本発明による光アッテネータの第7実施形態を示す図である。図12の第5実施形態でY軸と平行な主軸50Aを有するくさび板50が用いられているの対比して、図16の第7実施形態では、X軸に平行な主軸50A'を有するくさび板50'が用いられている。

【0101】

この実施形態によると、アッテネータユニットAU1及びAU2における減衰の波長特性が同じ傾向を有するようになるので、図10の第3実施形態及び図12の第5実施形態における動作原理に準じて理解されるように、減衰の波長特性を自由に調節し得る光アッテネータであって減衰が入力ビームの偏光状態に依存しない偏光無依存の光アッテネータの提供が可能になる。

30

【0102】

以上説明した実施形態では、複屈折結晶からなるくさび板の組み合わせにより偏光無依存の光アッテネータの提供を可能にしているが、複屈折結晶からなる平板の組み合わせにより偏光無依存の光アッテネータを提供することもできる。この場合には、くさび板の組み合わせによる場合には平行ビーム系を採用しているのに対して、収束ビーム系を採用するのが望ましい。

【0103】

近年、低損失(例えば 0.2 dB/km)な光ファイバの製造技術及び使用技術が確立され、光ファイバを伝送路とする光通信システムが実用化されている。また、光ファイバにおける損失を補償して長距離の伝送を可能にするために、信号光を増幅するための光増幅器の使用が提案され或いは実用化されている。

40

【0104】

光増幅器は、増幅されるべき信号光が供給される光増幅媒体と、光増幅媒体が信号光の波長を含む利得帯域を提供するように光増幅媒体をポンピング(励起)する手段とを備えている。例えば、エルビウムドープファイバ増幅器(EDFA)は、光増幅媒体としてのエルビウムドープファイバ(EDF)と、予め定められた波長を有するポンプ光をEDFに供給するためのポンプ光源とを備えている。 $0.98 \mu\text{m}$ 帯或いは $1.48 \mu\text{m}$ 帯の波長

50

を有するポンプ光を用いることによって、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯を含む利得帯域が得られる。また、半導体チップを光増幅媒体として用いる光増幅器も知られている。この場合、半導体チップに電流を注入することによってポンピングが行われる。

【0105】

一方、光ファイバによる伝送容量を増大させるための技術として、波長分割多重 (WDM) がある。WDM が適用されるシステムにおいては、異なる波長を有する複数の光キャリアが用いられる。各光キャリアを独立に変調することによって得られた複数の光信号が光マルチプレクサにより波長分割多重され、その結果得られた WDM 信号光が光ファイバ伝送路に送出される。受信側では、受けた WDM 信号光が光デマルチプレクサによって個々の光信号に分離され、各光信号に基づいて伝送データが再生される。従って、WDM を適用することによって、当該多重数に応じて一本の光ファイバにおける伝送容量を増大させることができる。

10

【0106】

WDM が適用されるシステムに光増幅器を組み入れる場合、利得傾斜 (ゲインチルト) 或いは利得偏差で代表される利得の波長特性によって伝送距離が制限される。例えば、EDFA においては、波長 $1.55 \mu\text{m}$ の近傍で利得傾斜が生じ、この利得傾斜は EDFA への信号光のトータル入力パワー及びポンプ光のパワーに従って変化することが知られている。

【0107】

図 17 は本発明によるシステムの実施形態を示すブロック図である。このシステムは、互いに異なる波長を有する複数の光信号を含む波長分割多重光 (WDM 光) が伝送される光ファイバ伝送路 68 と、光ファイバ伝送路 68 の途中に設けられる本発明による光アッテネータ 70 とを備えている。光アッテネータ 70 は各々可変の減衰を WDM 光に与えるためのアッテネータユニット AU1 及び AU2 を有している。アッテネータユニット AU1 の減衰の第 1 の波長特性はアッテネータユニット AU2 の減衰の第 2 の波長特性と異なる。ここでは、WDM 光に含まれる複数の光信号の波長はそれぞれ $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ である。

20

【0108】

光ファイバ伝送路 68 がインライン型の複数の光増幅器を含んでいる場合、もし、各光増幅器が WDM 光の帯域において利得の波長特性を有しているとすると、その利得の波長特性が累積し、信号電力或いは信号対雑音比 (光 SNR) のチャンネル間偏差が生じてしまう。

30

【0109】

図 17 の実施形態では、例えば光アッテネータ 70 を本発明の第 2 の側面に従って構成することによって、光アッテネータ 70 により与えられる減衰の波長特性を自由に調節することができるので、累積した利得の波長特性を補償して信号電力及び光 SNR のチャンネル間偏差を小さくすることができる。

【0110】

或いは、光ファイバ伝送路 68 における利得の波長特性がフラットになるように注意深く制御されているシステムにおいては、本発明の第 1 の側面に従って光アッテネータ 70 を構成することによって、光アッテネータユニット AU1 及び AU2 の各々において生じ得る減衰の波長特性を実質的に相殺させて、制御されているフラットな利得の波長特性を維持することができる。

40

【0111】

図 18 の (A), (B) 及び (C) はそれぞれ本発明による光増幅器の実施形態を示すブロック図である。各光増幅器が図 17 のシステムに適用されるものとして各光増幅器の構成及び動作を説明する。

【0112】

図 18 の (A) に示される実施形態では、光増幅器 71 は、2 つの光増幅ユニット 72 (#1 及び #2) と、これらの間に設けられる本発明による光アッテネータ 70 とを備えている。光アッテネータ 70 は各々可変の減衰を与えるためのアッテネータユニット AU1

50

及びA U 2を備えており、アッテネータユニットA U 1の減衰の第1の波長特性はアッテネータユニットA U 2の減衰の第2の波長特性と異なる。

【0113】

増幅すべきW D M光は先ず光増幅ユニット72(# 1)で増幅され、増幅されたW D M光に光アッテネータ70により減衰が与えられる。減衰されたW D M光は次いで光増幅ユニット72(# 2)で増幅されてこの光増幅器71から出力される。

【0114】

光増幅ユニット72(# 1及び# 2)の各々の利得の波長特性を維持すべきである場合には、第1及び第2の波長特性は互いに打ち消すように設定される。

或いは、光増幅ユニット72(# 2)から出力される光の波長特性(具体的にはW D M光のパワーの波長特性)がフラットになるように第1及び第2の波長特性が設定されてもよい。

10

【0115】

図18の(B)に示される実施形態では、光アッテネータ70は光増幅ユニット72の出力に接続されている。この場合、光アッテネータ70の動作により光増幅ユニット72の利得の波長特性が変化しないように、第1及び第2の波長特性は互いに打ち消すように設定される。

【0116】

図18の(C)に示される実施形態では、光アッテネータ70は光増幅ユニット72の入力に接続されている。この場合、光増幅ユニット72に供給される増幅すべきW D M光の波長特性が変化しないようにするために、例えば、第1及び第2の波長特性は互いに打ち消すように設定される。

20

【0117】

尚、図18の(B)及び(C)の各々の実施形態において、光増幅ユニット72において生じ得る利得の波長特性を打ち消すように第1及び第2の波長特性が設定されていてもよい。

【0118】

図19は本発明による端局装置の実施形態を示すブロック図である。光ファイバ伝送路68の入力端には端局装置74が接続されている。

端局装置74は、互いに異なる波長 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ を有する光信号をそれぞれ出力する複数のE / O(電気/光)変換器76(# 1, ..., # n)と、これらの光信号のレベルを調整するための本発明による光アッテネータ70(# 1, ..., # n)とを備えている。光アッテネータ70(# 1, ..., # n)の各々は所謂レベル調整ユニットとして用いられている。

30

【0119】

光アッテネータ70(# 1, ..., # n)から出力された光信号は光マルチプレクサ78により波長分割多重され、その結果得られたW D M光は光増幅器71により増幅されて光ファイバ伝送路68に供給される。光増幅器71には、例えば、図18の(A), (B)及び(C)の実施形態の各々を適用することができる。

【0120】

E / O変換器76(# 1, ..., # n)の各々は、C W光(連続波光)を出力するレーザダイオード(L D)80と、L D80から出力されたC W光を主信号に基づき変調するための光変調器82を含む。

40

【0121】

この実施形態によると、光アッテネータ70(# 1, ..., # n)の各々において本発明の適用によって減衰の波長特性が実質的にフラットであり或いは所望の波長特性が得られているので、E / O変換器76(# 1, ..., # n)の各々から出力された光信号のパワーの波長特性を維持することができ、得られるW D M光におけるパワーの波長特性を一定に保つことができる。

【0122】

50

また、光増幅器 7 1 はその構成要素として本発明による光アッテネータ 7 0 を有している
ので、得られる W D M 光におけるパワーの波長特性を平坦にし或いは所望の特性に設定
することができる。

【 0 1 2 3 】

尚、光アッテネータ 7 0 (# 1 , ... , # n) を省略して端局装置 7 4 を構成してもよいし
、光増幅器 7 1 を省略して端局装置 7 4 を構成してもよい。

【 0 1 2 4 】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によると、減衰の波長特性が平坦な光アッテネータ或いは減
衰の波長特性を調節し得る光アッテネータの提供が可能になるという効果が生じる。

10

【 0 1 2 5 】

また、本発明の特定の実施形態によると、減衰が入力ビームの偏光状態に依存しない偏光
無依存の光アッテネータの提供が可能になる。

さらに、本発明によると、本発明による光アッテネータを備えた新規なシステム、光増幅
器及び端局装置の提供が可能になるという効果もある。

【図面の簡単な説明】

【図 1】図 1 は本発明による光アッテネータの第 1 実施形態を示す図である。

【図 2】図 2 は本発明に適用可能なファラデー回転子の実施形態を示す図である。

【図 3】図 3 は図 2 に示されるファラデー回転子で回転角が変化する原理を説明するた
めの図である。

20

【図 4】図 4 は図 1 に示される 2 つのアッテネータユニットの各々における減衰と駆動電
流との関係を示すグラフである。

【図 5】図 5 はファラデー回転角の波長特性の一例を示すグラフである。

【図 6】図 6 は図 1 に示される光アッテネータにおける各ファラデー回転角の波長特性の
影響を説明するための図である。

【図 7】図 7 の (A) 及び (B) はそれぞれ図 1 に示される 2 つのアッテネータユニット
における減衰の波長特性の変化を示す図である。

【図 8】図 8 は本発明に適用可能な制御回路の実施形態を示すブロック図である。

【図 9】図 9 は本発明による光アッテネータの第 2 実施形態を示す図である。

【図 1 0】図 1 0 は本発明による光アッテネータの第 3 実施形態を示す図である。

30

【図 1 1】図 1 1 は本発明による光アッテネータの第 4 実施形態を示す図である。

【図 1 2】図 1 2 は本発明による光アッテネータの第 5 実施形態を示す図である。

【図 1 3】図 1 3 は図 1 2 に示されるアッテネータユニットにおける減衰の波長特性の測
定結果を示すグラフである。

【図 1 4】図 1 4 の (A) ~ (D) は図 1 2 に示される光アッテネータにおけるトータル
の減衰の波長特性の測定結果を示す図である。

【図 1 5】図 1 5 は本発明による光アッテネータの第 6 実施形態を示す図である。

【図 1 6】図 1 6 は本発明による光アッテネータの第 7 実施形態を示す図である。

【図 1 7】図 1 7 は本発明によるシステムの実施形態を示すブロック図である。

【図 1 8】図 1 8 の (A) , (B) 及び (C) は本発明による光増幅器の実施形態を示す
ブロック図である。

40

【図 1 9】図 1 9 は本発明による端局装置の実施形態を示すブロック図である。

【符号の説明】

O P 光路

A U 1 , A U 2 アッテネータユニット

P U 偏光ユニット

F R ファラデー回転子

4 , 6 , 8 , 1 0 偏光子

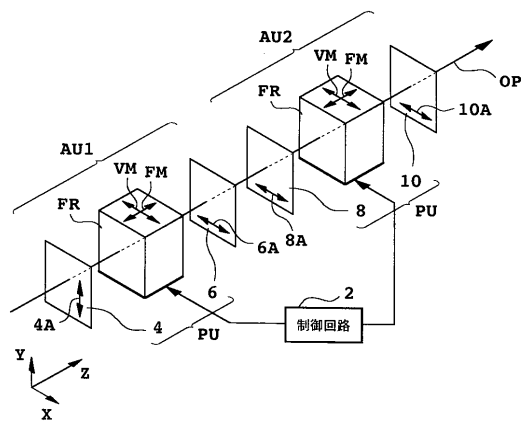
1 2 磁気光学結晶

1 4 永久磁石

50

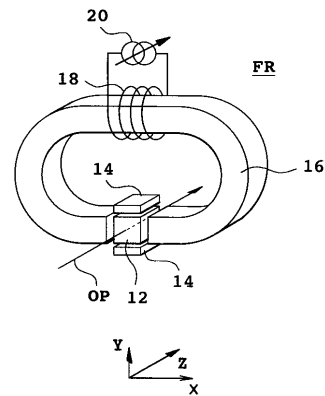
- 1 6 電磁石
2 0 可変電流源
4 4 , 4 6 , 4 8 , 5 0 複屈折結晶からなるくさび板

【図 1】



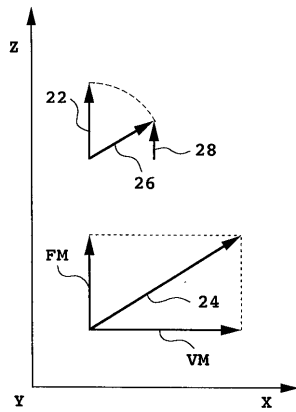
【図 2】

ファラデー回転子FRの実施形態を示す図



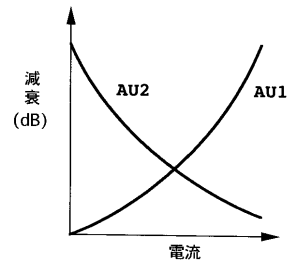
【図 3】

図2のファラデー回転子FRで
ファラデー回転角が変化する原理を説明するための図



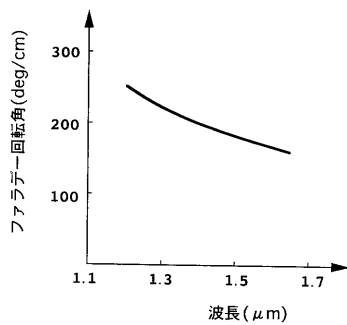
【図 4】

図1のアッテネータユニットAU1及びAU2の
各々における減衰と駆動電流との関係を示すグラフ



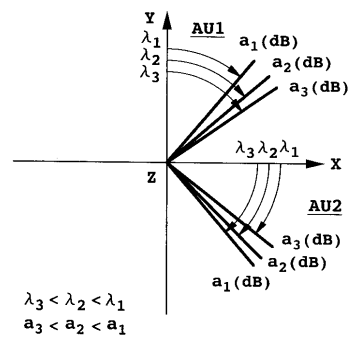
【図 5】

ファラデー回転角の波長特性の一例を示すグラフ



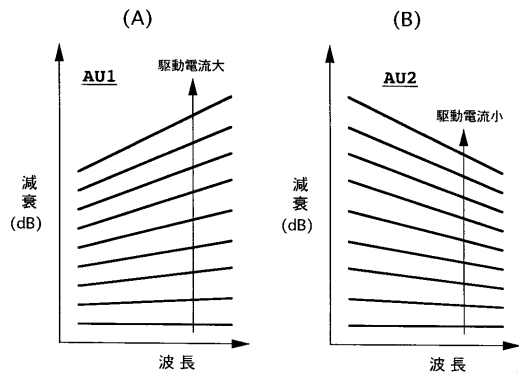
【図 6】

図1の光アッテネータにおける各ファラデー回転角の
波長特性の影響を説明するための図



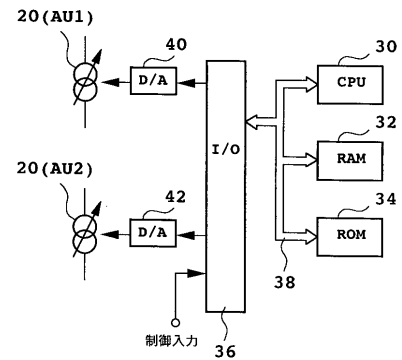
【図 7】

図1のアッテネータユニットAU1及びAU2における減衰の波長特性の変化を示す図



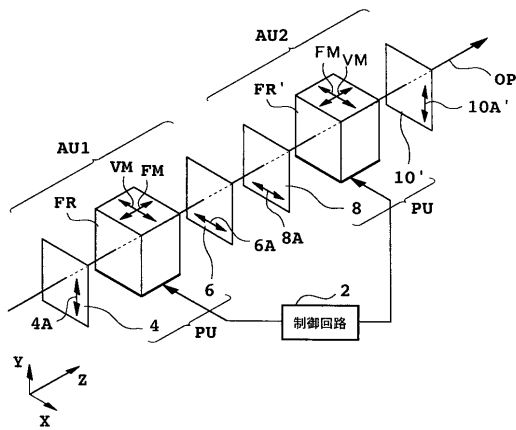
【図 8】

制御回路2の実施形態を示すブロック図



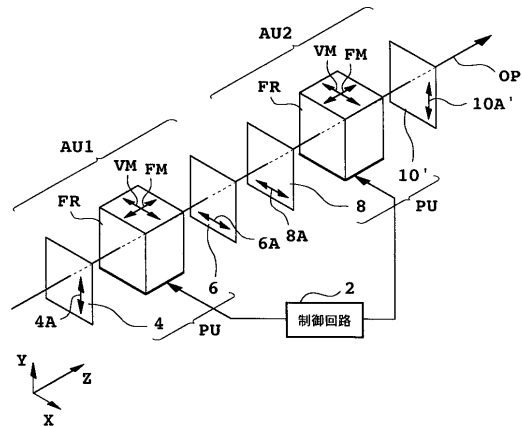
【図 9】

光アッテネータの第2実施形態を示す図



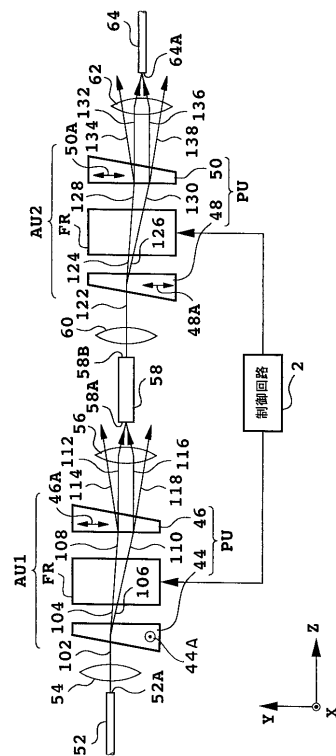
【図 10】

光アッテネータの第3実施形態を示す図



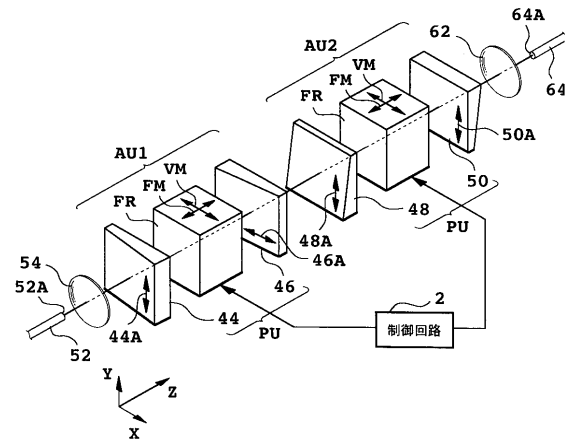
【図 1 1】

光アッテネータの第4実施形態を示す図



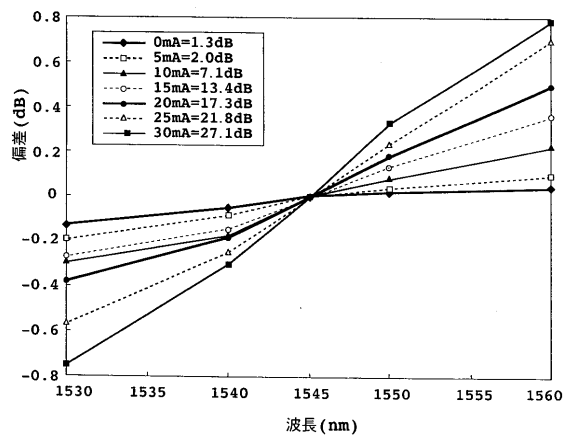
【図 1 2】

光アッテネータの第5実施形態を示す図



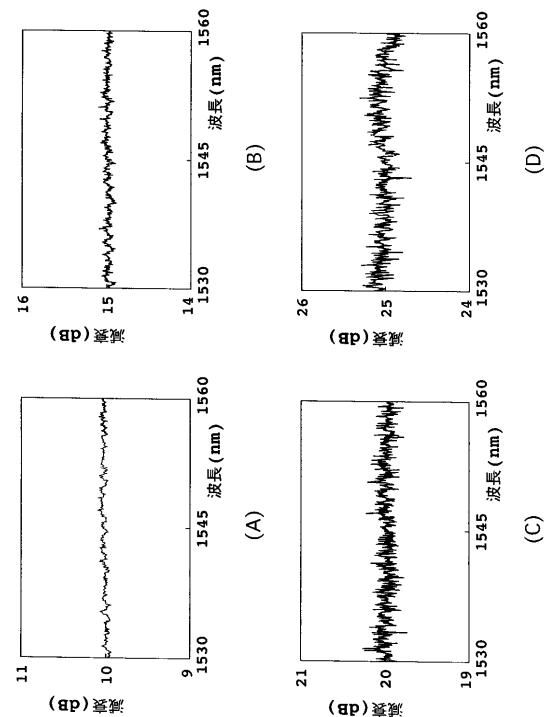
【図 1 3】

図12のアッテネータユニットAU1における減衰の波長特性の測定結果を示すグラフ



【図 1 4】

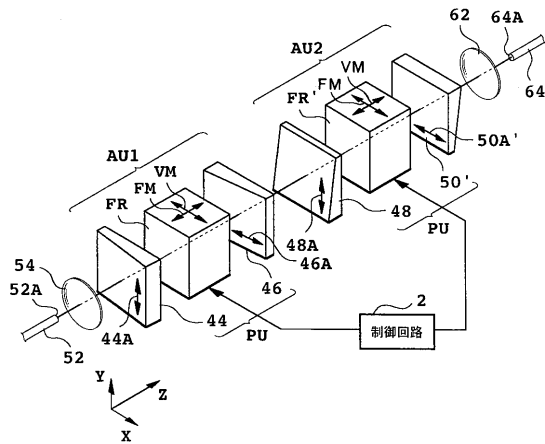
図12の光アッテネータにおけるトータル減衰の波長特性の測定結果を示すグラフ



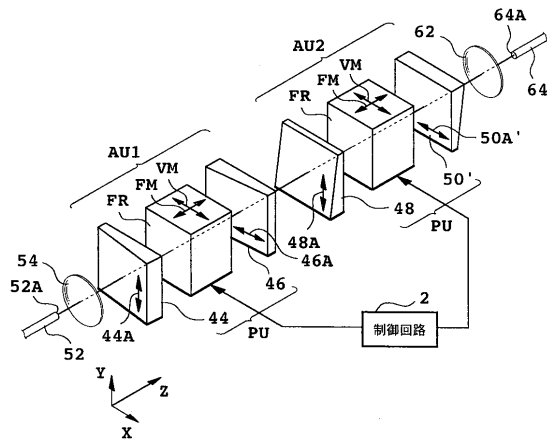
【 図 1 5 】

【 ㄨ 1 6 】

光アッテネータの第6実施形態を示す図



光アッテネータの第7実施形態を示す図

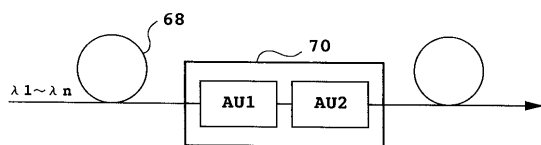


【 図 1 7 】

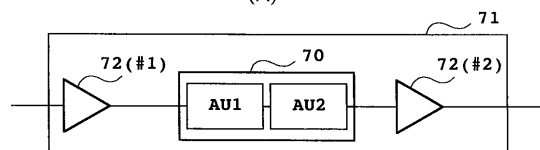
【 図 1 8 】

本発明による光増幅器の実施形態を示すブロック図

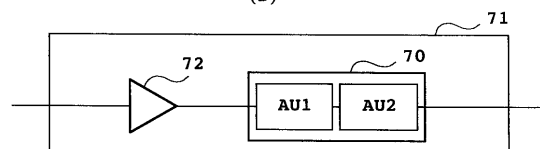
本発明によるシステムの実施形態を示すブロック図



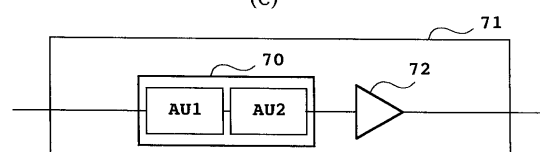
(A)



(B)

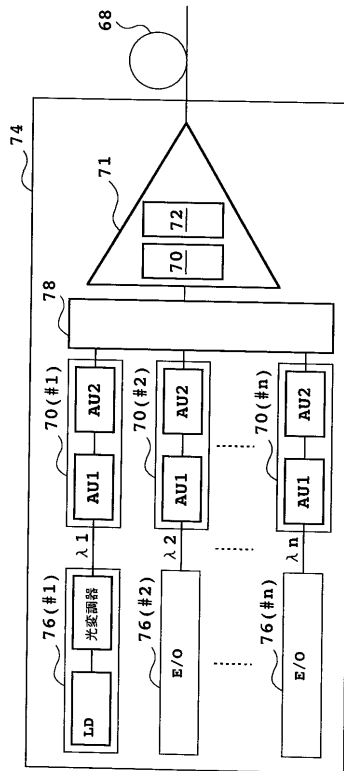


(C)



【図 19】

本発明による端局装置の実施形態を示すブロック図



フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B名)

G02F 1/01