

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4869895号
(P4869895)

(45) 発行日 平成24年2月8日(2012.2.8)

(24) 登録日 平成23年11月25日(2011.11.25)

| | | | | | |
|--------------|-------|-----------|---------|-------|---------|
| (51) Int.Cl. | | F I | | | |
| GO 1 N | 21/17 | (2006.01) | GO 1 N | 21/17 | 6 2 5 |
| A 6 1 B | 1/00 | (2006.01) | A 6 1 B | 1/00 | 3 0 0 D |
| GO 1 B | 11/24 | (2006.01) | GO 1 B | 11/24 | D |
| GO 1 B | 9/02 | (2006.01) | GO 1 B | 9/02 | |

請求項の数 4 (全 23 頁)

| | | | |
|-----------|-------------------------------|-----------|--|
| (21) 出願番号 | 特願2006-330877 (P2006-330877) | (73) 特許権者 | 306037311 富士フイルム株式会社 東京都港区西麻布2丁目26番30号 |
| (22) 出願日 | 平成18年12月7日(2006.12.7) | (74) 代理人 | 100073184 弁理士 柳田 征史 |
| (65) 公開番号 | 特開2008-145187 (P2008-145187A) | (74) 代理人 | 100090468 弁理士 佐久間 剛 |
| (43) 公開日 | 平成20年6月26日(2008.6.26) | (72) 発明者 | 黒岩 果林 神奈川県足柄上郡開成町宮台798番地 富士フイルム株式会社内 |
| 審査請求日 | 平成21年9月10日(2009.9.10) | 審査官 | 尾崎 淳史 |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光断層画像化装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1の波長帯域内で波長が繰り返し掃引される第1の光を射出する第1の光源と、前記第1の波長帯域と波長帯域が異なる第2の波長帯域内で波長が繰り返し掃引される第2の光を射出する第2の光源とを有し、前記第1の光の掃引の一部と第2の光の掃引の一部とが同時に行なわれる光源ユニットと、

前記第1の光および第2の光をそれぞれ第1および第2の測定光と第1および第2の参照光とに分割する光分割手段と、

該分割手段により分割された前記第1および第2の測定光が測定対象に照射されたときの該測定対象からの反射光である第1および第2の反射光と前記第1および第2の参照光とをそれぞれ合波する合波手段と、

該合波手段により前記第1の反射光と前記第1の参照光とが合波されたときに生ずる第1の干渉光と前記合波手段により前記第2の反射光と前記第2の参照光とが合波されたときに生ずる第2の干渉光とを、少なくとも前記第1の波長帯域の一部および前記第2の波長帯域の一部を含む第3の波長帯域と、該第3の波長帯域より短波長側へずれた第4の波長帯域と、前記第3の波長帯域より長波長側へずれた第5の波長帯域とに分割する波長分割手段と、

前記第3の波長帯域内の干渉光を第1の干渉信号として検出する第1の干渉光検出手段と、前記第4の波長帯域内の干渉光を第2の干渉信号として検出する第2の干渉光検出手段と、前記第5の波長帯域内の干渉光を第3の干渉信号として検出する第3の干渉光検出

10

20

手段と、

前記第1、第2および第3の干渉光検出手段により検出された前記第1、第2および第3の干渉信号を用いて前記測定対象の断層画像を生成する断層画像処理手段とを備えた事

を特徴とする光断層画像化装置。

【請求項2】

前記第1の光および第2の光の周波数対時間特性を検出し、前記断層画像処理手段に出力する周波数対時間特性検出手段を備え、

前記該断層画像処理手段は、前記周波数対時間特性検出手段により検出された前記第1の光および第2の光の周波数対時間特性を用いて前記断層画像を生成するものであることを特徴とする請求項1記載の光断層画像化装置。

10

【請求項3】

前記第1の波長帯域および前記第2の波長帯域は、長波長側または短波長側の端部に、波長帯域が重複する重複波長帯域を有するものであり、

前記第3の波長帯域が前記重複波長帯域の全てを含むものであり、

前記第1の光源および前記第2の光源の一方から前記第3の波長帯域内の波長の光が射出されている間は、該第3の波長帯域内の波長の光は前記一方の光源のみから射出されることを特徴とする請求項2記載の光断層画像化装置。

【請求項4】

前記波長分割手段が、2つのダイクロイックミラーから構成されていることを特徴とする請求項2または3記載の光断層画像化装置。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、OCT (Optical Coherence Tomography) 計測により測定対象の光断層画像を取得する光断層画像化装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、生体組織の光断層画像を取得する際に、OCT計測を利用した光断層画像取得装置が用いられることがある。この光断層画像取得装置は、光源から射出された低コヒーレント光を測定光と参照光とに分割した後、該測定光が測定対象に照射されたときの測定対象からの反射光、もしくは後方散乱光と参照光とを合波し、該反射光と参照光との干渉光の強度に基づいて光断層画像を取得するものである。以下、測定対象からの反射光、後方散乱光をまとめて反射光と標記する。

30

【0003】

上記のOCT計測には、大きくわけてTD-OCT (Time domain OCT) 計測とFD (Fourier Domain) - OCT計測の2種類がある。TD-OCT計測は、参照光の光路長を変更しながら干渉光強度を測定することにより、測定対象の深さ方向の位置 (以下、深さ位置と記載) に対応した反射光強度分布を取得する方法である。

【0004】

一方、FD-OCT計測は、参照光と信号光の光路長は変えることなく、光のスペクトル成分毎に干渉光強度を測定し、ここで得られたスペクトル干渉強度信号を計算機にてフーリエ変換に代表される周波数解析を行うことで、深さ位置に対応した反射光強度分布を取得する方法である。TD-OCTに存在する機械的な走査が不要となることで、高速な測定が可能となる手法として、近年注目されている。

40

【0005】

FD-OCT計測を行う装置構成で代表的な物としては、SD-OCT (Spectral Domain OCT) 装置とSS-OCT (Swept source OCT) の2種類が挙げられる。SD-OCT装置は、SLD (Super Luminescence Diode) やAES (Amplified Spontaneous Em

50

i s s i o n) 光源、白色光といった広帯域の低コヒーレント光を光源に用い、マイケルソン型干渉計等を用いて、広帯域の低コヒーレント光を測定光と参照光とに分割した後、測定光を測定対象に照射させ、そのとき戻って来た反射光と参照光とを干渉させ、この干渉光を分光素子を用いて各周波数成分に分解し、フォトダイオード等の素子がアレイ状に配列されたディテクタアレイを用いて各周波数成分毎の干渉光強度を測定し、これにより得られたスペクトル干渉強度信号を計算機でフーリエ変換することにより、光断層画像を構成するようにしたものである。

【 0 0 0 6 】

一方、SS-OCT装置は、光周波数を時間的に掃引させるレーザを光源に用い、反射光と参照光とを各波長において干渉させ、光周波数の時間変化に対応した信号の時間波形を測定し、これにより得られたスペクトル干渉強度信号を計算機でフーリエ変換することにより光断層画像を構成するようにしたものである。

10

【 0 0 0 7 】

OCT装置において、より高分解能、高画質な結果を得るために、光源波長の広帯域化、及びそれに応じたデータ点数アップが必要である。しかし、SD-OCT装置では、一般に、フォトダイオード等の素子がアレイ状に配列されたディテクタアレイを用いて干渉光を波長ごとに検出しているため、データ点数はディテクタアレイの素子数で制限されてしまう。データ点数増加のためにディテクタアレイの素子数を増加させようとする、現状では、コストの増大、製作性の低下、測定レートの低下等が起こり、好ましくない。これに対して、SS-OCT装置では、データ点数を増加させるには、例えば光源の周波数掃引周期が一定とした場合、ディテクタからの光電流信号をデジタル値に変換する回路のサンプリング周波数を増加させればよいので、測定レートを高く維持したまま、低コストで容易に実現可能である。

20

【 0 0 0 8 】

また、上述した各種OCT計測において、空間分解能の向上を図るために、広帯域なスペクトル幅を有する測定光を用いることが知られている(特許文献1参照)。この広帯域なスペクトル幅を有する光を射出する光源として、特許文献1にはそれぞれ異なるスペクトル帯域の光を射出する複数の光源と、各光源から射出された光を光結合器により合波し、単一光波の光を射出する方法が開示されている。

【 0 0 0 9 】

SD-OCT計測においては、特許文献2に、重畳した波長帯域を持つ複数の利得媒質の光を合波して連続したスペクトルを形成する方法が開示されている。また、SS-OCT計測において合波により連続したスペクトルを形成する方法としては、特許文献3に、利得媒質と波長選択素子をそれぞれ有する複数の波長走査光源を備えた構成が開示されており、特許文献4に、複数の利得媒質からの光を1つの波長選択素子で同時に制御する構成が開示されている。

30

【特許文献1】特開2002-214125号公報

【特許文献2】特開2001-264246号公報

【特許文献3】特開2006-47264号公報

【特許文献4】米国特許第6665320号明細書

40

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 0 】

上記のように、高い空間分解能を得るために複数の光源の光を合波して用いる場合、従来のSS-OCT装置では、ディテクタが1素子であるために、複数の光源から異なる波長の光が同時に射出されて測定対象に照射されると、これら複数の光による干渉情報が混ざり合い、検出できなくなるという問題がある。

【 0 0 1 1 】

そのため、特許文献3、特許文献4に記載の装置では、光源の制御、もしくはスイッチング素子等の利用により、ディテクタに入射する光の波長は1つになるように構成してい

50

る。しかしながら、このような方法では、測定光として広帯域の光を用いることはできるが、測定光の全波長帯域の光を照射するには時間がかかるため、測定レートが低下するという問題が生じる。

【 0 0 1 2 】

そこで、本発明は上記事情を鑑みなされたものであり、高速に高分解能の断層画像を取得可能な光断層画像化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 3 】

本発明の光断層画像化装置は、第1の波長帯域内で波長が繰り返し掃引される第1の光を射出する第1の光源と、前記第1の波長帯域と波長帯域が異なる第2の波長帯域内で波長が繰り返し掃引される第2の光を射出する第2の光源とを有し、前記第1の光の掃引の一部と第2の光の掃引の一部とが同時に行なわれる光源ユニットと、

前記第1の光および第2の光をそれぞれ第1および第2の測定光と第1および第2の参照光とに分割する光分割手段と、

該分割手段により分割された前記第1および第2の測定光が測定対象に照射されたときの該測定対象からの反射光である第1および第2の反射光と前記第1および第2の参照光とをそれぞれ合波する合波手段と、

該合波手段により前記第1の反射光と前記第1の参照光とが合波されたときに生ずる第1の干渉光と前記合波手段により前記第2の反射光と前記第2の参照光とが合波されたときに生ずる第2の干渉光とを、少なくとも前記第1の波長帯域の一部および前記第2の波長帯域の一部を含む第3の波長帯域と、該第3の波長帯域より短波長側へずれた第4の波長帯域と、前記第3の波長帯域より長波長側へずれた第5の波長帯域とに分割する波長分割手段と、

前記第3の波長帯域内の干渉光を第1の干渉信号として検出する第1の干渉光検出手段と、前記第4の波長帯域内の干渉光を第2の干渉信号として検出する第2の干渉光検出手段と、前記第5の波長帯域内の干渉光を第3の干渉信号として検出する第3の干渉光検出手段と、

前記第1、第2および第3の干渉光検出手段により検出された前記第1、第2および第3の干渉信号を用いて前記測定対象の断層画像を生成する断層画像処理手段とを備えた事を特徴とするものである。

【 0 0 1 4 】

なお、第1の光源および第2の光源は、所定の波長帯域内で波長が繰り返し掃引される光を射出するものであれば、いかなる構成のものであってもよい。例えば、単一の掃引波長レーザから構成されるものであってもよいし、あるいは射出される光が、実質的に1つ波長掃引光源から射出される光と同等であるとみなせるものであれば、複数の波長掃引レーザから構成されるものであってもよい。

【 0 0 1 5 】

また、「測定対象からの反射光」とは、測定対象で反射した光に加え測定対象で散乱された光を含むものである。

【 0 0 1 6 】

前記第1の波長帯域および前記第2の波長帯域が、長波長側または短波長側の端部に、波長帯域が重複する重複波長帯域を有するものであり、

前記第3の波長帯域が前記重複波長帯域の全てを含むものであれば、

前記第1の光源および前記第2の光源の一方から前記第3の波長帯域内の波長の光が射出されている間は、該第3の波長帯域内の波長の光は前記一方の光源のみから射出されるものであってもよい。

【 0 0 1 7 】

前記波長分割手段は、波長を分割可能なものであればいかなる物であってもよい。例えばWDM (Wavelength Division Multiplexing: 波長分割多重) カプラーから構成されるものであってもよいし、あるいは2つのダイクロイッ

10

20

30

40

50

クミラーから構成されるものであってもよい。

【 0 0 1 8 】

前記第 1 の光および第 2 の光の周波数対時間特性を検出し、前記断層画像処理手段に出力する周波数対時間特性検出手段を備える場合であれば、

前記断層画像処理手段は、前記周波数対時間特性検出手段により検出された前記第 1 の光および第 2 の光の周波数対時間特性を用いて前記断層画像を生成するものであってもよい。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 9 】

本発明の光断層画像化装置によれば、前記第 1 の反射光と前記第 1 の参照光とが合波されたときに生ずる第 1 の干渉光と前記合波手段により前記第 2 の反射光と前記第 2 の参照光とが合波されたときに生ずる第 2 の干渉光とを、少なくとも前記第 1 の波長帯域の一部および前記第 2 の波長帯域の一部を含む第 3 の波長帯域と、該第 3 の波長帯域より短波長側へずれた第 4 の波長帯域と、前記第 3 の波長帯域より長波長側へずれた第 5 の波長帯域とに分割し、前記第 3 の波長帯域内の干渉光を第 1 の干渉信号として検出し、前記第 4 の波長帯域内の干渉光を第 2 の干渉信号として検出し、前記第 5 の波長帯域内の干渉光を第 3 の干渉信号として検出し、これらの干渉信号に基づいて断層画像を生成するため、波長帯域の一部が重複している、あるいは波長帯域の端部同士が近接している第 1 の光と第 2 の光を同時に測定対象に照射しても、このとき生じた第 1 の干渉光と第 2 の干渉光を、3 つの波長帯域に分割して干渉信号を取得するので、重複しているあるいは近接している波長帯域内の干渉光に対応する干渉信号も取得可能となり、従来に比べて測定レートを向上させることができ、高速に高分解能の断層画像を取得することができる。

【 0 0 2 0 】

また、前記第 1 の波長帯域および前記第 2 の波長帯域は、長波長側または短波長側の端部に、波長帯域が重複する重複波長帯域を有するものであり、前記第 3 の波長帯域が前記重複波長帯域の全てを含むものである場合には、前記第 1 の光源および前記第 2 の光源の一方から前記第 3 の波長帯域内の波長の光が射出されている間は、該第 3 の波長帯域内の波長の光は前記一方の光源のみから射出されるため、第 1 の光と第 2 の光とを、同時に測定対象に照射しても、このとき生じた第 1 の干渉光による干渉信号と第 2 の干渉光による干渉信号とが混ざり合うことはなく、第 1 の干渉光による干渉信号と第 2 の干渉光による干渉信号とを同時に得ることができるので、従来に比べて測定レートをより向上させることができ、より高速に高分解能の断層画像を取得することができる。

【 0 0 2 1 】

従来の複数の光源や複数の利得媒質を備えたものでは、ディテクタに入射する光の波長が 1 つになるように同期をとって制御する必要があったが、本発明の光断層画像化装置によれば、このような制御は不要であり、装置を簡略化することができる。また、本発明の光断層画像化装置では、波長分割した波長帯域に応じて各干渉光検出手段を最適化した構成にすることができるため、各干渉光検出手段における検出精度を高め、取得する断層画像の分解能を向上させることができる。さらに、干渉光検出手段に用いる部品は、広帯域の光に対応する必要はなく、波長分割した波長帯域にのみ対応していればよいため、従来に比べて制約条件が緩和され、汎用的な部品が使用可能となり、装置構成が容易になる。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 2 2 】

以下、図面を参照して本発明の光断層画像化装置の実施形態を詳細に説明する。図 1 は本発明の第 1 の実施形態による光断層画像化装置 100 の概略構成図である。光断層画像化装置 100 は、例えば体腔内の生体組織や細胞等の測定対象の断層画像をマッハツェンダ型干渉計を用いて前述の S S - O C T 計測により取得するものである。

【 0 0 2 3 】

光断層画像化装置 100 は、波長が、波長帯域 a ($1.0\mu\text{m} \sim 1.5\mu\text{m}$) 内で、一定の周期で掃引されるレーザ光 $L a$ を射出する光源 10 a と、波長が、波長帯域 b ($0.$

10

20

30

40

50

6 μm ~1.1 μm)内で、一定の周期で掃引されるレーザ光L_bを射出する光源10_bとを有する光源ユニット10と、光源ユニット10から射出された光L_aとL_bとを合波する合波手段2と、光L_aおよび光L_bをそれぞれ測定光L_{1a}と参照光L_{2a}、測定光L_{1b}と参照光L_{2b}に分割する光分波手段3と、ポートaに入射された測定光L_{1a}、L_{1b}をポートbへ射出し、ポートbへ入射された反射光L_{3a}とL_{3b}とをポートcへ射出するサーキュレータ4と、反射光L_{3a}、L_{3b}と参照光L_{2a}、L_{2b}とをそれぞれ合波する合波手段5と、合波手段5により反射光L_{3a}と参照光L_{2a}とが合波されたときに生ずる干渉光L_{4a}および反射光L_{3b}と参照光L_{2b}とが合波されたときに生ずる干渉光L_{4b}を、3つの波長帯域、0.9 μm 以下、0.9 μm ~1.2 μm および1.2 μm 以上へ波長分割する波長分割手段30と、各波長帯域の干渉光を干渉信号として検出する干渉光検出手段40_a、40_bおよび40_cと、干渉光検出手段40_a、40_b、40_cにより検出された干渉信号を用いて測定対象Sの断層画像を取得する断層画像処理手段50とを備えている。

10

【0024】

なお、測定光L_{1a}、参照光L_{2a}、反射光L_{3a}、干渉光L_{4a}は光L_aに基づくものであり、光L_aと同じ波長帯域の光である。また、測定光L_{1b}、参照光L_{2b}、反射光L_{3b}、干渉光L_{4b}は光L_bに基づくものであり、光L_bと同じ波長帯域の光である。

【0025】

光源ユニット10の光源10_aは、利得媒質である半導体光増幅器(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)11_aと、FFP-TF(Fiber Fabry Perot - Tunable Filter)からなる波長選択手段12_aと、半導体光増幅器11_aおよび波長選択手段12_aの両端に接続されてリング状の共振器を構成する光ファイバ13_aとから主に構成されている。

20

【0026】

半導体光増幅器11_aは、駆動電流の注入により微弱な放出光を一端側に接続された光ファイバ13_aに射出するとともに、他端側の光ファイバ13_aから入射された光を増幅する機能を有している。この半導体光増幅器11_aにより、リング状の共振器においてレーザ光が発振し、このレーザ光が光ファイバ13_aに接続された分岐比10:90の光カプラ14_aにより分岐され、光ファイバFB1_aにより導波されて光L_aとして外部へ射出される。

30

【0027】

波長選択手段12_aは、透過させる光の波長を変更可能なように構成されており、これにより、リング状の共振器内で発振するレーザ光の波長が選択可能となり、一定の周期で波長掃引することができる。

【0028】

光源10_bもまた、光源10_aと同様の構成を有し、利得媒質である半導体光増幅器11_bと、FFP-TFからなる波長選択手段12_bと、これらの両端に接続されてリング状の共振器を構成する光ファイバ13_bとから主に構成されている。光源10_bの共振器において発振したレーザ光は、光ファイバ13_bに接続された分岐比10:90の光カプラ14_bにより分岐され、光ファイバFB1_bにより導波されて光L_bとして外部へ射出される。光源10_bにおいても、波長選択手段12_bにより波長選択がなされ、一定の周期で波長掃引することができる。

40

【0029】

図2は、光源10_aおよび10_bから射出されるレーザ光L_aおよびL_bの波長掃引の様子を示すものであり、時間と波長の関係を示す図である。この図2に示すように、光源10_aは、波長帯域 a (1.0 μm ~1.5 μm)内において、例えば周期2.5msで波長掃引を行なう。光源10_bは、波長帯域 b (0.6 μm ~1.1 μm)内において、光源10_aと同時に、周期2.5msで波長掃引を行なう。

【0030】

50

光ファイバFB1aを伝播した光Laと、光ファイバFB1bを伝播した光Lbとは、光合波手段2により合波され、光ファイバFB31へ射出され、光ファイバFB31を伝播して、光分波手段3へ入射する。

【0031】

光分波手段3は、例えば、分岐比90:10の2x2の光カプラから構成されている。光分波手段3は、光Laを測定光L1aと参照光L2aとに分割し、光Lbを測定光L1bと参照光L2bとに分割する。このとき、光分波手段3は、測定光:参照光=90:10の割合で分割する。測定光L1aおよびL1bは、ファイバFB32へ射出され、参照光L2aおよびL2bは、ファイバFB33へ射出される。

【0032】

光分波手段3とプローブ20の間の光路には、サーキュレータ4が設けられ、サーキュレータ4の光分波手段3の側にポートaに入射した測定光L1aおよびL1bは、プローブ20側のポートbからファイバFB34へ射出される。

【0033】

プローブ20は、光学ロータリコネクタ21を介して入射された測定光L1a、L1bを測定対象Sまで導波し、測定対象Sの同一部位に同時に照射する。また、プローブ20は、測定光L1a、L1bが測定対象Sに照射されたときの測定対象Sからの反射光L3a、L3bを導波する。プローブ20は、図示しないモータにより、光学ロータリコネクタ21から先のファイバ部が回転する構成となっており、それによりサンプル上において円周状に光を走査する様になっており、これにより2次元断層画像が計測可能となっている。さらに、図示しないモータによりプローブ20の先端が光路の走査円が形成する平面に対して垂直な方向に走査する事により、3次元断層画像の計測も可能となっている。また、プローブ20は、図示しない光コネクタにより光ファイバFB34に対して着脱可能に取り付けられている。勿論、プローブ先端形状や走査方向はこれに限る物ではなく、例えば、ファイバ先端に高速走査ミラーを配置して2次元走査を行うような構成でもよい。

【0034】

プローブ20からファイバFB34を介して射出された反射光L3aおよびL3bは、サーキュレータ4のポートbへ入射し、ポートcから、ファイバFB35へ射出される。合波手段5では、反射光L3a、L3bと参照光L2a、L2bとをそれぞれ合波し、干渉光L4aおよびL4bをファイバFB36へ射出する。なお、光分波手段3から合波手段5までの参照光L2a、L2bの光路には透過型の光路長調整手段6が設けられている。光路長調整手段6は、断層画像の取得を開始する位置を調整するために、それぞれ参照光L2a、L2bの光路長を変更するものである。

【0035】

波長分割手段30は、設定された波長に応じて光を分割する機能を有し、波長が0.9μm以下の光を反射し、波長が0.9μmより長い光は透過するダイクロイックミラー31と、波長が1.2μm以下の光を反射し、波長が1.2μmより長い波長の光は透過するダイクロイックミラー32と、レンズ33~36とを備えている。干渉光L4aおよびL4bの内、波長が0.9μm以下の干渉光(本発明の第4の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB37へ入射し、波長が0.9μmより長く、1.2μm以下の干渉光(本発明の第3の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB38へ入射し、波長が1.2μmより長い干渉光(本発明の第5の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB39へ入射する。ダイクロイックミラー31および32の波長反射特性を図3(1)に示す。なお、上記のダイクロイックミラー32の代わりに、図3(2)に示すように、波長が1.2μm以下の光を透過し、波長が1.2μmより長い光は反射するダイクロイックミラーを用いることもできる。この場合には、干渉光L4aおよびL4bの内、波長が0.9μm以下の干渉光(本発明の第4の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB37へ入射し、波長が0.9μmより長く、1.2μm以下の干渉光(本発明の第3の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB39へ入射し、波長が1.2μmより長い干渉光(本発明の第5の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB38へ入射する。

10

20

30

40

50

【0036】

なお、説明を簡単にするために、上述のように波長が重複しないように分割される例を用いて説明を行なうが、厳密には波長分割の際には、波長が重複した状態で分割されている。例えば図3(3)に示すように、波長が $0.9\mu\text{m}$ 以下の光をほぼ100%反射し、波長が $0.95\mu\text{m}$ より長い光はほぼ100%透過するダイクロミックミラー31と、波長が $1.15\mu\text{m}$ 以下の光をほぼ100%反射し、波長が $1.2\mu\text{m}$ より長い光はほぼ100%透過するダイクロミックミラー32を用いて波長を分割する場合であれば、干渉光L4aおよびL4bの内、波長が $0.95\mu\text{m}$ 以下の干渉光(本発明の第4の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB37へ入射し、波長が $0.9\mu\text{m}$ より長く、 $1.2\mu\text{m}$ 以下の干渉光(本発明の第3の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB38へ入射し、波長が $1.15\mu\text{m}$ より長い干渉光(本発明の第5の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB39へ入射する。また、図3(3)に示すダイクロミックミラー32の代わりに、図3(4)に示すように、波長が $1.15\mu\text{m}$ 以下の光をほぼ100%透過し、波長が $1.2\mu\text{m}$ より長い光はほぼ100%反射するダイクロミックミラーを用いることもできる。この場合には、干渉光L4aおよびL4bの内、波長が $0.95\mu\text{m}$ 以下の干渉光(本発明の第4の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB37へ入射し、波長が $0.9\mu\text{m}$ より長く、 $1.2\mu\text{m}$ 以下の干渉光(本発明の第3の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB39へ入射し、波長が $1.15\mu\text{m}$ より長い干渉光(本発明の第5の波長帯域の干渉光)は、光ファイバFB38へ入射する。

10

【0037】

光ファイバFB37、FB38およびFB39へは、例えば、分岐比50:50の 2×2 の光ファイバカプラ41a、41bおよび41cが接続され、それぞれ干渉光を二分して干渉光検出手段40a、40bおよび40cへ射出し、干渉光検出手段40a、40bおよび40bでは二分された干渉光をそれぞれ2つの光検出素子を用いてバランス検波するようにしている。この機構により、光強度ゆらぎの影響を抑え、より鮮明な画像を得ることができる。

20

【0038】

干渉光検出手段40a、40bおよび40cは、干渉光をそれぞれ光電変換し、断層画像処理手段50へ出力する。ここで、図4を参照しながら、干渉光検出手段40a、40bおよび40cでの検出結果について説明する。図4(1)、(2)および(3)は、干渉光検出手段40a、40bおよび40cから出力された干渉信号の強度変化を時間軸と対応させて示すものである。理解を助けるために光ごとに分解して示している。すなわち、干渉光L4aは、掃引開始後1msまでの間は、干渉光検出手段40bにより検出され、掃引開始1ms~2.5msの間は、干渉光検出手段40cにより検出される。また干渉光L4bは、掃引開始後1.5msまでの間は、干渉光検出手段40aにより検出され、掃引開始1.5ms~2.5msの間は、干渉光検出手段40bにより検出される。なお、各干渉光検出手段40a、40bおよび40cは、それぞれ入射される干渉光の波長帯域よりも広い検出波長帯域を有している。

30

【0039】

断層画像処理手段50は、例えばパーソナルコンピュータ等のコンピュータシステムからなり、予め不図示の記憶部へ、光Laおよび光Lbの周波数対時間特性を記憶している。

40

【0040】

断層画像処理手段50は、干渉光検出手段40a、40bおよび40cの検出結果を波長掃引光源の発振周波数と対応づけた後、すべて等周波数間隔の干渉信号となる様に信号の接続処理を実施する事により、ひとつの広帯域干渉信号IS0を形成する。この干渉信号IS0を、例えばフーリエ変換を始めとする周波数解析を行うことにより測定対象Sの各深さ位置における光反射強度を求める。

【0041】

次に、図1から図4を参照して光断層画像化装置100の動作例について説明する。まず、光源ユニット10の光源10aから、図2に示すような、波長が、波長帯域 a (

50

1.0 μm ~ 1.5 μm) 内で、一定の周期で掃引されるレーザ光 L a が射出される。光 L a は、光ファイバ F B 1 a 内を伝播し、光合波手段 2 に入射する。同様に、光源 1 0 b から、図 2 に示すような、波長が、波長帯域 b (0.6 μm ~ 1.1 μm) 内で、一定の周期で掃引されるレーザ光 L b が射出される。光 L b は、光ファイバ F B 1 b 内を伝播し、光合波手段 2 に入射する。光分波手段 3 において、光 L a、L b はそれぞれ測定光 L 1 a と参照光 L 2 a、測定光 L 1 b と参照光 L 2 b に分割される。

【 0 0 4 2 】

測定光 L 1 a および測定光 L 1 b は、光ファイバ F B 3 2 を伝播して、サーキュレータ 4 のポート a へ入射し、ポート b から射出され、光ファイバ F B 3 4 を伝播して光ロータリコネクタ 2 1 を介してプローブ 2 0 に入射し、プローブ 2 0 から測定対象 S に照射される。そして、測定対象 S の各深さ位置 z において反射した反射光 L 3 a、L 3 b がプローブ 2 0 に入射し、測定光と逆の経路を辿ってサーキュレータ 4 のポート b に入射し、ポート c から射出され、光ファイバ F B 3 5 を伝播して、合波手段 5 へ入射する。

10

【 0 0 4 3 】

分波手段 3 で分割された参照光 L 2 a および参照光 L 2 b は、光ファイバ F B 3 3 を伝播して、光路長調整手段 6 により光路長が調整された後、合波手段 5 へ入射する。

【 0 0 4 4 】

合波手段 5 では、反射光 L 3 a、L 3 b と参照光 L 2 a、L 2 b とをそれぞれ合波する。合波手段 5 により反射光 L 3 a と参照光 L 2 a とが合波されたときに生ずる干涉光 L 4 a および反射光 L 3 b と参照光 L 2 b とが合波されたときに生ずる干涉光 L 4 b は、波長分割手段 3 0 へ入射する。

20

【 0 0 4 5 】

光ファイバ F B 3 6 から射出され、レンズ 3 3 により平行光化された干涉光 L 4 a および L 4 b の内、波長が 0 . 9 μm 以下の光はダイクロイックミラー 3 1 により反射され、レンズ 3 4 により集光されて、ファイバ F B 3 7 へ入射する。

【 0 0 4 6 】

干涉光 L 4 a および L 4 b の内、波長が 0 . 9 μm より長く、1 . 2 μm 以下の光は、ダイクロイックミラー 3 1 を透過し、ダイクロイックミラー 3 2 により反射され、レンズ 3 5 により集光されて、ファイバ F B 3 8 へ入射する。波長が 1 . 2 μm より長い光は、ダイクロイックミラー 3 1 および 3 2 を透過し、レンズ 3 6 により集光されて、ファイバ F B 3 9 へ入射する。

30

【 0 0 4 7 】

各波長帯域の干涉光は、それぞれ光ファイバカプラ 4 1 a、4 1 b および 4 1 c により二分され、干涉光検出手段 4 0 a、4 0 b および 4 0 c へ入射する。干涉光検出手段 4 0 a、4 0 b および 4 0 c では二分された干涉光をそれぞれ 2 つの光検出素子を用いてパルス検波するとともに光電変換し、干涉信号として、断層画像処理手段 5 0 へ出力する。

【 0 0 4 8 】

断層画像処理手段 5 0 は、前述したように、干涉光検出手段 4 0 a、4 0 b および 4 0 c の検出結果を波長掃引光源の発振周波数と対応づけた後、すべて等周波数間隔の干涉信号となる様に信号の接続処理を実施する事により、ひとつの広帯域干涉信号 I S 0 を形成し、この干涉信号 I S 0 を、例えばフーリエ変換を始めとする周波数解析を行うことにより測定対象 S の各深さ位置における光反射強度を求める。

40

【 0 0 4 9 】

プローブ 2 0 は、図示しないモータにより、光学ロータリコネクタ 2 1 から先のファイバ部が回転する構成となっており、それによりサンプル上において円周状に光を走査する様に構成されている。このため、上述の動作により、測定対象 S の一点における各深さ位置における光反射強度を取得した後、順次光の照射位置を僅かに変更して、同様に各深さ位置における光反射強度を取得し、これらの光反射強度を統合することにより、2次元の光断層画像が生成される。生成された断層画像は、断層画像処理手段 5 0 に接続されている CRT (C a t h o d e R a y T u b e) や液晶表示装置等からなる表示装置 6 0

50

により表示される。

【 0 0 5 0 】

以上の説明で明らかなように、波長帯域の一部が重複している、光 L a と光 L b とを同時に測定対象に照射しても、このとき生じた干渉光 L 4 a と干渉光 L 4 b を、 $0.9\mu\text{m}$ 以下の波長帯域、 $0.9\mu\text{m}$ より長く $1.2\mu\text{m}$ 以下の波長帯域、または $1.2\mu\text{m}$ より長い波長大域の3つの波長帯域に分割して干渉信号を取得するので、重複している波長帯域内の干渉光に対応する干渉信号も取得可能となり、従来に比べて測定レートを向上させることができ、高速に高分解能の断層画像を取得することができる。

【 0 0 5 1 】

また、光 L a と光 L b とで波長が重複している重複波長帯域を含む上記の $0.9\mu\text{m}$ より長く $1.2\mu\text{m}$ 以下の波長帯域においては、光源 1 0 a または光源 1 0 b の一方の光源のみから光が射出されるため、光 L a と光 L b とを同時掃引しながら測定対象に照射しても、このとき生じた干渉光 L a による干渉信号と干渉光 L b による干渉信号とが混ざり合うことはなく、第 1 の干渉光による干渉信号と第 2 の干渉光による干渉信号とを同時に得ることができるので、従来に比べて測定レートをより向上させることができ、より高速に高分解能の断層画像を取得することができる。

【 0 0 5 2 】

またダイクロイックミラー 3 1 および 3 2 を有する波長分割手段 3 0 を用いたため、コンパクトにかつ効率よく干渉光を波長に応じて分割することができる。

【 0 0 5 3 】

なお、本実施の形態においては、光 L a 、 L b が一部重複した波長帯域を有し、かつ干渉光 L a と干渉光 L b のスペクトルが連続しているとみなせる場合について説明したが、本発明はこれに限定されるものではない。干渉光 L a と干渉光 L b のスペクトルが連続していると見なせない場合には、例えば断層画像処理手段 5 0 の代わりに図 5 に示す断層画像処理手段 5 5 を用いることにより、断層画像を取得することができる。

【 0 0 5 4 】

断層画像処理手段 5 5 は、例えばパーソナルコンピュータ等のコンピュータシステムからなる。干渉光 L 4 a に対応する干渉信号 I S a および干渉光 L 4 b に対応する干渉信号 I S b を生成し、該干渉信号 I S a および I S b を周波数解析することにより測定対象 S の各深さ位置における複数の中間反射強度（反射率） $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ を検出し、この複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ を用いて測定対象 S の断層画像を取得する機能を有している。具体的には、断層画像処理手段 5 5 は、図 5 に示すように干渉光検出手段 4 0 a 、 4 0 b および 4 0 c の検出結果から干渉信号 I S a 、 I S b を生成する干渉信号生成手段 5 4 、干渉信号 I S a 、 I S b をそれぞれ周波数解析することにより各深さ位置における複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ を検出する周波数解析手段 5 1 と、周波数解析手段 5 1 により検出された複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ から断層画像の生成に用いる反射強度 $r(z)$ を生成する反射強度処理手段 5 2 と、反射強度処理手段 5 2 により生成された反射強度 $r(z)$ を用いて断層画像を生成する断層画像生成手段 5 3 とを有している。

【 0 0 5 5 】

干渉信号生成手段 5 4 は、予め不図示の記憶部へ、光 L a および光 L b の周波数対時間特性を記憶し、該光 L a および光 L b の周波数対時間特性および各干渉光検出手段 4 0 a 、 4 0 b および 4 0 c の検出結果に基づいて、干渉信号 I S a および I S b を生成する。本実施の形態では、掃引開始後 1 m s までの間の干渉光検出手段 4 0 b の検出結果および掃引開始 1 m s ~ 2 . 5 m s の間の干渉光検出手段 4 0 c の検出結果を時間軸に沿って合成することにより、干渉信号 I S a を生成し、また掃引開始後 1 . 5 m s までの間の干渉光検出手段 4 0 a の検出結果および掃引開始 1 . 5 m s ~ 2 . 5 m s の間の干渉光検出手段 4 0 b の検出結果を時間軸に沿って合成することにより、干渉信号 I S b を生成する。

【 0 0 5 6 】

周波数解析手段 5 1 は、干渉信号 I S a を周波数解析することにより光 L a に基づく中

10

20

30

40

50

間反射強度 $r_a(z)$ を検出する第1周波数解析手段51aと、干渉信号 $I S_b$ を周波数解析することにより光 L_b に基づく中間反射強度 $r_b(z)$ を検出する第2周波数解析手段51bとを備えている。ここで、第1周波数解析手段51aにおいて干渉信号 $I S_a$ に基づいて中間反射強度（反射率） $r_a(z)$ を算出する方法について簡単に説明する。なお、詳細については「武田 光夫、「光周波数走査スペクトル干渉顕微鏡」、光技術コンタクト、2003、Vol. 41、No. 7、p426 - p432」に記載されている。

【0057】

測定光 L_{1a} が測定対象 S に照射されたとき、測定対象 S の各深さからの反射光 L_{3a} と参照光 L_{2a} とがいろいろな光路長差（測定対象 S の深さ位置）をもって干渉しあう際の各光路長差 l に対する干渉縞の光強度を $S(l)$ とすると、干渉光検出手段40において検出される光強度 $I(k)$ は、

$$I(k) = \int_0 S(l) [1 + \cos(kl)] dl \cdots (1)$$

で表され、例えば図6に示すようなグラフで表される。ここで、 k は波数、 l は参照光 L_{2a} と反射光 L_{3a} との光路長差である。式(1)は波数 k を変数とする光周波数領域のインターフェログラムとして与えられていると考えることができる。よって、周波数解析手段51において、干渉光検出手段40aの検出によるスペクトル干渉縞をフーリエ変換により周波数解析することにより、各波長における干渉信号 $I S_a$ の光強度 $S(l)$ を決定することができ、図7に示すように各深さ位置における反射率を求めることができる。そして、測定対象 S の測定開始位置からの距離情報と中間反射強度 $r_a(z)$ とを取得する。同様に、第2周波数解析手段51bは干渉信号 $I S_b$ についても測定開始位置からの距離情報と中間反射強度 $r_b(z)$ とを取得する。つまり、周波数解析手段51において、測定対象 S の同一の照射部位から複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ が取得されることになる。なお、周波数解析手段51は上述したフーリエ変換処理に限らず、たとえば最大エントロピー法(MEM)、Yule-Walker法等の公知のスペクトル解析技術を用いてそれぞれ中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ を取得するようにしてもよい。

【0058】

図5の反射強度処理手段52は、上述のように検出された各深さ位置 z からの複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ から断層画像の生成に用いる反射強度 $r(z)$ を検出するものである。具体的には、図8に示すように、反射強度処理手段52は、各深さ位置 z での中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ の平均値 $r(z) = (r_a(z) + r_b(z)) / 2$ を算出する。

【0059】

断層画像生成手段53は、反射強度処理手段52により検出された反射強度 $r(z)$ を用いて断層画像を生成するものである。具体的には、各測定光 L_{1a} 、 L_{1b} が測定対象 S の深さ方向 z に直交する方向に走査しながら照射されていく。すると、断層画像生成手段53において、複数の測定点での各深さ方向に対する反射強度 $r(z)$ が取得されていく。そして、断層画像生成手段53は各測定点において取得された複数の反射強度 $r(z)$ を用いて2次元もしくは3次元の断層画像を生成する。

【0060】

このように、断層画像処理手段50の反射強度処理手段52において、複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ の平均値を算出することにより、反射率 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ に含まれているノイズ成分が相殺され、画質の良い断層画像を得ることができる。

【0061】

測定対象 S の各深さ位置 z の反射強度の絶対値は、測定対象 S の組成に基づく光吸収・光散乱特性等の様々な要因により、照射される測定光 L_{1a} 、 L_{1b} の波長によって異なる。しかし、複数の測定光 L_{1a} 、 L_{1b} は測定対象 S の同一部位に同時に照射されているため、たとえばある深さ位置 z_1 から得られる複数の中間反射強度 $r_a(z_1)$ 、 $r_b(z_1)$ の定性的な特性、例えば反射強度が最大となるピーク位置等は、おおよそ同じものとなる。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 2 】

そこで、複数の中間反射強度 $r_a(z_1)$ 、 $r_b(z_1)$ の平均値 (= $r(z_1)$) を算出することにより、複数の中間反射強度 $r_a(z_1)$ 、 $r_b(z_1)$ の値が異なったものであるとしても、それぞれに含まれるノイズ成分を相殺し、深さ位置 z_1 での反射強度を示す成分を際立たせることができる。よって、広帯域な光源を用いず互いに波長帯域が異なる光 L_a 、 L_b を用いて断層画像を取得した場合であっても画質の良い断層画像を得ることができる。

【 0 0 6 3 】

なお、周波数解析手段 5 1 において、フーリエ変換の結果に対するサンプリングピッチは各光 L_a 、 L_b の波長帯域 a 、 b の幅に依存する。このため、上述のように各光 L_a 、 L_b の波長帯域 a 、 b の幅が異なるものであるとき、干渉信号 IS_a 、 IS_b のサンプリングピッチが異なる。この場合、波長帯域の狭い光 L_a から得られた干渉信号 IS_a に対し、波長帯域の足りない分だけ値として「0」を挿入することにより波長帯域 a 、 b の幅を同一に揃えるようにする。

10

【 0 0 6 4 】

また、複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ の平均値を算出する方法について例示したが、複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ の積を用いて反射強度 $r(z)$ を生成するにしてもよい。すると、複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ のうち、最も反射強度の強い信号成分が強め合うことになるため、相対的にノイズ成分の信号値が小さくなり画質の良い断層画像を得ることができる。さらに、上記手法に限らず、他の種々の手法により複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ を用いて各深さ位置における反射強度 $r(z)$ を生成し、断層画像を取得するにしても良い。上記実施の形態においては、複数の中間反射強度 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ の平均もしくは積を用いて反射強度を取得する場合について例示しているが、光源ユニット 10 から射出される光束 L_a 、 L_b のスペクトル情報を用いて、それぞれの干渉信号 IS_a 、 IS_b が得られた波長帯域を考慮して $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ を組み合わせることにより、反射強度 $r(z)$ の高分解能化を図ることができる。つまり、干渉信号 IS_a 、 IS_b のフーリエ変換で得られる $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ と、真の反射強度 $r(z)$ は、各光束 L_a 、 L_b のスペクトル形状のフーリエ変換 $h_a(z)$ 、 $h_b(z)$ と

20

【数 1】

$$ra(z) = r(z) \otimes ha(z) \quad \dots (2)$$

$$rb(z) = r(z) \otimes hb(z) \quad \dots (3)$$

⊗は畳み込み演算を示す

の関係にある。これを、 $r_a = [r_a(0), r_a(1 \times dz_a), \dots]^T$ 、 $r_b = [r_b(0), r_b(1 \times dz_b), \dots]^T$ 、 $r = [r(0), r(1 \times dz), \dots]^T$ として離散表現にすると

$$H_a \cdot r = r_a \quad \dots (4)$$

$$H_b \cdot r = r_b \quad \dots (5)$$

30

40

となる。

【 0 0 6 5 】

ここで、 H_a 、 H_b は、 $h_a = [h_a(0), h_a(1 \times dz), \dots]$ 、 $h_b = [h_b(0), h_b(1 \times dz), \dots]$ の各ベクトルを、要素をずらしながら並べてできる行列である。反復法等の公知の技術により、この関係式の最適解として反射強度 r を得ることができる。

【 0 0 6 6 】

このように、光源ユニット 10 から射出される各光束 L_a 、 L_b の波長帯域の違いを考慮した関係式から反射強度 $r(z)$ を算出することにより、より精度良く反射強度 $r(z)$ を算出することができ、分解能の高い断層画像を生成することができる。

50

【 0 0 6 7 】

なお、光 L a、光 L b の波長帯域が離散している場合等にも、上述の断層画像処理手段 5 5 を用いて断層画像を生成することができる。

【 0 0 6 8 】

次に、本発明の第 2 の実施形態にかかる光断層画像化装置 2 0 0 について図 9 を参照して説明する。図 9 は光断層画像化装置 2 0 0 の概略構成図である。光断層画像化装置 2 0 0 は、マイケルソン型干渉計を用いた S S - O C T 装置である。図 9 の光断層画像化装置 2 0 0 において、前述の実施形態の光断層画像化装置と同様の構成については同じ符号を付して重複説明を省略する。

【 0 0 6 9 】

光断層画像化装置 2 0 0 において、光源 1 0 a から射出して光ファイバ F B 1 a により導波された光 L a と、光源 1 0 b から射出して光ファイバ F B 1 b により導波された光 L b とは、合波手段 2 0 1 に入射し、合波される。合波後の光 L a、L b は、光ファイバ F B 2 1 により導波されてサーキュレータ 2 0 2 のポート a に入射し、ポート b から射出され、光ファイバ F B 2 2 を伝播し、合分波手段 2 0 3 に入射する。

【 0 0 7 0 】

合分波手段 2 0 3 は、例えば、分岐比 9 0 : 1 0 の 2 × 2 の光カプラから構成されている。なお、合分波手段 2 0 3 は、合波手段としても機能するものである。合分波手段 2 0 3 は、光 L a、L b を測定光 : 参照光 = 9 0 : 1 0 の割合となるように測定光 L 1 a、L 1 b と参照光 L 2 a、L 2 b とに分割し、測定光 L 1 a、L 1 b を光ファイバ F B 2 3 側へ射出し、参照光 L 2 a、L 2 b を光ファイバ F B 2 4 側へ射出する。

【 0 0 7 1 】

測定光 L 1 a、L 1 b は、光ロータリコネクタ 2 1 を介してプローブ 2 0 に入射し、プローブ 2 0 により導波されて測定対象 S に照射される。このときの反射光 L 3 a、L 3 b がプローブ 2 0 に入射し、プローブ 2 0 および光ファイバ F B 2 3 を伝播して、合分波手段 2 0 3 に入射する。

【 0 0 7 2 】

一方、参照光 L 2 a、L 2 b は光ファイバ F B 2 4 の端部に接続された反射型の光路長調整手段 2 0 4 により光路長の変更を受けた後、再び光ファイバ F B 2 4 により導波されて合分波手段 2 0 3 に入射する。

【 0 0 7 3 】

合分波手段 2 0 3 において、反射光 L 3 a、L 3 b と参照光 L 2 a、L 2 b が合波される。そして、反射光 L 3 a と参照光 L 2 a の合波により干渉光 L 4 a が発生し、反射光 L 3 b と参照光 L 2 b との合波により干渉光 L 4 b が発生する。このとき、光 L a、L b は異なる光源から射出されているため、反射光 L 3 a と参照光 L 2 b との合波、反射光 L 3 b と参照光 L 2 a との合波により干渉光が発生することはない。

【 0 0 7 4 】

干渉光 L 4 a、L 4 b は光ファイバ F B 2 2 を伝播し、サーキュレータ 2 0 2 のポート b へ入射し、ポート c から射出される。されに、光ファイバ F B 2 5 を伝播し、波長分離手段 3 0 へ入射する。

【 0 0 7 5 】

以降の波長分離手段 3 0、干渉光検出手段 4 0 a、4 0 b、4 0 c および断層画像処理手段 5 0 における構成および動作は、第 1 の実施形態のものと同様であるため、重複説明を省略する。

【 0 0 7 6 】

上記第 1 および第 2 の実施形態において、0 . 6 μ m ~ 0 . 9 μ m の波長帯域の光が入射する干渉光検出手段 4 0 a の受光素子には受光可能波長域が 3 2 0 ~ 1 1 0 0 n m の S i フォトダイオードを使用することができる。また、0 . 9 μ m ~ 1 . 2 μ m の波長帯域の光が入射する干渉光検出手段 4 0 b および 1 . 2 μ m ~ 1 . 5 μ m の波長帯域の光が入射する干渉光検出手段 4 0 c の受光素子には受光可能波長域 9 0 0 n m ~ 1 7 0 0 n m の

10

20

30

40

50

InGaAs フォトダイオードを使用することができる。

【0077】

従来は、1個のディテクタで光源ユニットから射出される光の全波長域をカバーしなくてはならない装置構成であり、上記のような波長帯域 a および波長帯域 b の光に対して使用可能なフォトダイオードは存在しなかったため、上記のような a および b の波長帯域の組合せで測定可能な装置は構成できなかった。しかし、本発明の光断層画像化装置によれば、光ごとに検出できるよう複数の干渉光検出手段を設けているため、上記のような a および b の波長帯域の組合せで測定することが可能になる。光源に用いられる半導体レーザの発光過程と、光検出器に用いられるフォトダイオードの受光過程は同じ原理に基づくことから、ある媒質からなる半導体レーザの発光帯域の光は、同じ媒質からなるフォトダイオードで検出可能である。従って、両者を対に使うことで、発光可能な全ての波長帯域をカバーして測定することができる。

10

【0078】

なお、本発明の光断層画像化装置は、上記波長帯域に限らず、測定対象 S の組成により使用する波長帯域を適宜変更することができる。たとえば測定対象 S との相互作用が少ない波長帯域（例えば水の分散の影響の少ない 1000 nm 帯）の光と、測定対象との相互作用が大きい波長帯域（例えば 800 nm 帯）の光を合波することで、高分解能な断層画像情報を得ると共に、測定対象の吸収特性、分散特性、蛍光特性、などの分光情報を同時に測定することができる。

【0079】

20

本発明の光断層画像化装置を内視鏡に適用した場合、合波光源の光として、内視鏡に装備されている CCD の感度内の波長帯域、例えば中心波長 850 nm の光を用いれば、エーミング光として兼用することも可能であり、エーミング光源を別途設ける必要がなくなる。

【0080】

従来、OCT 計測におけるフーリエ変換手法では、光源スペクトルが連続的であり広帯域である必要があったため、離散的な光 L a、L b を射出する光源ユニット 10 は断層画像を取得する光源としては従来の OCT 用光源としては適さない、と考えられてきた。

【0081】

しかし、本発明の第 1 の実施形態において説明したように、広帯域な波長帯域ではなく異なる波長帯域を有する複数の光 L a、L b を射出する光源ユニット 10 を用いた場合であっても高分解能な断層画像を得ることができることがわかった。このため、上述のような光源スペクトルが連続的であり広帯域である光を射出する、限定された光源ユニットを用いる必要がなくなる。さらに、断層画像処理手段 55 においては波長が異なる 2 つの干渉光の反射強度から断層画像を生成するため、不連続なスペクトルの光源を用いた場合であってもサイドローブのない断層画像を取得することができ、高分解能の画像を得ることができる。

30

【0082】

また、異なる波長帯域を有する複数の光を用いて高分解能な断層画像を得ることができ、多数の光を用いた高分解能のタイプと、少数の光を用いた安価な低分解能タイプとの切替が可能になり、要求に応じた測定が可能になる。

40

【0083】

次に、本発明の第 3 の実施形態にかかる光断層画像化装置 300 について図 10 を参照して説明する。図 10 は光断層画像化装置 300 の概略構成図である。光断層画像化装置 300 は、マッハツェンダ型干渉計を用いた SS-OCT 装置であり、3つの光を用いて光断層画像を取得するものである。図 10 の光断層画像化装置 300 において、前述の実施形態の光断層画像化装置と同様の構成については同じ符号を付して重複説明を省略する。

【0084】

光断層画像化装置 300 の光源ユニット 301 は、図 11 に示すように、レーザ光 L a（掃引波長帯域 a : 1.0 μm ~ 1.5 μm）を射出する光源 10 a と、レーザ光 L b（掃

50

引波長帯域 $b : 0.6 \mu\text{m} \sim 1.1 \mu\text{m}$) を射出する光源 10b と、レーザ光 Lc (掃引波長帯域 $b : 1.4 \mu\text{m} \sim 1.9 \mu\text{m}$) を射出する光源 10c とから構成されている。

【0085】

また、波長分割手段 302 は、波長が $0.9 \mu\text{m}$ 以下の光を反射し、波長が $0.9 \mu\text{m}$ より長い光は透過するダイクロイックミラー 31 と、波長が $0.9 \mu\text{m}$ 以上かつ $1.2 \mu\text{m}$ 以下の光を反射し、他の波長の光は透過するダイクロイックミラー 32 と、波長が $1.2 \mu\text{m}$ 以上かつ $1.5 \mu\text{m}$ 以下の光を反射し、他の波長の光は透過するダイクロイックミラー 305 と、レンズ 33 ~ 36 および 306 とを備えている。図 12 に各ダイクロイックミラーの波長反射特性を示す。

【0086】

光 La、光 Lb および光 Lc は、それぞれ光ファイバ FB1a、光ファイバ FB1b および光ファイバ FB1c 内を伝播し、合波手段 303 および 304 により合波され、分波手段 3 において、光 La、Lb および Lc はそれぞれ測定光 L1a と参照光 L2a、測定光 L1b と参照光 L2b、および測定光 L1c と参照光 L2c に分割される。その後、図 1 に示す光断層画像化装置 100 と同様に、測定光 L1a、L1b および測定光 L1c は、光ファイバ FB32 を伝播して、サーキュレータ 4 のポート a へ入射し、ポート b から射出され、光ファイバ FB34 を伝播して光ロータリコネクタ 21 を介してプローブ 20 に入射し、プローブ 20 から測定対象 S に照射される。そして、測定対象 S の各深さ位置 z において反射した反射光 L3a、L3b および L3c がプローブ 20 に入射し、測定光と逆の経路を辿ってサーキュレータ 4 のポート b に入射し、ポート c から射出され、光ファイバ FB35 を伝播して、合波手段 5 へ入射する。

【0087】

合波手段 5 では、反射光 L3a、L3b および L3c と参照光 L2a、L2b および L2c とをそれぞれ合波する。合波手段 5 により反射光 L3a と参照光 L2a とが合波されたときに生ずる干渉光 L4a、反射光 L3b と参照光 L2b とが合波されたときに生ずる干渉光 L4b は、反射光 L3c と参照光 L2c とが合波されたときに生ずる干渉光 L4c は波長分割手段 302 へ入射する。干渉光 L4a、L4b および L4c の内、波長が $0.9 \mu\text{m}$ 以下の光は光ファイバ FB37 へ入射し、波長が $0.9 \mu\text{m}$ より長く $1.2 \mu\text{m}$ 以下の光は光ファイバ FB38 へ入射し、波長が $1.2 \mu\text{m}$ より長く $1.5 \mu\text{m}$ 以下の光は光ファイバ FB39 へ入射し、波長が $1.5 \mu\text{m}$ より長い光は光ファイバ FB40 へ入射する。

【0088】

各波長帯域の干渉光は、それぞれ光ファイバカプラ 41a、41b、41c および 41d により二分され、干渉光検出手段 40a、40b、40c および 40d へ入射する。干渉光検出手段 40a、40b、40c および 40d では二分された干渉光をそれぞれ 2 つの光検出素子を用いてバランス検波するとともに光電変換し、断層画像処理手段 307 へ出力する。なお、図 13 (1)、(2)、(3) および (4) は、干渉光検出手段 40a、40b、40c および 40c から出力された干渉信号の強度変化を時間軸と対応させて示すものである。理解を助けるために光ごとに分解して示している。

【0089】

断層画像処理手段 307 は、例えばパーソナルコンピュータ等のコンピュータシステムからなり、予め不図示の記憶部へ、光 La、Lb および光 Lc の周波数対時間特性を記憶している。断層画像処理手段 307 は、干渉光検出手段 40a、40b、40c および 40d の検出結果を波長掃引光源の発振周波数と対応づけた後、すべて等周波数間隔の干渉信号となる様に信号の接続処理を実施する事により、ひとつの広帯域干渉信号 IS0 を形成する。この干渉信号 IS0 を、例えばフーリエ変換を始めとする周波数解析を行うことにより測定対象 S の各深さ位置における光反射強度を求める。

【0090】

また、光断層画像化装置 300 も、図 1 に示す第 1 の実施形態である光断層画像化装置 100 と同様に、プローブ 20 の光学ロータリコネクタ 21 から先のファイバ部を回転させ、サンプル上において円周状に光を走査させながら、測定対象 S の円周上の各部位にお

10

20

30

40

50

いて、各深さ位置における光反射強度を取得する。断層画像処理手段307は、これらの各部位の各深さ位置における光反射強度を統合することにより、2次元の光断層画像を生成し、断層画像処理手段307に接続されているCRTや液晶表示装置等からなる表示装置60により表示する。

【0091】

また、図10に示す光断層画像化装置300では、3つの光を用いて光断層画像化装置を用いたが、より多数の光を用いて光断層画像化装置を取得してもよい。なお、n個の光を用いる場合には、干渉光検出手段をn+1個用いればよい。

【0092】

次に、本発明の第4の実施形態にかかる光断層画像化装置400について図14を参照して説明する。図14は光断層画像化装置400の概略構成図である。光断層画像化装置400は、マッハツェンダ型干渉計を用いたSS-OCT装置であり、光Laおよび光Lbの周波数対時間特性を検出し、断層画像処理手段に出力する周波数対時間特性検出手段401aおよび401bを備え、該周波数対時間特性検出手段401aおよび401bにより検出された光Laおよび光Lbの周波数対時間特性を用いて断層画像を生成するものである。図12の光断層画像化装置400において、前述の実施形態の光断層画像化装置と同様の構成については同じ符号を付して重複説明を省略する。

10

【0093】

光源10aから射出された光Laの一部は、分波手段402aにより、光ファイバFB41aへ分波され、周波数対時間特性検出手段401aへ入射する。また光源10bから射出された光Lbの一部は、分波手段402bにより、光ファイバFB41bへ分波され、周波数対時間特性検出手段401bへ入射する。周波数対時間特性検出手段401aおよび401bは、例えば、ファブリーペロー干渉計から構成されるものであり、光Laおよび光Lbの周波数対時間特性をリアルタイムに検出するものである。

20

【0094】

断層画像処理手段403、干渉光検出手段40a、40bおよび40cの検出結果と、周波数対時間特性検出手段401aおよび401bにより検出された光Laおよび光Lbの周波数対時間特性と対応づけて、すべて等周波数間隔の干渉信号となる様に信号の接続処理を実施する事により、ひとつの広帯域干渉信号IS0を形成する。この干渉信号IS0を、例えばフーリエ変換を始めとする周波数解析を行うことにより測定対象Sの各深さ位置における光反射強度を求める。

30

【0095】

このように、リアルタイムに検出した光Laおよび光Lbの周波数対時間特性を用いて、光断層画像を生成するので、予め光Laおよび光Lbの周波数対時間特性を断層画像処理手段403へ記憶させておく必要がない。また、光Laおよび光Lbの周波数対時間特性と、予め記憶させている周波数対時間特性に一致させる必要がないため、このため、光Laおよび光Lbの波長帯域、掃引速度あるいは掃引タイミングなどを、測定対象Sに応じて、適宜変更することができ、装置の利便性が向上する。

【0096】

なお、第1、第3および第4の実施形態では、マッハツェンダ型干渉計を用いたSS-OCT装置を用い、第2の実施形態ではマイケルソン型干渉計を用いたSS-OCT装置を用いて説明を行なったが、各実施の形態は、SS-OCT装置であれば、いかなるタイプの干渉計を用いてもよい。例えばフィゾー型干渉計を用いたものであってもよい。

40

【0097】

上記各実施形態では、光源ユニットとして複数個のファイバリング型波長掃引光源を用いた例を挙げたが、その他の構成の波長掃引光源を用いてもよく、例えば波長選択手段として回折格子、ポリゴン、バンドパスフィルタ等を用い、利得媒質として希土類ドープファイバ等を用いた波長走査光源も適用可能である。

【0098】

または、特許文献3、特許文献4に記載された光源を一組とし、複数組の光源を合波す

50

る構成を採用してもよい。例えば、図15に示すように、各光の光源を、短波長側の光を射出する波長掃引レーザと、長波長側の光を射出する波長掃引レーザとの組み合わせにより構成してもよい。すなわち、波長帯域 $1.0\mu\text{m} \sim 1.3\mu\text{m}$ 内で波長を掃引する波長掃引レーザから射出された光La1と波長帯域 $1.2\mu\text{m} \sim 1.5\mu\text{m}$ 内で波長を掃引する波長掃引レーザから射出された光La2とを、波長が重なる波長帯域において、同期させて発振させながら合波することにより光Laを構成し、波長帯域 $0.6\mu\text{m} \sim 0.9\mu\text{m}$ 内で波長を掃引する波長掃引レーザから射出された光Lb1と波長帯域 $0.8\mu\text{m} \sim 1.1\mu\text{m}$ 内で波長を掃引する波長掃引レーザから射出された光Lb2とを波長が重なる波長帯域において、同期させて発振させながら合波することにより光Lbを構成してもよい。なお、波長が重なる波長帯域において同期させて発振させる場合であれば、3つ以上の波長掃引光源から射出された光を合波して、光Laまたは光Lbを構成することもできる。

10

【0099】

さらに、各実施の形態においては、1つの利得媒質から1つの光が射出される例について説明したが、1つの利得媒質から波長が異なる複数の光が射出される多色光源を用いてもよい。この場合は、例えば、光源ユニット10を多色光源に置換すればよい。

【0100】

ひとつの光の掃引波長帯域は、例示した波長帯域に限る物ではないが、OCT計測が可能な所定の波長帯域以上である必要がある。所定の波長帯域として明確な境界値はないが、おおよそ分解能1mmオーダーより小さいシステムを想定しており、光の周波数帯域でおおよそ数10GHz以上のオーダーである。

20

【0101】

また、上記実施形態では、光ファイバにより光を導波し、光カプラやWDMカプラにより合分波する例を示しているが、ミラー、プリズム、ダイクロイックミラー、ダイクロイックプリズム等により空間的に合分波するバルク光学系で構成してもよい。光ファイバロープの代わりに、空間伝搬した光をガルバノミラーで走査する構成でも良い。

【0102】

また、第1の実施形態と同様に、第2～第4の実施形態においても、光源ユニットから射出される各光の波長帯域は離散しているものであってもよい。

【0103】

また、上記実施形態では、測定対象から反射、もしくは後方散乱された光を測定する場合を例にとり説明したが、測定対象がガラスブロックや透明フィルムなどの透明媒体の場合、それらの面内屈折率分布、厚み分布、複屈折などを導出するために、反射光の代わりに透過光を測定することがある。そのような場合は、反射光の代わりに透過光を合波手段に導波して、この透過光と参照光を合波するようにすればよく、上記実施形態におけるその他の構成や方法はそのまま適用可能である。

30

【図面の簡単な説明】

【0104】

【図1】本発明の第1の実施形態にかかる光断層画像化装置の概略構成図

【図2】光源ユニットの波長掃引の様子を示す図

【図3】ダイクロイックミラーの波長反射特性を示す図

40

【図4】図1の干渉光検出手段において検出される干渉光の波長帯域を示す図

【図5】断層画像処理手段の変形例を示す図

【図6】図1の干渉光検出手段において検出される干渉光の一例を示すグラフ

【図7】図1の干渉光検出手段において検出される干渉光を周波数解析したときの各深さ位置の反射強度を示す図

【図8】図1の断層画像処理手段において複数の反射強度から断層画像の生成に用いる反射強度を生成する様子を示す図

【図9】本発明の第2の実施形態にかかる光断層画像化装置の概略構成図

【図10】本発明の第3の実施形態にかかる光断層画像化装置の概略構成図

【図11】図10の光源ユニットの波長掃引の様子を示す図

50

【図12】図10のダイクロイックミラーの波長反射特性を示す図

【図13】図10の干渉光検出手段において検出される干渉光の波長帯域を示す図

【図14】本発明の第4の実施形態にかかる光断層画像化装置の概略構成図

【図15】光源ユニットの変形例における波長掃引の様子を示す図

【符号の説明】

【0105】

100、200、300、400 光断層画像化装置

2、5、201 合波手段

3 分波手段

4、202 光サーキュレータ

10

6、204 光路長調整手段

10 光源ユニット

10a、10b、10c 光源

20 プローブ

30、302 波長分割手段

40a、40b、40c 干渉光検出手段

50、55 断層画像処理手段

60 表示装置

401a、401b 周波数対時間特性検出手段

ISa、ISb 干渉信号

20

La、Lb 光

L1a、L1b 測定光

L2a、L2b 参照光

L3a、L3b 反射光

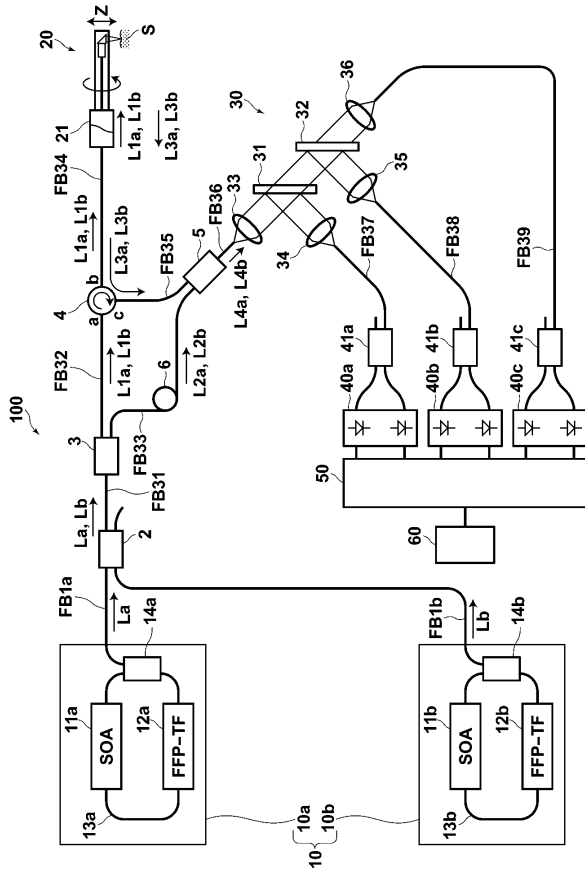
L4a、L4b 干渉光

S 測定対象

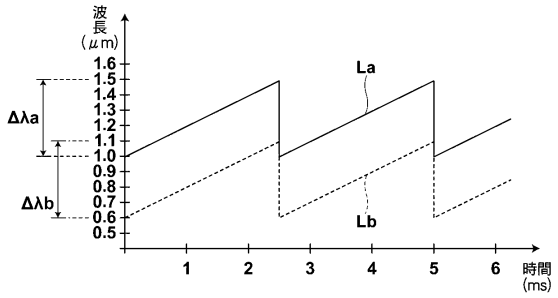
ra、rb 中間反射強度

a、 b 波長帯域

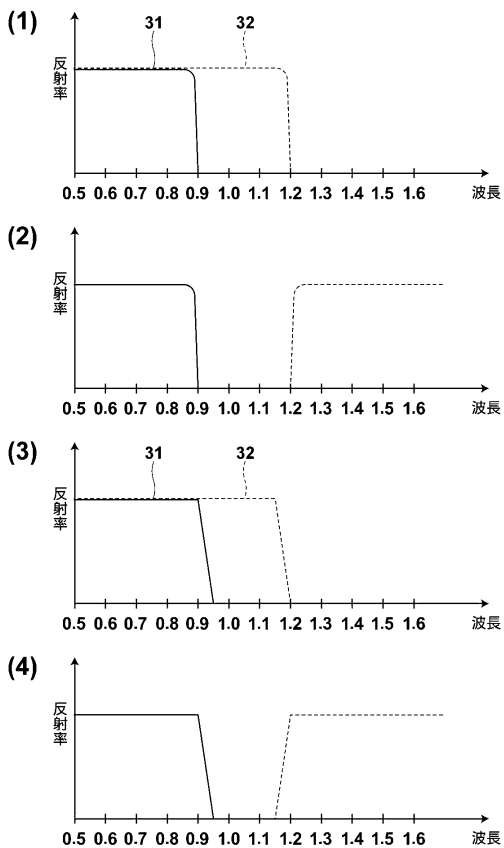
【 図 1 】



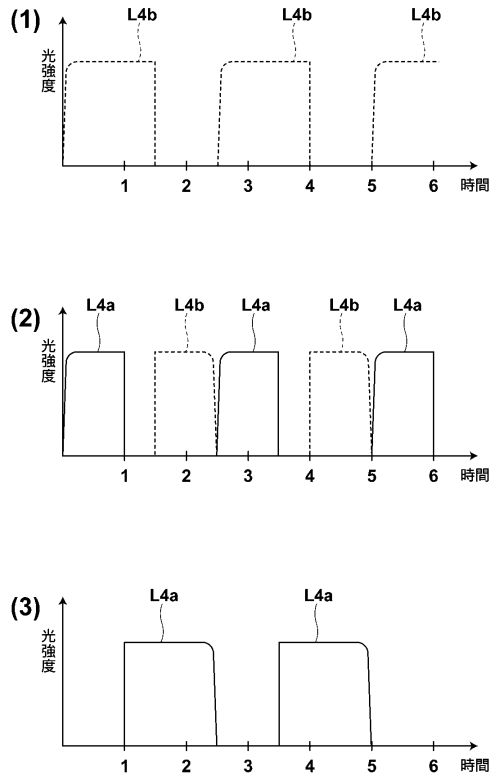
【 図 2 】



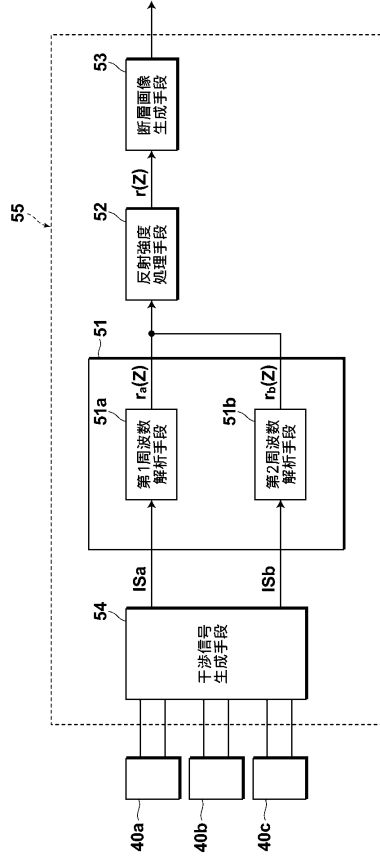
【 図 3 】



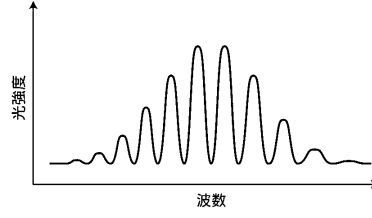
【 図 4 】



【 図 5 】



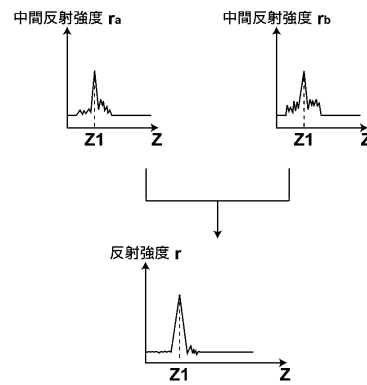
【 図 6 】



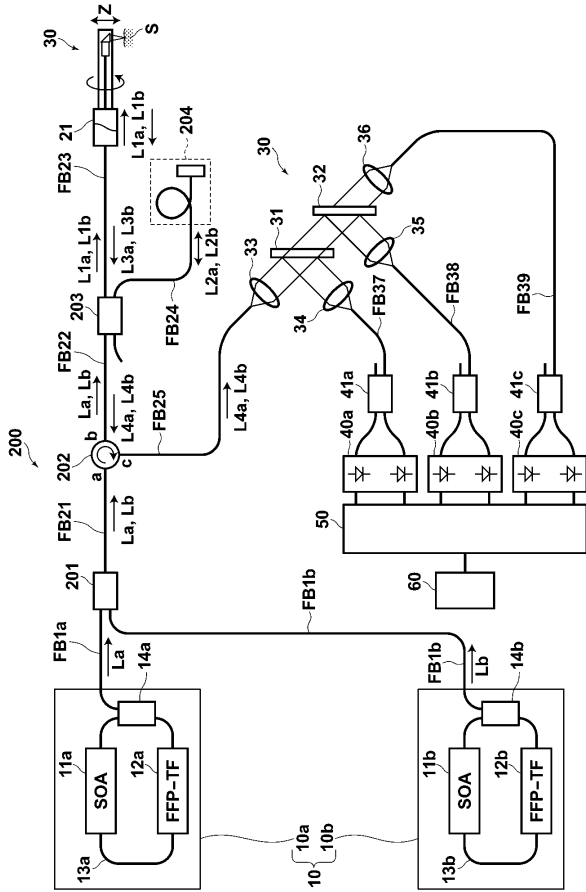
【 図 7 】

| 深さ位置 | 光源波長 - 干渉強度(交流成分)特性 | 中間反射強度(反射率) r_a (r_b) |
|-------------|---------------------|-----------------------------|
| 10 μ m | | |
| 20 μ m | | |
| 50 μ m | | |
| 100 μ m | | |

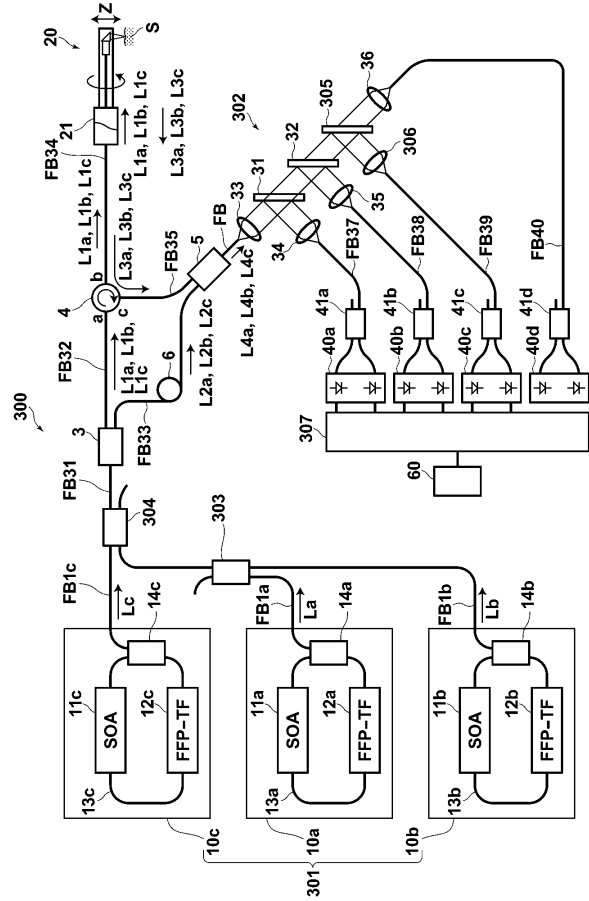
【 図 8 】



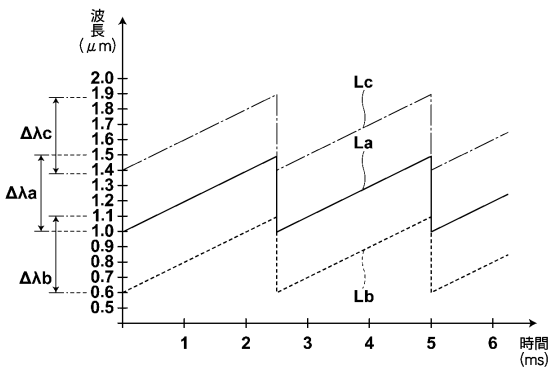
【図9】



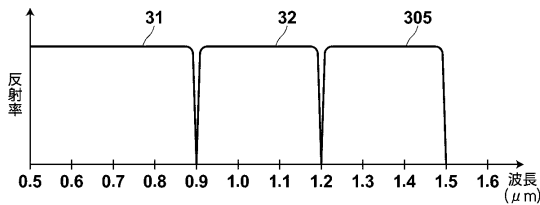
【図10】



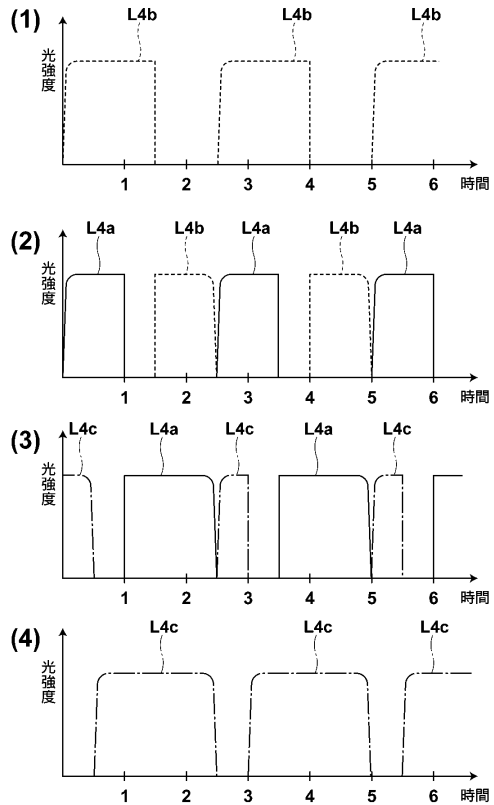
【図11】



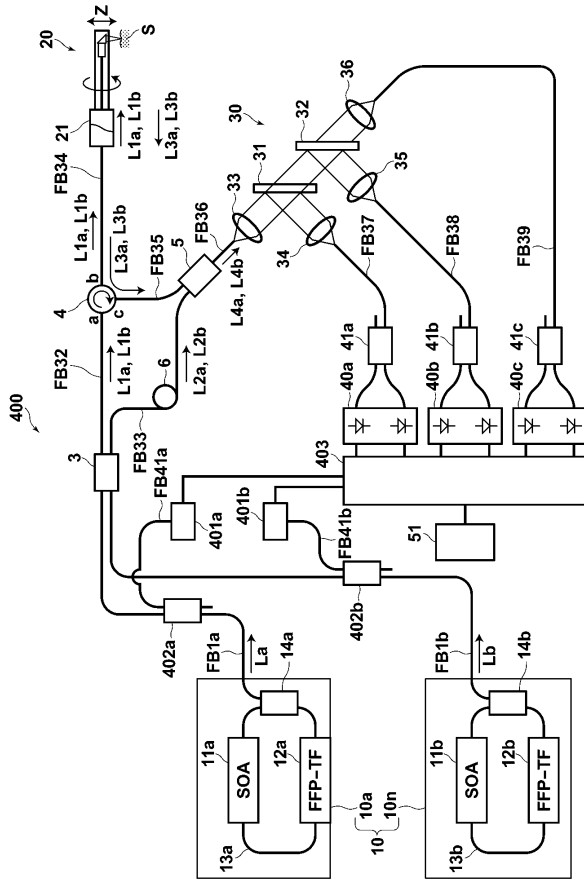
【図12】



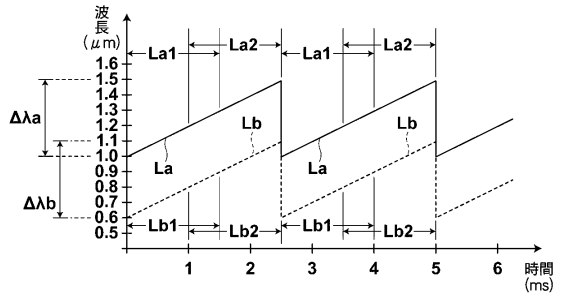
【図13】



【 図 14 】



【 図 15 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平04 - 015542 (JP, A)
特開平06 - 165784 (JP, A)
特開2000 - 074830 (JP, A)
特開2002 - 148185 (JP, A)
国際公開第2006 / 089802 (WO, A1)
特開2006 - 047264 (JP, A)
特開2007 - 163241 (JP, A)
特開平04 - 189349 (JP, A)
特開2003 - 075331 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 21 / 17
A61B 1 / 00, 10 / 00
G01B 9 / 02, 11 / 24