

(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2017-9455
(P2017-9455A)

(43) 公開日 平成29年1月12日(2017.1.12)

(51) Int.Cl.
GO1N 21/01 (2006.01)
GO1N 21/17 (2006.01)

F I
GO1N 21/01 D
GO1N 21/17 630

テーマコード (参考)
2G059

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 26 頁)

(21) 出願番号	特願2015-125577 (P2015-125577)	(71) 出願人	598041566
(22) 出願日	平成27年6月23日 (2015. 6. 23)		学校法人北里研究所
			東京都港区白金5丁目9番1号
		(74) 代理人	100106909
			弁理士 棚井 澄雄
		(74) 代理人	100188558
			弁理士 飯田 雅人
		(72) 発明者	吉國 裕三
			神奈川県相模原市南区北里1丁目15番1号 学校法人北里研究所内
		Fターム(参考)	2G059 AA05 BB12 EE02 EE09 EE10
			EE11 FF02 GG01 GG08 GG09
			HH01 HH06 JJ01 JJ11 JJ13
			JJ17 JJ22 KK01 LL01 MM01
			MM04 NN05

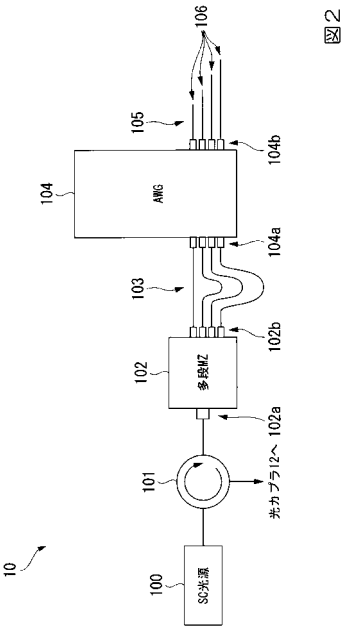
(54) 【発明の名称】 光干渉断層撮影用光源ユニット及び光干渉断層撮影装置

(57) 【要約】

【課題】周波数掃引の高速化が図られながらも、装置構成が比較的簡素な光干渉断層撮影用光源ユニット及び光干渉断層撮影装置を提供する。

【解決手段】光干渉断層撮影用光源ユニット10は、広帯域光をパルス状に出力する広帯域パルス光源100と、広帯域光を上流側入力ポート102aから入力し、当該広帯域光が分光されてなる複数の第1分光成分を、複数の上流側出力ポート102bの各々から出力する上流側分光器102と、異なる長さで設けられた複数の上流側光導波路103と、上流側光導波路103を通じて、複数の第1分光成分を複数の下流側入力ポート104aの各々から入力し、当該第1分光成分の各々が更に分光されてなる複数の第2分光成分を、複数の下流側出力ポート104bの各々から出力する下流側分光器104と、異なる長さで設けられた複数の下流側光導波路105と、を備えている。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

所定の周波数帯域に渡って強度分布が均一な広帯域光をパルス状に出力する広帯域パルス光源と、

パルス状の前記広帯域光を上流側入力ポートから入力し、当該広帯域光が分光されてなる複数の第 1 分光成分を、複数の上流側出力ポートの各々から出力する上流側分光器と、

複数の前記上流側出力ポートごとに異なる長さで設けられた上流側光導波路と、

前記上流側光導波路を通じて、複数の前記第 1 分光成分を複数の下流側入力ポートの各々から入力し、当該第 1 分光成分の各々が更に分光されてなる複数の第 2 分光成分を、複数の下流側出力ポートの各々から出力する下流側分光器と、

複数の前記下流側出力ポートごとに異なる長さで設けられ、先端に光反射板が設けられた下流側光導波路と、

を備え、

一の前記下流側入力ポートに入力された前記第 1 分光成分に含まれる複数の前記第 2 分光成分のうちの一つと、他の前記下流側入力ポートに入力された前記第 1 分光成分に含まれる複数の前記第 2 分光成分のうちの一つとは、共通の前記下流側出力ポートから出力される

光干渉断層撮影用光源ユニット。

【請求項 2】

複数の前記第 1 分光成分の各々は、第 1 の周波数差で周期的に離散化された複数の周波数帯域を含んでおり、

前記下流側分光器は、前記下流側入力ポートの各々に入力された前記第 1 分光成分を、前記第 1 の周波数差で周期的に離散化された周波数帯域ごとに分光して複数の前記第 2 分光成分を生成する

請求項 1 に記載の光干渉断層撮影用光源ユニット。

【請求項 3】

前記第 1 の周波数差は、一の前記上流側出力ポートから出力された前記第 1 分光成分と、他の前記上流側出力ポートから出力された前記第 1 分光成分との間の周波数差の最小値である第 2 の周波数差の整数倍とされている

請求項 2 に記載の光干渉断層撮影用光源ユニット。

【請求項 4】

一の前記下流側出力ポートと一の前記下流側入力ポートとの間における通過可能周波数帯域と、当該一の前記下流側出力ポートと他の前記下流側入力ポートとの間における通過可能周波数帯域と、の間の周波数差は、前記第 1 の周波数差と前記第 2 の周波数差との差分値、又は、前記第 1 の周波数差と前記第 2 の周波数差との加算値とされている

請求項 3 に記載の光干渉断層撮影用光源ユニット。

【請求項 5】

請求項 1 から請求項 4 の何れか一項に記載の光干渉断層撮影用光源ユニットを備える光干渉断層撮影装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光干渉断層撮影用光源ユニット及び光干渉断層撮影装置に関する。

【背景技術】

【0002】

光干渉断層計 (Optical Coherence Tomography ; OCT) は、光干渉現象を利用した断層撮影技術であり、例えば、網膜の断層撮影等に応用されている。また、近年、撮影のリアルタイム性を高めるために、OCT の撮影速度の向上が図られている。

【0003】

OCT の撮影速度を向上させる手法の一つとして、OCT 光源における光周波数掃引 (

10

20

30

40

50

走査)速度の高速化が挙げられる。例えば、OCT光源を、広帯域パルス光源と光フィルタと光導波路とを組み合わせで作製し、広帯域パルス光源から出力された広帯域光に含まれる複数の光周波数ごとに異なる光路長を適用することで、光周波数掃引の高速化を図ることができる(例えば、特許文献1参照)。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特許第5467343号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

【0005】

しかしながら、断層撮影における一層の分解能の向上のため、掃引ステップ数の高密度化が求められている。この場合、上述のOCT光源においては一種の光周波数に対し一本の光導波路を設ける必要がある。そうすると、例えば、光周波数を1024段階のステップで掃引しようとする場合、長さがそれぞれ異なる1024本の光導波路を用意するため、装置構成の複雑化、及び、製造コストの増大を招く。

【0006】

本発明が解決しようとする課題は、周波数掃引の高速化が図られながらも、装置構成が比較的簡素な光干渉断層撮影用光源ユニット及び光干渉断層撮影装置を提供することにある。

20

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の一態様は、所定の周波数帯域に渡って強度分布が均一な広帯域光をパルス状に出力する広帯域パルス光源と、パルス状の前記広帯域光を上流側入力ポートから入力し、当該広帯域光が分光されてなる複数の第1分光成分を、複数の上流側出力ポートの各々から出力する上流側分光器と、複数の前記上流側出力ポートごとに異なる長さで設けられた上流側光導波路と、前記上流側光導波路を通じて、複数の前記第1分光成分を複数の下流側入力ポートの各々から入力し、当該第1分光成分の各々が更に分光されてなる複数の第2分光成分を、複数の下流側出力ポートの各々から出力する下流側分光器と、複数の前記下流側出力ポートごとに異なる長さで設けられ、先端に光反射板が設けられた下流側光導波路と、を備え、一の前記下流側入力ポートに入力された前記第1分光成分に含まれる複数の前記第2分光成分のうちの一つと、他の前記下流側入力ポートに入力された前記第1分光成分に含まれる複数の前記第2分光成分のうちの一つとは、共通の前記下流側出力ポートから出力される光干渉断層撮影用光源ユニットである。

30

【0008】

また、本発明の一態様によれば、複数の前記第1分光成分の各々は、第1の周波数差で周期的に離散化された複数の周波数帯域を含んでおり、前記下流側分光器は、前記下流側入力ポートの各々に入力された前記第1分光成分を、前記第1の周波数差で周期的に離散化された周波数帯域ごとに分光して複数の前記第2分光成分を生成する。

【0009】

40

また、本発明の一態様によれば、前記第1の周波数差は、一の前記上流側出力ポートから出力された前記第1分光成分と、他の前記上流側出力ポートから出力された前記第1分光成分との間の周波数差の最小値である第2の周波数差の整数倍とされている。

【0010】

また、本発明の一態様によれば、一の前記下流側出力ポートと一の前記下流側入力ポートとの間における通過可能周波数帯域と、当該一の前記下流側出力ポートと他の前記下流側入力ポートとの間における通過可能周波数帯域と、の間の周波数差は、前記第1の周波数差と前記第2の周波数差との差分値、又は、前記第1の周波数差と前記第2の周波数差との加算値とされている。

【0011】

50

また、本発明の一態様は、上述の光干渉断層撮影用光源ユニットを備える光干渉断層撮影装置である。

【発明の効果】

【0012】

上述の光干渉断層撮影用光源ユニット及び光干渉断層撮影装置によれば、周波数掃引の高速化が図られながらも、装置構成を簡素化することができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】第1の実施形態に係る光干渉断層撮影装置の全体構成を示す図である。

【図2】第1の実施形態に係る光干渉断層撮影用光源ユニットの構成を示す図である。

10

【図3】第1の実施形態に係る上流側分光器の機能を説明する図である。

【図4】第1の実施形態に係る上流側光導波路の構成を説明する図である。

【図5】第1の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第1の図である。

【図6】第1の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第2の図である。

【図7】第1の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第3の図である。

【図8】第1の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第4の図である。

【図9】第1の実施形態に係る下流側光導波路の構成を説明する第1の図である。

【図10】第1の実施形態に係る下流側光導波路の構成を説明する第2の図である。

【図11】第1の実施形態に係る光干渉断層撮影装置の作用効果を説明する第1の図である。

20

【図12】第1の実施形態に係る光干渉断層撮影装置の作用効果を説明する第2の図である。

【図13】第2の実施形態に係る上流側光導波路の構成を説明する図である。

【図14】第2の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第1の図である。

【図15】第2の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第2の図である。

【図16】第2の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第3の図である。

【図17】第2の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第4の図である。

【図18】第2の実施形態に係る下流側光導波路の構成を説明する図である。

【図19】第2の実施形態に係る光干渉断層撮影装置の作用効果を説明する図である。

【図20】第3の実施形態に係る上流側光導波路の構成を説明する図である。

30

【図21】第3の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第1の図である。

【図22】第3の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第2の図である。

【図23】第3の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第3の図である。

【図24】第3の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第4の図である。

【図25】第3の実施形態に係る下流側光導波路の構成を説明する図である。

【図26】第3の実施形態に係る光干渉断層撮影装置の作用効果を説明する図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

<第1の実施形態>

以下、第1の実施形態に係る光干渉断層撮影装置を、図1～図12を参照しながら説明する。

40

【0015】

(全体構成)

図1は、第1の実施形態に係る光干渉断層撮影装置の全体構成を示す図である。

図1に示すように、光干渉断層撮影装置1は、光干渉断層撮影用光源ユニット10と、光検出器11と、光カップラ12と、基準ミラー13と、を備えている。図1は、光干渉断層撮影装置1が撮影対象物2（例えば、被験者の眼内）の断層画像を取得する様子を示している。

【0016】

光干渉断層撮影用光源ユニット10は、所定の周波数帯域（波長）に属する光（レーザ

50

）を高速で掃引（走査）可能なレーザ光源である。光干渉断層撮影用光源ユニット 10 は、例えば、波長幅 1525 nm～1575 nm（光周波数 200 THz 前後）の範囲で、所定周期（例えば、1 μ 秒）ごとに出力光の周波数掃引を繰り返す。光干渉断層撮影用光源ユニット 10 の出力光（周波数掃引光）は、光導波路（光ファイバ）を通して光カップラ 12 に入力される。

光カップラ 12 は、光干渉断層撮影用光源ユニット 10 が出力した周波数掃引光を、所定のパワー比率で基準ミラー 13 への経路、及び、撮影対象物 2 への経路へと分波して出力する。また、光カップラ 12 は、基準ミラー 13 で反射して戻ってきた光（基準光）と、撮影対象物 2 で反射して戻ってきた光（観測光）と、を合波して、光検出器 11 へと出力する。

光検出器 11 は、基準光と観測光とが合波されてなる干渉光のパワー（強度）を検出する。光検出器 11 によって取得された検出信号は直ちにコンピュータ等の演算装置に取り込まれる。当該演算装置は、取得された検出信号に対し所定の演算処理（フーリエ変換等）を施すことで撮影対象物 2 の断層画像を生成し、ディスプレイ等に表示する。

【0017】

（光干渉断層撮影用光源ユニットの構成）

図 2 は、第 1 の実施形態に係る光干渉断層撮影用光源ユニットの構成を示す図である。

図 2 に示すように、光干渉断層撮影用光源ユニット 10 は、広帯域パルス光源 100 と、光サーキュレータ 101 と、上流側分光器 102 と、上流側光導波路 103 と、下流側分光器 104 と、下流側光導波路 105 と、光反射板 106 と、を備えている。

【0018】

広帯域パルス光源 100 は、所定の周波数帯域に渡って強度分布が均一な広帯域光をパルス状に出力する。広帯域パルス光源 100 は、例えば、SC（Super Continuum）光源等で実現される。

広帯域パルス光源 100 は、パルス状の広帯域光を所定の周期（例えば、1 μ 秒）ごとに繰り返し出力する。

【0019】

光サーキュレータ 101 は、広帯域パルス光源 100 が出力した広帯域光を入力して上流側分光器 102（後述）に向けて出力する。また、光サーキュレータ 101 は、上流側分光器 102 が出力した光（光反射板 106（後述）で反射して戻ってきた光）を入力して光カップラ 12（図 1）に向けて出力する。

【0020】

上流側分光器 102 は、広帯域パルス光源 100 が出力したパルス状の広帯域光を上流側入力ポート 102a から入力する。上流側分光器 102 は、上流側入力ポート 102a に入力された上記広帯域光が分光されてなる複数の第 1 分光成分を、複数の上流側出力ポート 102b の各々から出力する。上流側分光器 102 は、例えば、多段型マッハツェンダー干渉計等であってよい。多段型マッハツェンダー干渉計の仕組み等については詳細な説明を省略する。

【0021】

上流側光導波路 103 は、例えば光ファイバであって、その一端側が、複数の上流側出力ポート 102b の各々に接続されるとともに、他端側が、複数の下流側入力ポート 104a に接続されている。上流側光導波路 103 は、それぞれ、複数の上流側出力ポート 102b ごと（及び、下流側入力ポート 104a ごと）に異なる長さで設けられている。

【0022】

下流側分光器 104 は、上流側光導波路 103 を通じて、上流側分光器 102 が出力した複数の第 1 分光成分を複数の下流側入力ポート 104a の各々から入力する。下流側分光器 104 は、下流側入力ポート 104a に入力された第 1 分光成分の各々が更に分光されてなる複数の第 2 分光成分を、複数の下流側出力ポート 104b の各々から出力する。下流側分光器 104 は、例えば、AWG（Arrayed Waveguide Grating）等であってよい。AWG の仕組み等については詳細な説明を省略する。

10

20

30

40

50

【0023】

下流側光導波路105は、例えば光ファイバであって、その一端側が、複数の下流側出力ポート104bの各々に接続される。また、下流側光導波路105の他端側（先端）には、それぞれ、光反射板106が設けられている。下流側光導波路105は、それぞれ、複数の下流側出力ポート104bごとに異なる長さで設けられている。

【0024】

以下、上流側分光器102は、1チャンネルの入力ポート（上流側入力ポート102a）と4チャンネルの出力ポート（上流側出力ポート102b）とを備えるものとして説明する。また、以下、下流側分光器104は、4チャンネルの入力ポート（下流側入力ポート104a）と4チャンネルの出力ポート（下流側出力ポート104b）とを備えるものとして説明する。

10

【0025】

（上流側分光器の機能）

図3は、第1の実施形態に係る上流側分光器の機能を説明する図である。

図3に示すように、4段のマッハツェンダー干渉計である上流側分光器102は、上流側入力ポート102aからパルス状の広帯域光Pを入力する。上流側分光器102は、入力された広帯域光Pを所定の周波数帯域別に分光して複数の第1分光成分Qを生成する。

具体的には、上流側分光器102は、上流側出力ポート102b0から第1分光成分Q0を出力する。また、上流側分光器102は、上流側出力ポート102b1から第1分光成分Q1を出力する。また、上流側分光器102は、上流側出力ポート102b2から第1分光成分Q2を出力する。また、上流側分光器102は、上流側出力ポート102b3から第1分光成分Q3を出力する。

20

【0026】

図3に示すように、第1分光成分Qの各々は、第1の周波数差 Δf （例えば、 $\Delta f = 100 \text{ GHz}$ ）で周期的に離散化された周波数成分を有している。

例えば、第1分光成分Q0は、周波数 f_{00} 、 f_{10} 、 f_{20} 、 f_{30} の各々にピークを有する周波数帯域を有している。周波数 f_{00} 、 f_{10} 、 f_{20} 、 f_{30} （ $f_{00} < f_{10} < f_{20} < f_{30}$ ）の各々は、第1の周波数差 Δf の間隔で離散化されている。

同様に、第1分光成分Q1は、周波数 f_{01} 、 f_{11} 、 f_{21} 、 f_{31} の各々にピークを有する周波数帯域を有しており、周波数 f_{01} 、 f_{11} 、 f_{21} 、 f_{31} （ $f_{01} < f_{11} < f_{21} < f_{31}$ ）の各々は、第1の周波数差 Δf の間隔で離散化されている。

30

同様に、第1分光成分Q2は、周波数 f_{02} 、 f_{12} 、 f_{22} 、 f_{32} の各々にピークを有する周波数帯域を有しており、周波数 f_{02} 、 f_{12} 、 f_{22} 、 f_{32} （ $f_{02} < f_{12} < f_{22} < f_{32}$ ）の各々は、第1の周波数差 Δf の間隔で離散化されている。

同様に、第1分光成分Q3は、周波数 f_{03} 、 f_{13} 、 f_{23} 、 f_{33} の各々にピークを有する周波数帯域を有しており、周波数 f_{03} 、 f_{13} 、 f_{23} 、 f_{33} （ $f_{03} < f_{13} < f_{23} < f_{33}$ ）の各々は、第1の周波数差 Δf の間隔で離散化されている。

【0027】

また、図3に示すように、第1分光成分Q0、Q1、Q2、Q3は、各々の周波数帯域のピーク周波数が第2の周波数差 δf （例えば、 $\delta f = 25 \text{ GHz}$ ）ずつずれている。

40

例えば、第1分光成分Q1のピーク周波数（周波数 f_{01} 、 f_{11} 、 f_{21} 、 f_{31} ）の各々は、第1分光成分Q0のピーク周波数（周波数 f_{00} 、 f_{10} 、 f_{20} 、 f_{30} ）の各々よりも第2の周波数差 δf だけ高周波数側にずれている。

また、第1分光成分Q2のピーク周波数（周波数 f_{02} 、 f_{12} 、 f_{22} 、 f_{32} ）の各々は、第1分光成分Q1のピーク周波数（周波数 f_{01} 、 f_{11} 、 f_{21} 、 f_{31} ）の各々よりも第2の周波数差 δf だけ高周波数側にずれている。

また、第1分光成分Q3のピーク周波数（周波数 f_{03} 、 f_{13} 、 f_{23} 、 f_{33} ）の各々は、第1分光成分Q2のピーク周波数（周波数 f_{02} 、 f_{12} 、 f_{22} 、 f_{32} ）の各々よりも第2の周波数差 δf だけ高周波数側にずれている。

即ち、第2の周波数差 δf は、一の上流側出力ポート102bから出力された第1分光

50

成分 Q（例えば、第 1 分光成分 Q 0）に含まれる各周波数帯域のピークと、他の上流側出力ポート 1 0 2 b から出力された第 1 分光成分 Q（例えば、第 1 分光成分 Q 1）に含まれる各周波数帯域のピークと、の間の周波数差の最小値である。

第 1 の周波数差 Δf （ $\Delta f = 100 \text{ GHz}$ ）は、第 2 の周波数差 δf （ $\delta f = 25 \text{ GHz}$ ）の整数倍（本実施形態においては 4 倍）とされている。

【0028】

（上流側光導波路の構成）

図 4 は、第 1 の実施形態に係る上流側光導波路の構成を説明する図である。

図 4 に示すように、上流側分光器 1 0 2 の上流側出力ポート 1 0 2 b の各々から出力された複数の第 1 分光成分 Q（Q 0～Q 3）は、上流側光導波路 1 0 3 を伝搬する。ここで、上述したように、各上流側光導波路 1 0 3 は、それぞれ、異なる長さで設けられている。

具体的には、上流側出力ポート 1 0 2 b 1 に接続された上流側光導波路 1 0 3 1 の長さは、上流側出力ポート 1 0 2 b 0 に接続された上流側光導波路 1 0 3 0 の長さよりも第 1 光路長差 $\delta L 1$ だけ長く設けられている。ここで、第 1 光路長差 $\delta L 1$ は、「 $\delta L 1 = (C o / 2) \cdot \delta t$ 」で与えられている。なお、“C o”は、真空中の光速であり、“ δt ”は、周波数掃引光の 1 ステップごとの時間間隔（ステップ間隔時間 δt （後述））である。

【0029】

同様に、上流側出力ポート 1 0 2 b 2 に接続された上流側光導波路 1 0 3 2 の長さは、上流側出力ポート 1 0 2 b 1 に接続された上流側光導波路 1 0 3 1 の長さよりも第 1 光路長差 $\delta L 1$ だけ長く設けられている。更に、上流側出力ポート 1 0 2 b 3 に接続された上流側光導波路 1 0 3 3 の長さは、上流側出力ポート 1 0 2 b 2 に接続された上流側光導波路 1 0 3 2 の長さよりも第 1 光路長差 $\delta L 1$ だけ長く設けられている。

【0030】

したがって、図 4 に示すように、上流側光導波路 1 0 3 1 を伝搬する第 1 分光成分 Q 1 は、上流側光導波路 1 0 3 0 を伝搬する第 1 分光成分 Q 0 よりも第 1 光路長差 $\delta L 1$ に対応する時間だけ遅れて下流側分光器 1 0 4 に到達する。

同様に、上流側光導波路 1 0 3 2 を伝搬する第 1 分光成分 Q 2 は、上流側光導波路 1 0 3 1 を伝搬する第 1 分光成分 Q 1 よりも第 1 光路長差 $\delta L 1$ に対応する時間だけ遅れて下流側分光器 1 0 4 に到達する。更に、上流側光導波路 1 0 3 3 を伝搬する第 1 分光成分 Q 3 は、上流側光導波路 1 0 3 2 を伝搬する第 1 分光成分 Q 2 よりも第 1 光路長差 $\delta L 1$ に対応する時間だけ遅れて下流側分光器 1 0 4 に到達する。

ここで、第 1 分光成分 Q 0、Q 1、Q 2、Q 3 は、それぞれ、下流側分光器 1 0 4 の下流側入力ポート 1 0 4 a 0、1 0 4 a 1、1 0 4 a 2、1 0 4 a 3 の各々に入力される。

【0031】

（下流側分光器の機能）

図 5～図 8 は、それぞれ、第 1 の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第 1～第 4 の図である。

本実施形態に係る下流側分光器 1 0 4 は、上述したように、4 チャンネルの入力ポート（下流側入力ポート 1 0 4 a）と 4 チャンネルの出力ポート（下流側出力ポート 1 0 4 b）とを有する AWG である。

ここで、下流側入力ポート 1 0 4 a の隣接チャンネルごとの周波数間隔（いわゆるチャンネル間隔）は、第 2 の周波数差 δf （ $\delta f = 25 \text{ GHz}$ ）とされている。これは、一の下流側出力ポート 1 0 4 b と一の下流側入力ポート 1 0 4 a との間における通過可能周波数帯域のピークと、当該一の下流側出力ポート 1 0 4 b と他の下流側入力ポート 1 0 4 a との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差が、第 2 の周波数差 δf （ $\delta f = 25 \text{ GHz}$ ）であることを意味している。

例えば、下流側出力ポート 1 0 4 b 0 と下流側入力ポート 1 0 4 a 0 との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側出力ポート 1 0 4 b 0 と下流側入力ポート 1 0 4 a

10

20

30

40

50

1 との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差が 25 GHz とされている。

同様に、下流側出力ポート $104b0$ と下流側入力ポート $104a1$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側出力ポート $104b0$ と下流側入力ポート $104a2$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差も 25 GHz とされている。

更に、下流側出力ポート $104b0$ と下流側入力ポート $104a2$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側出力ポート $104b0$ と下流側入力ポート $104a3$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差も 25 GHz とされている。

10

他の下流側出力ポート $104b1$ 、 $104b2$ 、 $104b3$ の各々に対する上記 4 つの下流側入力ポート $104a$ との関係についても同様とされる。

【0032】

また、下流側出力ポート $104b$ のチャンネル間隔は、第 1 の周波数差 Δf ($\Delta f = 100\text{ GHz}$) とされている。これは、一の下流側入力ポート $104a$ と一の下流側出力ポート $104b$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、当該一の下流側入力ポート $104a$ と他の下流側出力ポート $104b$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差が、第 1 の周波数差 Δf ($\Delta f = 100\text{ GHz}$) であることを意味している。

例えば、下流側入力ポート $104a0$ と下流側出力ポート $104b0$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側入力ポート $104a0$ と下流側出力ポート $104b1$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差が 100 GHz とされている。

20

同様に、下流側入力ポート $104a0$ と下流側出力ポート $104b1$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側入力ポート $104a0$ と下流側出力ポート $104b2$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差も 100 GHz とされている。

更に、下流側入力ポート $104a0$ と下流側出力ポート $104b2$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側入力ポート $104a0$ と下流側出力ポート $104b3$ との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差も 100 GHz とされている。

30

他の下流側入力ポート $104a1$ 、 $104a2$ 、 $104a3$ の各々に対する上記 4 つの下流側出力ポート $104b$ との関係についても同様とされる。

【0033】

上述の下流側分光器 104 において第 1 分光成分 $Q0$ が下流側入力ポート $104a0$ に入力された場合、下流側分光器 104 は、図 5 に示すように、当該第 1 分光成分 $Q0$ を、更に所定の周波数帯別に分光して複数の第 2 分光成分 $R0$ を生成する。ここで、下流側分光器 104 は、下流側入力ポート $104a0$ に入力された第 1 分光成分 $Q0$ を、第 1 の周波数差 Δf で周期的に離散化された周波数帯域ごとに分光して複数の第 2 分光成分 $R0$ を生成する。

40

具体的には、下流側分光器 104 は、第 1 分光成分 $Q0$ に含まれる、 100 GHz 間隔に離散化された各周波数帯域（ピーク周波数がそれぞれ周波数 $f00$ 、 $f10$ 、 $f20$ 、 $f30$ である周波数帯域）ごとに第 1 分光成分 $Q0$ を分光する。

これにより、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 $f00$ の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 $R00$ を下流側出力ポート $104b0$ から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 $f10$ の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 $R10$ を下流側出力ポート $104b1$ から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 $f20$ の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 $R20$ を下流側出力ポート $104b2$ から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 $f30$ の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 $R30$ を下流側出力ポート $104b3$ から出力する。

50

【0034】

また、第1分光成分Q0が下流側入力ポート104a0に入力されてから所定時間（第1光路長差 $\delta L1$ に対応する遅延時間）経過後、続いて、第1分光成分Q1が下流側入力ポート104a1に入力される。

上述の下流側分光器104において第1分光成分Q1が下流側入力ポート104a1に入力された場合、下流側分光器104は、図6に示すように、当該第1分光成分Q1を、更に所定の周波数帯別に分光して複数の第2分光成分R1を生成する。ここで、下流側分光器104は、下流側入力ポート104a1に入力された第1分光成分Q1を、第1の周波数差 Δf で周期的に離散化された周波数帯域ごとに分光して複数の第2分光成分R1を生成する。

10

具体的には、下流側分光器104は、第1分光成分Q1に含まれる、100GHz間隔に離散化された各周波数帯域（ピーク周波数がそれぞれ周波数 f_{01} 、 f_{11} 、 f_{21} 、 f_{31} である周波数帯域）ごとに第1分光成分Q1を分光する。

これにより、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数 f_{01} の周波数帯域のみからなる第2分光成分R01を下流側出力ポート104b0から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数 f_{11} の周波数帯域のみからなる第2分光成分R11を下流側出力ポート104b1から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数 f_{21} の周波数帯域のみからなる第2分光成分R21を下流側出力ポート104b2から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数 f_{31} の周波数帯域のみからなる第2分光成分R31を下流側出力ポート104b3から出力する。

20

【0035】

また、第1分光成分Q1が下流側入力ポート104a1に入力されてから所定時間（第1光路長差 $\delta L1$ に対応する遅延時間）経過後、更に、第1分光成分Q2が下流側入力ポート104a2に入力される。

上述の下流側分光器104において第1分光成分Q2が下流側入力ポート104a2に入力された場合、下流側分光器104は、図7に示すように、当該第1分光成分Q2を、更に所定の周波数帯別に分光して複数の第2分光成分R2を生成する。ここで、下流側分光器104は、下流側入力ポート104a2に入力された第1分光成分Q2を、第1の周波数差 Δf で周期的に離散化された周波数帯域ごとに分光して複数の第2分光成分R2を生成する。

30

具体的には、下流側分光器104は、第1分光成分Q2に含まれる、100GHz間隔に離散化された各周波数帯域（ピーク周波数がそれぞれ周波数 f_{02} 、 f_{12} 、 f_{22} 、 f_{32} である周波数帯域）ごとに第1分光成分Q2を分光する。

これにより、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数 f_{02} の周波数帯域のみからなる第2分光成分R02を下流側出力ポート104b0から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数 f_{12} の周波数帯域のみからなる第2分光成分R12を下流側出力ポート104b1から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数 f_{22} の周波数帯域のみからなる第2分光成分R22を下流側出力ポート104b2から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数 f_{32} の周波数帯域のみからなる第2分光成分R32を下流側出力ポート104b3から出力する。

40

【0036】

また、第1分光成分Q2が下流側入力ポート104a2に入力されてから所定時間（第1光路長差 $\delta L1$ に対応する遅延時間）経過後、更に、第1分光成分Q3が下流側入力ポート104a3に入力される。

上述の下流側分光器104において第1分光成分Q3が下流側入力ポート104a3に入力された場合、下流側分光器104は、図8に示すように、当該第1分光成分Q3を、更に所定の周波数帯別に分光して複数の第2分光成分R3を生成する。ここで、下流側分光器104は、下流側入力ポート104a3に入力された第1分光成分Q3を、第1の周波数差 Δf で周期的に離散化された周波数帯域ごとに分光して複数の第2分光成分R3を生成する。

50

具体的には、下流側分光器 104 は、第 1 分光成分 Q3 に含まれる、100 GHz 間隔に離散化された各周波数帯域（ピーク周波数がそれぞれ周波数 f_{03} 、 f_{13} 、 f_{23} 、 f_{33} である周波数帯域）ごとに第 1 分光成分 Q3 を分光する。

これにより、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{03} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R03 を下流側出力ポート 104b0 から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{13} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R13 を下流側出力ポート 104b1 から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{23} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R23 を下流側出力ポート 104b2 から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{33} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R33 を下流側出力ポート 104b3 から出力する。

10

【0037】

以上のように、一の下流側入力ポート 104a に入力された第 1 分光成分 Q に含まれる複数の第 2 分光成分のうちの一つと、他の下流側入力ポート 104a に入力された第 1 分光成分 Q に含まれる複数の第 2 分光成分のうちの一つとは、共通の下流側出力ポート 104b から出力される。

例えば、下流側入力ポート 104a0 に入力された第 1 分光成分 Q0 に含まれる複数の第 2 分光成分 R0 のうちの一つである第 2 分光成分 R00 と、下流側入力ポート 104a1 に入力された第 1 分光成分 Q1 に含まれる複数の第 2 分光成分 R1 のうちの一つである第 2 分光成分 R01 とは、共通の下流側出力ポート 104b0 から出力される。

また、下流側入力ポート 104a2 に入力された第 1 分光成分 Q2 に含まれる複数の第 2 分光成分 R2 のうちの一つである第 2 分光成分 R32 と、下流側入力ポート 104a3 に入力された第 1 分光成分 Q3 に含まれる複数の第 2 分光成分 R3 のうちの一つである第 2 分光成分 R33 とは、共通の下流側出力ポート 104b3 から出力される。

20

【0038】

また、上述したように、下流側入力ポート 104a のチャンネル間隔が第 2 の周波数差 δf ($\delta f = 25 \text{ GHz}$) とされている。これにより、下流側分光器 104 は、下流側入力ポート 104a の各々に入力された各第 1 分光成分 Q0、Q1、Q2、Q3 のうち、第 2 の周波数差 δf (25 GHz) の間隔にある分光成分（例えば、第 2 分光成分 R00、R01、R02、R03）を、共通の下流側出力ポート 104b（例えば、下流側出力ポート 104b0）から出力する。

30

【0039】

（下流側光導波路の構成）

図 9 は、第 1 の実施形態に係る下流側光導波路の構成を説明する第 1 の図である。

また、図 10 は、第 1 の実施形態に係る下流側光導波路の構成を説明する第 2 の図である。

図 9 に示すように、下流側分光器 104 の下流側出力ポート 104b の各々から出力された複数の第 2 分光成分 R0（R00～R30）、R1（R01～R31）、R2（R02～R32）、R3（R03～R33）は、下流側光導波路 105 を伝搬する。第 2 分光成分 R0、R1、R2、R3 は、それぞれ、下流側分光器 104 に到達した時間差（第 1 光路長差 $\delta L1$ に対応する遅延時間差）だけずれて、各下流側光導波路 105 を伝搬する。

40

ここで、上述したように、各下流側光導波路 105 は、それぞれ、異なる長さで設けられている。

具体的には、下流側出力ポート 104b1 に接続された下流側光導波路 1051 の長さは、下流側出力ポート 104b0 に接続された下流側光導波路 1050 の長さよりも第 2 光路長差 $\delta L2$ だけ長い長さとしてされている。ここで、第 2 光路長差 $\delta L2$ は、「 $\delta L2 = (C_0 / 2) \cdot (4 \cdot \delta t)$ 」で与えられている。

【0040】

同様に、下流側出力ポート 104b2 に接続された下流側光導波路 1052 の長さは、下流側出力ポート 104b1 に接続された下流側光導波路 1051 の長さよりも第 2 光路

50

長差 δL_2 だけ長い長さとなっている。更に、下流側出力ポート 104b3 に接続された下流側光導波路 1053 の長さは、下流側出力ポート 104b2 に接続された下流側光導波路 1052 の長さよりも第 2 光路長差 δL_2 だけ長い長さとなっている。

【0041】

したがって、下流側光導波路 1051 を伝搬する第 2 分光成分 R10 は、下流側光導波路 1050 を伝搬する第 2 分光成分 R00 よりも第 2 光路長差 δL_2 に対応する時間だけ遅れて光反射板 106 に到達する。

同様に、下流側光導波路 1052 を伝搬する第 2 分光成分 R20 は、下流側光導波路 1051 を伝搬する第 2 分光成分 R10 よりも第 2 光路長差 δL_2 に対応する時間だけ遅れて光反射板 106 に到達する。更に、下流側光導波路 1053 を伝搬する第 2 分光成分 R30 は、下流側光導波路 1052 を伝搬する第 2 分光成分 R20 よりも第 2 光路長差 δL_2 に対応する時間だけ遅れて光反射板 106 に到達する。

【0042】

この結果、各光反射板 106 で反射した各第 2 分光成分 R00、R10、R20、R30 は、図 10 に示すように、第 2 光路長差 δL_2 の 2 倍の長さに対応する遅延時間が生じた状態で、下流側分光器 104 に入力される。

なお、下流側光導波路 105 の伝搬中において、同一の下流側光導波路 105（例えば、下流側光導波路 1050）を伝搬する複数の第 2 分光成分（第 2 分光成分 R00、R01、R02、R03）の間に生じている遅延時間は変化しない。

【0043】

（作用効果）

図 11 は、第 1 の実施形態に係る光干渉断層撮影装置の作用効果を説明する第 1 の図である。

また、図 12 は、第 1 の実施形態に係る光干渉断層撮影装置の作用効果を説明する第 2 の図である。

光反射板 106（図 10）で反射した第 2 分光成分 R0～R3 は、それぞれ、下流側分光器 104、上流側光導波路 103、及び、上流側分光器 102 を逆に伝搬して、最終的に一つに合波されて、上流側入力ポート 102a から出力される。

そうすると、広帯域光 P が上流側入力ポート 102a に入力されてから、第 2 分光成分 R_{ji} （ $i = 0, 1, 2, 3, j = 0, 1, 2, 3$ ）の各々が上流側入力ポート 102a に戻ってくるまでに生じる全光路長差 ΔL は、式「 $\Delta L = (i + 4j) C_o \cdot \delta t$ 」で表される。

したがって、図 11 に示すように、第 2 分光成分 R00、R01、・・・、R03、R10、R11、・・・は、全て等しい時間間隔（ステップ間隔時間 δt ）で出力される。

【0044】

この結果、図 12 に示すように、光干渉断層撮影用光源ユニット 10 は、ステップ間隔時間 δt ごとに、第 2 の周波数差 δf （ $\delta f = 25 \text{ GHz}$ ）の間隔で周波数が掃引されてなる周波数掃引光を出力する。

【0045】

以上の通り、第 1 の実施形態に係る光干渉断層撮影装置 1 は、所定の周波数帯域に渡って強度分布が均一な広帯域光をパルス状に出力する広帯域パルス光源 100 と、パルス状の広帯域光 P を上流側入力ポート 102a から入力し、当該広帯域光 P が分光されてなる複数の第 1 分光成分 Q を、複数の上流側出力ポート 102b の各々から出力する上流側分光器 102 と、を備える。

また、光干渉断層撮影装置 1 は、複数の上流側出力ポート 102b ごとに異なる長さで設けられた上流側光導波路 103 を備える。

また、光干渉断層撮影装置 1 は、上流側光導波路 103 を通じて、複数の第 1 分光成分 Q を複数の下流側入力ポート 104a の各々から入力する下流側分光器 104 を備える。下流側分光器 104 は、当該第 1 分光成分 Q の各々（例えば、第 1 分光成分 Q0）が更に分光されてなる複数の第 2 分光成分（例えば、第 2 分光成分 R00、R10、R20、R

30) を、複数の下流側出力ポート 104b の各々から出力する。

また、光干渉断層撮影装置 1 は、複数の下流側出力ポート 104b ごとに異なる長さで設けられ、先端に光反射板 106 が設けられた下流側光導波路 105 を備える。

そして、一の下流側入力ポート 104a に入力された第 1 分光成分 Q に含まれる複数の第 2 分光成分のうちの一つ（例えば、第 2 分光成分 R00）と、他の下流側入力ポート 104a に入力された第 1 分光成分 Q に含まれる複数の第 2 分光成分のうちの一つ（例えば、第 2 分光成分 R01）とは、共通の下流側出力ポート 104b（例えば、下流側出力ポート 104b0）から出力される。

【0046】

このようにすることで、光干渉断層撮影装置 1 は、広帯域パルス光源 100 から出力されたパルス状の広帯域光 P を所望の分光成分（第 2 分光成分 R00、R01、・・・）に分光するとともに、当該分光成分ごとにそれぞれ異なる光路長を伝搬させる。そうすると、周波数帯域が異なる各分光成分の出力タイミングが、光路長差に応じた時間だけ遅延してずれるため、出力する光の周波数掃引を行うことができる。

この仕組みによれば、光路長差を所望に調整することで、周波数掃引の高速化を容易に実現することができる。また、広帯域光 P の周波数帯域をより広帯域化することで、掃引範囲の広帯域化も容易に実現することができる。

【0047】

また、本実施形態においては、分光成分ごとに異なる光路長は、上流側光導波路 103 に設けられた光路長差（第 1 光路長差 $\delta L1$ ）と下流側光導波路 105 に設けられた光路長差（第 2 光路長差 $\delta L2$ ）との組み合わせによって実現されている。したがって、例えば、下流側光導波路 105 に設けられた光路長差のみで光路長差を実現する場合よりも、必要とする光導波路の数を減らすことができる。

例えば、上述の例では、4 通りの第 1 光路長差 $\delta L1$ と、4 通りの第 2 光路長差 $\delta L2$ と、の組み合わせで 16 通りの光路長差を実現することができるが、必要な光導波路の数は、合計で 8 本である。また、1024 通りの光路長差を実現しようとする場合は、例えば、32 通りの第 1 光路長差 $\delta L1$ と、32 通りの第 2 光路長差 $\delta L2$ と、の組み合わせで実現することができるが、必要な光導波路の数は、合計で 64 本である。このように、従来では 1024 本必要であった光導波路の数を大幅に減らすことができる。

【0048】

以上より、第 1 の実施形態に係る光干渉断層撮影装置 1 によれば、周波数掃引の高速化が図られながらも、装置構成を簡素化することができる。

【0049】

< 第 2 の実施形態 >

以下、第 2 の実施形態に係る光干渉断層撮影装置を、図 13～図 19 を参照しながら説明する。

なお、第 2 の実施形態に係る光干渉断層撮影装置及び光干渉断層撮影用光源ユニットの構成は、第 1 の実施形態と同様であるため詳細な説明を省略する。

【0050】

（上流側光導波路の構成）

図 13 は、第 2 の実施形態に係る上流側光導波路の構成を説明する図である。

図 13 に示すように、第 2 の実施形態においても、上流側分光器 102 の上流側出力ポート 102b の各々から出力された複数の第 1 分光成分 Q（Q0～Q3）は、上流側光導波路 103 を伝搬する。

上流側出力ポート 102b1 に接続された上流側光導波路 1031 の長さは、上流側出力ポート 102b0 に接続された上流側光導波路 1030 の長さよりも第 1 光路長差 $\delta L1$ だけ短い長さとされている。ここで、第 2 の実施形態において、第 1 光路長差 $\delta L1$ は、「 $\delta L1 = (Co/2) \cdot (-3 \cdot \delta t)$ 」で与えられている（“ $-3 \cdot \delta t$ ”におけるマイナスの符号は、ここで基準とする上流側出力ポート 102b0 の長さよりも“短い”ことを表している）。

10

20

30

40

50

【0051】

同様に、上流側出力ポート102b2に接続された上流側光導波路1032の長さは、上流側出力ポート102b1に接続された上流側光導波路1031の長さよりも第1光路長差 $\delta L1$ ($\delta L1 = (Co/2) \cdot (-3 \cdot \delta t)$) だけ短い長さとされている。更に、上流側出力ポート102b3に接続された上流側光導波路1033の長さは、上流側出力ポート102b2に接続された上流側光導波路1032の長さよりも第1光路長差 $\delta L1$ ($\delta L1 = (Co/2) \cdot (-3 \cdot \delta t)$) だけ短い長さとされている。

【0052】

したがって、図13に示すように、上流側光導波路1031を伝搬する第1分光成分Q1は、上流側光導波路1030を伝搬する第1分光成分Q0よりも第1光路長差 $\delta L1$ に対応する時間だけ早く下流側分光器104に到達する。

同様に、上流側光導波路1032を伝搬する第1分光成分Q2は、上流側光導波路1031を伝搬する第1分光成分Q1よりも第1光路長差 $\delta L1$ に対応する時間だけ早く下流側分光器104に到達する。更に、上流側光導波路1033を伝搬する第1分光成分Q3は、上流側光導波路1032を伝搬する第1分光成分Q2よりも第1光路長差 $\delta L1$ に対応する時間だけ早く下流側分光器104に到達する。

ここで、第1分光成分Q0、Q1、Q2、Q3は、それぞれ、下流側分光器104の下流側入力ポート104a0、104a1、104a2、104a3の各々に入力される。

【0053】

(下流側分光器の機能)

図14～図17は、それぞれ、第2の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第1～第4の図である。

本実施形態に係る下流側分光器104は、第1の実施形態と同様に、4チャネルの入力ポート(下流側入力ポート104a)と4チャネルの出力ポート(下流側出力ポート104b)とを有するAWGである。

そして、本実施形態に係る下流側分光器104の下流側入力ポート104aのチャンネル間隔は、第1の周波数差 Δf ($\Delta f = 100 \text{ GHz}$)と第2の周波数差 δf ($\delta f = 25 \text{ GHz}$)との差分値($\Delta f - \delta f = 75 \text{ GHz}$)とされている。

例えば、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a0との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a1との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差が75GHzとされている。

同様に、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a1との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a2との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差も75GHzとされている。

更に、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a2との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a3との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差も75GHzとされている。

他の下流側出力ポート104b1、104b2、104b3の各々に対する上記4つの下流側入力ポート104aとの関係についても同様とされる。

【0054】

また、本実施形態に係る下流側分光器104の、下流側出力ポート104bのチャンネル間隔は、第1の実施形態と同様に、第1の周波数差 Δf ($\Delta f = 100 \text{ GHz}$)とされている。

【0055】

本実施形態においては、上流側光導波路1033(図13)を伝搬する第1分光成分Q3が最初に下流側分光器104に到達する。

下流側分光器104において第1分光成分Q3が下流側入力ポート104a3に入力さ

10

20

30

40

50

れた場合、下流側分光器 104 は、図 14 に示すように、当該第 1 分光成分 Q3 を、更に所定の周波数帯別に分光して複数の第 2 分光成分 R3 を生成する。

具体的には、下流側分光器 104 は、第 1 分光成分 Q3 に含まれる、100 GHz 間隔に離散化された各周波数帯域（ピーク周波数がそれぞれ周波数 f_{03} 、 f_{13} 、 f_{23} である周波数帯域）ごとに第 1 分光成分 Q3 を分光する。

これにより、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{03} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R03 を下流側出力ポート 104b1 から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{13} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R13 を下流側出力ポート 104b2 から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{23} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R23 を下流側出力ポート 104b3 から出力する。

10

【0056】

また、第 1 分光成分 Q3 が下流側入力ポート 104a3 に入力されてから所定時間（第 1 光路長差 δL_1 に対応する遅延時間）経過後、続いて、第 1 分光成分 Q2 が下流側入力ポート 104a2 に入力される。

上述の下流側分光器 104 において第 1 分光成分 Q2 が下流側入力ポート 104a2 に入力された場合、下流側分光器 104 は、図 15 に示すように、当該第 1 分光成分 Q2 を、更に所定の周波数帯別に分光して複数の第 2 分光成分 R2 を生成する。

具体的には、下流側分光器 104 は、第 1 分光成分 Q2 に含まれる、100 GHz 間隔に離散化された各周波数帯域（ピーク周波数がそれぞれ周波数 f_{02} 、 f_{12} 、 f_{22} 、 f_{32} である周波数帯域）ごとに第 1 分光成分 Q2 を分光する。

20

これにより、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{02} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R02 を下流側出力ポート 104b0 から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{12} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R12 を下流側出力ポート 104b1 から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{22} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R22 を下流側出力ポート 104b2 から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{32} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R32 を下流側出力ポート 104b3 から出力する。

【0057】

また、第 1 分光成分 Q2 が下流側入力ポート 104a2 に入力されてから所定時間（第 1 光路長差 δL_1 に対応する遅延時間）経過後、続いて、第 1 分光成分 Q1 が下流側入力ポート 104a1 に入力される。

30

上述の下流側分光器 104 において第 1 分光成分 Q1 が下流側入力ポート 104a1 に入力された場合、下流側分光器 104 は、図 16 に示すように、当該第 1 分光成分 Q1 を、更に所定の周波数帯別に分光して複数の第 2 分光成分 R1 を生成する。

具体的には、下流側分光器 104 は、第 1 分光成分 Q1 に含まれる、100 GHz 間隔に離散化された各周波数帯域（ピーク周波数がそれぞれ周波数 f_{11} 、 f_{21} 、 f_{31} である周波数帯域）ごとに第 1 分光成分 Q1 を分光する。

これにより、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{11} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R11 を下流側出力ポート 104b0 から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{21} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R21 を下流側出力ポート 104b1 から出力する。また、下流側分光器 104 は、ピーク周波数が周波数 f_{31} の周波数帯域のみからなる第 2 分光成分 R31 を下流側出力ポート 104b2 から出力する。

40

【0058】

また、第 1 分光成分 Q1 が下流側入力ポート 104a1 に入力されてから所定時間（第 1 光路長差 δL_1 に対応する遅延時間）経過後、続いて、第 1 分光成分 Q0 が下流側入力ポート 104a0 に入力される。

上述の下流側分光器 104 において第 1 分光成分 Q0 が下流側入力ポート 104a0 に入力された場合、下流側分光器 104 は、図 17 に示すように、当該第 1 分光成分 Q0 を

50

、更に所定の周波数帯別に分光して複数の第2分光成分R0を生成する。

具体的には、下流側分光器104は、第1分光成分Q0に含まれる、100GHz間隔に離散化された各周波数帯域（ピーク周波数がそれぞれ周波数f20、f30である周波数帯域）ごとに第1分光成分Q0を分光する。

これにより、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数f20の周波数帯域のみからなる第2分光成分R20を下流側出力ポート104b0から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数f30の周波数帯域のみからなる第2分光成分R30を下流側出力ポート104b1から出力する。

【0059】

上述したように、下流側入力ポート104aのチャンネル間隔が第1の周波数差 Δf と第2の周波数差 δf との差分値 $\Delta f - \delta f$ （ $\Delta f - \delta f = 75\text{GHz}$ ）とされている。これにより、下流側分光器104は、下流側入力ポート104aの各々に入力された各第1分光成分Q0、Q1、Q2、Q3のうち、差分値 $\Delta f - \delta f$ （75GHz）の間隔にある分光成分（例えば、第2分光成分R03、R12、R21、R30）を、共通の下流側出力ポート104b（例えば、下流側出力ポート104b1）から出力する。

【0060】

（下流側光導波路の構成）

図18は、第2の実施形態に係る下流側光導波路の構成を説明する図である。

図18に示すように、下流側分光器104の下流側出力ポート104bの各々から出力された複数の第2分光成分R20～R30、R11～R31、R02～R32、R03～R23は、下流側光導波路105を伝搬する。第2分光成分R20～R30、R11～R31、R02～R32、R03～R23は、それぞれ、下流側分光器104に到達した時間差（第1光路長差 $\delta L1$ に対応する遅延時間差）だけずれて、各下流側光導波路105を伝搬する。

【0061】

ここで、上述したように、各下流側光導波路105は、それぞれ、異なる長さで設けられている。本実施形態に係る下流側光導波路105の各々の長さは、第1の実施形態と同様とされている。即ち、下流側光導波路1050、下流側光導波路1051、下流側光導波路1052、下流側光導波路1053の順で、それぞれ、第2光路長差 $\delta L2$ （ $\delta L2 = (Co/2) \cdot (4 \cdot \delta t)$ ）の間隔で長くなるように設けられている。

【0062】

（作用効果）

図19は、第2の実施形態に係る光干渉断層撮影装置の作用効果を説明する図である。

以上のような構成によれば、光反射板106（図18）で反射した第2分光成分R20～R30、R11～R31、R02～R32、R03～R23は、それぞれ、下流側分光器104、上流側光導波路103、及び、上流側分光器102を逆に伝搬して、最終的に一つに合波されて、上流側入力ポート102aから出力される。

そうすると、広帯域光Pが上流側入力ポート102aに入力されてから、第2分光成分Rji（ $i = 0, 1, 2, 3, j = 0, 1, 2, 3$ ）の各々が上流側入力ポート102aに戻ってくるまでに生じる全光路長差 ΔL は、式「 $\Delta L = (-3i + 4j) Co \cdot \delta t$ 」で表される。

したがって、図19に示すように、第2分光成分R11、R12、R13、・・・は、全て等しい時間間隔（ステップ間隔時間 δt ）で出力される。

【0063】

この結果、光干渉断層撮影用光源ユニット10は、ステップ間隔時間 δt ごとに、第2の周波数差 δf （ $\delta f = 25\text{GHz}$ ）の間隔で周波数が掃引されてなる周波数掃引光を出力する。

【0064】

以上のように、第2の実施形態に係る下流側分光器104は、一の下流側出力ポート104bと一の下流側入力ポート104aとの間における通過可能周波数帯域と、当該一の

10

20

30

40

50

下流側出力ポート 104b と他の下流側入力ポート 104a との間における通過可能周波数帯域と、の間の周波数差が、第 1 の周波数差 Δf と第 2 の周波数差 δf との差分値とされている。

即ち、第 1 の実施形態に係る下流側分光器 104 の下流側入力ポート 104a のチャンネル間隔は、第 2 の周波数差 δf (25 GHz) であったのに対し、第 2 の実施形態に係る下流側分光器 104 の下流側入力ポート 104a のチャンネル間隔は、第 1 の周波数差 Δf と第 2 の周波数差 δf との差分値 (75 GHz) とされている。

このように、AWG である下流側分光器 104 の入力側の分解能 (どの程度の周波数差を有意に分光できるか) を 25 GHz 間隔から 75 GHz 間隔に広げることができるため、下流側分光器 104 の製作に要する労力や製造コストを低減することができる。

10

【0065】

< 第 3 の実施形態 >

以下、第 3 の実施形態に係る光干渉断層撮影装置を、図 20 ~ 図 26 を参照しながら説明する。

なお、第 3 の実施形態に係る光干渉断層撮影装置及び光干渉断層撮影用光源ユニットの構成は、第 1 の実施形態、第 2 の実施形態と同様であるため詳細な説明を省略する。

【0066】

(上流側光導波路の構成)

図 20 は、第 3 の実施形態に係る上流側光導波路の構成を説明する図である。

図 20 に示すように、第 3 の実施形態においても、上流側分光器 102 の上流側出力ポート 102b の各々から出力された複数の第 1 分光成分 Q ($Q_0 \sim Q_3$) は、上流側光導波路 103 を伝搬する。

20

上流側出力ポート 102b1 に接続された上流側光導波路 1031 の長さは、上流側出力ポート 102b0 に接続された上流側光導波路 1030 の長さよりも第 1 光路長差 δL_1 だけ長い長さとされている。ここで、第 3 の実施形態において、第 1 光路長差 δL_1 は、 $\delta L_1 = (C_0 / 2) \cdot (5 \cdot \delta t)$ で与えられている。

【0067】

同様に、上流側出力ポート 102b2 に接続された上流側光導波路 1032 の長さは、上流側出力ポート 102b1 に接続された上流側光導波路 1031 の長さよりも第 1 光路長差 δL_1 ($\delta L_1 = (C_0 / 2) \cdot (5 \cdot \delta t)$) だけ長い長さとされている。更に、上流側出力ポート 102b3 に接続された上流側光導波路 1033 の長さは、上流側出力ポート 102b2 に接続された上流側光導波路 1032 の長さよりも第 1 光路長差 δL_1 ($\delta L_1 = (C_0 / 2) \cdot (5 \cdot \delta t)$) だけ長い長さとされている。

30

【0068】

したがって、図 20 に示すように、上流側光導波路 1031 を伝搬する第 1 分光成分 Q_1 は、上流側光導波路 1030 を伝搬する第 1 分光成分 Q_0 よりも第 1 光路長差 δL_1 に対応する時間だけ遅く下流側分光器 104 に到達する。

同様に、上流側光導波路 1032 を伝搬する第 1 分光成分 Q_2 は、上流側光導波路 1031 を伝搬する第 1 分光成分 Q_1 よりも第 1 光路長差 δL_1 に対応する時間だけ遅く下流側分光器 104 に到達する。更に、上流側光導波路 1033 を伝搬する第 1 分光成分 Q_3 は、上流側光導波路 1032 を伝搬する第 1 分光成分 Q_2 よりも第 1 光路長差 δL_1 に対応する時間だけ遅く下流側分光器 104 に到達する。

40

ここで、第 1 分光成分 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 は、それぞれ、下流側分光器 104 の下流側入力ポート 104a0、104a1、104a2、104a3 の各々に入力される。

【0069】

(下流側分光器の機能)

図 21 ~ 図 24 は、それぞれ、第 3 の実施形態に係る下流側分光器の機能を説明する第 1 ~ 第 4 の図である。

本実施形態に係る下流側分光器 104 は、第 1 の実施形態、第 2 の実施形態と同様に、4 チャンネルの入力ポート (下流側入力ポート 104a) と 4 チャンネルの出力ポート (下流

50

側出力ポート104b)とを有するAWGである。

そして、本実施形態に係る下流側分光器104の下流側入力ポート104aのチャンネル間隔は、第1の周波数差 Δf ($\Delta f = 100 \text{ GHz}$)と第2の周波数差 δf ($\delta f = 25 \text{ GHz}$)との加算値 ($\Delta f + \delta f = 125 \text{ GHz}$)とされている。

例えば、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a0との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a1との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差が125GHzとされている。

同様に、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a1との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a2との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差も125GHzとされている。

更に、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a2との間における通過可能周波数帯域のピークと、下流側出力ポート104b0と下流側入力ポート104a3との間における通過可能周波数帯域のピークと、の間の周波数差も125GHzとされている。

他の下流側出力ポート104b1、104b2、104b3の各々に対する上記4つの下流側入力ポート104aとの関係についても同様とされる。

【0070】

また、本実施形態に係る下流側分光器104の、下流側出力ポート104bのチャンネル間隔は、第1の実施形態、第2の実施形態と同様に、第1の周波数差 Δf ($\Delta f = 100 \text{ GHz}$)とされている。

【0071】

上述の下流側分光器104において第1分光成分Q0が下流側入力ポート104a0に

らなる第2分光成分R02を下流側出力ポート104b1から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数f12の周波数帯域のみからなる第2分光成分R12を下流側出力ポート104b2から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数f22の周波数帯域のみからなる第2分光成分R22を下流側出力ポート104b3から出力する。

【0074】

また、第1分光成分Q2が下流側入力ポート104a2に入力されてから所定時間（第1光路長差 $\delta L1$ に対応する遅延時間）経過後、更に、第1分光成分Q3が下流側入力ポート104a3に入力される。

上述の下流側分光器104において第1分光成分Q3が下流側入力ポート104a3に入力された場合、下流側分光器104は、図24に示すように、当該第1分光成分Q3を、更に第1の周波数間隔 Δf （100GHz）ごとに分光して複数の第2分光成分R3を生成する。

これにより、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数f03の周波数帯域のみからなる第2分光成分R03を下流側出力ポート104b0から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数f13の周波数帯域のみからなる第2分光成分R13を下流側出力ポート104b1から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数f23の周波数帯域のみからなる第2分光成分R23を下流側出力ポート104b2から出力する。また、下流側分光器104は、ピーク周波数が周波数f33の周波数帯域のみからなる第2分光成分R33を下流側出力ポート104b3から出力する。

【0075】

上述したように、下流側入力ポート104aのチャネル間隔が第1の周波数差 Δf と第2の周波数差 δf との加算値 $\Delta f + \delta f$ （ $\Delta f + \delta f = 125\text{GHz}$ ）とされている。これにより、下流側分光器104は、下流側入力ポート104aの各々に入力された各第1分光成分Q0、Q1、Q2、Q3のうち、加算値 $\Delta f + \delta f$ （125GHz）の間隔にある分光成分（例えば、第2分光成分R00、R11、R22、R33）を、共通の下流側出力ポート104b（例えば、下流側出力ポート104b3）から出力する。

【0076】

（下流側光導波路の構成）

図25は、第3の実施形態に係る下流側光導波路の構成を説明する図である。

図25に示すように、下流側分光器104の下流側出力ポート104bの各々から出力された複数の第2分光成分R00、R01～R11、R02～R22、R03～R33は、下流側光導波路105を伝搬する。第2分光成分R00、R01～R11、R02～R22、R03～R33は、それぞれ、下流側分光器104に到達した時間差（第1光路長差 $\delta L1$ に対応する遅延時間差）だけずれて、各下流側光導波路105を伝搬する。

【0077】

ここで、上述したように、各下流側光導波路105は、それぞれ、異なる長さで設けられている。本実施形態に係る下流側光導波路105の各々の長さは、第1の実施形態、第2の実施形態と同様とされている。即ち、下流側光導波路1050、下流側光導波路1051、下流側光導波路1052、下流側光導波路1053の順で、それぞれ、第2光路長差 $\delta L2$ （ $\delta L2 = (Co/2) \cdot (4 \cdot \delta t)$ ）の間隔で長くなるように設けられている。

【0078】

（作用効果）

図26は、第3の実施形態に係る光干渉断層撮影装置の作用効果を説明する図である。

以上のような構成によれば、光反射板106（図25）で反射した第2分光成分R00、R01～R11、R02～R22、R03～R33は、それぞれ、下流側分光器104、上流側光導波路103、及び、上流側分光器102を逆に伝搬して、最終的に一つに合波されて、上流側入力ポート102aから出力される。

そうすると、広帯域光Pが上流側入力ポート102aに入力されてから、第2分光成分

R_{ji} ($i = 0, 1, 2, 3, j = 0, 1, 2, 3$) の各々が上流側入力ポート 102a に戻ってくるまでに生じる全光路長差 ΔL は、式「 $\Delta L = (5i + 4j) C_o \cdot \delta t$ 」で表される。

したがって、図 26 に示すように、第 2 分光成分 R_{00} 、 R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} は、全て等しい時間間隔（ステップ間隔時間 δt ）で出力される。

【0079】

この結果、光干渉断層撮影用光源ユニット 10 は、ステップ間隔時間 δt ごとに、第 2 の周波数差 δf ($\delta f = 25 \text{ GHz}$) の間隔で周波数が掃引されてなる周波数掃引光を出力する。

【0080】

以上のように、第 3 の実施形態に係る下流側分光器 104 は、一の下流側出力ポート 104b と一の下流側入力ポート 104a との間における通過可能周波数帯域と、当該一の下流側出力ポート 104b と他の下流側入力ポート 104a との間における通過可能周波数帯域と、の間の周波数差が、第 1 の周波数差 Δf と第 2 の周波数差 δf との加算値とされている。

即ち、第 1 の実施形態に係る下流側分光器 104 の下流側入力ポート 104a のチャンネル間隔は、第 2 の周波数差 δf (25 GHz) であったのに対し、第 2 の実施形態に係る下流側分光器 104 の下流側入力ポート 104a のチャンネル間隔は、第 1 の周波数差 Δf と第 2 の周波数差 δf との加算値 (125 GHz) とされている。

このように、AWG である下流側分光器 104 の入力側の分解能を 25 GHz 間隔から 125 GHz 間隔に広げることができるため、下流側分光器 104 の製作に要する労力や製造コストを低減することができる。

【0081】

<他の実施形態>

以上、第 1 の実施形態に係る光干渉断層撮影装置 1 について詳細に説明したが、第 1 の実施形態に係る光干渉断層撮影装置 1 の具体的な態様は、上述のものに限定されることはなく、要旨を逸脱しない範囲内において種々の設計変更等を加えることは可能である。

例えば、上述の第 1 の実施形態～第 3 の実施形態においては、光サーキュレータ 101 に近い側（上流側）にマッハツェンダー干渉計である上流側分光器 102 を設け、光サーキュレータ 101 から遠い側（下流側）に AWG である下流側分光器 104 を設ける態様とした。

他の実施形態においては、光サーキュレータ 101 に近い側（上流側）に AWG である下流側分光器 104 を設け、光サーキュレータ 101 から遠い側（下流側）にマッハツェンダー干渉計である上流側分光器 102 を設ける態様としてもよい。

【0082】

以上、本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものとする。

【符号の説明】

【0083】

- 1 光干渉断層撮影装置
- 10 光干渉断層撮影用光源ユニット
- 100 広帯域パルス光源
- 101 光サーキュレータ
- 102 上流側分光器
- 102a 上流側入力ポート
- 102b 上流側出力ポート

10

20

30

40

50

- 103 上流側光導波路
- 104 下流側分光器
- 104a 下流側入力ポート
- 104b 下流側出力ポート
- 105 下流側光導波路
- 106 光反射板
- 11 光検出器
- 12 光カプラ
- 13 基準ミラー
- 2 撮影対象物

10

【図1】

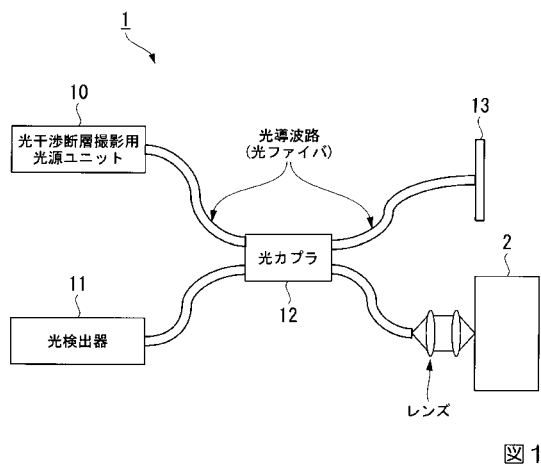


図1

【図2】

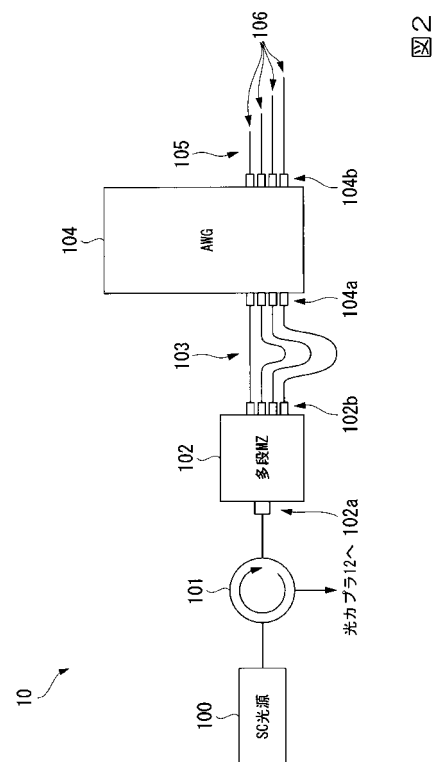


図2

【図 3】

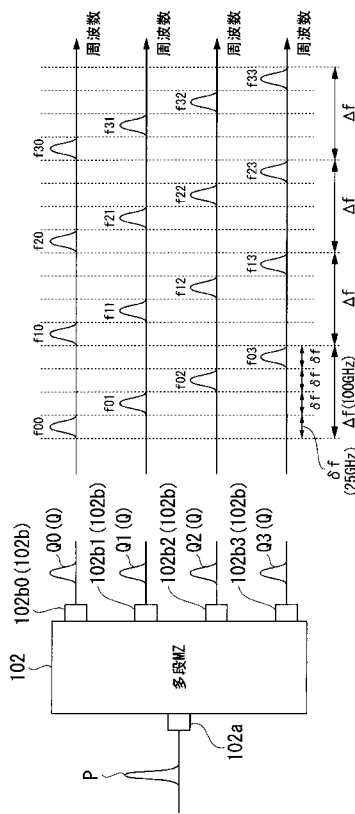


図 3

【図 4】

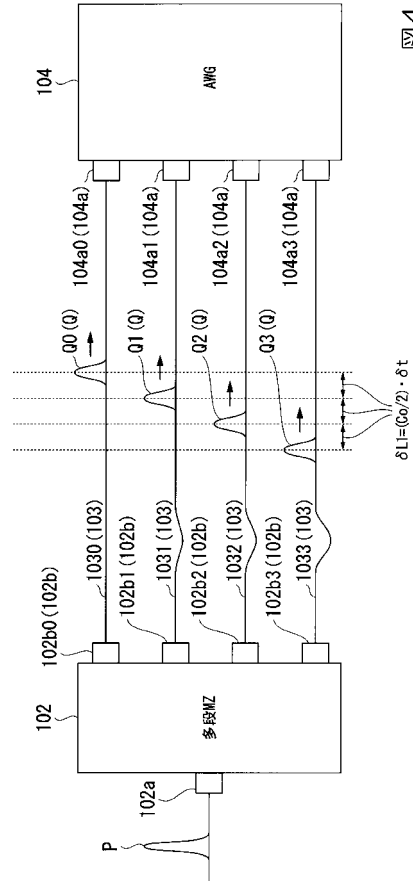


図 4

【図 5】

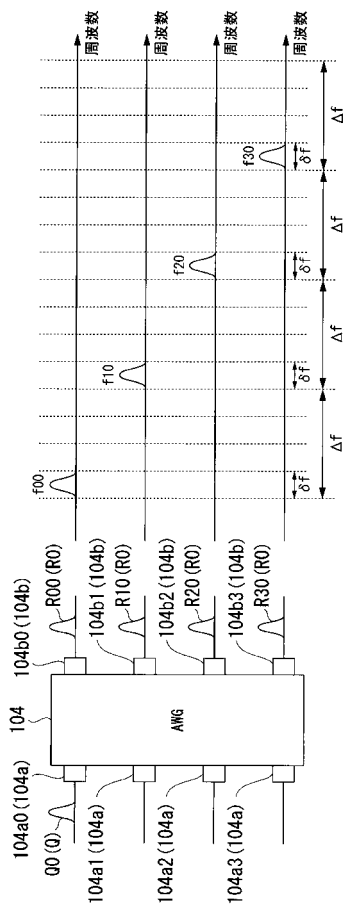


図 5

【図 6】

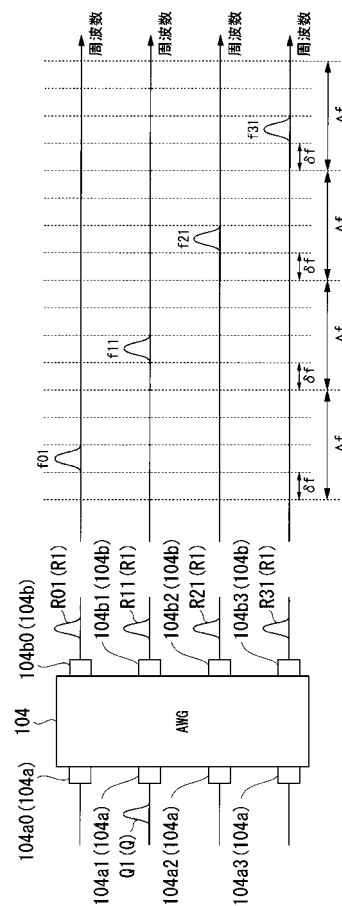


図 6

【図 7】

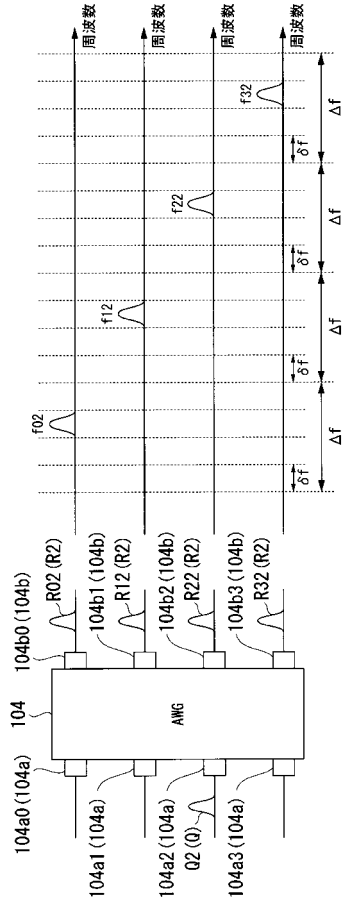


図 7

【図 8】

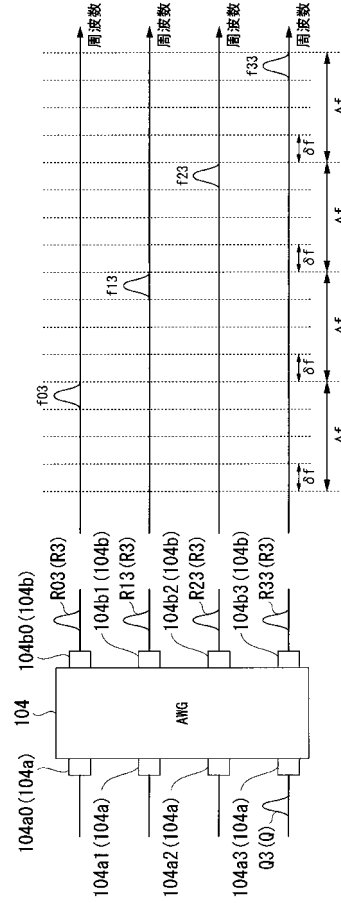


図 8

【図 9】

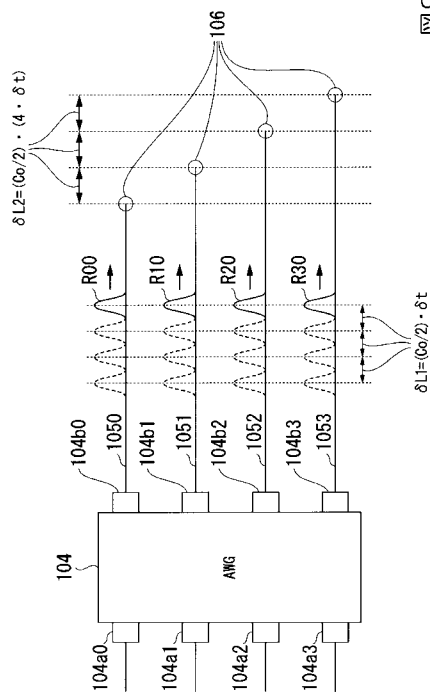


図 9

【図 10】

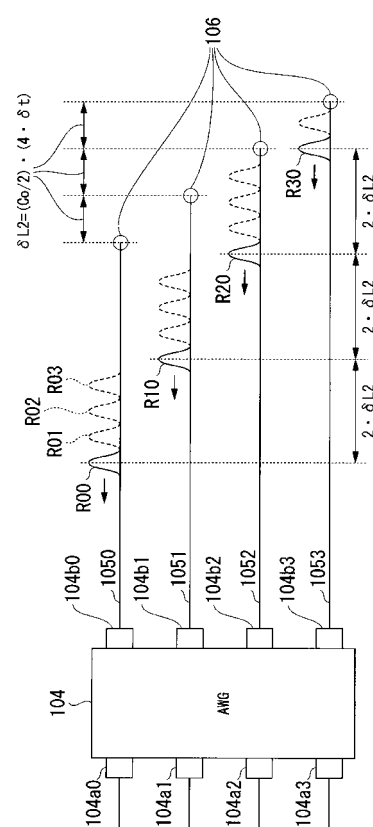


図 10

【図 1 1】

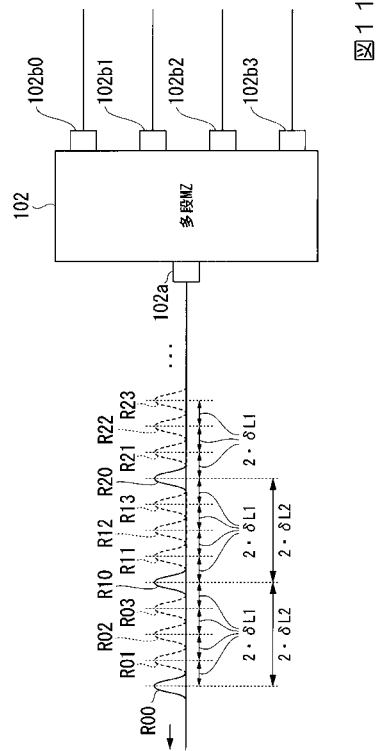


図 1 1

【図 1 2】

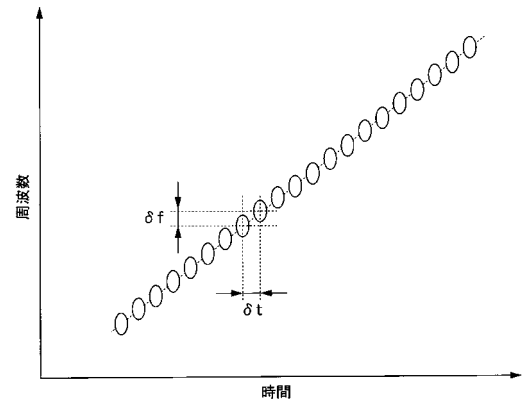


図 1 2

【図 1 3】

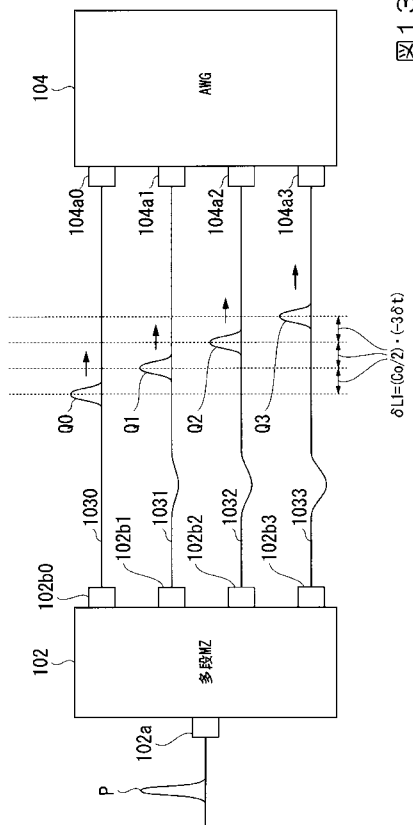


図 1 3

【図 1 4】

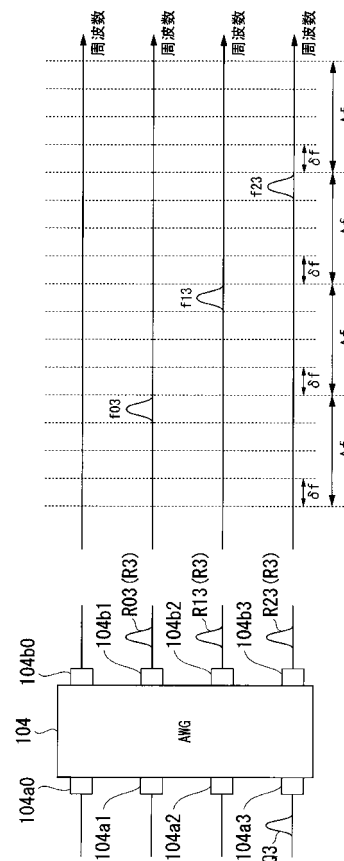


図 1 4

【図 19】

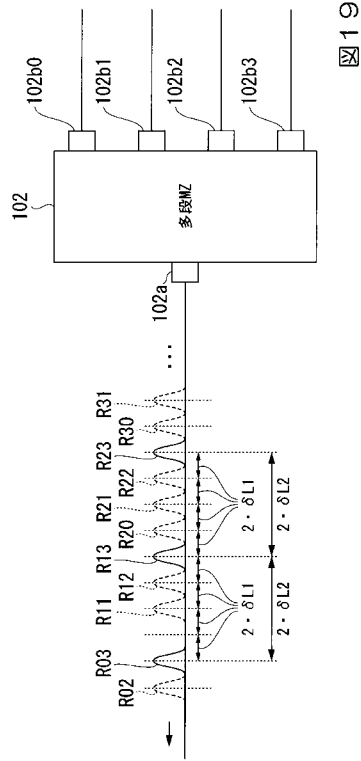


図 19

【図 20】

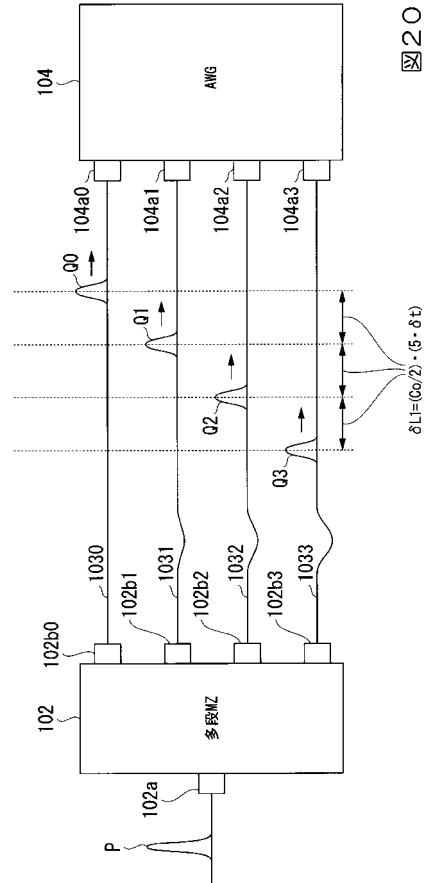


図 20

【図 21】

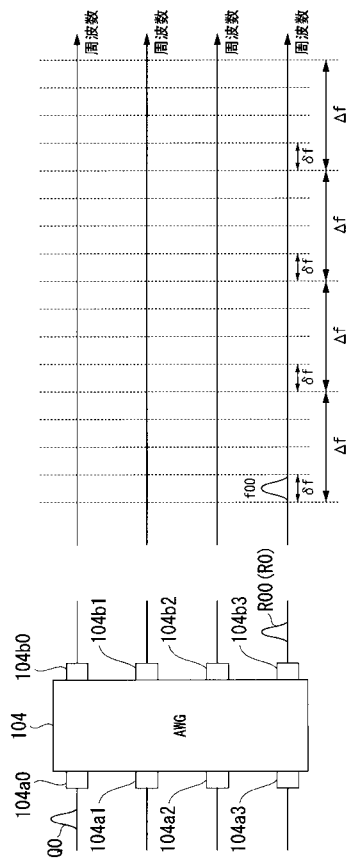


図 21

【図 22】

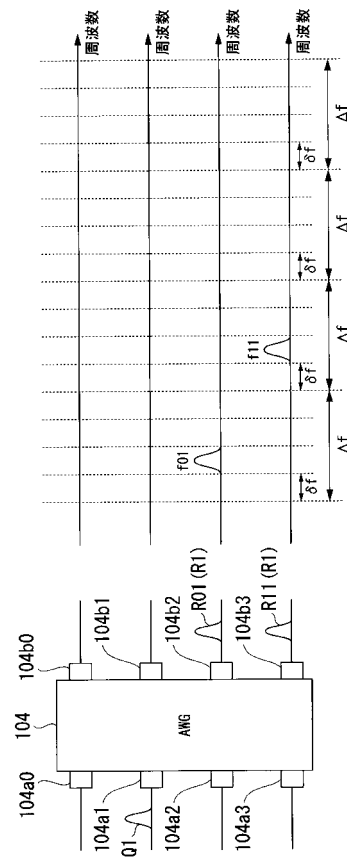


図 22

