

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5648961号
(P5648961)

(45) 発行日 平成27年1月7日(2015.1.7)

(24) 登録日 平成26年11月21日(2014.11.21)

(51) Int.Cl. F I
G O 1 J 3/45 (2006.01) G O 1 J 3/45

請求項の数 9 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2011-43171 (P2011-43171)	(73) 特許権者	304028346 国立大学法人 香川大学 香川県高松市幸町1番1号
(22) 出願日	平成23年2月28日(2011.2.28)	(74) 代理人	110001069 特許業務法人京都国際特許事務所
(65) 公開番号	特開2012-181060 (P2012-181060A)	(72) 発明者	石丸 伊知郎 香川県高松市林町2217-20 国立大 学法人香川大学工学部内
(43) 公開日	平成24年9月20日(2012.9.20)	審査官	横尾 雅一
審査請求日	平成26年1月23日(2014.1.23)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 分光特性測定装置及びその校正方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

- a) 被測定物の測定点から出射された光を第1反射部と第2反射部に導く分割光学系と、
b) 前記第1及び第2反射部によって反射された光を同一点に導き干渉像を形成する結像光学系と、
c) 前記第1反射部を移動させることにより前記分割光学系から前記第1反射部を経て前記結像光学系に向かう第1反射光と前記分割光学系から前記第2反射部を経て前記結像光学系に向かう第2反射光の間の光路長差を伸縮する光路長差伸縮手段と、
d) 前記第1反射部の移動量を検出する移動量検出部と、
e) 前記干渉像の光強度を検出する、複数の検出素子が2次元配列された光検出部と、
f) 前記光路長差伸縮手段によって前記光路長差を伸縮させることにより前記光検出部で検出される光強度変化に基づき、前記被測定物の測定点のインターフェログラムを求め、このインターフェログラムをフーリエ変換することによりスペクトルを取得する処理部とを備える分光特性測定装置において、
さらに、輝点から波長が既知の校正光を出射させる校正光出射手段と、
前記光路長差伸縮手段によって前記光路長差を伸縮させることにより前記光検出部で検出される前記輝点の干渉像の光強度変化の1周期に相当する前記第1反射部の移動量と、前記輝点の干渉像の画角と、前記校正光の波長とに基づき、前記第1反射部の設置角を求める設置角算出部と、
前記被測定物の測定点の画角を求める画角検出部とを備え、

10

20

前記処理部は、前記第 1 反射部の設置角と前記測定点の画角とから、前記第 1 反射部の移動量に対応する前記光路長差を求め、該光路長差に基づきスペクトルを校正することを特徴とする分光特性測定装置。

【請求項 2】

前記設置角算出部が、前記校正光の前記第 1 反射部への入射点を原点とする $x y z$ 座標系であって、前記第 1 反射部の反射面の法線を含む面を $x z$ 平面、該 $x z$ 平面に垂直な軸を y 軸とする校正光学座標系を定義し、当該校正光学座標系における前記設置角 γ (ただし、設置角 γ は前記第 1 反射部の反射面の法線の前記 y 軸回りの回転角を示す。) を以下の式

$$\gamma = (90^\circ + \gamma) + \cos^{-1} \{ (\lambda / 2M) \times \alpha \}$$

10

(上記式において、 α 及び γ は、前記輝点の干渉像の画角であって当該干渉像と前記校正光学座標系の原点とを結ぶ線と x 軸及び y 軸との角度、 λ は前記校正光の波長、 M は前記輝点の干渉像の光強度変化の 1 周期に相当する前記第 1 反射部の移動量を示す。)

から算出することを特徴とする請求項 1 に記載の分光特性測定装置。

【請求項 3】

前記設置角算出部は、 z 軸が前記輝点の干渉像と原点とを結ぶ線となる前記校正光学座標系における前記設置角 γ を算出することを特徴とする請求項 2 に記載の分光特性測定装置。

【請求項 4】

前記処理部は、前記光路長差 L を、以下の式

20

$$L = \{ 2M \cos(\gamma - \alpha) \} / \cos(\alpha) \quad (\text{ただし、} \alpha = \gamma + 90^\circ)$$

(上記式において、 α 及び γ は前記測定点の画角、 M は前記第 1 反射部の移動量を示す。)

から算出することを特徴とする請求項 2 又は 3 に記載の分光特性測定装置。

【請求項 5】

校正光出射手段が、波長が既知の単色光源から発せられた光が入射するように配置された、複数の離散輝点を形成するフライアイレンズから構成されることを特徴とする請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の分光特性測定装置。

【請求項 6】

- 被測定物の測定点から出射された光を第 1 反射部と第 2 反射部に導く分割光学系と、
- 前記第 1 及び第 2 反射部によって反射された光を同一点に導き干渉像を形成する結像光学系と、
- 前記第 1 反射部を移動させることにより前記分割光学系から前記第 1 反射部を経て前記結像光学系に向かう第 1 反射光と前記分割光学系から前記第 2 反射部を経て前記結像光学系に向かう第 2 反射光の間の光路長差を伸縮する光路長差伸縮手段と、
- 前記第 1 反射部の移動量を検出する移動量検出部と、
- 前記干渉像の光強度を検出する、複数の検出素子が 2 次元配列された光検出部と、
- 前記光路長差伸縮手段によって前記光路長差を伸縮させることにより前記光検出部で検出される光強度変化に基づき、前記被測定物の測定点のインターフェログラムを求め、このインターフェログラムをフーリエ変換することによりスペクトルを取得する処理部と

30

40

前記被測定物の測定点の画角を求める画角検出部と

を備える分光特性測定装置において、

輝点から出射された波長が既知の校正光を前記分割光学系に入射させ、そのとき前記結像光学系によって形成される干渉像の光強度変化 1 周期に相当する前記第 1 反射部の移動量を前記移動量検出部から取得し、

当該第 1 反射部の移動量と、前記輝点の干渉像の画角と、前記校正光の波長とに基づき、前記第 1 反射部の設置角を求め、

前記第 1 反射部の設置角と前記測定点の画角とから、前記第 1 反射部の移動量に対応する前記光路長差を求め、該光路長差に基づきスペクトルを校正することを特徴とする分光

50

特性測定装置の校正方法。

【請求項 7】

前記第 1 反射部の設置角が、前記校正光の前記第 1 反射部への入射点を原点とする x y z 座標系であって、前記第 1 反射部の反射面の法線を含む面を x z 平面、該 x z 平面に垂直な軸を y 軸とする校正光学座標系における前記設置角 θ (ただし、設置角 θ は前記第 1 反射部の反射面の法線の前記 y 軸回りの回転角を示す。) であり、当該設置角 θ を以下の式

$$\theta = (90^\circ + \alpha) + \cos^{-1} \left\{ \left(\frac{\lambda}{2M} \right) \times \frac{\Delta I}{I} \right\}$$

(上記式において、 α 及び λ は、前記輝点の干渉像の画角であって当該干渉像と前記校正光学座標系の原点とを結ぶ線と x 軸及び y 軸との角度、 λ は前記校正光の波長、 M は前記輝点の干渉像の光強度変化の 1 周期に相当する前記第 1 反射部の移動量を示す。)

10

から算出することを特徴とする請求項 6 に記載の分光特性測定装置の校正方法。

【請求項 8】

前記校正光学座標系は、その z 軸が前記輝点の干渉像と原点とを結ぶ線であることを特徴とする請求項 7 に記載の分光特性測定装置の校正方法。

【請求項 9】

前記光路長差 L は、以下の式

$$L = \left\{ 2M \cos(\alpha - \beta) \right\} / \cos(\beta) \quad (\text{ただし、} \beta = \alpha + 90^\circ)$$

(上記式において、 α 及び β は前記測定点の画角、 M は前記第 1 反射部の移動量を示す。)

20

から算出することを特徴とする請求項 7 又は 8 に記載の分光特性測定装置の校正方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、広視野イメージングに有用な分光特性測定装置及びその校正方法に関する。

【背景技術】

【0002】

分光特性の測定技術として、波長分散型分光法或いはフーリエ分光法と呼ばれる分光技術を用いた手法が提案されている(非特許文献 1 参照)。

波長分散型分光法は、測定試料を透過した光、或いは測定試料面で反射した光(以下、物体光という)を回折格子や音響光学可変波長フィルタ(AOTF; Acousto-Optic Tunable Filter)に照射したときに得られる回折光の回折角が、当該物体光の波長に応じて異なる原理を利用した分光法である。

30

【0003】

一方、フーリエ分光法(FTIR(フーリエ変換赤外分光光度計: Fourier Transform Infrared Spectroscopy))は、マイケルソン型の 2 光束干渉光学系を用いた位相シフト干渉による分光計測技術である。物体光をハーフミラーなどのビームスプリッタにより 2 分岐し、それぞれの光束をミラーにより反射させて再度ハーフミラーに到達させ、2 光束を合流させて干渉現象を観察する。2 分岐した光束のうち一方(参照光)を反射するミラーは参照ミラーと呼ばれる。フーリエ分光法では、参照ミラーを光の波長よりも短い分解能で高精度に移動させて干渉光強度を変化させ、いわゆるインターフェログラムを検出し、このインターフェログラムを数学的にフーリエ変換することにより分光特性を取得する。

40

【0004】

測定試料面から射出される物体光の光線方向は、散乱、屈折、反射等により様々な方向となる。このように多様な方向の光線成分が回折格子や参照ミラーに照射されると、分光精度が低下する。

そのため、いずれの分光法においても物体光の空間的コヒーレンシー(可干渉性)を高めるために、微小開口を有するピンホールやスリットを用いて物体光のうち特定方向の光線成分のみを回折格子や参照ミラーに照射させている。求められる分光性能にもよるが、分散型分光法では穴径が数十ミクロン程度のピンホールが用いられ、フーリエ分光法では

50

数ミリ程度の開口幅を有するスリットが用いられる。

【0005】

このようにピンホールやスリットを用いると、大半の物体光はピンホールやスリットを通過せず測定に供しないことから、光の利用効率が低い。一方、生体膜の内部を透過あるいは反射した散乱光は極微弱光であり、従来の分光技術ではこのような生体膜内部から生じる散乱光等の分光特性を評価することが困難であった。

【0006】

そこで、本発明者は、被測定物を光学的に構成する各輝点から生じる物体光束の干渉現象を利用することにより被測定物のインターフェログラムを求める手法を提案した（特許文献1参照）。

特許文献1に記載の手法では、各輝点から生じる透過光や拡散・散乱光等の物体光は対物レンズを介して位相シフターの固定ミラー部と可動ミラー部に導かれ、これら2つのミラー部から反射される物体光束が結像面において干渉像を形成する。可動ミラー部はピエゾ素子などにより移動されるようになっており、該可動ミラー部の移動に伴い干渉像強度が変化して、いわゆるインターフェログラムを形成する。従って、このインターフェログラムをフーリエ変換することにより物体光の分光特性（スペクトル）を取得することができる。

【0007】

このように特許文献1に記載の手法では、分割光学系（対物レンズ、固定ミラー部、可動ミラー部）を通過してきた光の全てを分析に用いることができるため、光の利用効率が

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特開2008-309706号公報

【非特許文献】

【0009】

【非特許文献1】平石次郎編「フーリエ変換赤外分光法」学会出版センター，1985年11月

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

特許文献1に記載の手法では、可動ミラーを機械的に移動させることにより、その移動量に応じた位相差を固定ミラー部と可動ミラー部で反射される物体光束に与える。このため、可動ミラー部の移動軸に対して様々な角度の光軸を有する光束が入射すると、可動ミラー部の移動量が同じであっても、各物体光に与えられる位相差量が入射角度により異なってしまふ。このように異なる位相差量を与えられた物体光は受光面において干渉現象を生じ、インターフェログラムとして一括して検出される。従って、位相差量に光軸の傾き（即ち入射角度）に応じた誤差を有すると、分光特性を劣化させる。特に広視野分光イメージングを行う場合は、測定位置毎の物体光の光軸に対する傾きの変化が大きくなるため、分光特性を大きく劣化させることになる。

【0011】

本発明が解決しようとする課題は、広視野分光イメージングを行う場合であっても高精度に分光特性を測定することができる分光特性測定装置及びその校正方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0012】

上記課題を解決するために成された本発明に係る分光特性測定装置は、

- a) 被測定物の測定点から出射された光を第1反射部と第2反射部に導く分割光学系と、
- b) 前記第1及び第2反射部によって反射された光を同一点に導き干渉像を形成する結像光学系と、

10

20

30

40

50

- c) 前記第 1 反射部を移動させることにより前記分割光学系から前記第 1 反射部を経て前記結像光学系に向かう第 1 反射光と前記分割光学系から前記第 2 反射部を経て前記結像光学系に向かう第 2 反射光の間の光路長差を伸縮する光路長差伸縮手段と、
- d) 前記第 1 反射部の移動量を検出する移動量検出部と、
- e) 前記干渉像の光強度を検出する、複数の検出素子が 2 次元配列された光検出部と、
- f) 前記光路長差伸縮手段によって前記光路長差を伸縮させることにより前記光検出部で検出される光強度変化に基づき、前記被測定物の測定点のインターフェログラムを求め、このインターフェログラムをフーリエ変換することによりスペクトルを取得する処理部とを備える分光特性測定装置において、

さらに、輝点から波長が既知の校正光を出射させる校正光出射手段と、

前記光路長差伸縮手段によって前記光路長差を伸縮させることにより前記光検出部で検出される前記輝点の干渉像の光強度変化の 1 周期に相当する前記第 1 反射部の移動量と、前記輝点の干渉像の画角と、前記校正光の波長とに基づき、前記第 1 反射部の設置角を求める設置角算出部と、

前記被測定物の測定点の画角を求める画角検出部とを備え、

前記処理部は、前記第 1 反射部の設置角と前記測定点の画角とから、前記第 1 反射部の移動量に対応する前記光路長差を求め、該光路長差に基づきスペクトルを校正することを特徴とする。

【 0 0 1 3 】

また、本発明の分光特性測定装置は、前記設置角算出部が、前記校正光の前記第 1 反射部への入射点を原点とする $x y z$ 座標系であって、前記第 1 反射部の反射面の法線を含む面を $x z$ 平面、該 $x z$ 平面に垂直な軸を y 軸とする校正光学座標系を定義し、当該校正光学座標系における前記設置角 y (ただし、設置角 y は前記第 1 反射部の反射面の法線の前記 y 軸回りの回転角を示す。) を以下の式

$$y = (90^\circ + \gamma) + \cos^{-1} \{ (\lambda / 2M) \times \alpha \}$$

(上記式において、 α 及び γ は、前記輝点の干渉像の画角であって当該干渉像と前記校正光学座標系の原点とを結ぶ線と x 軸及び y 軸との角度、 λ は前記校正光の波長、 M は前記輝点の干渉像の光強度変化の 1 周期に相当する前記第 1 反射部の移動量を示す。)

から算出することを特徴とする。

【 0 0 1 4 】

さらに本発明の分光特性測定装置は、前記設置角算出部が、 z 軸が前記輝点の干渉像と原点とを結ぶ線となる前記校正光学座標系における前記設置角 y を算出することを特徴とする。

上記構成では、前記輝点の干渉像の画角 α 及び γ がそれぞれ $\alpha = 0$ 及び $\gamma = 0$ となり、前記設置角 y を容易に算出することができる。

【 0 0 1 5 】

また、前記処理部が、前記光路長差 L を、以下の式

$$L = \{ 2M \cos(\alpha - \beta) \} / \cos(\beta) \quad (\text{ただし、} \beta = \gamma + 90^\circ)$$

(上記式において、 β 及び γ は前記測定点の画角、 M は前記第 1 反射部の移動量を示す。)

から算出するようにしても良い。

【 0 0 1 6 】

また、校正光出射手段を、波長が既知の単色光源から発せられた光が入射するように配置された、複数の離散輝点を形成するフライアイレンズから構成することも可能である。

【 0 0 1 7 】

本発明の分光特性測定装置の校正方法は、

- a) 被測定物の測定点から出射された光を第 1 反射部と第 2 反射部に導く分割光学系と、
- b) 前記第 1 及び第 2 反射部によって反射された光を同一点に導き干渉像を形成する結像光学系と、
- c) 前記第 1 反射部を移動させることにより前記分割光学系から前記第 1 反射部を経て前

10

20

30

40

50

記結像光学系に向かう第1反射光と前記分割光学系から前記第2反射部を経て前記結像光学系に向かう第2反射光の間の光路長差を伸縮する光路長差伸縮手段と、

d) 前記第1反射部の移動量を検出する移動量検出部と、

e) 前記干渉像の光強度を検出する、複数の検出素子が2次元配列された光検出部と、

f) 前記光路長差伸縮手段によって前記光路長差を伸縮させることにより前記光検出部で検出される光強度変化に基づき、前記被測定物の測定点のインターフェログラムを求め、このインターフェログラムをフーリエ変換することによりスペクトルを取得する処理部と、

前記被測定物の測定点の画角を求める画角検出部と

を備える分光特性測定装置において、

輝点から出射された波長が既知の校正光を前記分割光学系に入射させ、そのとき前記結像光学系によって形成される干渉像の光強度変化1周期に相当する前記第1反射部の移動量を前記移動量検出部から取得し、

当該第1反射部の移動量と、前記輝点の干渉像の画角と、前記校正光の波長とに基づき、前記第1反射部の設置角を求め、

前記第1反射部の設置角と前記測定点の画角とから、前記第1反射部の移動量に対応する前記光路長差を求め、該光路長差に基づきスペクトルを校正することを特徴とする。

【0018】

又、本発明の校正方法は、前記第1反射部の設置角が、前記校正光の前記第1反射部への入射点を原点とするxyz座標系であって、前記第1反射部の反射面の法線を含む面をxz平面、該xz平面に垂直な軸をy軸とする校正光学座標系における前記設置角 γ (ただし、設置角 γ は前記第1反射部の反射面の法線の前記y軸回りの回転角を示す。)であり、当該設置角 γ を以下の式

$$\gamma = (90^\circ + \alpha) + \cos^{-1} \left\{ \left(\frac{\lambda}{2M} \right) \times \beta \right\}$$

(上記式において、 α 及び β は、前記輝点の干渉像の画角であって当該干渉像と前記校正光学座標系の原点とを結ぶ線とx軸及びy軸との角度、 λ は前記校正光の波長、Mは前記輝点の干渉像の光強度変化の1周期に相当する前記第1反射部の移動量を示す。)

から算出することを特徴とする。

【0019】

この場合、前記校正光学座標系は、そのz軸が前記輝点の干渉像と原点とを結ぶ線であると、前記輝点の干渉像の画角 α 及び β がそれぞれ $\alpha = 0$ 及び $\beta = 0$ となり、前記設置角 γ を容易に算出することができる。

【0020】

また、前記光路長差Lは、以下の式

$$L = \{ 2M \cos(\alpha - \beta) \} / \cos(\alpha) \quad (\text{ただし、} \beta = \alpha + 90^\circ)$$

(上記式において、 α 及び β は前記測定点の画角、Mは前記第1反射部の移動量を示す。)

から算出することを特徴とする。

【発明の効果】

【0021】

本発明によれば、第1反射部の設置角を予め求め、この設置角と第1反射部の移動量及び被測定物の各測定点の画角から画角毎の光路長差を求めることができるので、検出感度の低下を招くことなく高精度に被測定物の各測定点の分光特性を測定することができる。また、被測定物の測定点の画角の大小に関係なく真の光路長差を求めることができるので、広視野分光イメージングに有用な分光特性測定装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】本発明の一実施形態に係る分光特性測定装置の測定モードを示す概略的なシステム構成図。

【図2】分光特性測定装置のブロック図。

10

20

30

40

50

【図 3】位相シフターの動作説明図。

【図 4】インターフェログラム (a) とそれをフーリエ変換したスペクトルの波形図 (b) 。

【図 5】インターフェログラムの生成原理の説明図。

【図 6】分光特性測定装置の校正モードを示す概略的なシステム構成図。

【図 7】校正光学座標系と位相シフターの位置関係を示す図。

【図 8】 xz 平面が可動ミラー部の反射面の法線を含むように校正光学座標系を定義したときの校正光学座標系と位相シフターの位置関係を示す図。

【図 9】位相シフト量と位相差との関係を説明するための図。

【図 10】画角 $x = 0$ である場合の位相差の求め方を説明するための図。

10

【図 11】反射の法則を説明するための図。

【図 12】位相シフターの移動に伴い得られたインターフェログラム (a)、インターフェログラムをフーリエ変換して得られた分光特性 (b) を示す図。

【図 13】校正光学座標系の求め方の説明図。

【図 14】干渉像の画角 x 及び y の求め方の説明図。

【図 15】離散輝点像を用いて構築した校正光学座標系と画角補正幾何モデルにより測定面 (結像面) 全体で校正を行った実験結果を示す図。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 3 】

以下、本発明の具体的な実施形態について説明する。

20

詳しくは後述するように、本実施形態に係る分光特性測定装置は測定モード及び校正モードを備えている。測定モードは被測定物の分光特性測定時に用いられるもので、まずは測定モードの装置構成を図 1 及び図 2 を参照しながら説明する。測定モードの分光特性測定装置 10 は、光学系 20 と、検出部 22 と、制御装置 40 とから構成されている。

光学系 20 は、光源 21 と検出部 22 を結ぶ光路上に設けられた、対物レンズ 24、位相シフター 25、結像レンズ 26 とから構成されている。対物レンズ 24 が分割光学系を、結像レンズ 26 が結像光学系をそれぞれ構成する。また、検出部 22 が光検出部に相当する。

【 0 0 2 4 】

制御装置 40 は、制御部 41、インターフェログラム取得部 42、演算処理部 43、記憶部 44、表示部 45、操作部 46 等を備えて構成されている。演算処理部 43 は、後述する、位相シフター 25 の設置角度の算出、スペクトルの補正、インターフェログラムのフーリエ変換といった演算処理を実行する。従って、本実施例では、演算処理部 43 が処理部、設置角算出部として機能する。なお、演算処理部 43 の実体は CPU を中心に構成されるパーソナルコンピュータであって、該コンピュータ上で所定のプログラムを実行することにより演算処理が達成される。

30

【 0 0 2 5 】

光源 21 から出射された光は被測定物 S に照射され、これにより当該被測定物 S の輝点から多様な方向に向かって散乱光や蛍光発光等の光線 (「物体光」ともいう) が放射状に出射する。被測定物 S から出射する光線は、対物レンズ 24 に入射して平行光束へ変換され、その後、位相シフター 25 を介して結像レンズ 26 に入射し、検出部 22 の受光面上に集光する。

40

【 0 0 2 6 】

前記対物レンズ 24 は、レンズ駆動機構 27 によって光軸方向に移動可能に構成されている。レンズ駆動機構 27 は、対物レンズ 24 の合焦位置を走査するためのもので、例えば piezo 素子により構成することができる。

【 0 0 2 7 】

なお、対物レンズ 24 を透過した後の光束は完全な平行光束である必要はない。後述するように、1 つの輝点から生じた光束を 2 分割あるいはそれ以上に分割できる程度に広げることができればよい。ただし、平行光束でない場合は、後述の位相シフト量に応じて生

50

じる位相差量に誤差を生じ易い。従って、より高い分光計測精度を得るためにはできるだけ平行光束とすることが望ましい。

【0028】

対物レンズ24を透過してきた平行光束は位相シフター25に到達する。位相シフター25は、可動ミラー部251と、その左部に配置された固定ミラー部252と、可動ミラー部251を移動させる駆動ステージ253とを備えて構成されている。可動ミラー部251及び固定ミラー部252の表面(反射面)は光学的に平坦で且つ本装置10が測定対象とする光の波長帯域を反射可能な光学鏡面となっている。

【0029】

本実施例では、位相シフター25が本発明の光路長差伸縮手段に相当し、可動ミラー部251及び固定ミラー部252がそれぞれ第1及び第2反射部に相当する。また、ここでは、反射光としたが透過光でも良い。

なお、以下の説明では、位相シフター25に到達した光束のうち可動ミラー部251の反射面に到達して反射される光束を可動光、固定ミラー部252の反射面に到達して反射される光束を固定光ともいう。

【0030】

駆動ステージ253は、例えば静電容量センサーを具備する圧電素子から構成されており、制御装置40からの制御信号を受けて可動ミラー部251を光の波長に応じた精度で矢印A方向に移動させる。分光測定能力にもよるが、例えば可視光領域では10nm程度の高精度な位置制御が必要となる。

【0031】

また、位相シフター25は、対物レンズ24からの平行光束の光軸に対して可動ミラー部251及び固定ミラー部252の反射面が45度傾くように配置されている。駆動ステージ253は、可動ミラー部251の反射面の光軸に対する傾きを45度に維持した状態で当該可動ミラー部251を移動する。このような構成により、可動ミラー部251の光軸方向の移動量は、駆動ステージ253の移動量の2倍となる。また、固定光と可動光の2光束間の相対的な位相変化を与える光路長差は、可動ミラー部251の光軸方向の移動量の2倍となる。

【0032】

位相シフター25に到達し、可動ミラー部251及び固定ミラー部252の反射面で反射された固定光及び可動光は、それぞれ結像レンズ26により収束されて検出部22の受光面(結像面)に入る。検出部22は例えば多数のCCD撮像素子が2次元マトリクス配置された2次元CCDカメラから構成されている。可動ミラー部251の反射面と固定ミラー部252の反射面は、検出部22の結像面で2つの光束の集光位置がずれない程度の精度で平行に構成されている。

【0033】

[測定原理]

次に、本実施形態に係る分光特性測定装置10の測定原理について図3～図5を用いて説明する。ここでは蛍光や散乱光などの光線が、対物レンズ24と結像レンズ26を経て検出部22の結像面で一つの点に集光し、干渉像を形成する光学モデルに基づいて説明する。

【0034】

前述したように、被測定物Sの一輝点から発せられた物体光は、対物レンズ24を経て位相シフター25の可動ミラー部251及び固定ミラー部252の表面に到達する。このとき、物体光は可動ミラー部251及び固定ミラー部252に分割されて到達する。

なお、固定ミラー部252の表面に到達する光束即ち固定光と、可動ミラー部251の表面に到達する光束即ち可動光の光量がほぼ等しくなるように、対物レンズ24に対する可動ミラー部251及び固定ミラー部252の位置が設定されているが、固定光及び可動光の一方或いは両方の光路に減光フィルタを設置して相対的な光量差を調整し、光量の均等化を行うことも可能である。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 5 】

可動ミラー部 2 5 1 及び固定ミラー部 2 5 2 の表面で反射された光は、それぞれ可動光及び固定光として結像レンズ 2 6 に入射し、検出部 2 2 の結像面において干渉像を形成する。このとき、被測定物 S から発せられる光線には様々な波長の光が含まれることから、可動ミラー部 2 5 1 を移動させて可動光と固定光の光路長差を変化させることにより、図 4 (a) に示すようなインターフェログラムと呼ばれる結像強度変化 (干渉光強度変化) の波形が得られる。図 4 (a) は検出部 2 2 の一つの画素におけるインターフェログラムである。なお、図 4 (a) において、横軸は可動ミラー部 2 5 1 の移動に伴う可動光と固定光の間の光路長差を、縦軸は結像面上の一点における結像強度を示す。

【 0 0 3 6 】

このインターフェログラムをフーリエ変換することにより、被測定物 S の一輝点から発せられた光の波長毎の相対強度である分光特性を取得することができる (図 4 (b) 参照) 。本実施形態では検出部 2 2 に 2 次元 CCD カメラを用いていることから、被測定物 S の 2 次元分光測定が可能となる。

【 0 0 3 7 】

図 5 (a) ~ (c) はインターフェログラムの生成原理の説明図である。まず、測定波長が単一波長の光の場合の光路長差と干渉光強度との関係について説明する。図 5 において、横軸は可動ミラー部 2 5 1 の移動に伴う固定光と可動光間の相対的な光路長差を示し、縦軸は、検出部 2 2 の一つの画素における結像強度を示している。

【 0 0 3 8 】

図 5 (a) ~ (c) は波長の長さが異なる 3 種類の単色光 ($a > b > c$) の光路長差と結像強度との関係を示している。図 5 の中央付近に示す位相シフト原点 (図中、一点鎖線で示す) は、図 3 (b) に示す状態 (可動ミラー部 2 5 1 の反射面が固定ミラー部 2 5 2 の反射面と一致している状態) をいう。可動ミラー部 2 5 1 と固定ミラー部 2 5 2 の反射面が一致しているときは、固定光と可動光に相対的な位相差が生じていない。つまり、これら 2 光束は結像面において位相が揃って到達するため、互いに強め合う。このため、結像面には明るい輝点が形成され、結像強度が大きくなる。

【 0 0 3 9 】

これに対して、可動ミラー部 2 5 1 を図 3 (b) に示す位置から図 3 (a) や (c) に示す位置に移動させて固定光と可動光との間に相対的な光路長差を生じさせると、この光路長差が半波長 ($\lambda/2$) の奇数倍になった時点で弱め合う干渉条件となるため結像強度は小さくなる。また、光路長差が 1 波長の整数倍になると、2 光束間の干渉条件が強め合う状態となり、結像強度が大きくなる。

従って、可動ミラー部 2 5 1 を移動させて光路長差を順次変化させていくと、2 光束間の干渉現象による結像強度は周期的に変化することになる。この結像強度変化の周期は、図 5 (a) ~ (c) に示すように、波長が長い光の場合は長く、波長が短い光の場合は短くなる。

【 0 0 4 0 】

一方、多波長の光を測定する分光特性測定装置では、多様な長さの波長の干渉光強度変化が足し合わされた輝度値変化として検出されることになる。これが図 4 (a) に示すインターフェログラムである。可動光と固定光の相対的な光路長差が無い位相シフト原点では、波長に依存せずに 2 光束は強め合うため、多波長の強度変化を足し合わせた測定値においても高い結像強度となる。しかし、光路長差が大きくなると、各波長の強度変化の周期が合わないため、多波長の強度変化を足し合わせても結像強度は大きくなる。このため、インターフェログラムは、光路長差が大きくなるに従い徐々に輝度値が小さくなっていく結像強度変化が観察される。このようにインターフェログラムは、単一波長の単周期結像強度変化が足し合わされた波形であることから、この波形データをフーリエ変換することにより図 4 (b) に示すような、波長ごとの相対強度である分光特性を取得することができる。

【 0 0 4 1 】

10

20

30

40

50

[校正方法]

次に、本実施形態の分光特性測定装置 10 の校正方法について説明する。

上述したように、本実施形態の分光特性測定装置 10 では、可動ミラー部 251 を徐々に移動させて固定光と可動光との間に相対的な光路長差（位相差）を生じさせることにより、インターフェログラムと呼ばれる結像強度変化の波形を得る。そして、このインターフェログラムをフーリエ変換することにより被測定物の輝点から発せられた光の波長毎の相対強度である分光特性を取得する。分光特性を精度良く求めるためには、固定光と可動光との間の位相差を正確に求める必要がある。可動ミラー部 251 の移動量が同じであっても、可動光と固定光との間の位相差量は、被測定物 S の各輝点から出射した光の位相シフター 25（可動ミラー部 251 及び固定ミラー部 252）に対する入射角度により異なる。当該入射角は、各輝点位置における物体光束の光軸の画角と、位相シフター 25 の設置角（前記物体光の光軸に対する可動ミラー部 251 及び固定ミラー部 252 の反射面の角度）によって決まる。このことから、本装置 10 では、画角補正幾何モデルを構築して位相シフター 25 の設置角を求め、この設置角を用いて輝点の画角毎の前記位相差を求めるようにしている。校正モードとは、位相シフター 25 の設置角を求めるための装置構成をいう。

10

【0042】

図 6 に示すように、校正モードでは、波長が既知の単色光源から出射された平行光束がフライアイレンズ 23 を透過した後、対物レンズ 24 に入射する。つまり、フライアイレンズ 23 が校正光射出手段として機能する。フライアイレンズ 23 は小レンズが複数、碁盤目状に配列されたものから成る。光源 21 から出射された光束はフライアイレンズ 23 に入射した後、各小レンズによって集光点を形成し、その後、再び広がって対物レンズ 24 に入射し、該対物レンズ 24 を経て位相シフター 25 の可動ミラー部 251 及び固定ミラー部 252 の表面に到達する。そして、可動ミラー部 251 及び固定ミラー部 252 の表面で反射された後、可動光及び固定光として結像レンズ 26 に入射し、検出部 22 の結像面において干渉する。校正モードでは、照明光学系にフライアイレンズ 23 を用いることにより複数の離散輝点を形成している。結像面には輝点に対応して干渉像が形成されることから、校正モードでは複数の離散輝点に対応する複数の離散干渉像が結像面に形成される。

20

【0043】

次に、画角補正幾何モデルを構築するに当たって定義する校正光学座標系について説明する。

30

校正光学座標系を定義するためには、位相シフター 25 の設置角度として 3 自由度（ x 、 y 、 z ）、輝点から出射され対物レンズ 24 を経て位相シフター 25 から結像面に入射する光の画角（ x 、 y ）として 2 自由度の合計 5 自由度を考慮する必要がある。しかし、考慮すべきパラメータが多いと画角補正幾何モデルの構築が難しくなる。そこで、本実施形態では反射の法則に着目して校正光学座標系を定義する。すなわち、位相シフター 25 の可動ミラー部 251 及び固定ミラー部 252 の表面である反射面の法線で位相シフター 25 の設置角度 x 、 y 、 z を定義する。

【0044】

40

図 7 は校正光学座標系と位相シフターとの位置関係を示す図である。この図 7 に示すように、設置角 x は xz 平面からの仰角（つまり、可動ミラー部 251 の反射面の法線と xz 平面のなす角度）、設置角 y は y 軸回りの回転角（ここでは、前記法線の xz 平面に対する投影と x 軸のなす角度としている）、設置角 z は前記反射面に対する法線回りの回転角を示す。設置角 z は法線周りの回転角であるため、反射の法則では無視することができる。

また、図 8 に示すように、法線を含む平面を xz 平面とする校正光学座標系を定義すると、設置角 x は 0deg. となる。つまり、このモデルで考慮すべき設置角は y のみとなる。

【0045】

50

このように xz 平面を定義した校正光学座標系において、フライアイレンズ 23 の各小レンズから放射された光が対物レンズ 24 を経て位相シフター 25 に入射すると、これらの入射光は位相シフター 25 の反射面で反射され、結像面上に干渉像を形成する。また、位相シフター 25 の可動ミラー部 251 は主軸 (x 軸) から設置角 γ 傾いた並進移動軸 (つまり、法線) に沿って位相シフト量 M だけ機械的に移動するものとする。このとき、 xz 平面上に位置する輝点から出射されて位相シフター 25 から結像面に入射する光、つまり画角 $x = 0$ の入射光について考えると、当該入射光の波面に与えられる位相差 L は、図 9 に示すように位相シフト量 M によって波面に与えられる位相差 L_1 と、初期位置にある可動ミラー部 251 の反射点から移動後の可動ミラー部 251 の反射点までの入射光に沿う方向の距離 L_2 との差となる。以上より、 $\gamma' = \gamma + 90^\circ$ とすると、以下の式 (1) ~ (3) が得られる。

$$L = L_1 - L_2 \quad \dots (1)$$

$$L_1 = M / \cos(\gamma - \gamma') \quad \dots (2)$$

$$L_2 = -1 \times L_1 \times \cos(2(\gamma - \gamma')) \quad \dots (3)$$

式 (1) ~ (3) より位相差 L は

$$\begin{aligned} L &= M / \cos(\gamma - \gamma') \{1 + \cos(2(\gamma - \gamma'))\} \\ &= M / \cos(\gamma - \gamma') \times 2\cos^2(\gamma - \gamma') \\ &= 2M \cos(\gamma - \gamma') \quad \dots (4) \end{aligned}$$

となる。

【0046】

位相シフター 25 の位相シフト量 M は、可動ミラー部 251 の移動軸に沿う方向の移動量を示し、例えば位相シフター 25 の駆動ステージ 253 にリニアエンコーダ等の移動量検出器 255 (図 2 参照) を設けることにより該検出器 255 の検出値から求めることができる。従って、本実施例では移動量検出器 255 が移動量検出部に相当する。

【0047】

なお、式 (4) は結像面上の干渉像の画角 $x = 0$ の入射光の位相差 L であるが、結像面上の干渉像の画角 $x \neq 0$ の入射光の場合は、図 10 に示すように、予め定義した xz 平面に対して画角 x だけ傾いた xz 平面を考えれば良い。この場合は、上述の校正光学座標系を使って求めた位相差は、実際の xz 平面における位相差 L を、予め定義した xy 平面に投影した長さとなる。つまり、実際の位相差 L は、校正光学座標系で求めた位相差を $\cos x$ で除算したものとなり、下記式 (5) で表すことができる。

$$L = \{2M \cos(\gamma - \gamma')\} / \cos(x) \quad \dots (5)$$

式 (5) より、位相シフター 25 の設置角 γ が求めれば、位相シフト量 M から、干渉像の画角 x 及び γ に応じた位相差量 L が算出可能となることが分かる。

【0048】

逆に、位相シフト量 M 、位相差量 L 、輝点の画角、干渉像の画角 x 及び γ が分かれば上記した式 (5) から位相シフター 25 の設置角 γ を求めることができる。ただし、式 (5) から設置角 γ を求めることができるのは、上述したように法線を含む面を xz 平面とする校正光学座標系を定義できることが前提となる。実験的に求めることができるデータは結像面上の離散干渉像の分光特性のみであり、法線は視認できない。そこで、結像面上の複数の離散干渉像の中の一つを通る軸を z 軸と定義し、画角 $x = 0$ 、 $\gamma = 0$ として設置角 γ を算出する。この画角は干渉像の画角であるが、反射の法則より位相シフター 25 に対する入射角と反射角は同じであることから、図 11 に示すように、反射光線と法線を含む面を xz 平面とした場合には、離散干渉像の画角と離散輝点像の画角は同じになる。

【0049】

以下、位相シフター 25 の設置角 γ を算出する手順について説明する。

位相シフター 25 を移動させると、結像面上では位相シフター 25 の位相シフト量 M に従って干渉像の結像強度が変化する。例えば図 12 (a) に破線で示すグラフ P_0 は、画角 $x = 0$ 、 $\gamma = 0$ 、設置角 $\gamma = 0$ のときの波長 λ の結像強度変化を示している。グラ

10

20

30

40

50

フ P_0 では、結像強度変化1周期分が波長 λ となる。これを理論値とする。それに対して画角 α 及び設置角 β が理論値以外のときの波長 λ の結像強度変化は実線で示すグラフ P_1 となり、理論値とは異なる周期で結像強度が変化する。これは、画角に応じて1周期に対する波面に与えられる位相差 L の移動軸が位相シフター25の機械的な移動軸に対して傾いていることから、実質的に波面に与えられる位相差量が異なるためである。このときの位相シフト量を M とすると、画角 α 及び設置角 β が理論値以外のときは、位相シフト量が M のときに波長 λ と等しい位相差 L が与えられたことになる。この M は、図12(b)に示すように、位相シフトに伴う結像強度変化のデータ(インターフェログラム)をフーリエ変換することにより得られる分光特性から求めることができる。単一波長の光源を用いた場合は、インターフェログラムをフーリエ変換することにより輝線スペクトルが得られ、この輝線スペクトルのピーク値として M を求めることができる。

10

【0050】

そこで、式(5)の位相差量 L に波長 λ を、位相シフト量 M に実験的に求めた M を代入することにより、以下に示す設置角 β の算出式(6)を求めることができる。

$$y = \cos^{-1}(\lambda/2M \cos \alpha) + \beta \quad \dots \quad (6)$$

【0051】

式(6)では、画角 α 及び β も未知である。しかし、上述したように、結像面上の複数の干渉像の中の1つを選択し、この干渉像を通る軸を z 軸と仮定すると、画角 α 及び β はいずれも0となり、波長 λ 及び位相シフト量 M が分かれば、式(6)から設置角 β を算出することができる。

20

【0052】

なお、図13に示すように、法線及び z 軸によって構成される xz 平面を法線を中心に回転させる。このとき、位相シフター25の設置角 β が変化しないようにすると、その円の接線が空間座標系(校正光学座標系)の y 軸となる。これは、円の接線が、結像面に対する xz 平面の射影である A 線(図13参照)、つまり、常に円の中心を通る線に対して垂直となるからである。取得した2次元データは設置角 β の等高線の一部である。従って、複数の離散干渉像の任意の一点を z 軸が通ると決定して校正光学座標系を定義することにより、設置角 β を求めることができる。

【0053】

上記のようにして設置角 β を求めることができれば、結像面上の全ての干渉像について、その画角 α 、 β と位相シフト量 M から、前述した式(5)を用いて真の位相差 L を求めることができる。この場合の干渉像の画角 α 、 β は、図14に示すように、結像レンズの焦点距離と干渉像の形成位置から次の式(7)及び(8)により求めることができる。

30

$$x = \tan^{-1}(b/f) \quad (7)$$

$$y = \tan^{-1}(a/f) \quad (8)$$

ここで、 f は結像レンズの焦点距離、 a は図14(a)の A 軸方向の距離、 b は B 軸方向の距離を示す。結像面に複数の画素が所定の間隔で $m \times n$ 配列されたCCDカメラにおいては、その画素の位置から a 及び b を求めることができる。従って、前記CCDカメラ(検出部22)及び演算処理部43が本発明の画角検出部を構成する。

40

【0054】

図15は物体面に形成した離散輝点像を用いて構築した校正光学座標系と画角補正幾何モデルにより測定面(結像面)全体で校正を行った実験結果を示したものである。この実験では、フライアイレンズ(焦点距離:10mm、直径:2.3mm、中心間距離:1.7mm)を用いて離散輝点像を形成し、CCDカメラ(型番:XC-75、画素サイズ:8.4 μm (H)×9.8 μm (V))上にて光学倍率1/2倍で観察した。また、本実験系の視野範囲は12.9mmである。光源には輝線スペクトルを有するHe-Neレーザ(波長:632.8nm)を用いた。その結果、設置角 β の値は30deg.となった。

【0055】

このように求めた設置角 β を用いて結像面上の全ての干渉像の2次元データから式(

50

5) から位相差 L を求めることで各干渉像の分光特性を校正することができる。図 15 では、CCDカメラの画素毎、つまり結像面上における干渉像の形成位置と校正前後の分光特性誤差及び校正後の分光特性誤差の関係を示している。図 15 から、画角が小さいときは校正前と校正後の分光特性の差はほとんどないが、画角が大きくなると校正前と校正後の分光特性の差が大きくなることから分かる。具体的には、例えば画角 $x = 0.56\text{deg}$ 、 $y = -0.92\text{deg}$ の位置にある干渉像の場合、取得した分光特性の誤差が 20.2mm から 0.70mm まで最大 97% 減少した。また、測定面全体でも $\pm 3\text{mm}$ の範囲で校正することができた。

【0056】

このように本実施形態によれば、位相シフター 25 の設置角 y を予め実験的に求め、この設置角 y を用いて画角毎の位相差を算出するようにしたので、分光特性を正しく校正することができる。

10

【0057】

尚、本発明は上記した実施形態に限らず、本発明の要旨を変更しない範囲で種々の拡張、変形が可能である。

例えば、上記実施形態では離散干渉像の任意の一つについて校正光学座標系を定義して位相シフターの設置角を求めるようにしたが、図 13 に示すように、求まる設置角が理論的には同じになる複数の離散干渉像についてそれぞれ校正光学座標系を定義して位相シフターの設置角を求め、これらの平均値を用いて画角毎の位相差を求めるようにしても良い。このようにすれば、測定誤差を小さく抑えることができる。

20

【0058】

また、全ての離散干渉像の結像強度変化から、画角毎に波長及び位相シフターの移動量と位相差量との関係を表すデータテーブルを作成し、このデータテーブルを用いて画角毎に分光特性を校正するようにしても良い。

【0059】

離散輝点はフライアイレンズを用いる他、2次元マトリックス配列された多数の光源を用いて形成することができる。

位相シフターの設置角は、少なくとも一つの干渉像について結像強度変化のデータが分かれば求めることが可能である。従って、校正モードでは、物体面上に1個の輝点を形成し、この輝点に対応する干渉像の分光特性から位相シフターの設置角を求めるようにしても良い。

30

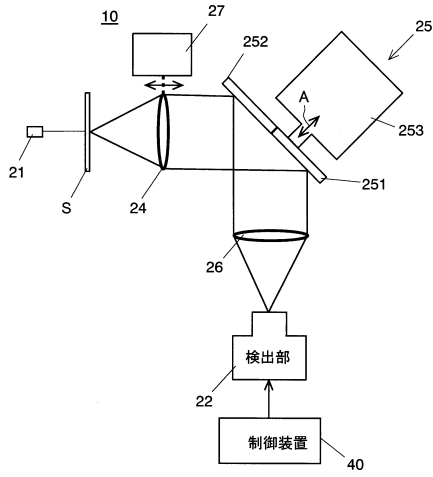
【符号の説明】

【0060】

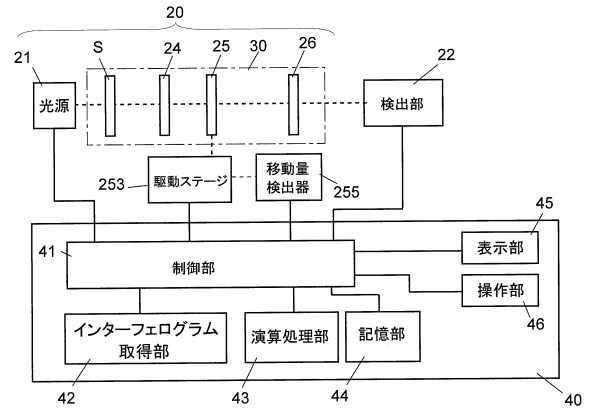
- 10 ... 分光特性測定装置
- 20 ... 光学系
- 21 ... 光源
- 22 ... 検出部
- 23 ... フライアイレンズ
- 24 ... 対物レンズ
- 25 ... 位相シフター
 - 251 ... 可動ミラー部
 - 252 ... 固定ミラー部
 - 253 ... 駆動ステージ
 - 255 ... 移動量検出器
- 26 ... 結像レンズ
- 27 ... レンズ駆動機構
- 40 ... 制御装置
- 41 ... 制御部
- 43 ... 演算処理部

40

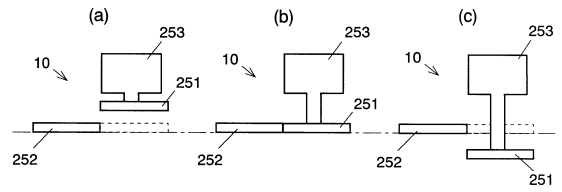
【図1】



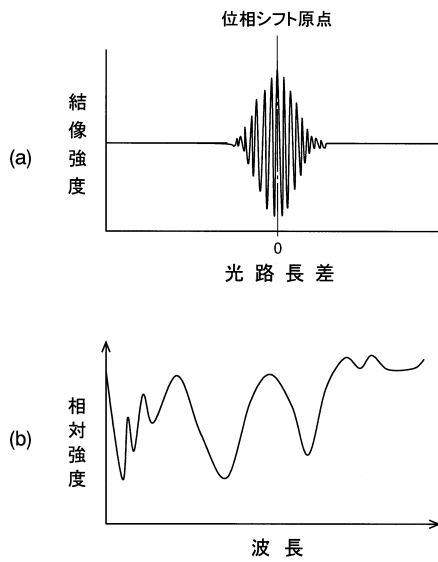
【図2】



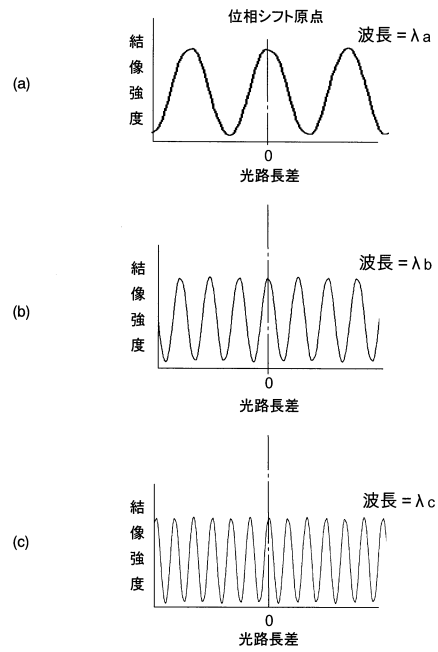
【図3】



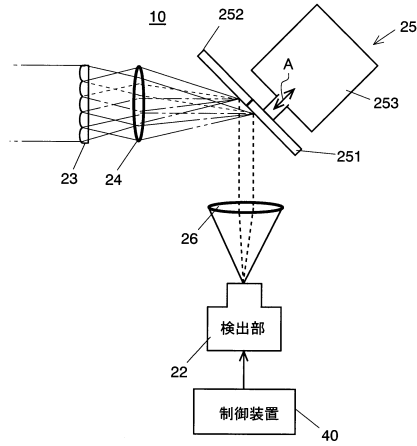
【図4】



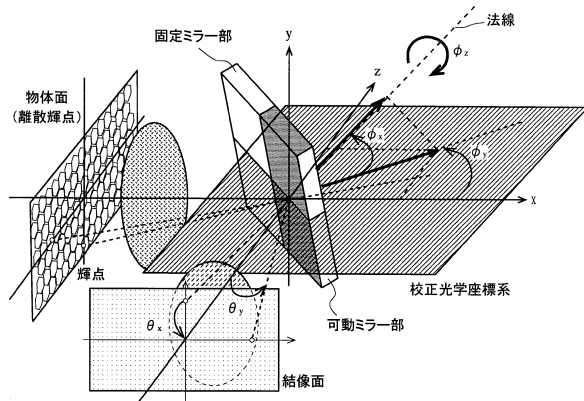
【図5】



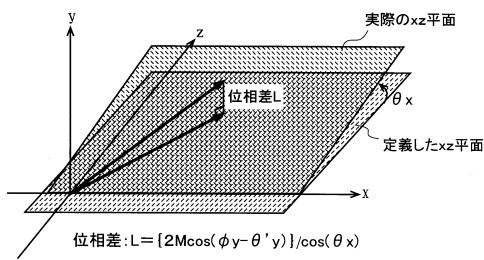
【図6】



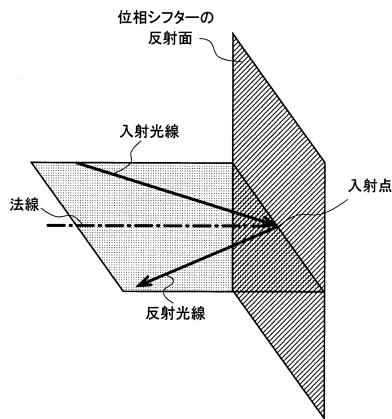
【図7】



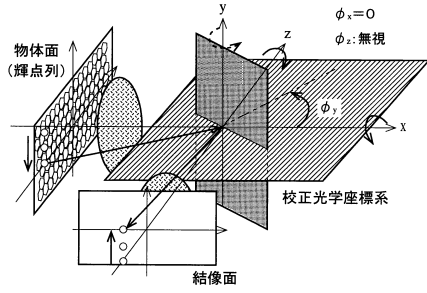
【図10】



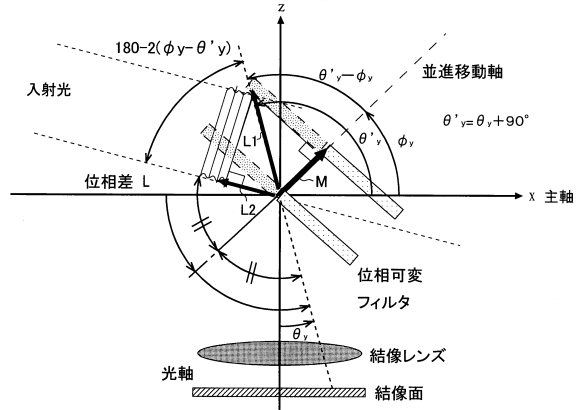
【図11】



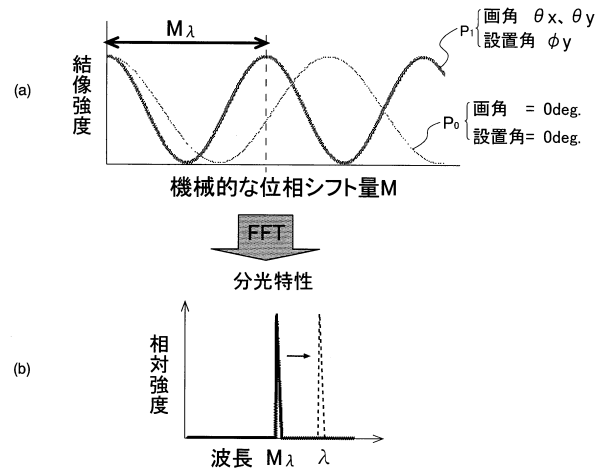
【図8】



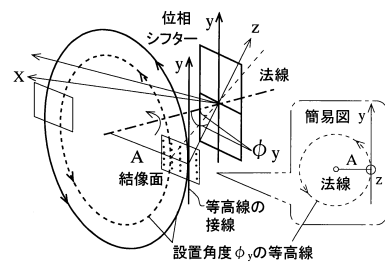
【図9】



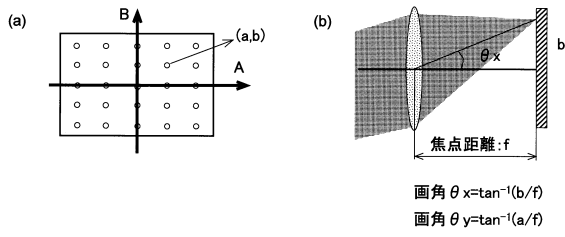
【図12】



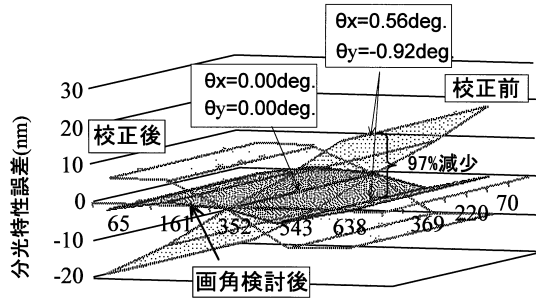
【図13】



【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



3次元分光特性誤差分布

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2008-309706(JP,A)
特表2000-514556(JP,A)
特表2005-538359(JP,A)
特開平06-347324(JP,A)
特表2008-507696(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01J 3/00 - 3/52

G01J 4/00 - 4/04

G01J 7/00 - 9/04

G01N 21/00 - 21/61

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)