

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6720051号
(P6720051)

(45) 発行日 令和2年7月8日(2020.7.8)

(24) 登録日 令和2年6月19日(2020.6.19)

(51) Int. Cl.	F I	
GO 1 N 21/23 (2006.01)	GO 1 N 21/23	
A 6 1 B 3/10 (2006.01)	A 6 1 B 3/10	1 0 0
GO 1 N 21/17 (2006.01)	GO 1 N 21/17	6 3 0

請求項の数 11 (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2016-210709 (P2016-210709)	(73) 特許権者	501009849 株式会社日立エルジーデータストレージ 東京都港区海岸三丁目2番23号
(22) 出願日	平成28年10月27日(2016.10.27)	(74) 代理人	100091096 弁理士 平木 祐輔
(65) 公開番号	特開2018-72111 (P2018-72111A)	(74) 代理人	100118773 弁理士 藤田 節
(43) 公開日	平成30年5月10日(2018.5.10)	(74) 代理人	100102576 弁理士 渡辺 敏章
審査請求日	平成31年2月13日(2019.2.13)	(72) 発明者	大澤 賢太郎 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
		審査官	横尾 雅一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光画像計測装置、光画像計測方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光を出射する光源、

前記光源が出射する光を用いて第1偏光状態の第1測定光と第2偏光状態の第2測定光を照射する光照射部、

前記第1測定光を測定対象に対して照射する時刻を第1時刻に調整するとともに、前記第2測定光を前記測定対象に対して照射する時刻を前記第1時刻とは異なる第2時刻に調整する、照射時刻制御部、

前記第1および第2測定光が前記測定対象によって反射もしくは散乱されることにより得られる第1および第2信号光を検出して電気信号として出力する光検出部、

を備え、

前記光照射部は、前記第1偏光状態とは異なる前記第2偏光状態の光を生成するパッシブ光学素子を用いて、前記第2測定光を生成し、

前記光源は、第1および第2光源を備え、

前記光照射部は、前記第1光源が出射する光を前記第1測定光として前記測定対象に対して照射するとともに、前記第2光源が出射する光を前記第2測定光として前記測定対象に対して照射し、

前記照射時刻制御部は、前記第1光源が光を出射する時刻と前記第2光源が光を出射する時刻を制御することにより、前記第1および第2時刻を調整する

ことを特徴とする光画像計測装置。

【請求項 2】

前記光画像計測装置はさらに、前記第 1 信号光を第 3 偏光状態の成分と第 4 偏光状態の成分に分離するとともに前記第 2 信号光を前記第 3 偏光状態の成分と前記第 4 偏光状態の成分に分離する偏光分離器を備え、

前記光検出部は、前記第 1 信号光の前記第 3 および第 4 偏光状態の成分をそれぞれ検出するとともに、前記第 2 信号光の前記第 3 および第 4 偏光状態の成分をそれぞれ検出することを特徴とする請求項 1 記載の光画像計測装置。

【請求項 3】

前記光画像計測装置はさらに、前記光源が出射する光を分岐して前記第 1 および第 2 測定光を生成するとともに第 1 および第 2 参照光を生成する光分岐部を備え、

前記光画像計測装置はさらに、前記第 1 信号光を前記第 1 参照光と合波することにより互いに位相関係が異なる 3 つ以上の干渉光を生成するとともに、前記第 2 信号光を前記第 2 参照光と合波することにより互いに位相関係が異なる 3 つ以上の干渉光を生成する、干渉光学系を備え、

前記光検出部は、前記干渉光を検出して電気信号として出力することを特徴とする請求項 1 記載の光画像計測装置。

【請求項 4】

前記光画像計測装置はさらに、前記第 1 信号光を第 3 偏光状態の成分と第 4 偏光状態の成分に分離するとともに前記第 2 信号光を前記第 3 偏光状態の成分と前記第 4 偏光状態の成分に分離する偏光分離器を備え、

前記光画像計測装置はさらに、前記光源が出射する光を分岐して前記第 1 および第 2 測定光を生成するとともに第 1 および第 2 参照光を生成する光分岐部を備え、

前記光画像計測装置はさらに、前記第 1 信号光の前記第 3 偏光状態の成分を前記第 1 参照光と合波することにより互いに位相関係が異なる 3 つ以上の干渉光を生成するとともに、前記第 2 信号光の前記第 3 偏光状態の成分を前記第 2 参照光と合波することにより互いに位相関係が異なる 3 つ以上の干渉光を生成する、第 1 干渉光学系を備え、

前記光画像計測装置はさらに、前記第 1 信号光の前記第 4 偏光状態の成分を前記第 1 参照光と合波することにより互いに位相関係が異なる 3 つ以上の干渉光を生成するとともに、前記第 2 信号光の前記第 4 偏光状態の成分を前記第 2 参照光と合波することにより互いに位相関係が異なる 3 つ以上の干渉光を生成する、第 2 干渉光学系を備え、

前記光検出部は、前記干渉光を検出して電気信号として出力することを特徴とする請求項 1 記載の光画像計測装置。

【請求項 5】

前記光画像計測装置はさらに、前記第 1 信号光を前記第 1 参照光と合波することにより第 1 および第 2 合成光を生成するとともに、前記第 2 信号光を前記第 2 参照光と合波することにより第 3 および第 4 合成光を生成する、偏光分離器を備え、

前記干渉光学系は、前記第 1 合成光が前記干渉光学系に対して入射する角度と前記第 2 合成光が前記干渉光学系に対して入射する角度が互いに異なるように構成されるとともに、前記第 3 合成光が前記干渉光学系に対して入射する角度と前記第 4 合成光が前記干渉光学系に対して入射する角度が互いに異なるように構成されている

ことを特徴とする請求項 3 記載の光画像計測装置。

【請求項 6】

前記光照射部は、前記第 1 および第 2 測定光を特定方向に繰り返し走査し、

前記照射時刻制御部は、前記測定対象の画像の前記特定方向におけるピクセル数を N とするとき、前記光照射部が前記第 1 および第 2 測定光を走査する周波数の N 倍以上の周波数で、前記測定対象に対して前記第 1 測定光を照射する動作と前記測定対象に対して前記第 2 測定光を照射する動作が切り替わるように、前記第 1 および第 2 時刻を調整する

ことを特徴とする請求項 1 記載の光画像計測装置。

【請求項 7】

前記光照射部は、前記第 1 および第 2 測定光を特定方向に繰り返し走査し、

10

20

30

40

50

前記照射時刻制御部は、前記測定対象の画像の前記特定方向におけるピクセル数を N とするとき、前記光照射部が前記第 1 および第 2 測定光を走査する周波数の約 N 倍以上かつ約 $2N$ 倍以下の周波数で、前記測定対象に対して前記第 1 測定光を照射する動作と前記測定対象に対して前記第 2 測定光を照射する動作が切り替わるように、前記第 1 および第 2 時刻を調整する

ことを特徴とする請求項 1 記載の光画像計測装置。

【請求項 8】

前記第 1 測定光の偏光状態と前記第 2 測定光の偏光状態は、互いに直交している

ことを特徴とする請求項 1 記載の光画像計測装置。

【請求項 9】

前記光照射部は、前記第 1 測定光が伝搬する第 1 光路と、前記第 2 測定光が伝搬し前記第 1 光路とは異なる第 2 光路と、を備える

ことを特徴とする請求項 1 記載の光画像計測装置。

【請求項 10】

前記光検出部は、前記第 1 時刻において前記第 1 信号光を検出し、前記第 2 時刻において前記第 2 信号光を検出する

ことを特徴とする請求項 1 記載の光画像計測装置。

【請求項 11】

光源が光を出射するステップ、

前記光源が出射する光を用いて第 1 偏光状態の第 1 測定光と第 2 偏光状態の第 2 測定光を照射する光照射ステップ、

前記第 1 測定光を測定対象に対して照射する時刻を第 1 時刻に調整するとともに、前記第 2 測定光を前記測定対象に対して照射する時刻を前記第 1 時刻とは異なる第 2 時刻に調整する、照射時刻制御ステップ、

前記第 1 および第 2 測定光が前記測定対象によって反射もしくは散乱されることにより得られる第 1 および第 2 信号光を検出して電気信号として出力する光検出ステップ、
を有し、

前記光照射ステップにおいては、前記第 1 偏光状態とは異なる前記第 2 偏光状態の光を生成するパッシブ光学素子を用いて、前記第 2 測定光を生成し、

前記光源は、第 1 および第 2 光源を備え、

前記光照射ステップにおいては、前記第 1 光源が出射する光を前記第 1 測定光として前記測定対象に対して照射するとともに、前記第 2 光源が出射する光を前記第 2 測定光として前記測定対象に対して照射し、

前記照射時刻制御ステップにおいては、前記第 1 光源が光を出射する時刻と前記第 2 光源が光を出射する時刻を制御することにより、前記第 1 および第 2 時刻を調整する

ことを特徴とする光画像計測方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光を用いて測定対象を観察する技術に関する。

【背景技術】

【0002】

光コヒーレンストモグラフィー (OCT: Optical Coherence Tomography) は光の干渉を用いて測定対象の断層画像を取得する技術であり、眼底検査の分野で 1996 年より実用化されており、近年では心臓病学、歯科学、腫瘍学、食品産業や再生医療など様々な分野への適用が検討されている。

【0003】

OCT においては、光源からの光を、測定対象に照射する信号光と測定対象に照射せずに参照光ミラーで反射させる参照光とに 2 分岐し、測定対象から反射された信号光を参照光と合波させ干渉させることにより測定信号を得る。

10

20

30

40

50

【0004】

OCTは、測定位置の光軸方向への走査方法（以下、zスキャンと称する）により、大きくタイムドメインOCTとフーリエドメインOCTとに分けられる。タイムドメインOCTにおいては、光源として低コヒーレンス光源を使用し、測定時に参照光ミラーを走査することによりzスキャンを実施する。これにより信号光に含まれる参照光と光路長が一致する成分のみが干渉し、得られた干渉信号に対して包絡線検波を行うことにより、所望の信号が復調される。フーリエドメインOCTはさらに、波長走査型OCTとスペクトルドメインOCTとに分けられる。波長走査型OCTにおいては、出射光の波長を走査することが可能な波長掃引光源を使用し、測定時に波長を走査することによりzスキャンがなされ、検出された干渉光強度の波長依存性（干渉スペクトル）をフーリエ変換することにより所望の信号を得る。スペクトルドメインOCTにおいては、光源として広帯域光源を用い、生成された干渉光を分光器により分光し、波長成分ごとの干渉光強度（干渉スペクトル）を検出することがzスキャンに対応している。得られた干渉スペクトルをフーリエ変換することにより所望の信号を得る。

10

【0005】

OCTの測定対象となる生体組織のうち、例えば人の肌に含まれるコラーゲンや、人の眼球の水晶体などは、複屈折性を有することが知られている。これらの複屈折性を可視化することができれば測定対象のより多様な情報を得ることができる。しかし、反射率分布を測定している通常のOCTは、複屈折性を可視化することができない。複屈折性を可視化するための技術として、偏光感受型OCTの開発が行われている（特許文献1）。

20

【0006】

下記特許文献2は、EO（Electro Optical）変調器を用いて入射ビームの偏光状態を高速変調することにより、測定対象のジョーンズベクトルを取得する技術について記載している。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開2004-028970号公報

【特許文献2】特開2007-298461号公報

【発明の概要】

30

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

特許文献1記載のような従来の偏光感受型OCT装置においては、測定対象の複屈折情報（ジョーンズ行列やミューラー行列）を取得するため、測定対象に入射させる測定光の偏光状態と参照光の偏光状態を変えて走査（測定）する必要がある。これら行列が4要素によって形成され、各要素が複素数で表される場合、各要素の実数成分と虚数成分をそれぞれ1回の測定によって取得するので、全ての要素を得るためには少なくとも8回の走査をする必要がある。

【0009】

特許文献2記載の偏光感受光画像計測装置は、EO変調器を用いることにより1度の走査で測定対象のジョーンズベクトルを得ることを図っている。しかしEO変調器は一般に大型かつ高価であり、その結果として装置のサイズやコストが増大する。

40

【0010】

本発明は、上記課題に鑑みてなされたものであり、装置のサイズやコストを抑制しつつ測定対象の複屈折に関する情報を取得することができる光画像計測装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明においては、第1偏光状態とは異なる第2偏光状態の光を生成するパッシブ光学素子を用いて、第1測定光とは異なる第2測定光を生成し、前記第1測定光を測定対象に

50

対して照射する時刻を第1時刻に調整するとともに、前記第2測定光を前記測定対象に対して照射する時刻を前記第1時刻とは異なる第2時刻に調整する。第1および第2測定光が前記測定対象によって反射もしくは散乱されることにより得られる第1および第2の信号光を検出して電気信号として出力させる。これにより、1度の走査で、2つの異なる偏光状態の測定光に対応する情報を同時に得ることができるので、安価で簡素な構成で、測定対象の複屈折に関する情報を従来よりも多く取得することができる。ここで、パッシブ光学素子とは、その素子が機能を果たす上で、何らかの電氣的・磁氣的・力学的制御を要求しない光学素子を指す。

【0012】

一例として、第1および第2測定光を遮光する遮光部を設け、前記遮光部が前記第1測定光を遮光する時刻と前記遮光部が前記第2測定光を遮光する時刻を調整することにより、前記第1および第2時刻を調整することとした。遮光部により測定光の照射タイミングを制御するので、第1および第2測定光を生成するために複数の光源を設ける必要がないという利点がある。

10

【0013】

一例として、第1および第2光源を設け、前記第1光源が出射する光を前記第1測定光として前記測定対象に対して照射するとともに、前記第2光源が出射する光を前記第2測定光として前記測定対象に対して照射し、前記第1光源が光を出射する時刻と前記第2光源が光を出射する時刻を制御することにより、前記第1および第2時刻を調整することとした。光源の発光タイミングの制御により測定光の照射タイミングを制御することができるので、簡素な構成で照射タイミングを高速に制御することができる。

20

【0014】

一例として、前記第1信号光を第3偏光状態の成分と第4偏光状態の成分に分離するとともに前記第2信号光を第3偏光状態の成分と第4偏光状態の成分に分離し、前記第1信号光の前記第3および第4偏光状態の成分をそれぞれ検出するとともに、前記第2信号光の前記第3および第4偏光状態の成分をそれぞれ検出することとした。これにより、1度の走査で測定対象の複屈折に関するさらに多くの情報を取得することができる。ここで、第3および第4偏光状態は、それぞれ第1および第2偏光状態と同じであっても、異なっても良い。

30

【0015】

一例として、前記光源が出射する光を分岐して前記第1および第2測定光を生成するとともに第1および第2参照光を生成し、前記第1信号光を前記第1参照光と合波することにより互いに位相関係が異なる3つ以上の干渉光を生成するとともに、前記第2信号光を前記第2参照光と合波することにより互いに位相関係が異なる3つ以上の干渉光を生成し、これらの干渉光を検出し電気信号として出力することとした。これにより、第1および第2信号光の位相情報を得ることができるので、1度の走査で測定対象の複屈折に関するさらに多くの情報を取得することができる。

【0016】

一例として、前記第1信号光を前記第1参照光と合波することにより第1および第2合成光を生成するとともに、前記第2信号光を前記第2参照光と合波することにより第3および第4合成光を生成し、前記第1合成光が前記干渉光学系に対して入射する角度と前記第2合成光が前記干渉光学系に対して入射する角度が互いに異なるように構成するとともに、前記第3合成光が前記干渉光学系に対して入射する角度と前記第4合成光が前記干渉光学系に対して入射する角度が互いに異なるように構成することとした。これにより干渉光学系を共通化できるので、装置の大型化やコスト増加を抑制できる。

40

【0017】

一例として、前記第1および第2測定光を特定方向に繰り返し走査し、前記測定対象の画像の前記特定方向におけるピクセル数をNとするとき、前記光照射部が前記第1および第2測定光を走査する周波数のN倍以上の周波数で、前記測定対象に対して前記第1測定光を照射する動作と前記測定対象に対して前記第2測定光を照射する動作を切り替えるこ

50

ととした。これにより、第1および第2信号光それぞれについてNピクセルの画像を生成するのに十分な信号をサンプリングすることができる。

【0018】

一例として、前記第1および第2測定光を特定方向に繰り返し走査し、前記測定対象の画像の前記特定方向におけるピクセル数をNとするとき、前記光照射部が前記第1および第2測定光を走査する周波数の約N倍以上かつ約2N倍以下の周波数で、前記測定対象に対して前記第1測定光を照射する動作と前記測定対象に対して前記第2測定光を照射する動作を切り替えることとした。これにより、第1測定光を測定対象に照射するタイミングと第2測定光を測定対象に照射するタイミングを異ならしめる手段として必要以上に高性能な素子・デバイスを用いることなく、第1および第2信号光それぞれについてNピクセルの画像を生成するのに十分な信号をサンプリングすることができる。

10

【発明の効果】

【0019】

本発明によれば、従来に比べて少ない走査回数で測定対象の複屈折に関する情報を取得し、あるいは1度の走査で従来よりも多くの測定対象の複屈折に関する情報を取得することができる。上記した以外の、課題、構成、および効果は、以下の実施形態の説明により明らかにされる。

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1】実施形態1に係る光画像計測装置の構成例を示す模式図である。

20

【図2】光遮光素子105の構造例を示す正面図である。

【図3】対物レンズ108の焦点位置（測定光の照射位置）の移動の時間スケールと、光遮光素子105による第1および第2測定光の照射タイミングの時間スケールを説明する図である。

【図4】実施形態2に係る光画像計測装置の構成例を示す模式図である。

【図5】第1および第2測定光をサンプル110に対して照射するタイミングの例を示す図である。

【図6】図4に示した直線IVにおける干渉光学系409の断面図である。

【図7】実施形態3に係る光画像計測装置の構成例を示す模式図である。

【図8】実施形態4に係る光画像計測装置の構成例を示す模式図である。

30

【発明を実施するための形態】

【0021】

<実施の形態1：光学系の構成>

図1は、本発明の実施形態1に係る光画像計測装置の構成例を示す模式図である。光源101から出射されたレーザー光はコリメートレンズ102によって平行光に変換され、光学軸が水平方向に対して約22.5度に設定された1/2板103によって偏光を45度直線偏光に調整された後、ビームディスプレイサ104によってP偏光成分である第1レーザー光とS偏光成分である第2レーザー光とに強度比1対1で偏光分離される。第1および第2レーザー光は、光遮光素子105によって所定のタイミングで遮光され、ビームディスプレイサ106によって合波された後、ハーフビームスプリッタ107に入射する。光遮光素子105は、第1および第2レーザー光を交互に通過させるように構成されている。光遮光素子105の構成例については後述する。

40

【0022】

第1レーザー光は、ハーフビームスプリッタ107によって第1測定光と第1参照光に2分岐され、第2レーザー光は、ハーフビームスプリッタ107によって第2測定光と第2参照光に2分岐される。

【0023】

P偏光状態の第1測定光とS偏光状態の第2測定光は、対物レンズ108によってサンプル110に集光して照射される。対物レンズ108の位置は対物レンズアクチュエータ109によって例えばx軸方向に周波数 f_{sig} で正弦波状に繰り返し駆動されつつ、y

50

方向に線形に駆動され、これにより測定光の照射位置（集光位置）を x y 方向に走査する。走査周波数と遮光周波数の関係について、後述の図 3 を用いて改めて説明する。

【 0 0 2 4 】

サンプル 1 1 0 としては、非侵襲的に内部構造の観察、特に複屈折の構造の観察が望まれるものであればどのようなものでもよい。例としては、食品、植物、培養細胞、ヒトの組織などが考えられる。サンプル 1 1 0 から第 1 および第 2 測定光が反射または散乱することによりそれぞれ得られる第 1 および第 2 信号光は、対物レンズ 1 0 8 およびハーフビームスプリッタ 1 0 7 を透過した後に偏光ビームスプリッタ 1 1 4 へ入射する。第 1 および第 2 信号光は、第 1 および第 2 測定光の偏光状態によらず、P 偏光成分と S 偏光成分をともに含んでいる場合がある。

10

【 0 0 2 5 】

P 偏光状態の第 1 参照光と S 偏光状態の第 2 参照光は、ミラー 1 1 1 と 1 1 2 によって反射された後、光学軸方向が水平方向に対して約 2 2 . 5 度に設定された / 2 板 1 1 3 によって偏光状態をそれぞれ 4 5 度直線偏光と - 4 5 度直線偏光に変換され、偏光ビームスプリッタ 1 1 4 へ導かれる。4 5 度偏光により、 / 2 板 1 1 3 を通過した後の光は P 偏光成分と S 偏光成分をともに含むことになる。

【 0 0 2 6 】

偏光ビームスプリッタ 1 1 4 に入射した時点における第 1 信号光の P 偏光成分は、偏光ビームスプリッタ 1 1 4 によって第 1 参照光の S 偏光成分と合波され、第 1 合成光となって第 1 干渉光学系 1 2 2 に入射する。偏光ビームスプリッタ 1 1 4 に入射した時点における第 1 信号光の S 偏光成分は、偏光ビームスプリッタ 1 1 4 によって第 1 参照光の P 偏光成分と合波され、第 2 合成光となってミラー 1 2 8 により反射された後、第 2 干渉光学系 1 3 6 に入射する。第 1 干渉光学系 1 2 2 と第 2 干渉光学系 1 3 6 の構成は同一であるから、以下では主に第 1 干渉光学系 1 2 2 の構成について説明する。

20

【 0 0 2 7 】

第 1 干渉光学系 1 2 2 へ入射した第 1 合成光は、ハーフビームスプリッタ 1 1 5 によって透過光と反射光に 2 分岐される。第 1 合成光の透過光は、光学軸が水平方向に対して約 2 2 . 5 度に設定された / 2 板 1 1 6 を透過した後、集光レンズ 1 1 7 によって集光されるとともにウォラストンプリズム 1 1 8 によって 2 分岐されることにより、互いに位相関係が 1 8 0 度異なる第 1 干渉光と第 2 干渉光が生成される。電流差動型の光検出器 1 2 3 は第 1 および第 2 干渉光を検出し、それらの強度の差に比例した信号 1 2 5 を出力する。

30

【 0 0 2 8 】

第 1 合成光の反射光は、光学軸が水平方向に対して約 4 5 度に設定された / 4 板 1 1 9 を透過した後、集光レンズ 1 2 0 によって集光されるとともにウォラストンプリズム 1 2 1 によって 2 分岐されることにより、互いに位相関係が 1 8 0 度異なる第 3 干渉光と第 4 の干渉光が生成される。電流差動型の光検出器 1 2 4 は第 3 および第 4 干渉光を検出し、それらの強度の差に比例した信号 1 2 6 を出力する。

【 0 0 2 9 】

同様にして、第 2 干渉光学系 1 3 6 は第 2 合成光から 4 つの干渉光を生成し、電流差動型の光検出器 1 3 7 と 1 3 8 はこれら干渉光をそれぞれ検出し、信号 1 3 9 と信号 1 4 0 を生成する。

40

【 0 0 3 0 】

偏光ビームスプリッタ 1 1 4 に入射した時点における第 2 信号光の P 偏光成分は、偏光ビームスプリッタ 1 1 4 によって第 2 参照光の S 偏光成分と合波され、第 3 合成光となって第 1 干渉光学系 1 2 2 に入射する。偏光ビームスプリッタ 1 1 4 に入射した時点における第 2 信号光の S 偏光成分は、偏光ビームスプリッタ 1 1 4 によって第 2 参照光の P 偏光成分と合波され、第 4 合成光となってミラー 1 2 8 により反射された後、第 2 干渉光学系 1 3 6 に入射する。

【 0 0 3 1 】

50

第3および第4合成光は、第1および第2合成光と同様に、第1干渉光学系122と第2干渉光学系136によってそれぞれが4つの干渉光に変換され、検出される。このとき光遮光素子105によって、常に第1レーザ光と第2レーザ光のどちらか一方は遮光されているので、第1および第2合成光がそれぞれ4つの干渉光に変換されて検出されるタイミングと、第3および第4合成光がそれぞれ4つの干渉光に変換され検出されるタイミングとは、互いに異なる。

【0032】

信号125、126、139、140は、画像生成部141に入力される。画像生成部141は、信号125、126、139、140に基づいて、サンプル110の反射率や複屈折についての情報を反映した画像を生成し、画像表示部142上に表示する。画像表示部142が表示する画像としては、例えば測定対象のジョーンズ行列の各要素の絶対値に対応する画像や、サンプル110によって生じた信号光のP偏光とS偏光の位相差に対応する画像などが考えられる。

10

【0033】

本実施形態1に係る光画像計測装置の光軸方向の空間分解能について説明する。本実施形態1においては、信号光に含まれる対物レンズ108の焦点以外からの反射光成分は、デフォーカス収差を有しており、平坦な波面を持った参照光と波面形状が一致しない。そのため、参照光と空間的に一様に干渉せず、検出器の受光面上で多数の干渉縞が形成される。このような干渉縞が形成されると、検出される干渉光の強度を受光部面内で積分した値は、単に信号光と参照光の強度和とほぼ等しくなるので、対物レンズ108の焦点以外からの反射光成分に対応する信号125、126、139、140の成分はほぼ0になる。このような原理により、対物レンズ108の焦点以外からの反射光成分は実効的に参照光と干渉しなくなり、対物レンズ108の焦点からの反射光成分だけが選択的に検出され、光軸方向の高い空間分解能が達成される。光軸方向の空間分解能は、対物レンズの開口数NAと、レーザ光の波長 λ によって決まり、 λ/NA^2 に比例する。一般的にOCT装置で利用される光の波長は、ヘモグロビンにも水にも吸収されにくい600nmから1300nm程度である。例えば対物レンズ108の開口数を0.4以上とすると、波長600nm~1300nmにおける光軸方向の空間分解能は約3.3 μ m~約7.2 μ mとなる。

20

【0034】

図2は、光遮光素子105の構造例を示す正面図である。光遮光素子105は、円盤の回転方向に沿って光透過部と光遮光部が交互に設けられた構造を有している。円盤を回転させることにより第1レーザ光と第2レーザ光が周期的に交互に遮光され、第1レーザ光と第2レーザ光のうち常にどちらか一方のレーザ光だけがビームディスプレイ106に導かれる。

30

【0035】

図3は、対物レンズ108の焦点位置(測定光の照射位置)の移動の時間スケールと、光遮光素子105による第1および第2測定光の照射タイミングの時間スケールを説明する図である。図3(a)に示すように、対物レンズアクチュエータ109による対物レンズ108の焦点位置が画像の1ライン分に相当する距離だけ移動するのに要する時間は $1/2f_{sig}$ である。したがって、本実施形態1に係る光画像計測装置が取得するサンプル110の画像のピクセル数を $N \times N$ とすると、対物レンズ108の焦点位置が1ピクセルに相当する距離分だけ移動するのに要する時間は平均的には $1/2Nf_{sig}$ となる(図3(b))。本実施形態1においては、対物レンズ108の焦点位置が1ピクセルに相当する距離分だけ移動する間(平均的には $1/2Nf_{sig}$ の時間)に光遮光素子105が第1および第2レーザ光のいずれを通過(または遮光)するかを少なくとも1回以上切り替えることとした。言い換えると、少なくとも $2Nf_{sig}$ 以上の周波数で第1および第2レーザ光を交互に遮光することとした。これにより、例えば図3(c)に示すように、対物レンズ108の焦点位置が1ピクセル分移動する時間の間に第1および第2測定光を測定対象に照射することができるので、第1および第2測定光それぞれについてNピク

40

50

セルの画像を生成するのに十分な信号をサンプリングすることができる。

【 0 0 3 6 】

第 1 および第 2 測定光をサンプル 1 1 0 に対して照射するタイミングは、対物レンズ 1 0 8 の焦点位置が 1 ピクセル分移動する間に、第 1 および第 2 測定光がそれぞれ少なくとも 1 回ずつサンプル 1 1 0 に対して照射されれば、どのようなタイミングでもよい。図 3 (c) に示すように対物レンズ 1 0 8 の焦点位置が 1 ピクセル分移動する間に第 1 および第 2 測定光を 1 回ずつ照射する場合、図 3 (d) に示すように 2 回ずつ照射する場合、などあらゆるパターンが考えられる。

【 0 0 3 7 】

一方で、第 1 および第 2 レーザ光を交互に遮光する周波数を大きくしすぎると、光遮光素子 1 0 5 や光検出器 1 2 3、1 2 4、1 3 7、1 3 8 が高い性能（高速性）を有していることが必要になるので、コストの増大を招く。したがって、第 1 および第 2 レーザ光を交互に遮光する周波数は必要以上に大きくせず、例えば約 $2 N f_{s i g}$ 以上から約 $4 N f_{s i g}$ 以下程度の範囲に設定するのが好ましい。

【 0 0 3 8 】

< 実施の形態 1 : 光学系の動作原理 >

以下では本実施形態 1 に係る光画像計測装置の動作原理および効果について数式を用いて詳細に説明する。測定対象のジョーンズ行列、第 1 および第 2 測定光のジョーンズベクトルをそれぞれ下記式 1 ~ 式 3 によって表す。

【 0 0 3 9 】

【 数 1 】

$$R = \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \quad (1)$$

【 0 0 4 0 】

【 数 2 】

$$E_{prob,1} = \sqrt{2} \begin{pmatrix} E_{prob} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

【 0 0 4 1 】

【 数 3 】

$$E_{prob,2} = \sqrt{2} \begin{pmatrix} 0 \\ E_{prob} \end{pmatrix} \quad (3)$$

【 0 0 4 2 】

偏光ビームスプリッタ 1 1 4 を透過した後の第 1 および第 2 信号光のジョーンズベクトルは、それぞれ下記式 4 と式 5 によって表すことができる。

【 0 0 4 3 】

【 数 4 】

$$E_{sig,1} = \begin{pmatrix} r_{pp} \\ r_{sp} \end{pmatrix} E_{prob} \quad (4)$$

【 0 0 4 4 】

10

20

30

40

【数 5】

$$E_{sig,2} = \begin{pmatrix} r_{ps} \\ r_{ss} \end{pmatrix} E_{prob} \quad (5)$$

【0045】

第1および第2参照光のジョーンズベクトルを下記式6と式7によって表すと、第1～第4合成光のジョーンズベクトルはそれぞれ下記式8～式11によって与えられる。

【0046】

【数 6】

$$E_{ref,1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} E_{ref} \quad (6)$$

10

【0047】

【数 7】

$$E_{ref,2} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} E_{ref} \quad (7)$$

【0048】

【数 8】

$$E_1 = \begin{pmatrix} r_{pp} E_{prob} \\ E_{ref} \end{pmatrix} \quad (8)$$

20

【0049】

【数 9】

$$E_2 = \begin{pmatrix} E_{ref} \\ r_{sp} E_{prob} \end{pmatrix} \quad (9)$$

30

【0050】

【数 10】

$$E_3 = \begin{pmatrix} r_{ps} E_{prob} \\ -E_{ref} \end{pmatrix} \quad (10)$$

【0051】

【数 11】

$$E_4 = \begin{pmatrix} E_{ref} \\ r_{ss} E_{prob} \end{pmatrix} \quad (11)$$

40

【0052】

第1干渉光学系122に入射した第1合成光について考えると、偏光ビームスプリッタ114を透過し、さらに / 2板116を透過した後の合成光のジョーンズベクトルは下記式12で表される。

【0053】

【数 1 2】

$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pp}E_{prob}/\sqrt{2} \\ E_{ref}/\sqrt{2} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} r_{pp}E_{prob} + E_{ref} \\ r_{pp}E_{prob} - E_{ref} \end{pmatrix} \quad (12)$$

【0 0 5 4】

式 1 2 で示される合成光は、ウォラストンプリズム 1 1 8 によって P 偏光成分と S 偏光成分に偏光分離された後、電流差動型の光検出器 1 2 3 によって差動検出される。したがって第 1 合成光に対応する信号 1 2 5 は、下記式 1 3 で表される。 r_{pp} は r_{pp} の位相、 ϕ は E_{prob} と E_{ref} の位相差である。簡単のため検出器 1 2 3 の変換効率は 1 とした。

10

【0 0 5 5】

【数 1 3】

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{4} |r_{pp}E_{prob} + E_{ref}|^2 - \frac{1}{4} |r_{pp}E_{prob} - E_{ref}|^2 \\ &= |r_{pp}| |E_{prob}| |E_{ref}| \cos(\theta_{pp} + \phi) \quad (13) \end{aligned}$$

【0 0 5 6】

一方、偏光ビームスプリッタ 1 1 4 で反射され、さらに / 4 板 1 1 9 を透過した後の合成光のジョーンズベクトルは、下記式 1 4 で表される。

20

【0 0 5 7】

【数 1 4】

$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & i/\sqrt{2} \\ i/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pp}E_{prob}/\sqrt{2} \\ E_{ref}/\sqrt{2} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} r_{pp}E_{prob} + iE_{ref} \\ i(r_{pp}E_{prob} - iE_{ref}) \end{pmatrix} \quad (14)$$

【0 0 5 8】

式 1 4 で示される合成光は、ウォラストンプリズム 1 2 1 によって P 偏光成分と S 偏光成分に偏光分離された後、電流差動型の光検出器 1 2 4 によって差動検出される。したがって第 1 合成光に対応する信号 1 2 6 は、下記式 1 5 で表される。

30

【0 0 5 9】

【数 1 5】

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{1}{4} |r_{pp}E_{prob} + iE_{ref}|^2 - \frac{1}{4} |r_{pp}E_{prob} - iE_{ref}|^2 \\ &= |r_{pp}| |E_{prob}| |E_{ref}| \sin(\theta_{pp} + \phi) \quad (15) \end{aligned}$$

【0 0 6 0】

同様にして、第 2 ~ 4 合成光に対応する差動検出信号を導くと、それぞれ下記式 1 6 ~ 式 2 1 のように表される。

40

【0 0 6 1】

【数 1 6】

$$I_2 = |r_{sp}| |E_{prob}| |E_{ref}| \cos(\theta_{sp} + \phi) \quad (16)$$

【0 0 6 2】

【数 1 7】

$$Q_2 = -|r_{sp}| |E_{prob}| |E_{ref}| \sin(\theta_{sp} + \phi) \quad (17)$$

【0 0 6 3】

50

【数 1 8】

$$I_3 = -|r_{ps}| |E_{prob}| |E_{ref}| \cos(\theta_{ps} + \phi) \quad (18)$$

【0 0 6 4】

【数 1 9】

$$Q_3 = -|r_{ps}| |E_{prob}| |E_{ref}| \sin(\theta_{ps} + \phi) \quad (19)$$

【0 0 6 5】

【数 2 0】

$$I_4 = |r_{ss}| |E_{prob}| |E_{ref}| \cos(\theta_{ss} + \phi) \quad (20)$$

【0 0 6 6】

【数 2 1】

$$Q_4 = -|r_{ss}| |E_{prob}| |E_{ref}| \sin(\theta_{ss} + \phi) \quad (21)$$

【0 0 6 7】

画像生成部 1 4 1 は、式 1 3、式 1 5、および式 1 6 ~ 式 2 1 で表される合計 8 つの作動検出信号に対して、下記式 2 2 で表される演算を実施することにより、サンプル 1 1 0 のジョーンズ行列に比例した信号を導く。

【0 0 6 8】

【数 2 2】

$$\begin{pmatrix} \sqrt{I_1^2 + Q_1^2} \tan^{-1}(Q_1/I_1) & \sqrt{I_3^2 + Q_3^2} \tan^{-1}(Q_3/I_3) \\ -\sqrt{I_2^2 + Q_2^2} \tan^{-1}(Q_2/I_2) & -\sqrt{I_4^2 + Q_4^2} \tan^{-1}(Q_4/I_4) \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} |E_{prob}| |E_{ref}| e^{i\phi} \quad (22)$$

【0 0 6 9】

<実施の形態 1 : まとめ>

本実施形態 1 に係る光画像計測装置は、パッシブ光学素子であるビームディスプレイサ 1 0 4 を用いて偏光状態の異なる第 1 および第 2 測定光を生成し、光遮光素子 1 0 5 (照射時刻制御部) を用いてこれら測定光を交互に照射する。これにより、大型で高価な偏光変調素子を用いることなく、従来よりも少ない (1 回の) 走査によりサンプル 1 1 0 のジョーンズ行列を求めることができる。

【0 0 7 0】

<実施の形態 2 >

図 4 は、本発明の実施形態 2 に係る光画像計測装置の構成例を示す模式図である。図 1 に示した部品と同じものには同一の符号を付し、その説明を省略する。本実施形態 2 に係る光画像計測装置は、2 つの異なる光源を用いている点が実施形態 1 とは異なる。さらに同一の干渉光学系を用いて各測定光を検出する点が実施形態 1 とは異なる。その他は概ね実施形態 1 と同様であるので、以下では差異点を中心に説明する。

【0 0 7 1】

第 1 光源 4 0 1 から出射された P 偏光状態の第 1 レーザ光は、コリメートレンズ 4 0 2 によって平行光に変換され、偏光ビームスプリッタ 4 0 3 に入射する。第 2 光源 4 0 4 から出射された P 偏光状態の第 2 レーザ光は、コリメートレンズ 4 0 5 によって平行光に変換され、光学軸が水平方向に対して約 4 5 度に設定された $\lambda/2$ 板 4 0 6 によって S 偏光状態に変換された後、偏光ビームスプリッタ 4 0 3 に入射する。第 1 および第 2 のレーザ光は、偏光ビームスプリッタ 4 0 3 によって合波された後、ハーフビームスプリッタ 1 0 7 に入射する。偏光ビームスプリッタ 4 0 3 はパッシブ光学素子である。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 2 】

発光時刻制御部 4 0 7 は、第 1 光源 4 0 1 と第 2 光源 4 0 4 が周期的に交互に発光するように制御する。具体的には、実施形態 1 における光遮光素子 1 0 5 による遮光時刻と同様に、対物レンズ 1 0 8 の焦点位置が 1 ピクセルに相当する距離分だけ移動する間（平均的には $1 / 2 N f_{s i g}$ の時間）に第 1 光源 4 0 1 と第 2 光源 4 0 4 のいずれが発光するかを少なくとも 1 回以上切り替えることとした。言い換えると、少なくとも $2 N f_{s i g}$ 以上の周波数で第 1, 第 2 の光源を交互に発光することとした。これにより、例えば図 3 (c) に示すように、対物レンズ 1 0 8 の焦点位置が 1 ピクセル分移動する時間の間に第 1 および第 2 測定光を測定対象に照射することができる。したがって第 1 および第 2 測定光それぞれについて、 N ピクセルの画像を生成するのに十分な信号をサンプリングすることができる。また、2 つの光源を設けてそれぞれの光源の発光タイミングを制御することにより、実施形態 1 のように光遮光素子 1 0 5 を用いる場合に比べて、より簡素な構成で高速に第 1 および第 2 測定光の照射タイミングを制御することができる。

10

【 0 0 7 3 】

図 5 は、第 1 および第 2 測定光をサンプル 1 1 0 に対して照射するタイミングの例を示す図である。照射タイミングは、対物レンズ 1 0 8 の焦点位置が 1 ピクセル分移動する間に、第 1 および第 2 測定光がそれぞれ少なくとも 1 回ずつサンプル 1 1 0 に対して照射されれば、どのようなタイミングでもよい。一例として図 5 (a) に示すように、対物レンズ 1 0 8 の焦点位置が 1 ピクセル分移動する間に第 1 および第 2 測定光を 1 回ずつ照射することができる。測定光の波形は図 5 (a) に示すような矩形波に限らず、例えば図 5 (b) に示すような正弦波の上端部を切り取ったような波形でも良い。このような波形は、例えば光源としてレーザダイオードを用い、発光閾値電流を中心にした正弦波電流でレーザダイオードを駆動することにより得られる。この場合には、図中に矢印で示したように測定光のパワーがもっとも大きいタイミングで信号をサンプリングすることが好ましい。その他の例として、図 5 (c) (d) に示すように、第 1 および第 2 測定光が照射される時間が互いに重複するように照射することもできる。この場合には、図中に矢印で示したように、どちらか一方の測定光が照射されていないタイミング（あるいは照射パワーが十分に小さいタイミング）で信号をサンプリングすることが望ましい。

20

【 0 0 7 4 】

第 1 光源 4 0 1 と第 2 光源 4 0 4 を交互に発光する周波数を大きくしすぎると、これら光源、発光時刻制御部 4 0 7、および光検出器 1 2 3、1 2 4、1 3 7、1 3 8 が高い性能（高速性）を有することが必要になるので、コストの増大を招く。したがって、第 1 光源 4 0 1 と第 2 光源 4 0 4 を交互に発光する周波数は必要以上に大きくせず、約 $2 N f_{s i g}$ 以上から約 $4 N f_{s i g}$ 以下程度の範囲に設定するのが好ましい。典型的な値である $f_{s i g} = 1 0 0 \text{ Hz}$ 、 $N = 1 0 0 0$ の場合には、各光源を交互に発光するのに好ましい周波数範囲は $2 0 0 \text{ kHz} \sim 4 0 0 \text{ kHz}$ であり、これは一般的なレーザドライバで十分に対応可能な周波数である。

30

【 0 0 7 5 】

第 1 および第 2 レーザ光がハーフビームスプリッタ 1 0 7 に入射してから、第 1 ~ 4 合成光が生成されるまでは、実施形態 1 と同じである。したがってこれら過程についての説明は省略する。

40

【 0 0 7 6 】

第 1 合成光は、干渉光学系 4 0 9 に対して図中の矢印 の方向から入射し、実施形態 1 と同様に 4 つの干渉光に変換される。電流差動型の光検出器 1 2 3 a と 1 2 4 a はこれら干渉光を検出し、信号 1 2 6 a と 1 2 6 b を生成する。第 2 合成光はミラー 1 2 8 と 4 0 8 によって干渉光学系 4 0 9 に対して図中の矢印 の方向から入射し、4 つの干渉光に変換される。電流差動型の光検出器 1 2 3 b と 1 2 4 b はこれら干渉光を検出し、信号 1 2 6 a と 1 2 6 b を生成する。

【 0 0 7 7 】

図 6 は、図 4 に示した直線 I V における干渉光学系 4 0 9 の断面図である。干渉光学系

50

409に対する第1合成光の入射角度と第2合成光の入射角度は、紙面に垂直な方向に相対的に傾いている。第1合成光(実線)と第2合成光(破線)の角度を相対的に傾けているので、同一の干渉光学系409により第1および第2合成光からそれぞれ4つの干渉光を生成しつつ、これらの干渉光を異なる検出器により検出することができる。したがって干渉光学系を2つ設ける必要がなくなり、光画像計測装置を小型化・低コスト化することができる。

【0078】

第3および第4合成光は、第1および第2合成光と同様に、干渉光学系409によってそれぞれが4つの干渉光に変換され、検出される。検出器が出力する信号125a、125b、126a、126bを処理する方法は、実施形態1における信号125、126、139、140を処理する方法と同一である。

10

【0079】

<実施の形態3>

図7は、本発明の実施形態3に係る光画像計測装置の構成例を示す模式図である。図1に示した部品と同じものには同一の符号を付し、その説明を省略する。本実施形態3に係る光画像計測装置は、タイムドメインOCTとして構成されている。本実施形態3においては、第1光源401と第2光源404から出射される光が広帯域光である点、および参照光の光路長を調整する手段を有している点において、実施形態2と異なる。その他の構成は概ね実施形態2と同様なので、以下では差異点を中心に説明する。

【0080】

20

第1光源401と第2光源404から出射された第1および第2広帯域光は、実施形態2と同様にハーフビームスプリッタ107に入射し、第1および第2測定光と、第1および第2参照光が生成される。第1および第2測定光は、サンプル110によって反射された後、第1および第2信号光となって偏光ビームスプリッタ114に導かれる。第1および第2参照光は、直角プリズムミラー701を反射した後、光学軸方向が水平方向に対して約22.5度に設定された $\lambda/2$ 板113によって偏光状態をそれぞれ45度直線偏光と-45度直線偏光に変換され、偏光ビームスプリッタ114へ導かれる。直角プリズムミラー701はステージ702の上に設置されており、ステージ702を光軸方向に動かすことにより、第1および第2参照光の光路長を調整することができる。

【0081】

30

このような構成においては、信号光に含まれる参照光と光路長が一致する反射光成分だけが選択的に参照光と干渉するという広帯域光の性質を利用することにより、光軸方向の高い空間分解能を達成することができる。このような原理を用いているので、深さ方向の測定位置の調整は、ステージ702によって参照光の光路長を変化させることによって実現される。光軸方向の空間分解能は広帯域光のコヒーレンス長によってのみ決まり、典型的には10 μ m程度である。すなわち本実施形態2においては、光軸方向の分解能が対物レンズ108の開口数に依存しないので、実施形態1~2とは異なり、光軸方向の分解能を高くするために高NAの対物レンズ108を用いる必要がない。したがって、ワーキングディスタンスの長い対物レンズ108を用いることができ、測定の簡便性を向上させることができる。

40

【0082】

<実施の形態4>

図8は、本発明の実施形態4に係る光画像計測装置の構成例を示す模式図である。図1に示した部品と同じものには同一の符号を付し、その説明を省略する。本実施形態4に係る光画像計測装置は、共焦点顕微鏡として構成されている。

【0083】

第1光源401から出射されたP偏光状態の第1レーザ光は、コリメートレンズ402によって平行光に変換され、偏光ビームスプリッタ403に入射する。第2光源404から出射されたP偏光状態の第2レーザ光は、コリメートレンズ405によって平行光に変換され、光学軸が水平方向に対して約45度に設定された $\lambda/2$ 板406によってS偏光

50

状態に変換された後、偏光ビームスプリッタ403に入射する。第1および第2レーザー光は、偏光ビームスプリッタ403によって合波された後、結晶軸方向を回転調整可能な / 2板801と / 4板802によって偏光状態を調整された後にハーフビームスプリッタ107に入射する。ハーフビームスプリッタ107を反射した第1および第2レーザー光は、走査光学系803を通った後、第1および第2測定光として対物レンズ108によってサンプル110に集光して照射される。サンプル110に対する第1および第2測定光の照射位置は、走査光学系803によって光軸の傾きを制御することにより、2次的に走査される。走査光学系803としては、例えば2枚のガルバノミラーなどを用いることができる。

【0084】

第1および第2測定光がサンプル110によって反射されることにより得られる第1および第2信号光は、対物レンズ108、走査光学系803、ハーフビームスプリッタ107を通り、結晶軸方向が調整可能な / 2板804と / 4板805によって偏光状態を調整された後、偏光ビームスプリッタ806によってP偏光成分とS偏光成分とに偏光分離される。

【0085】

第1および第2信号光のP偏光成分は集光レンズ807によって集光され、集光レンズ807の焦点位置に配置されたピンホール809を透過した成分が検出器811によって検出され、検出信号813が生成される。同様に、第1および第2信号光のS偏光成分は集光レンズ808によって集光され、集光レンズ808の焦点位置に配置されたピンホール810を透過した成分が検出器812によって検出され、検出信号814が生成される。画像生成部141は、検出信号813と814に基づいて、サンプル110の反射率や複屈折情報を反映した画像を生成し、画像表示部142上に表示する。

【0086】

本実施形態4においては、例えば合計で4回の測定（それぞれの測定を第1測定～第4測定と称する）を実施することにより、測定対象のジョーンズ行列を取得することができる。以下では、本実施形態4の動作原理と効果について数式を用いて詳細に説明する。

/ 2板801に入射する前の第1および第2レーザー光のジョーンズベクトルを下記式23と式24で表すこととする。

【0087】

【数23】

$$E_{prob,1} = \sqrt{2} \begin{pmatrix} E_{prob} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

【0088】

【数24】

$$E_{prob,2} = \sqrt{2} \begin{pmatrix} 0 \\ E_{prob} \end{pmatrix} \quad (24)$$

【0089】

第1測定においては、 / 2板801の結晶軸方向の角度は0度、 / 4板802の結晶軸方向の角度は22.5度、 / 2板804の結晶軸方向の角度は0度、 / 4板805の角度は0度に設定されている。このとき、サンプル110に照射される第1および第2測定光のジョーンズベクトルはそれぞれ下記式25と式26で表される。第1測定光は45度直線偏光、第2測定光は-45度直線偏光となる。

【0090】

10

20

30

40

【数 2 5】

$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{prob} \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} E_{prob} \quad (25)$$

【0 0 9 1】

【数 2 6】

$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E_{prob} \end{pmatrix} = \frac{e^{-i\pi/4}}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} E_{prob} \quad (26)$$

10

【0 0 9 2】

式 2 5 と 2 6 で表される第 1 および第 2 測定光がサンプル 1 1 0 から反射されることにより得られる第 1 および第 2 信号光が、 $\pi/4$ 板 8 0 5 を透過した後のジョーンズベクトルは、下記式 2 7 と 2 8 で表される。ただし偏光状態および振幅に無関係な位相因子は省略した。

【0 0 9 3】

【数 2 7】

$$\begin{aligned} E_{sig,1} &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} E_{prob} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} (r_{pp} + r_{ps}) \\ -e^{-i\pi/4} (r_{sp} + r_{ss}) \end{pmatrix} E_{prob} \quad (27) \end{aligned}$$

20

【0 0 9 4】

【数 2 8】

$$\begin{aligned} E_{sig,2} &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} E_{prob} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} (r_{pp} - r_{ps}) \\ -e^{-i\pi/4} (r_{sp} - r_{ss}) \end{pmatrix} E_{prob} \quad (28) \end{aligned}$$

30

【0 0 9 5】

第 1 測定によって得られる、第 1 および第 2 信号光の P 偏光成分に対応する検出信号 8 1 3 をそれぞれ $D^{(1)}_{1,p}$ と $D^{(1)}_{2,p}$ 、第 1 および第 2 信号光の S 偏光成分に対応する検出信号 8 1 3 をそれぞれ $D^{(1)}_{1,s}$ と $D^{(1)}_{2,s}$ 、のように表すと、これらは下記式 2 9 ~ 式 3 2 で表される。

【0 0 9 6】

【数 2 9】

$$D_{1,p}^{(1)} = \frac{1}{4} \left[|r_{pp}|^2 + |r_{ps}|^2 + 2|r_{pp}||r_{ps}|\cos(\theta_{pp} - \theta_{ps}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (29)$$

40

【0 0 9 7】

【数 3 0】

$$D_{2,p}^{(1)} = \frac{1}{4} \left[|r_{pp}|^2 + |r_{ps}|^2 - 2|r_{pp}||r_{ps}|\cos(\theta_{pp} - \theta_{ps}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (30)$$

【0 0 9 8】

50

【数 3 1】

$$D_{1,s}^{(1)} = \frac{1}{4} \left[|r_{sp}|^2 + |r_{ss}|^2 + 2|r_{sp}||r_{ss}|\cos(\theta_{sp} - \theta_{ss}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (31)$$

【0 0 9 9】

【数 3 2】

$$D_{2,s}^{(1)} = \frac{1}{4} \left[|r_{sp}|^2 + |r_{ss}|^2 - 2|r_{sp}||r_{ss}|\cos(\theta_{sp} - \theta_{ss}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (32)$$

【0 1 0 0】

第 2 測定においては、 / 2 板 8 0 1 の結晶軸方向の角度は 0 度、 / 4 板 8 0 2 の結晶軸方向の角度は 4 5 度、 / 2 板 8 0 4 の結晶軸方向の角度は 0 度に設定されている。このとき、サンプル 1 1 0 に照射される第 1 および第 2 測定光のジョーンズベクトルはそれぞれ下記式 3 3 と 3 4 で表される。第 1 測定光は右回り円偏光、第 2 測定光は左回り円偏光となる。

【0 1 0 1】

【数 3 3】

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & i/\sqrt{2} \\ i/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{prob} \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} E_{prob} \quad (33)$$

【0 1 0 2】

【数 3 4】

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & i/\sqrt{2} \\ i/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E_{prob} \end{pmatrix} = \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} E_{prob} \quad (34)$$

【0 1 0 3】

式 2 5 と 2 6 で表される第 1 および第 2 測定光がサンプル 1 1 0 によって反射されることにより得られる第 1 および第 2 信号光が、 / 4 板 8 0 5 を透過した後のジョーンズベクトルは、下記式 3 5 と 3 6 で表される。ただし偏光状態に無関係な因子は省略した。

【0 1 0 4】

【数 3 5】

$$\begin{aligned} E_{sig,1} &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} E_{prob} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4}(r_{pp} - ir_{ps}) \\ -e^{-i\pi/4}(r_{sp} - ir_{ss}) \end{pmatrix} E_{prob} \quad (35) \end{aligned}$$

【0 1 0 5】

【数 3 6】

$$\begin{aligned} E_{sig,2} &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} E_{prob} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4}(r_{pp} + ir_{ps}) \\ -e^{-i\pi/4}(r_{sp} + ir_{ss}) \end{pmatrix} E_{prob} \quad (36) \end{aligned}$$

10

20

30

40

50

【 0 1 0 6 】

第2測定によって得られる、第1および第2信号光のP偏光成分に対応する検出信号813を、それぞれ $D^{(2)}_{1,p}$ と $D^{(2)}_{2,p}$ 、第1および第2信号光のS偏光成分に対応する検出信号813をそれぞれ $D^{(2)}_{1,s}$ と $D^{(2)}_{2,s}$ 、のように表すと、これらは下記式37～式40で表される。

【 0 1 0 7 】

【 数 3 7 】

$$D_{1,p}^{(2)} = \frac{1}{4} \left[|r_{pp}|^2 + |r_{ps}|^2 - 2|r_{pp}||r_{ps}| \sin(\theta_{pp} - \theta_{ps}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (37)$$

10

【 0 1 0 8 】

【 数 3 8 】

$$D_{2,p}^{(2)} = \frac{1}{4} \left[|r_{pp}|^2 + |r_{ps}|^2 + 2|r_{pp}||r_{ps}| \sin(\theta_{pp} - \theta_{ps}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (38)$$

【 0 1 0 9 】

【 数 3 9 】

$$D_{1,s}^{(2)} = \frac{1}{4} \left[|r_{sp}|^2 + |r_{ss}|^2 - 2|r_{sp}||r_{ss}| \sin(\theta_{sp} - \theta_{ss}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (39)$$

20

【 0 1 1 0 】

【 数 4 0 】

$$D_{2,s}^{(2)} = \frac{1}{4} \left[|r_{sp}|^2 + |r_{ss}|^2 + 2|r_{sp}||r_{ss}| \sin(\theta_{sp} - \theta_{ss}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (40)$$

【 0 1 1 1 】

第3測定においては、 $\lambda/2$ 板801の結晶軸方向の角度は0度、 $\lambda/4$ 板802の結晶軸方向の角度は0度、 $\lambda/2$ 板804の結晶軸方向の角度は22.5度に設定されている。このとき、サンプル110に照射される第1および第2測定光のジョーンズベクトルはそれぞれ下記式41と42で表される。第1測定光はP偏光、第2測定光はS偏光となる。

30

【 0 1 1 2 】

【 数 4 1 】

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{prob} \\ 0 \end{pmatrix} = e^{i\pi/4} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} E_{prob} \quad (41)$$

【 0 1 1 3 】

【 数 4 2 】

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E_{prob} \end{pmatrix} = e^{-i\pi/4} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} E_{prob} \quad (42)$$

40

【 0 1 1 4 】

式41と42で表される第1および第2測定光がサンプル110によって反射されることにより得られる第1および第2信号光が、 $\lambda/2$ 板804を透過した後のジョーンズベクトルは、下記式43と44で表される。ただし偏光状態に無関係な因子は省略した。

【 0 1 1 5 】

【数 4 3】

$$\begin{aligned}
 E_{sig,1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} E_{prob} \\
 &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} (r_{pp} + r_{sp}) \\ e^{-i\pi/4} (r_{pp} - r_{sp}) \end{pmatrix} E_{prob} \quad (43)
 \end{aligned}$$

【0 1 1 6】

【数 4 4】

10

$$\begin{aligned}
 E_{sig,2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} E_{prob} \\
 &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} (r_{ps} + r_{ss}) \\ e^{-i\pi/4} (r_{ps} - r_{ss}) \end{pmatrix} E_{prob} \quad (44)
 \end{aligned}$$

【0 1 1 7】

第3測定によって得られる、第1および第2信号光のP偏光成分に対応する検出信号813をそれぞれ $D^{(3)}_{1,p}$ と $D^{(3)}_{2,p}$ 、第1および第2信号光のS偏光成分に対応する検出信号813をそれぞれ $D^{(3)}_{1,s}$ と $D^{(3)}_{2,s}$ 、のように表すと、これらは下記式45～式48で表される。

20

【0 1 1 8】

【数 4 5】

$$D^{(3)}_{1,p} = \frac{1}{4} \left[|r_{pp}|^2 + |r_{sp}|^2 + 2|r_{pp}||r_{sp}|\cos(\theta_{pp} - \theta_{sp}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (45)$$

【0 1 1 9】

【数 4 6】

30

$$D^{(3)}_{2,p} = \frac{1}{4} \left[|r_{ps}|^2 + |r_{ss}|^2 + 2|r_{ps}||r_{ss}|\cos(\theta_{ps} - \theta_{ss}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (46)$$

【0 1 2 0】

【数 4 7】

$$D^{(3)}_{1,s} = \frac{1}{4} \left[|r_{pp}|^2 + |r_{sp}|^2 - 2|r_{pp}||r_{sp}|\cos(\theta_{pp} - \theta_{sp}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (47)$$

【0 1 2 1】

【数 4 8】

40

$$D^{(3)}_{2,s} = \frac{1}{4} \left[|r_{ps}|^2 + |r_{ss}|^2 - 2|r_{ps}||r_{ss}|\cos(\theta_{ps} - \theta_{ss}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (48)$$

【0 1 2 2】

第4測定においては、 θ_{11} / 2板801の結晶軸方向の角度は0度、 θ_{12} / 4板802の結晶軸方向の角度は0度、 θ_{21} / 2板804の結晶軸方向の角度は22.5度に設定されている。このとき、サンプル110に照射される第1および第2測定光のジョーンズベクトルはそれぞれ下記式49と50で表される。第1測定光はP偏光、第2測定光はS偏光となる。

【0 1 2 3】

【数 4 9】

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{prob} \\ 0 \end{pmatrix} = e^{i\pi/4} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} E_{prob} \quad (49)$$

【0 1 2 4】

【数 5 0】

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E_{prob} \end{pmatrix} = e^{-i\pi/4} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} E_{prob} \quad (50)$$

10

【0 1 2 5】

式 4 1 と 4 2 で表される第 1 および第 2 測定光がサンプル 1 1 0 によって反射されることにより得られる第 1 および第 2 信号光が、 / 2 板 8 0 4 を透過した後のジョーンズベクトルは、下記式 5 1 と 5 2 で表される。ただし偏光状態に無関係な因子は省略した。

【0 1 2 6】

【数 5 1】

$$\begin{aligned} E_{sig,1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & i/\sqrt{2} \\ i/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} E_{prob} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} r_{pp} - ir_{sp} \\ ir_{pp} - r_{sp} \end{pmatrix} E_{prob} \quad (51) \end{aligned}$$

20

【0 1 2 7】

【数 5 2】

$$\begin{aligned} E_{sig,2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & i/\sqrt{2} \\ i/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} E_{prob} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} r_{ps} - ir_{ss} \\ ir_{ps} - r_{ss} \end{pmatrix} E_{prob} \quad (52) \end{aligned}$$

30

【0 1 2 8】

第 4 測定によって得られる、第 1 および第 2 信号光の P 偏光成分に対応する検出信号 8 1 3 をそれぞれ $D^{(4)}_{1,p}$ と $D^{(4)}_{2,p}$ 、第 1 および第 2 信号光の S 偏光成分に対応する検出信号 8 1 3 をそれぞれ $D^{(4)}_{1,s}$ と $D^{(4)}_{2,s}$ 、のように表すと、これらは下記式 5 3 ~ 式 5 6 で表される。

【0 1 2 9】

【数 5 3】

$$D_{1,p}^{(4)} = \frac{1}{4} \left[|r_{pp}|^2 + |r_{sp}|^2 - 2|r_{pp}||r_{sp}|\sin(\theta_{pp} - \theta_{sp}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (53)$$

40

【0 1 3 0】

【数 5 4】

$$D_{2,p}^{(4)} = \frac{1}{4} \left[|r_{ps}|^2 + |r_{ss}|^2 - 2|r_{ps}||r_{ss}|\sin(\theta_{ps} - \theta_{ss}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (54)$$

【0 1 3 1】

【数 5 5】

$$D_{1,s}^{(4)} = \frac{1}{4} \left[|r_{pp}|^2 + |r_{sp}|^2 + 2|r_{pp}||r_{sp}|\sin(\theta_{pp} - \theta_{sp}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (55)$$

【0 1 3 2】

【数 5 6】

$$D_{2,s}^{(4)} = \frac{1}{4} \left[|r_{ps}|^2 + |r_{ss}|^2 + 2|r_{ps}||r_{ss}|\sin(\theta_{ps} - \theta_{ss}) \right] |E_{prob}|^2 \quad (56)$$

【0 1 3 3】

画像生成部 1 4 1 は、実施形態 1 と同様に式 2 9 ~ 3 2、式 3 7 ~ 4 0、式 4 5 ~ 4 8、式 5 3 ~ 5 6 で表される合計 1 6 個の信号に対して演算処理を施すことにより、サンプル 1 1 0 のジョーンズ行列を導く。

【0 1 3 4】

本実施形態 4 によれば、実施形態 1 ~ 3 とは異なり光の干渉を用いていないので、干渉信号を得るための信号光と参照光との光軸調整や光路長調整を実施することなく、サンプル 1 1 0 のジョーンズ行列を得ることができる。

【0 1 3 5】

< 本発明の変形例について >

本発明は上記した実施例に限定されるものではなく、様々な変形例が含まれる。例えば、上記した実施例は本発明を分かりやすく説明するために詳細に説明したものであり、必ずしも説明した全ての構成を備えるものに限定されるものではない。また、ある実施例の構成の一部を他の実施例の構成に置き換えることが可能であり、また、ある実施例の構成に他の実施例の構成を加えることも可能である。また、各実施例の構成の一部について、他の構成の追加・削除・置換をすることが可能である。

【符号の説明】

【0 1 3 6】

- 1 0 1 : 光源
- 1 0 2 : コリメートレンズ
- 1 0 3 , 1 1 3 , 1 1 6 , 1 3 0 : / 2 板
- 1 0 4 , 1 0 6 : ビームディスプレイサ
- 1 0 5 : 光遮光素子
- 1 0 7 , 1 1 5 , 1 2 9 : ハーフビームスプリッタ
- 1 0 8 : 対物レンズ
- 1 0 9 : 対物レンズアクチュエータ
- 1 1 0 : サンプル
- 1 1 1 , 1 1 2 , 1 2 8 : ミラー
- 1 1 4 : 偏光ビームスプリッタ
- 1 1 9 , 1 3 3 : / 4 板
- 1 1 7 , 1 2 0 , 1 3 1 , 1 3 4 : 集光レンズ
- 1 1 8 , 1 2 1 , 1 3 2 , 1 3 5 : ウォラストンプリズム
- 1 2 2 : 第 1 干渉光学系
- 1 2 3 , 1 2 4 , 1 3 7 , 1 3 8 : 電流差動型の光検出器
- 1 3 6 : 第 2 干渉光学系
- 1 4 1 : 画像生成部
- 1 4 2 : 画像表示部

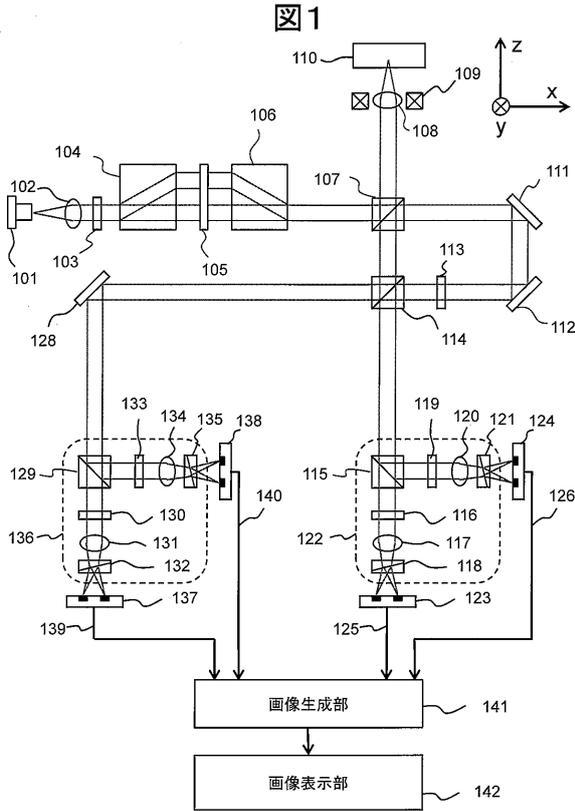
10

20

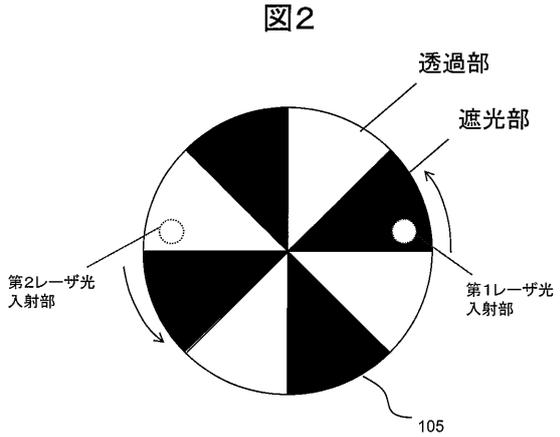
30

40

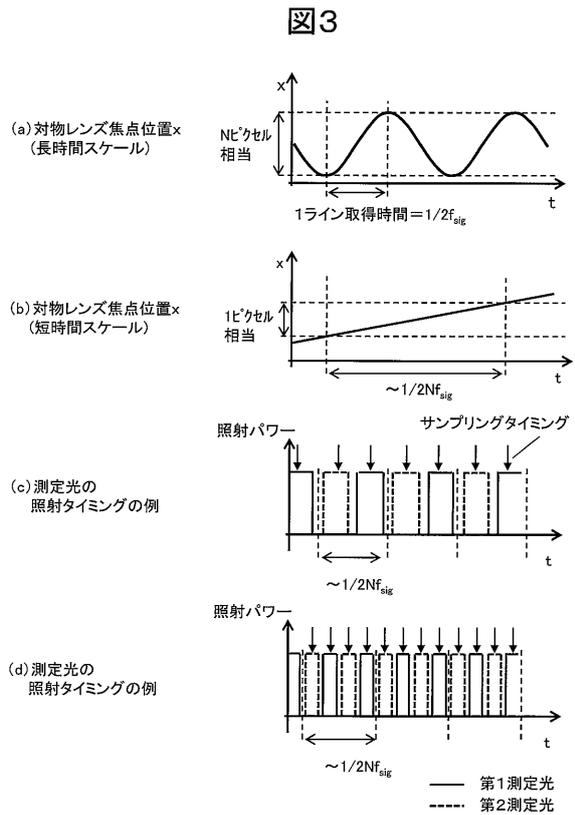
【図1】



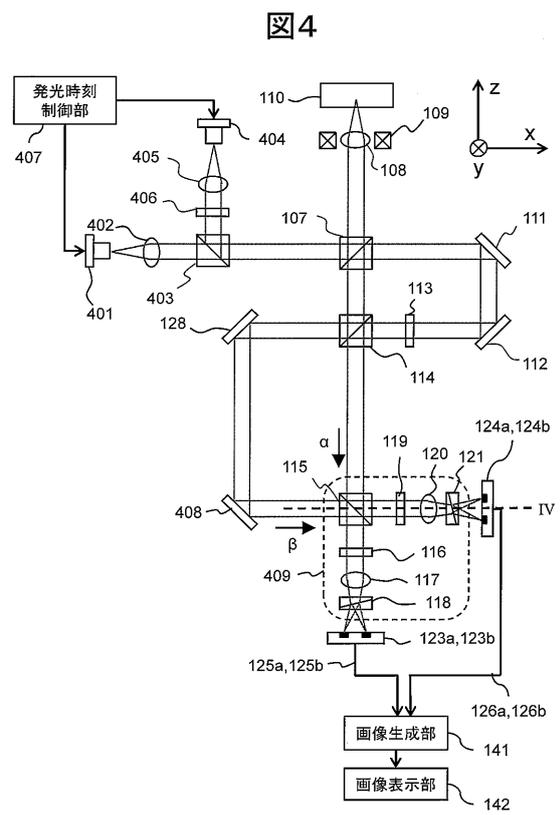
【図2】



【図3】

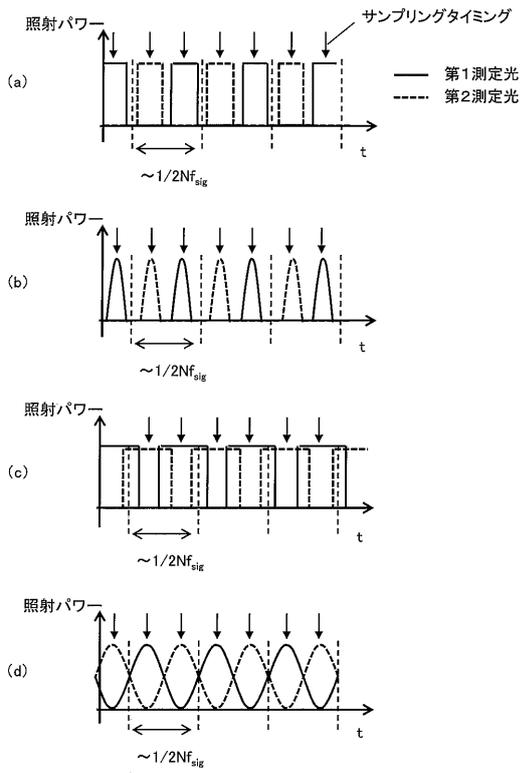


【図4】



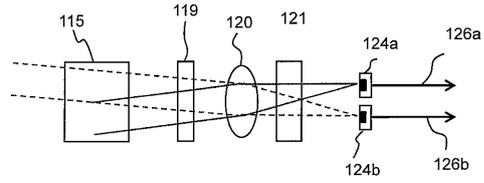
【図5】

図5



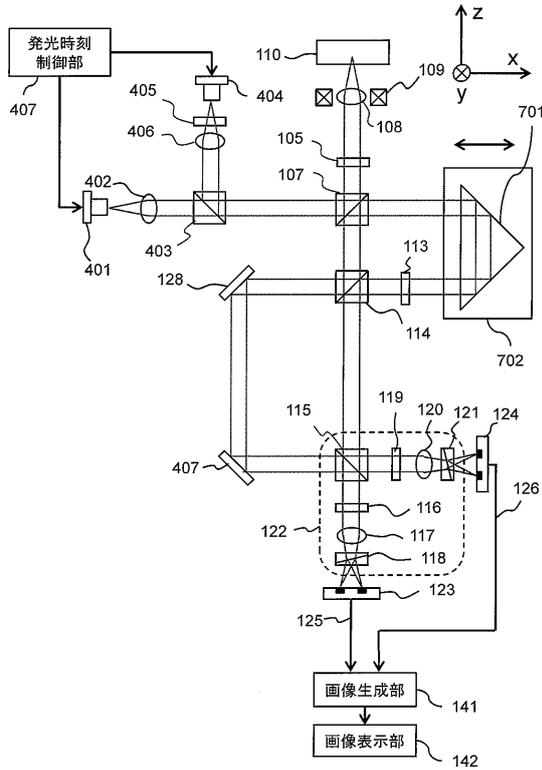
【図6】

図6



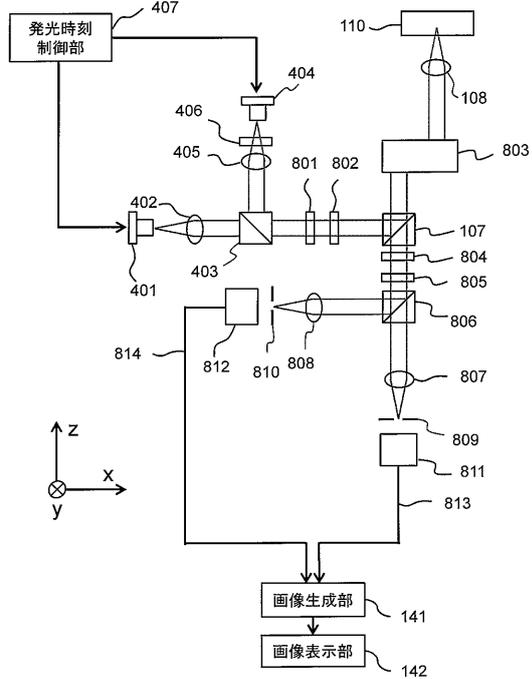
【図7】

図7



【図8】

図8



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2010-117372(JP,A)
米国特許出願公開第2013/0100456(US,A1)
特開2016-044999(JP,A)
特開2014-228473(JP,A)
特開2013-148482(JP,A)
特開2015-049204(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 21/00 - 21/61
A61B 3/00 - 3/18
G01J 3/00 - 3/52
G01B 9/00 - 9/10