

【公報種別】特許法第 17 条の 2 の規定による補正の掲載

【部門区分】第 6 部門第 1 区分

【発行日】平成 17 年 12 月 22 日 (2005.12.22)

【公表番号】特表 2004-514129 (P2004-514129A)

【公表日】平成 16 年 5 月 13 日 (2004.5.13)

【年通号数】公開・登録公報 2004-018

【出願番号】特願 2002-542833 (P2002-542833)

【国際特許分類第 7 版】

G 0 1 N 21/21

G 0 1 J 4/04

G 0 1 N 21/19

G 0 1 N 21/23

G 0 1 N 21/64

【F I】

G 0 1 N 21/21 Z

G 0 1 J 4/04 Z

G 0 1 N 21/19

G 0 1 N 21/23

G 0 1 N 21/64 A

G 0 1 N 21/64 E

【手続補正書】

【提出日】平成 16 年 11 月 18 日 (2004.11.18)

【手続補正 1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【書類名】明細書

【発明の名称】レーザ走査顕微鏡を用いて、物質によって放出、反射又は透過される光の偏光特性を測定する偏光特性測定方法及び装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

レーザ走査顕微鏡を用いて、既知の偏光状態を有するレーザビームを被試験物質に逐次照射し、上記物質によって放出、反射又は透過される光の偏光特性を測定する偏光特性測定方法において、

上記物質によって偏光状態が変えられた光ビーム又は上記物質によって放出される光を、上記物質の各点から略同時に受光される選択された光ビームの 2 つの異なる偏光成分の強度を測定することによって調べ、

上記 2 つの強度信号を処理することによって得られる信号を、上記物質の画像のそれぞれの点に割り当てる偏光特性測定方法。

【請求項 2】

上記 2 つの偏光成分の強度信号の差を、上記信号処理中に生成し、

上記 2 つの偏光成分の強度信号の差を、実行される測定に基づき、値 1、 $I_1 + I_2$ 、 $I_1 + 2 I_2$ 、あるいはミューラー行列の要素に割り当てられる又は測定又は計算によって決定される他の値によって分割することの特徴とする請求項 1 に記載の偏光特性測定方法

。

【請求項 3】

上記光ビームを、上記偏光状態又は光の強度の所定の比率に基づいて 2 つの異なるビー

ムに分割し、分割した各光ビームの一方の偏光成分のみの強度を測定することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の偏光特性測定方法。

【請求項 4】

上記物質から受光される光ビームの偏光成分間の位相を、2 点間で所定の周波数及び形状を有する関数に基づいて周期的に変え、上記偏光成分を、同じ検光子で連続して測定することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の偏光特性測定方法。

【請求項 5】

上記物質から受光される光ビームの偏光成分間の位相を、正弦波関数に基づいて 2 点間で変えることを特徴とする請求項 4 に記載の偏光特性測定方法。

【請求項 6】

上記物質から受光される光ビームの偏光成分間の位相を変えた後に、選択された波長に基づいて上記光ビームを分割し、該分割した各光ビームにおいて測定を同時に実行し、必要に応じて測定値の誤差を補正することを特徴とする請求項 4 又は 5 に記載の偏光特性測定方法。

【請求項 7】

上記照射光ビームの偏光成分間の位相を、2 点間で所定の周波数及び形状を有する関数に基づいて周期的に変え、FDLC 及び FDCD の値を、所定の周波数 ($2f$ 、 f) 及び位相で上記物質から周期的に放出される光の強度を測定することによって、決定することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の偏光特性測定方法。

【請求項 8】

上記照射レーザビームの偏光成分間の位相を、正弦波関数に基づいて 2 点間で変えることを特徴とする請求項 7 に記載の偏光特性測定方法。

【請求項 9】

上記物質の試料上のレーザ光の合焦点位置から受光される光の成分を選択し、

上記試料上の合焦点以外の点から受光される光の成分を排除することを特徴とする請求項 1 乃至 8 いずれか 1 項に記載の偏光特性測定方法。

【請求項 10】

空間的及び / 又は時間的に集中したレーザ光を用いて試料を照射して、該試料の分子中に多光子励起を起こすことを特徴とする請求項 4 乃至 6 いずれか 1 項に記載の偏光特性測定方法。

【請求項 11】

上記レーザ走査顕微鏡の少なくとも 1 つのレーザビームのストークスパラメータ (I 、 Q 、 U 、 V) を決定することを特徴とする請求項 4 乃至 6 いずれか 1 項に記載の偏光特性測定方法。

【請求項 12】

上記ストークスパラメータ (I 、 Q 、 U 、 V) を決定する間に、上記照射レーザビームの偏光状態を、減偏光、0 (又は 90) 度の直線偏光、+45 (又は -45) 度の直線偏光、円偏光の 4 つの状態に変化させることによって、上記レーザ走査顕微鏡の透過レーザビームのミューラー行列の要素を決定することを特徴とする請求項 4 乃至 6 いずれか 1 項に記載の偏光特性測定方法。

【請求項 13】

レーザ走査顕微鏡を用いて、物質によって放出、反射又は透過される光の偏光特性を測定する偏光特性測定装置において、

レーザ光源と、

上記レーザ光源と上記物質の試料間に配設された偏光状態発生器と、

上記試料によって偏光状態が変えられた光の強度又は上記試料によって放出される光の強度を検出するディテクタと、

上記ディテクタの前位に設けられ、偏光成分を空間的及び時間的に分離する偏光成分分離手段とを備える偏光特性測定装置。

【請求項 14】

上記偏光成分分離手段は、

上記試料からの光ビームが入射され、該光ビームの偏光状態によって偏光成分を空間的に分離する光学素子からなる、

あるいは、

上記試料からの光ビームが入射され、該光ビームを所定の比率で分割する光学素子と、上記ディテクタの前位に配設され、上記所定の比率で分割された各光ビームの一方の偏光成分を上記ディテクタにそれぞれ選択的に通過させる検光子とからなることを特徴とする請求項 13 に記載の偏光特性測定装置。

【請求項 15】

上記試料から入射される光ビームの偏光成分を時間的に分離する第 1 の偏光変調器と、

上記ディテクタの前位に配設された受動的な偏光検光子とを備える請求項 13 に記載の偏光特性測定装置。

【請求項 16】

上記受動的な偏光検光子とディテクタ間に配設された少なくとも 1 つの波長選択ビームスプリッタと、

上記波長選択ビームスプリッタで分離された光ビームを検出する上記ディテクタとを備える請求項 13 に記載の偏光特性測定装置。

【請求項 17】

受動的な偏光光学素子と偏光変調器とからなる偏光状態設定ユニットを備える請求項 13 に記載の偏光特性測定装置。

【請求項 18】

上記試料から受光される光ビームに対して設けられ、該試料上に焦点を合わせた光成分を選択するピンホールを備える請求項 13 乃至 17 にいずれか 1 項記載の偏光特性測定装置。

【請求項 19】

上記レーザ光源は、上記試料の分子の多光子励起を起こす空間的及び / 又は時間的に集中したレーザビームを出射することを特徴とする請求項 13 乃至 17 にいずれか 1 項に記載の偏光特性測定装置。

【請求項 20】

上記第 1 の偏光変調器と上記受動的な偏光検光子間に第 2 の偏光変調器を備え、

上記第 2 の偏光変調器の光軸は、上記第 1 の偏光変調器の光軸に対して 45° 回転されていることを特徴とする請求項 15 に記載の偏光特性測定装置。

【請求項 21】

上記偏光状態設定ユニットは、減偏光子、直線偏光子又は円偏光子と、光学的移相子とから、あるいはこれらの組合せからなることを特徴とする請求項 20 に記載の偏光特性測定装置。

【請求項 22】

上記偏光状態設定ユニットは、互いに平行又は垂直な偏光面を有する 2 つの受動的な直線偏光子の間に配設された光弾性変調器と、上記第 2 の直線偏光子の後位に配設された減偏光子とを備え、

上記光弾性変調器の光軸は、上記受動的な直線偏光子に対して 45° に設定されていることを特徴とする請求項 13 乃至 20 にいずれか 1 項に記載の偏光特性測定装置。

【請求項 23】

上記ディテクタの出力は、信号処理ユニットに接続されていることを特徴とする請求項 13 乃至 21 にいずれか 1 項に記載の偏光特性測定装置。

【請求項 24】

上記信号処理ユニットは、少なくとも 1 つの位相増幅器と、ローパスフィルタと、アナログ / デジタル変換器と、デジタル / アナログ変換器とを備えることを特徴とする請求項 22 に記載の偏光特性測定装置。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1 】

本発明は、レーザ走査顕微鏡を用いて、物質によって放出、反射又は透過される光の偏光特性を測定する偏光特性測定方法及び装置に関する。

【 0 0 0 2 】

レーザ走査顕微鏡 (laser scanning microscope: 以下、LSMという。)を用いて、被試験物質の選択された点 (明確に定義された体積単位) に、焦点を合わせたレーザビームを照射し、それに応じて透過、反射又は放出される光の強度に関する情報が得られ、その情報は、通常デジタル形式で記憶される。所定の幅及び長さの領域を走査する間に得られるレーザ走査顕微鏡の信号は、詳細な解析のための高解像度の画像 (picture) を得るのに用いられる。LSMを共焦点モードで使うことによって画質を更に向上させることができ、それによって、実質的に、合焦点以外の点から放出される光の擾乱効果 (disturbing effect) 排除することができる。市販のレーザ走査顕微鏡 (例えばツァイス社のタイプ410又はタイプ510) の殆どでは、共焦点モードは、基本機能であるが、反射光又は放出光 (蛍光) のみに対して使われている。LSMの共焦点モードにより、試料の非破壊の光学的スライス画像が得られ、三次元「画像」を再構築することができる。多光子レーザ励起法 (two or more photon laser excitation method) を使用することによって、厳密に限られた被試験領域の画質を非常に改善することができ、それによって、バックグラウンド発光 (強度) の擾乱効果を事実上完全に除去することができる (エー・ディアスプロ (A. Diaspro)、エム・ロベジョ (M. Robello) の多光子励起顕微鏡による生物系の研究 (Multi-Photon Excitation Microscopy to study Biosystems)、1999年ヨーロッパ顕微鏡及び分析 (European Microscopy and Analysis, March 1999))。

レーザ走査顕微鏡では、通常の顕微鏡及び方法と比較して、試料の構造の高画質及び高解像度の情報が得られる。それにもかかわらず、これらの方法では、偏光分光法だけによって調べることができる試料の異方性及び他の多くの物理的相互作用に関する情報は得られない。

【 0 0 0 3 】

偏光を用いることにより、異方性構造、例えば遷移双極子の立体配置、互いの物理的相互作用及び微小環境に関する情報を含む試料の画像が得られる。物質の異方性特性は、通常、物質によって放出、反射又は透過される光の偏光特性に、異方性方向として影響を与え、したがって、放出、反射又は透過される光の偏光特性の試験により、被試験物質の光学的異方性、更には分子の配列に関する情報を得ることができる。偏光 (直線偏光二色性 (linear dichroism: LD)、円偏光二色性 (circular dichroism: CD)) で実行される測定は、ハインズインスツルメント社 (Hinds Instruments Inc.) の1991年ニュースにおけるアプリケーションノート、ストーク偏光測定 (Application note, Stokes Polarimetry) にティー・シー・オークバーグ (T. C. Oakberg) によって記述されている。また、類似した方法が、複屈折を測定するのに使われる。ルミネセンス発光の直線偏光は、発光双極子の異方性に関する重要な情報を提供し、この異方性値 (r) の特性は、他の技術によって得られない物質の構造に関する重要な情報を提供する。発光 (放出光) の円偏光ルミネセンス (circular polarized luminescence: CPL) 成分は、励起状態における物質のキラル構造に関する重要な情報を提供する。この情報は他のどの方法からも得られない。更に、この重要な情報には、蛍光の偏光度 (degree of polarization: P) が含まれ、これによって、双極子間のエネルギー遷移、分子を囲むミクロ粘度、励起状態の継続期間、及び他の重要なパラメータに関する最終的な情報を得ることができる。 P 、 r 及びCPLの定義、測定及び物理的成分については、ジェイ・アール・ラコビッチ (J. R. Lakovicz) の著書「蛍光分光の原理 (Principles of Fluorescence Spectroscopy)」、アイ・ジェット・スタインバーグ (I. Z. Steinberg) によって酵素学における方法 (Methods in Enzymology) に発表されたレポートに詳細に述べられている。

【 0 0 0 4 】

キム (Kim) 等によって生物物理学ジャーナル (Biophysical Journal) に発表されたレポートにおいて詳細に述べられているように、差分偏光画像 (differential polarizatio

n image) を撮像する際に、直交偏光光 (orthogonally polarized light) を用いことにより、試料の異なる 2 つの画像が得られ、その強度の正規化した差分から、物質又は試料の異方性構造に関する情報が得られる。透過光の CD、LD 及び他の差分偏光値は、他の技術では得ることができない物質の異方性構造に関する重要な情報を提供する。

【0005】

蛍光 (放出光) の偏光特性は、概して、偏光部品 (例えば偏光フィルタ) を LSM のディテクタの前位に配設し、この偏光フィルタを、直線偏光光の 2 つの直交成分がそれぞれ透過する角度位置間で回転し、偏光フィルタの両方の位置において 2 つの画像を続けて撮像することによって、測定される。この方法は、ツァイス社のタイプ 410 LSM の付属品を用いて実施することができるが、蛍光の強度が時間的に変化するため、特に生物学的試料においては、満足な結果が得られない。更に、照射レーザー光の強度が変化するという問題もある。また、試料又はステージが振動したり、動くと、重大な歪みが発生する。

【0006】

アメリカ合衆国特許第 5,457,536 号には、ツァイス LSM を汎用レーザー走査顕微鏡に改良して、試料を透過した光の二色性及び複屈折を点毎に測定できることが、示唆されている。試料に照射されるレーザービームは、レーザー光源と試料間に挿入された偏光状態発生器によって変調される。試料を透過した光を測定するために、偏光検光子 (polarization analyzer) が物体面の向こう側に設けられている。偏光検光子からの出射光は光ディテクタに入射され、光ディテクタの出力は復調器に供給される。この構成の 1 つの欠点は、LSM の殆どにおいて、共焦点モードが、透過モードにおいてのみ利用可能であり、LD、CD 及び複屈折の測定には利用できないということである。この方法では、放出光又は反射光の偏光成分の測定をすることができず、したがって、発光 (放出光) の直線偏光又は円偏光 (r、CPL) の異方性を測定することができない。これは、共焦点蛍光顕微鏡が広く用いられている生物学的試料の研究に対しては大きな欠点である。生物学的用途の大部分において、異なる成分の立体的配置に関する重要な情報は、幾つかの発色団の発光を追跡することによって得られる。この情報の各項目は、上述した従来の技術によって解析することができない様々な偏光情報を伝える。多くの LSM においては、レーザー光は光ファイバを介して導かれるため、レーザー光を変調することは不可能あるいは非常に難しい。また、光の偏光成分の詳細な特性を示すことは不可能であり、したがって、ミューラー行列の要素に割り当てる重要なパラメータの幾つかは、測定することができない。

【0007】

したがって、本発明の一目的は、レーザー走査顕微鏡と偏光解析法の長所を組み合わせた偏光特性測定方法及び装置を提供することであり、レーザー走査顕微鏡と偏光解析法を組み合わせることにより、1 つの装置でより多くのパラメータを測定し、あるいは、1 つの装置の構成を変えることにより、放出される蛍光の特別なパラメータを共焦点モードで、単一の波長又は複数の波長において略同時に測定し、あるいは、放出、透過又は反射された光の偏光成分を最も完全に解析することができる。

【0008】

本発明の更なる目的は、測定中における光学素子の波長依存性及び偏光歪みに起因した誤差を除去又は補正することである。

【0009】

これらの目的は、レーザー走査顕微鏡を用いて、既知の偏光状態のレーザービームを被試験物質に逐次照射し、物質によって放出、反射又は透過される光の偏光特性を測定する偏光特性測定方法によって達成される。本発明に係る偏光特性測定方法において、物質によって偏光状態が変えられた光ビーム又は物質によって放出される光を、物質の各点から略同時に受光される選択された光ビームの 2 つの異なる偏光成分の強度を測定して調べ、2 つの強度信号を処理することによって得られる信号を、物質の画像のそれぞれの点に割り当てる。

【0010】

本発明の一側面では、2 つの偏光成分の強度信号の差を、信号処理中に生成し、その差

を、実行される測定に基づき、値 1 、 $I_1 + I_2$ 、 $I_1 + 2 I_2$ 、あるいはミューラー行列の要素に割り当てられる又は測定又は計算によって決定される他の値によって分割する。

【0011】

本発明の他の側面では、光ビームを、偏光状態又は光強度の所定の比率に基づいて2つの異なるビームに分割し、分割した各光ビームの一方の偏光成分のみの強度を測定する。

【0012】

本発明の更なる側面では、物質から受光される光ビームの偏光成分間の位相を、2点間で所定の周波数及び形状を有する関数に基づいて周期的に変え、偏光成分を同じ検光子で連続して測定する。

【0013】

物質から受光される光ビームの偏光成分間の位相を、好ましくは正弦波関数に基づいて2点間で変える。

【0014】

また、偏光特性の波長依存は、本発明に係る偏光特性測定方法によって測定することができ、物質から受光される光ビームの偏光成分間の位相を変えた後、選択された波長に基づいて光ビームを分割し、分割した各光ビームにおいて測定を同時に実行する。必要に応じて、測定値の誤差を補正する。

【0015】

本発明の他の側面では、照射光ビームの偏光成分間の位相を、2点間で所定の周波数及び形状を有する関数（好ましくは正弦波関数）に基づいて周期的に変え、FDLC及びFDDC値を、所定の周波数（ $2f$ 、 f ）及び位相で物質から周期的に放出される光の強度を測定することによって、決定する。

【0016】

共焦点モードにおける測定では、試料上のレーザ光の合焦点位置から受光される光の成分を選択し、合焦点以外の点から受光される光の成分を排除する。これにより、試料を光学的にスライスすることができる。

【0017】

本発明の更なる側面では、空間的及び／又は時間的に強度を集中できるレーザ光を用いて試料を照射して、試料の分子中に多光子を略同時に励起する。この偏光特性測定方法により、必然的に共焦点測定の利点が得られる。個々の画素に対する照射時間を非常に短くすることにより、レーザ光の悪い影響を受けることなく、試料をより長い時間、走査及び測定することができる。

【0018】

本発明に係る偏光特性測定方法は、レーザ走査顕微鏡の少なくとも1つの光ビームのストークスパラメータ（ I 、 Q 、 U 、 V ）を決定する簡単な方法を提供する。

【0019】

また、本発明は、ストークスパラメータ（ I 、 Q 、 U 、 V ）を決定する間に、照射レーザ光の偏光状態を、4つの状態（減偏光、0（又は90）度の直線偏光、+45（又は-45）度の直線偏光、円偏光）変化させることによって、レーザ走査顕微鏡の透過又は反射レーザビームのミューラー行列の要素を決定することができる方法を提供する。

【0020】

本発明の目的は、レーザ走査顕微鏡を用いて、物質によって放出、反射又は透過される光の偏光特性を測定する偏光特性測定装置によって達成され、この偏光特性測定装置は、レーザ光源と、レーザ光源と被試験物質間に配設された偏光状態発生器と、物質によって偏光状態が変えられた光の強度又は物質から放出される光の強度を検出するディテクタとを備える。また、本発明に係る偏光特性測定装置は、ディテクタの前位に設けられ、異なる偏光成分を空間的又は時間的に分離する偏光成分分離手段を備える。

【0021】

本発明に係る偏光特性測定装置は、物質からの光ビームが入射され、その偏光状態によって偏光成分を空間的に分離する光学素子を備え、あるいは、物質からの光ビームが入射

され、光ビームを所定の比率で分割する光学素子と、ディテクタの前位に配設され、所定の比率で分割された各光ビームの一方の偏光成分をディテクタにそれぞれ選択的に通過させる検光子とを備える。

【0022】

本発明の好ましい実施例においては、物質からの光ビームに対して光弾性変調器（PEM、カーセル等）を設けて、偏光成分を時間内に分離し、ディテクタの前位に受動的な偏光検光子を設けている。

【0023】

本発明に係る偏光特性測定装置は、偏光パラメータの波長依存性を測定するために、受動的な偏光検光子とディテクタ間に配設された少なくとも1つの波長選択ビームスプリッタと、波長選択ビームスプリッタによって分離された光ビームを検出するディテクタとを備える。

【0024】

本発明に係る偏光特性測定装置は、ストークスパラメータを決定するために、光弾性変調器と受動的な偏光検光子間に第2の光弾性変調器（PEM）を備える。そして、第2の光弾性変調器（PEM）の光軸は、第1の光弾性変調器（PEM）の光軸に対して45°回転されている。

【0025】

本発明に係る偏光特性測定装置は、ミュラー行列の要素を決定するために、減偏光子と、直線偏光子又は円偏光子と、光学的移相子とからなる、あるいはこれらの組合せからなる偏光状態発生器を備える。

【0026】

本発明に係る偏光特性測定装置は、蛍光検出直線偏光二色性（fluorescence detected linear dichroism：FDLD）の値及び蛍光検出円偏光二色性（fluorescence detected circular dichroism：FDCD）の値を測定するために、受動的な偏光光学素子と、光弾性変調器（photoelastic modulator：PEM）とからなる偏光状態発生器を備える。

【0027】

本発明に係る偏光特性測定装置は、信号対雑音比を改善するために、互いに平行又は垂直な偏光面を有する2つの受動的な直線偏光子間に配設された光弾性変調器（PEM）と、第2の直線偏光子の後位に配設された減偏光子とからなる偏光状態発生器を備える。そして、光弾性変調器（PEM）の光軸は、受動的な直線偏光子に対して45°に設定されている。

【0028】

本発明に係る偏光特性測定装置は、測定中に、測定された信号を変換して処理するとともに、誤差を補正するために、ディテクタの出力に接続された信号処理ユニットを備える。信号処理ユニットは、少なくとも1つのロックイン増幅器と、ローパスフィルタと、アナログ／デジタル変換器とを備える。アナログ入力も有するデジタル信号処理及び画像ユニットを用いる場合、信号処理ユニットに、デジタル／アナログ変換器が必要とされる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0029】

以下、図面を参照して本発明を詳細に説明する。

【0030】

図1は、2つのチャンネルを有する装置の構成を示すブロック図であり、レーザ光源1から偏光状態設定ユニット2を通ったレーザ光3は、オブジェクトテーブル6上の試料5に照射される。その反射光又は蛍光は、ビームスプリッタ（例えばハーフミラー）4によって向きが変えられる。そして、第2のビームスプリッタ8によって、2つの光ビームが生成される。両方の光ビームに対してそれぞれディテクタ16、17が設けられており、これらのディテクタ16、17は、光の強度に比例した出力信号を生成して、信号処理ユニット18に供給する。チャンネルcs1、cs2において、それぞれ1つの偏光成分の強度が測定される。第2のビームスプリッタ8としてハーフミラーを用いることができる。

。この場合、入射光ビームは、所定の比率の強度に分離される。分離された一方の光ビームは、後位に配設されたミラー 9 に入射され、選択された光ビームが向きを変えられる。分離された（方向が変えられた）光ビームの両方は、全ての偏光成分を含んでいるので、測定する偏光成分は、ディテクタ 16、17 の前位に受動的な偏光検光子 12、13 を設けて選択する必要がある。また、第 2 のビームスプリッタ 8 として、偏光ビームスプリッタ（例えば、ウォラストンプリズム等）も用いることができ、第 1 の分離ビームの第 1 の偏光成分だけを反射させ、第 2 の分離ビームの第 2 の偏光成分だけを透過させるようにしてもよい。偏光ビームスプリッタは、メレスグリオ社（Melles Griot）又はオリエル社（Oriol）から商業的に入手可能である。また、特別な偏光ビームスプリッタも、オズオブティクス社（OZ Optics Ltd.）から入手することができる。後位のミラー 9 は、方向を変える必要がある光ビームに対して設けられ、この場合、チャンネル c s 1 の光ビームをディテクタ 16 の方向に向ける。第 2 のビームスプリッタ 8 として偏光ビームスプリッタを用いる場合は、受動的な偏光検光子 12、13 は不要である。チャンネル c s 1、c s 2 の光ビームに対し、ディテクタ 16、17 の前位に、望ましくない光の強度を排除するためのカラーフィルタ 14、15 を設けるようにしてもよい。チャンネル c s 1、c s 2 の光ビームの光路に配設された絞り 10、11 は、共焦点撮像に必要とされものである。共焦点モードにおける測定には、試料上のレーザ光の合焦点位置から受光される光成分を選択し、合焦点以外の点から受光される光成分を排除する処理が含まれる。これにより、試料を光学的にスライスすることができる。直線偏光ビームスプリッタ又は検光子だけを用いる場合、試料 5 からの光ビームに対して、好ましくは光ビームを分離する前に、移相子（phase retarder、1/4 波長板）7 を設け、円偏光成分を選択できるようにしてもよい。図 1 の装置は、レーザ走査顕微鏡によって 1 画素毎に照射された試料から、同時に 2 つの異なる偏光成分の強度を測定する一実施例である。強度の値に比例したアナログ信号は、信号処理ユニット 18 に入力され、そこで必要な変換、計算及び補正が行われる。実質的に互いに直交する 2 つの偏光成分 I_1 、 I_2 に基づいて、出力信号は、以下の式うちの 1 つ又はミューラー行列の要素を決定するのに用いられる式の 1 つにより、算出される。

$$(1) \quad I_{out} = I_1 - I_2$$

$$(2) \quad I_{out} = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$$

$$(3) \quad I_{out} = (I_1 - I_2) / (I_1 + 2I_2)$$

円筒対称位置にある発光双極子の異方性を測定する場合には、式（3）が用いられる。本発明に係る偏光特性測定方法によって測定される偏光成分は、互いに直交している。信号処理ユニット 18 は、上述の式に基づいた結果を算出する。上述の計算のうちの 1 つは、各画素（試料の照射された点）毎に実行され、その結果は記憶装置に記憶される。記憶された画像情報は、ビデオ信号処理装置及びソフトウェアによって、表示装置（画面、モニタ等）に表示される。

【0031】

一実施例において、信号処理ユニット 18 の出力信号は、単に LSM の画像出力信号とされる。他の実施例においては、図 7 に示すように、LSM のレーザ光を走査／ラスタリングする同期信号と信号処理ユニット 18 の出力信号とを、電子制御装置、例えばコンピュータ COMP によって処理し、画像信号及び画像をモニタ MON 上に表示する。

【0032】

図 2 に示す実施例は、レーザ光 3 が試料 5 を透過し、透過光を測定する点でのみ、図 1 に示す実施例と異なる。測定には、図 1 に示す実施例と同じ構成要素が用いられる。図 1 の実施例と同じ図 2 の実施例の構成要素には、同じ指示符号を付している。この実施例における反射ミラー 4' は、当然ハーフミラーではなく、如何なる光学ミラーでも使うことができる。

【0033】

図 3 は、本発明に基づく他の実施例を示すブロック図であり、この実施例では、試料 5 から受光される光ビームを分離することなく、すなわち 1 つの光ビームを用いて、異なる偏光成分を測定するようにしている。これを実現するために、偏光成分を時間的に分離す

る構成としている。このために、試料 5 からの光ビームの偏光成分間の位相を、2 点間 (between two end positions) で所定の周波数及び形状を有する関数に基づいて (好ましくは正弦波関数に基づいて) 周期的に変えて、2 つの偏光成分を、同じ検光子 25 を介して同じディテクタ 27 で測定する。偏光成分間の位相を周期的に変えるために偏光変調器 (polarization modulator)、例えば光弾性変調器 (photoelastic modulator: PEM)、電気光学変調器 (electrooptical modulator: EOM)、光音響変調器 (optoacoustic modulator)、カーセル (Kerr cell)、ポッケルセル (Pockels cell) 等を用いる。図 3 に示す好ましい実施例においては、ディテクタ 27 の前位に光弾性変調器 23 を設けており、ディテクタ 27 は、光の強度を検出して、それに比例した信号を出力する。1 つの偏光成分だけを選択するために、光弾性変調器 23 とディテクタ 27 間に受動的な偏光検光子 25 を設けている。適切な光弾性変調器 23 としては、ハインズインスツルメント社から商品名 I / F S 50 が入手可能である。なお、同じ効果のある他の種類の素子又は手段を用いてもよい。ディテクタ 27 の出力は、上述した図 1、図 2 と同様に、信号処理ユニット 28 に供給される。

【0034】

また、ディテクタ 27 の前位にカラーフィルタ 26 を設け、望ましくないバックグラウンド光の強度を排除するようにしてもよい。光ビームの光路に配設された絞り 21 は、共焦点撮像に必要なものである。また、直線偏光検光子だけを用いる場合、試料 5 からの光ビームに対して、好ましくは光弾性変調器 23 よりも前位に、移相子 (1 / 4 波長板) 22 を設け、円偏光成分を選択できるようにしてもよい。

【0035】

上述のように 1 チャンネル構成とすることにより、測定に使用する構成要素の数を半分に減らすことができ、その結果、コストも大幅に削減することができる。経済的な利点に加え、同じ光学素子及び電気光学素子を用いて、同じ光ビームを測定することができ、素子の公差に起因した誤差を削減することができるという技術的な効果がある。光弾性変調器 23 は、所定の周波数及び形状を有する電気信号、例えば正弦波交流電圧によって制御され、その制御の結果、光弾性変調器 23 の正弦波交流厚さ (sinusoidal alternating width) d は、 $d = d_0 + A \cdot \sin(2\pi f t)$ となる。 d_0 は、制御電圧が印加されていないときの光弾性変調器 23 の初期の厚さである。最大の厚さは $d_0 + A$ であり、最小の厚さは $d_0 - A$ である。光弾性変調器 23 は、制御電圧が印加されていない状態 (ground state) では、透過光の偏光特性を変えない。光弾性変調器 23 の厚さの変化の最大値を $\lambda / 4$ (λ は、使用する光の波長である。) とすると、直線偏光入射光は、光弾性変調器 23 によって、光弾性変調器 23 の厚さが $d_0 + A$ の状態では、左円偏光光又は右円偏光光に変換され、光弾性変調器 23 の厚さが $d_0 - A$ の状態においては、右円偏光光又は左円偏光光に変換される。光弾性変調器 23 の厚さの変化の最大値を $\lambda / 2$ (λ は、使用する光の波長である。) とすると、直線偏光入射光は、光弾性変調器 23 により、光弾性変調器 23 の厚さが $d_0 + A$ 状態と $d_0 - A$ の状態においては、偏光面が入射光の偏光面に対して 90 度回転された直線偏光光に変換される。この場合、光弾性変調器 23 の厚さが $\lambda / 4$ に至るとき、変化の方向に従い、右円偏光光又は左円偏光光が生じる。

【0036】

したがって、厚さ $A = \lambda / 2$ において制御された光弾性変調器 23 の出力の変化が最大となる制御を用いると、同じ方向を有する直線偏光光が、制御電圧の周波数 f に対して 2 倍の周波数 $2f$ で繰り返し現れ、また、厚さ $A = \lambda / 4$ において変化が最大となる制御を用いると、同じ方向を有する円偏光光が、制御電圧の周波数 f で繰り返し現れるとすることができる。

【0037】

ディテクタ 27 の前位の直線偏光検光子 25 は、この検光子 25 の偏光軸と平行な偏光面を有する実質上 1 つの選択された直線偏光光だけを透過し、その直線偏光光の検出信号は最大になるとともに、他の全ての偏光成分の検出信号はより小さな値となる。検光子 25 の偏光軸と直交する偏光方向を有する直線偏光の検出信号は、最小となる。検光子 25

の前位に光弾性変調器 23 を配設すると、最終的には、受動的な偏光検光子 25 の偏光軸に対して偏光角が 0 度と 90 度の直線偏光光が得られ、図 10D に示すように、強度の出力信号は、制御電圧の周波数 f に比例した周波数 $2f$ で周期的に変化する。

【0038】

この信号処理は、図 1 に関連して説明した信号処理とは異なる。図 1 の装置が後続の信号処理のために静的信号を提供するのに対して、図 3 の装置構成は、偏光成分を提供し、その強度の測定値は、少なくとも 10 kHz、好ましくは少なくとも 100 kHz の比較的高い周波数で、時間的に周期的に変化する。そのような状況においては、測定は、正確に所定の位相位置において、PEM の正弦波制御電圧に同期して実行されなければならない。所定の位相位置における所定の周波数での反復測定は、位相 (phase sensitive)、すなわち「ロックイン (lock-in)」増幅器を用いて実施することができ、ロックイン増幅器は、所定の周波数 f で、あるいは所定の周波数 f と $2f$ のデュアルモードで測定を実行することができる。位相 (ロックイン) 増幅器は、通常の差動モードでは、強度差分値 $\Delta I = I_2 - I_1$ を出力する。少なくとも 10 kHz、好ましくは少なくとも 100 kHz の比較的高い周波数で動作する位相 (ロックイン) 増幅器は、例えば EG & G 社、ジュピタ (Jupiter) 社等の複数の製造会社から入手することができる。

【0039】

図 3 の構成において使用される信号処理ユニット 28 は、図 8A に示すように、ディテクタ 28 の出力に接続されたローパスフィルタ LP 及び位相増幅器 FE と、ローパスフィルタ LP の出力に接続されたアナログ/デジタル変換器 AD とを備える。アナログ入力も有するデジタル信号処理及び画像ユニットを用いる場合、デジタル/アナログ変換器 DA も必要とされる。ツァイス社によって現在製造されている LSM は、アナログ入力を有する画像ユニットを備えている。したがって、デジタル/アナログ変換器 DA は、互換性を維持するためのものである。

【0040】

LSM 装置の殆ど (ツァイス社のタイプ 410 LSM も) は、各発光波長を分離して、特別なディテクタ (通常は光電子増倍管) で測定される様々な波長成分を有する試料から放出される蛍光の強度を測定するのに適している。励起は、1 つの周波数又は複数の周波数で行ってもよい。波長分離のためには、ダイクロイックミラーを用いることができる。図 4 に示す異なる波長での測定を行う構成において、試料 5 への照射は、図 1 及び図 1 に関連して説明したものと同一である。試料 5 からハーフミラー 4 によって方向が変えられた光ビームに対して、光弾性変調器 (例えばハインズインスツルメント社から入手可能な FS50) 31 と、受動的な偏光検光子 32 とが設けられている。検光子 32 の後位には、試料からの光を異なる波長に基づいて分離するダイクロイックミラー又はダイクロイックビームスプリッタ 33 と、必要に応じて分離された光ビームの方向を変える光学ミラー 34 とが設けられている。ダイクロイックミラー又はダイクロイックビームスプリッタ 33 の前位に位置する光弾性変調器 31 (例えばハインズインスツルメント社のタイプ FS50) によって、蛍光の全ての波長成分は同時に変調される。偏光状態の変調は波長によって異なるが、変調は、算出、及び補正係数によって補正することができる。このように、図 3 に関連して説明した方法は、より長い波長まで拡張することができる。殆どのダイクロイックビームスプリッタが偏光状態に対して選択性があるという事実により、受動的な偏光検光子 32 は、場合によっては省略、あるいはダイクロイックミラーによって置き換えることができる。また、光の偏光状態に対してより長い波長範囲において感度が変化しないダイクロイックビームスプリッタも市販されている。各ディテクタ 37 は、それぞれの波長選択チャンネルの強度を同時に検出して、検出信号を共通の信号処理ユニット 38 に供給し、信号処理ユニット 38 は、上述の詳細に説明した信号処理を行う。この構成において測定を行うためには、多重化手段 (multiple means) 又は多重チャンネル手段 (multichannel means) を適用する必要がある。この構成において、変調周波数を全てのチャンネルに対して同じとすることにより、信号処理を単純化することができる。

【0041】

光ビームの光路に設けた絞り 35 は、共焦点撮像のために必要とされ、カラーフィルタ 36 は、不要なバックグランド光の強度を排除するために用いることができる。

【0042】

図4の構成で用いる信号処理ユニット38としては、図3に関連して詳細に説明した図8Aに示す信号処理ユニットと同じものを用いることができる。3チャンネルからなる3倍のデータ量进行处理するために、図8Aに示す信号処理ユニットを3個設け、あるいは、演算速度が十分に速い場合には、3つのチャンネルのディテクタ37の出力を信号処理ユニット38の入力に交互に（多重化して）供給することもできる。

【0043】

また、図4に示す構成は、発光帯域が単一の場合には、光ビームの異なる偏光成分を分離するためにも用いることができる。このためには、方向を変える前の1つの変調器及び1つの検光子の代わりに、各チャンネルに個々の変調器及び検光子を設ける必要がある。図3は、1チャンネルの構成を示す図である。この構成によって、2つのチャンネルにおいて、直線偏光発光の強度 $I(90^\circ) - I(0^\circ)$ と強度 $I(+45^\circ) - I(-45^\circ)$ との2チャンネルの差分及び円偏光成分を測定することができる。強度 $I(+45^\circ) - I(-45^\circ)$ の測定は、強度 $I(90^\circ) - I(0^\circ)$ の測定と同様に行うことができるが、変調器は 0° に設定され、検光子は 45° に設定される。このことは、特に異方性の測定において重要である。また、これらの測定において、蛍光の全強度に比例する値も測定することができ、したがって、感度の差を補正することができる。このことについては、図10を用いて、更に詳細に説明する。3つのチャンネルを用いることによって、全ての特性パラメータ、例えば放出される蛍光の偏光状態のストークスベクトル (Stokes vector) の全ての成分 (I、Q、U、V)、又は反射率を測定することができ、上述したように画像として表示することができる。

【0044】

1チャンネル法を用いてストークスベクトルの値又は偏光の状態を測定することは、知られている。レーザ走査顕微鏡 (LSM) においてこの方法を実行することにより、ストークスベクトルの全ての値 (I、Q、U、V) を測定し、画像として表示することができる (図5)。このために、2つの光弾性変調器43、44を、試料からの光ビームに対して直列に配設する。第1の光弾性変調器43の光軸は、基準面に対して 45° の角度を有し、第2の光弾性変調器44の光軸は、基準面に対して 0° の角度を有する。第2の光弾性変調器44とディテクタ47間に、光軸が同じ基準面に対して 22.5° の角度を有する受動的な偏光検光子45 (例えば、グラントンプソンプリズム (Glann-Thompson prism)) を配設する。ディテクタ47の出力は、上述した実施例と同様に、信号処理ユニット48に供給される。この場合、信号処理ユニット48は、図8Bに示すように、3個の位相 (ロックイン) 増幅器 FE1、FE2、FE3 と、ローパスフィルタ LP とを備える。誤差補正を行うことなく強度 I_m を測定する場合には、デジタルローパスフィルタを用いる。強度測定中に誤差を補正する場合には、第4の位相 (ロックイン) 増幅器 FE4 が必要とされる。信号をデジタル的に処理する場合には、ローパスフィルタ LP のアナログ出力にアナログ/デジタル変換器 AD を接続する。アナログ入力も有する LSM の画像ユニットとの互換性を維持するためには、デジタル/アナログ変換器 DA も必要とされる。位相 (ロックイン) 増幅器として、KFKI社 (ブダペスト) によって製造されているデジタル位相検出器 (digital phase sensitive detector: DPSD) を用いることができ、これは、デュアル構成の2個の位相増幅器を含んでいる。

【0045】

信号処理ユニット (signal processing unit: SPU) 48 の様々な機能 (位相増幅、周波数選択、信号処理) が制御可能の場合、上述した撮像方法を十分に実施することができる。この撮像方法は、以下の機能を有する低レベルのプログラマブル装置である1枚の DPSD 基板 (KFKI (ブダペスト)) 上で実行される。入力信号は、平均値を算出する前に、あらゆる周期的なスカラー信号を乗算することができ、これは、選択された周波数の信号の振幅は、従来の位相 (ロックイン) 増幅器と同様の差モード (difference mod

e) で測定することができるだけでなく、和モード (addition mode) でも測定することができることを意味している。差モードにおける出力信号は、位相 ϕ における入力信号の大きさから位相 $\phi + \pi$ における入力信号の大きさを減算することにより得られる。和モードにおける出力信号は、位相 ϕ における入力信号の大きさに位相 $\phi + \pi$ における入力信号の大きさを加算することにより得られる。2つの関数のスカラー積は、一般に、 $P = \int f_1(t) * f_2(t)$ で表される。和モードの乗数関数を図10Bに示し、差モードの乗数関数を図10Cに示す。

【0046】

ストークスベクトルの値は、以下のように表される。

【0047】

I、強度：PEM43又はPEM44の和モードで動作している位相 (ロックイン) 増幅器FE4の周波数 $2f$ における信号 ($I_1 + I_2 - 2I_m$) によって補正されたローパスフィルタLPの信号 I_m

Q、 $0^\circ \sim 90^\circ$ の直線偏光成分：PEM44の差モードで動作している位相 (ロックイン) 増幅器FE1の周波数 $2f$ における信号

U、 $\pm 45^\circ$ の直線偏光成分：PEM43の差モードで動作している位相 (ロックイン) 増幅器FE2の周波数 $2f$ における信号

V、円偏光成分：PEM43又はPEM44の差モードで動作している位相 (ロックイン) 増幅器FE3の周波数 f における信号

測定値は、適切に前処理された後、LSMの適切な画像ユニット (ビデオ信号処理基板) に入力され、ここで、微分偏光 (differential polarization: DP) 値を「従来の」モードにおける強度画像に類似した画像として表示する。

【0048】

本発明の他の側面として、画素を x 及び y 方向に走査するための同期信号も、適切な画像処理回路 (図7) によって、直接用いられる。その結果、LSMの画像処理による画像の記憶及び表示に対して互換性を維持し、LSMの画像処理から独立して画像処理を実行することができる。この方法の利点は、図4に基づく測定と比較して、測定に必要とされる検出チャンネルはただ1つであり、ディテクタを再配置した後に、それを外部ユニットとして使うことができるという点である。偏光画像は、LSMを更に使用することなく、得ることができ、また、偏光画像は、ハードウェア及びソフトウェアの特性から独立している。

【0049】

図6は、様々な種類の偏光状態設定ユニットの構成を示す図であり、これらの偏光状態設定ユニットは、図5の構成と組み合わせられ、照射光の既知の異なる偏光状態を用いることにより、透過モードにおける全てのミューラー行列の要素を決定することを可能にする。このために、図5の構成は、試料の後位 (図2のミラー4の後位) に配設される。ミューラー行列の要素は、本発明に係る偏光特性測定方法、すなわち、照射レーザ光の偏光状態を4つの状態 (減偏光 (depolarized)、 0° (又は 90°) の直線偏光、 $+45^\circ$ (又は -45°) の直線偏光、円偏光) に変化させ、4つの各状態においてストークスパラメータ (I, Q, U, V) を測定する方法によって、決定される。このために、偏光状態設定ユニット2a~2dは、減偏光子 (depolarizer) 51と、直線偏光子又は円偏光子52、53と、光学的な移相子54とを備え、あるいはこれらの組合せが用いられる。図6A~図6Dは、時間的には一定であるが、異なる偏光状態のレーザ光を生成する偏光状態設定ユニット2a~2dを示す図である。偏光状態設定ユニット2aは、偏光レーザ光の偏光を消す減偏光子51を備え、偏光が消されたレーザ光を試料に照射する。偏光状態設定ユニット2bは、必要に応じて直線偏光子又は円偏光子である偏光子52を備える。偏光状態設定ユニット2bは、直線偏光又は円偏光レーザ光を試料を照射し、レーザ光が元々減偏光されている場合に用いられる。偏光状態設定ユニット2cは、直線偏光子53と、この直線偏光子53の後位に配設された移相子54とを備え、円偏光レーザ光を試料に照射し、レーザ光が元々減偏光されている場合に用いられる。偏光状態設定ユニット2dは

、減偏光子 5 1 と、この減偏光子 5 1 の後位に配設された偏光子 5 2 とを備える。偏光子 5 2 は、必要に応じて直線偏光子又は円偏光子である。偏光状態設定ユニット 2 d は、直線偏光又は円偏光レーザ光を試料に照射し、レーザ光が元々偏光されている場合に用いられる。

【0050】

図 9 は、蛍光検出直線偏光二色性 (fluorescence detected linear dichroism: FDL D) 及び蛍光検出円偏光二色性 (luorescence detected circular dichroism: FDC D) を測定する本発明を適用した構成を示す図である。このために、偏光状態設定ユニット 2 は、直線偏光子 8 1 と、その後位の光弾性変調器 8 2 とを備える。レーザ光源 1 が直線偏光レーザ光を出射するときには、直線偏光子 8 1 は省略することができる。この構成により、励起レーザ光は変調され、異なった偏光状態が得られる。発光光の光路は、LSM に対して変更する必要はない。これにより、構成を図 1 の構成よりも簡単にすることができる。図 1 に用いられている構成要素と同じ機能を有する同じ構成要素には、同じ指示符号を付している。信号処理は、上述した方法に類似した復調法を用いて実行される。FDL D の値は、周波数 $2f$ で測定され、FDC D の値は、周波数 f で測定され、また、画像処理も上述の詳細に説明した方法と同じである。

【0051】

本発明に基づいて大出力レーザ光を用いることにより、空間的及び / 又は時間的に強度を集中させて試料を照射し、試料の分子中に多光子を略同時に励起することができる。二光子励起は焦点からの距離の自乗に比例して減少するので、バックグラウンド蛍光が大幅に減少するという周知の事実を用いることにより、空間的な分解能を向上させることができる。とともに、レーザ光の悪い影響を最小化することができる。

【0052】

強度 $I = I_1 + I_2$ の正確な値は、ローパスフィルタを用いた従来の方法では、測定することができない。誤差の原因及び本発明に係る偏光特性測定方法を、図 10 を参照して更に詳細に説明する。図 10 A は、正弦波交流制御電圧 (sinusoidal alternating control voltage) による光弾性変調器 (以下、PEM という。) 8 2 の厚さ d の変化を、時間の関数 (function of time) として示している。図 10 A から明らかなように、正弦波交流電圧によって制御される PEM 8 2 の厚さも、 $d = d_0 + A \sin(2\pi f t)$ に基づいて正弦波的に変化する。

【0053】

PEM 8 2 に制御電圧が印加されていない状態 (ground state) では、PEM 8 2 を通過する光の偏光状態は、変化しない。 $A = \lambda / 2$ の場合、PEM 8 2 は、厚さが最大値 $d_0 + A$ 又は最小値 $d_0 - A$ の状態において入射光の偏光面を 90 度回転させる。図 10 D は、直線偏光検光子 1 5 の後位に位置するディテクタ 1 7 によって検出される強度の値を時間の関数として示しており、PEM 8 2 の制御は、図 10 A に示す制御と同一である。検光子 1 5 は、その光軸が、駆動されていない PEM 8 2 を通過する直線偏光光の偏光面に平行になるように配設されている。この構成では、最大強度 I_2 が厚さ d_0 の各位置において得られる。 $d_0 + A$ 及び $d_0 - A$ の位置では、直線偏光光の偏光面が、検光子 1 5 の光軸に対して直交しているため、ディテクタ 1 7 によって検出される強度は、最小の強度 I_1 である。強度関数が正弦波関数でない場合、デジタルローパスフィルタによって分離される DC 成分 (DC component) は、強度 $I_v = (I_1 + I_2) / 2$ ではなく、 I_m である。第 4 の位相増幅器 FE 4 を用いることによって、和モード (addition mode) における $S_+ = I_1 + I_2 - 2I_m$ を得ることができる。 I_m は既に測定されているので、強度の補正值 (compensate value) は、以下の式に基づいて算出することができる。

$$I = I_1 + I_2 = S_+ + 2I_m$$

【0054】

測定強度の誤差を補正する方法は、周知の技術と比較したとき、巨視的な二色性測定に対して、変調度に制限がなく、したがって、より正確な補正值が得られる。

【0055】

様々な光学素子が偏光状態に影響を及ぼすことに起因したDP測定の実験誤差は、補正法 (correction method) によって補正することができ、その補正は、デジタル信号処理中に行うこともできる。

【0056】

励起 (照射) 光の強度を変調することによって、光選択性 (photoselection) を無くすることができる、信号対雑音比を改善することができる。

【0057】

LSMに用いられているレーザ光は、通常は偏光されている。吸収及び発光は、照射光の偏光状態に依存するので、試料から得られる画像は、用いられた光の偏光状態によって変わる。LSM画像においては、偏光状態によっては、好ましくない露光過多、露光不足、更には細部の潰れが生じる。このことは、特に異方性の試料においては極めて重要である。このような影響は、図6Aを用いて提案したように、偏光状態設定ユニット内に減偏光子 (depolarizer) を用いることによって、取り除くことができる。減偏光子は、蛍光発光又は反射と同様に、透過の場合にも用いることができる。しかしながら、励起/照射光ビームに対して設けられた受動的な減偏光子は、微視的レベルで不均質性を生じ、多くの場合、満足できる結果が得られない。

【0058】

FDD/FDCD測定において用いられている方法と同様に、照射光の偏光状態を時間的に変化させるのに、減偏光子の代わりに、PEMを用いることもできる。ディテクト信号を適切に選択又は平均化した後、レーザ光を合焦点させ及び平均化を行っている時間内に、励起/照射光の偏光面が全ての方向となうようにすることにより、妨害の悪影響がなく、光選択性を取り除くことができる。

【0059】

偏光測定を行わない場合、信号対雑音比を改善するために、変調及び復調方法を用いることもできる。このために、偏光状態発生器は、互いに偏光面が平行又は垂直な2つの受動的な直線偏光子間に配設された光弾性変調器 (PEM) を備え、この光弾性変調器の光軸は、受動的な直線偏光子に対して45度に設定されている。なお、必要に応じて、第2の直線偏光子の後位に減偏光子を設けてもよい。この構成によって、PEMの周波数 f に対して2倍の周波数 $2f$ の正弦波交流強度が得られる。復調は、単一の位相 (ロックイン) 増幅器によって、周波数 $2f$ で行うことができる。レーザ光源から歪みがない直線偏光レーザ光が得られるときには、レーザ光源側の直線偏光子は省略することができる。また、上述のように、光選択性が測定に影響せず、又は補正を動的なモード (dynamic mode) で行う場合には、減偏光子も省略することができる。信号対雑音比を改善するこの方法は、高い強度変調を用いる他の方法に比して、FDD及びFDCDの測定と、光選択性の補正とを同じ構成要素を用いて行うことができるという利点を有する。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明を適用した、放出モード又は反射モードで動作し、2つのチャンネルを有する偏光特性測定装置の構成を示すブロック図である。

【図2】

本発明を適用した、透過モードで動作し、2つのチャンネルを有する偏光特性測定装置の構成を示すブロック図である。

【図3】

本発明を適用した、変調原理に基づいて動作し、1つのチャンネルを有する偏光特性測定装置の構成を示すブロック図である。

【図4】

本発明を適用した、異なる波長を測定する変調原理に基づいて動作する偏光特性測定装置の構成を示すブロック図である。

【図5】

本発明を適用した、ストークスパラメータを測定する偏光特性測定装置の構成を示すブ

ブロック図である。

【図 6】

本発明を適用した、ミューラー行列の要素を決定する偏光特性測定装置の構成を示すブロック図である。

【図 7】

測定値を表示するための信号処理及び画像ユニットの構成を示すブロック図である。

【図 8】

本発明を適用した装置に用いられる信号処理ユニットの構成を示すブロック図である。

【図 9】

本発明を適用した、FDLD 値及び FDCD 値を決定するための装置の構成を示すブロック図である。

【図 10】

光弾性変調器の正弦波誤差を補正する方法を説明するためのブロック図である。