

(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2008-128708

(P2008-128708A)

(43) 公開日 平成20年6月5日(2008.6.5)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G 0 1 N 21/17 (2006.01)	G O 1 N 21/17 6 2 5	2 G O 5 9
A 6 1 B 10/00 (2006.01)	A 6 1 B 10/00 E	4 C O 6 1
A 6 1 B 1/00 (2006.01)	A 6 1 B 1/00 3 0 0 D	

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2006-311286 (P2006-311286)
 (22) 出願日 平成18年11月17日 (2006.11.17)

(71) 出願人 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
 (74) 代理人 100073184
 弁理士 柳田 征史
 (74) 代理人 100090468
 弁理士 佐久間 剛
 (72) 発明者 寺村 友一
 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
 (72) 発明者 赤堀 貞登
 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

最終頁に続く

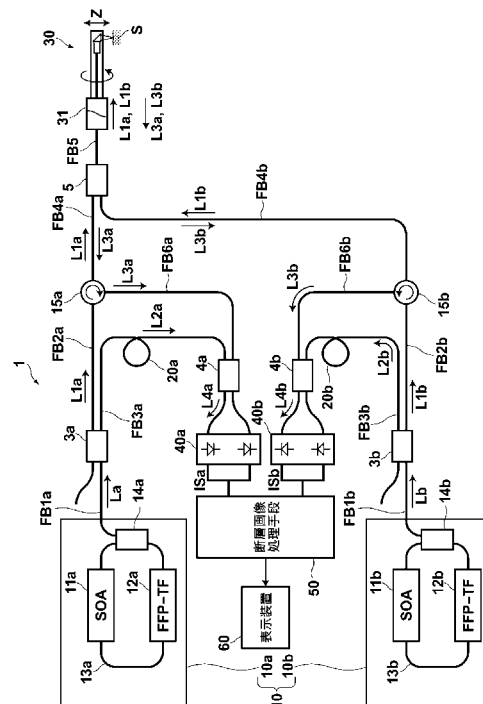
(54) 【発明の名称】 光断層画像化装置

(57) 【要約】

【課題】 光断層画像化装置において、高速に高分解能の断層画像を取得する。

【解決手段】 光源ユニット10から、互いに波長が異なるとともに、同一の時間帯にそれぞれ所定の波長帯域内で波長が変化する複数の光束La、Lbが射出される。光分割手段3は光束La、Lbをそれぞれ測定光L1a、L1bと参照光L2a、L2bとに分割する。合波手段4a、4bは測定光L1a、L1bが測定対象Sに照射されたときの反射光L3a、L3bと参照光L2a、L2bとを各光束ごとにそれぞれ合波する。合分波手段5は、波長域に応じて光束の進行方向を制御し、測定光L1a、L1bを合波し、反射光L3a、L3bを分波する。干渉光検出手段40a、40bは上記合波により生ずる干渉光L4a、L4bを干渉信号ISa、ISbとして各光束ごとに検出する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

互いに波長が異なるとともに、同一の時間帯にそれぞれ所定の波長帯域内で波長が変化する複数の光束を射出する光源ユニットと、

該光源ユニットから射出された前記各光束をそれぞれ測定光と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複数の前記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と前記参照光とを前記各光束ごとにそれぞれ合波する合波手段と、

該合波手段により前記反射光と前記参照光とが合波されたときに生ずる複数の干渉光を干渉信号として前記各光束ごとに検出する複数の干渉光検出手段と、

該干渉光検出手段により検出された複数の前記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

を備えたことを特徴とする光断層画像化装置。

【請求項 2】

前記複数の光束のうち少なくとも 2 つの光束が、該各光束の前記波長帯域が互いに離散するとともに該波長帯域内においてそれぞれ連続したスペクトルを有するものであり、

前記断層画像処理手段が、前記少なくとも 2 つの光束による前記干渉信号を用いて前記測定対象の同一部位の断層画像を取得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。

【請求項 3】

前記複数の光束のうち少なくとも 2 つの光束の前記波長帯域の一部が重畳しており、

前記光源ユニットと前記干渉光検出手段との間の光路に、重畳した前記一部の波長帯域の光を遮光する光学フィルタがさらに設けられていることを特徴とする請求項 1 記載の光断層画像化装置。

【請求項 4】

前記複数の光束のうち少なくとも 2 つの光束の前記波長帯域の一部が重畳しており、

前記断層画像処理手段が、重畳した前記一部の波長帯域の光による前記干渉信号を除去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。

【請求項 5】

前記光分割手段および前記合波手段が、前記各光束ごとにそれぞれ複数設けられていることを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれか 1 項記載の光断層画像化装置。

【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。

【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 (Time domain 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、深さ位置という) に対応した反射光強度分布を取得する方法である。

10

20

30

40

50

【0004】

一方、FD (Fourier Domain) - 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。

【0005】

FD (Fourier Domain) - 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 Emission)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、この干渉光をスペクトロメータ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。

10

【0006】

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。

20

【0007】

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。

30

【0008】

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。

40

【0009】

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。

【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

50

【特許文献4】米国特許第6665320号明細書

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

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。

【0011】

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。

10

【0012】

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】

【0013】

本発明の光断層画像化装置は、互いに波長が異なるとともに、同一の時間帯にそれぞれ所定の波長帯域内で波長が変化する複数の光束を射出する光源ユニットと、該光源ユニットから射出された前記各光束をそれぞれ測定光と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複数の前記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と前記参照光とを前記各光束ごとにそれぞれ合波する合波手段と、該合波手段により前記反射光と前記参照光とが合波されたときに生ずる複数の干渉光を干渉信号として前記各光束ごとに検出する複数の干渉光検出手段と、該干渉光検出手段により検出された複数の前記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ことを特徴とするものである。

20

【0014】

ここで、光源ユニットは、上記のような複数の光束を射出するものであればその構成を問わず、上記のような複数の光束を射出可能な1つの光源からなるものであってもよいし、あるいは、複数の波長可変光源からなるものであってもよい。

30

【0015】

また、各光束の波長帯域は、互いに離散したものであってもよいし、その一部が重畳するものであってもよく、光源ユニットから射出される複数の光束により連続したスペクトルが形成されるようなものでもよいし、あるいは不連続なスペクトルが形成されるようなものでもよい。各光束の波長帯域の幅は同一であってよいし、異なるものであってもよい。

【0016】

なお、干渉光検出手段は、各光束ごとに干渉光を検出できるように、光源ユニットから射出される前記複数の光束の数と同数設けられていることが好ましい。

40

【0017】

上記の光断層画像化装置において、前記複数の光束のうち少なくとも2つの光束が、該各光束の前記波長帯域が互いに離散するとともに該波長帯域内においてそれぞれ連続したスペクトルを有するものであり、前記断層画像処理手段が、前記少なくとも2つの光束による前記干渉信号を用いて前記測定対象の同一部位の断層画像を取得するように構成してもよい。

【0018】

また、前記複数の光束のうち少なくとも2つの光束の前記波長帯域の一部が重畳しているときには、前記光源ユニットと前記干渉光検出手段との間の光路に、重畳した前記一部

50

の波長帯域の光を遮光する光学フィルタをさらに設けることが好ましい。

【0019】

あるいは、前記複数の光束のうち少なくとも2つの光束の前記波長帯域の一部が重畳しているときには、前記断層画像処理手段が、重畳した前記一部の波長帯域の光による前記干渉信号を除去することが好ましい。

【0020】

また、上記の光断層画像化装置は、前記光分割手段および前記合波手段が、前記各光束ごとにそれぞれ複数設けられているように構成してもよい。

【0021】

なお、本明細書において、例えば「2つの光束の波長帯域が離散している」とは、これら2つの光束のピーク波長の間に、OCT計測に寄与しない低強度の波長帯域が存在することを意味し、2つの光束のピーク強度に対して概ね-10dB以下の光強度となる波長帯域が存在することを意味する。2つの光束のピーク強度が異なるときは、よりピーク強度が小さな方のピーク強度を用いて考えるものとする。そして、「2つの光束の波長帯域の一部が重畳している」とは、上記の「2つの光束の波長帯域が離散している」の逆の意味とする。

10

【0022】

同様に、「不連続なスペクトル」とは、該スペクトルを有する光束の波長帯域内において、この光束のピーク強度に対して概ね-10dB以下の光強度となる波長帯域が、FD-OCT計測において測定される周波数域サンプリング間隔に比べて十分に広い波長域に渡って、存在することを意味する。そして、「連続したスペクトル」とは、上記の「不連続なスペクトル」の逆の意味とする。なお、例えば、半導体レーザの周波数を階段状に変調する様な光束や、例えば周波数コム技術を用いた線スペクトルが密に並んで広帯域発光している様な光源は、それらの離散した波長間隔がFD-OCT計測において測定される周波数サンプリング間隔同等、あるいはそれより狭いため、連続したスペクトルと見なす事ができる。

20

【0023】

また、本明細書において、波長可変光源の「スペクトル」とは、特に断りのない限り、ある瞬時のものではなく、光束が射出される全時間帯における、波長に対する光強度分布を意味するものとする。

30

【発明の効果】

【0024】

本発明の光断層画像化装置によれば、互いに波長が異なるとともに、同一の時間帯にそれぞれ所定の波長帯域内で波長が変化する複数の光束を射出する光源ユニットと、これら複数の光束に基づく複数の干渉光を干渉信号として前記各光束ごとに検出する複数の干渉光検出手段とを備えているため、波長が異なる複数の光束を同時に測定対象に照射しても、このとき生じた複数の干渉光による複数の干渉信号が混ざり合うことはなく、複数の干渉信号を光束ごとに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。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、各光束の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、各光束の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。

40

【0025】

前記複数の光束のうち少なくとも2つの光束が、該各光束の前記波長帯域が互いに離散するとともに該波長帯域内においてそれぞれ連続したスペクトルを有するものであり、前

50

記断層画像処理手段が、前記少なくとも2つの光束による前記干渉信号を用いて前記測定対象の同一部位の断層画像を取得するものである場合には、連続した広帯域のスペクトルを有する光源や、連続した広帯域のスペクトルを形成可能な複数の光源の組合せを用いることなく、簡便な構成の光源ユニットから射出された複数の光束による干渉信号を用いて、連続した広帯域のスペクトルを有する光源ユニットを用いた場合と同様に良好な画質の断層画像を取得することができる。

【0026】

前記複数の光束のうち少なくとも2つの光束の前記波長帯域の一部が重畳しているときには、前記光源ユニットと前記干渉光検出手段との間の光路に、重畳した前記一部の波長帯域の光を遮光する光学フィルタをさらに設けるようにすれば、重畳した波長帯域を有する各光束に基づく複数の干渉光を確実に分離して検出することができる。

10

【0027】

前記複数の光束のうち少なくとも2つの光束の前記波長帯域の一部が重畳しているときには、前記断層画像処理手段が、重畳した前記一部の波長帯域の光による前記干渉信号を除去するようにすれば、重畳した波長帯域を有する各光束に基づく複数の干渉信号を確実に分離することができる。

【0028】

前記光分割手段および前記合波手段が、前記各光束ごとにそれぞれ複数設けられている場合には、光分割手段および合波手段を各光束の波長帯域に応じて最適化した構成にすることができるため、取得する断層画像の分解能を向上させることができる。光分割手段および合波手段それぞれに用いる部品は、広帯域の光に対応する必要はなく、各光束の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。

20

【発明を実施するための最良の形態】

【0029】

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1の概略構成図である。光断層画像化装置1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SS-OCT計測により取得するものである。

【0030】

光断層画像化装置1は、互いに波長が異なるとともに、同一の時間帯にそれぞれ所定の波長帯域内で波長が変化する複数の光束La、Lbを射出する光源ユニット10と、光源ユニット10から射出された光束La、Lbをそれぞれ測定光L1aと参照光L2a、測定光L1bと参照光L2bに分割する光分割手段3a、3bと、光分割手段3a、3bにより分割された複数の測定光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と参照光L2a、L2bとをそれぞれ合波する合波手段4a、4bと、合波手段4a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を干渉信号ISaとし、合波手段4bにより反射光L3bと参照光L2bとが合波されたときに生ずる干渉光L4bを干渉信号ISbとして各光束ごとに検出する複数の干渉光検出手段40a、40bと、干渉光検出手段40a、40bにより検出された干渉信号ISa、ISb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。

30

40

【0031】

なお、測定光L1a、参照光L2a、反射光L3a、干渉光L4aは光束Laに基づくものであり、光束Laと同じ波長帯域の光である。また、測定光L1b、参照光L2b、反射光L3b、干渉光L4bは光束Lbに基づくものであり、光束Lbと同じ波長帯域の光である。ここで、「各光束ごとに」とは、同じ波長帯域の光ごとにという意味であるとする。

【0032】

光源ユニット10は、周波数(波長)を一定の周期で掃引させながらレーザ光を射出す

50

る波長掃引光源である2つの光源10a、10bからなる。光源10aは、利得媒質である半導体光増幅器(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)11aと、FFP-TF(Fiber Fabry Perot - Tunable Filter)からなる波長選択手段12aと、半導体光増幅器11aおよび波長選択手段12a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13aとから主に構成されている。

【0033】

半導体光増幅器11a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13aに射出するとともに、他端側の光ファイバ13aから入射された光を増幅する機能を有している。半導体光増幅器11aは、例えば波長1000nm~1100nmに発光帯域を持つInGaAs/AlGaAs素子で構成されている。この半導体光増幅器11a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13aに接続された分岐比10:90の光カプラ14aにより分岐され、光ファイバFB1aにより導波されて光束Laとして外部へ射出される。

10

【0034】

波長選択手段12a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。

【0035】

光源10bもまた、光源10aと同様の構成を有し、利得媒質である半導体光増幅器11bと、FFP-TFからなる波長選択手段12b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13bとから主に構成されている。半導体光増幅器11bは、例えば波長1250nm~1350nmに発光帯域を持つInGaAsP素子で構成されている。光源10bの共振器において発振したレーザ光は、光ファイバ13bに接続された分岐比10:90の光カプラ14bにより分岐され、光ファイバFB1bにより導波されて光束Lbとして外部へ射出される。光源10bにおいても、波長選択手段12b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。

20

【0036】

一例として、光源10a、10bの波長掃引の様子を図2Aに、光源10a、10bのスペクトルを図2BにそれぞれLa、Lbを付して示す。同一の時間帯に、光源10aは、波長帯域a内において一定周期で波長掃引された光束Laを射出し、光源10bは、波長帯域b内において一定周期で波長掃引された光束Lbを射出する。光束La、Lbは各波長帯域a、b内においてそれぞれ連続したスペクトルを有するものであり、波長帯域aと波長帯域bとは互いに離散している。そのため、光源ユニット10から射出される光束La、Lbが形成するスペクトルは不連続なものとなる。

30

【0037】

なおここで、「波長帯域aと波長帯域bとは互いに離散している」とは、図2Bに示すように、光束La、Lbのピーク波長a、bの間に、ピーク強度に対して強度が概ね-10dB以下となる波長帯域が存在していることを意味する。本実施形態では、aは波長1000nm~1100nm、bは波長1250nm~1350nmであり、波長帯域1100nm~1250nmの範囲に発光しない領域が存在する。

40

【0038】

図1の光分割手段3a、3b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。光分割手段3aは、光束Laを測定光L1aと参照光L2aとに分割し、光分割手段3bは、光束Lbを測定光L1bと参照光L2bとに分割する。このとき、光分割手段3a、3bは、測定光:参照光=90:10の割合で分割する。

【0039】

プローブ30は、光学ロータリコネクタ31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30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L3

50

a、L3bを導波する。プローブ30は、図示しないモータにより、光学ロータリコネクタ31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束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30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30は、図示しない光コネクタにより光ファイバFB5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。

【0040】

光分割手段3aとプローブ30の間の光路、光分割手段3bとプローブ30の間の光路には合分波手段5が設けられている。合分波手段5は、設定されたカットオフ波長に応じて光を合分波する機能を有し、たとえばWDM(Wavelength Division Multiplexing:波長分割多重)カプラにより構成される。WDMカプラは概ね-10dB以下のアイソレーションがあれば、完全に分離していると言える。合分波手段5は、光分割手段3a、3b側からそれぞれ入射された測定光L1a、L1bを合波してプローブ30側に射出し、プローブ30側から入射された反射光L3a、L3bの光を分波してそれぞれ合波手段4a、4b側へ射出する。

【0041】

この合分波手段5のカットオフ波長は、光束Laの波長帯域aと光束Lbの波長帯域bの間の波長帯域、すなわち図2Bで示す波長帯域内の波長に設定することが望ましく、この場合には、反射光L3a、L3bを確実に分離させることができるので、本実施形態の合分波手段5のカットオフ波長はこのように設定されている。なお、合分波手段5としてWDMカプラを用いることにより、合波本数が増加しても光利用効率の低下を最小限に留めることができる。

【0042】

反射光L3aは合波手段4aにおいて参照光L2aと合波され、反射光L3bは合波手段4bにおいて参照光L2bと合波される。なお、光分割手段3aから合波手段4aまでの参照光L2aの光路には透過型の光路長調整手段20aが設けられ、光分割手段3bから合波手段4bまでの参照光L2bの光路には透過型の光路長調整手段20bが設けられている。光路長調整手段20a、20b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。

【0043】

合波手段4a、4bは、例えば、分岐比50:50の2x2の光ファイバカプラから構成されている。合波手段4aは反射光L3aと参照光L2aを合波して、このとき生じた干渉光L4aを干渉光検出手段40aへ射出する。合波手段4bは反射光L3bと参照光L2bを合波して、このとき生じた干渉光L4bを干渉光検出手段40bへ射出する。なお、ここでは、合波手段4a、4bはそれぞれ干渉光L4a、L4bを二分して干渉光検出手段40a、40bへ射出し、干渉光検出手段40a、40bでは二分された干渉光L4a、L4b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。

【0044】

干渉光検出手段40a、40bはそれぞれ、干渉光L4a、L4bをそれぞれ光電変換し、各光束La、Lbの波長帯域a、bごとの複数の干渉信号ISA、ISBとして検出する機能を有している。ここでは、光源10a、10bの波長掃引のトリガと同期をとることで、対応する光束を認識するようにしてもよい。このとき、干渉光検出手段40a、40bにおいて、光源10a、10bの各スペクトル毎の干渉信号ISA、ISBが観測されることになる。干渉信号ISA、ISBは、断層画像処理手段50に出力される。

【0045】

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が

10

20

30

40

50

らなる。断層画像処理手段50は、干渉光検出手段40により光電変換された干渉信号ISa、ISb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断層情報(反射率) $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ を検出し、この複数の中間断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ 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50は、図3に示すように、複数の干渉信号ISa、ISb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断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ を検出する周波数解析手段51と、周波数解析手段51により検出された複数の中間断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ から断層画像の生成に用いる断層情報 $r(z)$ を生成する断層情報処理手段52と、断層情報処理手段52により生成された断層情報 $r(z)$ を用いて断層画像を生成する断層画像生成手段53とを有している。

10

【0046】

周波数解析手段51は、干渉信号ISaを周波数解析することにより光束Laに基づく中間断層情報 $r_a(z)$ を検出する第1周波数解析手段51aと、干渉信号ISbを周波数解析することにより光束Lbに基づく中間断層情報 $r_b(z)$ 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ISaに基づいて中間断層情報(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。

20

【0047】

測定光L1a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L3aと参照光L2a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、

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

で表され、例えば図4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L2aと反射光L3a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ISaの光強度 $S(l)$ を決定することができ、図5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断層情報 $r_a(z)$ とを取得する。同様に、第2周波数解析手段51bは干渉信号ISbについても測定開始位置からの距離情報と中間断層情報 $r_b(z)$ 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断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ 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断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ を取得するようにしてもよい。

30

【0048】

図3の断層情報処理手段52は、上述のように検出された各深さ位置 z からの複数の中間断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ から断層画像の生成に用いる断層情報 $r(z)$ を検出するものである。具体的には、図6に示すように、断層情報処理手段52は、各深さ位置 z での中間断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ の平均値 $r(z) = (r_a(z) + r_b(z)) / 2$ を算出する。

40

【0049】

断層画像生成手段53は、断層情報処理手段52により検出された断層情報 $r(z)$ 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L1a、L1b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断層情報 $r(z)$ が取得されてい

50

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断層情報 $r(z)$ を用いて2次元もしくは3次元の断層画像を生成する。

【0050】

このように、断層画像処理手段50の断層情報処理手段52において、複数の中間断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ 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。

【0051】

測定対象Sの各深さ位置zの断層情報の絶対値は、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断層情報 $r_a(z_1)$ 、 $r_b(z_1)$ の定性的な特性、例えば断層情報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

【0052】

そこで、複数の中間断層情報 $r_a(z_1)$ 、 $r_b(z_1)$ の平均値(= $r(z_1)$)を算出することにより、複数の中間断層情報 $r_a(z_1)$ 、 $r_b(z_1)$ 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 での断層情報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離散した光束 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。

20

【0053】

なお、周波数解析手段51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束 L_a 、 L_b の波長帯域 a 、 b の幅に依存する。このため、上述のように各光束 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、波長帯域の狭い光束 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。

【0054】

また、複数の中間断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ の平均値を算出する方法について例示したが、複数の中間断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ の積を用いて断層情報 $r(z)$ を生成するようにしてもよい。すると、複数の中間断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ のうち、最も断層情報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断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ を用いて各深さ位置における断層情報 $r(z)$ を生成し、断層画像を取得するようにしても良い。

30

【0055】

上記実施の形態においては、複数の中間断層情報 $r_a(z)$ の平均もしくは積を用いて断層情報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、断層情報 $r(z)$ 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、真の断層情報 $r(z)$ 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

40

【数1】

$$r_a(z) = r(z) \otimes h_a(z) \quad \dots (2)$$

$$r_b(z) = r(z) \otimes h_b(z) \quad \dots (3)$$

\otimes は畳み込み演算を示す

50

【0056】

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

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

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

となる。

【0057】

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断層情報 r を得ることができる。

10

【0058】

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断層情報 $r(z)$ を算出することにより、より精度良く断層情報 $r(z)$ 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。

【0059】

次に、図1から図6を参照して光断層画像化装置1の動作例について説明する。光源10aから波長帯域 a 内を一定の周期で波長掃引された光束 L_a が射出され、光ファイバFB1aにより導波されて光分割手段3aに入射する。光分割手段3aにおいて光束 L_a は測定光 L_{1a} と参照光 L_{2a} に光分割されて、測定光 L_{1a} は光ファイバFB2a側に射出され、参照光 L_{2a} は光ファイバFB3a側に射出される。測定光 L_{1a} は光ファイバFB2aにより導波されてサーキュレータ15aを経由した後、光ファイバFB4aにより導波されて合分波手段5に入射する。

20

【0060】

一方、光源10bからは、波長帯域 b 内を一定の周期で波長掃引された光束 L_b が射出され、光ファイバFB1bにより導波されて光分割手段3bに入射する。光分割手段3bにおいて光束 L_b は測定光 L_{1b} と参照光 L_{2b} に光分割されて、測定光 L_{1b} は光ファイバFB2b側に射出され、参照光 L_{2b} は光ファイバFB3b側に射出される。測定光 L_{1b} は光ファイバFB2bにより導波されてサーキュレータ15bを経由した後、光ファイバFB4bにより導波されて合分波手段5に入射する。

30

【0061】

合分波手段5において、測定光 L_{1a} と測定光 L_{1b} は合波されて、光ファイバFB5により導波されて光ロータリコネクタ31を介してプローブ30に入射し、プローブ30により導波されて測定対象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_{3a} 、 L_{3b} がプローブ30に入射し、測定光と逆の経路を辿って合分波手段5に入射する。

【0062】

合分波手段5のカットオフ波長は、上述のように図2Bの波長帯域 a 内に設定されているため、合分波手段5において反射光 L_{3a} と反射光 L_{3b} は分波されて、反射光 L_{3a} は光ファイバFB4a側に射出され、反射光 L_{3b} は光ファイバFB4b側に射出される。

40

【0063】

光ファイバFB4aにより導波された反射光 L_{3a} は、サーキュレータ15aを経由した後、光ファイバFB6aにより導波されて合波手段4aに入射する。一方、光分割手段3aにより分割された参照光 L_{2a} は、光ファイバFB3aの途中に設けられた光路長調整手段20aにより光路長を変更された後、合波手段4aに入射する。

【0064】

合波手段4aにおいて、反射光 L_{3a} と参照光 L_{2a} が合波され、この合波により生じた干渉光 L_{4a} は二分されて干渉光検出手段40aへ射出される。干渉光検出手段40a

50

では、干渉光 L 4 a がバランス検波されるとともに光電変換されて、干渉信号 I S a が生成され、断層画像処理手段 5 0 へ出力される。

【 0 0 6 5 】

同様に、光ファイバ F B 4 b により導波された反射光 L 3 b は、サーキュレータ 1 5 b を経由した後、光ファイバ F B 6 b により導波されて合波手段 4 b に入射する。一方、光分割手段 3 b により分割された参照光 L 2 b は、光ファイバ F B 3 b の途中に設けられた光路長調整手段 2 0 b により光路長を変更された後、合波手段 4 b に入射する。

【 0 0 6 6 】

合波手段 4 b において、反射光 L 3 b と参照光 L 2 b が合波され、この合波により生じた干渉光 L 4 b は二分されて干渉光検出手段 4 0 b へ射出される。干渉光検出手段 4 0 b 10 では、干渉光 L 4 b がバランス検波されるとともに光電変換されて、干渉信号 I S b が生成され、断層画像処理手段 5 0 へ出力される。

【 0 0 6 7 】

断層画像処理手段 5 0 では、干渉信号 I S a、I S b を用いて各深さ位置における複数の中間断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ が検出され、各中間断層情報 $r_a(z)$ 、 $r_b(z)$ から断層画像の生成に用いる断層情報 $r(z)$ が算出されて、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 C R T (C 20 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 により表示される。

【 0 0 6 8 】

以上説明したように、光断層画像化装置 1 によれば、互いに波長が異なり、同時に波長掃引される複数の光束 L a、L b を測定対象 S に照射して、このとき生じた波長の異なる複数の干渉光 L 4 a、L 4 b を波長帯域ごとに異なる干渉光検出手段 4 0 a、4 0 b で検出することにより、高速に高分解能の画像を取得することができる。

【 0 0 6 9 】

なお、上記の第 1 の実施形態の光断層画像化装置 1 の説明では、光束 L a、L b が離散した波長帯域を有する場合について説明したが、これは本発明において限定的な事項ではなく、以下の第 2 の実施形態で説明するように、光束 L a、L b は重畳した波長帯域を有するものであってもよい。

【 0 0 7 0 】

以下、本発明の第 2 の実施形態による光断層画像化装置 2 0 0 について、図 7、図 8 A、図 8 B を参照しながら説明する。図 7 は光断層画像化装置 2 0 0 の概略構成図である。図 7 の光断層画像化装置 2 0 0 は、図 1 の光断層画像化装置 1 と比較すると、光源ユニット 1 0 から射出される光束 L S a、L S b の波長帯域と、光学フィルタ 2 0 1 a、2 0 1 b がさらに設けられているが異なる。以下では、主に光断層画像化装置 1 との相違点について説明し、図 7 の光断層画像化装置 2 0 0 において、図 1 の光断層画像化装置 1 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 7 1 】

第 2 の実施形態において光源ユニット 1 0 から射出される光束 L S a、L S b は、互いに波長が異なるとともに、同一の時間帯にそれぞれ所定の波長帯域内で波長掃引されるものであるが、これらの波長帯域の一部は、図 8 A に示すように波長帯域 c において重畳している。このような光束 L S a、L S b を用いて図 1 と同じ構成の光断層画像化装置で測定したのでは、合分波手段 5 において各光束ごとに分波することができず、1つの干渉光検出手段に 2つの光束による干渉信号が混在してしまい、分離不可能となる。

【 0 0 7 2 】

そこで、光断層画像化装置 2 0 0 では、光源 1 0 a、1 0 b と合分波手段 5 との間の測定光の光路にそれぞれ、波長帯域 c の光を遮光するための光学フィルタ 2 0 1 a、2 0 1 b を配置している。

【 0 0 7 3 】

図 7 に示す光断層画像化装置 2 0 0 において、光束 L S a は光分割手段 3 a において測 50

定光 L S 1 a ' と参照光 L 2 a に光分割される。測定光 L S 1 a ' は光ファイバ F B 2 a により導波されてサーキュレータ 1 5 a を経由して光ファイバ F B 4 a 側に射出され、光ファイバ F B 4 a の途中に設けられた光学フィルタ 2 0 1 a に入射する。光学フィルタ 2 0 1 a において測定光 L S 1 a ' は波長帯域 c の光が遮光されて、図 8 B に示すようなスペクトルを有する測定光 L S 1 a となる。

【 0 0 7 4 】

測定光 L S 1 a が測定対象 S に照射されたときの反射光 L S 3 a もまた図 8 B に示す測定光 L S 1 a と同様のスペクトルを有する。反射光 L S 3 a は光ファイバ F B 4 a により導波される際に光学フィルタ 2 0 1 a を通過するが、すでに波長帯域 c の光を含んでいないためスペクトルの変化はない。合波手段 4 a において反射光 L S 3 a と参照光 L S 2 a は合波され、このとき生じた干渉光 L S 4 a も図 8 B に示す測定光 L S 1 a と同様のスペクトルを有する。

10

【 0 0 7 5 】

同様に、光束 L S b は光分割手段 3 b において測定光 L S 1 b ' と参照光 L 2 b に光分割される。測定光 L S 1 b ' は光ファイバ F B 2 b により導波されてサーキュレータ 1 5 b を経由して光ファイバ F B 4 b 側に射出され、光ファイバ F B 4 b の途中に設けられた光学フィルタ 2 0 1 b に入射する。光学フィルタ 2 0 1 b において測定光 L S 1 b ' は波長帯域 c の光が遮光されて、図 8 B に示すようなスペクトルを有する測定光 L S 1 b となる。

20

【 0 0 7 6 】

測定光 L S 1 b が測定対象 S に照射されたときの反射光 L S 3 b もまた図 8 B に示す測定光 L S 1 b と同様のスペクトルを有する。反射光 L S 3 b は光ファイバ F B 4 b により導波される際に光学フィルタ 2 0 1 b を通過するが、すでに波長帯域 c の光を含んでいないためスペクトルの変化はない。合波手段 4 b において反射光 L S 3 b と参照光 L S 2 b は合波され、このとき生じた干渉光 L S 4 b も図 8 B に示す測定光 L S 1 b と同様のスペクトルを有する。

【 0 0 7 7 】

光断層画像化装置 2 0 0 における上記以外の動作については、光断層画像化装置 1 における動作と同様である。

【 0 0 7 8 】

つまり、光学フィルタ 2 0 1 a 、 2 0 1 b を設けることにより、光源ユニット 1 0 から射出される複数の光束の波長帯域が重畳していても、図 8 B に示すような互いに離散した波長帯域を有する光束 L S a 、 L S b を用いて測定を行ったのと同様となる。したがって、第 1 の実施形態の場合と同様に、光束 L S a 、 L S b ごとの干渉光 L S 4 a 、 L S 4 b を分離して、それぞれ干渉光検出手段 4 0 a 、 4 0 b で検出することができるので、異なる光束からの干渉信号が混在して分離不能になることはない。

30

【 0 0 7 9 】

なお、干渉信号の混在の可能性は、各光束の波長帯域と合分波手段 5 のカットオフ波長の関係にもよる。例えば、光断層画像化装置 1 における光束 L a の波長帯域の一部が、合分波手段 5 のカットオフ波長近傍にある場合、干渉光 L 4 a の一部が干渉光検出手段 4 0 b に入射してしまい、干渉光検出手段 4 0 b の信号に対しノイズとなることがある。この場合も、上記例と同様に、遮光用の光学フィルタを設けることにより、信号の混在を回避できる。

40

【 0 0 8 0 】

なお、図 7 に示す例では、合分波手段 5 の上流側に光学フィルタ 2 0 1 a 、 2 0 1 b を配置しているが、光源ユニット 1 0 と干渉光検出手段 4 0 a 、 4 0 b の間の光路であれば、他の場所でもよい。

【 0 0 8 1 】

また、図 7 に示す例では、2つの光学フィルタを設けているが、合分波手段 5 のカットオフ波長によってはいずれか一方の光学フィルタのみ設けるようにしてもよい。各々の干

50

渉光検出手段において、1つの光束に基づく干渉光のみが検出されるように光学フィルタが設けられていればよい。

【0082】

上記の第2の実施形態では、重畳した波長帯域 c の光を光学的に除去する光学フィルタを設けたが、予め波長帯域 c がわかっている場合には、光学フィルタを用いずに、後述する第3の実施形態の変形例のように、断層画像処理手段50において信号処理するようにしてもよい。

【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9を参照して説明する。図9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装置であるが、図1の光断層画像化装置1と比較すると、干渉計よりも合分波手段5が上流側に配置されている点が基本的に異なる。以下では、主にこの相違点について説明し、図9の光断層画像化装置300において、図1の光断層画像化装置1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

【0084】

光断層画像化装置300において、光源10aから射出して光ファイバFB1aにより導波された光束Laと、光源10bから射出して光ファイバFB1bにより導波された光束Lbとは、合分波手段5により合波されて、光ファイバFB31により導波されて光分割手段3に入射する。

20

【0085】

光分割手段3は、例えば、分岐比90:10の2x2の光カブラから構成されている。光分割手段3において光束La、Lbは測定光L1a、L1bと参照光L2a、L2bに光分割される。測定光L1a、L1bは光ファイバFB32により導波されてサーキュレータ301を経由した後、光ファイバFB34およびプローブ30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L3a、L3bはプローブ30および光ファイバFB34により導波されてサーキュレータ301を経由した後、光ファイバFB35により導波されて反射光分離手段306に入射する。

【0086】

反射光分離手段306は、波長選択性を有し、たとえばWDMカブラから構成される。反射光分離手段306は、光束Laと同じ波長帯域の反射光L3aを光ファイバFB36a側に射出し、光束Lbと同じ波長帯域の反射光L3bを光ファイバFB36b側に射出する。光ファイバFB36aには合波手段4aが結合されており、光ファイバFB36bには合波手段4bが結合されている。

30

【0087】

一方、光分割手段3により分割された参照光L2a、L2bは、光ファイバFB33により導波されて、光ファイバ33の途中に設けられた光路長調整手段20により光路長を変更された後、参照光分離手段307に入射する。

【0088】

参照光分離手段307は、波長選択性を有し、たとえばWDMカブラから構成される。参照光分離手段307は、光束Laと同じ波長帯域の参照光L2aを光ファイバFB37a側に射出し、光束Lbと同じ波長帯域の参照光L2bを光ファイバFB37b側に射出する。光ファイバFB37aには合波手段4aが結合されており、光ファイバFB37bには合波手段4bが結合されている。

40

【0089】

合波手段4aにおいて、反射光L3aと参照光L2aが合波され、これらの干渉光L4aは二分されて干渉光検出手段40aへ射出される。合波手段4bにおいて、反射光L3bと参照光L2bが合波され、これらの干渉光L4bは二分されて干渉光検出手段40bへ射出される。

【0090】

50

以降の干渉光検出手段40a、40b、断層画像処理手段50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。

【0091】

以下、第3の実施形態の変形例として、光源ユニット10から射出される光束LSa、LSbの波長帯域の一部が図8Aに示すように重畳し、この重畳する波長帯域cの光に基づく干渉信号を断層画像処理手段50において除去する場合について図10を参照しながら説明する。図10(1)の左側には、横軸に時間、縦軸に波長をとり、重畳した波長帯域を有する2つの光束LSa、LSbの波長掃引の様子を示している。また、図10(1)の右側には、図10(1)の左側の波長軸と対応させて、縦軸に波長、横軸に反射光分離手段306および参照光分離手段307の分岐率をとり、これらの分岐特性を示している。本変形例においては、反射光分離手段306および参照光分離手段307は、重畳した波長帯域cで、分岐率が約0~100%に変化するものが選択されている。波長帯域cの最短波長を s 、最長波長を L とする。この波長帯域 $s \sim L$ の光による干渉信号が、混在する信号となるため、図10(1)に示すように、光束La、Lbの波長帯域 $s \sim L$ の光による干渉信号が同時帯に発生するように、2つの光源10a、10bの波長掃引のタイミングを設定しておく。

10

【0092】

図10(2)は、光源10a、10bから射出される光束LSa、LSbの光強度の時間変化を表す図であり、横軸は時間、縦軸は光強度である。図10(3)は干渉光検出手段40aから出力された干渉信号の強度変化であり、図10(4)は干渉光検出手段40bから出力された干渉信号の強度変化であり、ともに図10(2)の時間軸と対応させて、理解を助けるために光束ごとに分解して示している。

20

【0093】

図10(1)に示す合分波手段5の特性により、干渉光検出手段40aで検出される光の波長帯域は L 以下であるため、干渉光検出手段40aから出力される干渉信号は、光束LSaに基づく信号Iaと、光束LSbのうち波長帯域 $s \sim L$ の光に基づく信号Ibcである。同様に、干渉光検出手段40bで検出される光の波長帯域は s 以上であるため、干渉光検出手段40bから出力される干渉信号は、光束Lbに基づく信号Ibtと、光束Laのうち波長帯域 $s \sim L$ の光に基づく信号Iacである。

【0094】

30

そこで、断層画像処理手段50において、図10(3)、図10(4)の破線で囲んだ領域の信号、すなわち波長帯域 $s \sim L$ の光に基づく信号を除去する処理を行う。これにより、光源ユニット10から射出される複数の光束の波長帯域が重畳していても、図8Bに示すような互いに離散した波長帯域を有する光束LSa、LSbを用いて測定を行ったのと同様の結果が得られる。

【0095】

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11および図12を参照して説明する。図11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、フィゾー型干渉計を用いたSS-OCT装置であり、図1の光断層画像化装置1のプロープ30とは異なるプロープ430を用いている点の特徴である。以下では、主にこの特徴について説明し、図11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。

40

【0096】

プロープ430は、図12に示すように、測定対象S側の出射端部に光分割手段431が設けられており、光源ユニット10からの光束の一部を透過させて測定光とするとともに、残りの一部の光を反射して参照光とするように構成されている。図12に示す例では、光分割手段431としてハーフミラーを用いているが、ハーフミラーの代わりに、プロープ430の射出端面に入射光の一部を反射させる反射膜を施してもよい。あるいは、プロープ430の射出端面に膜を形成せず、射出端面を入射光の光軸と直交する平面として

50

、この平面を光学研磨してオプティカルフラット面を形成し、射出端面における媒質の屈折率差（たとえばガラスと空気との屈折率差）により反射した光を参照光として用いるようにしてもよい。

【0097】

光断層画像化装置400において、光源10aから射出して光ファイバFB1aにより導波された光束Laは、サーキュレータ15aを經由し、光ファイバFB4aにより導波されて合分波手段5に入射する。同様に、光源10bから射出して光ファイバFB1bにより導波された光束Lbは、サーキュレータ15bを經由し、光ファイバFB4bにより導波されて合分波手段5に入射する。

【0098】

合分波手段5において光束Laと光束Lbは合波されて、光ファイバFB5により導波されて光ロータリコネクタ31を介してプローブ430に入射する。プローブ430の射出端部の光分割手段431において、光束La、Lbの一部は透過して測定光L1a、L1bとなり、残りの一部は反射されて参照光L2a、L2bとなる。測定光L1a、L1bは測定対象Sに照射されて、このときの反射光L3a、L3bはプローブ430および光ファイバFB5により導波されて合分波手段5に入射する。また、光分割手段431で反射された参照光L2a、L2bもまたプローブ430および光ファイバFB5により導波されて合分波手段5に入射する。

【0099】

合分波手段5に入射した反射光L3a、L3bおよび参照光L2a、L2bは波長帯域に応じて分波され、反射光L3aと参照光L2aは光ファイバFB4a側に射出され、反射光L3bと参照光L2bは光ファイバFB4b側に射出される。

【0100】

その後、反射光L3aと参照光L2aはサーキュレータ15aを經由して、光ファイバFB41aにより導波されて分波手段401aに入射する。分波手段401aは例えば、分岐比50：50の2×2の光カプラから構成されている。分波手段401aに入射した光の約50%の反射光L3aおよび参照光L2aは光ファイバFB42a側に射出されてそのまま導波されて合波手段4aに入射する。分波手段401aに入射した光の残りの約50%の反射光L3aおよび参照光L2aは光ファイバFB43a側に射出されて、途中の経路に設けられた光路長調整手段20aにより光路長の変更を受けた後、合波手段4a

【0101】

合波手段4aにおいて、光ファイバFB42aにより導波された参照光L2aと光ファイバFB43aにより導波された反射光L3aとによる干渉、あるいは光ファイバFB42aにより導波された反射光L3aと光ファイバFB43aにより導波された参照光L2aとによる干渉により干渉光L4aが生じる。この干渉光L4aは二分されて干渉光検出手段40aへ射出される。

【0102】

また、光ファイバFB4b側に射出された反射光L3bと参照光L2bについても、同様であり、これらの光はサーキュレータ15bを經由して、光ファイバFB41bにより導波されて分波手段401bに入射する。分波手段401bは例えば、分岐比50：50の2×2の光カプラから構成されている。分波手段401bに入射した光の約50%の反射光L3bおよび参照光L2bは光ファイバFB42b側に射出されてそのまま導波されて合波手段4bに入射する。分波手段401bに入射した光の残りの約50%の反射光L3bおよび参照光L2bは光ファイバFB43b側に射出されて、途中の経路に設けられた光路長調整手段20bにより光路長の変更を受けた後、合波手段4bに入射する。

【0103】

合波手段4bにおいて、光ファイバFB42bにより導波された参照光L2bと光ファイバFB43bにより導波された反射光L3bとによる干渉、あるいは光ファイバFB42bにより導波された反射光L3bと光ファイバFB43bにより導波された参照光L2

10

20

30

40

50

bとよる干渉により干渉光L4bが生じる。この干渉光L4bは二分されて干渉光検出手段40bへ射出される。

【0104】

以降の干渉光検出手段40a、40b、断層画像処理手段50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。

【0105】

次に、本発明の第5の実施形態にかかる光断層画像化装置500について図13を参照して説明する。図13は光断層画像化装置500の概略構成図である。光断層画像化装置500は、フィゾー型干渉計を用いたSS-OCT装置であるが、図11の光断層画像化装置400と比較すると、干渉計よりも合分波手段5が上流側に配置されている点が基本的に異なる。以下では、主にこの相違点について説明し、図13の光断層画像化装置500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

【0106】

光断層画像化装置500において、光源10aから射出して光ファイバFB1aにより導波された光束Laと、光源10bから射出して光ファイバFB1bにより導波された光束Lbとは、合分波手段5に入射し、合波される。合波後の光束La、Lbは、光ファイバFB31により導波されてサーキュレータ501を經由し、光ファイバFB51により導波されて光ロタリコネクタ31を介してプローブ430に入射する。プローブ430の出射端部の光分割手段431において、光束La、Lbは測定光L1a、L1bと参照光L2a、L2bとに分割される。測定光L1a、L1bは測定対象Sに照射されて、このときに反射光L3a、L3bが生じる。反射光L3a、L3bおよび参照光L2a、L2bはプローブ430および光ファイバFB51により導波されてサーキュレータ501を經由し、分波手段505に入射する。

20

【0107】

分波手段505は波長選択性を有し、たとえばWDMカプラにより構成される。分波手段505に入射した光のうち、反射光L3aおよび参照光L2aは光ファイバFB41a側に射出され、反射光L3bおよび参照光L2bは光ファイバFB41b側に射出される。光ファイバFB41aは分波手段401aに結合されており、光ファイバFB41bは分波手段401bに結合されている。分波手段401a、401b以降の動作については第4の実施形態の場合と同様であるため説明を省略する。

30

【0108】

なお、上記の光断層画像化装置500では、分波手段505の下流に干渉計を配置して、波長帯域ごとに光を分波した後、干渉させるようにしているが、変形例として、干渉した後で波長帯域ごとに光を分波して干渉光検出手段へ導くようにしてもよい。

【0109】

次に、本発明の第6の実施形態にかかる光断層画像化装置600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600の概略構成図である。光断層画像化装置600は、マイケルソン型干渉計を用いたSS-OCT装置である。図14の光断層画像化装置600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。

40

【0110】

光断層画像化装置600において、光源10aから射出して光ファイバFB1aにより導波された光束Laは、サーキュレータ15aを經由し、光ファイバFB61aにより導波されて光分割手段603aに入射する。光分割手段603a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。なお、本実施形態における光分割手段603aは、合波手段としても機能するものである。光分割手段603aは、光束Laを測定光:参照光=90:10の割合となるように測定光L1aと参照光L2aとに分割し、測定光L1aを光ファイバFB4a側へ射出し、参照光L2aを光ファイバFB62a側へ射出する。光ファイバFB4aにより導波された測定光L1aは、合分波手段5に入射す

50

る。

【0111】

また、光源10bから射出して光ファイバFB1bにより導波された光束Lbは、サーキュレータ15bを経由し、光ファイバFB61bにより導波されて光分割手段603bに入射する。光分割手段603bは、例えば、分岐比90:10の2×2の光カプラから構成されている。なお、本実施形態における光分割手段603bは、合波手段としても機能するものである。光分割手段603bは、光束Lbを測定光:参照光=90:10の割合となるように測定光L1bと参照光L2bとに分割し、測定光L1bを光ファイバFB4b側へ射出し、参照光L2bを光ファイバFB62b側へ射出する。光ファイバFB4bにより導波された測定光L1bは、合分波手段5に入射する。

10

【0112】

合分波手段5において測定光L1aと測定光L1bは合波されて、光ファイバFB5により導波されて光ロータリコネクタ31を介してプローブ30に入射し、プローブ30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L3a、L3bがプローブ30に入射し、測定光と逆の経路を辿って合分波手段5に入射する。合分波手段5において反射光L3aと反射光L3bは分波されて、反射光L3aは光ファイバFB4a側に射出されて光分割手段603aに入射し、反射光L3bは光ファイバFB4b側に射出されて光分割手段603bに入射する。

【0113】

一方、参照光L2aは光ファイバFB62aの端部に接続された反射型の光路長調整手段620aにより光路長の変更を受けた後、再び光ファイバFB62aにより導波されて光分割手段603aに入射する。また、参照光L2bも光ファイバFB62bの端部に接続された反射型の光路長調整手段620bにより光路長の変更を受けた後、再び光ファイバFB62bにより導波されて光分割手段603bに入射する。

20

【0114】

光分割手段603aにおいて、反射光L3aと参照光L2aが合波されて、これらの干渉光L4aが発生し、干渉光L4aは光ファイバFB61aにより導波されてサーキュレータ15aを経由して光ファイバFB63aにより導波されて分波手段605aに入射する。分波手段605aは、たとえば分岐比50:50の2×2の光カプラから構成されている。分波手段605aにおいて、干渉光L4aは二分されて干渉光検出手段40aへ射出される。

30

【0115】

同様に、光分割手段603bにおいて、反射光L3bと参照光L2bが合波されて、これらの干渉光L4bが発生し、干渉光L4bは光ファイバFB61bにより導波されてサーキュレータ15bを経由して光ファイバFB63bにより導波されて分波手段605bに入射する。分波手段605bは、たとえば分岐比50:50の2×2の光カプラから構成されている。分波手段605bにおいて、干渉光L4bは二分されて干渉光検出手段40bへ射出される。

【0116】

以降の干渉光検出手段40a、40b、断層画像処理手段50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。

40

【0117】

次に、本発明の第7の実施形態にかかる光断層画像化装置700について図15を参照して説明する。図15は光断層画像化装置700の概略構成図である。光断層画像化装置700は、マイケルソン型干渉計を用いたSS-OCT装置であるが、図14の光断層画像化装置600と比較すると、干渉計よりも合分波手段5が上流側に配置されている点が基本的に異なる。以下では、主にこの相違点について説明し、図15の光断層画像化装置700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。

【0118】

50

光断層画像化装置700において、光源10aから射出して光ファイバFB1aにより導波された光束Laと、光源10bから射出して光ファイバFB1bにより導波された光束Lbとは、合分波手段5に入射し、合波される。合波後の光束La、Lbは、光ファイバFB31により導波されてサーキュレータ501を経由し、光ファイバFB71により導波されて光分割手段703に入射する。

【0119】

光分割手段703は、例えば、分岐比90:10の2×2の光カプラから構成されている。なお、本実施形態における光分割手段703は、合波手段としても機能するものである。光分割手段703は、光束La、Lbを測定光:参照光=90:10の割合となるように測定光L1a、L1bと参照光L2a、L2bとに分割し、測定光L1a、L1bを光ファイバFB72側へ射出し、参照光L2a、L2bを光ファイバFB73側へ射出する。

10

【0120】

測定光L1a、L1bは、光ロータリコネクタ31を介してプローブ30に入射し、プローブ30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L3a、L3bがプローブ30に入射し、プローブ30および光ファイバFB72に導波されて光分割手段703に入射する。

【0121】

一方、参照光L2a、L2bは光ファイバFB73の端部に接続された反射型の光路長調整手段720により光路長の変更を受けた後、再び光ファイバFB73により導波されて光分割手段703に入射する。

20

【0122】

光分割手段703において、反射光L3a、L3bと参照光L2a、L2bが合波される。そして、反射光L3aと参照光L2aの合波により干渉光L4aが発生し、反射光L3bと参照光L2bとの合波により干渉光L4bが発生する。このとき、光束La、Lbは図2Bに示すように波長帯域が離散しているため、反射光L3aと参照光L2bとの合波、反射光L3bと参照光L2aとの合波により干渉光が発生することはない。

【0123】

干渉光L4a、L4bは光ファイバFB71により導波され、サーキュレータ501を経由して光ファイバFB74により導波されて干渉光分離手段705に入射する。干渉光分離手段705は波長選択性を有し、たとえばWDMカプラにより構成される。干渉光分離手段705において、干渉光L4aは光ファイバFB75a側に射出されて分波手段701aに入射し、干渉光L4bは光ファイバFB75b側に射出されて分波手段701bに入射する。分波手段701a、701bはたとえば分岐比50:50の2×2の光カプラから構成されている。分波手段701a、701bにおいて、干渉光L4a、L4bはそれぞれ二分されて干渉光検出手段40a、40bへ射出される。

30

【0124】

以降の干渉光検出手段40a、40b、断層画像処理手段50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。

【0125】

次に、本発明の第8の実施形態にかかる光断層画像化装置800について図16を参照して説明する。図16は光断層画像化装置800の概略構成図である。光断層画像化装置800は、マイケルソン型干渉計を用いたSS-OCT装置である。図16の光断層画像化装置800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。

40

【0126】

光断層画像化装置800では、光断層画像化装置700の光分割手段703に代わり、光分割手段803を用いている。光分割手段803は、例えば、分岐比50:50の2×2の光カプラから構成されている。光源10a、10bから射出した光束La、Lbが合分波手段5により合波されてサーキュレータ501経由後に光ファイバFB71により導

50

波されるところまでは光断層画像化装置 700 と同じである。

【0127】

その後、光束 L_a 、 L_b は光分割手段 803 に入射し、光分割手段 803 において測定光：参照光 = 50 : 50 の割合となるように測定光 L_{1a} 、 L_{1b} と参照光 L_{2a} 、 L_{2b} とに分割され、測定光 L_{1a} 、 L_{1b} を光ファイバ FB72 側へ射出され、参照光 L_{2a} 、 L_{2b} を光ファイバ FB73 側へ射出される。

【0128】

測定光 L_{1a} 、 L_{1b} は、光ロータリコネクタ 31 を介してプローブ 30 に入射し、プローブ 30 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_{3a} 、 L_{3b} がプローブ 30 に入射し、プローブ 30 および光ファイバ FB72 に導波されて光分割手段 803 に入射する。

10

【0129】

一方、参照光 L_{2a} 、 L_{2b} は光ファイバ FB73 の端部に接続された反射型の光路長調整手段 720 により光路長の変更を受けた後、再び光ファイバ FB73 により導波されて光分割手段 803 に入射する。

【0130】

光分割手段 803 において、反射光 L_{3a} 、 L_{3b} と参照光 L_{2a} 、 L_{2b} が合波される。そして、反射光 L_{3a} と参照光 L_{2a} の合波により干涉光 L_{4a} が発生し、反射光 L_{3b} と参照光 L_{2b} との合波により干涉光 L_{4b} が発生する。干涉光 L_{4a} 、 L_{4b} のうち約 50% は、光ファイバ FB81 側に射出され干涉光分離手段 806 に入射する。干涉光 L_{4a} 、 L_{4b} のうち残りの約 50% は、光ファイバ FB71 側に射出され、サーキュレータ 501 を経由して光ファイバ 82 により導波されて干涉光分離手段 807 に入射する。

20

【0131】

干涉光分離手段 806、807 は波長選択性を有し、たとえば WDM カブラから構成される。干涉光分離手段 806 は、干涉光 L_{4a} を光ファイバ FB83a 側に射出し、干涉光 L_{4b} を光ファイバ FB83b 側に射出する。干涉光分離手段 807 は、干涉光 L_{4a} を光ファイバ FB84a 側に射出し、干涉光 L_{4b} を光ファイバ FB84b 側に射出する。光ファイバ FB83a、FB84a により導波された干涉光 L_{4a} は干涉光検出手段 40a に入射する。光ファイバ FB83b、FB84b により導波された干涉光 L_{4b} は干涉光検出手段 40b に入射する。

30

【0132】

以降の干涉光検出手段 40a、40b、断層画像処理手段 50 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。

【0133】

なお、光断層画像化装置 800 のようにマイケルソン型干涉計を用いて分岐比 50 : 50 で測定光と参照光を分割する場合も、図 14 に示す光断層画像化装置 600 のように、合分波手段 5 が干涉計よりも下流側に配置された構成も可能である。

【0134】

上記第 1 ~ 第 8 の実施形態および変形例において、例えば光束 L_a の中心波長 $\lambda_1 = 880 \text{ nm}$ 、光束 L_b の中心波長 $\lambda_2 = 1300 \text{ nm}$ とした場合、波長帯域 λ_a の光が入射する干涉光検出手段 40a の受光素子には受光可能波長域が $320 \sim 1100 \text{ nm}$ の Si フォトダイオード、波長帯域 λ_b の光が入射する干涉光検出手段 40b の受光素子には受光可能波長域 $900 \text{ nm} \sim 1700 \text{ nm}$ の InGaAs フォトダイオードを使用することができる。

40

【0135】

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 λ_1 および λ_2 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 λ_1 および λ_2 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、光束

50

ごとに検出できるように複数の干渉光検出手段を設けているため、上記のような 1 および 2 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。

【0136】

また、光束 L_a の中心波長 $\lambda_1 = 880 \text{ nm}$ 、光束 L_b の中心波長 $\lambda_2 = 1300 \text{ nm}$ とした場合、図 1、7、11、14 に示すような複数の干渉計を有する光断層画像化装置の構成では、波長帯域 a の光が入射する干渉計のサーキュレータ 15a には $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (BIG)、波長帯域 b の光が入射する干渉計のサーキュレータ 15b には $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) を使用することが望ましい。従来では、1 個のサーキュレー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ったため、いずれかの波長域で吸収損失が大きく、光利用効率が大きく低下するという問題があった。しかし、図 1、7、11、14 に示す光断層画像化装置によれば、光束ごとに干渉計を設けているため、上記問題を解決することができる。

10

【0137】

あるいは、 $\lambda_2 = 1000 \text{ nm}$ の場合、サーキュレータには $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (TGG) を使用することが望ましい。サーキュレータに限らず、カプラ、もしくはダイクロイックミラー、ファイバなどにおいても、従来技術では使用波長全域に対応する必要があるのに対して、本発明の実施形態の光断層画像化装置では、各光束のそれぞれの波長域に対応していればよいため、使用する光学部品の要求使用を緩和することができ、部品のコストを低減することができる。

20

【0138】

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) の光束と、測定対象との相互作用が大きい波長帯域 (例えば 800 nm 帯) の光束を合波することで、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。

30

【0139】

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 の光束を用いれば、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。

【0140】

上記第 1、第 3 ~ 第 8 の実施形態の光断層画像化装置の光源ユニットから射出される 2 つの光束は、分散した波長帯域を有する。従来、OCT 装置で使用される光源は、そのスペクトルがガウス形状であることが理想とされていた。TD-OCT 装置では、ガウス形状から外れたスペクトル形状を持つ光源を使用したときにはサイドローブが立つため、画像の分解能が悪化するという問題点があった。スペクトル信号を測定する FD-OCT 計測では、光源スペクトルをあらかじめ測定し、そこから得られるフィルタ関数を干渉信号にかけることにより、ガウス形状のスペクトルであった場合に得られる信号に近づける処理が従来では行われている。しかし、断層画像を取得する深さ範囲に対応する光源スペクトルは連続である必要があり、例えば発光帯域の真ん中で光量がゼロとなる様な離散的なスペクトル波形においては適切な処理ができないとされていた。

40

【0141】

また、従来は OCT 装置では、高分解能測定を実現するために光源の波長帯域が広いことが望まれていた。光源としては安価で小型なスーパーミネセンスダイオード (SLD)、あるいは半導体光アンプ (SOA) といった半導体光源が望ましいが、これらはその

50

媒質の特性により利得帯域が限られるため、単体で連続的に100nmを超える帯域を実現するのは難しい。

【0142】

そこで、特許文献1に示すような複数の光源からの光を合波して波長帯域を広げる手法が考えられていた。このうち、複数の光源から射出される光を分岐比50:50のカプラを用いて合波する方法があるが、カプラで出力が双方の合計の半分になるために、光利用効率が悪くなってしまふ。また、偏光ビームスプリッタを用いて合波する方法もあるが、この手法で合波できるのは2光束までである。

【0143】

つまり、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、離散的な光束La、Lb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。

10

【0144】

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離散的な波長帯域を有する複数の光束La、Lb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とわかった。このため、上述のような特定の特性に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50において波長が異なる2つの干渉光の断層情報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

20

【0145】

また、離散的な波長帯域を有する複数の光束を用いて高分解能な断層画像を得ることができるため、多数の光束を用いた高分解能のタイプと、少数の光束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。

【0146】

なお、上記第1～第8の実施形態および変形例の光断層画像化装置は全て、SS-OCT装置であり、背景技術の項において述べたように、SD-OCT装置に比べて、測定レートで有利である。具体的には例えば、波長帯域200nm、波長分解能0.1nmのOCT装置を考えた場合、高分解能、光画質の断層画像を得るためには、2000点以上のデータ点数が必要であり、より正確なスペクトル形状を知るためには4000点以上のデータ点数が望ましい。また、OCT装置としては2次元断層画像を動画表示することが望ましく、例えば、測定波長帯域のデータ点数が2000点、光軸と垂直な方向のライン数が1000ラインの画像を繰り返しレート10Hzで表示する場合、データ読み出しレートは20MHzが必要となる。

30

【0147】

前述のように、SD-OCT装置において、データ点数を増加させるためにはディテクタの素子数を増加させることが必要である。OCT装置における一般的な光源波長である近赤外域に受光感度を持つInGaAs素子のディテクタアレイで現在入手可能なものとしては、素子数1024個(例えばSensors Unlimited Inc., 社製、型番SU-LDV-1024LE)のものが挙げられるが、このようなものは高価である。データ点数を2000点以上、または4000点以上取得するには、高価な素子数1024個のディテクタアレイを最低2個、望ましくは4個以上接続して使用する必要がある。また、複数のディテクタアレイを接続する場合、高精度な位置調整が必要とされる。さらに、上記の素子数1024個のディテクタアレイと、素子数512個のディテクタアレイ(Sensors Unlimited Inc., 社製、型番SU-LDV-512LD)の仕様を比較すると、最大ラインレートが素子数512個のディテクタアレイでは12820flame/秒であるのに対し、素子数1024個のディテクタアレイでは4266flame/秒であり、素子数が増加するに伴い、1ラインの読み出しレートは低下している。このような1ラインの読み出しレートの低下は、画像のフレームレート

40

50

を低下させるという点で問題である。

【0148】

これに対して、SS-OCT装置では、ディテクタのサンプリング間隔を増加させる事で、データ点数の増加は安価に実現できる。前述の例で言えば、光軸と垂直方向1000ラインの画像を10Hzで表示する場合、データ点数が4000点の場合でも40MHzのサンプリングレートでデータを取得すれば良い。これは、フォトダイオード1素子と安価な電気回路で十分に実現可能なレベルである。

【0149】

また、測定光を広帯域化する場合、SD-OCT装置では、干渉光検出手段におけるグレーティング等の波長分散素子、レンズ等の集光素子など光学設計の変更が必要であるが、SS-OCT装置では、WDMカプラとディテクタを追加するだけで済むため、容易に実現できる。

【0150】

なお、本発明は上記実施形態に限定されず、発明の要旨を変更しない限りにおいて、種々の変形が可能である。例えば、上記例では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、図9、図13、図15、図16に示す光断層画像化装置の光源ユニット10を多色光源に置換すればよい。

【0151】

また、上記例では、説明を簡単にするために2つの光束を用いた例について説明したが、3以上の光束でもよい。n個の光束を用いる場合には、例えばn×1のWDMカプラや複数個のWDMカプラを用いることで構成可能である。図17は、4つの波長掃引光源1~4から射出される光束を用いるn=4の場合に、2つの2×1のWDMカプラ15、16および1つの2×2のWDMカプラ17を用いて合波する構成例を示す。また、図18は、4つの波長掃引光源1~4から射出される光束を用いるn=4の場合に、1つの4×1のWDMカプラ18で合波する構成例を示す。

【0152】

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る構成を採用してもよい。

【0153】

上記実施形態では、光源ユニットとしてファイバリング型波長掃引光源を用いて例を挙げたが、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、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。波長掃引は、連続的な掃引が好ましいが、不連続的な波長変化であってもよい。各光束の波長掃引周期は、第3の実施形態の変形例のように同期を取る場合を除き、互いに異なる周期であってもよい。

【0154】

また、上記実施形態では、光源ユニットから射出される光束のスペクトルが略ガウス形状のものを例にとり説明したが、これに限定するものではなく、例えば波長に対して光強度が一定であるスペクトルであってもよい。

【0155】

ひとつの光源の発光波長域は、例示した波長幅に限る物ではないが、単一光源において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以上のオーダである。

【0156】

また、上記実施形態では、光ファイバにより光束を導波し、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。光ファイバプローブの代わりに、空間伝搬した光束をガルバノミラーで走査する構成でも良い。

10

20

30

40

50

【 0 1 5 7 】

第 2 の実施形態およびその変形例において説明した、光源ユニットから射出される複数の光束の波長帯域の一部が重畳する場合の干渉光または干渉信号の混在の回避方法は、第 3 ~ 第 8 の実施形態にも適用可能である。

【 0 1 5 8 】

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。

10

【 図面の簡単な説明 】

【 0 1 5 9 】

【 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 A 】 図 1 の光源ユニットの波長掃引の様子を示す図

【 図 2 B 】 図 1 の光源ユニットから射出される光束のスペクトルを示す図

【 図 3 】 図 1 の断層画像処理手段の一例を示すブロック図

【 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一例を示すグラフ

【 図 5 】 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中間断層情報を示す図

20

【 図 6 】 図 1 の断層画像処理手段において複数の中間断層情報から断層画像の生成に用いる断層情報を生成する様子を示す図

【 図 7 】 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 8 A 】 図 7 の光源ユニットから射出される光束のスペクトルを示す図

【 図 8 B 】 図 7 の光学フィルタにより遮光した後のスペクトルを示す図

【 図 9 】 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 1 0 】 本発明の第 3 の実施形態の変形例の動作を説明するための図

【 図 1 1 】 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 1 2 】 図 4 におけるフィゾー型干渉計を説明するための図

【 図 1 3 】 本発明の第 5 の実施形態にかかる光断層画像化装置の概略構成図

30

【 図 1 4 】 本発明の第 6 の実施形態にかかる光断層画像化装置の概略構成図

【 図 1 5 】 本発明の第 7 の実施形態にかかる光断層画像化装置の概略構成図

【 図 1 6 】 本発明の第 8 の実施形態にかかる光断層画像化装置の概略構成図

【 図 1 7 】 4 つの光源からの光束を合波する例を示す図

【 図 1 8 】 4 つの光源からの光束を合波する別の例を示す図

【 符号の説明 】

【 0 1 6 0 】

1、2 0 0、3 0 0、4 0 0、5 0 0、6 0 0、7 0 0、8 0 0 光断層画像化装置

3、3 a、3 b、4 3 1 光分割手段

4 a、4 b 合波手段

40

5 合分波手段

1 0 光源ユニット

1 0 a、1 0 b 光源

2 0、2 0 a、2 0 b 光路長調整手段

3 0、4 3 0 プローブ

4 0 a、4 0 b 干渉光検出手段

5 0 断層画像処理手段

6 0 表示装置

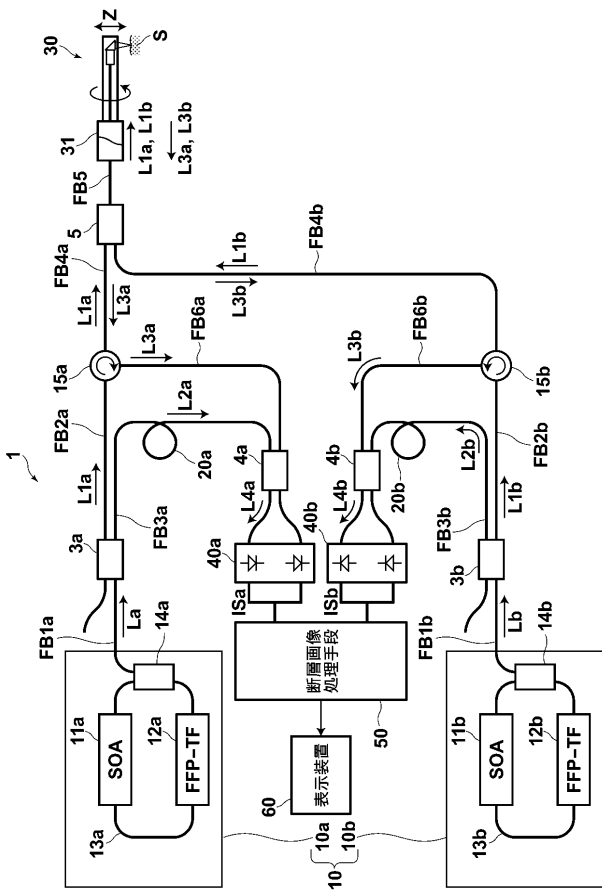
2 0 1 a、2 0 1 b 光学フィルタ

3 0 6 反射光分離手段

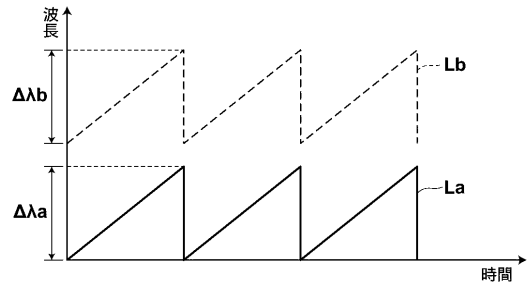
50

- 3 0 7 参照光分離手段
- 7 0 5、8 0 6、8 0 7 干涉光分離手段
- I S a、I S b 干涉信号
- L a、L b、L S a、L S b 光束
- L 1 a、L 1 b 測定光
- L 2 a、L 2 b 参照光
- L 3 a、L 3 b 反射光
- L 4 a、L 4 b 干涉光
- S 測定対象
- r a、r b 中間断層情報
- a、 b 波長帯域

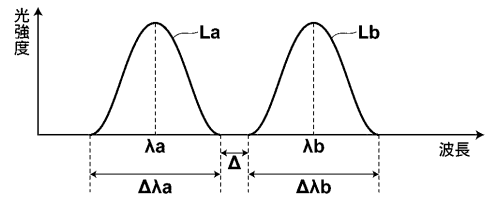
【 図 1 】



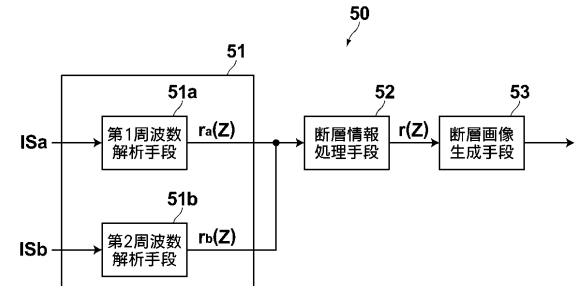
【 図 2 A 】



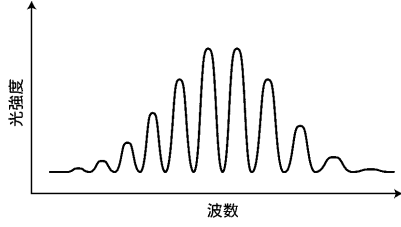
【 図 2 B 】



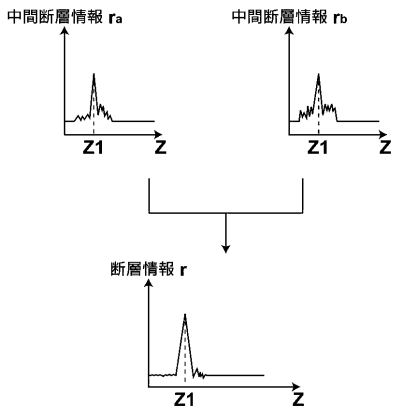
【 図 3 】



【 図 4 】



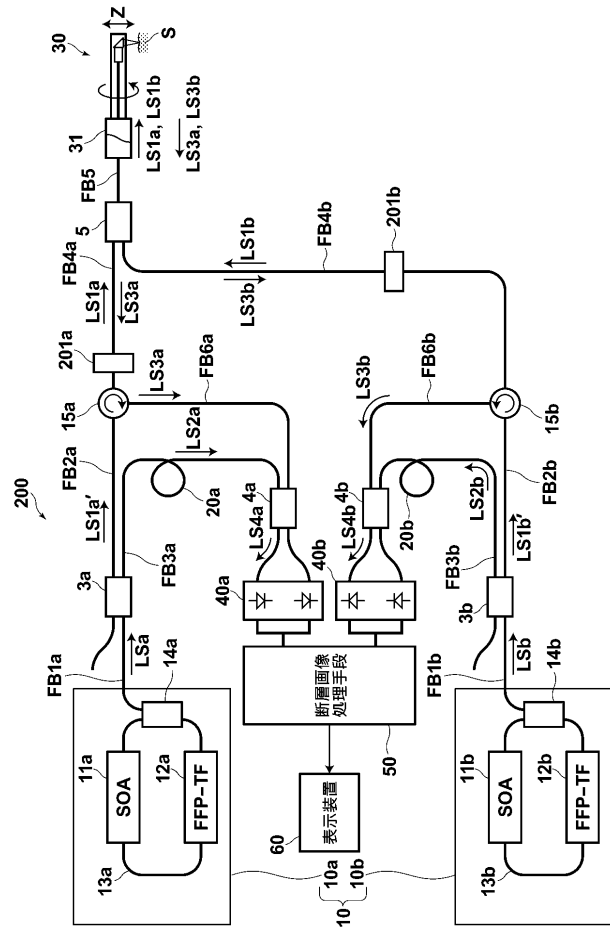
【 図 6 】



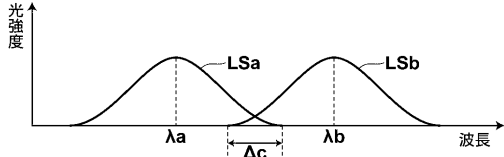
【 図 5 】

深さ位置	光源波長 - 干渉強度(交流成分)特性	中間断層情報 ra (ra)
10μm	<p>0.4 0.2 0 -0.2 -0.4</p> <p>0.9 0.92 0.94 0.96 0.98 1 1.02 1.04 1.06 1.08 1.1</p>	<p>10μm Z</p>
20μm	<p>0.4 0.2 0 -0.2 -0.4</p> <p>0.9 0.92 0.94 0.96 0.98 1 1.02 1.04 1.06 1.08 1.1</p>	<p>20μm Z</p>
50μm	<p>0.4 0.2 0 -0.2 -0.4</p> <p>0.9 0.92 0.94 0.96 0.98 1 1.02 1.04 1.06 1.08 1.1</p>	<p>50μm Z</p>
100μm	<p>0.4 0.2 0 -0.2 -0.4</p> <p>0.9 0.92 0.94 0.96 0.98 1 1.02 1.04 1.06 1.08 1.1</p>	<p>100μm Z</p>

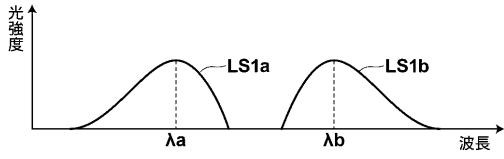
【 図 7 】



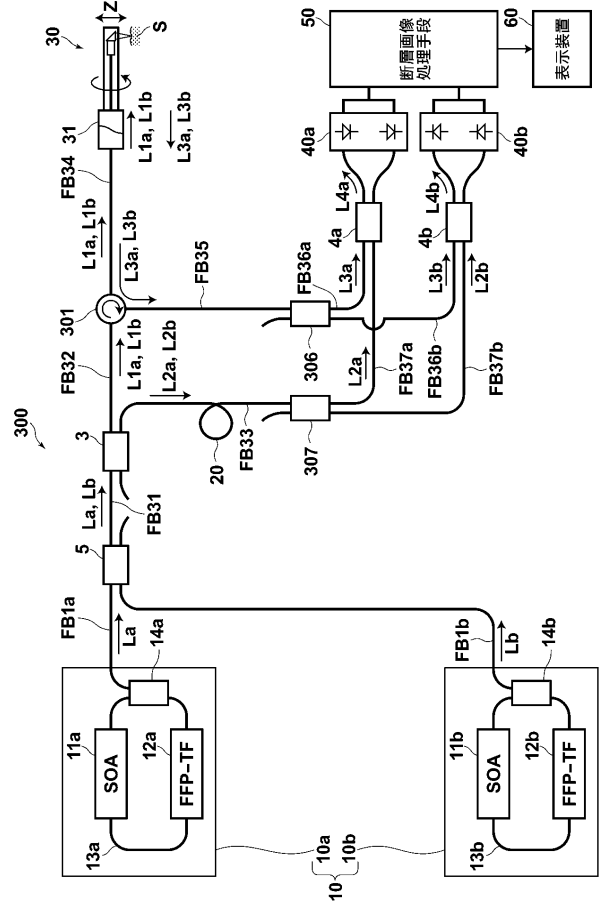
【 図 8 A 】



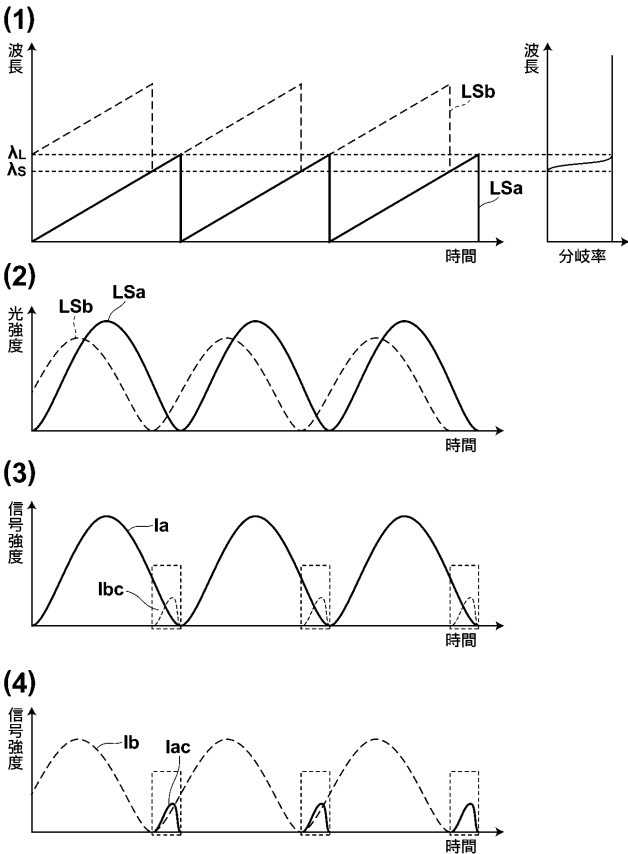
【 図 8 B 】



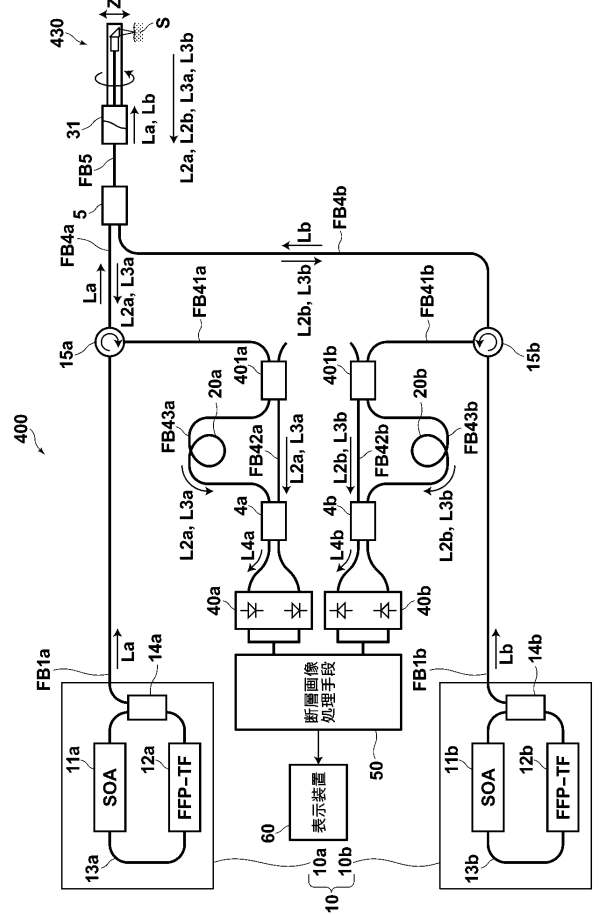
【 図 9 】



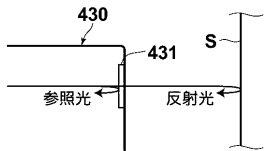
【 図 10 】



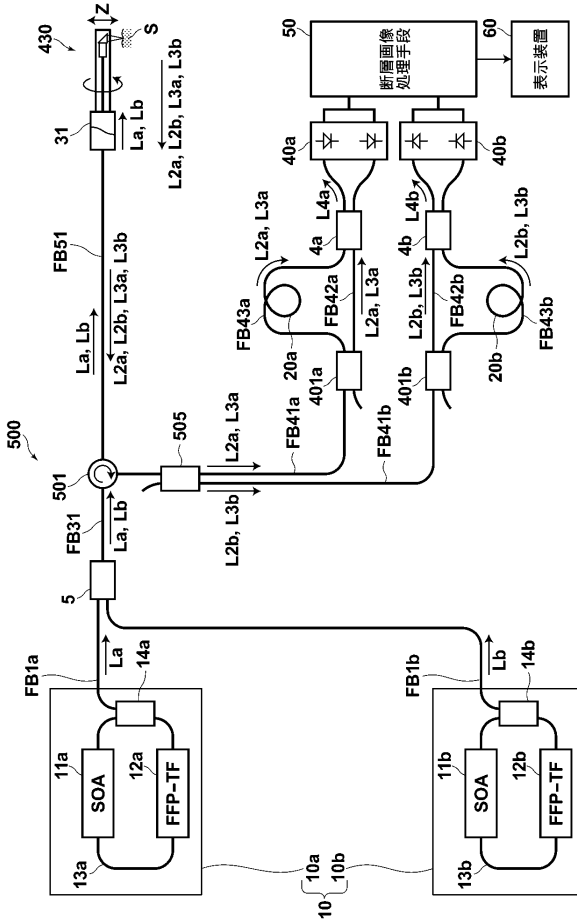
【 図 11 】



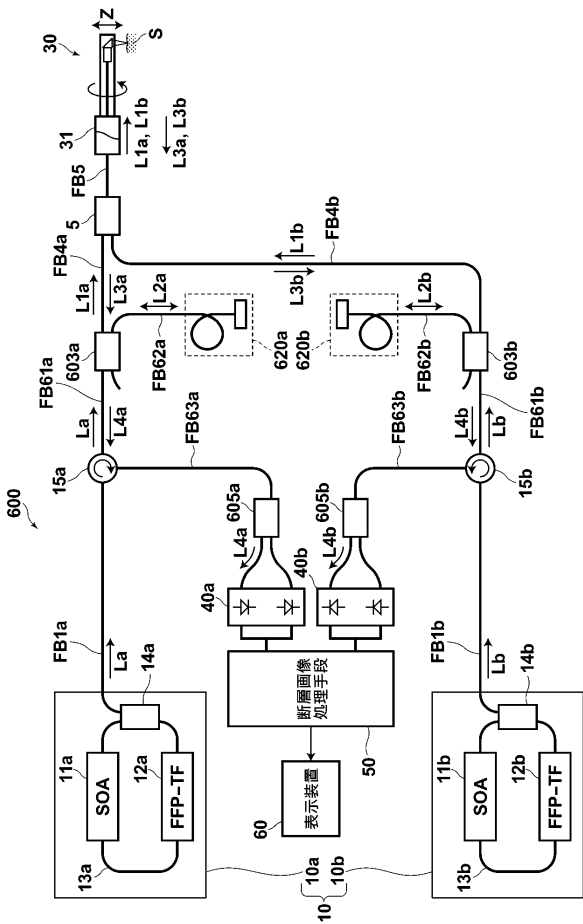
【 図 1 2 】



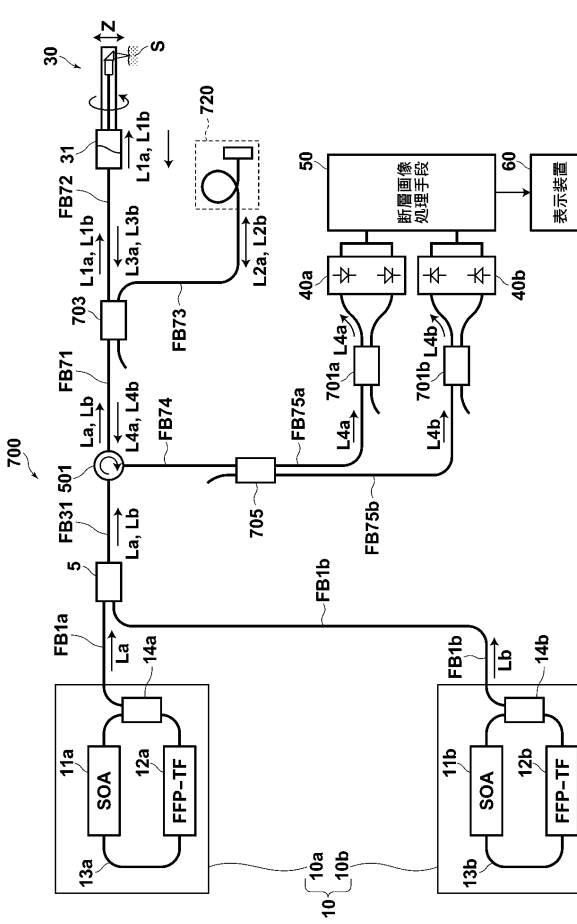
【 図 1 3 】



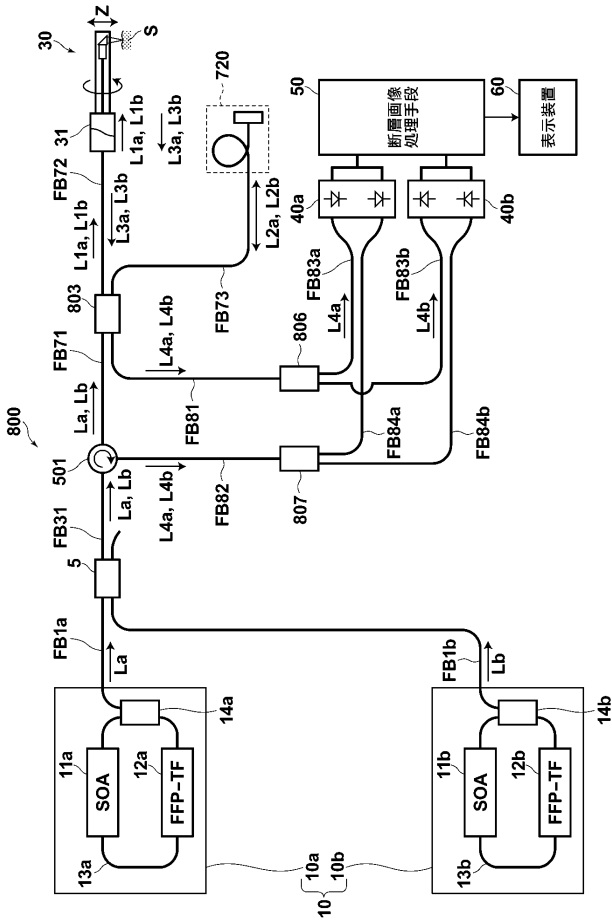
【 図 1 4 】



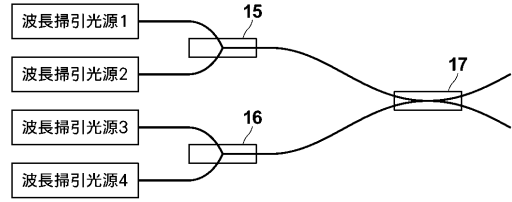
【 図 1 5 】



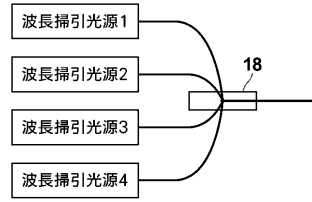
【 図 16 】



【 図 17 】



【 図 18 】



フロントページの続き

(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

Fターム(参考) 2G059 AA05 AA06 BB12 EE02 EE09 EE11 FF01 GG01 GG03 GG09
HH01 HH06 JJ02 JJ05 JJ11 JJ15 JJ17 JJ22 KK03 LL02
MM01 MM09 NN01
4C061 AA00 BB05 CC07 DD00 FF47 HH51 LL01 MM10 NN01 NN05
PP11 QQ01 SS21 VV01