

(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2014-228306

(P2014-228306A)

(43) 公開日 平成26年12月8日(2014.12.8)

(51) Int.Cl.
G01N 21/17 (2006.01)F I
G O 1 N 21/17 6 2 0テーマコード (参考)
2 G O 5 9

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2013-106265 (P2013-106265)
(22) 出願日 平成25年5月20日 (2013. 5. 20)(71) 出願人 000002130
住友電気工業株式会社
大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
(74) 代理人 100088155
弁理士 長谷川 芳樹
(74) 代理人 100113435
弁理士 黒木 義樹
(74) 代理人 100136722
弁理士 ▲高▼木 邦夫
(74) 代理人 100110582
弁理士 柴田 昌聰
(72) 発明者 長谷川 健美
神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電
気工業株式会社横浜製作所内

最終頁に続く

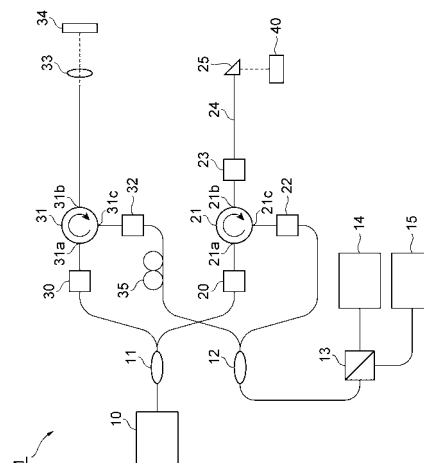
(54) 【発明の名称】 OCT装置

(57) 【要約】

【課題】実用的な光サーキュレータを用いて高い空間分解能でOCT測定を行うことができるOCT装置を提供する。

【解決手段】OCT装置1は、測定対象物40の光断層画像を取得するものであって、OCT装置1、光源10、光分岐器11、光合波器12、偏波ビームスプリッタ13、光検出器14、光検出器15、PMD補償素子20、光サーキュレータ21、PMD補償素子22、ロータリージョイント23、光プローブ24、ミラー25、PMD補償素子30、光サーキュレータ31、PMD補償素子32、レンズ33、参照鏡34および偏波コントローラ35を備える。PMD補償素子は、光サーキュレータの固有偏波状態ストークスベクトルと逆方向のストークスベクトルの固有偏波状態を有し、光サーキュレータの偏波モード分散と実質的に等しい大きさの偏波モード分散を有する。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

光を出力する光源と、

前記光源から出力された光を測定光と参照光とに 2 分岐して、これら測定光および参照光を出力する光分岐器と、

前記光分岐器から出力されて測定対象物によって反射または散乱された測定光を入力するとともに、前記光分岐器から出力された参照光を入力し、これら入力した測定光と参照光とを合波し干渉させて当該干渉光を出力する光合波器と、

前記光合波器から出力された干渉光を検出する光検出器と、

第 1 ポート、第 2 ポートおよび第 3 ポートを有し、前記光分岐器から出力された測定光を前記第 1 ポートに入力して前記第 2 ポートから前記測定対象物へ向けて出力し、前記測定対象物によって反射または散乱された測定光を前記第 2 ポートに入力して前記第 3 ポートから前記光合波器へ出力する光サーキュレータと、

前記光サーキュレータの前記第 1 ポートと前記光分岐器との間の測定光の光路、前記光サーキュレータの前記第 2 ポートと前記測定対象物との間の測定光の光路、および、前記光サーキュレータの前記第 3 ポートと前記光合波器との間の測定光の光路のうちの何れか 1 以上の光路上に設けられ、前記光サーキュレータの固有偏波状態のストークスベクトルと逆方向のストークスベクトルで表される固有偏波状態を有する P M D 補償素子と、

を備えることを特徴とする O C T 装置。

【請求項 2】

前記光サーキュレータの前記第 1 ポートと前記光分岐器との間の測定光の光路、および、前記光サーキュレータの前記第 3 ポートと前記光合波器との間の測定光の光路それぞれに、前記 P M D 補償素子が設けられている、ことを特徴とする請求項 1 に記載の O C T 装置。

【請求項 3】

前記 P M D 補償素子は前記光サーキュレータの偏波モード分散と実質的に等しい大きさの偏波モード分散を有することを特徴とする請求項 1 に記載の O C T 装置。

【請求項 4】

前記 P M D 補償素子は所定の長さ及び所定の回転方向を有する偏波保持光ファイバであることを特徴とする請求項 1 に記載の O C T 装置。

【請求項 5】

前記 P M D 補償素子は所定の曲げ半径で巻かれた光ファイバであることを特徴とする請求項 1 に記載の O C T 装置。

【請求項 6】

前記 P M D 補償素子は所定の強さの側圧が付与された光ファイバであることを特徴とする請求項 1 に記載の O C T 装置。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、O C T 装置に関するものである。

【背景技術】**【0002】**

O C T 装置は、光干渉断層撮像 (Optical CoherenceTomography : O C T) 技術を用いて、測定対象物の光断層画像を取得することができる。O C T では、光源から出力された光が光分岐器により測定光と参照光とに 2 分岐される。光分岐器から出力されて測定対象物によって反射 (後方散乱を含む。以下同様。) された測定光と、光分岐器から出力された参照光とは、光合波器により合波され干渉して当該干渉光が出力される。光合波器から出力された干渉光は光検出器により検出される。これにより、測定対象物における測定光の反射点までの光伝搬時間および反射率が測定され、さらに、測定対象物への測定光入射

10

20

30

40

50

位置が走査されることで、測定対象物の２次元または３次元の光断層画像が取得される。

【０００３】

ＯＣＴの方式として、ＳＳ-ＯＣＴ（SweptSource Optical Coherence Tomography）、ＳＤ-ＯＣＴ（Spectral Domain Optical Coherence Tomography）およびＴＤ-ＯＣＴ（Time Domain Optical Coherence Tomography）が知られている。ＳＳ-ＯＣＴは、発振波長が時間とともに掃引される波長掃引光源を用いて干渉光のスペクトルを測定する。ＳＤ-ＯＣＴは、広帯域光源および分光検出器を用いて干渉光のスペクトルを測定する。ＴＤ-ＯＣＴは、参照光の遅延時間を掃引しながら干渉光を検出することで測定光と参照光との相互相関関数を測定する。

【０００４】

特許文献１に開示されたＯＣＴ装置は、非相反素子である光サーキュレータを用いている。この光サーキュレータは、第１ポート、第２ポートおよび第３ポートを有し、光分岐器から出力された測定光を第１ポートに入力して第２ポートから測定対象物へ向けて出力し、測定対象物によって反射または散乱された測定光を第２ポートに入力して第３ポートから光合波器へ向けて出力する。光サーキュレータ等の非相反素子を用いたＯＣＴ装置は、光カプラ等の相反素子を用いたＯＣＴ装置と比べて、光分岐による光学損失を回避することができ、光の利用効率が高まるので、測定対象物による反射を検出する感度が改善される。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００５】

【特許文献１】特表２００３－５２４７５８号公報

【特許文献２】米国特許第４４６４０２２号明細書

【非特許文献】

【０００６】

【非特許文献１】Zhang et al., Optics Express, Vol.19, No.18, pp.16830-16842 (2011).

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００７】

しかしながら、光サーキュレータは偏波モード分散（Polarization Mode Dispersion : PMD）を有していることから、光サーキュレータを用いたＯＣＴ装置は、光サーキュレータの偏波モード分散によって空間分解能の性能が劣化する問題がある。光サーキュレータの偏波モード分散がＯＣＴ測定性能に与える影響は非特許文献１においても指摘されている。

【０００８】

特許文献１に開示されたＯＣＴ装置は、このような問題を解消することを意図して、偏光無依存型の光サーキュレータを用いている。偏光無依存型の光サーキュレータは、典型的には、特許文献２に記載されているように、入力された光を偏光状態に従って２つの光路に分割し、それぞれの光路において偏光方向を非相反的に回転させた後に、２つの偏光状態の光を１つの光路に合波する構造を持っている。

【０００９】

上記の構造において、２つの光路それぞれの伝搬遅延が互いに一致していれば、合波後の光では偏波モード分散は生じない。しかし、実用上は、材料の異方性や部品形状の精度不足により２つの光路の間に伝搬遅延が生じ、その結果として光サーキュレータは偏波モード分散を持つ。実用的な光サーキュレータを用いた場合、光サーキュレータの偏波モード分散がＯＣＴ測定性能に与える影響は無視し得ないほど大きい。

【００１０】

一方、偏波モード分散の値が十分低く管理された光サーキュレータを用いることによって上記の問題を解決し得る。しかし、一般にそのような光サーキュレータは製造上の困難

10

20

30

40

50

を有するので、この方法による解決は製造コストの増大という別の問題を生じさせる。

【 0 0 1 1 】

本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、実用的な光サーキュレータを用いて高い空間分解能で OCT 測定を行うことができる OCT 装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 2 】

本発明の OCT 装置は、(1) 光を出力する光源と、(2) 光源から出力された光を測定光と参照光とに 2 分岐して、これら測定光および参照光を出力する光分岐器と、(3) 光分岐器から出力されて測定対象物によって反射または散乱された測定光を入力するとともに、光分岐器から出力された参照光を入力し、これら入力した測定光と参照光とを合波し干渉させて当該干渉光を出力する光合波器と、(4) 光合波器から出力された干渉光を検出する光検出器と、(5) 第 1 ポート、第 2 ポートおよび第 3 ポートを有し、光分岐器から出力された測定光を第 1 ポートに入力して第 2 ポートから測定対象物へ向けて出力し、測定対象物によって反射または散乱された測定光を第 2 ポートに入力して第 3 ポートから光合波器へ出力する光サーキュレータと、(6) 光サーキュレータの第 1 ポートと光分岐器との間の測定光の光路、光サーキュレータの第 2 ポートと測定対象物との間の測定光の光路、および、光サーキュレータの第 3 ポートと光合波器との間の測定光の光路のうちの何れか 1 以上の光路上に設けられ、光サーキュレータの固有偏波状態のストークスベクトルと逆方向のストークスベクトルで表される固有偏波状態を有する PMD 補償素子と、を備えることを特徴とする。なお、原理的に固有偏波状態は、互いに逆方向のストークスベクトルを有し群速度が最大及び最少となる 2 つの状態が対として存在するが、本明細書では、特記しない限り群速度最大の固有偏波状態の方を指すものとする。

【 0 0 1 3 】

本発明の OCT 装置は、光サーキュレータの第 1 ポートと光分岐器との間の測定光の光路、および、光サーキュレータの第 3 ポートと光合波器との間の測定光の光路それぞれに、PMD 補償素子が設けられているのが好適である。PMD 補償素子は、光サーキュレータの偏波モード分散と実質的に等しい大きさの偏波モード分散を有するのが好適である。PMD 補償素子は、所定の長さ及び所定の回転方向を有する偏波保持光ファイバであってもよいし、所定の曲げ半径で巻かれた光ファイバであってもよいし、また、所定の強さの側圧が付与された光ファイバであってもよい。

【発明の効果】

【 0 0 1 4 】

本発明の OCT 装置は、実用的な光サーキュレータを用いて高い空間分解能で OCT 測定を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 5 】

【図 1】本実施形態の OCT 装置 1 の構成を示す図である。

【図 2】典型的な偏波無依存型の光サーキュレータの差動群遅延の波長依存性の測定結果を示すグラフである。

【図 3】典型的な偏波無依存型の光サーキュレータの固有偏波状態のストークスベクトルの方向の波長依存性の測定結果を示すグラフである。

【図 4】PMD 補償素子 20 の第 1 構成例を示す図である。

【図 5】PMD 補償素子 20 の第 2 構成例を示す図である。

【図 6】PMD 補償素子 20 の第 3 構成例を示す図である。

【図 7】本実施形態の OCT 装置 1 における光サーキュレータ 21 および PMD 補償素子 20、22 の差動群遅延の波長依存性を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 6 】

以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための形態を詳細に説明する。なお、図

10

20

30

40

50

面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。以下では、OCTの方式の一つであるSD-OCTに発明を適用した実施形態を示すが、本発明はSS-OCTやTD-OCTなどの他のOCT方式にも同様に適用可能である。

【0017】

図1は、本実施形態のOCT装置1の構成を示す図である。OCT装置1は、測定対象物40の光断層画像を取得するものであって、OCT装置1、光源10、光分岐器11、光合波器12、偏波ビームスプリッタ13、光検出器14、光検出器15、PMD補償素子20、光サーキュレータ21、PMD補償素子22、ロータリージョイント23、光プロープ24、ミラー25、PMD補償素子30、光サーキュレータ31、PMD補償素子32、レンズ33、参照鏡34および偏波コントローラ35を備える。

10

【0018】

光源10は、広帯域光を出力する。光分岐器11は、光源10から出力された光を測定光と参照光とに2分岐して、測定光をPMD補償素子20へ出力するとともに、参照光をPMD補償素子30へ出力する。

【0019】

光サーキュレータ21は、第1ポート21a、第2ポート21bおよび第3ポート21cを有する。光サーキュレータ21は、光分岐器11から出力されてPMD補償素子20を経た測定光を第1ポート21aに inputs して、その inputs した測定光を第2ポート21bからロータリージョイント23へ出力する。光サーキュレータ21は、ロータリージョイント23から到達した測定光を第2ポート21bに inputs して、その inputs した測定光を第3ポート21cからPMD補償素子22へ出力する。

20

【0020】

光サーキュレータ21の第2ポート21bから出力された測定光は、ロータリージョイント23を経て光プロープ24に入り、光プロープ24の先端に接続されたミラー25によって側方の測定対象物40に向けて照射される。測定対象物40において反射された測定光は、ミラー25、光プロープ24およびロータリージョイント23を経て、光サーキュレータ21の第3ポート21bに inputs される。

【0021】

光サーキュレータ31は、第1ポート31a、第2ポート31bおよび第3ポート31cを有する。光サーキュレータ31は、光分岐器11から出力されてPMD補償素子30を経た参照光を第1ポート31aに inputs して、その inputs した参照光を第2ポート31bからレンズ33へ出力する。光サーキュレータ31は、レンズ33から到達した参照光を第2ポート31bに inputs して、その inputs した参照光を第3ポート31cからPMD補償素子32へ出力する。

30

【0022】

光サーキュレータ31の第2ポート31bから出力された参照光は、レンズ33を経て参照鏡34に照射されて反射される。参照鏡34で反射された参照光は、レンズ33を経て光サーキュレータ31の第2ポート31bに inputs される。

【0023】

光合波器12は、光サーキュレータ21の第3ポート21cから出力されてPMD補償素子22を経た測定光を inputs するとともに、光サーキュレータ31の第3ポート31cから出力されてPMD補償素子32および偏波コントローラ35を経た参照光を inputs する。光合波器12は、これら inputs した測定光と参照光とを合波し干渉させて当該干渉光を偏波ビームスプリッタ13へ出力する。

40

【0024】

偏波ビームスプリッタ13は、光合波器12から出力された干渉光を inputs し、この inputs した干渉光を2つの偏光状態に分離して、一方の偏光状態の光を光検出器14へ出力し、他方の偏光状態の光を光検出器15へ出力する。光検出器14および光検出器15それぞれは、偏波ビームスプリッタ13から到達した光を受光し、その受光した光のスペクトルを検出する。

50

【 0 0 2 5 】

OCT装置1は、この検出したスペクトルに基づいて信号処理を行って、測定対象物40の内部の測定光入射方向に沿った反射率分布を得る。OCT装置1は、光プローブ23の先端を回転および並進させながら上記のような測定を繰り返し行うことで、測定対象物40の光断層画像を取得することができる。

【 0 0 2 6 】

PMD補償素子20, 22は、光サーキュレータ21の偏波モード分散を補償する。また、PMD補償素子30, 32は、光サーキュレータ31の偏波モード分散を補償する。ここで、先ず光サーキュレータの偏波モード分散等について説明し、その後にPMD補償素子について説明する。

【 0 0 2 7 】

図2は、典型的な偏波無依存型の光サーキュレータの差動群遅延の波長依存性の測定結果を示すグラフである。図3は、典型的な偏波無依存型の光サーキュレータの固有偏波状態のストークスベクトルの方向の波長依存性の測定結果を示すグラフである。ここで測定に用いた光サーキュレータはAgiltron製OCPI-30L111135である。差動群遅延(Differential Group Delay : DGD)は、2つの固有偏波状態(Eigenstate of Polarization : ESOP)の間の群遅延の差である。偏波モード分散(PMD)は、一定の波長範囲で差動群遅延(DGD)を平均した値である。固有偏波状態(ESOP)は、全ての偏光状態のうちで群遅延が最大の偏光状態および最小の偏光状態である。固有偏波状態は、光の偏波状態を表すストークス・ベクトル(s_1, s_2, s_3)を用いて、下記式により求められる方向(θ, ϕ)で表される。

【 0 0 2 8 】

【数1】

$$\cos \theta = s_1 / \sqrt{s_1^2 + s_2^2}, \quad \sin \theta = s_2 / \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\sqrt{s_1^2 + s_2^2} / s_3 \right)$$

【 0 0 2 9 】

図2に示されるように、典型的な光サーキュレータは、第1ポートに入力されて第2ポートから出力される光に対して略0.02psの偏波モード分散を生じさせ(同図(a))、第2ポートに入力されて第3ポートから出力される光に対しても略0.02psの偏波モード分散を生じさせる(同図(b))。光サーキュレータは、測定光を2回通過させるから、測定光に対して略0.04psの偏波モード分散を生じさせる。略0.04psの偏波モード分散は、空気中での光の伝搬距離に換算すると略12μmに相当する。したがって、光サーキュレータにおける偏波モード分散によって、測定対象物の反射点までの片道距離の測定値には略6μmの誤差が生じる。一方で、OCT測定の典型的な空間分解能は10~20μmであるので、上記の偏波モード分散による誤差は無視できない影響を生じうる。

【 0 0 3 0 】

そこで、本実施形態では、PMD補償素子20は、光サーキュレータ21の第1ポート21aから第2ポート21bまでの光路における測定光の偏波モード分散を補償する。PMD補償素子22は、光サーキュレータ21の第2ポート21bから第3ポート21cまでの光路における測定光の偏波モード分散を補償する。PMD補償素子30は、光サーキュレータ31の第1ポート31aから第2ポート31bまでの光路における参照光の偏波モード分散を補償する。また、PMD補償素子32は、光サーキュレータ31の第2ポート31bから第3ポート31cまでの光路における参照光偏波モード分散を補償する。

【 0 0 3 1 】

以下ではPMD補償素子20について主に説明するが、他のPMD補償素子22, 30, 32についても同様である。PMD補償素子20は、光サーキュレータ21の固有偏波

10

20

30

40

50

状態のストークスベクトルと逆方向のストークスベクトルで表される固有偏波状態を有する。また、PMD補償素子20は、光サーキュレータ21の偏波モード分散と実質的に等しい大きさの偏波モード分散を有するのが好適である。図4～図6それぞれは、PMD補償素子20の構成例を示す図である。

【0032】

図4に示される第1構成例のPMD補償素子20Aは、所定の長さを有する偏波保持光ファイバを所定の方向に回転させて光サーキュレータ21の第1ポート21aに接続した構成を有する。例えば、6.2cmの長さで0.1psの偏波モード分散を発生させることができる偏波保持光ファイバが知られている。図5に示される第2構成例のPMD補償素子20Bは、通常の（偏波保持でない）光ファイバを円柱体に所定の曲げ半径で所定の長さだけ巻くことで該光ファイバに複屈折を誘起した構成を有する。図6に示される第3構成例のPMD補償素子20Cは、通常の光ファイバの所定の長さ部分に対して所定の大きさの側圧を与えることで該光ファイバに複屈折を誘起した構成を有する。これら何れの構成のPMD補償素子も低コストで実現され得る。

【0033】

図4～図6それぞれに示されるような構成による偏波モード分散付与方法では、差動群遅延（DGD）の大きさ及び固有偏波状態（ESOP）のストークスベクトルの方向それぞれは、波長によらず略一定である。これは、高次の偏波モード分散を無視することができることを意味する。一方、図2および図3に示されるように、光サーキュレータの差動群遅延（DGD）の大きさ及び固有偏波状態（ESOP）のストークスベクトルの方向それぞれも、波長によらず略一定である。したがって、図4～図6それぞれに示されるような構成を有するPMD補償素子は、光サーキュレータの偏波モード分散を効果的に補償することができる。

【0034】

図1に示されるOCT装置1の構成において、図2，図3に示されるような差動群遅延（DGD）の大きさ及び固有偏波状態（ESOP）のストークスベクトルの方向を有する光サーキュレータ21の第1ポート21aに、図4に示されるような構成を有するPMD補償素子20を接続する場合、具体的には以下ようになる。この場合、光サーキュレータ21の偏波モード分散PMD1は0.020psである。光サーキュレータ21の固有偏波状態のストークスベクトルの方向（ θ_1, φ_1 ）は、 $\theta_1 = 55$ 度であり、 $\varphi_1 = 101$ 度である。そこで、PMD補償素子20の偏波保持光ファイバは、偏波モード分散PMD2 = PMD1 = 0.020psとなる長さにカットされ、 $\theta_2 = 180 + \theta_1 = 235$ 度かつ $\varphi_2 = 180 - \varphi_1 = 79$ 度となるような方向（ θ_2, φ_2 ）に回転されて、光サーキュレータ21の第1ポート21aに接続される。

【0035】

また、図1に示されるOCT装置1の構成において、図2，図3に示されるような差動群遅延（DGD）の大きさ及び固有偏波状態（ESOP）のストークスベクトルの方向を有する光サーキュレータ21の第3ポート21cに、図4に示されるような構成を有するPMD補償素子22を接続する場合、具体的には以下ようになる。この場合、光サーキュレータ21の偏波モード分散PMD1は0.022psである。光サーキュレータ21の固有偏波状態のストークスベクトルの方向（ θ_1, φ_1 ）は、 $\theta_1 = 82$ 度であり、 $\varphi_1 = 34$ 度である。そこで、PMD補償素子22の偏波保持光ファイバは、偏波モード分散PMD2 = PMD1 = 0.022psとなる長さにカットされ、 $\theta_2 = 180 + \theta_1 = 262$ 度かつ $\varphi_2 = 180 - \varphi_1 = 146$ 度となるような方向（ θ_2, φ_2 ）に回転されて、光サーキュレータ21の第3ポート21cに接続される。

【0036】

図7(a)は、本実施形態のOCT装置1における光サーキュレータ21およびPMD補償素子20の全体の差動群遅延の波長依存性を示すグラフである。図7(b)は、本実施形態のOCT装置1における光サーキュレータ21およびPMD補償素子22の全体の差動群遅延の波長依存性を示すグラフである。同図に示されるように、光サーキュレータ

10

20

30

40

50

およびPMD補償素子の全体の差動群遅延は 0.002 ps に低減される。この偏波モード分散は距離に換算して $0.6\text{ }\mu\text{m}$ であり、OCT測定の空間分解能 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ に比べて十分小さいので、偏波モード分散の影響は無視できる大きさとなる。このように、本実施形態のOCT装置1は、実用的な光サーキュレータ21, 31を用いて高い空間分解能でOCT測定を行うことができる。

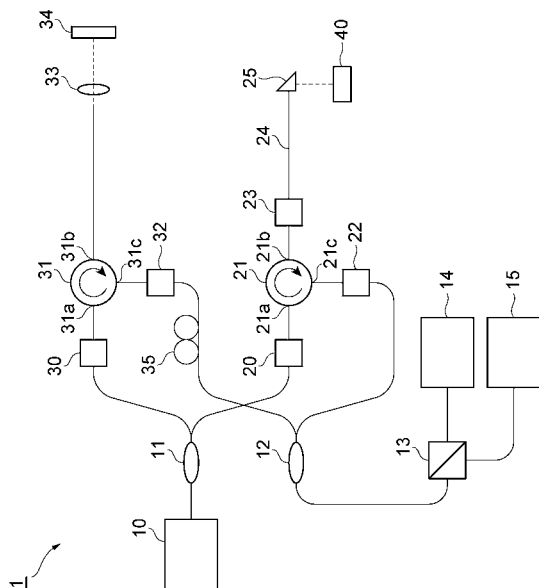
【符号の説明】

【0037】

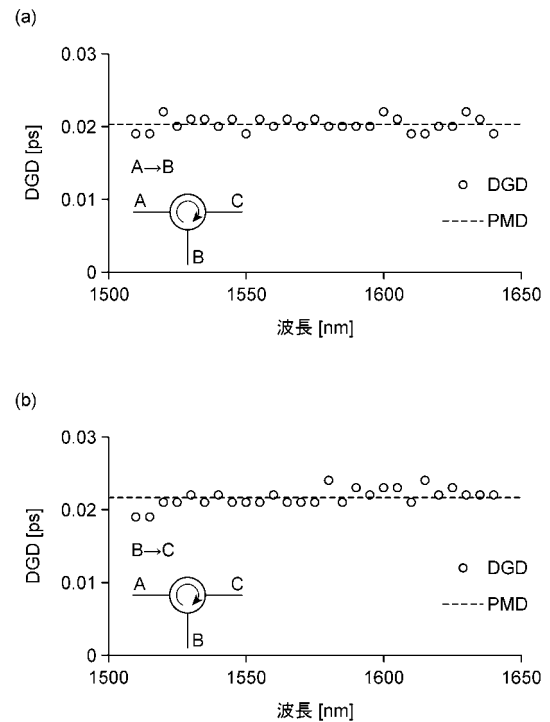
1...OCT装置、10...光源、11...光分岐器、12...光合波器、13...偏波ビームスプリッタ、14...光検出器、15...光検出器、20...PMD補償素子、21...光サーキュレータ、22...PMD補償素子、23...ロータリージョイント、24...光プローブ、25...ミラー、30...PMD補償素子、31...光サーキュレータ、32...PMD補償素子、33...レンズ、34...参照鏡、35...偏波コントローラ、40...測定対象物。

10

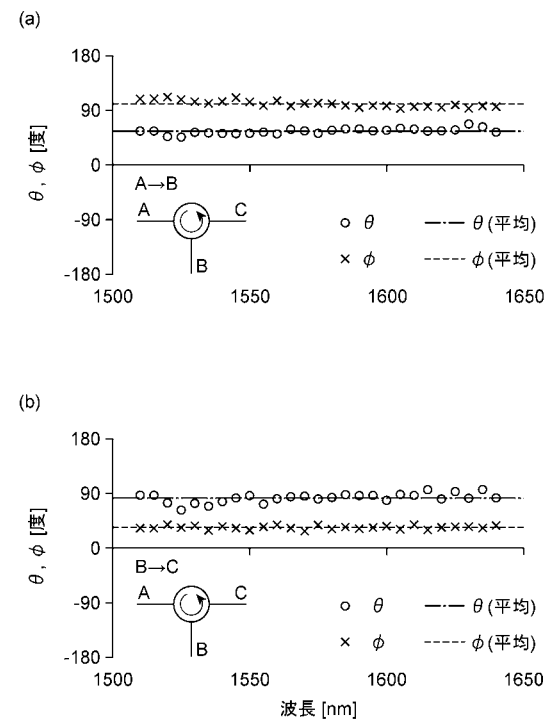
【図1】



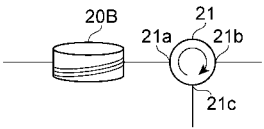
【図2】



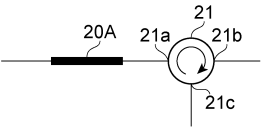
【 図 3 】



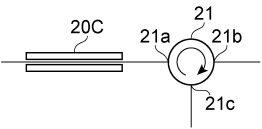
【 図 5 】



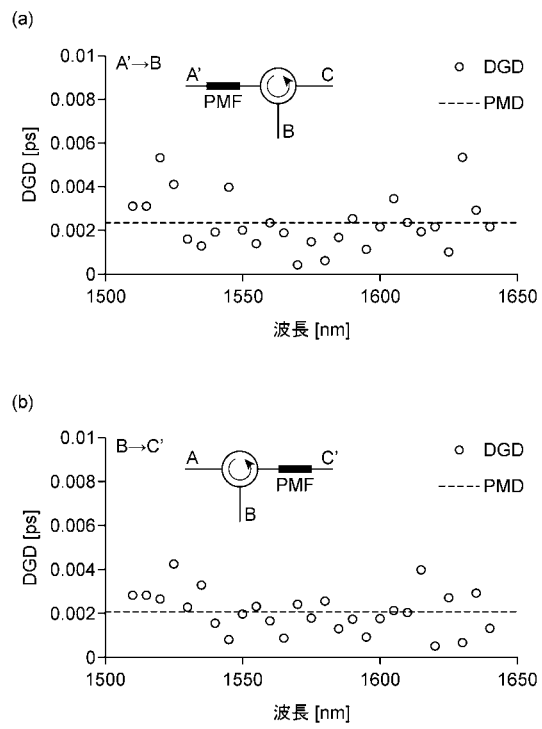
【 図 4 】



【 図 6 】



【 図 7 】



フロントページの続き

(72)発明者 小尾 浩士

神奈川県横浜市栄区田谷町 1 番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

F ターム(参考) 2G059 AA05 EE02 EE12 FF01 HH01 JJ11 JJ13 JJ19 JJ22 KK01
LL02 MM01