

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5349739号
(P5349739)

(45) 発行日 平成25年11月20日(2013.11.20)

(24) 登録日 平成25年8月30日(2013.8.30)

(51) Int. Cl. F I
GO 1 B 9/02 (2006.01) GO 1 B 9/02
GO 1 B 11/24 (2006.01) GO 1 B 11/24 D

請求項の数 4 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2006-114308 (P2006-114308)	(73) 特許権者	000137694
(22) 出願日	平成18年4月18日 (2006.4.18)		株式会社ミットヨ
(65) 公開番号	特開2006-329975 (P2006-329975A)		神奈川県川崎市高津区坂戸一丁目20番1号
(43) 公開日	平成18年12月7日 (2006.12.7)	(74) 代理人	100092820
審査請求日	平成21年2月25日 (2009.2.25)		弁理士 伊丹 勝
審査番号	不服2012-7830 (P2012-7830/J1)	(72) 発明者	川▼崎▲ 和彦
審査請求日	平成24年4月27日 (2012.4.27)		茨城県つくば市上横場430番地の1 株
(31) 優先権主張番号	特願2005-128872 (P2005-128872)		式会社ミットヨ内
(32) 優先日	平成17年4月27日 (2005.4.27)	(72) 発明者	鈴木 義将
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		茨城県つくば市上横場430番地の1 株
			式会社ミットヨ内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 干渉計及び干渉計の校正方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

出射される出射光の波長を変更可能に構成された波長可変光源と、
 該出射光を測定光と参照光とに分割すると共に、参照面で反射した前記参照光及び測定対象物で反射した前記測定光を合成して合成光とする光分割合成部材と、
 前記合成光を複数の分割光に分割する光分割手段と、
 前記複数の分割光の各々の間に所定の位相差を与える複数の位相シフト光学部材と、
 位相をシフトさせられた前記複数の分割光の各々により形成される複数の干渉縞画像を撮像する撮像部と、
 前記波長可変光源を制御して前記出射光の波長を複数通りに変化させる波長制御部と、
 前記測定対象物の一部又は前記測定対象物に代えた校正用基板を設置して前記波長制御部により前記出射光の波長を複数通りに変化させた場合に前記複数の分割光のそれぞれにより得られる複数通りの干渉縞の画像を各前記撮像部により撮像させ、撮像された複数通りの干渉縞の干渉縞強度に基づき、前記複数の分割光のそれぞれによる干渉縞の干渉縞強度のバイアス、振幅及び位相シフト量を演算する演算部と
 を備え、
 前記波長制御部は、前記出射光の複数通りの波長の各々を、複数通りの基準波長の1つを基準として、前記撮像部の露光時間内において所定の波長走査幅で変動させる制御を実行するものであり、
 前記撮像部は、前記露光時間内における前記出射光の波長の変動によって得られる干渉

縞画像を撮像するように構成されたことを特徴とする干渉計。

【請求項 2】

前記波長走査幅は、前記測定対象物の裏面からの反射光と前記参照光との間の光路差が可干渉距離よりも大きく、且つ前記測定光と前記参照光との間の光路差が可干渉距離よりも小さくなるように設定されることを特徴とする請求項 1 記載の干渉計。

【請求項 3】

光源から出射された出射光を測定光と参照光とに分割し、参照面で反射した前記参照光及び測定対象物で反射した前記反射光を再び合成して合成光とし、この合成光を複数の分割光に分割して前記複数の分割光の各々の間に所定の位相差を与えて得られた複数の干渉縞画像を解析することにより測定対象物の形状を測定する干渉計の校正方法において、

前記測定対象物の一部又は前記測定対象物に代えた校正用基板を設置するステップと、前記出射光の波長を複数通りに変化させるステップと、

前記出射光の波長の変化に基づいて前記複数の分割光のそれぞれにより得られる複数通りの干渉縞を撮像するステップと、

その撮像された干渉縞の干渉縞強度を取得して、前記複数の分割光の各々のバイアス、振幅及び位相シフト量を演算するステップとを備え、

前記出射光の波長を複数通りに変化させるステップは、前記出射光の複数通りの波長の各々を、複数通りの基準波長の 1 つを基準として、撮像のための露光時間内において所定の波長走査幅で変動させ、

前記撮像するステップは、前記露光時間内における前記出射光の波長の変動によって得られる干渉縞画像を撮像することを特徴とする干渉計の校正方法。

【請求項 4】

前記波長走査幅は、前記測定対象物の裏面からの反射光と前記参照光との間の光路差が可干渉距離よりも大きく、且つ前記測定光と前記参照光との間の光路差が可干渉距離よりも小さくなるように設定されることを特徴とする請求項 3 記載の干渉計の校正方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、干渉計及び干渉計の校正方法に関する。

【背景技術】

【0002】

干渉計により得られた干渉縞の解析方法として、位相シフト法がある。位相シフト法は、参照面を光軸方向に変位させるなどの手法により、干渉縞の位相をシフトさせて、複数枚の干渉縞画像を取得し、測定対象物の形状を算出する方法である。高い精度が得られるため、現在では、多くの干渉計に適用されている。

【0003】

しかし、この位相シフト法は、参照面を変位させながら干渉縞を取得するため、測定に時間を要する。また、干渉縞を取得する間、測定対象物を静定している必要があるため、振動などの揺らぎを排除した特別な環境下でしか使用することができなかった。

【0004】

これに対し、複数の撮像素子を用いて、光学的に位相をシフトさせた干渉縞を同時に撮像する方法が、例えば特許文献 1、特許文献 2 により知られている。この文献では、参照光と物体光とを合成した合成光をビームスプリッタで 3 つに分割し、この 3 つの分割光をそれぞれ偏光方向の異なる 3 つの偏光板を通過させて 3 つの撮像素子に投影する位相シフト法を開示している。この方法によれば、位相シフト法で演算処理するのに必要な枚数の干渉縞画像を瞬時に取り込むことができるため測定の高速化が図れる。また、振動条件下での測定も可能になる。

10

20

30

40

50

【0005】

しかし、この特許文献1、2の方法で測定対象物を高精度に測定するためには、位相シフトされた3枚の干渉縞画像の対応点のバイアス、振幅が等しいことが前提となる。ところが、ビームスプリッタにおける分割強度誤差や / 4板の進相軸、遅相軸の設置誤差の影響により、3枚の干渉縞画像間のバイアスと振幅を等しくすることは困難であり、これが測定精度の低下を招いている。

【0006】

また、3つの偏光板の偏光軸の設置誤差が生じれば、3枚の干渉縞画像間の位相シフト量が設計値と異なってしまうので、測定対象物面によって発生した干渉縞に対して、測定原理に即した設計値通りの位相シフト量を得ることはできず、やはり測定精度が低下する

10

【0007】

測定精度の向上のためには、干渉計を構成する光学部品を高精度に製作すると共に、高精度な調整機構を利用して干渉計を調整する必要がある。しかし、干渉計筐体の経時変化や温度変動などによる幾何学的な寸法変化や光学部品の性能の変化などにより、干渉計の製作直後に値付けされたバイアス値、振幅値、及び位相は変化してしまう。従って、ユーザが干渉計を使用する環境において、定期的に、あるいは測定の前において、ユーザがこれらの値を容易に値付けできるようにすることが好ましい。これにより、高速、高精度で使用環境を選ばない干渉計による測定が実現するからである。

【特許文献1】特開平2-287107号公報

20

【特許文献2】特開2000-329535号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

本発明は、位相をシフトさせた干渉縞を光学的手法により同時に取得する干渉計において、複数の撮像素子から得られる干渉縞の干渉縞強度のバイアス及び振幅のバラツキ、並びに位相の設計値からの偏差を、定期的に又は測定の前にユーザが容易に計測することを可能とし、測定の高精度化を達成すると共に、使用環境を選ばない干渉計及び干渉計の校正方法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】

30

【0009】

上記目的を達成するため、本発明に係る干渉計は、出射される出射光の波長を変更可能に構成された波長可変光源と、該出射光を測定光と参照光とに分割すると共に、参照面で反射した前記参照光及び測定対象物で反射した前記測定光を合成して合成光とする光分割合成部材と、前記合成光を複数の分割光に分割する光分割手段と、前記複数の分割光の各々の間に所定の位相差を与える複数の位相シフト光学部材と、位相をシフトさせられた前記複数の分割光の各々により形成される複数の干渉縞画像を撮像する撮像部と、前記波長可変光源を制御して前記出射光の波長を複数通りに変化させる波長制御部と、前記測定対象物の一部又は前記測定対象物に代えた校正用基板を治具に固定して前記波長制御部により前記出射光の波長を複数通りに変化させた場合に前記複数の分割光のそれぞれにより得られる複数通りの干渉縞の画像を各前記撮像部により撮像させ、撮像された複数通りの干渉縞の干渉縞強度に基づき、前記複数の分割光のそれぞれによる干渉縞の干渉縞強度のバイアス、振幅及び位相シフト量を演算する演算部とを備えたことを特徴とする。

40

【0010】

上記目的を達成するため、本発明に係る干渉計の校正方法は、光源から出射された出射光を測定光と参照光とに分割し、参照面で反射した前記参照光及び測定対象物で反射した前記反射光を再び合成して合成光とし、この合成光を複数の分割光に分割して前記複数の分割光の各々の間に所定の位相差を与えて得られた複数の干渉縞画像を解析することにより測定対象物の形状を測定する干渉計の校正方法において、前記測定対象物の一部又は前記測定対象物に代えた校正用基板を治具に固定するステップと、前記出射光の波長を複数

50

通りに変化させるステップと、前記出射光の波長の変化に基づいて前記複数の分割光のそれぞれにより得られる複数通りの干渉縞を撮像するステップと、その撮像された干渉縞の干渉縞強度を取得して、前記複数の分割光の各々のバイアス、振幅及び位相シフト量を演算するステップとを備えたことを特徴とする。

【発明の効果】

【0011】

この発明によれば、複数の干渉縞画像の干渉縞強度のバイアス及び振幅のバラツキ、並びに位相の設計値からの偏差を、定期的に又は測定の前にユーザが容易に計測することが可能となり、これにより測定の高精度化が達成されると共に、使用環境を選ばない干渉計及び干渉計の校正方法を提供することができる。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0012】

次に、本発明の実施の形態を、図面を参照して詳細に説明する。

【0013】

図1は、本発明の第1の実施の形態に係る干渉計の全体構成を示している。この実施の形態の干渉計は、波長可変レーザ301と、集光レンズ302と、ピンホール303と、コリメータレンズ304とからなる投光系を備えている。波長可変レーザ301は、出射光の波長を複数通りに変化させることができるように構成されており、その波長の制御は、コンピュータ401により、波長コントローラ402を介して行われる。コンピュータ401は、撮像された干渉縞画像を解析し、測定対象物の形状を演算するためのソフトウェアをインストールされたものである。また、コンピュータ401は、干渉計の校正動作の実行時において、波長可変レーザ301の出射光の波長を制御する制御信号を出力する。波長コントローラ402は、この制御信号に基づき、波長可変レーザ301の波長を制御する。

20

【0014】

この投光系から射出された出射光は、光分割合成部材としての偏光ビームスプリッタ305により、直交する直線偏光である測定光と参照光とに分割される。測定光と参照光はそれぞれ、1/4波長板308、1/4波長板306により直線偏光から円偏光に変換された後、治具321に固定された測定対象物501及び参照面307で反射する。反射した測定光と参照光とは、それぞれ1/4波長板308、306により、入射時とは90度振動方向が異なる互いに直交する直線偏光に変換された後、偏光ビームスプリッタ305により合成される。合成された合成光は、1/4波長板310により、左回り円偏光、右回り円偏光の合成光に変換される。

30

【0015】

またこの干渉計は、結像レンズ311と、ビームスプリッタ312、313及び反射プリズム314からなる光分割部材とを備えている。この光分割部材により分割された3つの分割光は、偏光板315、317、319を介して、CCDカメラ316、318、320にそれぞれ投影される。

【0016】

偏光板315、317、319は、透過軸方向が45度ずつ異なっており、これらを通過した3つの分割光の位相を90度ずつ異ならせるようにするものである。

40

【0017】

前記3つの分割光による干渉縞の各対応点同士でバイアス、振幅が等しければ、次のような演算手順により、測定対象物の形状を測定することができる。すなわち、3つの分割光による干渉縞画像の画像信号の差を求め、その余弦信号S、正弦信号Cを得る。そして、S/Cの逆正接 $\arctan(S/C)$ を計算する。これにより、参照光と測定光の位相差が特定され、これにより測定対象物の形状を測定することができる。この測定方法の詳細な説明は特許文献1にもなされているので、ここでは省略する。

【0018】

しかし、干渉計を構成する光学部材の出荷当時からの各種誤差や、経時変化等による事

50

後的な誤差により、各干渉縞画像の対応点間でバイアス、振幅が等しくならない場合が生じる。バイアス、振幅が等しくない場合、画像信号の差を演算してもバイアス成分が消去されず、また逆正接の演算時に振幅成分が消去されない。また、各干渉縞画像間に相対的に付与される位相シフト量においても、同様の理由により、設計値どおりの正確な量を与えられるものではない。そのため、上記の演算手順では高精度に参照光と測定光の位相差を特定することができない。

【 0 0 1 9 】

そこで、本実施の形態の干渉計では、次の方法により、各 CCD カメラ 3 1 6、3 1 8、3 2 0 の干渉縞の干渉縞強度のバイアス、振幅、及び位相シフト量を測定し、干渉計の校正を実行する。まず、治具 3 2 1 に測定対象物 5 0 1 に代えて、校正用基板 5 0 2 を固定する。校正用基板 5 0 2 は、干渉縞強度のバイアス、振幅、及び位相シフト量を測定する限りにおいては、形状が既知のものである必要はない。

10

【 0 0 2 0 】

ただし、形状既知の校正用基板 5 0 2 を用い、干渉縞を解析して校正用基板 5 0 2 の形状を算出し、その算出値と校正用基板 5 0 2 の形状の真値との差を算出することにより、干渉計で系統的に発生する系統誤差を把握することができる。把握された系統誤差に基づいて測定対象物 W の測定結果を補正することが可能になる。

【 0 0 2 1 】

そしてこの校正用基板 5 0 2 に、波長可変レーザ 3 0 1 の出射光を、その波長を複数通りに変化させて照射し、その異なる波長毎に各 CCD カメラ 3 1 6、3 1 8、3 2 0 で干渉縞画像を撮影する。

20

【 0 0 2 2 】

一般的に、1つの CCD カメラ 3 1 6、3 1 8 又は 3 2 0 により得られる干渉縞の干渉縞強度 I_i ($i = 1, 2, 3$ 。 $i = 1$ は CCD カメラ 3 1 6 を、 $i = 2$ は CCD カメラ 3 1 8 を、 $i = 3$ は CCD カメラ 3 2 0 をそれぞれ表している) は、次の [数 1] により表現することができる。

【 0 0 2 3 】

【 数 1 】

$$I_i(x, y, \lambda) = B_i(x, y) + A_i(x, y) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta L(x, y) + \delta\phi_i(x, y)\right)$$

30

$$\text{ただし、 } \Delta L(x, y) = L2(x, y) - L1(x, y)$$

【 0 0 2 4 】

ここで、 $B_i(x, y)$ はバイアス、 $A_i(x, y)$ は振幅を示しており、 (x, y) は、各対応点の座標を示している。また、 $L(x, y)$ は、偏光ビームスプリッタ 3 0 5 により分割され、再び合成されるまでの参照光の光路長 $L1(x, y)$ と、測定光の光路長 $L2(x, y)$ の差である。また、 $\phi_i(x, y)$ は、干渉縞強度 I_1 、 I_2 、 I_3 の位相であり、偏光板 3 1 5、3 1 7、3 1 9 により 90° 刻みで異なる値を与えられている。

【 0 0 2 5 】

波長可変レーザ 3 1 0 の出射光の波長 λ を波長シフト量 $\Delta\lambda$ だけ変化させた場合、この干渉縞強度 I_i は、次の [数 2] により表される。

40

【 0 0 2 6 】

【 数 2 】

$$I_i(x, y, \lambda + \Delta\lambda) = B_i(x, y) + A_i(x, y) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda + \Delta\lambda} \cdot \Delta L(x, y) + \delta\phi_i(x, y)\right)$$

$$\approx B_i(x, y) + A_i(x, y) \cos\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta L(x, y) \cdot \left(1 - \frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right) + \delta\phi_i(x, y)\right)\right]$$

【 0 0 2 7 】

この [数 2] は、更に次のように変形して表現することができる。

50

【 0 0 2 8 】

【 数 3 】

$$I_i(x, y, \lambda + \Delta\lambda) \approx B_i(x, y) + A_i(x, y) \cos(F_i(x, y) + G\Delta\lambda)$$

$$F_i(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta L(x, y) + \delta\phi_i(x, y),$$

$$G = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \cdot \Delta L$$

【 0 0 2 9 】

10

すなわち、波長を から波長シフト量 だけ異ならせた場合においてCCDカメラ316、318、又は320のそれぞれで撮像される異なる干渉縞画像は、[数3]に示すように、 $G \cdot \Delta\lambda$ ($G = -2/\lambda^2$) だけ位相が異なる波形として表現することができる。

【 0 0 3 0 】

従って、この波長シフト量を、例えば少なくとも3通りに変化させて、その異なる少なくとも3通りの波長シフト量 の場合に関し、1つのCCDカメラ316、318、又は320で異なる干渉縞を撮像し、その干渉縞強度を取得することにより、バイアス $B_i(x, y)$ 、振幅 $A_i(x, y)$ 、及び位相 $F_i(x, y)$ を計算することができる。計算された位相 $F_i(x, y)$ から、各分割光の位相シフト量 $\phi_i(x, y)$ も計算することができる。こうして計算されたバイアス $B_i(x, y)$ 等の値は記憶部403に記憶され、後述するように、測定対象物501の形状測定において、形状を高精度に算出するために用いられる。

20

【 0 0 3 1 】

N通り(N > 3)の波長は、互いに異なる値を有するものであればその大きさ及び間隔は不問であるが、一例として、[数4]のように、N通りの波長シフト量 $\Delta\lambda_j$ を、1周期(2)をN等分した値に設定することができる。

【 0 0 3 2 】

【 数 4 】

$$G \cdot \Delta\lambda_j = \frac{2\pi}{N} \cdot j$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

30

【 0 0 3 3 】

この条件の下、以下の[数5]の計算を行うことにより、バイアス $B_i(x, y)$ 、振幅 $A_i(x, y)$ 及び位相 $F_i(x, y)$ が算出される。

【 0 0 3 4 】

【 数 5 】

$$B_i(x, y) = 1/N \cdot \sum_{j=1}^N I_{ij}(x, y)$$

40

$$A_i(x, y) = 2/N \cdot \left\{ \left[\sum_{j=1}^N I_{ij}(x, y) \cdot \cos(G \cdot \Delta\lambda_j) \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^N I_{ij}(x, y) \cdot \sin(G \cdot \Delta\lambda_j) \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$$F_i(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{-\sum_{j=1}^N I_{ij}(x, y) \cdot \sin(G \cdot \Delta\lambda_j)}{\sum_{j=1}^N I_{ij}(x, y) \cdot \cos(G \cdot \Delta\lambda_j)} \right]$$

【 0 0 3 5 】

$F_i(x, y)$ から、位相 $\phi_i(x, y)$ も算出することができる。なお、この実施の形態では、 $\phi_i(x, y)$ を算出する代わりに、CCDカメラ316(i = 1)によ

50

り撮像された干渉縞の干渉縞強度の位相を基準位相とし、次の[数6]で表現される、基準位相に対する相対的位相シフト量 (x, y) 、 (x, y) を演算し記憶する。参照面に対する測定対象物の相対形状を測定する場合には、この相対的位相シフト量 (x, y) 、 (x, y) から演算する方が、以降の説明から明らかなように演算を簡便にすることができる。

【0036】

【数6】

$$\alpha(x, y) = F_2(x, y) - F_1(x, y)$$

$$\beta(x, y) = F_3(x, y) - F_1(x, y)$$

10

【0037】

次に、こうして校正用基板502を測定して得られたバイアス $B_i(x, y)$ 、振幅 $A_i(x, y)$ 、及び位相シフト量 (x, y) 、 (x, y) を用いて補正を行い、測定対象物501の測定を高精度化する方法について説明する。

【0038】

まず、測定対象物501、又は校正用基板502を測定した場合において生じる各種の光の強度を図2、3に示すように定義する。参照面307で反射する参照光の強度を $a(x, y)$ 、ビームスプリッタ312、ビームスプリッタ313、反射プリズム314でそれぞれ反射する参照光の強度を $a_1(x, y)$ 、 $a_2(x, y)$ 、 $a_3(x, y)$ と定義する。これらは、測定対象物501を測定する場合と、校正用基板502を測定する場合とで同一である。

20

【0039】

また、校正用基板502を測定する場合において校正用基板502で反射する測定光の強度を $b(x, y)$ 、ビームスプリッタ312、ビームスプリッタ313、反射プリズム314でそれぞれ反射する測定光の強度を $b_1(x, y)$ 、 $b_2(x, y)$ 、 $b_3(x, y)$ と定義する。 $a_i(x, y)$ 、 $b_i(x, y)$ は、バイアス $B_i(x, y)$ 、振幅 $A_i(x, y)$ と、次の[数7]に示すような関係にある。

【0040】

【数7】

$$B_i(x, y) = a_i(x, y) + b_i(x, y)$$

$$A_i(x, y) = 2\sqrt{a_i(x, y) \cdot b_i(x, y)}$$

30

【0041】

校正用基板502の測定によりバイアス $B_i(x, y)$ 、振幅 $A_i(x, y)$ の値が得られているので、この[数7]の2式から、 $a_i(x, y)$ 、 $b_i(x, y)$ も特定することができる。

【0042】

また、測定対象物501を測定する場合において測定対象物501で反射する測定光の強度を $b'(x, y)$ 、ビームスプリッタ312、ビームスプリッタ313、反射プリズム314でそれぞれ反射する測定光の強度を $b_1'(x, y)$ 、 $b_2'(x, y)$ 、 $b_3'(x, y)$ と定義する。この測定光 $b'(x, y)$ の測定光 $b(x, y)$ に対する強度比を反射率比 (x, y) として下記の[数8]のように定義する。

40

【0043】

【数8】

$$b'(x, y) = r(x, y)b(x, y)$$

【0044】

また、光分割後の測定光の強度 $b_1'(x, y)$ についても、同様に下記[数9]に示す関係が成り立つ。

【0045】

50

【数 9】

$$b'_1(x, y) = r(x, y)b_1(x, y)$$

$$b'_2(x, y) = r(x, y)b_2(x, y)$$

$$b'_3(x, y) = r(x, y)b_3(x, y)$$

【0046】

測定対象物501を測定する場合のバイアス $B_i'(x, y)$ 、振幅 $A_i'(x, y)$ は、上記 $b_i(x, y)$ と反射率比 $r(x, y)$ を用いて、次の【数10】のように表される。

【0047】

【数10】

$$B_i'(x, y) = a_i(x, y) + r(x, y)b_i(x, y)$$

$$A_i'(x, y) = 2\sqrt{a_i(x, y) \cdot r(x, y) \cdot b_i(x, y)}$$

$$= \sqrt{r(x, y)} \cdot A_i(x, y)$$

【0048】

このため、測定対象物501を測定する場合に各CCDカメラ316, 318, 320で得られる干渉縞の強度 $I_i(x, y)$ は、次の【数11】で表される。

【0049】

【数11】

$$I_1'(x, y) = a_1(x, y) + r(x, y)b_1(x, y) + 2\sqrt{a_1(x, y) \cdot r(x, y) \cdot b_1(x, y)} \cos[\phi(x, y)]$$

$$I_2'(x, y) = a_2(x, y) + r(x, y)b_2(x, y) + 2\sqrt{a_2(x, y) \cdot r(x, y) \cdot b_2(x, y)} \cos[\phi(x, y) + \alpha(x, y)]$$

$$I_3'(x, y) = a_3(x, y) + r(x, y)b_3(x, y) + 2\sqrt{a_3(x, y) \cdot r(x, y) \cdot b_3(x, y)} \cos[\phi(x, y) + \beta(x, y)]$$

【0050】

$I_i'(x, y)$ をCCDカメラ316, 318, 320の画像信号から取得し、この $I_i'(x, y)$ を用いて、 $r(x, y)$ を、例えば次のようにして代数的に求めることができる。

【0051】

まず、上記【数11】を変形して、 $I_i'(x, y) - a_i(x, y)$ を左辺とした下記【数12】とする。

【0052】

【数12】

$$I_1' - a_1 = \gamma b_1 + 2A_1 \sqrt{\gamma} \cos \phi$$

$$I_2' - a_2 = r b_2 - 2A_2 \sin \alpha \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \sin \phi + 2A_2 \cos \alpha \cdot \sqrt{\gamma} \cos \phi$$

$$I_3' - a_3 = r b_3 - 2A_3 \sin \beta \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \sin \phi + 2A_3 \cos \beta \cdot \sqrt{\gamma} \cos \phi$$

【0053】

$r(x, y)$ 、 $(r(x, y))^{1/2} \cdot \sin \phi$ 、 $(r(x, y))^{1/2} \cdot \cos \phi$ についてこの【数12】を解く。

【0054】

【数13】

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ \sqrt{\gamma} \sin \phi \\ \sqrt{\gamma} \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & A_1 \\ b_2 & -A_2 \sin \alpha & A_2 \cos \alpha \\ b_3 & -A_3 \sin \beta & A_3 \cos \beta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_1' - a_1 \\ I_2' - a_2 \\ I_3' - a_3 \end{bmatrix}$$

【0055】

下記の【数14】に示す行列式が0にならない、 $r(x, y)$ であれば、【数13】を $r(x, y)$ 、 $(r(x, y))^{1/2} \cdot \sin \phi$ 、 $(r(x, y))^{1/2} \cdot \cos \phi$ について解くことができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 6 】

【 数 1 4 】

$$\det \begin{bmatrix} b_1 & 0 & A_1 \\ b_2 & -A_2 \sin \alpha & A_2 \cos \alpha \\ b_3 & -A_3 \sin \beta & A_3 \cos \beta \end{bmatrix}^{-1}$$

【 0 0 5 7 】

((x , y)) ^{1 / 2} ・ s i n 、 ((x , y)) ^{1 / 2} ・ c o s が得られたら、両者の比の逆正接を、下記 [数 1 5] のようにとることにより、 を求めることができる。

【 0 0 5 8 】

【 数 1 5 】

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{r} \sin \phi}{\sqrt{r} \cos \phi} \right\}$$

$$= \tan^{-1} \left\{ \frac{[b_2 A_3 \cos \beta - A_2 \cos \alpha \cdot b_3 (I_1' - a_1) + [-b_2 A_3 \cos \beta - A_4 b_3 (I_2' - a_2) + [b_1 A_2 \cos \alpha - A_4 b_2 (I_3' - a_3)]]}{[b_2 A_3 \sin \beta - A_2 \sin \alpha \cdot b_3 (I_1' - a_1) - b_1 A_3 \sin \beta - A_4 b_3 (I_2' - a_2) + b_1 A_2 \sin \alpha \cdot (I_3' - a_3)]} \right\}$$

【 0 0 5 9 】

この [数 1 5] は反射率比 の大きさに無関係に恒等的に成立するため、 1、すなわち、校正用基板 5 0 2 として、測定対象物 5 0 1 と反射率が異なるものを用いても、その影響を受けることなく測定値の校正を行うことができる。また、 の数値を求めることなく、測定値の校正を行うことができる。ちなみに、反射率比 (x , y) は次の式から求めることが可能である。

【 0 0 6 0 】

【 数 1 6 】

$$y = \frac{A_2 A_3 [\sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta] (I_1' - a_1) + A_1 A_3 \sin \beta (I_2' - a_2) - A_1 A_2 \sin \alpha (I_3' - a_3)}{b_1 A_2 A_3 \sin \alpha \cos \beta - b_1 A_2 A_3 \cos \alpha \sin \beta + b_2 A_1 A_3 \sin \beta - b_3 A_1 A_2 \sin \alpha}$$

【 0 0 6 1 】

図 4 は、本発明の第 2 の実施の形態に係る干渉計の全体構成を示している。この実施の形態の干渉計は、図 4 に示すように、ビームスプリッタ 3 1 2、3 1 3、及び反射プリズム 3 1 4 により 3 分割した測定光及び参照光による干渉縞画像を、1つの CCD カメラ 3 2 2 により撮像するように干渉計を構成するものである。

【 0 0 6 2 】

図 5 は、本発明の第 3 の実施の形態に係る干渉計の構成のうち、レンズ 3 1 1 以降の部分のみを示している。その他の部分は上記の実施の形態と同一であるので、詳細な説明は省略する。この実施の形態の干渉計は、ビームスプリッタ 3 1 2、3 1 3、及び反射プリズム 3 1 4 に代えて回折格子 3 2 3 により測定光及び参照光を分割し、偏光板 3 1 5、3 1 7、3 1 9、3 2 4 で位相差を与える形式を採用している。撮像素子は、図 5 のような 1 つの CCD カメラ 3 2 5 でも良いし、図 1 のような分割光毎に設けられた CCD カメラであっても良い。

【 0 0 6 3 】

図 6 は、本発明の第 4 の実施の形態に係る干渉計の全体構成を示している。この実施の形態の干渉計は、図 6 に示すように、高密度位相アレイ素子 4 6 0 により測定光及び参照光を複数に分割し、その分割された光に位相差を与える形式を採用している。この高密度位相アレイ素子 4 6 0 は、本願の出願人が出願した特開 2 0 0 4 - 1 3 8 6 1 7 号公報に開示のものと同じであり、以下にその構成を簡単に説明する。高密度位相アレイ素子 4 6 0 は、低次数のクォーツ波長板などの複屈折基板 4 6 2 を備えている。複屈折基板 4 6 2 は、表面 4 6 9 および速軸 4 6 8 を有する。遅軸は、この速軸 4 6 8 と直交する方向を向いている。

【 0 0 6 4 】

複屈折基板 4 6 2 は、対応する画素群毎に例えば矩形状に形成されたパターン 4 6 1 (部分 4 6 6 a ~ d) の厚さが 4 通り (T ₀、T ₉₀、T ₁₈₀、T ₂₇₀) に異なるよう

10

20

30

40

50

に形成され、これにより、4つの異なる相対位相変位 (P_0 、 P_{90} 、 P_{180} 、 P_{270}) を有する干渉縞画像を生成するものである。なお、複屈折基板461は、厚さ依存性の位相を与えない平面層462により覆われている。

【0065】

この構造においても、各光学素子を誤差無く製作し配置することは極めて困難であり、複数の干渉縞画像管のバイアス、振幅のバラツキや位相シフト量の設計値に対する偏差が発生することが予想される。そのため、上記のような校正法が、この第4の実施の形態においても適用され得る。

【0066】

次に、本発明の第5の実施の形態を、図8を参照して説明する。上記の第1乃至第4の実施の形態は、測定対象物501が、その裏面からの反射が無いが、或いは無視できるもの（例えば、測定対象物501が（1）金属鏡面、（2）表面と裏面との間に相対的に傾斜加工を施したウェッジ型のガラス基板、（3）裏面が粗面加工されたガラス基板、などである）である場合に、適用可能である。裏面からの反射が無視できない場合、その反射光はノイズ光となり、干渉縞のバイアス、振幅、位相シフト量等の正確な測定が困難又は不可能になる。

【0067】

これに対しこの第5の実施の形態の干渉計及びその校正方法は、測定対象物の裏面からの反射光（ノイズ光）が無視できない測定対象物に対しても干渉縞信号のバイアス、振幅等の測定が可能に構成されている点で、上記の実施の形態と異なっている。

【0068】

図8は、本実施の形態に係る干渉計の構成例を示している。ここで、測定対象物に対応する校正用基板502Aが干渉計に設置され、測定対象面である表面502Sからの測定光だけでなく、裏面502Rからのノイズ光が無視できないものとする。なお、この図8に示す干渉計は、光学系の構造自体は第1の実施の形態（図1）と同様である。また、波長可変コントローラ402により波長可変レーザ301の波長が可変とされている点も同様である。

【0069】

ただし、本実施の形態では、測定対象物の裏面からのノイズ光による影響を低減するため、少なくとも3通りに波長が変化させられるだけでなく、その各波長がある程度の波長幅（波長走査幅）を与えられている点で、上記の実施の形態と異なっている。以下では、図9に示すように、波長可変レーザ310の出射光の波長 λ を、 λ_0 、 $\lambda_0 + \Delta\lambda_1$ 、 $\lambda_0 + \Delta\lambda_2$ の少なくとも3通りを中心波長として、 $\pm p/2$ の範囲（波長走査幅 p ）で変動させることができるよう、波長コントローラ402が構成されているものとして説明する。ただし、中心波長を中心として均等幅で波長が変化する必要はなく、ある波長（基準波長）を基準として所定の波長走査幅をもって波長が変動すれば十分である。基準波長を中心とした変動量が、+側と-側で異なってもよいし、また基準波長から+側、-側の一方にのみ変動させるのでも構わない。

【0070】

そして、各CCDカメラ316、318、320の各々において、その波長の変動による光を積分受光する。ここで積分受光とは、CCDカメラの露光時間 T_e 内に波長 λ をある波長幅に亘り変化させて受光することを意味する。これにより、裏面502Rからのノイズ光の影響を受けることなく、干渉縞のバイアス、振幅及び位相シフト量を測定することができる。以下、この積分受光の原理を詳しく説明する。

【0071】

裏面502Rからのノイズ光が無視できない場合、参照光、測定光、及びノイズ光の合成光の、1つのCCDカメラ316、318、又は320のいずれかで得られる干渉縞強度 I_i' は、次の式で表される。なお、参照光、測定光及びノイズ光を複素振幅で表した場合の振幅を1とし、簡略化して示している。また、干渉縞画像は2次元の光強度分布を有するが、次の式以降では、ある1点の光強度を1次元で簡略化して示している。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 2 】

【 数 1 7 】

$$I_i' = \operatorname{Re} \left[\left\{ \exp(ikL_1) + \exp(ikL_2) + \exp(ikL_3) \right\} \cdot \left\{ \exp(ikL_1) + \exp(ikL_2) + \exp(ikL_3) \right\}^* \right]$$

$$= \operatorname{Re} \left[3 + 2 \exp\{ik(L_2 - L_1)\} + 2 \exp\{ik(L_3 - L_2)\} + 2 \exp\{ik(L_3 - L_1)\} \right]$$

ここで、 L_1 、 L_2 、 L_3 は、それぞれ参照光、測定光、対象物の裏面からの反射光の光路長を表す。また、 k は波数 ($= 2\pi / \lambda$) を表している。

L_2 と L_1 の差、 L_3 と L_1 の差をそれぞれ L_{21} 、 L_{31} とすると、[数 1 7] は次式のように表現することができる。

【 0 0 7 3 】

【 数 1 8 】

$$I_i' = 3 + 2 \cos(k\Delta L_{21}) + 2 \cos\{k(\Delta L_{31} - \Delta L_{21})\} + 2 \cos(k\Delta L_{31})$$

$$= 3 + 2 \cos(k\Delta L_{21}) + 2 \cos(k\Delta L_{31}) + 2 \cos(k\Delta L_{21}) \cos(k\Delta L_{31}) + 2 \sin(k\Delta L_{21}) \sin(k\Delta L_{31})$$

CCDカメラの露光時間 T_e 内において中心波長 λ_0 を中心として波長走査幅 p で波長を変化させた場合に、各波長により発生する干渉縞画像の積分強度としての積分干渉縞強度 I_i が得られる。積分干渉縞強度 I_i は、次の式で表される。

【 0 0 7 4 】

【 数 1 9 】

$$I_i = \int_{-\Delta p/2}^{\Delta p/2} I_i' dp$$

$$= \int_{-\Delta p/2}^{\Delta p/2} [3 + 2 \cos(k\Delta L_{21}) + 2 \cos(k\Delta L_{31}) + 2 \cos(k\Delta L_{21}) \cos(k\Delta L_{31}) + 2 \sin(k\Delta L_{21}) \sin(k\Delta L_{31})] dp$$

なお、波長走査幅 p は、次の式で表される範囲で設定されるのが好適である。

【 0 0 7 5 】

【 数 2 0 】

$$\frac{\lambda^2}{\Delta L_{31}} < \Delta p < \frac{\lambda^2}{\Delta L_{21}}$$

波長走査幅 p は、可干渉距離 l と関連がある。上記 [数 2 0] を満たすように p が設定されることにより、可干渉距離 l よりも光路差 L_{31} を大きくし、かつ可干渉距離 l よりも光路差 L_{21} を小さくすることができる。これにより、裏面 502R からの反射光であるノイズ光の影響は低減又は除去される一方、表面 502S からの反射光 (測定光) は、消えることなく干渉縞画像を得ることができる。

【 0 0 7 6 】

ここで、参照光の光路長 L_1 と測定光の光路長 L_2 が略等しくなるように測定対象物 W の位置調整がなされていると考える。この場合、[数 1 9] の各項のうち、第 2 項のように L_{21} のみを含む項は、波長に関係なく略一定の強度となり、測定対象物 W の形状によって変化する強度となる。

【 0 0 7 7 】

一方、第 3 項のように L_{31} のみを含む項は、波長が走査されることで強度が変動するが、積分されると平均強度となり、 L_{31} とは無関係の強度となる。従ってこの第 3 項は、干渉縞強度 I において、バイアスを表す項となる。第 1 項の定数項も、バイアスを表す項となる。第 4 項、第 5 項は、測定対象物 W の形状に応じて変化する強度にバイアス成分が積算された強度となる。従って、[数 1 9] は、次式のように簡略化して表現することができる。

【 0 0 7 8 】

【 数 2 1 】

$$I_i \approx B_i + A_i \cos(k\Delta L_{21})$$

10

20

30

40

50

ただし、 B_i はバイアス、 A_i は振幅を表している。従って、裏面反射のノイズ光が存在する場合であっても、中心波長 λ_0 を中心として波長走査幅 $\Delta\lambda$ に亘って波長走査を行うことにより、積分された干渉縞画像が得られ、裏面反射の影響を除いて計測を行うことができる。

【0079】

さらに、このような計測を、3通り以上の中心波長 λ_0 、 $\lambda_0 + \Delta\lambda_1$ 、 \dots 、 $\lambda_0 + \Delta\lambda_j$ 各々において実行し、CCDカメラ316、318、320で干渉縞を撮像して実行することにより、測定対象物501の裏面からのノイズ光による影響を低減させつつ、干渉縞のバイアス、振幅及び位相シフト量を測定することができる。このバイアス、振幅及び位相シフト量の測定の方法を、以下において詳細に説明する。

10

【0080】

各CCDカメラ316、318及び320で得られる積分干渉縞強度 I_{ij} は、位相シフト量 ϕ_i の違いを考慮して、

【0081】

【数22】

$$I_{ij} \approx B_i + A_i \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_j} \Delta L_{21} + \delta\phi_i\right)$$

20

と表される。波長 λ_j を λ_0 から λ_j だけ変化させた場合において、 λ_0 に比べ λ_j が十分小さい場合には、次式で近似できる。

【0082】

【数23】

$$\begin{aligned} I_{ij} &\approx B_i + A_i \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0 + \Delta\lambda_j} \Delta L_{21} + \delta\phi_i\right) \\ &\approx B_i + A_i \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta L_{21} \left(1 - \frac{\Delta\lambda_j}{\lambda_0}\right) + \delta\phi_i\right) \end{aligned}$$

30

この式は、更に次のように変形することができる。

【0083】

【数24】

$$I_{ij} \approx B_i + A_i \cos(F_i + G\Delta\lambda_j)$$

ただし

$$F_i = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta L_{21} + \delta\phi_i$$

40

$$G = \frac{2\pi}{\lambda_0^2} \Delta L_{21}$$

【0084】

すなわち、中心波長 λ_0 を $\lambda_0 + \Delta\lambda_1$ 、 \dots 、 $\lambda_0 + \Delta\lambda_j$ とシフトさせた場合に1つのCCDカメラ316、318又は320で得られる積分干渉強度 I_{ij} は、位相が $G\Delta\lambda_j$ だけ位相が異なる波形として表現することができる。従って、波長シフト量 $\Delta\lambda_j$ を少なくとも3通りに変化させ、その異なる少なくとも3通りの波長シフト量それぞれについて、3つのCCDカメラ316、318及び320で撮像を行い、上記の実施の形態と同様に、バイアス B_i 、振幅 A_i 、及び位相シフト量 ϕ_i 等を演算することが

50

できる。また、第1の実施の形態で説明した[数4]のように位相シフト量を演算し、[数5]のようにしてバイアス B_i 、振幅 A_i 、及び位相シフト量 ϕ_i 等を演算することもできる。

一例として、1つの中心波長を $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$ とし、厚さ 4mm で屈折率 1.5 程度のガラス基板を測定対象物及び校正用基板とする場合、 $p = 0.1 \text{nm}$ 、 $\lambda_1 = 0.2 \text{nm}$ となるように波長をコントロールすればよく、市販の波長可変レーザで容易に実施可能である。

【0085】

以上干渉計の校正方法の実施例は、測定対象に代えて校正用基板を設置することで示した。複数の対象物を測定する場合に、校正用基板を設置して校正する代わりに、そのうちの1つまたはいくつかを使って、干渉計の校正を行っても良い。また、干渉計の観測領域よりも大きな対象物の形状を走査測定する場合には、対象物の一部の領域を使って校正を行い、そのときに得られた校正値を使って、他の領域を走査測定しても良い。いずれの場合にも、校正用基板を別途用いなくても良いこと以外は、解決すべき課題と手法はまったく同じである。

以上、発明の実施の形態を説明したが、本発明はこれらに限定されるものではなく、発明の趣旨を逸脱しない範囲内において、種々の変更、追加等が可能である。

【図面の簡単な説明】

【0086】

【図1】本発明の第1の実施の形態に係る干渉計の構成を示している。

【図2】図1の干渉計において、校正用基板502を測定した場合において生じる各種の光の強度を定義するものである。

【図3】図1の干渉計において、測定対象物501を測定した場合において生じる各種の光の強度を定義するものである。

【図4】本発明の第2の実施の形態に係る干渉計の構成を示している。

【図5】本発明の第3の実施の形態に係る干渉計の構成を示している。

【図6】本発明の第4の実施の形態に係る干渉計の構成を示している。

【図7】図6の高密度位相アレイ素子460の構造を示す。

【図8】本発明の第5の実施の形態に係る干渉計の構成を示している。

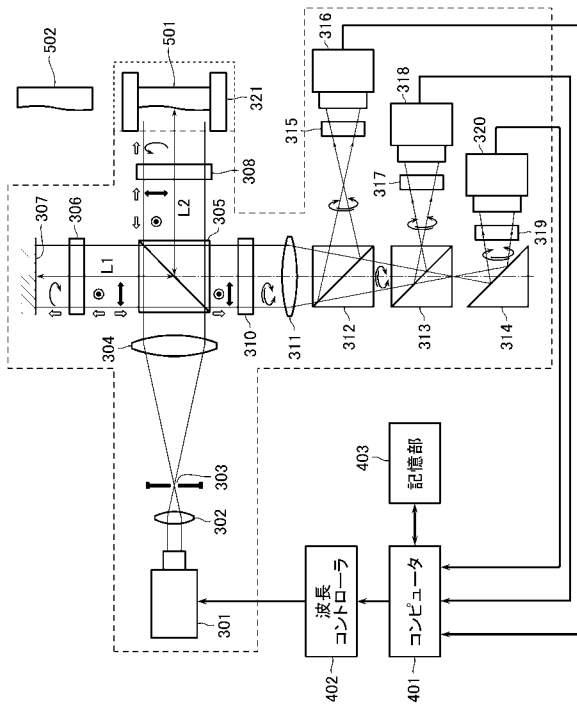
【図9】第5の実施の形態の波長可変レーザ301から出射される波長の範囲を示すグラフである。

【符号の説明】

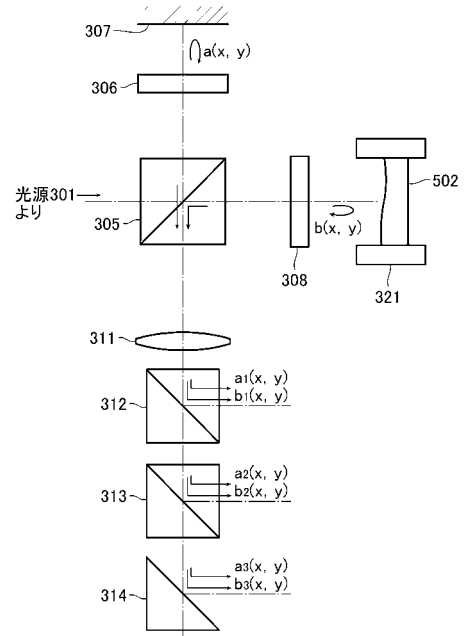
【0087】

301・・・波長可変レーザ、 302・・・集光レンズ、 303・・・ピンホール、 304・・・コリメータレンズ、 305・・・偏光ビームスプリッタ、 306、308、310・・・1/4波長板、 307・・・参照面、 311・・・結像レンズ、 312、313・・・ビームスプリッタ、 314・・・反射プリズム、 315、317、319、324・・・偏光板、 316、318、320、322、325・・・CCDカメラ、 321・・・治具、 323・・・回折格子、 501・・・測定対象物、 401・・・コンピュータ、 402・・・波長コントローラ、 403・・・記憶部、 501・・・測定対象物、 502・・・校正用基板。

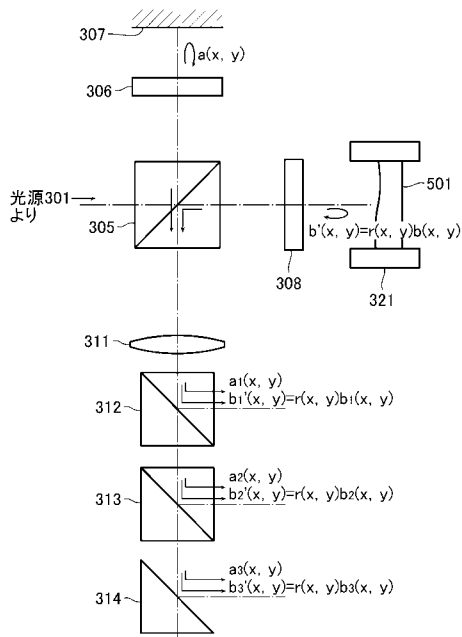
【図1】



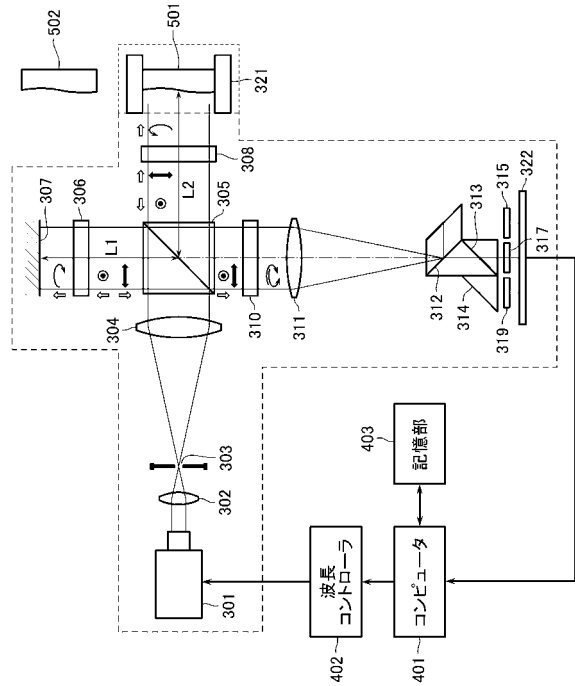
【図2】



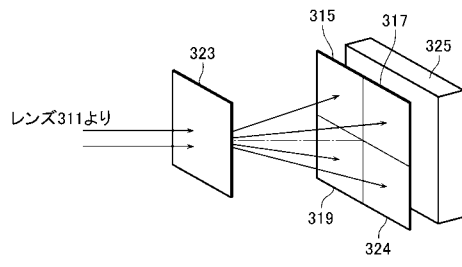
【図3】



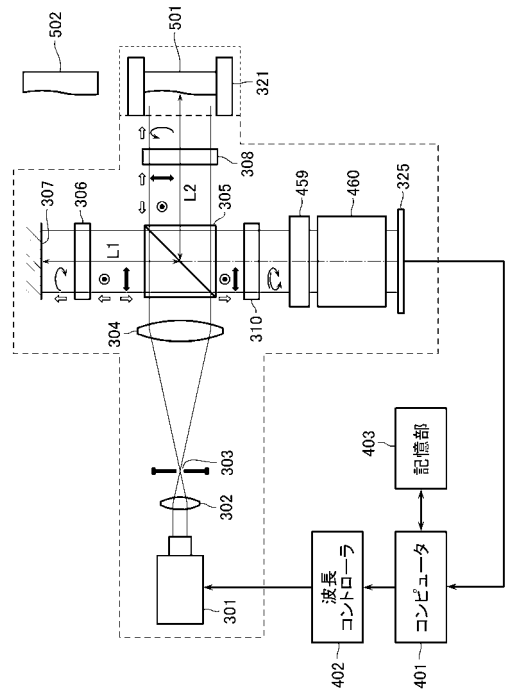
【図4】



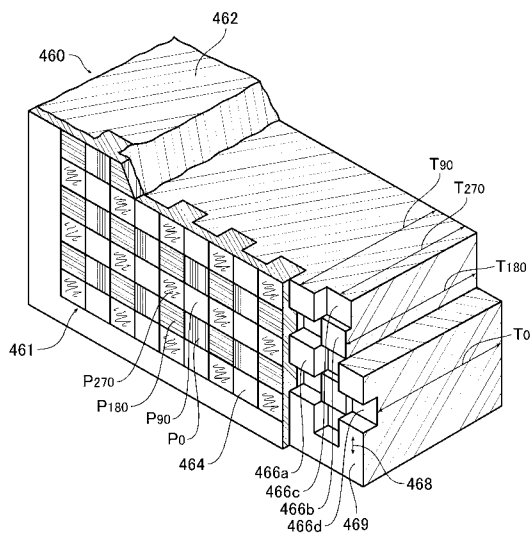
【図5】



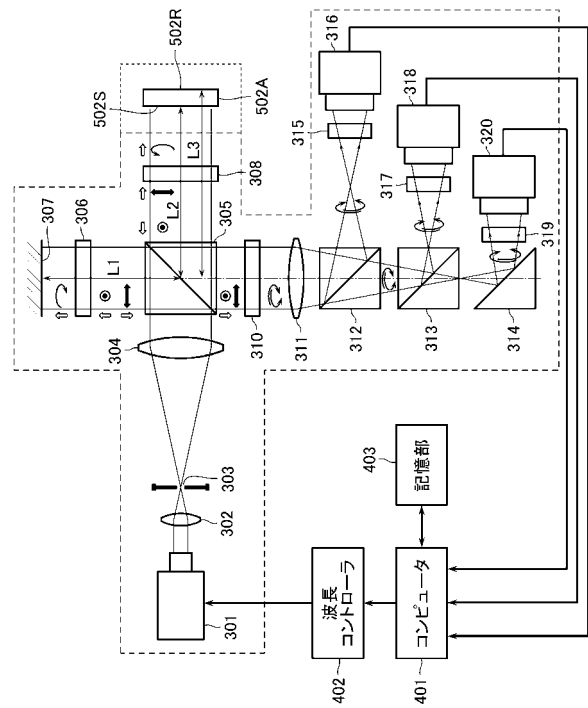
【図6】



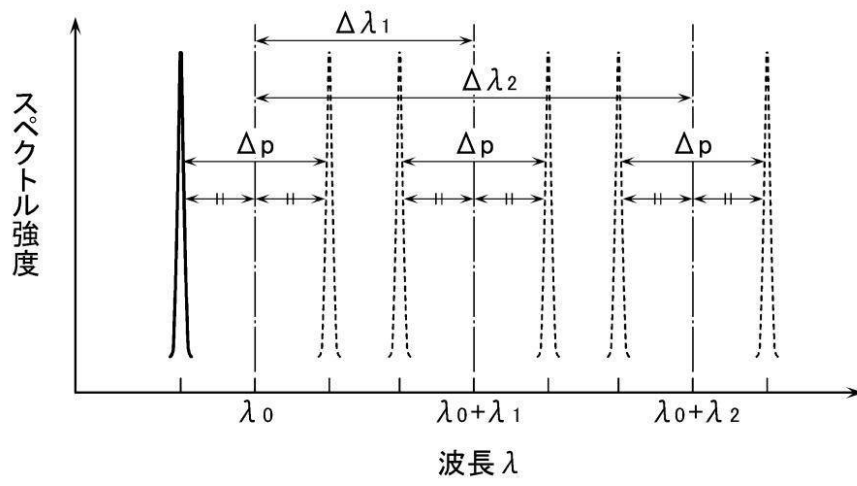
【図7】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(72)発明者 デイビッド ダブリュー セスコ
アメリカ合衆国 ワシントン州ウッディンヴィル 206番 アベニュー エヌ・イー 15123

合議体

審判長 飯野 茂

審判官 中塚 直樹

審判官 関根 洋之

(56)参考文献 特開2002-13907(JP,A)
特開2000-275021(JP,A)
特開2004-37165(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01B 9/02
G01B 11/00-11/30