

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7194438号
(P7194438)

(45)発行日 令和4年12月22日(2022.12.22)

(24)登録日 令和4年12月14日(2022.12.14)

(51)国際特許分類		F I	
G 0 1 J	3/45 (2006.01)	G 0 1 J	3/45
G 0 1 J	9/02 (2006.01)	G 0 1 J	9/02
G 0 1 J	3/10 (2006.01)	G 0 1 J	3/10
G 0 1 B	9/02 (2022.01)	G 0 1 B	9/02

請求項の数 10 (全19頁)

(21)出願番号	特願2019-509004(P2019-509004)	(73)特許権者	504133110 国立大学法人電気通信大学 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1
(86)(22)出願日	平成31年1月22日(2019.1.22)	(74)代理人	100106909 弁理士 棚井 澄雄
(86)国際出願番号	PCT/JP2019/001898	(74)代理人	100175824 弁理士 小林 淳一
(87)国際公開番号	WO2019/167478	(74)代理人	100169764 弁理士 清水 雄一郎
(87)国際公開日	令和1年9月6日(2019.9.6)	(72)発明者	美濃島 薫 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内
審査請求日	令和3年12月24日(2021.12.24)	(72)発明者	加藤 峰士 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内
(31)優先権主張番号	特願2018-38101(P2018-38101)		
(32)優先日	平成30年3月2日(2018.3.2)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		
(出願人による申告)平成25年度、独立行政法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業、総括実施型研究、研究プロジェクト名「ERATO美濃島知的シンセサイザプロジェクト」に係る産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願			

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 2次元分光計測方法及び2次元分光計測装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

周波数軸で零に対して所定のオフセット周波数を有する第1の周波数モードと前記周波数軸で前記第1の周波数モードに対して所定の繰り返し周波数の整数倍の間隔をあけて並ぶ複数の第2の周波数モードとを有し、前記繰り返し周波数が前記オフセット周波数の4倍である第1の光周波数コムを生成する光周波数コム生成工程と、

前記第1の光周波数コムを第2の光周波数コムと第3の光周波数コムに分け、前記第2の光周波数コムを第4の光周波数コムと第5の光周波数コムに分け、前記第4の光周波数コムの時間軸上の位相を前記第5の光周波数コムの時間軸上の位相に対して90°ずらす位相差付与工程と、

前記第3の光周波数コムまたは前記第4の光周波数コム及び前記第5の光周波数コムを試料に照射し、前記試料から出射されて光学情報を含む前記第3の光周波数コム、または前記第4の光周波数コム及び前記第5の光周波数コムを得る試料照射工程と、

何れかに前記光学情報を含む前記第4の光周波数コムと前記第3の光周波数コムとを干渉させて第1の干渉信号を生成し、何れかに前記光学情報を含む前記第5の光周波数コムと前記第3の光周波数コムとを干渉させて第2の干渉信号を生成する干渉信号生成工程と、

前記第1の干渉信号と前記第2の干渉信号から包絡線強度を取得する包絡線強度取得工程と、

前記包絡線強度に基づいて前記試料の光学情報を抽出する光学情報抽出工程と、
を備える2次元分光計測方法。

【請求項 2】

前記時間軸上における前記第 4 の光周波数コムと前記第 5 の光周波数コムとの位相のずれに応じて前記繰り返し周波数を調整する繰り返し周波数調整工程をさらに備える、
請求項 1 に記載の 2 次元分光計測方法。

【請求項 3】

前記包絡線強度取得工程において、
透過率の波長依存性が互いに逆である 2 枚のフィルタのそれぞれを前記包絡線強度が通過したときの透過強度を取得し、
前記光学情報抽出工程において、
前記透過強度の比に基づいて前記光学情報を算出する、
請求項 1 または請求項 2 に記載の 2 次元分光計測方法。

10

【請求項 4】

前記光学情報抽出工程において、
前記第 2 の光周波数コムまたは前記第 3 の光周波数コムに所定の遅延時間を付加し、
前記光学情報を含む強度・位相スペクトルを取得する、
請求項 1 から請求項 3 の何れか一項に記載の 2 次元分光計測方法。

【請求項 5】

前記光学情報は、前記第 3 の光周波数コム、前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムの何れか 1 つの光周波数コムの光路上の屈折率の分布、前記屈折率の揺らぎ、
前記試料の形状の何れかを含む、
請求項 1 から請求項 4 の何れか一項に記載の 2 次元分光計測方法。

20

【請求項 6】

周波数軸で零に対して所定のオフセット周波数を有する第 1 の周波数モードと前記周波数軸で前記第 1 の周波数モードに対して所定の繰り返し周波数の整数倍の間隔をあけて並ぶ複数の第 2 の周波数モードとを有し、前記繰り返し周波数が前記オフセット周波数の 4 倍である第 1 の光周波数コムを出射する光周波数コム出射部と、

前記第 1 の光周波数コムを第 2 の光周波数コムと第 3 の光周波数コムに分ける第 1 の分岐部と、

前記第 2 の光周波数コムを第 4 の光周波数コムと第 5 の光周波数コムに分ける第 2 の分岐部と、

30

前記第 4 の光周波数コムの時間軸上の位相を前記第 5 の光周波数コムの時間軸上の位相に対して 90° ずらす位相差付与部と、

前記第 3 の光周波数コムまたは前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムは任意の光学情報を含み、前記第 4 の光周波数コムと前記第 3 の光周波数コムとを干渉させて第 1 の干渉信号を生成し、前記第 5 の光周波数コムと前記第 3 の光周波数コムとを干渉させて第 2 の干渉信号を生成する干渉信号生成部と、

前記第 1 の干渉信号と前記第 2 の干渉信号との包絡線強度を取得する包絡線強度取得部と、

前記包絡線強度に基づいて前記光学情報を抽出する光学情報抽出部と、
を備える 2 次元分光計測装置。

40

【請求項 7】

前記位相差付与部から出射された前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムの一部を取得し、前記光周波数コム出射部にフィードバックするフィードバック機構をさらに備える、

請求項 6 に記載の 2 次元分光計測装置。

【請求項 8】

前記包絡線強度取得部は、

透過率の波長依存性が互いに逆である 2 枚のフィルタを備え、

前記包絡線強度が前記 2 枚のフィルタのそれぞれを通過したときの透過強度を取得し、
前記光学情報抽出部は、

50

前記透過強度の比に基づいて前記光学情報を算出する、
請求項 6 または請求項 7 に記載の 2 次元分光計測装置。

【請求項 9】

前記第 2 の光周波数コムまたは前記第 3 の光周波数コムに所定の遅延時間を付加する遅延機構をさらに備え、

前記光学情報抽出部において、

前記光学情報を含む強度・位相スペクトルを取得する、

請求項 6 から請求項 8 の何れか一項に記載の 2 次元分光計測装置。

【請求項 10】

前記光学情報は、前記第 3 の光周波数コム、前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムの何れか 1 つの光周波数コムの光路上の屈折率の分布、前記屈折率の揺らぎ、前記第 3 の光周波数コムの進路上に、または前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムの進路上に配置した試料の形状の何れかを含む、

請求項 6 から請求項 9 の何れか一項に記載の 2 次元分光計測装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、2次元分光計測方法及び2次元分光計測装置に関する。本願は、2018年3月2日に、日本に出願された特願2018-038101号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

【背景技術】

【0002】

従来、分光情報を得る手法として、撮像法やフーリエ変換赤外分光法 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR)、分散型の赤外分光法などをはじめとする多くの手法が用いられている。これらの手法では、2次元の空間情報と1次元の波長情報とを同時に得ることは困難であった。以下、2次元の空間情報と1次元の波長情報とをまとめて、2次元分光情報という場合がある。

【0003】

近年、天文学や地球科学、物性分野などの学術分野では、2次元分光情報に含まれる各情報を同時にリアルタイムで取得可能な2次元分光への期待が高まっている。2次元分光は、面分光、あるいはハイパースペクトルイメージングとも呼ばれる。2次元分光情報が得られれば、例えば取得データから任意の波長の画像を抽出でき、例えば銀河などの広がった天体について詳細に解析ができる。従来の2次元分光法では、例えば2次元平面の各点(複数の測定領域)をスキャンしつつ、各点についてFT-IRを行い、2次元分光情報を取得できる。ところが、従来の2次元分光法では空間掃引に時間がかかるため、動的対象物の計測が困難であるという問題があった。一方、一度に2次元分光情報を取得できれば、様々な動的対象物の分光計測を正確に行うことができる。

【0004】

2次元分光の手法としては、例えば可変バンドパスフィルタで透過させる波長帯を掃引しながら取得する手法などが挙げられる。非特許文献1には、可変バンドパスフィルタで透過させる波長帯を掃引しつつ、2次元の空間情報と1次元の波長情報とを取得する手法に適用可能な可変バンドパスフィルタが開示されている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【文献】H. R. Morris, C. C. Hoyt, P. Miller and P. J. Treado, "Liquid Crystal Tunable Filter Raman Chemical Imaging," Appl. Spectrosc. vol. 50, no. 6, pp. 805-811 (1996).

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

20

30

40

50

【 0 0 0 6 】

しかしながら、非特許文献 1 に開示されている可変バンドパスフィルタで異なる波長帯の光を透過させて 2 次元の空間情報と 1 次元の波長情報とを取得する場合、波長帯を掃引する必要があるので、掃引時間がかかり、瞬時に高解像度の波長情報やスペクトル分布などの分光情報を得るのは困難であるという問題があった。そのため、上述の可変バンドパスフィルタを用いて波長帯を掃引する 2 次元分光は、動的現象の計測には不向きであった。

【 0 0 0 7 】

本発明は、上述の問題を解決するためになされたものであって、瞬時に高解像度の分光情報を取得し、リアルタイムで 2 次元分光計測を可能とする 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置を提供する。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 8 】

本発明の 2 次元分光計測方法は、周波数軸で零に対して所定のオフセット周波数を有する第 1 の周波数モードと前記周波数軸で前記第 1 の周波数モードに対して所定の繰り返し周波数の整数倍の間隔をあけて並ぶ複数の第 2 の周波数モードとを有し、前記繰り返し周波数が前記オフセット周波数の 4 倍である第 1 の光周波数コムを生成する光周波数コム生成工程と、前記第 1 の光周波数コムを第 2 の光周波数コムと第 3 の光周波数コムに分け、前記第 2 の光周波数コムを第 4 の光周波数コムと第 5 の光周波数コムに分け、前記第 4 の光周波数コムの時間軸上の位相を前記第 5 の光周波数コムの時間軸上の位相に対して 90° ずらす位相差付与工程と、前記第 3 の光周波数コムまたは前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムを試料に照射し、前記試料から出射されて光学情報を含む前記第 3 の光周波数コムまたは前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムを得る試料照射工程と、何れかに前記光学情報を含む前記第 4 の光周波数コムと前記第 3 の光周波数コムとを干渉させて第 1 の干渉信号を生成し、何れかに前記光学情報を含む前記第 5 の光周波数コムと前記第 3 の光周波数コムとを干渉させて第 2 の干渉信号を生成する干渉信号生成工程と、前記第 1 の干渉信号と前記第 2 の干渉信号から包絡線強度を取得する包絡線強度取得工程と、前記包絡線強度に基づいて前記試料の光学情報を抽出する光学情報抽出工程と、を備える。

【 0 0 0 9 】

上述の 2 次元分光計測方法では、前記時間軸上における前記第 4 の光周波数コムと前記第 5 の光周波数コムとの位相のずれに応じて前記繰り返し周波数を調整する繰り返し周波数調整工程をさらに備えてもよい。

【 0 0 1 0 】

また、上述の 2 次元分光計測方法では、前記包絡線強度取得工程において、透過率の波長依存性が互いに逆である 2 枚のフィルタのそれぞれを前記包絡線強度が通過したときの透過強度を取得し、前記光学情報抽出工程において、前記透過強度の比に基づいて前記光学情報を算出してもよい。

【 0 0 1 1 】

また、上述の 2 次元分光計測方法では、前記光学情報抽出工程において、前記第 2 の光周波数コムまたは前記第 3 の光周波数コムに所定の遅延時間を付加し、前記光学情報を含む強度スペクトル及び位相スペクトルを取得してもよい。

【 0 0 1 2 】

本発明の 2 次元分光計測装置は、周波数軸で零に対して所定のオフセット周波数を有する第 1 の周波数モードと前記周波数軸で前記第 1 の周波数モードに対して所定の繰り返し周波数の整数倍の間隔をあけて並ぶ複数の第 2 の周波数モードとを有し、前記繰り返し周波数が前記オフセット周波数の 4 倍である第 1 の光周波数コムを出射する光周波数コム出射部と、前記第 1 の光周波数コムを第 2 の光周波数コムと第 3 の光周波数コムに分ける第 1 の分岐部と、前記第 2 の光周波数コムを第 4 の光周波数コムと第 5 の光周波数コムに分ける第 2 の分岐部と、前記第 4 の光周波数コムの時間軸上の位相を前記第 5 の光周波数コムの時間軸上の位相に対して 90° ずらす位相差付与部と、前記第 3 の光周波数コムまた

10

20

30

40

50

は前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムは任意の光学情報を含み、前記第 4 の光周波数コムと前記第 3 の光周波数コムとを干渉させて第 1 の干渉信号を生成し、前記第 5 の光周波数コムと前記第 3 の光周波数コムとを干渉させて第 2 の干渉信号を生成する干渉信号生成部と、前記第 1 の干渉信号と前記第 2 の干渉信号との包絡線強度を取得する包絡線強度取得部と、前記包絡線強度に基づいて前記光学情報を抽出する光学情報抽出部と、を備える。

【0013】

上述の 2 次元分光計測装置において、前記位相差付与部から出射された前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムの一部を取得し、前記光周波数コム出射部にフィードバックするフィードバック機構をさらに備えてもよい。

10

【0014】

上述の 2 次元分光計測装置において、前記包絡線強度取得部は、透過率の波長依存性が互いに逆である 2 枚のフィルタを備え、前記包絡線強度が前記 2 枚のフィルタのそれぞれを通過したときの透過強度を取得し、前記光学情報抽出部は、前記透過強度の比に基づいて前記光学情報を算出してもよい。

【0015】

上述の 2 次元分光計測装置は、前記第 2 の光周波数コムまたは前記第 3 の光周波数コムに所定の遅延時間を付加する遅延機構をさらに備え、前記光学情報抽出部において、前記光学情報を含む強度・位相スペクトルを取得してもよい。

【0016】

上述の 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置において、前記光学情報は、前記第 3 の光周波数コム、前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムの何れか 1 つの光周波数コムの光路上の屈折率の分布、前記屈折率の揺らぎ、前記第 3 の光周波数コムの進路上に、または前記第 4 の光周波数コム及び前記第 5 の光周波数コムの進路上に配置した試料の形状の何れかを含む。

20

【発明の効果】

【0017】

本発明によれば、瞬時に高解像度の分光情報を取得し、リアルタイムで 2 次元分光計測を可能とする 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置が提供される。

【図面の簡単な説明】

30

【0018】

【図 1】本発明の 2 次元分光計測方法を説明するための図であり、光周波数コムの時間軸上の電場分布（上段）及び周波数軸上の強度分布（下段）の模式図である。

【図 2】繰り返し周波数がキャリア・エンベロップ・オフセットの 4 倍である関係を保つように制御された光周波数コムの時間軸上の電場分布を示す模式図である。

【図 3】互いに位相が 90° ずれた光周波数コム（光パルス列）を生成するパルス生成光学系の概略図である。

【図 4】光周波数コムにおける時間軸上で 1 番目の光パルスと 2 番目の光パルスとの時間間隔を説明するための模式図である。

【図 5】光周波数コムの光路に生じた変動を安定化させる光学系の一例を示す概略図である。

40

【図 6】本発明の 2 次元分光計測装置に適用可能な干渉信号強度取得装置の構成を示す概略図である。

【図 7】図 6 に示す干渉信号強度取得装置及び図 1 に示す 2 次元分光計測装置の遅延機構の構成を示す模式図である。

【図 8】図 6 に示す干渉信号強度取得装置のハーフミラーにおける光周波数コムの透過 / 反射の様子を示す斜視図である。

【図 9】図 6 に示す干渉信号強度取得装置の別のハーフミラーにおける光周波数コムの透過 / 反射の様子を示す斜視図である。

【図 10】図 6 に示す干渉信号強度取得装置のさらに別のハーフミラーにおける光周波数

50

コムの透過 / 反射の様子を示す斜視図である。

【図 1 1】互いに位相が 90° ずれた干渉信号の包絡線強度分布を示す模式図である。

【図 1 2】本発明の 2 次元分光計測装置の構成を示す概略図である。

【図 1 3】図 1 2 に示す 2 次元分光計測装置のフィルタの透過率の波長依存性を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0019】

以下、本発明の 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置の実施形態について、図面を参照して説明する。

【0020】

< 原理的説明 >

図 1 は、光周波数コムの時間軸上の電場分布（上段）及び周波数軸上の強度分布（下段）を示す模式図である。周波数軸上の強度分布は、スペクトル分布を表す。図 1 の上段に示すように、一定の繰り返しで発振される光パルス列の繰り返し時間 T_{rep} と周波数間隔 f_{rep} との間には、(1) 式に示す関係が成り立つ。

【0021】

【数 1】

$$f_{rep} = \frac{1}{T_{rep}} \quad \dots (1)$$

【0022】

それぞれの光パルス列は、光源の共振器などの内部で伝搬する多くの縦モードの重ね合わせから成り立っている。光パルス列は、これらの縦モードの重ね合わせの波である搬送波と、搬送波の包絡線を構成する波束によって構成されている。搬送波は、キャリアとも呼ばれる。搬送波の包絡線は、エンベロップとも呼ばれる。このような光パルス列では、搬送波の速度と波束の速度は互いに異なるため、時間の経過に伴い、位相差が生じる。レーザー共振器は分散媒質によって構成される。時間軸上で所定の繰り返し時間 T_{rep} の間隔ごとに繰り返し発せられる光パルス列では、隣り合うパルス間に位相のずれ ϕ_{CEO} が生じる。位相のずれ ϕ_{CEO} の周期は、時間 T_{CEO} で一周期する。

【0023】

時間軸上における上述の超短パルス列をフーリエ変換し、周波数軸上で観測すると、図 1 の下段に示すように、互いに繰り返し時間 T_{rep} の逆数に相当する繰り返し周波数 f_{rep} の間隔をあけて並んだ多数の周波数モードが観測される。

【0024】

図 1 の下段に示すように、光周波数コムは、周波数軸で零に対して所定のキャリア・エンベロップ・オフセット (Carrier Envelope Offset: CEO、オフセット周波数) f_{CEO} を有する周波数モード (第 1 の周波数モード) f_0 と、周波数軸で周波数モード f_0 に対して所定の繰り返し周波数 f_{rep} の整数倍の間隔をあけて並ぶ複数の周波数モード (第 2 の周波数モード) f_m と、を有する。光周波数コムのキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} は、時間 T_{CEO} の逆数に相当する。そして、キャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} 、位相のずれ ϕ_{CEO} 、時間 T_{CEO} の間には、(2) 式に示す関係が成り立つ。

【0025】

【数 2】

$$f_{CEO} = \left(\frac{\phi_{CEO}}{2\pi} \right) f_{rep} \quad \dots (2)$$

【0026】

10

20

30

40

50

光周波数コム n の n 番目のスペクトルの周波数は、繰り返し周波数 f_{rep} とキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} とをパラメータとして、(3)式のように表される。

【0027】

【数3】

$$f(n) = n \times f_{rep} + f_{CEO} \quad \dots (3)$$

【0028】

上述の相互関係をふまえ、光周波数コム n の複数の周波数モードに関するパラメータを制御することで、搬送波や包絡線を制御することができる。本実施形態では、光周波数コム n の2つのパラメータ、すなわち繰り返し周波数 f_{rep} とキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} が(4)式の関係を保つように、光周波数コム n の複数の周波数モードに関するパラメータを制御する。

10

【0029】

【数4】

$$f_{rep} = 4 \times f_{CEO} \quad \dots (4)$$

【0030】

図2は、繰り返し周波数 f_{rep} とキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} が(4)式の関係を保つように制御された光周波数コム n の時間軸上の電場分布を示す模式図である。図2に示すように、時間軸上で隣り合う光パルスの位相のずれは、 $(f_{rep}/2) = 90^\circ$ になる。基準とする光パルスから時間軸上で4つ前方の光パルスには、基準とする光パルスと同じ位相及び波形パターンが表れる。時間 T_{CEO} とキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} との間には、(5)式の関係が成り立つ。

20

【0031】

【数5】

$$T_{CEO} = \frac{1}{f_{CEO}} \quad \dots (5)$$

30

【0032】

図3は、互いに位相が 90° ずれた光パルス列を生成する光学系120の一例を示す概略図である。図3に示すように、光学系120は、光周波数コム出射部103と、ハーフミラー(第2の分岐部)112、ハーフミラー118と、全反射ミラー114、116と、遅延付与部(位相差付与部)123とを備える。光周波数コム出射部103は、不図示のファンクションジェネレーターなどを備える。光周波数コム出射部103は、ファンクションジェネレーターの操作によって繰り返し周波数 f_{rep} とキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} が(4)式の関係を保つように主にキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} を制御し、キャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} が制御された光周波数コムC1を出射する。

40

【0033】

光周波数コムC1は、ハーフミラー112を透過し、光周波数コムC4と光周波数コムC5に分離される。光周波数コムC4は、全反射ミラー116で反射され、ハーフミラー118に入射する。光周波数コムC5は、ハーフミラー112及び全反射ミラー114で反射され、遅延付与部123を通り、ハーフミラー118に入射する。遅延付与部123は、それぞれの反射面を対向させた2枚の全反射ミラー121、122で構成されている。全反射ミラー114で反射された光周波数コムC5は、遅延付与部123に入射し、光路をずらしつつ全反射ミラー121、122の反射面の間を所定の回数往復し、ハーフミラー118に向けて出射する。ハーフミラー118に入射する光周波数コムC4、C5の

50

一方の位相が他方の位相に対して90°だけずれるように、全反射ミラー121, 122の位置及び離間距離が調整されている。すなわち、光学系120では、光周波数コムを分岐し、一方を他方に対してある光パルスと時間軸上で1つ後の光パルスとの時間差の分だけ、遅延させる。時間軸上で隣り合う光パルスの時間差は、繰り返し時間 T_{rep} 分に相当する。

【0034】

図3に示すように、光学系120では、各種ミラーの振動や空気揺らぎなどによって、光周波数コムC4, C5の各々の光路長差が変動する。このことをふまえ、光周波数コムC1の繰り返し周波数 f_{rep} を制御し、光周波数コムC1の光パルスの繰り返し時間 T_{rep} を微調整することによって、光周波数コムC4, C5の光路差の変動を吸収し、光周波数コムC4, C5を安定させることができる。図4は、時間軸上で基準とする光周波数コムC1の1番目の光パルス 図3及び図4に示す“1st”の光パルス と2番目の光パルス 図3及び図4に示す“2nd”の光パルス との時間間隔を説明するための模式図である。1番目の光パルスと時間軸上で隣り合う2番目の光パルスとの繰り返し時間 T_{rep1} , T_{rep2} , T_{rep3} は、繰り返し周波数 f_{rep1} , f_{rep2} , f_{rep3} によって(6)式~(8)式のように表される。

10

【0035】

【数6】

$$T_{rep1} = \frac{1}{f_{rep1}} \quad \dots (6)$$

20

【0036】

【数7】

$$T_{rep2} = \frac{1}{f_{rep2}} \quad \dots (7)$$

【0037】

【数8】

$$T_{rep3} = \frac{1}{f_{rep3}} \quad \dots (8)$$

30

【0038】

図4及び(6)式~(8)式に示す T_{rep} と f_{rep} との相対関係をふまえ、光周波数コムC1の繰り返し周波数 f_{rep} を制御する。

【0039】

図4及び(6)式~(8)式からわかるように、光周波数コム出射部103のファンクションジェネレーターなどを操作し、光周波数コムC1の繰り返し周波数 f_{rep} を制御することによって、繰り返し時間 T_{rep} を制御できる。

40

【0040】

図3に示すように、互いに位相が90°ずれた光周波数コムC4, C5の時間軸上における光パルス1つ分のずれに対して、光周波数コムC4, C5のそれぞれの光路に生じた変動によって、さらに時間差が加わる、または時間差が減じられる。図5は、光周波数コムC4, C5の光路に生じた変動を安定化させることが可能な光学系124の一例を示す概略図である。光学系124は、光学系120の構成に加え、ハーフミラー126と、フィードバック機構128と、を備える。ハーフミラー126は、ハーフミラー118より光周波数コムC4, C5の進行方向の前方に配置されている。フィードバック機構128は、ハーフミラー126で分離され、且つハーフミラー126を透過する光周波数コム

50

C 4 , C 5 とは異なる光周波数コム C 4 , C 5 の進路上に配置されている。ハーフミラー 1 1 8 によって合波され、且つ時間差 Δt を含む光周波数コム C 4 , C 5 は、ハーフミラー 1 2 6 で 2 つに分離される。分離された一方の光周波数コム (第 4 の光周波数コム及び第 5 の光周波数コムの一部) C 4 , C 5 はハーフミラー 1 2 6 で反射され、フィードバック機構 1 2 8 に入力し、光周波数コム出射部 1 0 3 にフィードバックされる。このことによって、光周波数コム C 1 の繰り返し周波数 f_{rep} が調整される。図 5 に示すように、光周波数コム出射部 1 0 3 から出射される光周波数コム C 1 の繰り返し時間 T_{rep} が時間差 Δt だけ増減される。繰り返し時間 T_{rep} が時間差 Δt で調整されることによって、ハーフミラー 1 1 8 に入射する光周波数コム C 4 , C 5 同士の位相のずれが再び 90° 、すなわち光パルス 1 つ分になる。

10

【 0 0 4 1 】

< 干渉信号強度取得装置 >

図 6 は、本発明の干渉信号強度取得装置であって、互いに 90° だけ位相がずれた干渉強度信号を瞬時に得る干渉強度信号取得光学系 1 3 0 の構成を示す概略図である。干渉強度信号取得光学系 1 3 0 は、光周波数コム出射部 1 0 3 と、部分光学系 1 2 4 P と、分岐部 1 5 0 と、遅延機構 2 0 6 と、撮像カメラ (包絡線強度取得部) 1 6 1 とを備える。図 6 に示す部分光学系 1 2 4 P は、図 5 に示す光学系 1 2 4 のうち、光周波数コム出射部 1 0 3 を除いた構成を示す。分岐部 1 5 0 は、光周波数コム C 6 , C 7 を光周波数コム C 3 から取り出す。分岐部 1 5 0 は、ハーフミラー (干渉信号生成部) 1 5 2、ハーフミラー (第 1 の分岐部) 1 5 3 , 1 5 5 , 1 5 8 と、全反射ミラー 1 5 4 , 1 5 6 , 1 5 7 とを備える。

20

【 0 0 4 2 】

光周波数コム出射部 1 0 3 は、繰り返し周波数 f_{rep} がキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} の 4 倍である光周波数コム (第 1 の光周波数コム) C 1 を出射する。第 1 の分岐部 1 0 4 は、光周波数コム C 1 を光周波数コム (第 2 の光周波数コム) C 2 と光周波数コム (第 3 の光周波数コム) C 3 に分ける。第 2 の分岐部 1 0 5 は、光周波数コム C 2 を光周波数コム (第 4 の光周波数コム) C 4 と光周波数コム (第 5 の光周波数コム) C 5 に分ける (図 5 参照)。位相差付与部 1 0 6 は、光周波数コム C 4 の時間軸上の位相と光周波数コム C 5 の時間軸上の位相とを 90° ずらす。干渉信号生成部 1 0 7 は、光周波数コム C 4 と任意の光学情報を含む光周波数コム (第 3 の光周波数コム) C 6 とを干渉させて干渉信号 (第 1 の干渉信号) I M 1 を生成し、光周波数コム C 5 と光学情報を含む光周波数コム (第 3 の光周波数コム) C 7 とを干渉させて干渉信号 (第 2 の干渉信号) I M 2 を生成する。

30

【 0 0 4 3 】

本明細書における光学情報には、各光周波数コム自身が有する光学的特性や各光周波数コムの光路上の屈折率の分布・揺らぎや、光路上に配置された試料を通過することにより付加される試料の形状などがすべて含まれる。また、試料の形状には、試料の表面の凹凸形状、試料の内部の構造などが含まれる。つまり、干渉強度信号取得光学系 1 3 0 によれば、試料の表面あるいは内部構造といった形状の情報を取得できる。例えば、図 6 に示す干渉強度信号取得光学系 1 3 0 のように試料 S が設置されていない場合、光学情報は光周波数コム C 3 自身が有する光学的特性や光周波数コム C 3 , C 6 , C 7 の光路上の屈折率の分布・揺らぎを意味する。一方、後述する 2 次元分光計測装置 2 0 0 のように測定対象の試料 S が配置されている場合、光学情報としては試料 S の形状を含む光学的特性が主体になる。図 1 1 に示すように、包絡線強度取得部 1 0 8 は、干渉信号 I M 1 と干渉信号 I M 2 との包絡線強度 E V を取得する。

40

【 0 0 4 4 】

図 6 に示すように、光周波数コム出射部 1 0 3 から出射された光周波数コム C 1 は、ハーフミラー 1 5 3 によって、光周波数コム C 2 , C 3 に分離される。光周波数コム C 2 は、部分光学系 1 2 4 P に入射し、上述したように互いに位相が 90° だけずれた光周波数コム C 4 , C 5 として出射する。一方、ハーフミラー 1 5 3 で反射された光周波数コム C

50

3は、分岐部150に入射し、全反射ミラー154で反射され、ハーフミラー155で光周波数コムC6, C7に分離される。

【0045】

遅延機構206は、光周波数コムC3に所定の遅延時間を付加する機構であり、光周波数コムC3の進路上に配置されている。遅延機構206は、図7に示すように、それぞれの反射面207rが対向配置された2個の全反射プリズム207を有する。遅延機構206が矢印Mに沿って移動することによって、光周波数コムC3の光路長が変わり、所定の遅延時間が付加される。

【0046】

図8は、部分光学系124P(すなわち、光学系124)のハーフミラー118における光周波数コムC4の反射及び光周波数コムC5の透過の様子を示す模式図である。図7に示すように、光周波数コムC4, C5のうち、光周波数コムC4は、ハーフミラー118の反射面118aに入射し、上面視で入射方向に対して略直角に反射される。一方、光周波数コムC4, C5のうち、光周波数コムC5は、ハーフミラー118の反射面118aとは反対側の面118b及び反射面118aを透過し、上面視で光周波数コムC4の進路と重なる進路に沿ってハーフミラー118から出射される。高さ方向においては、光周波数コムC4, C5のそれぞれの進路は、互いにずれている。

10

【0047】

図9は、分岐部150のハーフミラー158における光周波数コムC6の反射及び光周波数コムC7の透過の様子を示す模式図である。図9に示すように、光周波数コムC6, C7のうち、光周波数コムC6は、ハーフミラー158の反射面158aに入射し、上面視で入射方向に対して略直角に反射される。一方、光周波数コムC6, C7のうち、光周波数コムC7は、ハーフミラー158の反射面158aとは反対側の面158b及び反射面158aを透過し、上面視で光周波数コムC6の進路と重なる進路に沿ってハーフミラー158から出射される。高さ方向においては、光周波数コムC6, C7のそれぞれの進路は、互いにずれている。光周波数コムC6の進路の高さは光周波数コムC4の高さと一致し、光周波数コムC7の高さは光周波数コムC5の高さと一致している。

20

【0048】

図10は、分岐部150のハーフミラー152における光周波数コムC4, C5の透過及び光周波数コムC6, C7の反射の様子を示す模式図である。図10に示すように、ハーフミラー118から出射された光周波数コムC4, C5は、ハーフミラー152の反射面152aとは反対側の面152bを透過する。一方、ハーフミラー158から出射された光周波数コムC6, C7は、ハーフミラー152の反射面152aによって上面視で入射方向に対して略直角に反射され、面152bを透過した光周波数コムC4, C5と干渉し合い、干渉信号IM1, IM2が生成される。干渉信号IM1は光周波数コムC4, C6同士の干渉信号であり、干渉信号IM2は光周波数コムC5, C7同士の干渉信号である。本実施形態では、図8から図10に示すように、ハーフミラー118における光周波数コムC4, C6同士の照射位置を互いに異ならせ、ハーフミラー158における光周波数コムC5, C7同士の照射位置を互いに異ならせる。このことによって、光周波数コムC4, C6が重なって干渉信号IM1が生成される位置と、光周波数コムC5, C7が重なって干渉信号IM2が生成される位置とを異ならせる。

30

40

【0049】

光周波数コムC4, C5同士の位相が互いに90°ずれているので、干渉信号IM1, IM2同士の位相は、互いに90°ずれている。図11は、干渉信号IM1, IM2から得られる包絡線強度EVの一例を示すグラフである。撮像カメラ161によって、ある瞬間の干渉信号IM1の強度T1と干渉信号IM2の強度T2を取得すれば、 $\{(T1)^2 + (T2)^2\}^{1/2}$ を算出することによって、包絡線強度EVが瞬時に得られる。

【0050】

上述のように、包絡線強度EVは、撮像カメラ161によって検出される。撮像カメラ161で検出された包絡線強度EVは、撮像カメラ161に付属の処理部(図示略)によ

50

って適宜処理される。処理部は、例えば撮像カメラ 161 に接続されているコンピュータに内蔵されているプログラムなどである。干渉強度信号取得光学系 130 では、互いに 90° だけ位相がずれた干渉信号 $IM1$, $IM2$ の包絡線強度 EV が瞬時に得られる。

【0051】

< 2次元分光計測装置 >

図 12 は、本発明の 2次元分光計測装置 200 の構成を示す概略図である。図 12 に示すように、2次元分光計測装置 200 は、上述した干渉強度信号取得光学系 130 の構成に加え、単体の撮像カメラ 161 に替えて、波長情報取得部 208 を備える。2次元分光計測装置 200 においても、フィードバック機構 128 によって光周波数 $comC4$, $C5$ が光周波数 com 射出部 103 にフィードバックされ、光周波数 $comC4$, $C5$ との位相のずれ（時間差、図 3 参照）に応じて繰り返し周波数 f_{rep} が調整されている。

10

【0052】

波長情報取得部 208 は、ハーフミラー 231 と、全反射ミラー 232 と、フィルタ $F1$, $F2$ と、互いに同じ画素数を有する 2 台の撮像カメラ 241 , 242 と、画像処理部（光学情報抽出部）250 とを備える。干渉強度信号取得光学系 130 の全反射ミラー 154 は、ハーフミラー 159 に替えられている。分光計測の対象である試料 S は、ハーフミラー 159 を透過する光周波数 $comC3$ の進路上に配置されている。

【0053】

図 12 に示すように、ハーフミラー 153 で反射された光周波数 $comC3$ は、ハーフミラー 159 を透過し、試料 S に照射される。試料 S から反射された光周波数 $comC3$ には、試料 S の分光情報や位相・形状に関する情報をすべて含む光学情報が含まれる。光周波数 $comC3$ からハーフミラー 155 によって 2 つに分けられた光周波数 $comC6$, $C7$ にも試料 S の光学情報が含まれる。試料 S の光学情報は、干渉信号 $IM1$, $IM2$ に反映される。干渉信号 $IM1$, $IM2$ の包絡線強度 EV は、ハーフミラー 231 によって 2 つに分けられ、分けられた 2 つの包絡線強度 $EV1$, $EV2$ はそれぞれフィルタ $F1$, $F2$ を通過する。

20

【0054】

図 13 は、フィルタ $F1$, $F2$ の透過率の波長依存性を示すグラフである。図 13 に示すように、フィルタ $F1$, $F2$ の透過率の波長依存性は互いに逆である。フィルタ $F1$ の透過率は、波長が増加するにしたがって概ね低下する。一方、フィルタ $F2$ の透過率は、波長が増加するにしたがって概ね上昇する。このようにフィルタ $F1$, $F2$ の透過率の波長依存性が互いに逆であることによって、これらのフィルタ $F1$, $F2$ を通過させた包絡線強度 $EV1$, $EV2$ に関する光強度比と波長との 1 対 1 対応が成立する。

30

【0055】

画像処理部 50 では、フィルタ $F1$, $F2$ を通して撮像カメラ 241 , 242 で取得した試料 S の測定領域ごとの包絡線強度 $EV1$, $EV2$ の透過強度の比が算出される。撮像カメラ 241 , 242 の各画素について算出した包絡線強度 $EV1$, $EV2$ の透過強度の比に基づいて、各画素の信号強度比が求まり、包絡線強度 EV の分布内の各強度を発現する波長が瞬時に決定される。瞬時に波長情報を得ることで、各空間位置（測定領域）における試料 S から反射された光周波数 $comC3$ の位相情報が計測される。光周波数 $comC3$ の位相情報は、時間差であって、物理的な位置の違いや屈折率の違いを示す。本実施形態では、物理的な位置を瞬時に取得する際には、試料 S から反射された光周波数 $comC6$ の位相スペクトルは基本的に変化しないと想定する。

40

【0056】

< 2次元分光計測方法 >

本発明の 2次元分光計測方法は、光周波数 com 生成工程と、位相差付与工程と、試料照射工程と、干渉信号生成工程と、包絡線強度取得工程と、光学情報抽出工程とを備える。本発明の一実施形態の 2次元分光計測方法は、2次元分光計測装置 200 を用いて干渉信号 $IM1$, $IM2$ の包絡線強度 EV を瞬時に取得し、取得した包絡線強度 EV に基づいて試料 S の光学情報を得ることが可能な方法である。

50

【 0 0 5 7 】

光周波数コム生成工程では、光周波数コム C 1 を生成する（図 1 参照）。光周波数コム C 1 は、周波数軸で零に対して所定のキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} を有する周波数モード f_0 と、周波数軸で周波数モード f_0 に対して所定の繰り返し周波数 f_{rep} の整数倍の間隔をあけて並ぶ複数の周波数モード f_m と、を有する。光周波数コム C 1 では、 $f_{rep} = 4 \times f_{CEO}$ の関係が成立している。前述の関係を成立させるために、光周波数コム出射部 1 0 3 のファンクションジェネレーターなどを用いて、キャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} 及び繰り返し周波数 f_{rep} を制御する。

【 0 0 5 8 】

次に、位相差付与工程では、光周波数コム C 1 をハーフミラー 1 5 3 で光周波数コム C 2 と光周波数コム C 3 に分け、光周波数コム C 2 をさらにハーフミラー 1 1 2（図 3 参照）で光周波数コム C 4 と光周波数コム C 5 に分ける。続いて、遅延付与部 1 2 3 によって、光周波数コム C 5 の時間軸上の位相を光周波数コム C 4 の時間軸上の位相に対して 90° ずらす。

10

【 0 0 5 9 】

次に、試料照射工程では、光周波数コム C 3 または光周波数コム C 4 , C 5 を試料 S に照射し、試料 S から出射されて光学情報を含む光周波数コム C 3 または光周波数コム C 4 , C 5 を得る。

【 0 0 6 0 】

本実施形態では、光周波数コム C 3、または光周波数コム C 4 , C 5 に任意の光学情報を含む。干渉信号生成工程では、何れかに光学情報を含む光周波数コム C 4 と光周波数コム C 6 とを合わせて干渉させ、干渉信号 I M 1 を生成する。干渉信号生成工程では、何れかに光学情報を含む光周波数コム C 5 と光周波数コム C 7 とを合わせて干渉させ、干渉信号 I M 2 を生成する。

20

【 0 0 6 1 】

次に、包絡線強度取得工程では、干渉信号 I M 1 , I M 2 を撮像カメラ 1 6 1 で同時に検出し、包絡線強度 E V を得る。

【 0 0 6 2 】

次に、光学情報抽出工程では、包絡線強度 E V に基づいて試料 S の光学情報を抽出する。本実施形態では、包絡線強度取得工程において、包絡線強度 E V を 2 つの包絡線強度 E V 1 , E V 2 に分け、包絡線強度 E V 1 , E V 2 がフィルタ F 1 , F 2 のそれぞれを通過したときの透過強度を撮像カメラ 2 4 1 , 2 4 2 で取得する。その後、包絡線強度取得工程で取得した包絡線強度 E V 1 , E V 2 の透過強度の比に基づいて試料 S に関する波長情報を瞬時に取得し、画像処理部 2 5 0 によって前述の波長情報から試料 S の光学情報を算出する。具体的には、予め計測した強度の比から求めた波長情報と遅延距離の関係と比較することで、試料 S の 2 次元分光情報または 3 次元形状を算出できる。

30

【 0 0 6 3 】

本実施形態の 2 次元分光計測方法は、上述の各工程に加え、さらに周波数調整工程を備えている。周波数調整工程では、フィードバック機構 1 2 8 によって光周波数コム C 4 , C 5 の一部を光周波数コム出射部 1 0 3 にフィードバックし、光周波数コム C 4 , C 5 との位相のずれ（時間差、図 3 参照）に応じて繰り返し周波数 f_{rep} を調整する。

40

【 0 0 6 4 】

以上説明したように、本実施形態の 2 次元分光計測方法は、上述の光周波数コム生成工程と、位相差付与工程と、干渉信号生成工程と、包絡線強度取得工程と、光学情報抽出工程と、を備える。本実施形態の 2 次元分光計測装置 2 0 0 は、上述の光周波数コム出射部 1 0 3 と、第 1 の分岐部 1 0 4 と、第 2 の分岐部 1 0 5 と、位相差付与部 1 0 6 と、干渉信号生成部 1 0 7 と、包絡線強度取得部 1 0 8 と、画像処理部 2 5 0 と、を備える。本実施形態の 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置 2 0 0 では、光周波数コムの繰り返し周波数 f_{rep} とキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} を制御して $f_{rep} = 4 \times f_{CEO}$ とし、繰り返し周波数 f_{rep} が制御された光周波数コムを 2 つに分けて互いに

50

位相が 90° ずれた光周波数コムを生成する。互いに位相が 90° ずれた 2 つの光周波数コムは、参照光として機能する光パルス列である。これらの 2 つの光周波数コムのそれぞれと任意の光学情報を含む光周波数コムとを干渉させ、 90° 位相がずれた干渉信号を光学的にリアルタイムで生成する。任意の光学情報を含む光周波数コムは、プローブ光として機能する光パルス列である。このことによって、干渉信号の包絡線強度を瞬時に、計測時においてリアルタイムに取得できる。光周波数コムを用いることによって、繰り返し周波数 f_{rep} とキャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} が原子時計と同程度の安定性と正確性をもって制御される。キャリア・エンベロップ・オフセット f_{CEO} を制御することによって、時間軸上で隣り合う光パルス同士の位相差を活かし、計測時のターゲットとする全波長域で原理的に位相差を正確に揃えることができる。したがって、本実施形態の 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置 200 によれば、瞬時に高解像度の分光情報を取得でき、リアルタイムで 2 次元分光計測を行うことができる。

10

【0065】

本実施形態の 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置 200 では、第 4 の光周波数コムと第 5 の光周波数コムを光周波数コム出射部 103 にフィードバックし、第 4 の光周波数コムと第 5 の光周波数コムとの位相のずれ（時間差）に応じて繰り返し周波数 f_{rep} を調整する。このことによって、参照光の光周波数コム同士の位相のずれをなくすことができる。本実施形態の 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置 200 によれば、2 次元分光計測装置 200 を構成するミラーなどの光学素子が振動して光周波数コムの光路に変動が生じた場合であっても、従来のようにピエゾ素子などのように機械的に駆動する構成を光学系に追加しなくても、光周波数コムの光路の変動を光学的に補償できる。

20

【0066】

本実施形態の 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置 200 では、透過率の波長依存性が互いに逆である 2 枚のフィルタ F_1 、 F_2 を包絡線強度 E_{V1} 、 E_{V2} が通過したときの透過強度を取得し、取得した包絡線強度 E_{V1} 、 E_{V2} の透過強度の比に基づいて試料 S の光学情報を算出する。このような検出手法によって、包絡線強度 E_V に含まれる試料 S の波長情報を瞬時に取得でき、取得した波長情報から試料 S の光学情報をリアルタイムで高解像度に取得できる。

【0067】

本実施形態の 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置 200 では、遅延機構 206 によって光周波数コム C_3 に所定の遅延時間を付加することによって、光学情報を含む強度・位相スペクトルを取得できる。

30

【0068】

本実施形態の 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置 200 で得られる光学情報は、光周波数コム C_3 または光周波数コム C_4 、 C_5 の光路上の屈折率の分布・揺らぎ、試料 S の形状の何れかを含み、上述の構成では試料 S の 3 次元形状が含まれる。本実施形態の 2 次元分光計測方法及び 2 次元分光計測装置 200 によれば、包絡線強度 E_V に基づいて試料 S の 3 次元形状を取得できるので、瞬時かつリアルタイムの 3 次元形状計測を実現し、天文分野や物性分野をはじめとする広い分野に適用できる。

【0069】

40

以上、本発明の好ましい実施形態について詳述したが、本発明は上述の実施形態に限定されない。本発明は、特許請求の範囲内に記載された本発明の要旨の範囲内において、変更可能である。

【0070】

例えば、上述の実施形態では、光周波数コム C_3 が試料 S を通過することによって、光周波数コム C_3 に試料 S の光学情報が付与されるが、試料 S の光学情報は、光周波数コム C_3 に替えて光周波数コム C_4 、 C_5 に付与されてもよい。その場合は、光周波数コム C_4 、 C_5 の偏光を互いに直交させて合波し、試料 S を通過させた後に分波する。試料 S の光学情報を含む光周波数コム C_4 、 C_5 のそれぞれと試料 S の光学情報を含まない光周波数コム C_6 、 C_7 との干渉信号（第 1 の干渉信号、第 2 の干渉信号）を得ることによって

50

、上述の実施形態と同様の作用効果が得られる。但し、試料Sの光学情報は、偏光依存性を有しておらず、偏光依存性を考慮せずに取得できると想定する。

【0071】

図12に示す2次元分光計測装置200では、試料Sから反射された光周波数コムC3を取得しているが、光周波数コムC3を試料Sに照射して試料Sから透過した光周波数コムC3を取得してもよい。その場合、ハーフミラー159を全反射ミラーに替え、試料Sを光周波数コムC3の進路上で前述のように置き換えた全反射ミラーとハーフミラー155との間に配置すればよい。

【0072】

上述の実施形態の2次元分光計測装置200において、試料Sに関する位相スペクトルを測定する際には、試料Sから反射された光周波数コムC3の位相スペクトルが波長に対して変化してもよい。但し、その場合の光周波数コムC3の位相スペクトルの変化は、波長に対して一意に決まらなければならない。試料Sに関する位相スペクトルは、光周波数コムC3または光周波数コムC1に対して時間遅延を加え、干渉信号IM1, IM2の強度の遅延時間依存性を測定することによって取得できる。

10

【0073】

上述の実施形態において、遅延機構206は、ハーフミラー153, 159の間の光周波数コムC3の進路上、ハーフミラー153, 112の間の光周波数コムC2の進路上のいずれかに配置されればよい。遅延機構206の構成は、所定の光周波数コムに所定の遅延時間を付加できれば、特に限定されない。上述の実施形態の2次元分光計測装置200において、試料Sの3次元形状を瞬時に計測する際には、遅延機構206で時間掃引する必要はない。光周波数コムC3には、試料Sを透過あるいは反射させたときに、試料Sの形状に由来する遅延時間が与えられる。試料Sの3次元形状を瞬時に計測する場合は、遅延時間が与えられた光周波数コムC3を、遅延機構206を除いた上述の実施形態の2次元分光計測装置200で計測することによって、試料Sの形状に由来する遅延時間を波長情報として瞬時に取得できる。このような波長情報を取得することは、試料Sの瞬時3次元形状計測を行うことと同じである。

20

【0074】

上述の実施形態では、光周波数コムの光学的特性に起因する正確さと安定性が維持された状態で、試料Sの典型的な光学情報として奥行き情報、すなわち3次元形状が得られる。但し、本発明の2次元分光計測方法及び2次元分光計測装置によって得られる試料Sの光学情報は、光周波数コムの光パルス列が干渉信号生成部に到達する時間をずらすものであれば3次元形状に限定されない。本発明の2次元分光計測方法及び2次元分光計測装置によって得られる試料Sの光学情報には、例えば屈折率の揺らぎなどが含まれる。取得したい試料Sの光学情報の種類に応じて、波長情報取得部や光学情報抽出部の構成、処理部のプログラムによる処理内容を適宜変更できる。

30

【0075】

上述の実施形態では、光周波数コムC4, C5, C6, C7をチャープしてもよい。光周波数コムC4, C5, C6, C7をチャープする場合は、これらの光周波数コムの元である光周波数コムC2, C3のそれぞれの光路上に適当な分散媒質を設置し、その分散媒質に光周波数コムC2, C3を通過させればよい。このように分散媒質を通過させて光周波数コムC4, C5, C6, C7をチャープした場合、干渉信号IM1, IM2は変化しないので、上述の実施形態と同様の作用効果が得られる。

40

【符号の説明】

【0076】

103・・・光周波数コム出射部

104・・・第1の分岐部

105・・・第2の分岐部

106・・・位相差付与部

107・・・干渉信号生成部

50

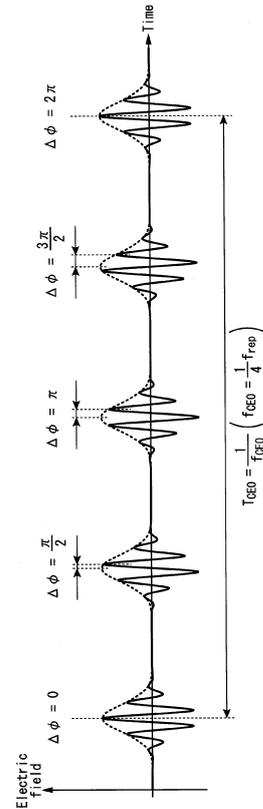
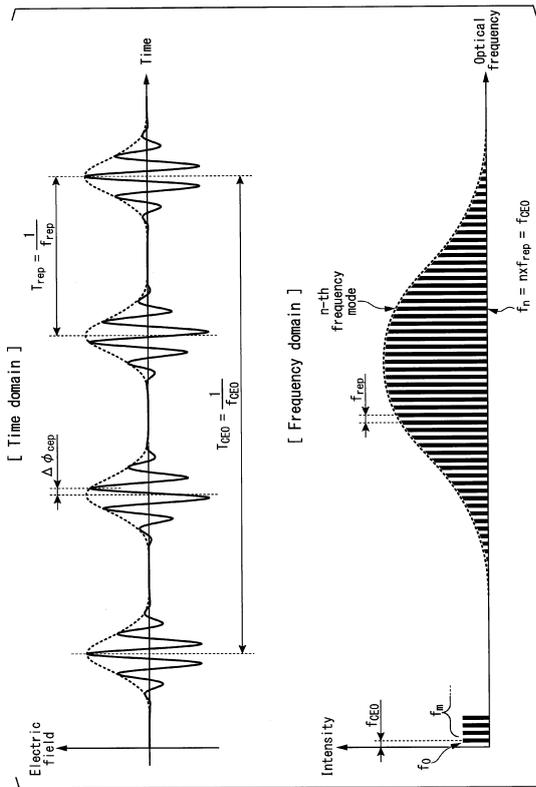
- 1 0 8 . . . 包絡線強度取得部
- 1 3 0 . . . 干涉強度信号取得光学系 (干涉信号強度取得装置)
- C 1 . . . 光周波数コム (第 1 の光周波数コム)
- C 2 . . . 光周波数コム (第 2 の光周波数コム)
- C 3 . . . 光周波数コム (第 3 の光周波数コム)
- C 4 . . . 光周波数コム (第 4 の光周波数コム)
- C 5 . . . 光周波数コム (第 5 の光周波数コム)
- C 6 . . . 光周波数コム (第 3 の光周波数コム)
- C 7 . . . 光周波数コム (第 3 の光周波数コム)
- S . . . 試料

10

【 図 面 】

【 図 1 】

【 図 2 】



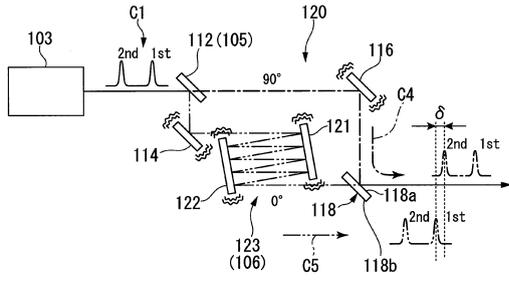
20

30

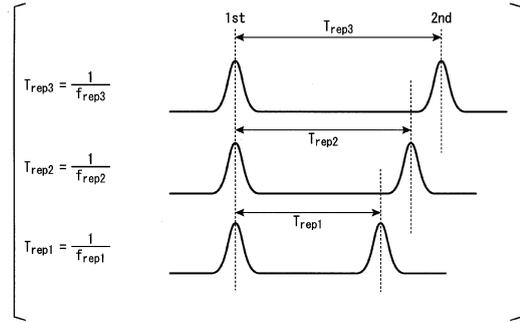
40

50

【 図 3 】

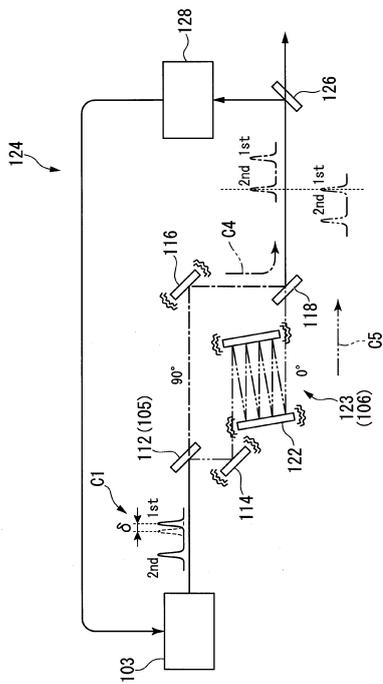


【 図 4 】

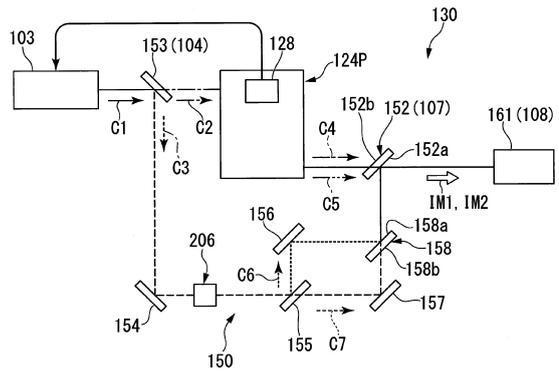


10

【 図 5 】



【 図 6 】



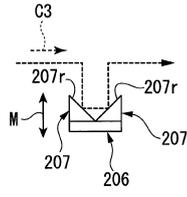
20

30

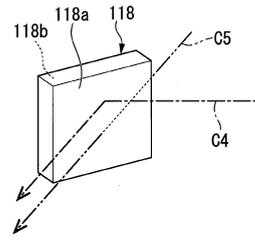
40

50

【 図 7 】

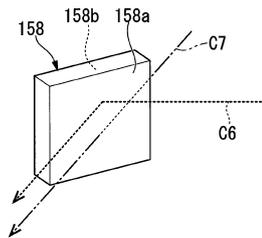


【 図 8 】

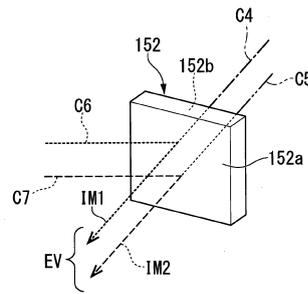


10

【 図 9 】



【 図 10 】



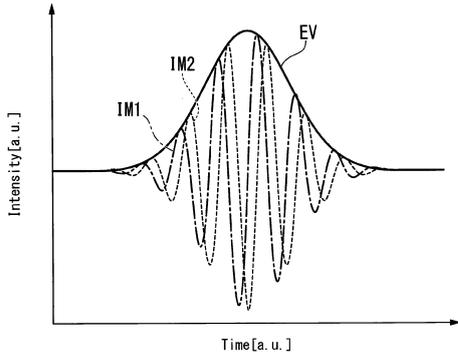
20

30

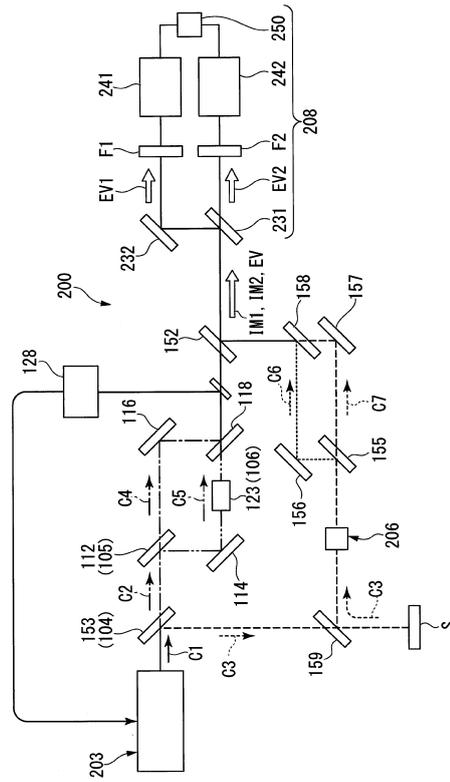
40

50

【 1 1 】



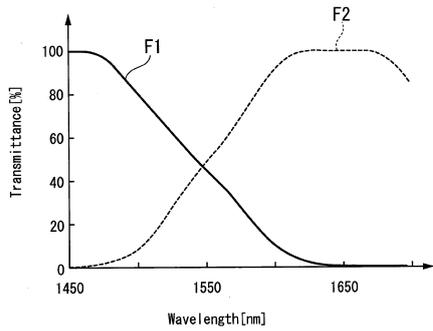
【 1 2 】



10

20

【 1 3 】



30

40

50

フロントページの続き

審査官 横尾 雅一

- (56)参考文献 特開2017-090259(JP,A)
特開2015-155822(JP,A)
特開2012-013574(JP,A)
特表2013-507005(JP,A)
特表2011-529180(JP,A)
米国特許第7123402(US,B1)
米国特許出願公開第2011/0069309(US,A1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
G01J 3/00 - G01J 3/52
G01J 9/00 - G01J 9/04
G01B 9/02
G01B 11/00 - G01B 11/30
G01N 21/00 - G01N 21/61
G02F 1/35
H01S 3/13
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)