

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02015/045266

発行日 平成29年3月9日 (2017.3.9)

(43) 国際公開日 平成27年4月2日 (2015.4.2)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)  
**GO 1 N 21/27 (2006.01)** GO 1 N 21/27 Z 2 G O 5 9  
 GO 1 N 21/27 H

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 46 頁)

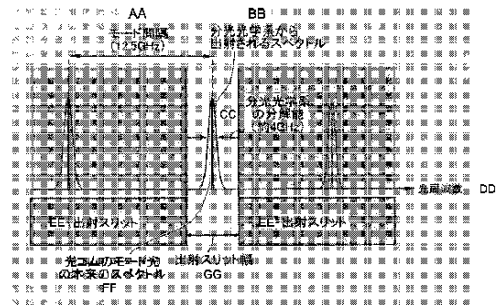
出願番号	特願2015-538858 (P2015-538858)	(71) 出願人	504132881 国立大学法人東京農工大学 東京都府中市晴見町3-8-1
(21) 国際出願番号	PCT/JP2014/004314	(71) 出願人	504190548 国立大学法人埼玉大学 埼玉県さいたま市桜区下大久保255
(22) 国際出願日	平成26年8月21日 (2014.8.21)	(74) 代理人	110000877 龍華国際特許業務法人
(31) 優先権主張番号	特願2013-197192 (P2013-197192)	(72) 発明者	黒川 隆志 東京都府中市晴見町3-8-1 国立大学 法人東京農工大学内
(32) 優先日	平成25年9月24日 (2013.9.24)	(72) 発明者	柏木 謙 東京都府中市晴見町3-8-1 国立大学 法人東京農工大学内
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 測定装置

(57) 【要約】

分光光学系を有する測定装置の測定帯域を広げ、当該測定装置の制御系を簡単にし、かつ、当該測定装置を安価にする。被測定試料の透過特性または反射特性を測定する測定装置であって、一定の周波数間隔を有する複数のモード光を含むコム光を出力する周波数コム光源と、コム光が入力され、コム光における複数のモード光を一つずつ周波数分解する分光光学系と、分光光学系から取り出された複数のモード光のうち少なくとも一つのモード光の強度を検出する光検出器とを備え、光検出器が強度を検出する一つのモード光は、コム光源の出力から、光検出器の入力までの間に配置された被測定試料を透過または反射し、コム光のモード間隔周波数は、分光光学系の光周波数分解能より大きい測定装置を提供する。



AA... MODE INTERVAL (12.5 GHz)  
 BB... SPECTRUM IRRADIATED FROM SPECTROSCOPIC OPTICAL SYSTEM  
 CC... RESOLUTION OF SPECTROSCOPIC OPTICAL SYSTEM (APPROXIMATELY 4 GHz)  
 DD... OPTICAL FREQUENCY  
 EE... EXIT SLIT  
 FF... ORIGINAL LIGHT MODE SPECTRUM OF OPTICAL COMB  
 GG... EXIT SLIT WIDTH

**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

被測定試料の透過特性または反射特性を測定する測定装置であって、  
一定の周波数間隔を有する複数のモード光を含むコム光を出力する周波数コム光源と、  
前記コム光が入力され、前記コム光における前記複数のモード光を一つずつ周波数分解する分光光学系と、  
前記分光光学系から取り出された前記複数のモード光のうち少なくとも一つのモード光の強度を検出する光検出器と  
を備え、  
前記光検出器が強度を検出する前記一つのモード光は、前記コム光源の出力から、前記光検出器の入力までの間に配置された前記被測定試料を透過または反射し、  
前記コム光のモード間隔周波数は、前記分光光学系の光周波数分解能より大きい測定装置。

10

**【請求項 2】**

前記モード間隔周波数は、前記分光光学系の光周波数分解能の 2 倍以上である  
請求項 1 に記載の測定装置。

**【請求項 3】**

前記分光光学系は、前記複数のモード光のうち、指定される一つのモード光だけを取り出す出射スリットを有し、  
前記光検出器は、前記出射スリットから出射された前記一つのモード光の強度を検出する単一の光電変換素子を有する、  
請求項 1 または 2 に記載の測定装置。

20

**【請求項 4】**

前記光検出器は、前記分光光学系によって周波数分解された前記複数のモード光を並列的に検出するイメージセンサを有する、請求項 1 または 2 に記載の測定装置。

**【請求項 5】**

前記コム光源は、  
前記モード間隔周波数と同一の繰り返し周波数の光パルスを出力するパルス光源と、  
前記パルス光源が出力する前記光パルスのスペクトルを周波数シフトさせる周波数シフタと、  
前記光パルスの有する周波数帯域を拡大した前記コム光を、前記光パルスに基づいて生成する帯域拡大部と  
を有する請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載の測定装置。

30

**【請求項 6】**

前記周波数シフタにおけるシフト量に応じて、前記分光光学系が取り出す光周波数の範囲をシフトさせる制御機能を有する制御部を更に備える  
請求項 5 に記載の測定装置。

**【請求項 7】**

前記パルス光源は、  
単一周波数の連続光を出力する連続発振レーザと、  
前記連続光の周波数を、前記モード間隔周波数に応じた周波数で変調して、複数のモード光を含む種コム光を生成する光変調器と、  
前記種コム光における各モード光の位相および振幅を調整し、光パルスを合成する光パルス合成部と  
を有する請求項 5 または 6 に記載の測定装置。

40

**【請求項 8】**

前記連続光の周波数を、前記モード間隔周波数よりも小さい周波数で位相変調して、それぞれのモード光に 1 次の両側サイドバンド光を生じさせて、前記光変調器に入力する位相変調器と、  
前記位相変調器に信号を入力する信号発生器と、

50

前記光検出器の出力と前記信号発生器の信号が位相調整された信号とを受信するロックイン検波器と

を更に有し、

前記分光光学系は、指定される1つのモード光と当該モード光の前記1次の両側サイドバンド光とを同時に取り出して前記光検出器に入射し、

前記光検出器から出力される電気信号は前記ロックイン検波器に送られ、変調信号を用いて位相敏感検波され、直交した2つの信号が取り出される

請求項7に記載の測定装置。

【請求項9】

前記光変調器は、前記連続光が分岐して入力される第1の光変調器および第2の光変調器を含み、

10

前記第1の光変調器は、前記モード間隔周波数が $f_1$ の前記コム光の前記種コム光を生成し、前記第2の光変調器は、前記モード間隔周波数が $f_2$ の前記コム光の前記種コム光を生成し、

$f_1$ と $f_2$ との差は、 $f_1$ および $f_2$ のいずれよりも小さく、

前記モード間隔周波数が $f_1$ の前記コム光および前記モード間隔周波数が $f_2$ の前記コム光の一方または両方が、前記被測定試料を透過または反射しており、

前記モード間隔周波数が $f_1$ の前記コム光と前記モード間隔周波数が $f_2$ の前記コム光とは合波され、前記分光光学系に入射される

請求項7に記載の測定装置。

20

【請求項10】

前記光パルス合成部は、前記第1の光変調器および前記第2の光変調器に対応する第1の光パルス合成部および第2の光パルス合成部を含み、

前記帯域拡大部は、前記第1の光パルス合成部および前記第2の光パルス合成部に対応する第1の帯域拡大部および第2の帯域拡大部を含む

請求項9に記載の測定装置。

【請求項11】

被測定試料の透過特性または反射特性をヘテロダイン検波により測定する測定装置であって、

周波数が異なる複数のモード光を含むコム光を出力するコム光源と、

30

前記コム光源から出力されて異なるモード間隔周波数のコム光となった2種類のコム光が、合波されて入力されるデュアルコム受光器と

を備え、

前記コム光源は、

前記コム光において隣接する複数のモード光の周波数間隔であるモード間隔周波数と同一の間隔を有し、且つ、前記コム光よりも少ない数のモード光を含む光パルスを出力するパルス光源と、

前記モード光が存在する周波数帯域を前記光パルスより拡大した前記コム光を、前記光パルスに基づいて生成する帯域拡大部と、

前記パルス光源が出力する前記光パルスの周波数を、前記モード間隔周波数よりも狭い範囲でシフトさせることで、前記コム光の各モード光の周波数を一括してシフトさせる周波数シフトと

40

を有し、

前記パルス光源は、

連続光を出力する連続発振レーザと、

前記連続光の周波数を、前記モード間隔周波数に応じた周波数で変調して、複数のモード光を含む種コム光を生成する、第1の光変調器および第2の光変調器と、

前記種コム光における各モード光の位相および振幅を調整し、光パルスを合成する光パルス合成部と、

を含み、

50

前記連続光は2つに分岐され、前記第1の光変調器および前記第2の光変調器にそれぞれ入射されて、

前記第1の光変調器は、前記モード間隔周波数が $f_1$ の前記コム光の前記種コム光を生成し、前記第2の光変調器は、前記モード間隔周波数が $f_2$ の前記コム光の前記種コム光を生成し、

$f_1$ と $f_2$ との差は、 $f_1$ および $f_2$ のいずれよりも小さく、

前記モード間隔周波数が $f_1$ の前記コム光および前記モード間隔周波数が $f_2$ の前記コム光の一方または両方が、前記被測定試料を透過または反射しており、

前記モード間隔周波数が $f_1$ の前記コム光と前記モード間隔周波数が $f_2$ の前記コム光とは合波され、前記デュアルコム受光器に入射される測定装置。

10

【請求項12】

前記光パルス合成部は、前記第1の光変調器および前記第2の光変調器に対応する第1の光パルスシンセサイザおよび第2の光パルスシンセサイザを含み、

前記帯域拡大部は、前記第1の光パルスシンセサイザおよび前記第2の光パルスシンセサイザに対応する第1の帯域拡大部および第2の帯域拡大部を含む

請求項11に記載の測定装置。

【請求項13】

前記光パルス合成部と前記帯域拡大部との間に、光周波数シフタをさらに備える

請求項8から12のいずれか一項に記載の測定装置。

【請求項14】

20

前記光パルス合成部は、前記第1の光変調器および前記第2の光変調器に対応する第1の分散付与器および第2の分散付与器を含み、

前記帯域拡大部は、前記第1の分散付与器および前記第2の分散付与器に対応する第1の帯域拡大部および第2の帯域拡大部を含み、

前記デュアルコム受光器は、

異なるモード間隔周波数のコム光が合波されて入力される光電変換素子と、

前記光電変換素子からの出力が入力されるディジタイザと

を有し、

前記測定装置は、

前記第1の分散付与器と前記第1の帯域拡大部との間に設けられた一の周波数シフタと

30

前記連続発振レーザからの出力を前記第1の光変調器および前記第2の光変調器に分岐する分岐コプラと前記連続発振レーザとの間に設けられた他の周波数シフタと

をさらに備える、

請求項11に記載の測定装置。

【請求項15】

被測定光源の発光スペクトルをヘテロダイン検波により測定する測定装置であって、

周波数が異なる複数のモード光を含むコム光を出力するコム光源と、

前記コム光が入力され、前記コム光における前記複数のモード光のうち、指定される1つのモード光だけを取り出す分光光学系と、

40

前記分光光学系から取り出された前記1つのモード光と前記被測定光源の被測定光とが合波された光の強度を検出する光検出器と

を備え、

前記コム光において隣接する前記複数のモード光の周波数間隔であるモード間隔周波数は、前記分光光学系の光周波数分解能より大きい測定装置。

【請求項16】

被測定光源の発光スペクトルをヘテロダイン検波により測定する測定装置であって、

周波数が異なる複数のモード光を含むコム光を出力するコム光源と、

前記コム光と前記被測定光源の被測定光とが合波された光の強度を検出する光検出器と

50

前記光検出器の出力が入力される電気スペクトラムアナライザとを備える測定装置。

【請求項 17】

前記コム光源と前記分光光学系との間において、近赤外の波長帯域のコム光を、前記近赤外の波長帯域よりも長波長である中赤外の波長帯域のコム光に変換する、第1の波長変換部と、前記第1の波長変換部において中赤外の波長帯域に変換されたコム光を、前記被測定試料を透過または反射した後に、近赤外の波長帯域のコム光に再び変換する、第2の波長変換部とをさらに備える

10

請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の測定装置。

【請求項 18】

前記コム光源と前記デュアルコム受光器との間において、近赤外の波長帯域のコム光を、前記近赤外の波長帯域よりも長波長である中赤外の波長帯域のコム光に変換する、第1の波長変換部と、前記第1の波長変換部において中赤外の波長帯域に変換されたコム光を、前記被測定試料を透過または反射した後に、近赤外の波長帯域のコム光に再び変換する、第2の波長変換部とをさらに備える

20

請求項 11 または 12 に記載の測定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、測定装置に関する。

【背景技術】

【0002】

図 25 は、周波数コム光源を備える従来の測定装置 1400 である。測定装置 1400 を用いて、被測定試料 1420 の光周波数応答特性を測定することができる。測定装置 1400 は、モード光の間隔が 10 GHz オーダーである周波数コム光源 1402 と、複数の低密度周波数のコム光を発生させるインターリーバ 1408 と、インターリーバ 1408 から出射される低密度周波数のコム光を選択する光スイッチ 1410 と、光スイッチ 1410 からの出射光を増幅する EDFA (光増幅器) 1412 と、光増幅器 1412 からの出射光のうち 1 つのモード光を取り出す可変光フィルタ 1414 を備える。

30

【0003】

測定装置 1400 においては、可変光フィルタ 1414 を透過した 1 つのモード光 (周波数  $f_m$ ) が、周波数シフタ 1416 により、光周波数軸上を MHz オーダーの周波数  $f$  だけ掃引される。当該掃引された 1 つのモード光は、被測定試料 1420 を透過し、高速光検出器 1422 に入射する。高速光検出器 1422 には、掃引された 1 つのモード光に加えて、可変波長レーザ 1430 の出射光も入射する。高速光検出器 1422 の出力は、電気アンプ 1424 およびローパスフィルタ 1426 を経て、光パワーメータ 1428 に出力される。これにより、掃引された 1 つのモード光が可変波長レーザ 1430 の出射光により光ヘテロダイン検波される。

40

【0004】

測定装置 1400 では、周波数コム光源 1402 から出力されるコム光のうち 1 つのモード光を取り出し、周波数シフタ 1416 により MHz オーダーで周波数掃引して変化させる。それゆえ、被測定試料 1420 への入射光を、MHz オーダーで制御することができる。また、インターリーバ 1408 を一段または二段用いてモード間隔を広げているので、可変光フィルタ 1414 の分解能よりも小さなモード間隔のコム光源に対しても、1 つのモード光を選択できる。さらに、光ヘテロダイン検波により、被測定試料 1420 を透過した光の強度および周波数を測定することができる。したがって、測定装置 1400

50

は、被測定試料 1420 の光周波数に対する応答特性について、MHz オーダーでの分解能を有する（例えば、特許文献 1 参照）。

[ 先行技術文献 ]

[ 特許文献 ]

[ 特許文献 1 ] 特開 2011 - 017649 号公報

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0005 】

しかしながら、測定装置 1400 においては、コム光のモード間隔を広げて 1 つのモード光だけを取り出すために、インターリーバ 1408、光スイッチ 1410 および可変光フィルタ 1414 を用いている。また、可変光フィルタ 1414 の分解能よりもモード間隔を大きくするために、インターリーバ 1408 を一段または二段にして用いている。光増幅器 (EDFA) 1412 はこれらの部品の損失を補うために必要である。これらの部品の使用可能な波長帯は通信波長帯である 1520 ~ 1570 nm なので、測定帯域がこの波長帯に限定されるという問題がある。また、インターリーバ 1408 で分配した低密度周波数コム光の中から 1 つの低密度周波数コム光を光スイッチ 1410 で順次選択しなければならない。そのため、測定に時間がかかるという問題がある。さらに、測定装置 1400 においては、光ヘテロダイン検波のための波長可変レーザが必要であるので、測定装置の制御系が複雑であり、かつ、測定装置が高価となる問題がある。

10

【 課題を解決するための手段 】

20

【 0006 】

本発明の第 1 の態様においては、被測定試料の透過特性または反射特性を測定する測定装置であって、一定の周波数間隔を有する複数のモード光を含むコム光を出力する周波数コム光源と、コム光が入力され、コム光における複数のモード光を一つずつ周波数分解する分光光学系と、分光光学系から取り出された複数のモード光のうち少なくとも 1 つのモード光の強度を検出する光検出器とを備え、光検出器が強度を検出する 1 つのモード光は、コム光源の出力から、光検出器の入力までの間に配置された被測定試料を透過または反射し、コム光のモード間隔周波数は、分光光学系の光周波数分解能より大きい測定装置を提供する。

【 0007 】

30

本発明の第 2 の態様においては、被測定試料の透過特性または反射特性をヘテロダイン検波により測定する測定装置であって、周波数が異なる複数のモード光を含むコム光を出力するコム光源と、前記コム光源から出力されて異なるモード間隔周波数のコム光となった 2 種類のコム光が、合波されて入力されるデュアルコム受光器とを備え、コム光源は、コム光において隣接する複数のモード光の周波数間隔であるモード間隔周波数と同一の間隔を有し、且つ、コム光よりも少ない数のモード光を含む光パルスを出力するパルス光源と、モード光が存在する周波数帯域を光パルスより拡大したコム光を、光パルスに基づいて生成する帯域拡大部と、パルス光源が出力する光パルスの周波数を、モード間隔周波数よりも狭い範囲でシフトさせることで、コム光の各モード光の周波数を一括してシフトさせる周波数シフタとを有し、パルス光源は、連続光を出力する連続発振レーザと、連続光の周波数を、モード間隔周波数に応じた周波数で変調して、複数のモード光を含む種コム光を生成する、第 1 の光変調器および第 2 の光変調器と、種コム光における各モード光の位相および振幅を調整し、光パルスを合成する光パルス合成部と、を含み、連続光は 2 つに分岐され、第 1 の光変調器および第 2 の光変調器にそれぞれ入射されて、第 1 の光変調器は、モード間隔周波数が  $f_1$  のコム光の種コム光を生成し、第 2 の光変調器は、モード間隔周波数が  $f_2$  のコム光の種コム光を生成し、 $f_1$  と  $f_2$  との差は、 $f_1$  および  $f_2$  のいずれよりも小さく、モード間隔周波数が  $f_1$  のコム光およびモード間隔周波数が  $f_2$  のコム光の一方または両方が、被測定試料を透過または反射しており、モード間隔周波数が  $f_1$  のコム光とモード間隔周波数が  $f_2$  のコム光とは合波され、デュアルコム受光器に入射される測定装置を提供する。

40

50

## 【 0 0 0 8 】

本発明の第3の態様においては、被測定光源の発光スペクトルをヘテロダイン検波により測定する測定装置であって、周波数が異なる複数のモード光を含むコム光を出力するコム光源と、コム光が入力され、コム光における複数のモード光のうち、指定される1つのモード光だけを取り出す分光光学系と、分光光学系から取り出された1つのモード光と被測定光源の被測定光とが合波された光の強度を検出する光検出器とを備え、コム光において隣接する複数のモード光の周波数間隔であるモード間隔周波数は、分光光学系の光周波数分解能より大きい測定装置を提供する。

## 【 0 0 0 9 】

本発明の第4の態様においては、被測定光源の発光スペクトルをヘテロダイン検波により測定する測定装置であって、周波数が異なる複数のモード光を含むコム光を出力するコム光源と、コム光と被測定光源の被測定光とが合波された光の強度を検出する光検出器と、光検出器の出力が入力される電気スペクトラムアナライザとを備える測定装置を提供する。

10

## 【 0 0 1 0 】

なお、上記の発明の概要は、本発明の必要な特徴の全てを列挙したものではない。また、これらの特徴群のサブコンビネーションもまた、発明となりうる。

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 0 1 1 】

【 図 1 】 第1の実施形態における測定装置 100を示す図である。

20

【 図 2 】 図1における出射スリット 58の面上に分光されて結像したコムモード光を示す図である。

【 図 3 】 第1の実施形態の変形例である測定装置 105を示す図である。

【 図 4 】 第2の実施形態における測定装置 200を示す図である。

【 図 5 】 SSB変調器 14が1本のレーザ光の周波数をシフトすることを示す図である。

【 図 6 】 SSB変調器 14により周波数シフトされるコム光を示す図である。

【 図 7 】 光パルスシンセサイザ 24を用いた短パルス光源 12を有する周波数コム光源 10を示す図である。

【 図 8 】 分散付与器 21を用いた短パルス光源 12を有する周波数コム光源 10を示す図である。

30

【 図 9 】 第3の実施形態における測定装置 300を示す図である。

【 図 10 】 第4の実施形態における測定装置 400を示す図である。

【 図 11 】 第5の実施形態における測定装置 500を示す図である。

【 図 12 】 2つの経路を用いたデュアルコム分光の場合におけるスペクトルの変化を示す図である。

【 図 13 】 第5の実施形態の変形例である測定装置 550を示す図である。

【 図 14 】 SSB変調器 34-2がコム光を光周波数軸上でシフトさせる様子を示す図である。

【 図 15 】 第6の実施形態における測定装置 600を示す図である。

【 図 16 】 第7の実施形態における測定装置 700を示す図である。

40

【 図 17 】 1つの経路を用いたデュアルコム分光の場合におけるスペクトルの変化を示す図である。

【 図 18 】 第8の実施形態における測定装置 800を示す図である。

【 図 19 】 第8の実施形態における光周波数計測の原理を示す図である。

【 図 20 】 第9の実施形態における測定装置 900を示す図である。

【 図 21 】 第10の実施形態における測定装置 1000を示す図である。

【 図 22 】 第11の実施形態における測定装置 1100と測定装置 1106を示す図である。

【 図 23 】 白色ランプ 1204および分光光学系 1220を備える測定装置である。

【 図 24 】 波長可変レーザ光源を備える測定装置である。

50

【図 2 5】周波数コム光源を備える従来の測定装置である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下、発明の実施の形態を通じて本発明を説明するが、以下の実施形態は請求の範囲にかかる発明を限定するものではない。また、実施形態の中で説明されている特徴の組み合わせの全てが発明の解決手段に必須であるとは限らない。

【0013】

図 1 は、第 1 の実施形態における測定装置 100 を示す図である。測定装置 100 は、被測定試料 40 の透過特性または反射特性を測定する。測定装置 100 は、周波数コム光源 10、分光光学系 50、光検出器としての単一の光電変換素子 60、A/D コンバータ 70、駆動回路 80 および制御部としてのプロセッサ 90 を備える。

10

【0014】

周波数コム光源 10 から出射された光は、コリメートレンズ 35 を経由して、被測定試料 40 に入力される。被測定試料 40 から出力された光は、コリメートレンズ 45 を経由して、分光光学系 50 に入力される。分光光学系 50 から出力された光は、単一の光電変換素子 60 に入力される。単一の光電変換素子 60 は例えばフォトダイオードである。単一の光電変換素子 60 を用いる場合、単一の光電変換素子 60 の出力は、A/D コンバータ 70 を経由してプロセッサ 90 に入力される。プロセッサ 90 は、A/D コンバータ 70 から出力される信号を取り込むとともに、駆動回路に制御信号を送る。駆動回路 80 は、当該制御信号に基づいて分光光学系 50 における回折格子 55 の回転角度を制御する。

20

【0015】

周波数コム光源 10 は、スーパーコンティニウム光と呼ばれるコム光を出力する。周波数コム光源 10 は、パルス光源としての短パルス光源 12 と、短パルス光源 12 の光パルスの光強度を増幅する EDFA (Erbium-Doped optical Fiber Amplifier (光ファイバ型増幅器)) 16 と、EDFA 16 が出力する光パルスの光周波数帯域を拡大する帯域拡大部としての HNL F (Highly-Nonlinear Fiber) 18 とを有する。

【0016】

短パルス光源 12 は、光パルスを発生させる。また、周波数コム光源 10 は、短パルス光源 12 が出力する光パルスの繰り返し周波数に等しいモード間隔周波数のコム光を発生する。なお、本明細書においてモード間隔周波数とは、コム光において隣接する複数のモード光の周波数間隔を指す。本例では、短パルス光源 12 が出力する光パルスの繰り返し周波数を 12.5 GHz とすれば、複数のモード光の周波数間隔は 12.5 GHz である。また、当該光パルスは、波長帯域において、中心波長が 1.55 μm で、かつ、広がりが 10 nm 程度である光パルスである。短パルス光源 12 から出力された光パルスは、EDFA 16 に入力される。

30

【0017】

EDFA 16 は、短パルス光源 12 から出力された光パルスの光強度を増幅する。EDFA 16 から出射された光パルスは、HNL F 18 に入力される。

【0018】

HNL F 18 は、光パルスの繰り返し周波数に等しいモード間隔周波数のスーパーコンティニウム光と呼ばれるコム光を発生する。モード光が存在する周波数帯域を光パルスより拡大したコム光を、光パルスに基づいて生成する。例えば、HNL F 18 は、波長帯域で 10 nm 程度の広がりを有する光パルスを、数百 nm 程度に拡大する。これにより、HNL F 18 は、入力された光パルスよりも広い波長帯域 (周波数帯域) において、周波数が異なる複数のモード光を含むコム光を出力する。HNL F 18 は、GeO<sub>2</sub> 等を添加した石英系光ファイバ、または、断面内に空孔が周期配列して存在するフォトニッククリスタルファイバであってよい。HNL F 18 から出射されたコム光は、コリメートレンズ 45 を経由して、分光光学系 50 に入射する。

40

【0019】

50



分光光学系 50 には、被測定試料を透過したコム光が入力される（透過光学系）。なお、分光光学系 50 には、被測定試料から反射したコム光が入力されてもよい（反射光学系）。反射光学系の場合には、コリメートレンズ 35 から出射した光はミラー 42 で反射されて、被測定試料 40 に入力される。そして、被測定試料 40 から反射された光が、ミラー 42 を経てコリメートレンズ 45 に入力される。

#### 【0020】

分光光学系 50 は、被測定試料を透過したコム光または被測定試料から反射したコム光が入力され、コム光における複数のモード光のうち、指定される 1 つのモード光だけを取り出す。分光光学系 50 は、コム光が入力される入射スリット 52、入射スリット 52 を透過した光が入力されるコリメートレンズ 54、コリメートレンズ 54 を透過したコム光を回折する回折格子 55、レンズ 56 から出力された光を透過させる出射スリット 58 を有する。当該回折されたコム光はレンズ 56 を介して出射スリット 58 の面上にモード光のスペクトルを結像する。

10

#### 【0021】

出射スリット 58 の面上に結像されたモード光のスペクトルのうち、回折格子 55 の角度に応じて定められる 1 つのモード光だけが出射スリット 58 を通過し、単一の光電変換素子 60 に出射する。

#### 【0022】

また、コム光におけるモード間隔周波数は、コム光が生成される段階において、各々厳密に定まっている。よって、回折格子 55 の回転角度を調整することにより出射スリット 58 を介して、ある 1 つのモード光を取得することができ、そのモード光の周波数は厳密に定まっている。これにより、回折格子 55 の回転角度を調節することにより、被測定試料に対してモード周波数間隔ごとの光周波数応答特性を測定することができる。

20

#### 【0023】

単一の光電変換素子 60 は、分光光学系 50 から取り出された 1 つのモード光の強度を検出する。当該 1 つのモード光は、周波数コム光源 10 の出力から、単一の光電変換素子 60 の入力までの間に配置された被測定試料 40 を透過または反射した光である。単一の光電変換素子 60 は、出射スリット 58 から出射された 1 つのモード光の強度を時間に応じてアナログ電気信号に変換する。当該アナログ電気信号は、A/D コンバータ 70 に入力されてデジタル電気信号に変換される。当該デジタル電気信号は、光強度信号として、プロセッサ 90 に入力される。

30

#### 【0024】

プロセッサ 90 は、光強度信号を受信して駆動回路 80 を制御する。プロセッサ 90 は、回折格子 55 の回転角度の情報を予め有している。よって、プロセッサ 90 は当該回転角度の情報を基に、出射スリット 58 から出射された 1 つのモード光の周波数の情報を予め有している。プロセッサ 90 は、当該 1 つのモード光の周波数の情報と A/D コンバータ 70 から得られた光強度信号とを基にして、分光光学系 50 から取得される周波数スペクトルがわかる。

#### 【0025】

プロセッサ 90 は、分光光学系 50 から 1 つのモード光を用いた測定が終了した後に、さらに、分光光学系 50 から取り出されるモード光を指定する。例えば、プロセッサ 90 は、既に観測した 1 つのモード光よりも周波数が高いまたは低いモード光を指定してよい。

40

#### 【0026】

プロセッサ 90 は、コム光における複数のモード光のうち 1 つのモード光だけを順次取り出すべく、駆動回路 80 に回折格子 55 の回転角度を制御する制御信号を送信する。駆動回路 80 は、当該制御信号を受信して、回折格子 55 の回転角度を調整する。なお、回折格子 55 の回転角度とは、コリメートレンズ 54 から出射された平行光に対する、回折格子 55 の入射光面の角度であってよい。

#### 【0027】

50

本例で用いられるコム光は、例えば波長帯域が  $1.2 \sim 1.8 \mu\text{m}$  の近赤外帯域とすることができる。つまり、測定装置の波長帯域を、従来の測定装置よりも広げることができる。また、本例の測定装置 100 においては、光ヘテロダイン検波のための波長可変レーザが不要である。それゆえ、従来の測定装置と比較して制御系が簡単になる。また、それゆえ、測定装置自体を安価に製造することができる。

【0028】

図 2 は、図 1 における出射スリット 58 の面上に分光されて結像したコムのモード光を示す図である。コム光の周波数間隔と分光光学系 50 の光周波数分解能の関係が表されている。切立ったスペクトルが光コムのモード光のもつ本来のスペクトルである。モード光に比べてなだらかなスペクトルは、分光光学系 50 によってその分解能まで広がったモード光のスペクトルである。

10

【0029】

回折格子 55 で回折された光は、周波数に応じた角度で射出される。出射スリット 58 は、回折格子 55 で回折された光のうち、所定の周波数範囲の光を通過させる。本例において、分光光学系 50 の光周波数分解能は、出射スリット 58 が光を通過させる周波数範囲の幅を指す。回折格子 55 を出射スリット 58 に対して回転させることで、出射スリット 58 を通過する光の周波数が変化する。

【0030】

コム光は回折格子 55 で回折されて、出射スリット面上にモード光のスペクトルが展開される。モード間隔周波数は、分光光学系 50 の光周波数分解能より大きくないと、1つのモード光のみを出射スリット 58 から取り出すことができない。例えば、モード間隔周波数は、分光光学系 50 の光周波数分解能の 2 倍以上である。望ましくは、モード光のモード間隔は、分光光学系 50 の光周波数分解能の 3 倍から 4 倍である。

20

【0031】

本例では、モード光のモード間隔は  $12.5 \text{ GHz}$  である。なお、高性能の分光器では一般に、回折格子 55、入射スリット 52 および出射スリット 58 を合わせた分光光学系 50 の光周波数分解能は、 $1500 \text{ nm}$  の波長の光に対して約  $4 \text{ GHz}$  である。したがって、本例のモード光のモード間隔周波数は、分光光学系 50 の光周波数分解能の約 3 倍である。それゆえ、約  $4 \text{ GHz}$  の光周波数分解能を有する本例の分光光学系 50 であっても、コム光における複数のモード光を、各々独立に取り出すことができる。

30

【0032】

図 3 は、第 1 の実施形態の変形例である測定装置 105 を示す図である。本例では、光検出器として、単一の光電変換素子 60 に代えて、イメージセンサ 62 を用いる。当該イメージセンサ 62 の出力は、画像処理回路 72 において処理されて、プロセッサ 90 に出力される。なお、本例では第 1 の実施形態（図 1）の例と異なり、出射スリット 58 を用いない。

【0033】

イメージセンサ 62 は、アレイ状に配列された複数の光電変換素子を有する。回折格子 55 から射出される複数のモード光のスペクトルは、イメージセンサ 62 における異なる各々の光電変換素子にそれぞれ入射する。これによりイメージセンサ 62 は、分光光学系 50 から出力された複数のモード光の強度を、アナログの電気信号として並列的に検出する。画像処理回路 72 は、イメージセンサ 62 において並列的に検出されたアナログの電気信号をデジタルの電気信号に変換してプロセッサ 90 に出力する。なお、イメージセンサ 62 は、イメージセンサ 62 の光電変換機能と画像処理回路 72 のアナログ デジタル変換機能とを合わせて有してもよい。

40

【0034】

本例では、出射スリット 58 が無くとも、各モード光の強度を測定することができる。また、出射スリット 58 を用いないので、回折格子 55 は固定されてよい。したがって、本例では回折格子 55 を駆動する駆動回路 80 も無くともよいが、回折格子を粗調整用に回転するために駆動回路があってもよい。よって、第 1 の実施形態（図 1）と比較して、

50

簡易な構成にできる。また、同時に複数のモード光のスペクトルを取得できるので、計測速度を高めることができる。

【0035】

図4は、第2の実施形態における測定装置200を示す図である。第2の実施形態における周波数コム光源10は、短パルス光源12とEDFA16との間に周波数シフトとしてのSSB(Single Side Band)変調器14(単側波帯光変調器)と、当該SSB変調器14に変調信号を入力する信号発生器15と、EDFA16とHNLF18との間にパルス圧縮器17とを備える点が、第1の実施形態と異なる。また、プロセッサ90がSSB変調器14の周波数を制御する点も、第1の実施形態と異なる。

【0036】

短パルス光源12において発生した光パルスは、繰り返し周波数が例えば12.5GHzとすると、その周波数に等しいモード間隔の複数のモード光を含む。なお、図4(a)は短パルス光源12から出射した光パルス(例えば半値幅を4ps)の模式図であって、上側は強度スペクトル(横軸を光周波数、縦軸を光強度)、下側は時間波形(横軸を時間、縦軸を光強度)である。短パルス光源12において発生した光パルスは、SSB変調器14に入射する。

【0037】

SSB変調器14は、信号発生器15から出力される正弦波信号により、短パルス光源12が出力する光パルスのスペクトルを一括してシフトさせる。SSB変調器14は、周波数精度が1Hz以下と極めて高い信号発生器15を用いるので、高精度にMHzオーダーの周波数シフトを実現することができる。

【0038】

なお、図4(b)はSSB変調器14から出射した光パルスの模式図である。上側の強度スペクトル(横軸を光周波数、縦軸を光強度)は一括して $f$ だけシフトする様子を示す。なお、ここでは強度スペクトルのみを模式的に示したが、位相スペクトルも同様に一括して $f$ だけシフトする。下側は時間波形(横軸を時間、縦軸を光強度)で、光パルスの時間波形がSSB変調器出射後も保持される様子を示す。光パルスの時間波形は、半値幅を4psで保持される。SSB変調器14において中心周波数が $f$ だけシフトされた光パルスは、EDFA16を介して、HNLF18に入射する。

【0039】

HNLF18は、中心周波数がシフトされた光パルスに基づいて、コム光を発生させる。当該コム光は、入力された光パルスよりも広い周波数帯域において、入力パルスと同じモード間隔周波数を有するコム光である。ただし、当該コム光は、光パルスの強度/位相スペクトルがSSB変調器14により周波数軸上を $f$ だけシフトしたことを反映して、複数のモード光の全てが周波数軸上を $f$ だけシフトする。

【0040】

なお、従来、単色の連続光に対してSSB変調器14を用いることにより、単色の連続光を周波数シフトすることは確認されている(特許文献1においても可変光フィルタ1414を通過した単色光の連続光に対してこの現象は用いられている)。

【0041】

図5は、SSB変調器14が1本のレーザ光の周波数をシフトすることを示す図である。光周波数 $f_0$ のレーザ光は、信号発生器15からSSB変調器14に印加される電圧の周波数 $f$ に応じて、周波数軸上の正方向に周波数 $f$ だけ掃引される。

【0042】

再び図4の説明に戻る。SSB変調器14がピコ秒パルスの振幅だけでなく位相のスペクトルもシフトさせ、かつ、光パルスの時間波形を変化させないことは本出願の発明者により初めて確認された。なお、SSB変調器14は波長依存性を有する。それゆえ、SSB変調器14は、光パルスのもつ波長帯域が広がる前である、短パルス光源12の直後に配置することが望ましい。SSB変調器14をパルス圧縮器17またはHNLF18の後に配置すると、光パルスのもつ波長帯域が既に広がっているので、SSB変調器14の持

10

20

30

40

50

つ波長依存性に起因して、スペクトルを上手くシフトさせることができない。

【0043】

プロセッサ90は、SSB変調器14におけるシフト量に応じて、分光光学系50が取り出す光周波数の範囲をシフトさせる。例えばプロセッサ90は、信号発生器15の周波数を制御することにより各モード光の周波数シフト量をMHzオーダーで制御し、かつ、当該周波数シフト量に応じて回折格子55の回転角度を調整する。

【0044】

プロセッサ90は、分光光学系50が取り出す光周波数の範囲に中心がシフトされた測定対象のモード光の周波数と一致するように、回折格子55の回転角度を調整する。例えばプロセッサ90は、シフトされた測定対象のモード光が、出射スリット58におけるスリットの中心を通過するように、回折格子55の回転角度を調整する。これにより、シフトされたモード光の1つを単一の光電変換素子60により検出することができる。したがって、光周波数の応答特性の測定を、MHzオーダーの高分解能で実現することができる。なお、光周波数シフトを用いた第2の実施形態において、単一の光電変換素子60の代わりにイメージセンサ62を配置し、出射スリット58を除いた構成にしてもよいことはもちろんである。

【0045】

図6は、SSB変調器14により周波数シフトされるコム光を示す図である。コム光に含まれる複数のモード光( $f_{m-1}$ 、 $f_m$ 、 $f_{m+1}$ )の各々は、信号発生器15からSSB変調器14に印加される電圧の周波数 $f$ に応じて、周波数軸上の正方向に周波数 $f$ だけ掃引される。本例では、周波数 $f$ だけ掃引された光周波数 $f_m$ のモード光が、分光光学系50から取り出される。なお、信号発生器15を制御してSSB変調器14に印加される電圧の周波数 $f$ は、プロセッサ90が制御する。

【0046】

図7は、光パルスシンセサイザ24を用いた短パルス光源12を有する周波数コム光源10を示す図である。本例では、光パルス合成部として、光パルスシンセサイザ24を用いる。周波数コム光源10は、短パルス光源12と、短パルス光源12から出射された光パルスが入射するEDFA16と、EDFA16が出射する光パルスのパルス幅を圧縮するパルス圧縮器17と、パルス圧縮器17から出射された光の光周波数帯域を拡大するHNL18とを有する。

【0047】

短パルス光源12は、連続発振レーザとしての周波数安定化レーザ20と、連続光から種コム光を生成する光変調器22と、種コム光を基に光パルスを合成する光パルスシンセサイザ24とを有する。周波数安定化レーザ20は、発振周波数が長時間一定な(例えば1日当たりの周波数変動1MHz以下)連続光を出力する。周波数安定化レーザは、図7(a1)に示すように一定の単一光周波数を有し、図7(b1)に示すように時間的に連続して出力されるレーザである。

【0048】

光変調器22は、連続光の周波数を、発生しようとする光パルスの繰り返し周波数に応じた周波数で変調して、複数の側帯波を発生する。ここでは、周波数安定化レーザ20から発振する連続光の単一光周波数と当該単一光周波数から発生した側帯波群とを合わせて種コム光と呼ぶ。光変調器22は、信号発生器23からRF変調を受けて、連続光の光を変調する。光変調器22は、誘電体結晶であるLiNbO<sub>3</sub>(LN)光変調器であってよい。

【0049】

本例の光変調器22は、信号発生器23が発生する例えば12.5GHzの正弦波信号によって周波数間隔が12.5GHzである約30本の側帯波を発生する(図7(a2))。これらの側帯波群が種コム光となる。なお、変調後の光は、連続光ではなく、時間的に不連続な波形となる(図7(b2))。

【0050】

10

20

30

40

50

光サーキュレータ 25 は、光変調器 22 から入力された光を光パルスシンセサイザ 24 に出力する。光パルスシンセサイザ 24 は、光変調器 22 から入力された種コム光における各モード光の位相および振幅を調整する。光パルスシンセサイザ 24 は、アレイ導波路格子 26、強度変調器 27、位相変調器 28、電流制御器 29 およびミラー 30 を有する。アレイ導波路格子 26 は、強度変調器 27 に光を導波させる。

【0051】

種コム光の各モード光は、アレイ導波路格子 26 によって異なるチャネル導波路へ分波される。チャネルごとに設置された強度変調器 27 および位相変調器 28 によって、各モード光の位相および振幅を調整されて光パルスが合成される（図 7（a-3））。この光パルスシンセサイザ 24 については非特許文献 1 がある。合成された光パルスは、光サーキュレータ 25 を経由し、EDFA 16 へ出力される（非特許文献 1：H. Tsuda, Y. Tanaka, T. Shioda, and T. Kurokawa: "Analog and digital optical pulse synthesizers using arrayed-waveguide gratings for high-speed optical signal processing," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 26, No. 6, pp. 670-677, (2008)）。

10

【0052】

これにより、本例では、繰り返し周波数 12.5 GHz（パルス間隔 80 ps）を有する光パルスが合成される（図 7（b-3））。光パルスシンセサイザ 24 で合成された光パルスは、EDFA 16 を経てパルス圧縮器 17 に入力される。

20

【0053】

パルス圧縮器 17 は、光パルスのパルス幅を圧縮することにより、光パルスの光強度ピークを高くする。パルス圧縮された光パルスは、HNLF 18 に入力される。

【0054】

HNLF 18 は、モード光が存在する周波数帯域を光パルスより拡大したコム光を生成する（図 7（a-4））。なお、当該コム光のモード間隔周波数は、種コム光のモード間隔周波数と同じ 12.5 GHz で維持される。

【0055】

図 8 は、分散付与器 21 を用いた短パルス光源 12 を有する周波数コム光源 10 を示す図である。本例では、光パルス合成部として、光パルスシンセサイザ 24 の代わりに、分散付与器 21 を用いる。分散付与器 21 は、合成しようとする光パルスの中心波長において分散の絶対値が大きな値を持つものであって、例えば、波長 1.55 μm 付近においては標準の単一モードファイバを用いることができる。分散付与器 21 を用いても、光パルスシンセサイザ 24 と同様に、連続光を基にして光パルスを合成することができる。光パルスシンセサイザを用いる場合に比べて、合成される光パルスの質（例えば FT 積）はやや劣るものの、デバイス構成が簡単なため低コストとなり、操作も簡便となる利点がある。

30

【0056】

図 9 は、第 3 の実施形態における測定装置 300 を示す図である。測定装置 300 により、FM 分光を実行することができる。測定装置 300 は、基本的には、第 1 の実施形態における測定装置 100 の周波数コム光源 10 を、図 7 の周波数コム光源 10 とした構成である。ただし、位相変調器 31、信号発生器 32、位相調整器 120 およびロックイン検波器 110 を設ける点が異なる。

40

【0057】

本例の短パルス光源 12 は、周波数安定化レーザ 20 および光変調器 22 の間に位相変調器 31 を有する。位相変調器 31 には、信号発生器 32 から MHz オーダーの変調電圧が加えられる。位相変調器 31 は、周波数安定化レーザ 20 の連続光の周波数を、モード間隔周波数よりも小さい周波数で位相変調する。本例では、位相変調器 31 の変調周波数は、光変調器 22 の変調周波数よりも小さい。位相変調器 31 は、周波数安定化レーザ 2

50

0が発振した単一周波数連続光に1次の両側サイドバンド光を生じさせて(図9(a 1))、当該光を光変調器22に入力する。

【0058】

つまり、本例では、周波数安定化レーザ20から出射する連続発振光を位相変調器31で位相変調するだけで、周波数コム全てのモードを同じように位相変調することができる。

【0059】

光変調器22は、位相変調器31から入力された光を変調して種コム光を生成する。種コム光の各モードは1次の両側サイドバンドを有する(図9(a 2))。信号発生器32が発生する正弦波信号は、位相変調器31に入力される。同時に信号発生器32が発生する正弦波信号は位相調整器120によって位相が調整されて、ロックイン検波器110にも入力される。

【0060】

位相変調器31により浅く位相変調された1つのモード光は、分光光学系50によって取り出され、光検出器としての単一の光電変換素子60に入射する。制御部としてのプロセッサ90は、ロックイン検波器110から出力される信号を取り込むとともに、駆動回路80に制御信号を送る。駆動回路80は、当該制御信号に基づいて分光光学系50における回折格子55の回転角度を制御する。単一の光電変換素子60が検出する光強度には、位相変調器31における変調信号と同じ周波数で変動する成分が含まれる。当該成分には、変調信号と位相が $\pi/2$ ずれている直交位相成分と、変調信号と同位相の同位相成分とが含まれる(SIN成分およびCOS成分)。

【0061】

これらのSIN成分とCOS成分の振幅がそれぞれ位相と振幅の情報を含む。この合成波のSIN成分とCOS成分それぞれを、位相変調器31における変調信号を用いてロックイン検波器110で検出する。ロックイン検波器110は、位相変調器31における変調信号と、当該変調信号の位相を $\pi/2$ 変化させた信号とを用いて、SIN成分とCOS成分をそれぞれ検波する。これにより、振幅と位相の変化を検出できる。本例では、位相変調器31によって位相変調されたコム光が、被測定試料40と分光光学系50を通った後、単一の光電変換素子60で電気信号に変換され、位相変調器31における変調信号によってダブルバランス検波され、吸収と位相の微小変動が検出される。

【0062】

図10は、第4の実施形態における測定装置400を示す図である。測定装置400は2つの光路を用いたデュアルコム分光に用いられる。測定装置400のデュアルコム受光器150は、被測定試料40を透過または反射する信号光と参照光とをヘテロダイン検波することにより、被測定試料40の光周波数応答特性を検出する。

【0063】

測定装置400の周波数コム光源10は、図7に記載の周波数コム光源10と基本的に同じである。ただし、周波数安定化レーザ20からの出力が分岐カプラ33により分岐されて、一方は、被測定試料40を透過する信号光となり、他方は参照光となる点が異なる。

【0064】

本例の光変調器22は、周波数安定化レーザ20の連続光が分岐して入力される第1の光変調器22-1および第2の光変調器22-2を含む。第1の光変調器22-1には、周波数 $f_1$ の変調電圧が与えられる。一方、第2の光変調器22-2には、周波数 $f_2$ の変調電圧が与えられる。これにより、第1の光変調器22-1は、モード間隔周波数が $f_1$ の種コム光を生成する。また、第2の光変調器22-2は、モード間隔周波数が $f_2$ の種コム光を生成する。

【0065】

本例では、 $f_1$ と $f_2$ との差は、 $f_1$ および $f_2$ のいずれよりも十分に小さい。具体的には、 $f_1$ は12.5GHzである。一方、 $f_2$ は $(12.5 + \Delta f)$ GHzであり、ま

10

20

30

40

50

た  $f$  は一般に数  $k$  Hz ~ 数 10 MHz に設定する。

【0066】

測定においては、 $f$  および  $f_1$  の比または  $f$  および  $f_2$  の比によりサンプリング点数の上限が定まる。したがって、 $f$  を  $f_1$  または  $f_2$  よりも十分小さく設定することにより、サンプリング点数を多くとることができる。これにより、測定帯域を広くすることができる。

【0067】

モード間隔周波数が  $f_1$  の種コム光およびモード間隔周波数が  $f_2$  の種コム光は、それぞれ E D F A 1 6 - 1 および 1 6 - 2、パルス圧縮器 1 7 - 1 および 1 7 - 2、ならびに、H N L F 1 8 - 1 および 1 8 - 2 を経て、モード間隔周波数が  $f_1$  のコム光およびモード間隔周波数が  $f_2$  の種コム光となる。

10

【0068】

本例の光パルスシンセサイザ 2 4 は、第 1 の光変調器 2 2 - 1 および第 2 の光変調器 2 2 - 2 に対応する、第 1 の光パルス合成部としての第 1 の光パルスシンセサイザ 2 4 - 1 および第 2 の光パルス合成部としての第 2 の光パルスシンセサイザ 2 4 - 2 を含む。第 1 の光パルスシンセサイザ 2 4 - 1 には、第 1 の光変調器 2 2 - 1 からモード間隔周波数が  $f_1$  の種コム光が入力される。同様に、第 2 の光パルスシンセサイザ 2 4 - 2 には、第 2 の光変調器 2 2 - 2 からモード間隔周波数が  $f_2$  の種コム光が入力される。

【0069】

帯域拡大部としての H N L F 1 8 は、第 1 の光パルスシンセサイザ 2 4 - 1 および第 2 の光パルスシンセサイザ 2 4 - 2 に対応する第 1 の帯域拡大部としての H N L F 1 8 - 1 および第 2 の帯域拡大部としての H N L F 1 8 - 2 を含む。H N L F 1 8 - 1 および 1 8 - 2 は、それぞれモード間隔周波数が  $f_1$  のコム光およびモード間隔周波数が  $f_2$  のコム光を発生させる。

20

【0070】

モード間隔周波数が  $f_1$  のコム光は、被測定試料 4 0 を透過または反射して、信号光となる。モード間隔周波数が  $f_2$  のコム光はミラー 4 2 を経由し、参照光となる。被測定試料 4 0 を透過または反射したモード間隔周波数が  $f_1$  のコム光と、モード間隔周波数が  $f_2$  のコム光とは合波ミラー 3 6 において合波され、分光光学系 5 0 に入射される。当該合波された光は、分光光学系 5 0 で分光され、単一の光電変換素子 6 0 でヘテロダイン検波される。コム光の中心周波数  $f_c$  (周波数安定化レーザ 2 0 の発振周波数に等しい) から  $N$  番目の信号モード光の周波数は  $f_c + N \cdot f_1$  となる。また、 $N$  番目の参照モード光の周波数は  $f_c + N \cdot (f_1 + f)$  となる。両者の周波数差  $N \cdot f$  を  $f_1$  よりも小さく設定すれば、分光光学系により  $N$  番目の信号モード光と参照モード光が選択され、単一の光電変換素子 6 0 に入射する。したがって、単一の光電変換素子 6 0 の最大帯域を  $f_1$  に設定すれば、両者間のヘテロダイン信号が得られる。これにより、被測定試料 4 0 の光周波数応答特性が検出される。

30

【0071】

本例では、1つの周波数安定化レーザ 2 0 から信号光と参照光の光コムを独立に発生させるので、2つの光コムのモードは同期されており安定である。また、デュアルコム受光器 1 5 0 により参照光を検出する前に、信号光と参照光とを合波することにより、高感度な検出ができる。つまり、信号光の強度が吸収により減衰しても、強い参照光とのヘテロダイン検波により高感度な検出ができる。なお、本明細書において、単に、モード間隔周波数が  $f_1$  または  $f_2$  のコム光と記載した場合、当該コム光は、被測定試料 4 0 を透過したコム光または被測定試料 4 0 から反射されたコム光に限定されない。

40

【0072】

なお、本例においても、第 1 の実施形態と同様に光パルスシンセサイザ 2 4 とパルス圧縮器 1 7 の間に、S S B 変調器 3 4 をさらに備えてよい。具体的には、S S B 変調器 3 4 は、光パルスシンセサイザ 2 4 - 1 から出力されたモード間隔周波数が  $f_1$  の種コム光および光パルスシンセサイザ 2 4 - 2 から出力されたモード間隔周波数が  $f_2$  の種コム光を

50

、光周波数軸上で周波数掃引してよい。これにより、SSB変調器34を用いない場合と比較して、さらに高い分解能でスペクトル測定をすることができる。また、第2の実施形態(図4)と同様に、制御部としてのプロセッサ90が分光光学系50における回折格子55とSSB変調器34とを制御し、かつ、単一の光電変換素子60の出力信号を取得してもよい。

【0073】

図11は、第5の実施形態における測定装置500を示す図である。測定装置500は、測定装置400と同様に2つの光路を用いたデュアルコム分光に用いられる。測定装置500のデュアルコム受光器160は、被測定試料40の光透過特性または光反射特性を、被測定試料40を透過または反射する信号光と参照光とを用いてヘテロダイン検波により測定する。

10

【0074】

ただし、測定装置500のデュアルコム受光器160は、分光光学系50および単一の光電変換素子60に代えて、単一の光電変換素子60および電気スペクトラムアナライザ130を有する点が、デュアルコム受光器150と異なる。つまり、被測定試料を透過または反射したモード間隔周波数が $f_1$ のコム光と、モード間隔周波数が $f_2$ のコム光とは合波され、まず、単一の光電変換素子60に入力される。そして、単一の光電変換素子60の出力は、電気スペクトラムアナライザ130に入力される。

【0075】

なお、測定装置500は、HNL F18-2と合波ミラー36との間に、可変波長フィルタ19を設ける点も、測定装置400と異なる。可変波長フィルタ19を用いることにより、測定に使用しないモード間隔周波数 $f_2$ のコム光(参照光)の一部をフィルタリングする。

20

【0076】

本例のデュアルコム分光法によれば、モード間隔周波数 $f_1$ のコム光(信号光)とモード間隔周波数 $f_2$ のコム光(参照光)とをヘテロダイン検波する。つまり、電気スペクトラムアナライザ130は、ヘテロダイン検波された電気信号のスペクトルを検出する。したがって、マイクロ波波長帯域の電気スペクトラムアナライザ130により、被測定試料40の光周波数応答特性を検出することができる。さらに、数MHz前後の高分解な分光を実現するためには、単一の光電変換素子60があれば足りる。また、一度の測定において測定波長帯域を広くして測定することができるので、一度の測定で大容量な情報を取得することができる。

30

【0077】

図12は、2つの経路を用いたデュアルコム分光の場合におけるスペクトルの変化を示す図である。図12(a1)は、HNL F18-1から出力されるモード間隔周波数が $f_1$ のコム光を示す。図12(b1)は、HNL F18-2から出力されるモード間隔周波数が $f_2$ のコム光を示す。上述のように、 $f_2$ は $f_1$ よりも $f$ だけ大きいので、モード間隔周波数が $f_2$ のコム光は、モード間隔周波数が $f_1$ のコム光と連続光に由来する中央のモード光(太線)とを一致させた位置から、 $0$ 、 $f$ 、 $2f$ 、 $3f$ の周波数差を有する。

40

【0078】

図12(a2)は、被測定試料40を透過した後のモード間隔周波数が $f_1$ のコム光を示す。図12(b2)は、可変波長フィルタ19を透過した後のモード間隔周波数が $f_2$ のコム光を示す。モード間隔周波数が $f_1$ のコム光は、被測定試料40を透過して、特定のモード光の光強度が減衰する。当該減衰した情報を有するモード間隔周波数が $f_1$ のコム光が、被測定試料40の光周波数応答特性を示す信号光となる。なお、中央のモード光(太線)よりも低周波数のスペクトルは測定に用いない場合はフィルタリングしてよい。

【0079】

図12(a3)は、被測定試料40を透過した後のモード間隔周波数が $f_1$ のコム光

50



(信号光)とモード間隔周波数が $f_2$ のコム光(参照光)とが、合波ミラー36で合波され、ヘテロダイン検波されたスペクトルを示す。当該スペクトルは、分光光学系50を有するデュアルコム受光器150でも、電気スペクトラムアナライザ130を有するデュアルコム受光器160でも、測定することができる。

【0080】

上述のように、 $f$ は12.5GHzよりも十分に小さい周波数(波長帯域でマイクロ波のオーダー)である。それゆえ、 $f$ 、 $2f$ 、 $3f$ は、電気スペクトラムアナライザ130でも検出することができる。

【0081】

図13は、第5の実施形態の変形例である測定装置550を示す図である。本例では、デュアルコム受光器160は、単一の光電変換素子60およびディジタイザ140を有する。ディジタイザ140は、時間的に変化するアナログ信号を順次AD変換してデジタル信号として記録する。また、光パルス合成部として、第1の光パルスシンセサイザ24-1および第2の光パルスシンセサイザ24-2に代えて、第1の分散付与器21-1および第2の分散付与器21-2を有する。さらに、周波数シフトとしてのSSB変調器34-2が第1の分散付与器21-1とパルス圧縮器17-1の間に設けられる。また、SSB変調器34-1が、周波数安定化レーザ20と分岐カプラ33との間に設けられる。上記の点が第5の実施形態の測定装置500と異なる。SSB変調器34-1によって、第5の実施形態と同様に、モード間隔周波数が $f_1$ と $f_2$ の2つのコム光を光周波数軸上で周波数掃引することができる。

10

20

【0082】

図14は、SSB変調器34-2がコム光を光周波数軸上でシフトさせる様子を示す図である。図14の左側上段は、図13の第1の分散付与器21-1から出力される、モード間隔周波数が $f_1$ であるコム光を示す。図14の左側下段は、図13の第2の分散付与器21-2から出力される、モード間隔周波数が $f_2$ であるコム光を示す。モード間隔周波数が $f_2$ のコム光は、モード間隔周波数が $f_1$ のコム光に対して光周波数 $f_0$ で一致している。モード間隔周波数が $f_2$ のコム光は、モード間隔周波数が $f_1$ のコム光に対して光周波数 $f_0$ から、 $0$ 、 $f$ 、 $2f$ 、 $3f$ の周波数差を有する。

【0083】

図14の左側上段における図面左向きの矢印は、モード間隔周波数が $f_1$ のコム光を周波数シフトさせる向きを表す。本例では、モード間隔周波数が $f_1$ のコム光を低周波数方向に、 $4f$ だけ周波数シフトさせる。図14の右側上段は、SSB変調器34-2によってシフトされたモード間隔周波数が $f_1$ のコム光を示す。また、図14の右側下段は、モード間隔周波数が $f_2$ のコム光を示す。

30

【0084】

このように、SSB変調器34-2によって、モード間隔周波数が $f_1$ のコム光のみを光周波数軸上でシフトして、2つのコム光が一致するモードを選択することができる。これによって、測定したい波長域に合わせて2つのコム光のモードを一致させることができる。

【0085】

図15は、第6の実施形態における測定装置600を示す図である。測定装置600は1つの光路を用いたデュアルコム分光に用いられる。測定装置600は、光変調器22-1および22-2から出力された光が、光パルスシンセサイザ24に輸入される前に分岐カプラ33で合波される点で、第4の実施形態における測定装置400と異なる。その他の点は、測定装置400と同様である。また、第2の実施形態(図4)と同様に、制御部としてのプロセッサ90が分光光学系50における回折格子55とSSB変調器34とを制御し、かつ、単一の光電変換素子60の出力信号を取得してもよい。

40

【0086】

図16は、第7の実施形態における測定装置700を示す図である。測定装置700は、1つの光路を用いたデュアルコム分光に用いられる。測定装置700は、光変調器22

50

- 1および2 2 - 2から出力された光が、光パルスシンセサイザ2 4に入力される前に分岐カプラ3 3で合波される点で、第5の実施形態における測定装置5 0 0と異なる。その他の点は、測定装置5 0 0と同様である。

【0087】

1つの経路を用いたデュアルコム分光（第6および第7の実施形態）は、2つの経路を用いたデュアルコム分光（第4および第5の実施形態）と比較して、検出感度が低い。しかしながら、2つの経路を用いたデュアルコム分光と比較して、装置の構成部品数を削減することができ、かつ、装置の構成を簡素化することができる。したがって、2つの経路を用いたデュアルコム分光よりも高い精度を必要としない場合には、1つの経路を用いたデュアルコム分光を用いることもできる。

10

【0088】

図17は、1つの経路を用いたデュアルコム分光の場合におけるスペクトルの変化を示す図である。図17(a 1)は、HNL F 18から出力されるモード間隔周波数が $f_1$ のコム光を示す。図17(b 1)も、HNL F 18から出力されるモード間隔周波数が $f_2$ のコム光を示す。なお、モード間隔周波数が $f_1$ のコム光とモード間隔周波数が $f_1$ のコム光とは、光パルスシンセサイザ2 4に入力される前に分岐カプラ3 3で合波されているが、説明のためにあえて2つに分離して図示した。

【0089】

上述のように、 $f_2$ は $f_1$ よりも $f$ だけ大きい。したがって、モード間隔周波数が $f_2$ のコム光は、モード間隔周波数が $f_1$ のコム光と連続光に由来する中央のモード光（太線）とを一致させた位置から、 $0$ 、 $f$ 、 $2f$ 、 $3f$ の周波数差を有する。

20

【0090】

図17(a 2)は、被測定試料4 0を透過した後における、モード間隔周波数が $f_1$ のコム光を示す。図17(b 2)は、被測定試料4 0を透過した後における、モード間隔周波数が $f_2$ のコム光を示す。モード間隔周波数が $f_1$ のコム光およびモード間隔周波数が $f_2$ のコム光は、被測定試料4 0を透過して特定のモード光の光強度が減衰する。なお、中央のモード光（太線）よりも低周波数のスペクトルは測定に用いない場合はフィルタリングしてよい。

【0091】

図17(a 3)は、被測定試料4 0を透過した後のモード間隔周波数が $f_1$ のコム光とモード間隔周波数が $f_2$ のコム光とを、合成したスペクトルを示す。図17(a 4)は、スペクトル強度を補正してヘテロダイン検波をする様子を示す。上述のように、一つの経路を用いたデュアルコム分光では、被測定試料4 0の透過光強度を $I_s$ とすると、電気スペクトラムアナライザ1 3 0の出力は $I_s$ の自乗に比例する。そこで、被測定試料4 0の透過光強度 $I_s$ を取得することを目的として、スペクトル強度の平方根を算出して補正する。当該補正されたスペクトルは、分光光学系5 0を有するデュアルコム受光器1 5 0でも、電気スペクトラムアナライザ1 3 0を有するデュアルコム受光器1 6 0でも、測定することができる。

30

【0092】

2つの経路を用いたデュアルコム分光（第4および第5の実施形態）、ならびに、1つの経路を用いたデュアルコム分光（第6および第7の実施形態）においては、同じ周波数安定化レーザ2 0を光源とする。それゆえ、ヘテロダイン用のレーザを別途設けなくともよい。加えて、仮に周波数安定化レーザ2 0の出力周波数に揺らぎが生じたとしても、同一の光源を用いてヘテロダイン検波することにより、観測する2つのコム周波数差（ $f$ ）には影響が生じない。よって、仮に周波数安定化レーザ2 0の出力周波数に揺らぎがある場合であっても、ヘテロダイン検波の精度を担保することができる。

40

【0093】

図18は、第8の実施形態における測定装置8 0 0を示す図である。測定装置8 0 0は、被測定光源3 8の発光スペクトルをヘテロダイン検波により測定する。つまり、測定装置8 0 0は、被測定光源3 8から出力される被測定光の発光スペクトルを計測する。測定

50

装置 800 は、コリメートレンズ 35 および 45 の間に被測定試料 40 を有しないことを除いて、第 2 の実施形態における測定装置 200 とほぼ同じである。

【0094】

測定装置 800 は、周波数コム光源 10、合波ミラー 36、被測定光源 38 および分光光学系 50 を有する。周波数コム光源 10 は、周波数が異なる複数のモード光を含むコム光を出力する。周波数コム光源 10 は、第 2 の実施形態における測定装置 200 の短パルス光源 12 として、図 7 で説明した光パルスシンセサイザ 24 を用いた短パルス光源 12 を有する。

【0095】

HNL F 18 から出力されたコム光は、コリメートレンズ 35 を通過後、合波ミラー 36 において、被測定光源 38 から出力された被測定光と合波される。合波された光は、コリメートレンズ 45 を経て、分光光学系 50 へ出力される。

10

【0096】

分光光学系 50 は、第 1 から第 3 の実施形態に記載された分光光学系 50 と同じであってよい。分光光学系 50 は、コム光が入力され、コム光における複数のモード光のうち、指定される 1 つのモード光だけを取り出す。なお、コム光において隣接する複数のモード光の周波数間隔であるモード間隔周波数は、分光光学系 50 の光周波数分解能より大きい。

【0097】

光検出器としての単一の光電変換素子 60 は、分光光学系 50 から取り出された 1 つのモード光と被測定光源の被測定光とが合波された光の強度を検出する。合波された光の強度は、単一の光電変換素子 60 において電気信号に変換されて、BPF (Band Pass Filter) 65 を経て AD コンバータ 70 へ出力される。なお、上述のように、回折格子 55 の回転角度に応じて、出射スリット 58 から出力される光周波数は予め定められている。

20

【0098】

BPF 65 は、周波数  $f$  が  $f_0 < f < f_0 + \Delta f$  の範囲の電気信号のみを通過させる。したがって、単一の光電変換素子 60 で検出したヘテロダイン信号の周波数帯域は BPF 65 によって上記範囲に制限されて、AD コンバータ 70 へ透過される。なお、BPF 65 の透過周波数幅 ( $\Delta f$ ) の中心周波数  $f_0$  は、隣接するコム光の間隔の半分よりも十分に小さな周波数とする。例えば、中心周波数  $f_0$  は、 $6.25 (= 12.5 / 2)$  GHz よりも十分に小さな値であってよい。

30

【0099】

これにより、1 つのモード光と被測定光から生じるヘテロダイン信号が、BPF 65 の透過周波数帯域と一致した場合に、測定装置 800 は光ビートの光強度信号および周波数を測定することができる。当該 1 つのモード光の光強度および光周波数が既知であれば、ビート信号の被測定光の光強度および光周波数から、被測定光の光強度および光周波数を算出することができる。

【0100】

AD コンバータ 70 は、当該光強度信号を制御部としてのプロセッサ 90 へ出力する。プロセッサ 90 は、光強度信号および光周波数 (つまり、観測した光周波数スペクトル) に基づいて、SSB 変調器 14 へ印加する電圧の周波数および回折格子 55 の回転角度を制御してよい。例えば、プロセッサ 90 は、光周波数スペクトルを一旦観測した後、SSB 変調器 14 を制御してモード光を掃引してよい。また、プロセッサ 90 は、光周波数スペクトルを一旦観測した後、回折格子 55 の回転角度を変更して、観測に用いたモード光とは異なる光周波数のモード光を分光光学系 50 が取り出すように指定してよい。

40

【0101】

図 19 は、第 8 の実施形態における光周波数計測の原理を示す図である。図 19 (a) に示すように、光コムスペクトルは複数の異なるモード光を有する。図 19 (b) に示すように、分光光学系 50 は 1 つのモード光を含む透過帯域幅を有する。また、BPF 6

50

5 は、分光光学系 5 0 の周波数分解能の幅より狭い周波数幅 ( $\Delta f$ ) の透過帯域幅を有する。

【0102】

図 19 (c) に示すように、BPF 65 の透過周波数帯域は、 $f_0 < f < f_0 + \Delta f$  の範囲である。周波数  $f_0$  は、隣接するコム光の間隔の半分よりも十分に小さな周波数を有する。図 19 (d) に示すように、1つのモード光と被測定光との光ビートの周波数が BPF 65 の透過周波数と一致した場合に、測定装置 800 は光強度信号を測定することができる。一方、光ビートの周波数が BPF 65 の透過周波数と一致しない場合は、光強度信号が測定されない。

【0103】

図 20 は、第 9 の実施形態における測定装置 900 を示す図である。本例の測定装置 900 は、分光光学系 50 によりコム光のうち 1つのモード光が分光された後に、当該モード光と被測定光源 38 の被測定光とをヘテロダイン検波する点が、上述の測定装置 800 と相違する。他の構成は、上述の測定装置 800 と同一である。

【0104】

図 21 は、第 10 の実施形態における測定装置 1000 を示す図である。測定装置 1000 は、被測定光源の発光スペクトルをヘテロダイン検波により測定する。測定装置 1000 は、第 8 の実施形態の測定装置 800 と比較して、分光光学系 50 および単一の光電変換素子 60 を、光検出器としての単一の光電変換素子 60 および電気スペクトラムアナライザ 130 に代えた点で基本的に異なる。測定装置 1000 は、波長帯域でマイクロ波のオーダーのビート信号をヘテロダイン検波により検出するので、分光光学系 50 に代えて、コム光と被測定光源 38 の被測定光とが合波された光の強度を検出する単一の光電変換素子 60 および光検出器の出力が入力される電気スペクトラムアナライザ 130 を備える。当該構成によっても、ヘテロダイン検波をすることができる。

【0105】

図 22 は、第 11 の実施形態における測定装置 1100 を示す図である。測定装置 1100 は、近赤外域 ( $1.2 \sim 1.8 \mu\text{m}$ ) である光周波数コム光源の波長帯域を、中赤外域 ( $2.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ ) の波長帯域へ変換することができる。これにより、当該中赤外の波長帯域において、被測定試料 40 の透過特性もしくは反射特性の測定、または、被測定光源 38 の被測定光の発光スペクトル計測をすることができる。また、透過特性もしくは反射特性の測定または発光スペクトル計測をするときに、中赤外域から近赤外域に光の波長帯域を変換する。

【0106】

測定装置 1100 は、近赤外の周波数コム光源 10、第 1 の波長変換部 1102、第 2 の波長変換部 1104、分光光学系 50 および光検出器としての単一の光電変換素子 60 を備える。周波数コム光源 10、分光光学系 50 および単一の光電変換素子 60 は第 1 から第 10 の実施形態において上述した通りである。第 1 の波長変換部 1102 および第 2 の波長変換部 1104 は、周波数コム光源 10 と分光光学系 50 との間に設けられる。

【0107】

第 1 の波長変換部 1102 は、分極反転デバイス 172 とポンプ光 170 とを有する。分極反転デバイス 172 は、光学異方性を有する非線形光学結晶である。分極反転デバイス 172 は、PPLN (Periodically poled lithium niobate) であってよい。ポンプ光 170 は、周波数安定化されたレーザ光である。ポンプ光 170 は、 $0.98 \mu\text{m}$  の波長を有するレーザ光であってよい。

【0108】

第 1 の波長変換部 1102 は、光周波数コム光源 10 から出力された近赤外の波長帯域のコム光を、近赤外の波長帯域よりも長波長である中赤外の波長帯域のコム光に変換する。第 1 の波長変換部 1102 は、近赤外の波長帯域のコム光 (中心波長  $\lambda_1$ ) とポンプ光 170 (波長  $\lambda_2$ ) とを合波ミラー 36 により合波し、分極反転デバイス 172 に入力する。分極反転デバイス 172 は、差周波発生により、 $1/\lambda_3 = 1/\lambda_2 - 1/\lambda_1$  (式

10

20

30

40

50

1) を満たす波長  $\lambda_3$  の光を発生させる。差周波発生とは、非線形光学結晶に  $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  ( $\lambda_2 < \lambda_1$ ) の2つの波長の光を入射したとき、 $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  のいずれよりも長い  $\lambda_3$  の波長の光が発生する現象である。

【0109】

例えば、分極反転デバイス172は、近赤外の波長帯域のコム光(中心波長  $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$ )とポンプ光170(波長  $\lambda_2 = 0.98 \mu\text{m}$ )とにより、中赤外の波長帯域のコム光(中心波長  $\lambda_3 = 2.8 \mu\text{m}$ )を発生させる。なお、当該中赤外の波長帯域のコム光におけるモード光の周波数間隔は、近赤外の波長帯域のコム光(中心波長  $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$ )と同じ周波数間隔となる。

【0110】

分極反転デバイス172から出力される中赤外の波長帯域のコム光は、被測定試料40に入力される。なお、本例は、被測定試料40の透過特性を測定する場合について説明するが、第1の実施形態で説明したように、反射特性を測定するよう構成を変更してもよい。また、測定装置1106のように、分極反転デバイス172から出力される中赤外の波長帯域のコム光と被測定光源38から出力される被測定光とを合波ミラー36により合波して、被測定光のスペクトル計測をしてもよい。

【0111】

第2の波長変換部1104は、第1の波長変換部1102において中赤外の波長帯域に変換されたコム光を、被測定試料40を透過または反射した後に、近赤外の波長帯域のコム光に再び変換する。第2の波長変換部1104は、中赤外の波長帯域のコム光(波長  $\lambda_1'$ )とポンプ光(波長  $\lambda_2'$ )とを合波ミラー36により合波し、分極反転デバイス172に入力する。分極反転デバイス172は、差周波発生により、 $1/\lambda_3' = 1/\lambda_2' - 1/\lambda_1'$ (式1)を満たす波長  $\lambda_3'$  の光を発生させる。なお、当該近赤外の波長帯域のコム光におけるモード光の周波数間隔は、光周波数コム光源10のコム光と同じ周波数間隔となる。

【0112】

本例では、近赤外域から中赤外へ波長帯域を変換し、その後、中赤外から近赤外へと再度波長帯域を変換する。これにより、中赤外域用の分光光学系50を別途用いることなく、近赤外用の分光光学系50をそのまま用いることができる。また、中赤外域用の光検出器は感度が低く雑音が大きい。しかし、本例では、中赤外から近赤外に波長帯域を再変換する。したがって、中赤外の波長帯域で光検出する場合と比較して、光検出の感度を上げ、かつ、雑音を減らすことができる。

【0113】

また、本例では、近赤外の波長帯域の光コムを差周波発生によりガス分析に有用な中赤外の波長帯域の光コムへ波長変換できる。さらに、中赤外の波長帯域のコム光を近赤外の波長帯域に再変換することにより、高感度・低雑音な光周波数応答特性の検出をすることができる。

【0114】

なお、本例では、分光光学系50を有する測定装置1100および1106について述べたが、分光光学系50および単一の光電変換素子60を光検出器および電気スペクトラムアナライザに置き換えてもよい。この場合、第1の波長変換部および第2の波長変換部は、コム光源と光検出器との間に設けられる。これにより、被測定光源38の被測定光をヘテロダイン検波することができる。

(比較例1)

【0115】

図23は、白色ランプ1204および分光光学系1220を備える測定装置1200である。白色ランプ1204として、可視から赤外域にかけて連続的に広がったスペクトルを有するタングステンランプが用いられている。白色ランプ1204の光をコリメートレンズ1206により平行光束にして、光源1202から被測定試料1210に出力する。被測定試料1210を透過した光は、分光光学系1220に出力される。

10

20

30

40

50

## 【0116】

分光光学系1220には回折格子1222が用いられる。回折格子1222に光を当てて光を分散させ、スリット1224を通すことにより、目的の波長を有する単色光を得る。スリット1224の後ろに光電子増倍管またはフォトダイオードなどの光検出器1230を設けて、単色光を検出する。

## 【0117】

測定装置1200は、白色ランプ1204を光源とするので波長帯域が広帯域であるが、分解能は分光光学系1220の回折格子により定められ、一般に数GHz程度である。また、光源がタングステンランプであるので、光強度も微弱である。さらに、周波数確度を得るには基準光源による較正が必要となる。

10

(比較例2)

## 【0118】

図24は、波長可変レーザー光源を備える測定装置1300である。波長可変レーザー1304としては、外部共振器型の半導体レーザーが一般的に用いられる。波長可変レーザー1304はモード間隔(一般に、約 $1\text{ pm} = \text{約 } 100\text{ MHz}$ )ごとに波長を掃引できる。波長可変レーザー1304は、被測定試料1310を透過したレーザー光を光検出器1324で検出するだけの簡単な構成である。波長は波長可変レーザー1304に組み込まれた波長計で検出されるので、分光光学系は不要である。

## 【0119】

測定装置1300では、波長可変レーザー1304を用いて波長を掃引するので、 $10 \sim 100\text{ MHz}$ 程度と高い分解能が得られる。しかし、レーザーの可変波長範囲は高々 $100\text{ nm}$ であるので、測定帯域が狭い( $100\text{ nm}$ 程度)という問題点がある。また、周波数確度を得るには基準光源による較正が必要となる。

20

(比較例3)

## 【0120】

他に、FM分光測定装置がある。FM分光法は、1980年に提案されたレーザー分光技術であるが、極めて高感度かつ高分解能であるので、原子分子などのスペクトルを観測できる。FM分光法では、位相変調によりレーザー光に側帯波を発生させ、この側帯波と搬送波の間でヘテロダイン検出を行う。光検出器の後にダブルバランスミキサを用いることで、吸収と位相の両方を高感度に検出できる。光源には周波数安定化された半導体レーザーを用いることで、 $0.1\text{ MHz}$ の高い分解能を得ることができる(参考文献: G. C. Bjorklund, "Frequency-Modulation Spectroscopy", Opt. Lett., 5, p. 15, 1980.)。

30

## 【0121】

FM分光測定装置は、レーザーの位相変調により、極めて高感度かつ高い分解能( $0.1\text{ MHz}$ )が得られる。しかし、周波数安定化された半導体レーザーを用いるので、測定波長範囲が極めて狭い波長範囲( $1\text{ nm}$ 程度)となる。したがって、被測定試料に応じて異なる波長で測定するためには、異なる発振波長のレーザーを準備する必要がある。

(比較例4)

## 【0122】

その他に、デュアルコム分光測定装置がある。デュアルコム分光法の報告は、2台のフェムト秒レーザー( $100\text{ MHz}$ 間隔の光コム、 $f = 4\text{ kHz}$ )を用いたHCN吸収スペクトルの計測結果として、2008年位NIST(米)によりなされた(参考文献I. Coddington et al., "Coherent Multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs" Phys. Rev. Lett. (100, 013902 (2008)).)。

40

## 【0123】

デュアルコム分光法は、電気スペクトラムアナライザを用いることで、1台の光検出器のみで $100\text{ MHz}$ 前後の高い分解能のスペクトルを得ることができる。しかし、提案さ

50

れたデュアルコム分光法では、2台のフェムト秒レーザのモードおよびレーザのモード間隔を同期する必要があるため、測定が容易ではない。また、一度に測定することができる周波数帯域が狭い。

【0124】

本願と比較例1から4および背景技術に記載したマルチGHzコム光源との対比結果を、下記の表1にまとめる。

【0125】

【表1】

	測定帯域	分解能	周波数確度	光強度	備考
1.分光光度計 (白色光源+分光系)汎用	広い (可視~赤外)	3GHz (1.5 $\mu$ m)	数100GHz~ 1THz	弱い	周波数確度を得るには 基準光源による校正が 必要である。
2.波長可変 レーザー光源 を用いる方法	狭い (100nm)	~100MHz (共振器FSR)	10~100MHz (周波数ドリフト)	強い	周波数確度を得るには 基準光源による校正が 必要である。
3.マルチGHz コムを光源に 用いる方法	1.55 $\mu$ m帯に 限られる。 (1520~ 1570nm)	1MHz	~1MHz	強い	光学系・制御系が複雑、 かつ、高価である。
4.FM分光法	極めて狭い (~1nm)	~0.1MHz	~0.1MHz	強い	高感度、高分解能。
5.デュアル コム分光法	狭い (50nm)	50MHz	~kHz ( $f_{\text{CEO}}, f_{\text{rep}}$ を計 測・制御)	強い	2台のフェムトレーザを 同期安定化するので、 複雑、かつ、高価である。
本願	広い (近赤外~中赤 外、可視も可 能)	~1MHz	~0.1MHz	強い	マルチGHzコム周波 数掃引により、広帯域な FM分光も可能である。

10

20

【産業上の利用可能性】

【0126】

本願に記載の測定装置は、医療・ライフサイエンス、工業化学、薬品・食品などの分野で広く利用することができる。

30

【0127】

医療・生体への応用(血中グルコース濃度測定等)。

例えば、糖尿病(国内に約700万人)に関して、血液中のグルコース濃度の定量分析が非侵襲で行うことができ、治療または予防に大きな効果が期待できる。これまで20年以上に渡って国内外で光を用いた非侵襲分析技術の研究が進められてきたが、実用化に至っていない。その主な原因は、広帯域、高分解能、高光強度の分光分析が未開拓なことによる。

40

【0128】

ガス分析( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 等)。

化学プラント等ではガス漏洩または混合比などを管理するために、分光分析技術が主流となっている。そこでは多様なガスに対応するため、近赤外から中赤外にかけて高強度の光源が必要となる。

【0129】

光通信(変調スペクトルの測定、光源の線スペクトル測定等)。

光通信分野では、周波数資源の枯渇から1.2 $\mu$ m~1.8 $\mu$ mと広い波長領域に高密度に周波数チャンネルを割り当てる研究が進んでおり、広い周波数帯域でのMHzオーダーの変調信号解析が必要となる。

50

【0130】

物性研究（原子・分子のエネルギー準位の精密測定、同位体分離）。

物性研究分野では、原子・分子のエネルギー順位の精密測定または同位体分離のために MHz 精度の周波数確度が求められている。

【0131】

以上、本発明を実施の形態を用いて説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施の形態に記載の範囲には限定されない。上記実施の形態に、多様な変更又は改良を加えることが可能であることが当業者に明らかである。その様な変更又は改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれ得ることが、請求の範囲の記載から明らかである。

【0132】

請求の範囲、明細書、および図面中において示した装置、システム、プログラム、および方法における動作、手順、ステップ、および段階等の各処理の実行順序は、特段「より前に」、「先立って」等と明示しておらず、また、前の処理の出力を後の処理で用いるのでない限り、任意の順序で実現しうることに留意すべきである。請求の範囲、明細書、および図面中の動作フローに関して、便宜上「まず、」、「次に、」等を用いて説明したとしても、この順序で実施することが必須であることを意味するものではない。

10

【符号の説明】

【0133】

10 周波数コム光源、12 短パルス光源、14 SSB変調器、15 信号発生器、  
16 EDFA、17 パルス圧縮器、18 HNL F、19 可変波長フィルタ、20  
周波数安定化レーザ、21 分散付与器、22 光変調器、23 信号発生器、24  
光パルスシンセサイザ、25 光サーキュレータ、26 アレイ導波路格子、27 強度  
変調器、28 位相変調器、29 電流制御器、30 ミラー、31 位相変調器、32  
信号発生器、33 分岐カプラ、34 SSB変調器、35 コリメートレンズ、36  
合波ミラー、38 被測定光源、40 被測定試料、42 ミラー、45 コリメート  
レンズ、50 分光光学系、52 入射スリット、54 コリメートレンズ、55 回折  
格子、56 レンズ、58 出射スリット、60 単一の光電変換素子、62 イメージ  
センサ、65 BPF、70 ADコンバータ、72 画像処理回路、80 駆動回路、  
90 プロセッサ、100 測定装置、105 測定装置、110 ロックイン検波器、  
120 位相調整器、130 電気スペクトラムアナライザ、140 デジタイザ、1  
50 デュアルコム受光器、160 デュアルコム受光器、170 ポンプ光、172  
分極反転デバイス、200 測定装置、300 測定装置、400 測定装置、500  
測定装置、550 測定装置、600 測定装置、700 測定装置、800 測定装置  
、900 測定装置、1000 測定装置、1100 測定装置、1102 第1の波長  
変換部、1104 第2の波長変換部、1106 測定装置、1200 測定装置、12  
02 光源、1204 白色ランプ、1206 コリメートレンズ、1210 被測定試  
料、1220 分光光学系、1222 回折格子、1224 スリット、1230 光検  
出器、1300 測定装置、1304 波長可変レーザ、1310 被測定試料、132  
4 光検出器、1400 測定装置、1402 周波数コム光源、1408 インターリ  
ーバ、1410 光スイッチ、1412 EDFA、1414 可変光フィルタ、141  
6 周波数シフタ、1420 被測定試料、1422 高速光検出器、1424 電気ア  
ンプ、1426 ローパスフィルタ、1428 光パワーメータ、1430 可変波長レ  
ーザ

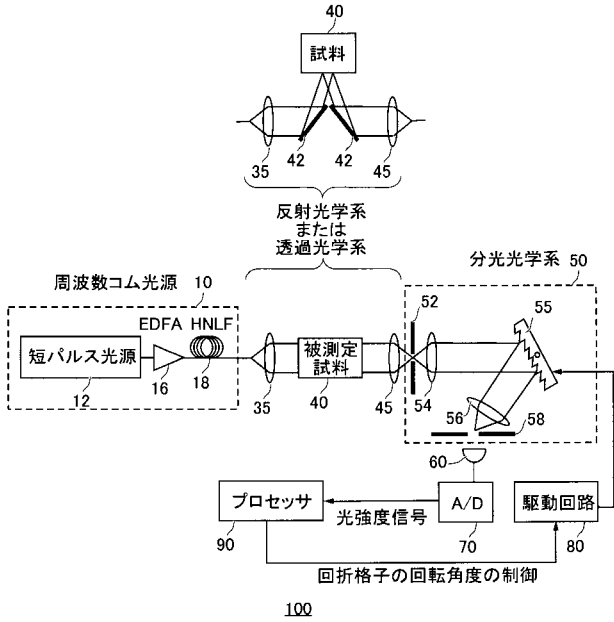
20

30

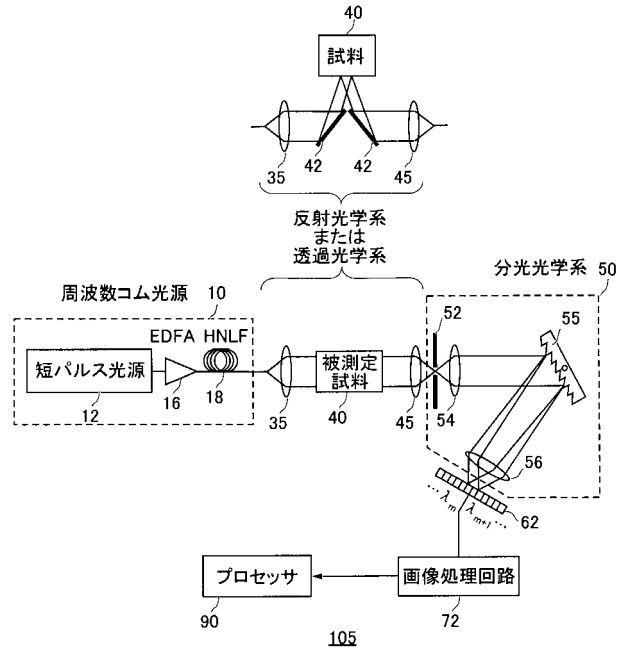
40



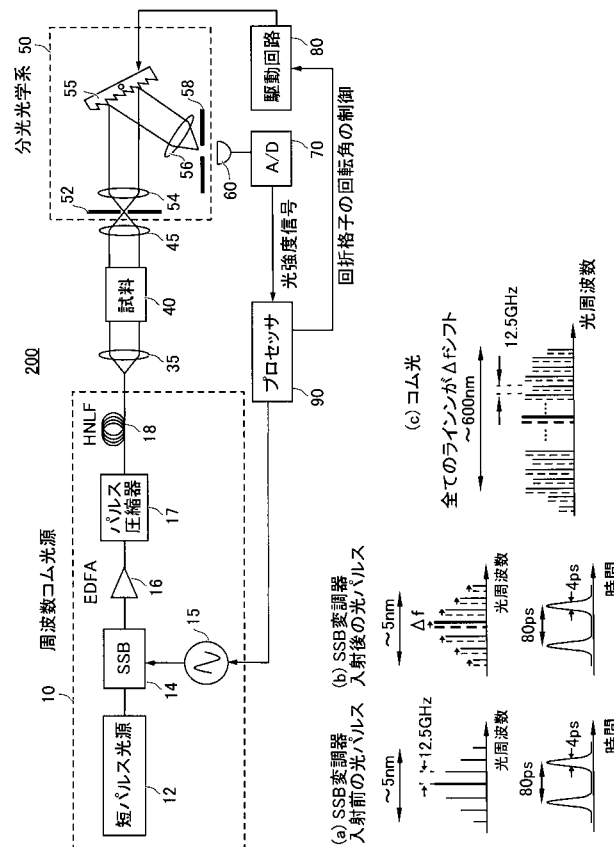
【図1】



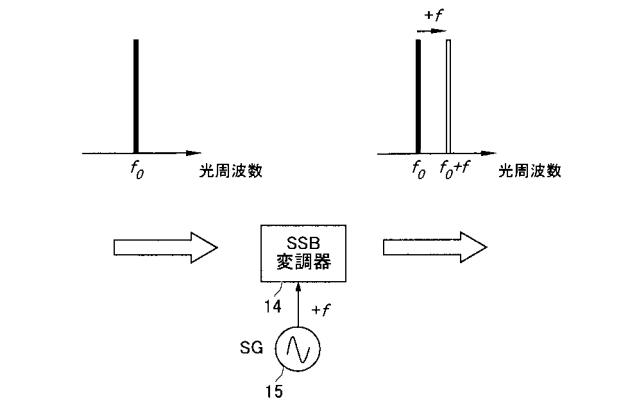
【図3】



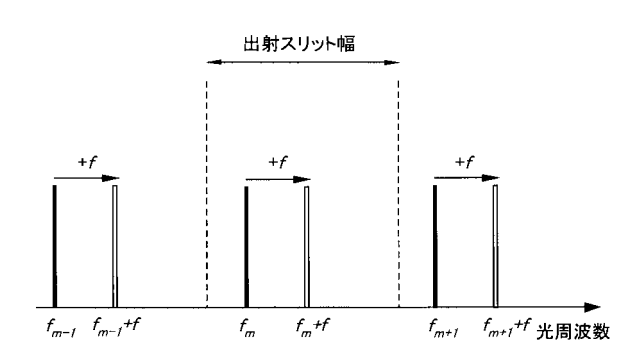
【図4】



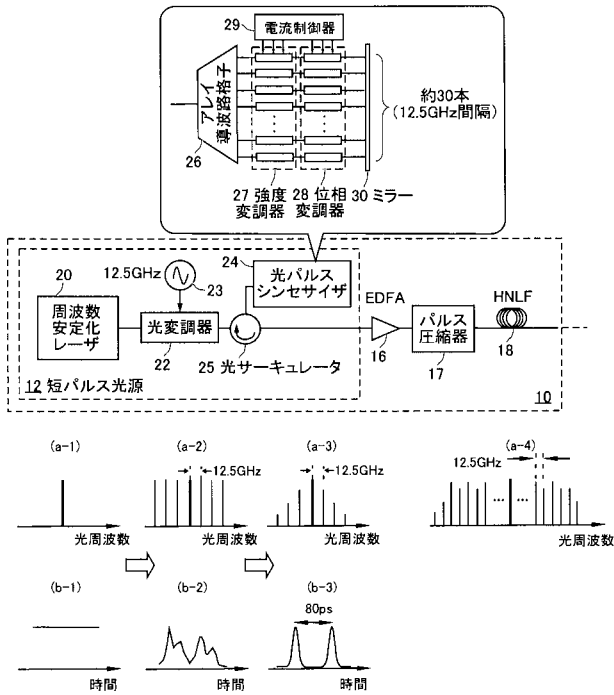
【図5】



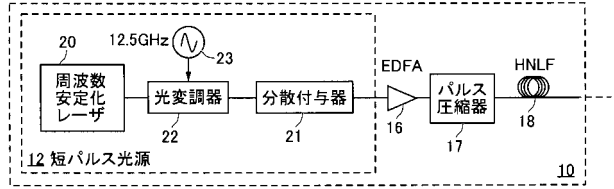
【図6】



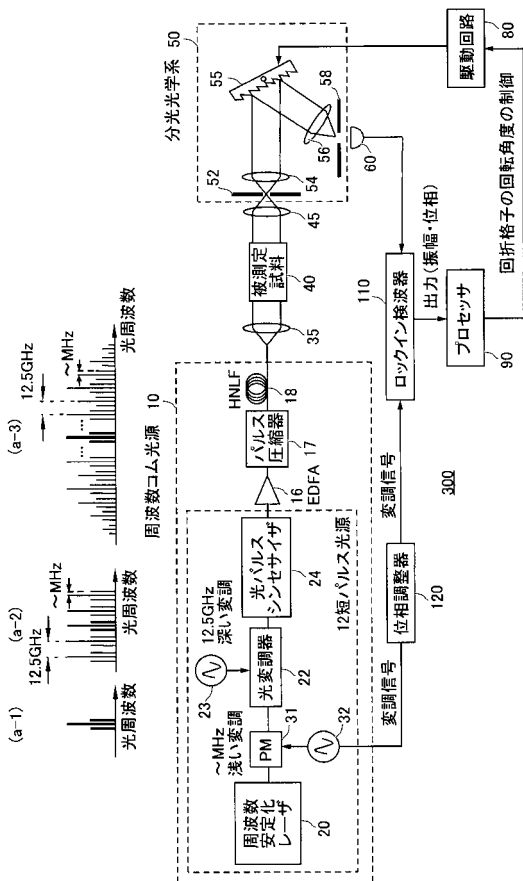
【 図 7 】



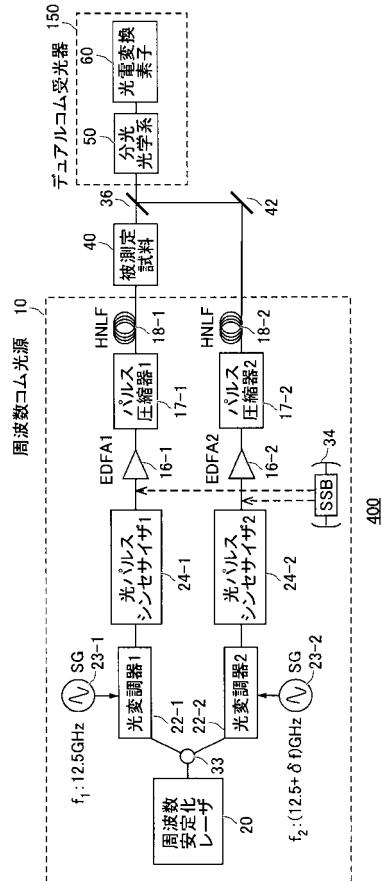
【 図 8 】



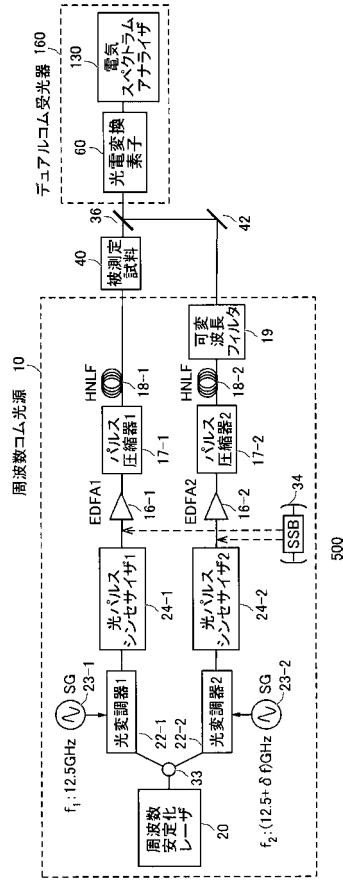
【 図 9 】



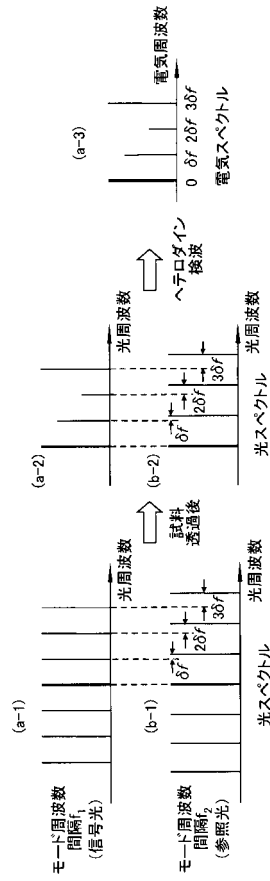
【 図 10 】



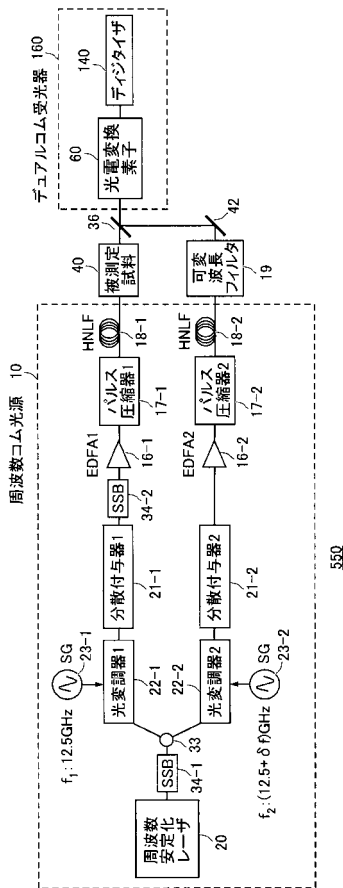
【 図 1 1 】



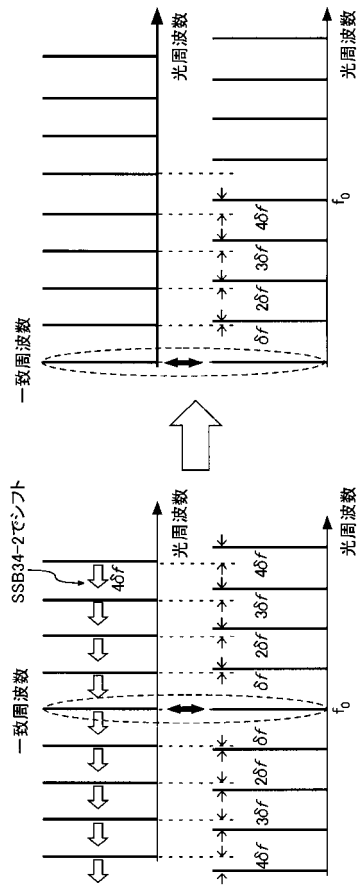
【 図 1 2 】



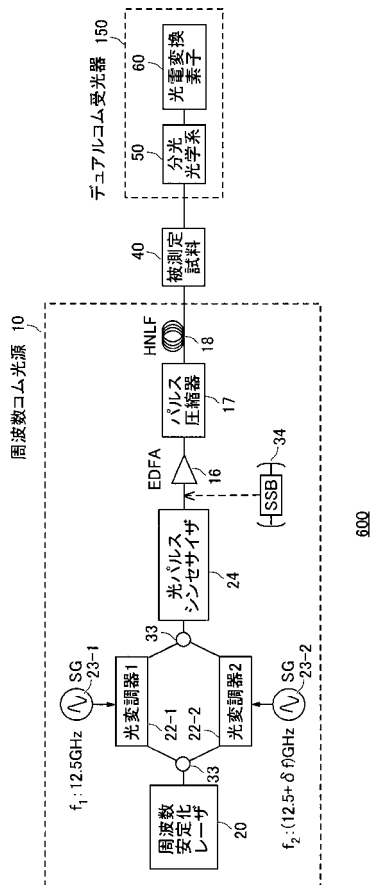
【 図 1 3 】



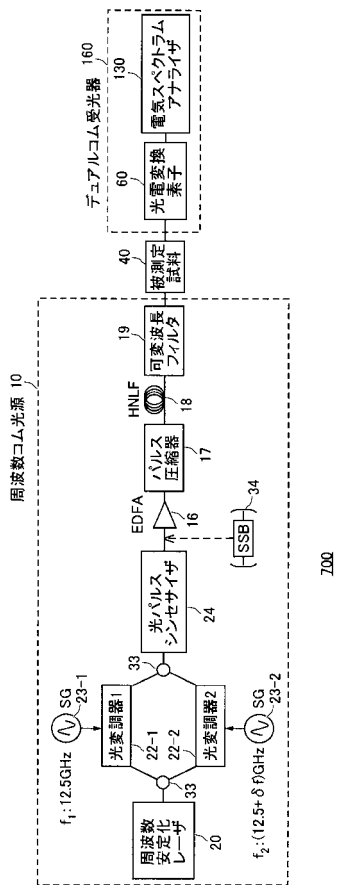
【 図 1 4 】



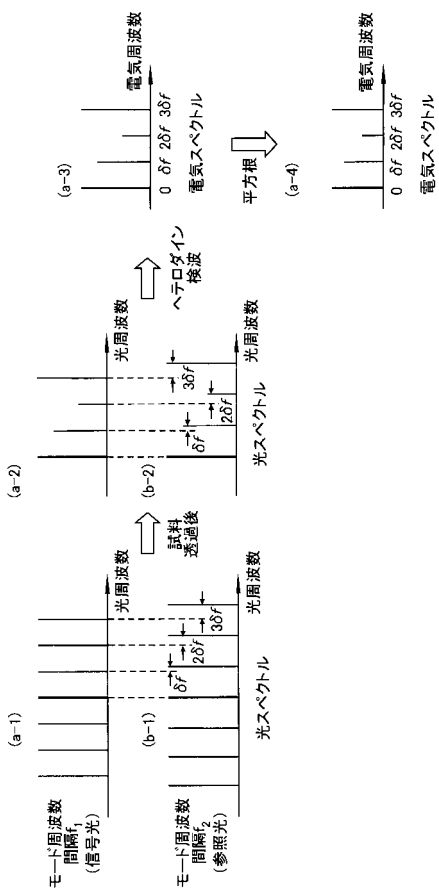
【図 15】



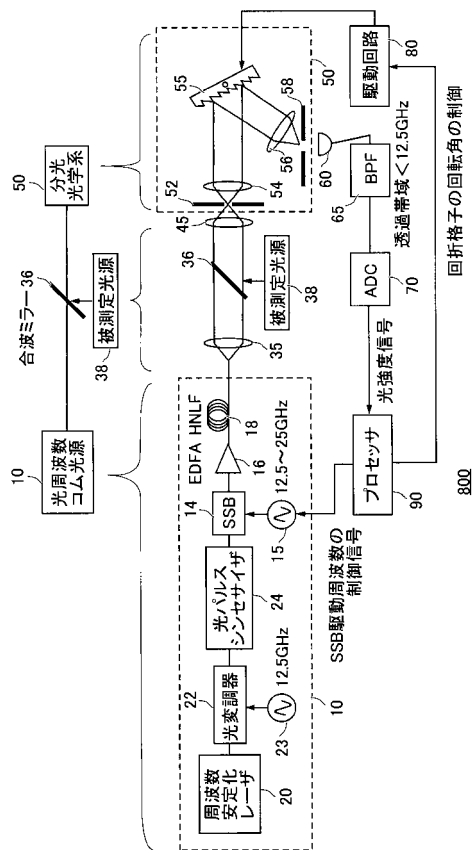
【図 16】



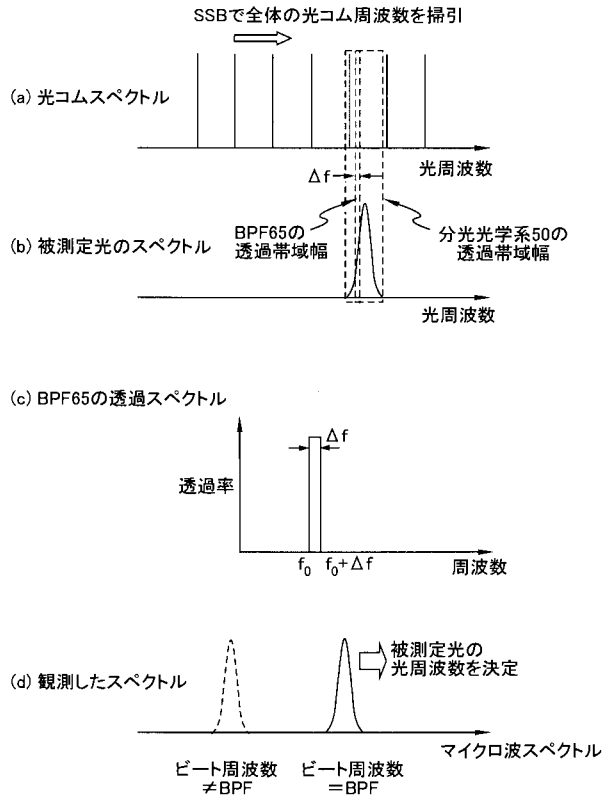
【図 17】



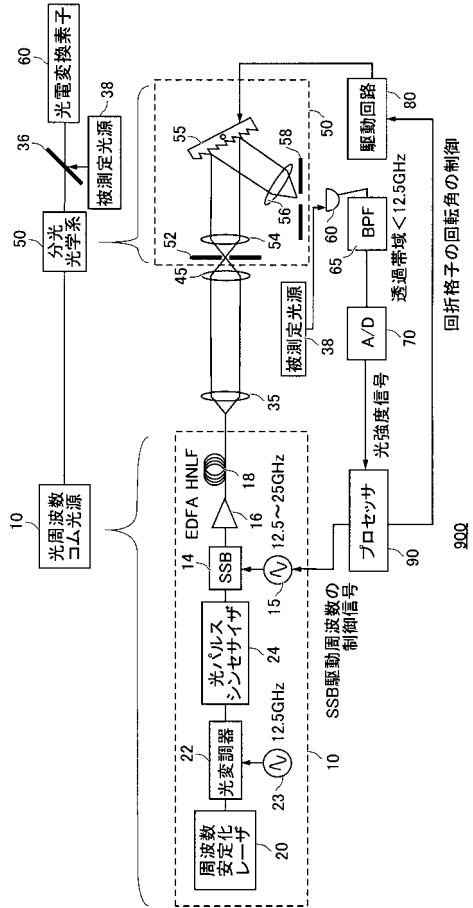
【図 18】



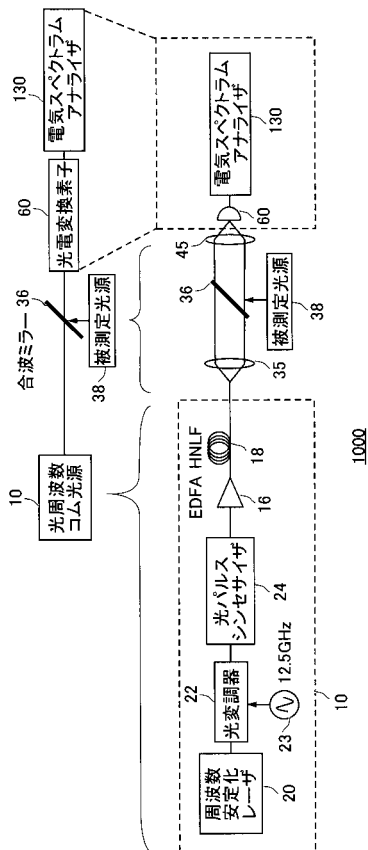
【 図 1 9 】



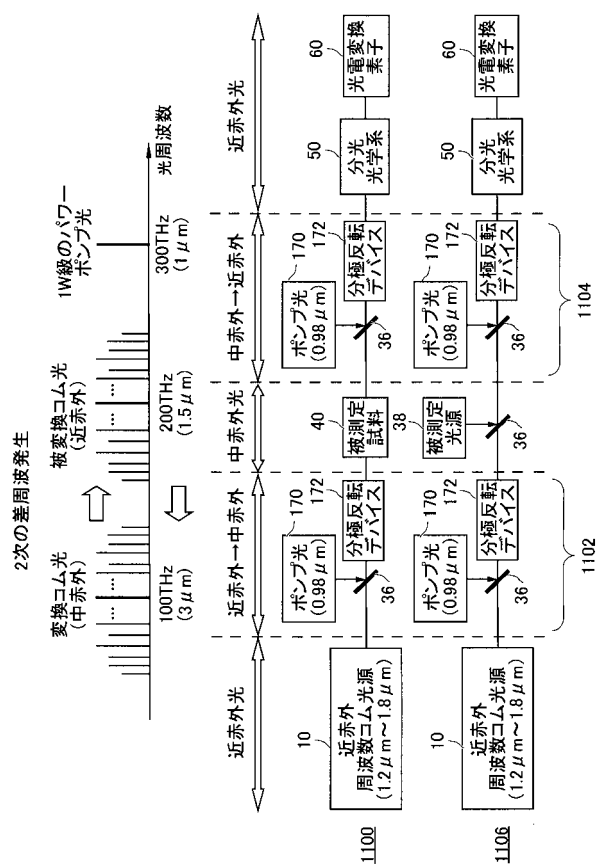
【 図 2 0 】



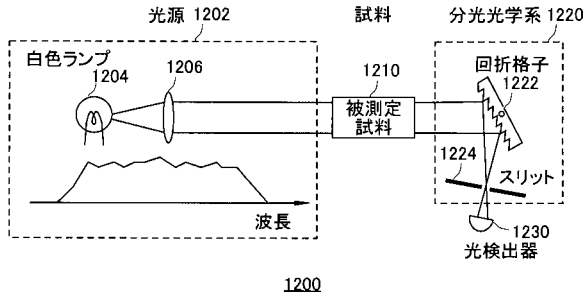
【 図 2 1 】



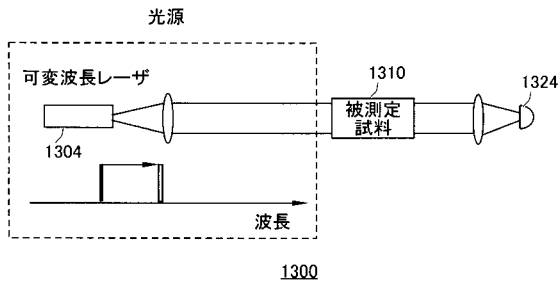
【 図 2 2 】



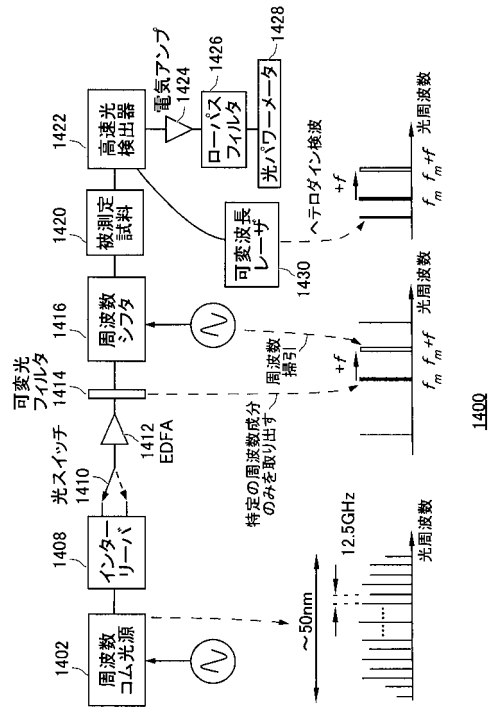
【 図 2 3 】



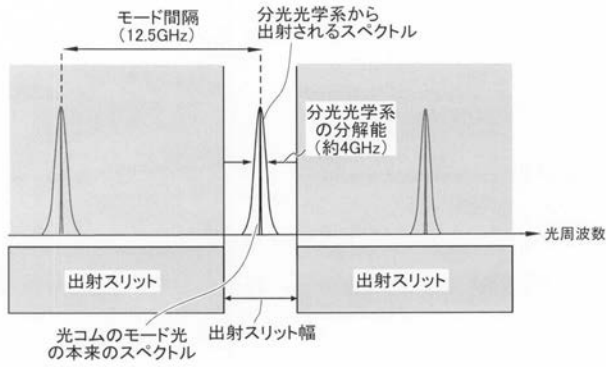
【 図 2 4 】



【 図 2 5 】



【 図 2 】



## 【手続補正書】

【提出日】平成27年2月20日(2015.2.20)

## 【手続補正1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】

被測定試料の透過特性または反射特性を測定する測定装置であって、  
一定の周波数間隔を有する複数のモード光を含むコム光を出力する周波数コム光源と、  
前記コム光が入力され、前記コム光における前記複数のモード光を一つずつ周波数分解する分光光学系と、

前記分光光学系から取り出された前記複数のモード光のうち少なくとも1つのモード光の強度を検出する光検出器と

を備え、

前記光検出器が強度を検出する前記1つのモード光は、前記コム光源の出力から、前記光検出器の入力までの間に配置された前記被測定試料を透過または反射し、

前記コム光のモード間隔周波数は、前記分光光学系の光周波数分解能より大きく、

前記コム光源は、

前記モード間隔周波数と同一の繰り返し周波数の光パルスを出力するパルス光源と、

前記パルス光源が出力する前記光パルスのスペクトルを周波数シフトさせるSSB変調器と、

前記光パルスの有する周波数帯域を拡大した前記コム光を、前記光パルスに基づいて生成する帯域拡大部と

を有し、

前記パルス光源は、

単一周波数の連続光を出力する連続発振レーザと、

前記連続光の周波数を、前記モード間隔周波数に応じた周波数で変調して、複数のモード光を含む種コム光を生成する光変調器と、

前記種コム光における各モード光の位相および振幅を調整し、光パルスを合成する光パルス合成部と

を有する

測定装置。

【請求項2】

前記モード間隔周波数は、前記分光光学系の光周波数分解能の2倍以上である

請求項1に記載の測定装置。

【請求項3】

前記分光光学系は、前記複数のモード光のうち、指定される1つのモード光だけを取り出す出射スリットを有し、

前記光検出器は、前記出射スリットから出射された前記1つのモード光の強度を検出する単一の光電変換素子を有する、

請求項1または2に記載の測定装置。

【請求項4】

前記光検出器は、前記分光光学系によって周波数分解された前記複数のモード光を並列的に検出するイメージセンサを有する、請求項1または2に記載の測定装置。

【請求項5】

(削除)

【請求項6】

前記SSB変調器におけるシフト量に応じて、前記分光光学系が取り出す光周波数の範

囲をシフトさせる制御機能を有する制御部を更に備える

請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載の測定装置。

【請求項 7】

(削除)

【請求項 8】

前記連続光の周波数を、前記モード間隔周波数よりも小さい周波数で位相変調して、それぞれのモード光に 1 次の両側サイドバンド光を生じさせて、前記光変調器に入力する位相変調器と、

前記位相変調器に信号を入力する信号発生器と、

前記光検出器の出力と前記信号発生器の信号が位相調整された信号とを受信するロックイン検波器と

を更に有し、

前記分光光学系は、指定される 1 つのモード光と当該モード光の前記 1 次の両側サイドバンド光とを同時に取り出して前記光検出器に入射し、

前記光検出器から出力される電気信号は前記ロックイン検波器に送られ、変調信号を用いて位相敏感検波され、直交した 2 つの信号が取り出される

請求項 1 に記載の測定装置。

【請求項 9】

前記光変調器は、前記連続光が分岐して入力される第 1 の光変調器および第 2 の光変調器を含み、

前記第 1 の光変調器は、前記モード間隔周波数が  $f_1$  の前記コム光の前記種コム光を生成し、前記第 2 の光変調器は、前記モード間隔周波数が  $f_2$  の前記コム光の前記種コム光を生成し、

$f_1$  と  $f_2$  との差は、 $f_1$  および  $f_2$  のいずれよりも小さく、

前記モード間隔周波数が  $f_1$  の前記コム光および前記モード間隔周波数が  $f_2$  の前記コム光の一方または両方が、前記被測定試料を透過または反射しており、

前記モード間隔周波数が  $f_1$  の前記コム光と前記モード間隔周波数が  $f_2$  の前記コム光とは合波され、前記分光光学系に入射される

請求項 1 に記載の測定装置。

【請求項 10】

前記光パルス合成部は、前記第 1 の光変調器および前記第 2 の光変調器に対応する第 1 の光パルス合成部および第 2 の光パルス合成部を含み、

前記帯域拡大部は、前記第 1 の光パルス合成部および前記第 2 の光パルス合成部に対応する第 1 の帯域拡大部および第 2 の帯域拡大部を含む

請求項 9 に記載の測定装置。

【請求項 11】

(削除)

【請求項 12】

(削除)

【請求項 13】

(削除)

【請求項 14】

(削除)

【請求項 15】

被測定光源の発光スペクトルをヘテロダイン検波により測定する測定装置であって、

周波数が異なる複数のモード光を含むコム光を出力するコム光源と、

前記コム光が入力され、前記コム光における前記複数のモード光のうち、指定される 1 つのモード光だけを取り出す分光光学系と、

前記分光光学系から取り出された前記 1 つのモード光と前記被測定光源の被測定光とが合波された光の強度を検出する光検出器と



を備え、

前記コム光において隣接する前記複数のモード光の周波数間隔であるモード間隔周波数は、前記分光光学系の光周波数分解能より大きく、

前記コム光源は、

前記モード間隔周波数と同一の繰り返し周波数の光パルスを出力するパルス光源と、

前記パルス光源が出力する前記光パルスのスペクトルを周波数シフトさせるSSB変調器と、

前記光パルスの有する周波数帯域を拡大した前記コム光を、前記光パルスに基づいて生成する帯域拡大部と

を有し、

前記パルス光源は、

単一周波数の連続光を出力する連続発振レーザと、

前記連続光の周波数を、前記モード間隔周波数に応じた周波数で変調して、複数のモード光を含む種コム光を生成する光変調器と、

前記種コム光における各モード光の位相および振幅を調整し、光パルスを合成する光パルス合成部と

を有する

測定装置。

【請求項16】

被測定光源の発光スペクトルをヘテロダイン検波により測定する測定装置であって、

周波数が異なる複数のモード光を含むコム光を出力するコム光源と、

前記コム光と前記被測定光源の被測定光とが合波された光の強度を検出する光検出器と

、

前記光検出器の出力が入力される電気スペクトラムアナライザと

を備え、

前記コム光源は、

モード間隔周波数と同一の繰り返し周波数の光パルスを出力するパルス光源と、

前記パルス光源が出力する前記光パルスのスペクトルを周波数シフトさせるSSB変調器と、

前記光パルスの有する周波数帯域を拡大した前記コム光を、前記光パルスに基づいて生成する帯域拡大部と

を有し、

前記パルス光源は、

単一周波数の連続光を出力する連続発振レーザと、

前記連続光の周波数を、前記モード間隔周波数に応じた周波数で変調して、複数のモード光を含む種コム光を生成する光変調器と、

前記種コム光における各モード光の位相および振幅を調整し、光パルスを合成する光パルス合成部と

を有する

測定装置。

【請求項17】

前記コム光源と前記分光光学系との間において、

近赤外の波長帯域のコム光を、前記近赤外の波長帯域よりも長波長である中赤外の波長帯域のコム光に変換する、第1の波長変換部と、

前記第1の波長変換部において中赤外の波長帯域に変換されたコム光を、前記被測定試料を透過または反射した後に、近赤外の波長帯域のコム光に再び変換する、第2の波長変換部と

をさらに備える

請求項1から4、6、8から10のいずれか一項に記載の測定装置。

【請求項18】

(削除)

【請求項 19】

前記コム光源と前記分光光学系との間において、  
近赤外の波長帯域のコム光を、前記近赤外の波長帯域よりも長波長である中赤外の波長帯域のコム光に変換する、第1の波長変換部と、  
前記第1の波長変換部において中赤外の波長帯域に変換されたコム光を、前記被測定光と合波した後に、近赤外の波長帯域のコム光に再び変換する、第2の波長変換部とをさらに備える  
請求項15に記載の測定装置。

【請求項 20】

前記コム光源と前記光検出器との間において、  
近赤外の波長帯域のコム光を、前記近赤外の波長帯域よりも長波長である中赤外の波長帯域のコム光に変換する、第1の波長変換部と、  
前記第1の波長変換部において中赤外の波長帯域に変換されたコム光を、前記被測定光と合波した後に、近赤外の波長帯域のコム光に再び変換する、第2の波長変換部とをさらに備える  
請求項16に記載の測定装置。

【手続補正 2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0016

【補正方法】変更

【補正の内容】

【0016】

、操作も簡便となる利点がある。

[0056]

図9は、第3の実施形態における測定装置300を示す図である。測定装置300により、FM分光を実行することができる。測定装置300は、基本的には、第1の実施形態における測定装置100の周波数コム光源10を、図7の周波数コム光源10とした構成である。ただし、位相変調器31、信号発生器32、位相調整器120およびロックイン検波器110を設ける点が異なる。なお、本例の周波数コム光源10は、短パルス光源12と帯域拡大部16との間に周波数シフタとしてのSSB変調器14を有してもよい。

[0057]

本例の短パルス光源12は、周波数安定化レーザ20および光変調器22の間に位相変調器31を有する。位相変調器31には、信号発生器32からMHzオーダーの変調電圧が加えられる。位相変調器31は、周波数安定化レーザ20の連続光の周波数を、モード間隔周波数よりも小さい周波数で位相変調する。本例では、位相変調器31の変調周波数は、光変調器22の変調周波数よりも小さい。位相変調器31は、周波数安定化レーザ20が発振した単一周波数連続光に1次の両側サイドバンド光を生じさせて(図9(a1))、当該光を光変調器22に入力する。

[0058]

つまり、本例では、周波数安定化レーザ20から出射する連続発振光を位相変調器31で位相変調するだけで、周波数コム全てのモードを同じように位相変調することができる。

[0059]

光変調器22は、位相変調器31から入力された光を変調して種コム光を生成する。種コム光の各モードは1次の両側サイドバンドを有する(図9(a2))。信号発生器32が発生する正弦波信号は、位相変調器31に入力される。同時に信号発生器32が発生する正弦波信号は位相調整器120によって位相が調整されて、ロックイン検波器110にも入力される。

[0060]

位相変調器 31 により浅く位相変調された 1 つのモード光は、分光光学系 50 によって取り出され、光検出器としての単一の光電変換素子 60 に入射する。制御部としてのプロセッサ 90 は、ロックイン検波器 110 から出力される信号を取り込むとともに、駆動回路 80 に制御信号を送る。駆動回路 80 は、当該制御信号に基づいて分光光学系 50 における回折格子 55 の回

## 【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2014/004314
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01N21/27 (2006.01) i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01N21/00-G01N21/61, G01J3/00-G01J3/52, G01M11/00-G01M11/08		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2014 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2014 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2014		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) JSTPlus (JDreamIII)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2011-007571 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 13 January 2011 (13.01.2011), paragraphs [0001] to [0005], [0018] to [0022], [0034] to [0035]	<u>1-7</u> 8-10
X Y	JP 8-101066 A (Anritsu Corp.), 16 April 1996 (16.04.1996), paragraphs [0001], [0012], [0023] to [0024]; fig. 1, 8 to 9	<u>15-16</u> 1-3, 5-7
Y	JP 2010-230653 A (Canon Inc.), 14 October 2010 (14.10.2010), paragraphs [0015] to [0016], [0023] to [0024]	1, 4
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents:		
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention	
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone	
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art	
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search 10 September, 2014 (10.09.14)	Date of mailing of the international search report 22 September, 2014 (22.09.14)	
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer	
Facsimile No.	Telephone No.	

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/004314

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2013/040168 A2 (THE MASSACHUSETTS INSTITUTES OF TECHNOLOGY), 21 March 2013 (21.03.2013), paragraphs [0028], [0036]	5-7, 11-14
Y	CHOI, S. et al. "Supercontinuum Comb Generation Using Optical Pulse Synthesizer and Highly Nonlinear Dispersion-Shifted Fiber", JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Volume 48, 2009.09.24, Article 09LF01 * Figure 1	7, 11-14
A	NEWBURY, N.R. et al. "Sensitivity of coherent dual-comb spectroscopy", OPTICS EXPRESS, Volume 18, Number 8, 2010.03.31, Pages 7929-7945 * Figure 4	9-10
Y	Naoto WATANABE et al., "Dual-comb spectroscopy using two electro-optic modulator based frequency combs", Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan, vol.68, no.1, Part 2, 05 March 2013 (05.03.2013), page 221, Article 27pEE-9 * main text, fig. 1	11-14
A	JP 2013-507005 A (IMRA AMERICA, INC.), 28 February 2013 (28.02.2013), paragraphs [0038], [0055]; fig. 4	17-18
A	Sho OKUBO et al., "Dual-comb System for Broadband Near-infrared Spectroscopy", Extended Abstracts of the 74th JSAP Autumn Meeting, 31 August 2013 (31.08.2013), Article 04-126, 1 page	11

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/004314

**Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)**

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1.  Claims Nos.:  
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
2.  Claims Nos.:  
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3.  Claims Nos.:  
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

**Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)**This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:  
(See extra sheet.)

1.  As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2.  As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3.  As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4.  No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

- Remark on Protest**
- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- No protest accompanied the payment of additional search fees.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2014/004314

Continuation of Box No.III of continuation of first sheet(2)

On the basis of special technical features of the present application, inventions of respective claims set forth in the scope of claims are classified into four inventions each of which has a special technical feature indicated below.

(Invention 1) claims 1-10 and 17

"A measurement device which is provided with: a frequency comb light source for outputting comb light; a spectral optical system for frequency-resolving a plurality of mode beams in the comb light one by one; and a light detector for detecting the intensity of at least one mode beam, wherein the one mode beam is transmitted through or reflected by a sample to be measured disposed between the output of the comb light source and the input of the light detector, and the mode spacing frequency of the comb light is higher than the light frequency resolution of the spectral optical system"

(Invention 2) claims 11-14 and 18

"A measurement device which is provided with a dual comb light receiver and performs measurement by heterodyne detection, wherein a pulse light source, a band expansion unit, and a frequency shifter are used in a comb light source, and in the pulse light source, two kinds of seed comb light beams having slightly different mode spacing frequencies are generated by branching continuous light from a continuous wave laser into two light beams and causing the two light beams to be incident on a first modulator and a second modulator"

(Invention 3) claim 15

"A measurement device which is provided with: a frequency comb light source for outputting comb light; a spectral optical system for frequency-resolving a plurality of mode beams in the comb light one by one; and a light detector for detecting the intensity of at least one mode beam, and measures an emission spectrum of a light source to be measured by heterodyne detection, wherein the mode spacing frequency of the comb light is higher than the light frequency resolution of the spectral optical system"

(Invention 4) claim 16

"A measurement device which heterodyne-detects an emission spectrum using a comb light source, wherein a light detector and an electric spectrum analyzer are used"

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2014/004314

JP 2011-007571 A	2011.01.13	JP 5475341 B2	2014.04.16
JP 8-101066 A	1996.04.16	(Family: none)	
JP 2010-230653 A	2010.10.14	EP 2228621 A2	2010.09.15
		EP 2228621 A3	2011.01.26
		US 2010/225924 A1	2010.09.09
		US 8363226 B2	2013.01.29
WO 2013/040168 A2	2013.03.21	WO 2013/040168 A3	2014.05.22
		US 2014/185635 A1	2014.07.03
JP 2013-507005 A	2013.02.28	CN 102576971 A	2012.07.11
		DE 112010003904 T5	2013.03.07
		US 2011/080580 A1	2011.04.07
		WO 2011/041472 A1	2011.04.07



国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2014/004314	
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01N21/27(2006.01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01N 21/00 - G01N 21/61, G01J 3/00 - G01J 3/52, G01M 11/00 - G01M 11/08			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2014年 日本国実用新案登録公報 1996-2014年 日本国登録実用新案公報 1994-2014年			
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) JSTPlus (JDreamIII)			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号	
Y A	JP 2011-007571 A (日本電信電話株式会社) 2011.01.13 [0001]-[0005], [0018]-[0022], [0034]-[0035]	1-7 8-10	
X Y	JP 8-101066 A (アンリツ株式会社) 1996.04.16 [0001], [0012], [0023]-[0024], 図 1, 8-9	15-16 1-3, 5-7	
Y	JP 2010-230653 A (キヤノン株式会社) 2010.10.14 [0015]-[0016], [0023]-[0024]	1, 4	
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。		<input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。	
* 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願		の日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献	
国際調査を完了した日 10.09.2014		国際調査報告の発送日 22.09.2014	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号 100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 高揚 正光 電話番号 03-3581-1101 内線 3250	2W 2910

国際調査報告

国際出願番号 PCT/JP2014/004314

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	WO 2013/040168 A2 (THE MASSACHUSETTS INSTITUTES OF TECHNOLOGY) 2013.03.21 [0028], [0036]	5-7, 11-14
Y	CHOI, S. et. al. "Supercontinuum Comb Generation Using Optical Pulse Synthesizer and Highly Nonlinear Dispersion-Shifted Fiber", JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Volume 48, 2009.09.24, Article 09LF01 * Figure 1	7, 11-14
A	NEWBURY, N. R. et. al. "Sensitivity of coherent dual-comb spectroscopy", OPTICS EXPRESS, Volume 18, Number 8, 2010.03.31, Pages 7929-7945 * Figure 4	9-10
Y	渡邊直登 他, "電気光学変調器型光周波数コムを用いたデュアルコム分光", 日本物理学会講演概要集 [WATANABE, N. et. al. "Dual-comb spectroscopy using two electro-optic modulator based frequency combs". Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan], Volume 68, Number 1, Part 2, 2013.03.05, Page 221, Article 27pEE-9 * 本文, 図1	11-14
A	JP 2013-507005 A (IMRA AMERICA, INC.) 2013.02.28 [0038], [0055], 図4	17-18
A	大久保章 他, "近赤外デュアルコム広帯域分光システムの開発", 第74回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集 [OKUBO, S. et. al. "Dual-comb System for Broadband Near-infrared Spectroscopy", Extended Abstracts of the 74th JSAP Autumn Meeting ], 2013.08.31, Article 04-126, 1 Page	11

国際調査報告	国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 4 / 0 0 4 3 1 4
<p>第Ⅱ欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見（第1ページの2の続き）</p> <p>法第8条第3項（PCT17条(2)(a)）の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。</p> <p>1. <input type="checkbox"/> 請求項 _____ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。つまり、</p> <p>2. <input type="checkbox"/> 請求項 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、</p> <p>3. <input type="checkbox"/> 請求項 _____ は、従属請求の範囲であってPCT規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。</p>	
<p>第Ⅲ欄 発明の単一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）</p> <p>次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるときの国際調査機関は認めた。 （特別ページ参照）</p> <p>1. <input type="checkbox"/> 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求項について作成した。</p> <p>2. <input checked="" type="checkbox"/> 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求項について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。</p> <p>3. <input type="checkbox"/> 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求項のみについて作成した。</p> <p>4. <input type="checkbox"/> 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求項について作成した。</p> <p>追加調査手数料の異議の申立てに関する注意</p> <p><input type="checkbox"/> 追加調査手数料及び、該当する場合には、異議申立手数料の納付と共に、出願人から異議申立てがあった。</p> <p><input type="checkbox"/> 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあったが、異議申立手数料が納付命令書に示した期間内に支払われなかった。</p> <p><input type="checkbox"/> 追加調査手数料の納付はあったが、異議申立てはなかった。</p>	

本願の特別な技術的特徴に基づくと、請求の範囲に記載された各請求項に係る発明は、下記の特別な技術的特徴を有する4つの発明に区分される。

(発明1) 請求項 1-10, 17

「コム光を出力する周波数コム光源と、コム光における複数のモード光を一つずつ周波数分解する分光光学系と、少なくとも1つのモード光の強度を検出する光検出器とを備えた測定装置において、前記1つのモード光は、前記コム光源の出力から、前記光検出器の入力までの間に配置された非測定試料を透過又は反射し、前記コム光のモード間隔周波数が、分光光学系の光周波数分解能よりも大きいこと」

(発明2) 請求項 11-14, 18

「デュアルコム受光器を備え、ヘテロダイン検波により測定する測定装置において、コム光源にパルス光源と帯域拡大部と周波数シフタとを用いるとともに、前記パルス光源において連続発振レーザからの連続光を2つに分岐して第1の変調器及び第2の変調器に入射させることにより、モード間隔周波数が小さく異なる2種類の種コム光を生成すること」

(発明3) 請求項 15

「コム光を出力する周波数コム光源と、コム光における複数のモード光を一つずつ周波数分解する分光光学系と、少なくとも1つのモード光の強度を検出する光検出器とを備え、被測定光源の発光スペクトルをヘテロダイン検波により測定する測定装置において、前記コム光のモード間隔周波数が、分光光学系の光周波数分解能よりも大きいこと」

(発明4) 請求項 16

「コム光源を用いて発光スペクトルをヘテロダイン検波する測定装置において、光検出器と電気スペクトラムアナライザとを用いること」

国際調査報告  
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 4 / 0 0 4 3 1 4

JP 2011-007571 A	2011.01.13	JP 5475341 B2	2014.04.16
-----	-----	-----	-----
JP 8-101066 A	1996.04.16	(ファミリーなし)	
-----	-----	-----	-----
JP 2010-230653 A	2010.10.14	EP 2228621 A2	2010.09.15
		EP 2228621 A3	2011.01.26
		US 2010/225924 A1	2010.09.09
		US 8363226 B2	2013.01.29
-----	-----	-----	-----
WO 2013/040168 A2	2013.03.21	WO 2013/040168 A3	2014.05.22
		US 2014/185635 A1	2014.07.03
-----	-----	-----	-----
JP 2013-507005 A	2013.02.28	CN 102576971 A	2012.07.11
		DE 112010003904 T5	2013.03.07
		US 2011/080580 A1	2011.04.07
		WO 2011/041472 A1	2011.04.07
-----	-----	-----	-----

## フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG

(72)発明者 田中 洋介

東京都府中市晴見町3 - 8 - 1 国立大学法人東京農工大学内

(72)発明者 塩田 達俊

埼玉県さいたま市桜区下大久保2 5 5 国立大学法人埼玉大学内

Fターム(参考) 2G059 AA01 BB01 BB12 CC04 CC05 CC16 EE01 EE02 EE12 GG01  
GG06 GG08 GG09 HH01 JJ02 JJ03 JJ05 JJ11 JJ13 JJ17  
JJ22 KK02 KK04

(注)この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。