

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4108564号
(P4108564)

(45) 発行日 平成20年6月25日(2008.6.25)

(24) 登録日 平成20年4月11日(2008.4.11)

(51) Int.Cl.

F I

G O 1 J 4/04 (2006.01)

G O 1 J 4/04

Z

請求項の数 17 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2003-275503 (P2003-275503)	(73) 特許権者	000004226
(22) 出願日	平成15年7月16日(2003.7.16)		日本電信電話株式会社
(65) 公開番号	特開2004-170382 (P2004-170382A)		東京都千代田区大手町二丁目3番1号
(43) 公開日	平成16年6月17日(2004.6.17)	(74) 代理人	100083552
審査請求日	平成17年7月11日(2005.7.11)		弁理士 秋田 収喜
(31) 優先権主張番号	特願2002-218458 (P2002-218458)	(74) 代理人	100103746
(32) 優先日	平成14年7月26日(2002.7.26)		弁理士 近野 恵一
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(72) 発明者	平林 克彦
			東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日 本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	天野 主税
			東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日 本電信電話株式会社内
		審査官	▲高▼場 正光

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 偏波状態測定器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ファイバあるいは導波路内の信号光の少なくとも一部を外部に取り出す光取出手段と、
前記光取出手段で取り出された信号光をコリメートして光ビームとする光コリメート手
段と、

前記光ビームが垂直に入射される偏波制御手段と、

前記偏波制御手段を通過した光が入射されるディテクタアレイとを有し、

前記光取出手段は、ファイバあるいは導波路内の光を通過する部分を切断するように、
前記ファイバあるいは導波路の延長方向に垂直な直線に対して、 22.5° の角度で斜め
に、前記ファイバあるいは導波路に設けられる第1の溝と、

当該第1の溝内に挿入されるハーフミラーとを有し、

前記光コリメート手段は、前記ハーフミラーで反射された光を、コリメートして出射す
るプリズム状のレンズアレイであることを特徴とする偏波状態測定器。

【請求項2】

前記プリズム状のレンズアレイは、頂角角度が 45° であり、斜め側面がレンズアレイ
とされたプリズムマイクロレンズアレイ、あるいは、斜め側面にマイクロレンズアレイを
有するプリズムであることを特徴とする請求項1に記載の偏波状態測定器。

【請求項3】

前記偏波制御手段は、回転機構を持つ円盤と、

前記円盤上に設けられる、 0° 方向の偏光子、 45° 方向の偏光子、 $\lambda/4$ 板 + 90°

10

20

方向の偏光子、および 90° 方向の偏光子、あるいは任意の方向の直交する偏光子 2 枚および波長板を備えた偏光子を有することを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載の偏波状態測定器。

【請求項 4】

前記偏波制御手段は、直線偏光子、あるいは、直線偏光子を円盤型に加工した回転型偏光子であることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載の偏波状態測定器。

【請求項 5】

前記ファイバあるいは導波路内の光を通過する部分を切断するように、前記ファイバあるいは導波路に設けられる第 2 の溝と、

前記第 2 の溝に挿入されるアクティブ面型素子とを有することを特徴とする請求項 1 ないし請求項 4 のいずれか 1 項に記載の偏波状態測定器。

10

【請求項 6】

前記偏波制御手段は、前記光ビームが入射される位置に、軸がある任意の方向になるように配置され、 m 、 n を整数とするとき、通過する光ビームの位相を、 $2n\pi + m\pi/4$ だけシフトさせる位相制御素子と、

前記位相制御素子の後段に配置され、 p 偏波と s 偏波に分離する偏光分離素子とを有し、

前記ディテクタアレイは、前記偏光分離素子の前記 2 つの偏波の出力部に配置される 2 個のディテクタであり、

前記 m を 3 つ以上ふって、前記位相制御素子を通して光ビームの位相をシフトさせた時の前記 2 個のディテクタの出力に基づき、光ビームの偏光状態を測定する測定手段とを備えることを特徴する請求項 1 に記載の偏波状態測定器。

20

【請求項 7】

前記偏光分離素子は、軸が前記任意の方向に対して θ だけ傾けて配置されることを特徴とする請求項 6 に記載の偏波状態測定器。

【請求項 8】

前記偏波制御手段は、前記光ビームが入射される位置に、それぞれの軸がある任意の方向に対して $\pm\theta$ 方向となるように配置され、 k 、 l 、 m 、 n を整数とするとき、通過する光ビームの位相を、 $2n\pi + m\pi/4$ 、および、 $2l\pi + k\pi/4$ だけシフトさせる第 1 および第 2 の位相制御素子と、

30

前記第 1 および第 2 の位相制御素子の後段に、軸が前記任意の方向となるように配置される直線偏光子とを有し、

前記ディテクタアレイは、前記直線偏光子の後段に配置されるディテクタであり、

前記 k 、 m をそれぞれ 3 つ以上ふって、前記第 1 および第 2 の位相制御素子を通して光ビームの位相をシフトさせたときの、前記第 1 の位相制御素子を通して光ビームの位相シフト量と前記第 2 の位相制御素子を通して光ビームの位相シフト量との組み合わせの中の少なくとも 6 つの組み合わせの時の、前記ディテクタの出力に基づき、光ビームの偏光状態を測定する測定手段とを備えることを特徴する請求項 1 に記載の偏波状態測定器。

【請求項 9】

40

前記直線偏光子は、シート状の偏光子であることを特徴とする請求項 8 に記載の偏波状態測定器。

【請求項 10】

前記ファイバあるいは導波路を固定する固定板を備え、

前記任意の方向は、前記固定板の第 1 の面の法線方向であり、

前記位相制御素子は、前記固定板の第 1 の面上に配置されることを特徴とする請求項 6 ないし請求項 9 のいずれか 1 項に記載の偏波状態測定器。

【請求項 11】

前記 θ の値は、 $22.5^\circ \times n$ (n は整数) であることを特徴とする請求項 7 ないし請求項 10 のいずれか 1 項に記載の偏波状態測定器。

50

【請求項 1 2】

前記位相制御素子の前記光ビームが通過する以外の部分に、前記光ビームに平行なモニタ光を通過させるモニタ光源と、

前記モニタ光を受光するモニタ光用ディテクタと、

前記位相制御素子のモニタ光の入射面および出射面に配置されるクロスニコル状態の偏光子とを備え、

前記位相制御素子は、印加電圧により位相シフト量を変化させる位相制御素子であり、

前記モニタ光は、前記信号光と同じ波長あるいはその半分の波長の光であり、

前記測定手段は、前記モニタ光ディテクタの出力が、最大あるいは最小となる印加電圧を、前記位相制御素子を通過する光ビームの位相シフト量が、 $2n\pi + m\pi/4$ となる電圧として記憶しておき、前記記憶した電圧を前記位相制御素子に印加し、前記位相制御素子を通過する光ビームの位相をシフトさせて、光ビームの偏光状態を測定することを特徴とする請求項 6 ないし請求項 1 1 のいずれか 1 項に記載の偏波状態測定器。

10

【請求項 1 3】

前記モニタ光源は、発光ダイオードであることを特徴とする請求項 1 2 に記載の偏波状態測定器。

【請求項 1 4】

前記位相制御素子は、電気光学結晶板であり、

前記位相制御素子の軸は、前記電気光学結晶板の結晶軸方向であることを特徴とする請求項 6 ないし請求項 1 3 のいずれか 1 項に記載の偏波状態測定器。

20

【請求項 1 5】

前記位相制御素子は、電気光学セラムクス板であり、

前記位相制御素子の軸は、前記電気光学セラムクス板に印加する電界方向であることを特徴とする請求項 6 ないし請求項 1 3 のいずれか 1 項に記載の偏波状態測定器。

【請求項 1 6】

前記位相制御素子は、液晶素子であり、

前記位相制御素子の軸は、前記液晶素子の液晶分子の配向方向であることを特徴とする請求項 6 ないし請求項 1 3 のいずれか 1 項に記載の偏波状態測定器。

【請求項 1 7】

前記位相制御素子は、液晶素子であり、

前記液晶素子のキャパシタンスを測定する測定手段を備え、

前記測定手段の測定結果に基づき、前記位相制御素子を通過する前記光ビームの位相シフト量を、 $2n\pi + m\pi/4$ に制御することを特徴とする請求項 6 ないし請求項 1 3 のいずれか 1 項に記載の偏波状態測定器。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ファイバあるいは導波路内を進行する光の偏波状態を、簡易にモニタ可能な小型・集積・アレイ化可能・低価格な偏波状態測定器に関する。

【背景技術】

40

【0002】

偏波制御器は、コヒーレント通信に必須のデバイスである。最近では 40 Gbit/s 以上の超高速通信における偏波モード分散補償に用いられている。

偏波モード分散補償を行うためには、偏波状態を測定し、偏光度を求めるのが有効である。このためには、ファイバ、ファイバアレイ、導波路内の光の偏波状態を通過する光の偏波に影響を及ぼすことなく、偏波状態をモニタする必要が生じている。しかも、多数のファイバ内の偏波状態を高速で、同時に測定する必要がある。

また、数 Tbit/s 以上の超大容量伝送には、波長多重に加えて偏波多重技術が用いられているが、偏波多重した信号を偏波分離するためには、ファイバ内の直線偏波を分離して、その強度をモニタする必要が生じる。しかもアレイで同時に高速にモニタする必要が

50

ある。

即ち、カップラで分離して、ファイバあるいは導波路を介して偏波を測定すると、カップラ部、ファイバ部、導波路部で偏波状態は変化してしまう。このような制約があるため、偏波測定器はファイバ、導波路に集積化が可能で小型である必要がある。

さらに、ファイバや導波路はアレイ状であることが多く、複数の光の偏波状態を同時に測定する必要がある。しかし、光ファイバ内の偏波状態に変化を与えることなく、アレイ状で偏波状態を測定する技術はなかった。

従来の偏波測定器は、バルクのプリズムや偏光ビームスプリッタ、波長板、などを組み合わせた空間ビーム系を用いるタイプが多く、小型集積化に不向きであった。さらに、各光学部品が高価で、アライメントに労力を要するため、数10万円から数100万円と高価であった。

【0003】

一方、波長多重通信は1本のファイバに多数の波長の光の信号を乗せて伝送できることから急速に普及が進んでいる。

光伝送においては、1:1の幹線系の通信、1:Nの局から家庭・オフィス、N×Nの光スイッチ・ルーティングなど種々の形態がある。

ファイバ内の波長多重された光のスペクトルを監視して、それぞれの波長ピークの強度が同じになるように補正したり、波長のずれがないかチェックする必要がある。このため、ファイバアレイあるいは導波路内の光のスペクトルを監視測定する必要がある。しかもアレイで高速に測定する必要がある。

しかし、ファイバ内の光スペクトルを通過する光に影響を及ぼすことなく、光スペクトルを測定する装置はなく、またアレイ状態でモニタできるものもなかった。

最近になって、ファイバ、ファイバアレイ内、導波路の光強度をモニタするタップ型のディテクタアレイが開発されている。

これは導波路内に分岐を設け、分岐した部分にマイクロピラミッドミラーとディテクタアレイを張り付けるという方法で行われたり(下記非特許文献1参照)、2本の同一方向を向いたファイバからの入射光をミラーで反射させて出射側ファイバへカップリングし、ミラーから通過した一部の光をディテクタで受けるタップ型モニタ(下記非特許文献2参照)、導波路に斜めに溝を掘ってハーフミラーを挿入して反射光をディテクタで受けるというインライン形パワーモニタ(下記非特許文献3参照)がある。

【0004】

なお、本願発明に関連する先行技術文献としては以下のものがある。

【非特許文献1】NEC、小田、古宇田、北条、金子、花田、他「マイクロピラミッドミラーを用いたアレイ光導波路モニタチップ」、2002年電情報通信学会総合大会C-3-16、p.148

【非特許文献2】サンテック(株) カタログ、タップPDモニタ

【非特許文献3】住友電工、佐々木、小宮、藤村、塩崎、瀬村、山林、西村「小型多チャネル光信号強度モニタの開発」SEIテクニカルレビュー 第159号(23)2001年9月

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

前述したように、光のパワーの監視装置は、一部開発されるようになってきたが、通過する光の状態を変化させることなく、アレイで光のスペクトル、光の偏波状態をモニタする装置は開発されていない。

本発明は、前記従来技術の問題点を解決するためになされたものであり、本発明の目的は、ファイバ内を通過する光の偏波状態、スペクトル状態をアレイで安価にモニタすることが可能な技術を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本願において開示される発明のうち、代表的なものの概要を簡単に説明すれば、下記の

10

20

30

40

50

通りである。

本発明では、ファイバアレイ・導波路に斜めに溝を形成し、当該溝内に、通過する光の偏波状態に影響を与えないように設計したハーフミラーを挿入固定して、その反射された光のアレイを、プリズム状に加工したマイクロレンズにより、コリメートして、機械的に回転する偏光子、フィルタ、波長板、あるいは電氣的に屈折率を変化させる電気光学素子などに垂直に通過させて、その出力をディテクタ、ディテクタアレイで受けることにより、ファイバ内を通過する偏波の状態、光スペクトルの状態、その他光の状態をアレイで安価にモニタする。

本発明における、導波路に斜めに溝を形成し、ハーフミラーを挿入して反射光をディテクタアレイで受けるという手法は、前述の非特許文献3に開示されているインライン形パワーモニタに類似している。

10

【0007】

しかしながら、前述の非特許文献3に開示されている方法では、ファイバから反射した光を斜めに射出させてレンズを介することなく斜めの光をディテクタに直接入射させている。パワーのみをモニタする場合はそれでよいが、光のスペクトル、偏光状態を測定するためには、波長板、フィルタ、電気光学素子、ディテクタなどの面に垂直にコリメートした光アレイを入射させる必要があり、そのため、本発明では、レンズアレイをプリズム状に加工し、ファイバで反射された光をコリメートするという手法を採用する。

即ち、本発明は、光取出手段により、ファイバあるいは導波路内の信号光の少なくとも一部を外部に取り出し、プリズムマイクロレンズアレイなどの光コリメート手段により、前記光取出手段で取り出された信号光をコリメートし、その後、可変波長フィルタ、電気光学効果素子、偏光子、波長板などに垂直に通過させ、ディテクタアレイで受け、光ファイバ内を伝送する光信号に影響を与えず、その内部の光のスペクトル、偏波状態、偏波の一部の強度、選択された波長の強度あるいはそれらを組み合わせたものを1チャンネル以上同時に測定する機能を持つことを特徴とする偏波状態測定器である。

20

【0008】

本発明は最近の下記の技術の進展により、発明に至ったものである。

(一) 液晶素子、PLZTなど電気光学セラミクス等の大きな電気光学効果を有する位相制御素子の作製技術が進展し、民生用のディスプレイ、写真プリンタなどに用いられ、価格が大幅に低下してきた。

30

(二) 通信用の1300nm、1550nm帯半導体レーザが普及し、さらにその半分の波長の光のレーザ(660nm、780nmの半導体レーザ)は民生用に普及し、特に後者のレーザの価格が大幅に低下した。

さらに、発光ダイオードの価格はさらに低下し、650nmから660nm、780から800nmの発光ダイオードは数10円であり、またディテクタもSiのフォトダイオードが非常に安価に入手できるようになった。

(三) ファイバアレイ、導波路アレイの技術の進展とともに、ディテクタアレイが比較的安価に入手可能になった。

【発明の効果】

【0009】

40

本願において開示される発明のうち代表的なものによって得られる効果を簡単に説明すれば、下記の通りである。

(1) 本発明によれば、1本ないしアレイ・テープ・リボンファイバ内あるいは導波路アレイ内の偏波の状態、スペクトルの状態をアレイ一括で高速に容易にモニタすることが可能となる。

(2) 本発明によれば、従来の偏波状態測定器に比べて、安価であるとともに、小型化、かつ、アレイ化が可能な偏波状態測定器を提供することが可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0010】

以下、図面を参照して本発明の実施例を詳細に説明する。

50

なお、実施例を説明するための全図において、同一機能を有するものは同一符号を付け、その繰り返しの説明は省略する。

〔参考例 1〕

本発明の参考例 1 として、光スペクトルアナライザについて説明する。

本参考例のインライン型光スペクトルアナライザの基本構造を図 1 (a) ~ 図 1 (c) に示す。

図 1 (a) において、1 - 1 はハーフミラー、1 - 2 はファイバアレイを固定する V 溝アレイ、1 - 3 はテープファイバ、1 - 4 は斜めに形成された $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 幅の溝であり、ここでは溝 (1 - 4) の角度は、テープファイバ (1 - 3) の延長方向に垂直な直線に対して、 22.5 度とされる。

1 - 5 は、平面マイクロレンズアレイを 45 度の頂角を持つプリズム状に加工したプリズムマイクロレンズアレイ、1 - 6 はディテクタアレイ、1 - 7 はファイバからの信号光をハーフミラーで反射された光をマイクロレンズアレイでコリメートしたビームアレイ、1 - 8 はファイバコア、1 - 9 はプリズム面に形成された AR コートである。

【 0 0 1 1 】

図 1 (b)、(c) において、1 - 10 はディスクフィルタであり、ディスクフィルタ (1 - 10) は、円周方向に透過波長が変化している。

1 - 11 はファイバアレイとディテクタアレイを固定するジグ、1 - 12 はディスクフィルタの位置をモニタするセンサ部、1 - 13 は円周上に設けたマーカであり、このマーカ (1 - 13) の数をカウントすることにより、その透過スペクトル波長を決定する。

本参考例では、プリズムマイクロレンズアレイ (1 - 5) として、イオン拡散によってガラス表面に屈折率分布を持たせてレンズとした平面マイクロレンズアレイを例に挙げて説明しているが、通常の凸形のレンズアレイでも構わない。

溝の角度は 22.5 度を代表とし、出射角度は 45 度が望ましいが、溝 (1 - 4) の角度は、 0 度以上 90 度以下であれば、反射光は上に取り出すことができる。

【 0 0 1 2 】

平面マイクロレンズアレイをプリズム状に加工する方法を図 3 に示す。

マイクロレンズアレイは種々開発されている。ガラス表面、プラスチック表面を凸あるいは凹状に加工したものが代表的である。

このマイクロレンズアレイをプリズム状に加工してもよいが、凹凸があるため、加工が比較的難しい。そこで、屈折率分布をもった平面マイクロレンズを用いるのが最もよい。

平面マイクロレンズは、日本板硝子が開発したレンズアレイであり、代表的には $250 \mu\text{m}$ ピッチで焦点距離は約 0.65 mm であり、石英硝子にマスクを塗って、屈折率が高くなるイオン中に浸してイオンを拡散させることによって作製される。

拡散させると表面が凸状になるが、研磨して平坦化している。液晶ディスプレイや通信用レンズとして広く使われている。

この平面マイクロレンズを図 3 (a) に示すように、表面のレンズ面を底辺とするように、プリズム状に加工する。

図 3 (a) において、3 - 1 は平面マイクロレンズアレイ基板 (通常 $250 \mu\text{m}$ ピッチで配列)、3 - 2 はレンズ面を底辺に持つようにプリズム状に切断研磨したプリズムマイクロレンズアレイ、3 - 3 はファイバ、3 - 4 はハーフミラー、3 - 5 はプリズム形マイクロレンズアレイでコリメートされたビームアレイである。

【 0 0 1 3 】

ガラス厚は約 1 mm であるので、ダイシングソーによって 45 度で切断し、研磨することによって平面マイクロレンズアレイを底辺に持つプリズムマイクロレンズアレイ (3 - 2) が得られる。

このプリズムマイクロレンズアレイ (3 - 2) の頂点から底辺までの距離を 0.8 mm 程度として、ファイバ (3 - 3) (あるいは、導波路) に 22.5° に形成した溝にハーフミラー (3 - 4) を挿入して光を反射させた上に、プリズムマイクロレンズアレイ (3 - 2) を屈折率が一致した接着剤で固定すると、反射点がちょうど平面マイクロレンズア

10

20

30

40

50

レイの焦点（ガラス中では焦点距離は $0.65\text{ mm} \times 1.45 = 0.94\text{ mm}$ ）になり、光はコリメートされる。

ファイバの外直径が $125\text{ }\mu\text{m}$ とすると、 45° プリズムの場合、一辺の長さは 1.27 mm に設定すると焦点距離の所にファイバとミラーの反射点がある。

平面マイクロレンズアレイは $250\text{ }\mu\text{m}$ ピッチが標準であり、さらにはファイバアレイのピッチも $250\text{ }\mu\text{m}$ が標準であるので、 $250\text{ }\mu\text{m}$ ピッチのビームアレイを 45° 方向に出射できる。

通常、テープファイバ（3 - 3）のアレイ数は4、8、12、16、32とあるが、平面マイクロレンズ（3 - 1）のアレイ数はそれ以上に対応できている。

また、図3（b）に示すように、平面マイクロレンズアレイ（3 - 1）を $100\text{ }\mu\text{m}$ から $200\text{ }\mu\text{m}$ 程度に薄く研磨し、市販のプリズム（3 - 7）に張り付けてもよい。

図3（b）において、3 - 6は薄く研磨された平面マイクロレンズアレイ、3 - 7はプリズムである。図3（b）に示す方法では、市販のプリズムを適用できるメリットがある。

【0014】

誘電体多層膜フィルタの中で、その位置によって透過波長が変化する波長フィルタがあり、直線方向に線形に波長が変化するタイプと、円盤の円周方向に波長が変化するタイプ（参考文献、鈴木、阿部、橋本、片桐「ディスク形波長可変光フィルタを用いた絶対波長制御法の提案と検証」2002年電子情報通信学会総合大会C - 3 - 79、p. 211）がある。

後者では、半値幅の限界は 0.1 nm で可変波長範囲は 150 nm 程度であり、消光比は 40 dB 以上、ロス 1 dB 程度である。

ここでは、図1に示すように、後者のフィルタ（本明細書では、ディスクフィルタという）を用いた場合について説明する。

$250\text{ }\mu\text{m}$ ピッチのファイバアレイ（1 - 3）をV溝に固定して、ハーフミラー（1 - 1）で反射させて、プリズムマイクロレンズアレイ（1 - 5）でコリメートビームアレイを形成し、ディスクフィルタ（1 - 10）を通過させて、ディテクタアレイ（1 - 6）に入射させる。

ディスクフィルタ（1 - 10）の外周には破線のマーカ（1 - 13）が形成されており、このマーカ（1 - 13）に光を透過させることにより、ディスクフィルタ（1 - 10）を通過しているビームの光の波長の絶対値を読むことが可能である。

入射側のファイバは、ディスクフィルタ直近に来るため、図1（b）に示すように、ディスクフィルタ（1 - 10）に接触しないように若干曲げている。

本ディスクフィルタ（1 - 10）を毎秒1000回転で回転させると、 1 ms で 150 nm の操引を分解能 0.1 nm で行い、ディテクタアレイ（1 - 6）からの出力をADコンバータで 1 MHz 以上の速度で取り込むことにより、多チャンネルのインライン型の光スペクトラムアナライザを実現できる。

波長スイッチ、レベルイコライザなどにおいて、各波長のチャンネルの波長の絶対値、ピークパワーなどを常にモニタして、異常があった場合、パソコンからエラーを出すようにプログラムを組むことが可能となる。

【0015】

次に、液晶可変波長フィルタを用いる場合について説明する。

ディスクフィルタ（1 - 10）は、機械回転式であるので信頼性が落ちるという欠点がある。そこでメカニカル部分のない、液晶可変波長光フィルタを用いてインライン型スペクトラムアナライザを構成する構造を、図2（a）、（b）、（c）に示す。

図2（a）は、 $\lambda/4$ 板（2 - 7）とミラー（2 - 6）を用いて偏波依存性を解消するタイプの液晶可変波長フィルタを示す図、図2（b）は、偏光分離により偏波依存性を解消するタイプの液晶可変波長フィルタを示す図である。

図2（c）は、液晶可変波長フィルタの正面を示す図である。

図2（a）、（b）、（c）において、2 - 1は2列のディテクタアレイ、2 - 2は平

10

20

30

40

50

坦なガラス、2 - 3 は透明電極、2 - 4 は誘電体ミラー、2 - 5 はネマチック液晶、2 - 6 はミラー、2 - 7 は $\lambda/4$ 板、2 - 8 は入射する光ビーム、2 - 9 は三角支持台、2 - 10 は平面マイクロレンズをプリズム状に加工したプリズムマイクロレンズアレイ、2 - 11 は方解石（カルサイト）を代表とする偏光分離素子、2 - 12 は $\lambda/2$ 板、2 - 13 は液晶フィルタを通過する光ビームアレイ、2 - 14 は容量をモニタするための分割された透明電極パターン、2 - 15 は液晶フィルタを駆動するための透明電極パターンである。

【0016】

液晶可変波長フィルタは偏波依存性があるため、偏波無依存化する必要がある。

但し、ディテクタで直接受けるため、偏光分離した2本のビームを再度1本のビームに戻す必要はなく、2列のディテクタアレイ（2 - 1）に分離した2列の光ビームアレイをディテクタアレイ（2 - 1）に入射させればよい。

偏光分離の方法は、図2（b）に示すように、偏光分離素子（カルサイトあるいは偏光ビームスプリッタ+プリズム）（2 - 11）によって、2本のp、s偏波に分離し、片方のビームを $\lambda/2$ 板（2 - 12）で90°回転させて、2本とも液晶の配向と同じ偏光方向にして液晶可変波長フィルタを通過させる方法と、図2（a）に示すように、液晶可変波長フィルタの入射側に $\lambda/4$ 板（2 - 7）とミラー（2 - 6）を張り付け、入射した光の内、透過された光以外の波長を反射させこれを $\lambda/4$ 板（2 - 7）とミラー（2 - 6）によって再度液晶可変波長フィルタに入射させる方法がある。

液晶可変波長フィルタは、配向膜/誘電体ミラー（2 - 4）/透明電極（2 - 3）/ガラス基板（2 - 2）でネマチック液晶（2 - 5）を挟んだ液晶エタロンの構造を持ち、誘電体ミラー（2 - 4）の平行度を高精度に調整したものであり、数V電圧を印加するだけで波長は150nm以上変化する。フィネスは150程度であるので、分解能は1nmとディスクフィルタに比べると低い。

【0017】

面型の可変波長フィルタとして動作するので、コリメータビームアレイを液晶フィルタに通過させて、ディテクタアレイにカップリングさせる。

ディテクタアレイ（2 - 1）は2列のアレイであり、2本に分離した1対の光ビームが入射する。電気に変換された後、2つの電気出力をパソコン上で足し算することによって偏波無依存化することが可能である。

前述のディスクフィルタ（1 - 10）と同様にスペクトラムアナライザアレイを実現できる。

しかし、液晶可変波長フィルタは面内で少し波長分布を持ち、また温度によって透過波長が変化する。

このため、図2（c）に示すように、光が通過する近傍に数カ所ITOをパターンニングすることにより、透明電極パターン（2 - 14）を形成して、□のコンデンサを作り、コンデンサの容量を常にモニタすることにより、温度、外部応力等によってギャップや屈折率が変化しても、常にその位置の正確な波長をモニタして、光スペクトラムアナライザを実現できる（特願平7 - 147472号「液晶可変波長フィルタの駆動電源装置」参考）。

2本のビームは偏光分離の場合と同様に2列のディテクタアレイ（2 - 1）に入射させることによって、偏波無依存のインライン形のスペクトラムアナライザを実現できる。

このように、本参考例では、ファイバアレイ、導波路アレイ内の光信号のスペクトルをアレイで測定することができる。

【0018】

[実施例1]

本発明の実施例1として、インライン型偏波状態測定器について説明する。

光の偏光状態を測定するためには、 $\lambda/4$ 板あるいは $\lambda/2$ 板、旋光子、直線偏光子を組み合わせ、その通過した4つの出力から偏光状態を知ることができる。

例えば、図4に示すように、円盤の上に0°方向の偏光子、 $\lambda/4$ 板+90°方向の偏

10

20

30

40

50

光子、 90° 方向の偏光子、および 45° 方向の偏光子を張り合わせる。

図4において、4-1は直線偏光子、4-2は、 45° 方向の偏光子、4-3は上側に配置した 0° 方向の直線偏光子、4-4は $\lambda/4$ 板、4-5は 90° 方向の直線偏光子、4-6は回転式円盤、4-7は破線マーカである。

4-8は、破線マーカで円盤の回転角度をモニタする部分であり、4-9はディテクタアレイ、4-10は溝に挿入したハーフミラー、4-11はテープファイバであり、テープファイバ(4-11)は、円盤(4-6)に接触しないように、さらに偏波の状態を変化させない程度に曲げられている。4-12はプリズム台、4-13は出射側テープファイバである。

これらの4つの部品を通過した光のパワーを測定することにより、ストークスベクトルを計算できる。この計算方法については後述する。

円盤(4-6)には、1組以上の該偏光子と波長板の組み合わせを張り合わせ、高速で回転させることにより、高速にストークスベクトルを計算できる。

ファイバアレイからの出力を、平面マイクロレンズをプリズム状に加工したプリズムマイクロレンズアレイでコリメートビームアレイにして、円盤(4-6)を回転しながら、ディテクタアレイ(4-9)で出力をモニタして、その出力をADコンバータでパソコンへ転送することにより、1ms以下の速度で16ch以上のファイバアレイ内の偏波状態を同時に測定できる。

また、円盤上に乗せる波長板、偏光子の組み合わせはこれ以外にも複数あり、種々の組み合わせからストークスベクトルを計算して出力することができる。

【0019】

[実施例2]

本発明の実施例2として、インライン型直線偏波モニタについて説明する。

インライン型の直線偏波モニタは、その前段に、偏波制御素子アレイを付けて、(1)ファイバアレイ内の偏波を常に直線偏波に変換するためのモニタとして用いたり、(2)偏波モード分散制御において直線偏光子を通過した高速に変調された光信号の高次モードの電気RFパワーをモニタしてそのパワーを最大にするように制御することにより、偏波モード分散制御する(参考文献:M.Hayashi,H.Tanaka,and M.Suzuki,"40Gb/s demonstration of wide range PMD-compensation using a polarizer" OECC2001,48-49,2001)ために用いられる。

従来、1本でコリメータとして、その間に偏光ビームスプリッタを付けることによって、直線偏波成分をモニタしていたが、多チャンネルのコリメータがないため多チャンネル化ができなかった。

本発明では多チャンネル化が可能である。固定の偏光子をディテクタの前に配置する際、コリメートレンズを付けた場合と付けない場合について説明する。

【0020】

固定型偏光子を用いて偏波を安定化させた場合

図5(a)に示すように、ハーフミラーから反射された光をコリメートレンズを付けずに偏光子を通してディテクタアレイで受けてもよい。

図5(a)において、5-1はハーフミラー、5-2はディテクタアレイ、5-3はV溝アレイを形成したガラス基板、5-4は斜めに形成した溝、5-5はテープファイバ、5-6は直線偏光子であり、5-7は直線偏光子の偏光軸の方向を示す。

一般に、偏光子は、通常その面に垂直に光を通過させた場合に最も消光比が高くなるように設計されている。

図5(a)のように、光ビームが偏光子に対して約 45° の角度で入射すると消光比は低下する。ポーラコア(コーニング製直線偏光子)を用いた場合には、長波長側の特性が低下する。200 μm 厚の偏光子ポーラコアは本来60dB程度の消光比を持つが 45° 傾けているため、長波長側で消光比が20dB程度と低下する。

ここでは、偏光子の偏光軸をファイバと平行に配置しているが、直交させて配置するとさらに消光比は低下してしまう。

10

20

30

40

50

1550nm以下であれば消光比は18dB程度得られるため、コリメートレンズを挿入する必要はないが、図5(b)に示すように、平面マイクロレンズをプリズム状に加工したプリズムマイクロレンズアレイ(5-8)を配置して、45°方向に光を反射させて光が垂直に入射するように直線偏光子(5-6)とディテクタアレイ(5-2)を配置することにより、消光比を劣化させることなく、直線偏波成分をファイバを通過する光に何ら影響を及ぼすことなくモニタすることが可能となり、(1)偏波安定化、(2)偏波モード分散制御のアレイ化に非常に有効である。

【0021】

回転型偏光子を用いて、任意の方向の直線偏波の成分をモニタする場合

先の例では、直線偏光子(5-6)の向きは決まっていたため、決まった方向の直線偏波成分しかモニタできなかった。

10

本例では、前述の参考例1で示したように、円盤型に直線偏光子を加工し、平面マイクロレンズをプリズム状に加工したプリズムマイクロレンズアレイとディテクタアレイの間に配置し、円盤状の偏光子を回転させることにより、その直線偏光子の方向を任意に変えることにより、任意の方向の直線偏波の成分をアレイでモニタすることが可能となる。図6にその構造を示す。

図6において、6-1は円盤状に加工した直線偏光子、6-2はその周囲に付けた偏光子の軸の方向をモニタするためのマーカ、6-3はディテクタアレイ、6-4はマーカモニタ、6-5はファイバアレイを固定したV溝ガラス基板、6-6は溝に挿入したハーフミラー、6-7は平面マイクロレンズをプリズム状に加工したプリズムマイクロレンズアレイ、6-8はファイバアレイから反射されてコリメートされた光ビームアレイ、6-9はこれらの部品を支持する固定ジグである。

20

直線偏光子(6-1)を回転させ、マーカ(6-2)の数をカウントすることにより、その直線偏光子(6-1)の角度を読みとり、その角度の直線偏光成分をディテクタアレイ(6-3)でモニタすることが可能となる。

このため、任意の角度の直線偏波を得るために、このインライン形のディテクタアレイを用いると、その強度を最大あるいは最小にすることにより、所望の方向の直線偏波に制御することが可能となる。

【0022】

[実施例3]

30

本発明の実施例3として、ハーフミラーの反射率の偏波依存性を解消する方法を説明する。

ストークスベクトルを正確に求める場合、ハーフミラー(図1の1-1)で反射された光の偏波および通過する光の偏波は同じであり、また位相差が生じないようにする必要がある。このため、ハーフミラーを構成する誘電体ミラーの層構成を最適設計する必要がある。

ハーフミラーの角度、反射率を設定して、誘電体ミラーの高屈折率層と低屈折率層の膜厚を振って、ある波長領域でp、s偏波に対する反射率を計算し、その偏波依存性が最低になるようにシミュレーションする。その結果、最低20層以上の膜を形成することにより、計算および実験結果からほぼ偏波依存性のない反射率を得られることがわかった。

40

Ta₂O₅/SiO₂多層膜とし、それらの厚さをλ/4からλ/2近くの厚さにして、その層数を25層として、反射率の計算値と実測値および位相差の計算値の結果を図7に示す。

本実施例の誘電体ミラーでは、溝の角度が22.5°で反射率が15%になり、位相差が最低になり、p、s偏波の反射率が15%になるように設計した。

層の総数は25層であり、約6μmの厚さがある。実際の測定値も図7に示す。このようにミラーの層厚を20層以上とし、それぞれの膜厚を調整することによって、反射率のp、s偏波依存性がなく、位相差が生じない誘電体ミラーを形成できる。

【0023】

[実施例4]

50

本発明の実施例 4 として、誘電体ミラーの層構成、溝へ挿入固定の接着剤の屈折率マッチングについて説明する。

誘電体ミラー（図 1 の 1 - 1）を、 Ta_2O_5 / SiO_2 多層膜とし、それらの厚さを $\lambda / 4$ から $\lambda / 2$ 近くの厚さにして、その層数を 25 層として研磨後、屈折率がファイバの屈折率 1.45 と一致した接着剤で、溝に挿入して接着した。透過の偏波依存性は 0.06 dB であり、反射の偏波依存性は 0.02 dB であった。

これに対して、接着剤が 1.5 の物を用いると、透過の偏波依存性は 0.2 dB、反射の偏波依存性も 0.5 dB 以上と大きくなった。このため、偏波依存性がなく、位相差が生じない誘電体ミラーは、層の数は 20 層以上で、溝に挿入・固定する際の接着剤はファイバ・導波路の屈折率に一致していることが必要となる。

【0024】

[参考例 2]

本発明の参考例 2 として、回折格子を持つ光スペクトラムアナライザについて説明する。

先の実施例では、円盤形可変波長フィルタ、液晶可変波長フィルタを用いたが、回折格子（グレーティング）でも同様に光スペクトルを測定することができる。図 8 にその構造を示す。

図 8 において、8 - 1 はグレーティング、8 - 2 はレンズ、8 - 3 は 2 次元ディテクタアレイ、8 - 4 はプリズムレンズアレイ、8 - 5 はハーフミラー、8 - 6 はテーパーファイバ、8 - 7 は分光した光である。

ハーフミラー（8 - 5）で反射した光はグレーティング（8 - 1）によって回折されて、分光され、2 次元のディテクタアレイ（8 - 3）に入射し、ディテクタアレイ（8 - 3）で光スペクトルを測定できる。

なお、図 8 では、固定のグレーティングを記載しているが、回転形グレーティングを用いると、1 次元のディテクタアレイを配置することにより、光スペクトラムアナライザアレイを実現することができる。

【0025】

[実施例 5]

本発明の実施例 5 として、先の実施例 2 で作製したインライン形固定偏光子付きディテクタアレイを用いて、ファイバアレイ内の偏波を常に TE 偏波に変換して、光導波路に入力する系を図 9 に示す。

図 9 では、液晶偏波制御素子により、ファイバアレイ内の偏波を制御している。（特願 2002 - 068880 号「導波路型光素子及びその作製方法」参照）

図 9 において、9 - 1 は光導波路の光導入部であり、9 - 2 は実施例 2 で作製したインライン形偏光子付きディテクタアレイである。

9 - 3 はファイバアレイに固定したファイバアレイに 2 本の溝を形成して薄い液晶偏波制御素子を挿入した偏波制御回路であり、インライン形偏光子付きディテクタアレイ（9 - 2）の直線偏光子を通過した光のパワーを最小にするようにフィードバックをかけることにより、常に導波路に入力する偏波が TE 偏波になる。

導波路自体は大きな複屈折を持つため、TE 偏波が入力されると TE 偏波のまま導波路内を伝搬するので、導波路の偏波依存性がなくなるという大きなメリットがある。

【0026】

[実施例 6]

先の実施例 1 から実施例 5、参考例 1、参考例 2 までは、ファイバアレイ・導波路アレイ内の光の偏波状態、スペクトル状態をアレイでモニタするものについて説明した。

これらの光アレイの状態をモニタした後、その結果を持って制御をする必要が出てくる。例えば、偏波状態をモニタした場合には、その結果を基に偏波制御する。フィードフォワード方式において、偏波をモニタした位置での偏波を制御する必要がある。

具体的には、コヒーレント通信におけるフィードフォワード偏波制御、あるいは偏波モード分散補償がこれに当たる。

10

20

30

40

50

しかし、偏波状態モニタの後、テープファイバで偏波制御器を接続すると、ファイバが固定されていないため、偏波状態が変化してしまっている。

そこで、本実施例の偏波状態測定器を作製したファイバ基板・導波路の同一基板上に偏波制御器を設置することが必要である。

そのためには、本実施例の偏波測定器、参考例の光スペクトラム測定器を作製した時と同様に、同一基板上のファイバ・導波路アレイに溝を形成して、アクティブ面型素子（例えば、液晶の偏波制御器アレイあるいは薄い P L Z T 偏波制御器アレイなどの偏波制御器）を挿入すればよい。（参考文献：K.Hirabayashi, and C.Amano, "Liquid-Crystal Polarization Controller Arrays on Planar Waveguide Circuits," IEEE PTL vol.14, No.4, April p.504-506, 2002, K.Hirabayashi, and C.Amano, "Variable and Rotatable Waveplates of PLZT Electro-Optic Ceramic Material on Planar Waveguide Circuits," IEEE PTL vol.14, No.7, July, p.956-958, 2002）

このようにすることにより、偏波をモニタした箇所で直接偏波制御が可能となる。また、スペクトル状態をモニタした場合には、薄型の可変減衰器などのアクティブ面型素子を溝に挿入することにより、選択された波長の強度を制御することができる。

【 0 0 2 7 】

[実施例 7]

図 10 は、本発明の実施例 7 の偏波状態測定器を示す図であり、同図 (a) は正面図、同図 (b) は斜視図、同図 (c) は偏波測定部のみの外観図、同図 (d) は偏波測定部の側面図である。

同図において、11-1 は位相制御素子を構成する電気光学セラミクス、11-2 は電気光学セラミクス (11-1) を挟む 2 つの電極、11-3 はファイバあるいは導波路を固定する固定板、11-4 はファイバあるいは導波路のコア、11-5 は固定板 (11-3) に形成された溝に挿入される誘電体ミラー、11-6 はプリズム、11-7 は平面マイクロレンズ、11-8 は偏光分離素子、11-9 は 2 個のディテクタ、11-10 は電気光学セラミクス (11-1) を乗せる三角形の台、11-11 は入出力ファイバ、11-12 は誘電体ミラーで反射された光ビーム、11-13 はモニタ光を作るコリメータ付きレーザダイオード、11-14 はモニタビーム、11-15 はモニタ光用ディテクタ、11-16 はモニタ光用の 45° の方向を向いた直線偏光子、11-17 はモニタ光用の -45° の方向を向いた直線偏光子、11-18 は電気光学セラミクス (11-1) に電圧を印加するパルス電源である。

なお、本実施例では、電気光学セラミクス (11-1) として、P L Z T を使用している。

また、平面マイクロレンズ (11-7) は、通常のマクロレンズでもよく、さらに、偏光分離素子 (11-8) は直交方向に分離するタイプのもので、方解石などの異方性光学結晶、あるいは偏光ビームスプリッタが使用される。

また、平面マイクロレンズ (11-7) とプリズム (11-6) に代えて、前述のプリズムマイクロレンズアレイを使用することもできる。

【 0 0 2 8 】

本実施例の偏波状態測定器は、ファイバあるいはファイバアレイあるいは導波路のコア (11-4) を横切るように、固定板 (11-3) に形成した溝に誘電体ミラー (ハーフミラー) (11-5) を挿入し、当該誘電体ミラー (11-5) で反射させた光を、コリメートレンズ (11-7) でコリメートし、この光ビームを、2 枚の電極 (11-2) で挟んだ 1 枚の電気光学セラミクス (11-1) を通過させる。

また、電気光学セラミクス (11-1) の後段に、p 偏波と s 偏波の 2 つに分離する偏光分離素子 (11-8) を配置し、p 偏波と s 偏波の出力を 2 個のディテクタ (11-9) で検出するようになし、電気光学セラミクス (11-1) に、0 V と 1 / 4 波長電圧 (位相が $\pi / 2$)、半波長電圧 (位相が π) を印加し、そのときの 2 個のディテクタ (11-9) の出力からストークスパラメータを算出する。

ファイバあるいは導波路の光を外部に取り出す際、誘電体ミラー (11-5) によって

偏波が変化しないように、誘電体ミラー（１１－５）を挿入する溝の角度は３０°以下が望ましく（この角度を、２２．５°に設定すると、反射した光は４５°の角度になり、プリズムなど、汎用品をそのまま用いることが可能である）、さらに、誘電体ミラー（１１－５）における誘電体多層膜の膜構成を最適に設計しておく必要がある。

なお、本実施例において、電気光学セラミクス（１１－１）に代えて、ニオブ酸リチウムなどの電気光学結晶や、平行配向の液晶素子を用いても構わない。

ＰＬＺＴのカー定数は、 $R = 7 \times 10^{-3} (\mu\text{m}/\text{V})^2$ で与えられ、その屈折率変化は、下記（１）式で与えられる。

【００２９】

【数１】

$$\Delta n = \frac{-R_1 n_1^3 E_3^2}{2} = 7 \times 10^{-3} \times E^2 (V^2 / \mu\text{m}^2)$$

・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・（１）

ここで、Eは印加される電界である。

通常、ＰＬＺＴ基板は０．５mm厚研磨品が標準であるので、本実施例では、これを長さ１０mmに切断し、この基板の両側に電極を蒸着で付け、１．５５μmの光信号を光ビーム（ビーム直径２００－３００μm）として通過させる。

その際、光ビームの位相シフト量が、０、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 π シフトする電圧は、０V、４０．９V、５８．８V、８１．８Vとなる。

高耐圧のオペアンプを用いることによって、電圧を印加するが、電流は流れないので、１個数万円のオペアンプで電源を作製でき、電源の価格が高くなることはない。

さらに、ＰＬＺＴの長さを２０mmにすれば、それぞれの電圧は、これらの半分の値になり、より安価なオペアンプを使用できる。

【００３０】

電気光学セラミクス（１１－１）、偏光分離素子（１１－８）、およびディテクタ（１１－９、１１－１５）からなる偏光測定部の大きさは、ＰＬＺＴ板に、偏光分離素子（１１－８）とディテクタ（１１－９、１１－１５）を付けるのみなので、最大でも、２０mm×１０mm×１０mmの大きさで済み、従来に比べて非常に小型化が可能である。

なお、図１０では、１本の光ビームしか図示していないが、ファイバあるいは導波路からの反射光をレンズアレイにより、コリメートビームアレイとし、そのピッチを０．２５mmから１mmピッチとして、８チャンネル、あるいは１６チャンネルのディテクタアレイで受けても、モジュールの大きさはほぼ１チャンネルと同じである。

但し、ＰＬＺＴは、位相－電圧特性にヒステリシスを持つ場合があるので、電圧を上昇させた場合と下降させた場合で、数Vの差が生じる。

したがって、本実施例のように、正確に位相量を変化させる必要がある場合には、印加電圧は上昇時のみ、あるいは下降時のみの電圧を印加した場合の、ディテクタの出力を読む必要がある。

【００３１】

以下、入射光のストークスベクトル（w、x、y、z）を算出する方法を説明する。

計算を簡単にするために、絶対座標に対して、電気光学セラミクス（ここでは、ＰＬＺＴ）からなる位相制御素子が、任意の方向（本実施例では、固定板の法線方向）に対して２２．５°傾いており、偏光分離素子（１１－８）の方向が０°と９０°であるとする。

本実施例の偏光測定部では、作製上の都合から、電気光学セラミクス（ＰＬＺＴ基板）（１１－１）の軸（ＰＬＺＴ基板に印加する電界方向）が、固定板の法線方向と同一方向（固定板の法線方向に対して０°方向）、偏光分離素子（１１－８）が、固定板の法線方向に対して２２．５°傾いている。

従って、本計算で得られたストークスベクトルは、本来のストークスベクトルに変換するために、固定板の法線方向に対して－２２．５度回転座標変換させる必要がある。

入力光のストークスベクトルを（w、x、y、z）とすると、位相Δが０の時の２個の

10

20

30

40

50

ディテクタ (1 1 - 9) の出力 1、2 は下記 (2) 式の通りとなる。なお、 $w = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$ である。

[数 2]

出力 1 ($\Delta = 0$) : $-w/2 + x/2$

出力 2 ($\Delta = 0$) : $w/2 + x/2$

..... (2)

【 0 0 3 2 】

位相 Δ が π の時の 2 個のディテクタ (1 1 - 9) の出力 1、2 のストークスベクトルは、それぞれ下記 (3) 式の通りとなる。

[数 3]

{ ($w/2 - y/2$)、($-w/2 + y/2$)、0、0 }

{ ($w/2 + y/2$)、($w/2 + y/2$)、0、0 }

..... (3)

従って、位相が π の時の 2 個のディテクタ (1 1 - 9) の出力 1、2 は、下記 (4) 式の通りとなる。

[数 4]

出力 1 ($\Delta = \pi$) : $-w/2 + y/2$

出力 2 ($\Delta = \pi$) : $w/2 + y/2$

..... (4)

位相 $\pi/2$ の時の 2 個のディテクタ (1 1 - 9) の出力 1、2 のストークスベクトルは、それぞれ下記 (5) 式の通りとなる。

従って、位相が $\pi/2$ の時の 2 個のディテクタ (1 1 - 9) の出力 1、2 は、それぞれ下記 (6) 式の通りとなる。

【 0 0 3 3 】

【 数 5 】

$$\left\{ \frac{w}{2} + \frac{1}{2} \left(-\frac{x}{2} - \frac{y}{2} + \frac{z}{\sqrt{2}} \right), -\frac{w}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{2} + \frac{y}{2} - \frac{z}{\sqrt{2}} \right), 0, 0 \right\}$$

$$\left\{ \frac{w}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{2} + \frac{y}{2} - \frac{z}{\sqrt{2}} \right), \frac{w}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{2} + \frac{y}{2} - \frac{z}{\sqrt{2}} \right), 0, 0 \right\}$$

..... (5)

$$\text{出力 1 (} \Delta = \pi/2 \text{) : } -\frac{w}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{2} + \frac{y}{2} - \frac{z}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\text{出力 2 (} \Delta = \pi/2 \text{) : } \frac{w}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{2} + \frac{y}{2} - \frac{z}{\sqrt{2}} \right)$$

..... (6)

以上、6 つの出力からストークスベクトル (w 、 x 、 y 、 z) を求めることができる。なお、先に述べたように、求められたストークスベクトルを -22.5° 回転座標変換しておく必要がある。

【 0 0 3 4 】

次に、電気光学セラミクス (1 1 - 1) における、光ビームの位相シフト量が、0、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 π となる印加電圧を求める方法を説明する。

図 1 1 (a) に示すように、モニタ光を信号光と同じ波長とすると、クロスニコルの状態で、0 V で光ビームの位相シフト量は 0 であり、電圧を印加させていくとモニタ光の出力は $\sin^2(\Theta)$ のカーブに乗る。

出力が最大になるように電圧を調整した時の電圧 (計算では 81.8 V) が半波長電圧

10

20

30

40

50

(位相 π) となる。

1/4 波長シフトの電圧 ($\pi/2$) は出力が $\sin^2(\theta)$ に載ることから、最大値の半分の値になる時の電圧値 (計算では 58.8 V) を求めればよい。

また、モニタ光が、測定する信号光の波長の半分の波長の光、例えば、 $1.55\mu\text{m}$ の波長が信号光であれば、780 nm のレーザ光をモニタ光とする。780 nm のレーザは非常に安価に入手可能である。

信号光が 1300 nm であれば、さらに安価な赤のレーザポインタ用の 650 nm の半導体レーザがモニタ光として使用可能である。さらに安価な発光ダイオードを用いてもよい。

この場合には、図 11 (b) に示すように、出力が最大になる時が 1/4 波長 ($\pi/2$) 電圧、さらに電圧を上げて出力が最低になるときの電圧が 1/2 波長電圧 (π) となる。

【0035】

予め、この電圧を手動で求めておき、図 12 に示すように、0、1/4 波長電圧 ($V(\pi/2)$)、1/2 波長電圧 ($V(\pi)$) の 3 つの電圧を繰り返して印加し、そのタイミング時の 2 個のディテクタ (11-9) の 2 出力を測定することにより、ほぼリアルタイムで、信号光の偏波状態をモニタすることが可能となる。

PLZT は、応答測度が非常に速く、ns で応答するが、電源や A/D コンバータの速度が $1\mu\text{s}$ 程度であるので、1 MHz 程度のクロックで測定し、約 100 kHz で偏波状態を算出できる。

なお、本実施例では、位相制御素子として、電気光学セラミクス (PLZT) を用いたが、位相制御素子としては、ネマチック平行配向液晶を代表とする液晶素子でも、あるいはニオブ酸リチウムを代表とする電気光学結晶を使用してもよい。

液晶素子を用いると、さらに低電圧化できるが、応答測度が ms 程度であるので、高速な偏波測定はできず、約 100 Hz での偏波状態を出力できる。

また、位相制御素子の方向、分離偏光素子の方向は、前述の説明以外に種々の組み合わせがあるが、ここではその 1 例を示したのみで、本発明は全ての組み合わせを包含する。また光ビームは 1 本としたが、複数であっても、ディテクタアレイで受けることによって一括で偏波状態を知ることが可能である。

【0036】

[実施例 8]

図 13 は、本発明の実施例 8 の偏波状態測定器を示す図であり、同図 (a) は偏波測定部のみの外観図、同図 (b) は偏波測定部の側面図、同図 (c) は斜視図である。

同図において、12-1 はそれぞれ配向方向が $\pm 22.5^\circ$ の 2 枚の平行配向液晶素子、12-2 は入射光ビーム、12-3 は 0° 方向の直線偏光子、12-4 はディテクタ、12-5 はモニタ光用の 67.5° の方向を向いた直線偏光子、12-6 はモニタ光用の -22.5° の方向を向いた直線偏光子、12-7 はモニタ用レーザあるいは発光ダイオード、12-8 はパルス電源、11-5 は固定板 (11-3) に形成された溝に挿入される誘電体ミラー、11-6 はプリズム、11-7 は平面マイクロレンズまたは平面マイクロレンズアレイ、11-10 は偏波測定部を乗せる三角形の台、11-11 は入出力ファイバである。

本実施例において、光信号は、液晶素子 1 あるいは液晶素子 2 の両方を通過し、モニタ光は、液晶素子 1 あるいは液晶素子 2 のそれぞれ 1 つしか通過しないように配置する。

液晶素子 1 および液晶素子 2 の 2 枚の液晶素子 (12-1) 板のそれぞれの液晶の配向方向を固定板の法線方向に対して、 $\pm 22.5^\circ$ に設定し、その後ろに、固定板の法線方向に対して 0° 方向に設定した直線偏光子 (12-3) を配置し、その後ろに、ディテクタ (12-4) を配置する。

この際、液晶素子 1 および液晶素子 2 による光ビームの位相シフト量 (Δ, ϕ) を、0、 $\pi/2$ 、 π に設定することにより、その組み合わせの出力から偏波状態を測定することができる。

入力される信号光のストークスベクトルを (w , x , y , z) とし、液晶素子 1 および液晶素子 2 による光ビームの位相シフト量 (Δ , Φ) を、 0 、 π / 2 、 π に設定すると、その時に、信号光を受光するディテクタ (1 2 - 4) の出力は下記 (7) 式の通りとなる。

【 0 0 3 7 】

【 数 6 】

$$\Delta=0、\Phi=0：OUT1=\frac{w}{2}+\frac{x}{2}$$

$$\Delta=0、\Phi=\pi/2：OUT2=\frac{w}{2}+\frac{1}{2}\left(\frac{x}{2}+\frac{y}{2}-\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \quad 10$$

$$\Delta=0、\Phi=\pi：OUT3=\frac{w}{2}+\frac{y}{2}$$

$$\Delta=\pi/2、\Phi=0：OUT4=\frac{w}{2}+\frac{1}{2}\left(\frac{x}{2}-\frac{y}{2}+\frac{z}{\sqrt{2}}\right)$$

$$\Delta=\pi、\Phi=0：OUT5=\frac{w}{2}-\frac{y}{2} \quad 20$$

$$\Delta=\pi、\Phi=\pi：OUT6=\frac{w}{2}-\frac{x}{2}$$

..... (7)

【 0 0 3 8 】

したがって、下記 (8) 式の計算により、 w 、 x 、 y を求めることができる。

[数 7]

$$OUT1+OUT6=w$$

$$OUT1-OUT6=x$$

$$OUT3-OUT5=y$$

..... (8)

また、 x 、 y が分かれば、 OUT 2 と OUT 4 とから z を求めることができる。その他の組み合わせでも、ストークスベクトル (w , x , y , z) を求めることが可能である。

モニタ光を信号光と同じ波長に設定した場合には、光ビームの位相シフト量 0 、および位相シフト量が π のときの電圧は、クロスニコル状態に配置される直線偏光子 (1 2 - 5 , 1 2 - 6) からの出力を受光するモニタ光用ディテクタ (1 2 - 4) の出力が、最小値、最大値になった電圧であり、最大値の 1 / 2 の値になる電圧が 1 / 4 波長電圧となる。

モニタ光の波長を信号光の半分に設定した場合、例えば、信号光が 1 . 5 5 μ m の場合、 7 8 0 n m の安価なレーザ、あるいはさらに安価な発光ダイオードを用い、クロスニコル状態に配置される直線偏光子 (1 2 - 5 , 1 2 - 6) からの出力を、モニタ光用ディテクタ (1 2 - 4) として、安価な Si フォトダイオードを使用して受光することができる。

特に、液晶素子は薄いため、発光ダイオードにレンズを付けただけでコリメートビームを作ることが可能である。

【 0 0 3 9 】

図 1 4 に、モニタ光を信号光の半分の波長とした場合の液晶素子の位相と電圧、クロスニコルのモニタ光の出力の関係を示す。

液晶素子の場合には、飽和電圧を印加すると位相シフト量が 0 に近くなる。

平行配向液晶は、そのギャップと充填する液晶の Δ n によって、位相変化量を調整できる。

約 1 0 μ m のギャップで、 Δ n が約 0 . 2 5 の液晶を充填すると位相シフト (変化) 量

は約 2.2π となり、本発明のように、0 から π 変化させるには十分である。

電圧を十分印加（約 10 V）してモニタ出力が最低になった時の電圧を飽和電圧とし、次に、ここから電圧を下げて、モニタ出力が最大になる電圧が $1/4$ 波長電圧（位相 $\pi/2$ ）、さらに電圧を下げて出力が 0 になるときの電圧が $1/2$ 波長電圧（位相 π ）である。

さらに電圧を低下させて、再度出力が 0 になったときの電圧が位相 2π あるいは 0 の電圧である。

このように手動で 3 つの電圧を設定し、この 3 つの電圧を繰り返し印加することによって、その組み合わせの出力から偏波状態をモニタすることが可能となる。

液晶の駆動電圧は通常 5 V 程度であり、飽和電圧も 10 V 程度であるので、これらの電圧を電源に記憶させて繰り返し電圧印加できる電源は、非常に安価である。

液晶の応答速度は数 ms であるので、A/D コンバータも低速のものをを用いることが可能である。

通常、ノートパソコンなどに接続できる USB タイプの A/D コンバータのデータ取り込み速度は、10 チャンネルから 20 チャンネルのもので 1 ms 程度であるので、これらの安価な A/D コンバータを用いれば十分である。

但し、液晶素子の場合にはヒステリシスがでることがないので、印加電圧は上昇時でも下降時でも、電圧 - 位相特性は同じになる。

【0040】

液晶素子の場合には、モニタ光を用いなくても、簡易に位相をキャパシタンスによってモニタすることが可能である。

その方法を以下に説明する。この方法は、液晶可変波長フィルタの波長（位相）とキャパシタンスが 1 : 1 に対応することを応用したものである。（K.Hirabayashi "Relationship between optical and electric properties of LC optical devices," Opt.Lett., 21(1996)pp.1484-1486 参照）

液晶素子中の液晶分子を、図 15 (a) のように示すと、入射光の感じる屈折率は、p 偏波、s 偏波それぞれに対して、下記 (9) 式の通りとなる。

[数 8]

$$\begin{aligned} p : n_e &= -\Delta n \times \sin^2(\varphi) + n_o \\ s : n_o \end{aligned}$$

..... (9)

さらに、液晶素子の誘電率は、印加電界に対して、下記 (10) 式の通りとなる。

[数 9]

$$\varepsilon_e = \Delta \varepsilon \times \cos^2(\varphi) + \varepsilon_o$$

..... (10)

従って、下記 (11) 式のように表される。

[数 10]

$$(-(n_e - n_o) / \Delta n_{max} + (\varepsilon_e - \varepsilon_o) / \Delta \varepsilon_{max}) = 1$$

..... (11)

液晶素子のキャパシタンス C は、 $C = \varepsilon_e S / d$ で表される。ここで、d はセルギャップ、S は面積である。

従って、キャパシタンスの変化 ΔC と位相の変化 Δn は下記 (12) 式の関係で表される。

[数 11]

$$\Delta n = -(\Delta n_{max} / \Delta C_{max}) \Delta C + \Delta n_{max}$$

..... (12)

【0041】

図 15 (b) に示すように、 Δn は電圧印加とともに減少して、0 に近づき、 ΔC は増大する。

従って位相 Δ は、下記 (13) 式のように簡単な式で表される。

10

20

30

40

50

[数 1 2]

$$\Delta = (- (\Delta n_{m a x} / \Delta C_{m a x}) \Delta C + \Delta n_{m a x}) \times (d / n \lambda)$$

$$\Delta = a \times C + b$$

..... (1 3)

予め、液晶素子の位相シフト量とキャパシタンスを実測して、図 1 6 の関係を求めて置けば、a と b の値がわかり、キャパシタンスを測定するのみで、位相を求めることができる。この関係は温度が変化しても有効に成り立つ。

液晶素子のキャパシタンスは数 n F であるので、温度依存性が少なく正確にキャパシタンスがわかっているコンデンサを液晶素子に直列に接続し、液晶とこのコンデンサに印加される印加電圧を測定することによって、キャパシタンスを実測できる。

この位相シフト量が、0、 $\pi / 2$ 、 $\pi / 4$ になる電圧に設定し、この電圧を繰り返して液晶素子 1、2 に印加して、その時のディテクタの出力から偏波状態を算出することができる。

【 0 0 4 2 】

また、図 1 7 に示すように、ファイバアレイ、あるいは、導波路アレイからのアレイ状の信号光をアレイレンズでコリメートアレイにして、その光をディテクタアレイ (1 2 - 9) で受光することにより、アレイ状の信号光の偏波状態をモニタすることが可能となる。

図 1 7 では、4 チャンネルの場合を図示しているが、市販の A D コンバータは 8 チャンネル、1 6 チャンネルのものが安価で市販されており、また、ディテクタアレイ (1 2 - 9) は 4 0 チャンネルのものも市販されているので、それらの A D コンバータを用いることにより、8 チャンネル、1 6 チャンネルの偏波モニタを実現することが可能である。

以上説明したように、本実施例の偏波状態測定器によれば、電気光学効果を持つ位相制御素子 (例えば、ニオブ酸リチウムを代表とする電気光学結晶、P L Z T を代表とする電気光学セラミクス、液晶素子) による光ビームの位相シフト量を、モニタ光を用いることにより、正確に 0、 $\pi / 2$ 、 π に繰り返し設定して、その後ろに設けた偏光子付きのディテクタの出力から偏波状態を計算するようにしたので、従来の偏波状態測定器に比べて、安価であるとともに、小型化、かつ、アレイ化が可能となる。

以上、本発明者によってなされた発明を、前記実施例に基づき具体的に説明したが、本発明は、前記実施例に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲において種々変更可能であることは勿論である。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 4 3 】

【図 1 (a)】インライン型光スペクトルアナライザアレイの基本構造を示す図である。

【図 1 (b)】インライン型光スペクトルアナライザアレイの基本構造を示す図である。

【図 1 (c)】ディスクフィルタの構造を示す図である。

【図 2 (a)】 $\lambda / 4$ 板とミラーを用いて偏波依存性を解消するタイプの液晶可変波長フィルタを示す図である。

【図 2 (b)】偏光分離により偏波依存性を解消するタイプの液晶可変波長フィルタを示す図である。

【図 2 (c)】液晶可変波長フィルタの正面を示す図である。

【図 3 (a)】平面マイクロレンズアレイをプリズム状に加工しプリズムマイクロレンズアレイを作成する方法を説明するための図である。

【図 3 (b)】平面マイクロレンズアレイからプリズムマイクロレンズアレイを作成する方法を説明するための図である。

【図 4】円盤の上に、0° 方向の偏光子、 $\lambda / 4$ 板 + 9 0° 方向の偏光子、9 0° 方向の偏光子、および 4 5° 方向の偏光子を、回転させることによって偏波状態をモニタする構造を示す図である。

【図 5 (a)】プリズムコリメートレンズ無しの固定偏光子付き偏波モニタの構造を示す図である。

【図 5 (b)】プリズムコリメートレンズ有りの固定偏光子付き偏波モニタの構造を示す図である。

【図 6】回転型偏光子付き偏波モニタの構造を示す図である。

【図 7】p、s 偏波に対して偏波依存性がなく、位相差が生じないハーフミラーの反射率の計算値と実測値および位相差の計算値を示すグラフである。

【図 8】グレーティング形インラインスペクトラムアナライザの構造を示す図である。

【図 9】本発明の実施例 2 で作製したインライン形固定偏光子付きディテクタアレイを用いて、ファイバアレイ内の偏波を常に TE 偏波に変換して、光導波路に入力する系を示す図である。

【図 10】本発明の実施例 7 の偏波状態測定器を示す図である。

10

【図 11】PLZT に印加する印加電圧とモニタ出力の関係を示すグラフである。

【図 12】本発明の実施例 7 の偏波状態測定器において、電気光学セラミクス (PLZT) に印加する印加電圧、2 個のディテクタの出力 1、2 およびクロックの関係を示すグラフである。

【図 13】本発明の実施例 8 の偏波状態測定器を示す図である。

【図 14】モニタ光の波長が、信号光の波長の半分である場合、液晶素子の印加電圧と位相、クロスニコルの出力の関係を示すグラフである。

【図 15】液晶素子の分子、および液晶素子の電圧 - 位相シフト量 - キャパシタンスの関係を示すグラフである。

【図 16】液晶素子の位相 - キャパシタンスの関係を示すグラフである。

20

【図 17】本発明の実施例 8 の偏波状態測定器の変形例を示す図である。

【符号の説明】

【 0 0 4 4 】

1 - 1 ハーフミラー

1 - 2 ファイバアレイを固定する V 溝アレイ

1 - 3 テープファイバ

1 - 4 溝

1 - 5 プリズムマイクロレンズアレイ

1 - 6 ディテクタアレイ

1 - 7 プリズムマイクロレンズアレイでコリメートされたビームアレイ

30

1 - 8 ファイバコア

1 - 9 プリズム面に形成された AR コート

1 - 10 ディスクフィルタ

1 - 11 ファイバアレイとディテクタアレイを固定するジグ

1 - 12 ディスクフィルタの位置をモニタするセンサ部

1 - 13 円周上に設けたマーカ

2 - 1 2 列のディテクタアレイ

2 - 2 平坦なガラス

2 - 3 透明電極

2 - 4 誘電体ミラー

40

2 - 5 ネマチック液晶

2 - 6 ミラー

2 - 7 $\lambda / 4$ 板

2 - 8 入射する光ビーム

2 - 9 三角支持台

2 - 10 プリズム状に加工されたレンズアレイ

2 - 11 偏光分離素子

2 - 12 $\lambda / 2$ 板

2 - 13 液晶フィルタを通過する光ビームアレイ

2 - 14 容量をモニタするための分轄された透明電極パターン

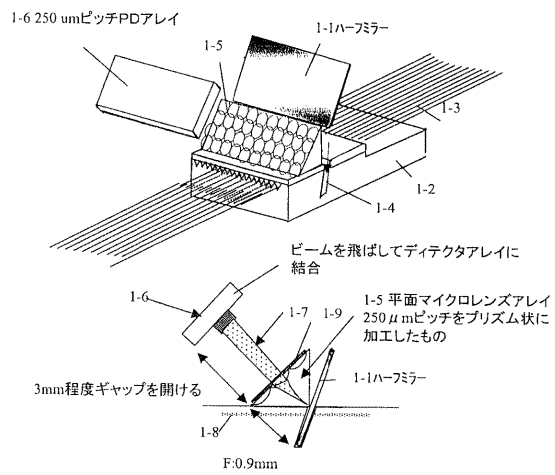
50

2 - 1 5	液晶フィルタを駆動するための透明電極パターン	
3 - 1	平面マイクロレンズアレイ基板	
3 - 2	プリズムマイクロレンズアレイ	
3 - 3	ファイバ	
3 - 4	ハーフミラー	
3 - 5	プリズムマイクロレンズアレイでコリメートされたビームアレイ	
3 - 6	薄く研磨された平面マイクロレンズアレイ	
3 - 7	プリズム	
4 - 1	直線偏光子	
4 - 2	45°方向の直線偏光子	10
4 - 3	上側に配置した直線偏光子	
4 - 4	下側に配置したλ/4板	
4 - 5	90°方向の直線偏光子	
4 - 6	回転式円盤	
4 - 7	破線マーカ	
4 - 8	破線マーカで円盤の回転角度をモニタする部分	
4 - 9	ディテクタアレイ	
4 - 10	ハーフミラー	
4 - 11	テープファイバ	
4 - 12	プリズム台	20
4 - 13	出射側テープファイバ	
5 - 1	ハーフミラー	
5 - 2	ディテクタアレイ	
5 - 3	V溝アレイを形成したガラス基板	
5 - 4	溝	
5 - 5	テープファイバ	
5 - 6	直線偏光子	
5 - 7	直線偏光子の偏光軸の方向	
5 - 8	プリズムマイクロレンズアレイ	
6 - 1	円盤状に加工した直線偏光子	30
6 - 2	偏光子の軸の方向をモニタするためのマーカ	
6 - 3	ディテクタアレイ	
6 - 4	マーカモニタ	
6 - 5	ファイバアレイを固定したV溝ガラス基板	
6 - 6	ハーフミラー	
6 - 7	プリズムマイクロレンズアレイ	
6 - 8	ファイバアレイから反射されてコリメートされた光ビームアレイ	
6 - 9	固定ジグ	
8 - 1	グレーティング	
8 - 2	レンズ	40
8 - 3	2次元ディテクタアレイ	
8 - 4	プリズムレンズアレイ	
8 - 5	ハーフミラー	
8 - 6	テープファイバ	
8 - 7	分光した光	
9 - 1	光導波路の光導入部	
9 - 2	実施例3で作製したインライン形偏光子ディテクタアレイ	
9 - 3	偏波制御回路	
10	コリメートレンズ	
11 - 1	電気光学セラミクス (PLZT)	50

1 1 - 2	電極	
1 1 - 3	導波路あるいはファイバを固定する固定板	
1 1 - 4	導波路あるいはファイバのコア	
1 1 - 5	誘電体ミラー	
1 1 - 6	プリズム	
1 1 - 7	平面マイクロレンズ（またはマクロレンズ）	
1 1 - 8	偏光分離素子（方解石あるいは偏光ビームスプリッタ）	
1 1 - 9	ディテクタ	
1 1 - 1 0	三角形形状の台	
1 1 - 1 1	入出力ファイバ	10
1 1 - 1 2	誘電体ミラーで反射された光ビーム	
1 1 - 1 3	モニタ光を作るコリメータ付きレーザダイオード	
1 1 - 1 4	モニタビーム	
1 1 - 1 5	ディテクタ	
1 1 - 1 6	直線偏光子	
1 1 - 1 7	直線偏光子	
1 1 - 1 8	パルス電源	
1 1	入出力ファイバ	
1 2 - 1	平行配向液晶素子	
1 2 - 2	入射光ビーム	20
1 2 - 3	直線偏光子	
1 2 - 4	ディテクタ	
1 2 - 5	直線偏光子	
1 2 - 6	直線偏光子	
1 2 - 7	モニタ用レーザあるいは発光ダイオード	
1 2 - 8	パルス電源	
1 2 - 9	ディテクタアレイ	

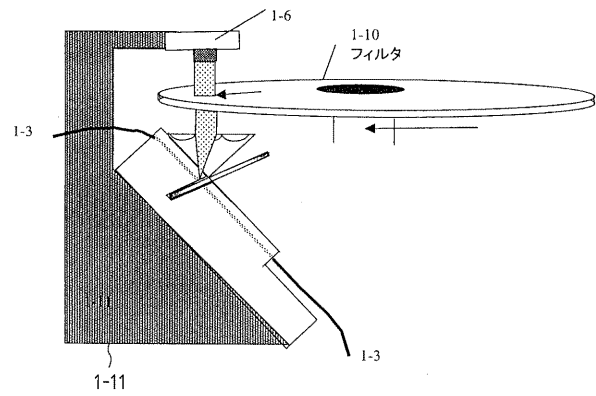
【図 1 (a)】

図 1 (a)



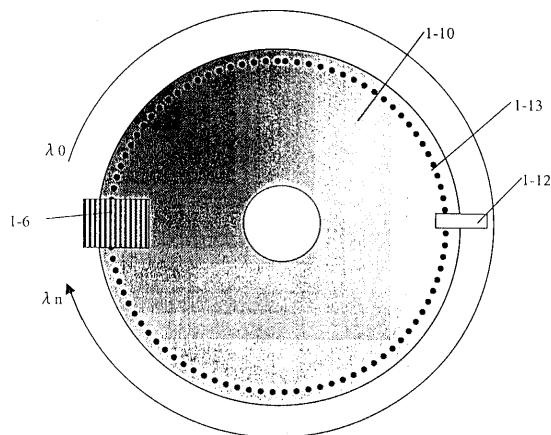
【図 1 (b)】

図 1 (b)



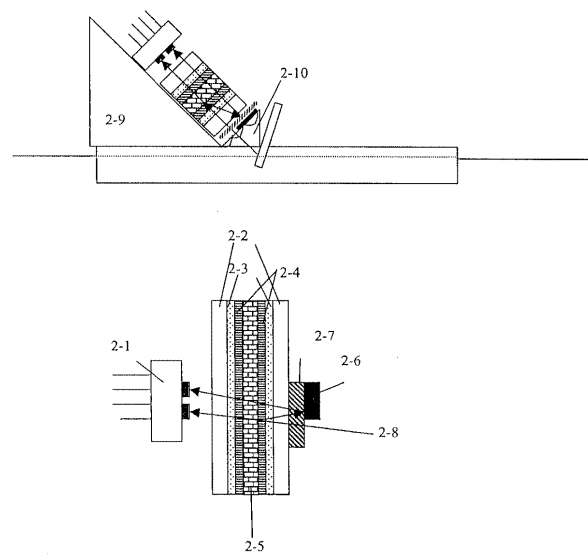
【図 1 (c)】

図 1 (c)



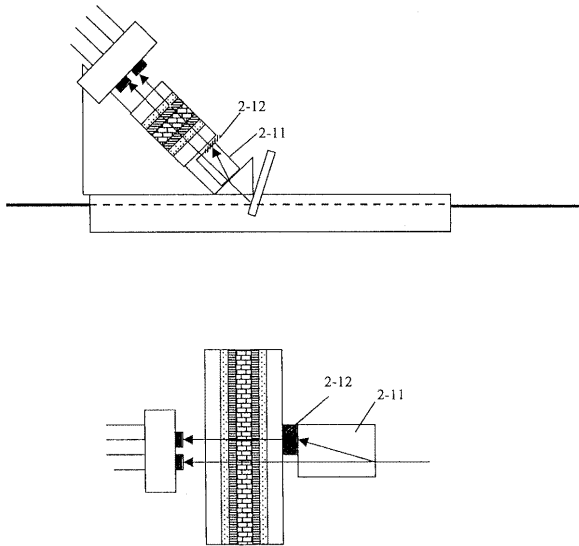
【図 2 (a)】

図 2 (a)



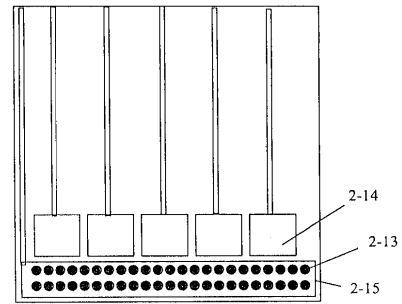
【図 2 (b)】

図 2 (b)



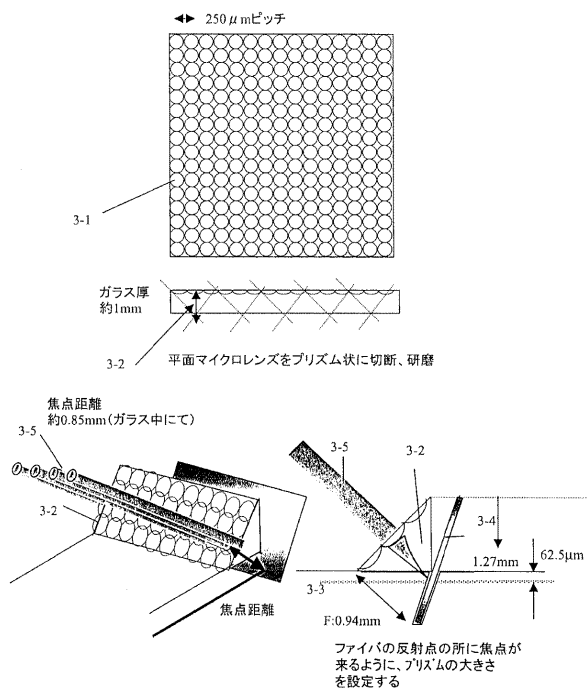
【図 2 (c)】

図 2 (c)



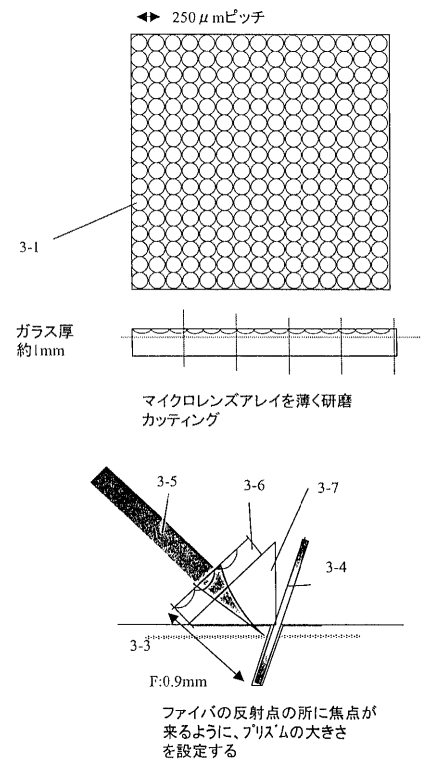
【図 3 (a)】

図 3 (a)



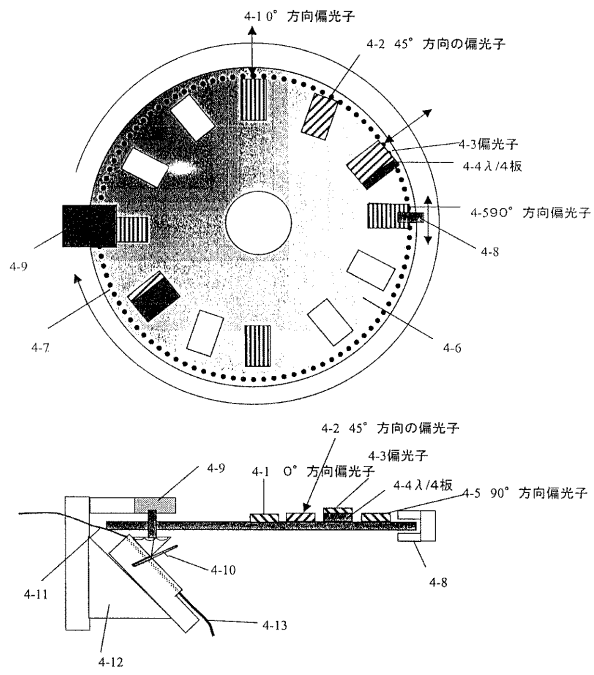
【図 3 (b)】

図 3 (b)



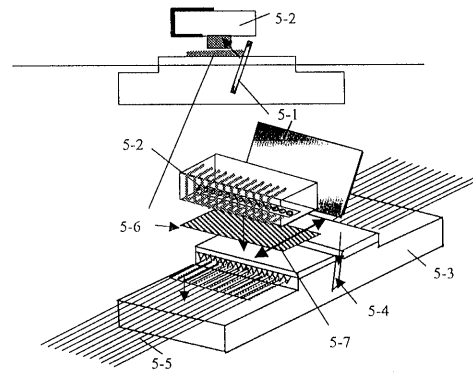
【図 4】

図 4



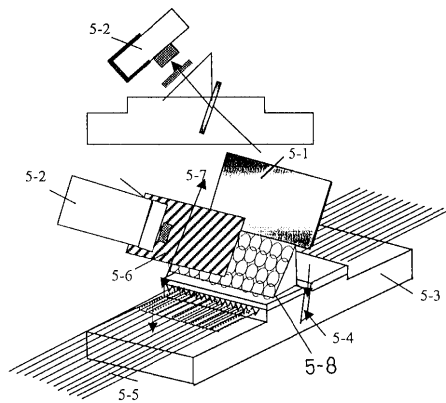
【図 5 (a)】

図 5 (a)



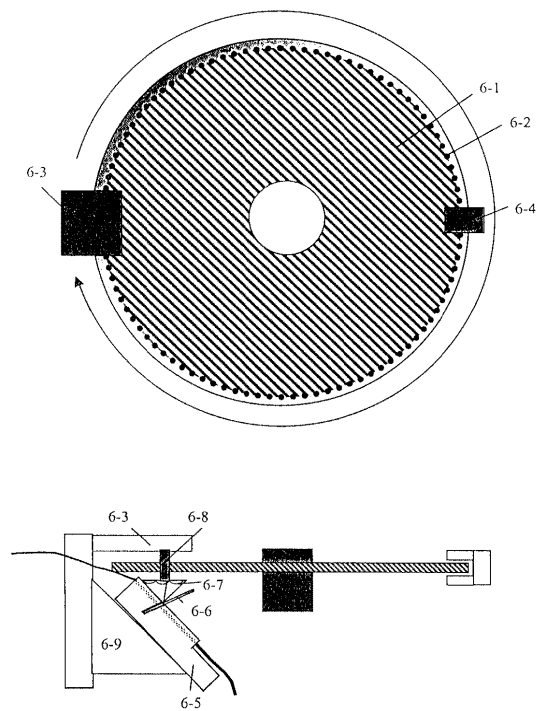
【図 5 (b)】

図 5 (b)



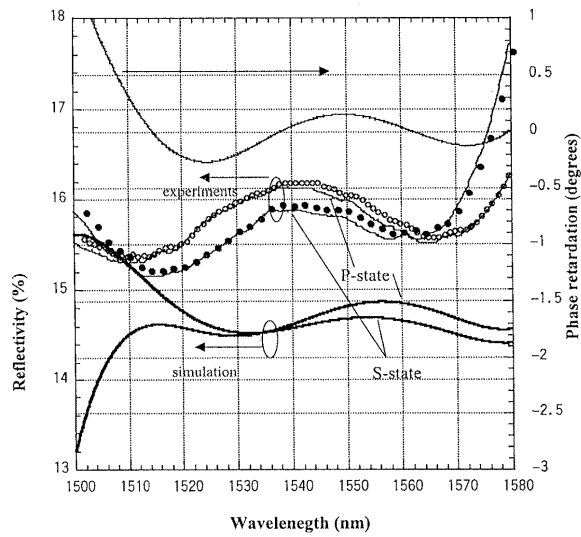
【図 6】

図 6



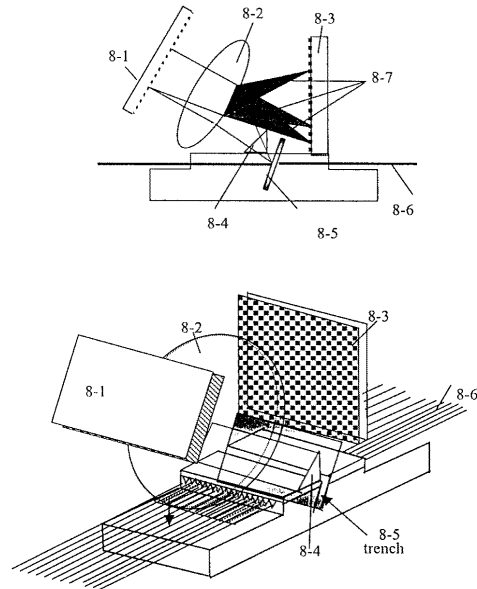
【図 7】

図 7



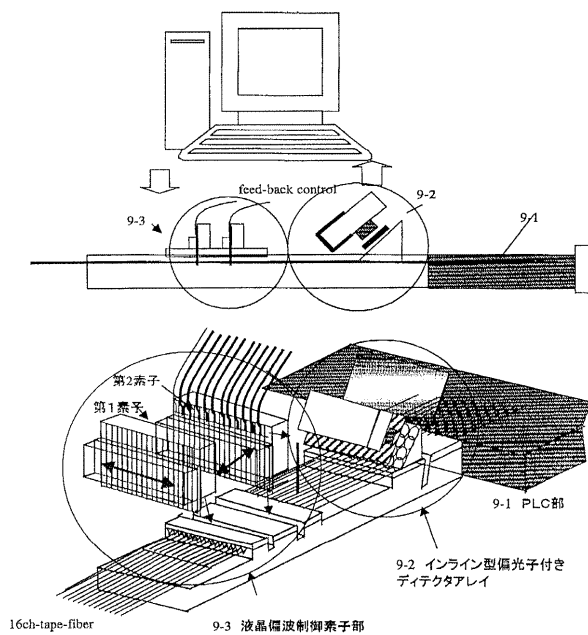
【図 8】

図 8



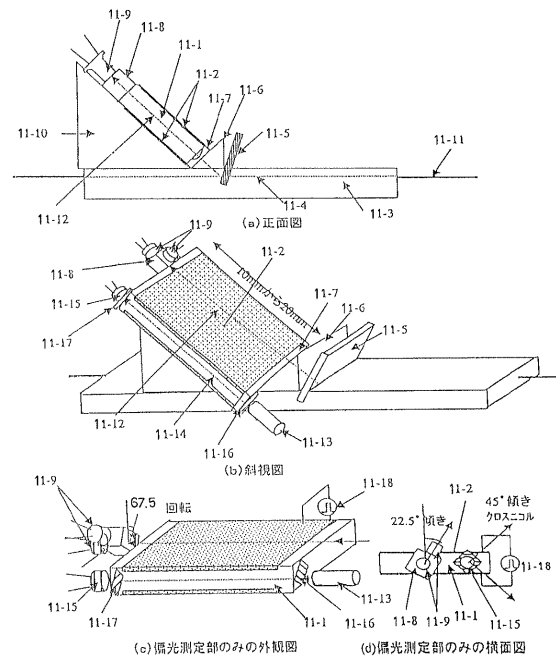
【図 9】

図 9



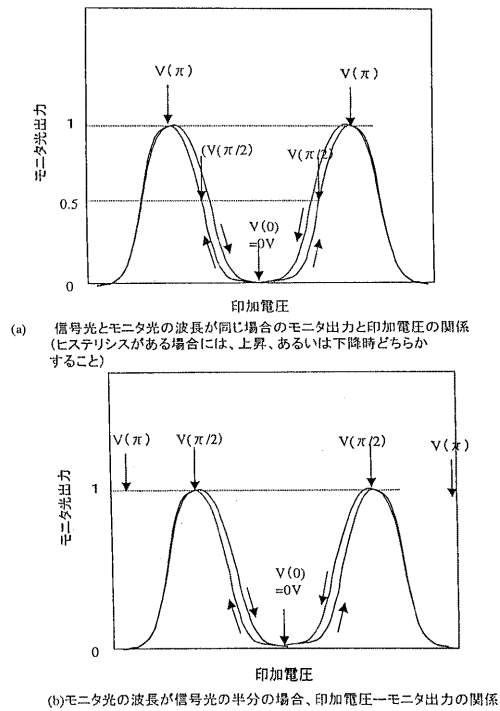
【図 10】

図 10



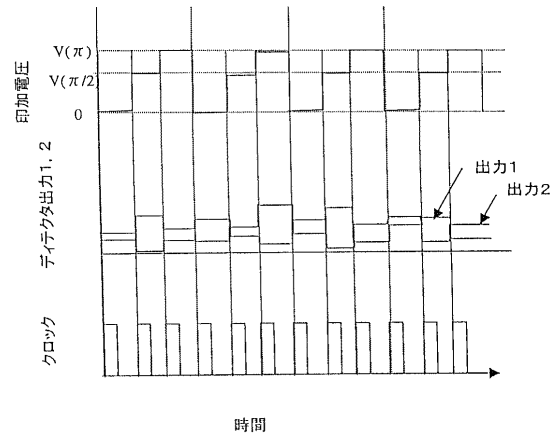
【 図 1 1 】

図 1 1



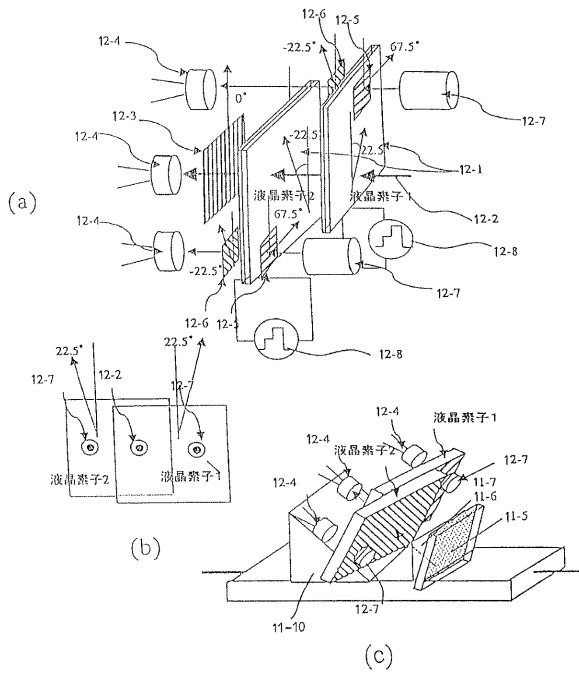
【 図 1 2 】

图 12



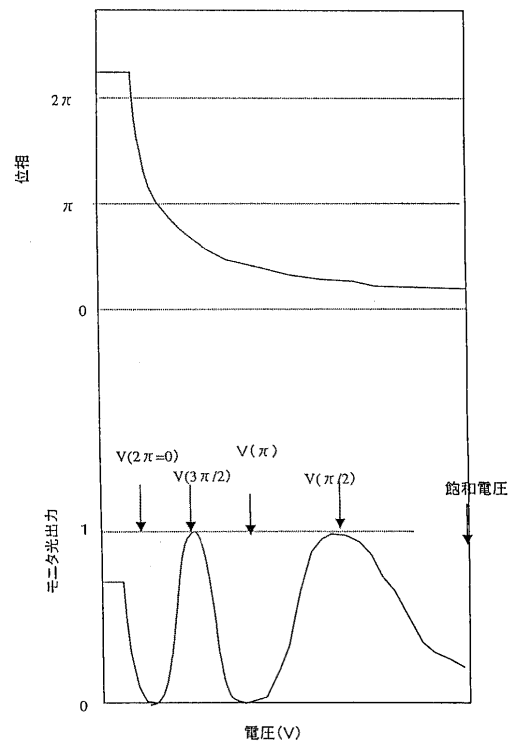
【 図 1 3 】

图 1-3



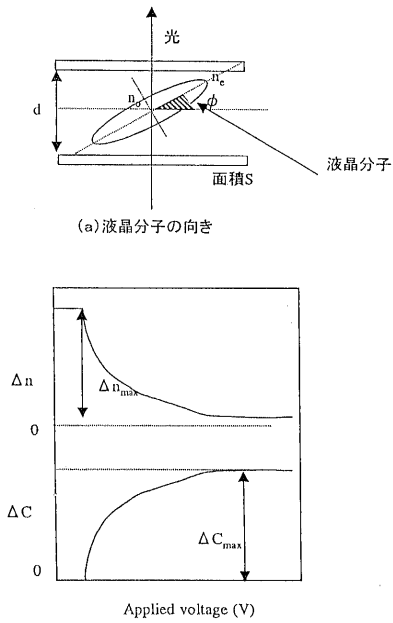
【 図 1 4 】

图 14



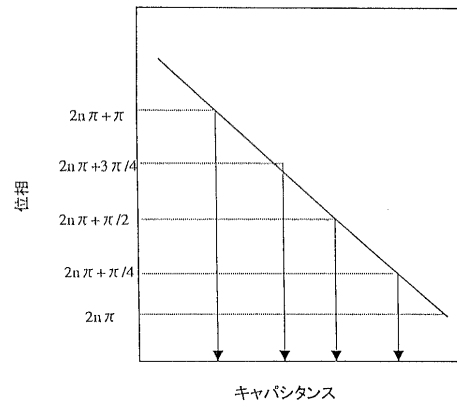
【図 15】

図 15



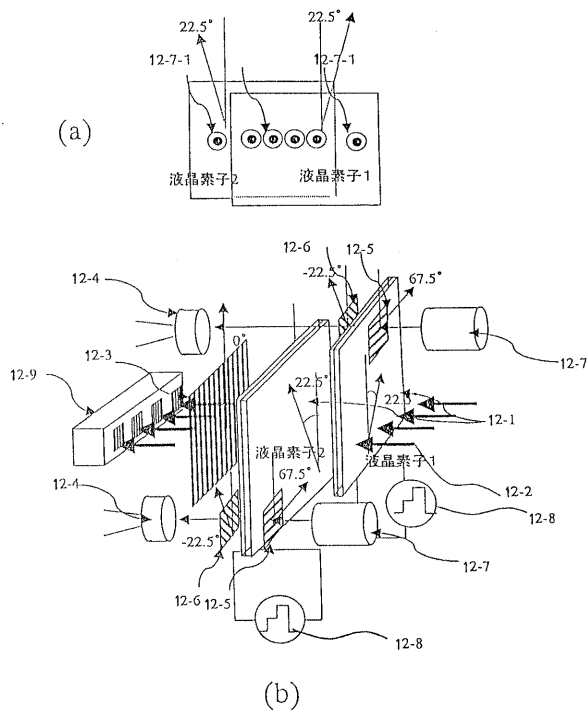
【図 16】

図 16



【図 17】

図 17



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平 0 6 - 2 5 8 6 1 0 (J P , A)
特開平 1 1 - 1 4 2 7 5 2 (J P , A)
特開平 0 2 - 2 2 6 0 2 8 (J P , A)
特開 2 0 0 0 - 1 8 3 8 1 6 (J P , A)
特開 2 0 0 0 - 1 6 2 0 4 3 (J P , A)
特開 2 0 0 0 - 0 8 2 8 3 8 (J P , A)
佐々木 隆 外 6 名 , “ 小型多チャンネル光信号強度モニタの開発 ” , S E I テクニカルレビュー
 , 2 0 0 1 年 9 月 , 第 159 号 , pp.23-27
M. Hayashi 外 2 名 , “ 40Gb/s Demonstration of Wide Range PMD Compensation Using a Polar
izer ” , OECC/IQOC 2001 Conference Incorporating ACOFT , 2 0 0 1 年 7 月 , pp.48-49 , ISB
N: 0 646 41752 5

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G 0 1 J 3 / 0 0 - 4 / 0 4
G 0 1 N 2 1 / 0 0 - 2 1 / 6 1