

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02017/030194

発行日 平成30年6月7日 (2018.6.7)

(43) 国際公開日 平成29年2月23日 (2017.2.23)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G02B 21/06 (2006.01)	G02B 21/06	2H052
G02B 21/36 (2006.01)	G02B 21/36	

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 24 頁)

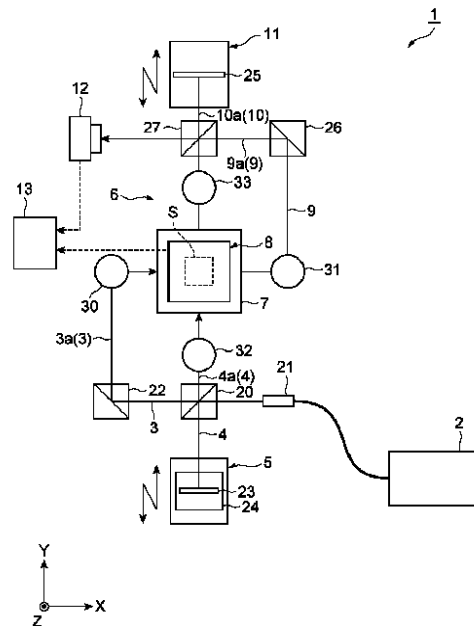
出願番号 特願2017-535578 (P2017-535578)	(71) 出願人 304023318 国立大学法人静岡大学 静岡県静岡市駿河区大谷836
(21) 国際出願番号 PCT/JP2016/074265	
(22) 国際出願日 平成28年8月19日 (2016.8.19)	
(31) 優先権主張番号 特願2015-161758 (P2015-161758)	(74) 代理人 100088155 弁理士 長谷川 芳樹
(32) 優先日 平成27年8月19日 (2015.8.19)	(74) 代理人 100124800 弁理士 諏澤 勇司
(33) 優先権主張国 日本国 (JP)	(72) 発明者 白杵 深 静岡県浜松市中区城北3丁目5-1 国立 大学法人静岡大学大学院総合科学技術研究 科工学専攻内
	(72) 発明者 ▲高▼田 智裕 静岡県浜松市中区城北3丁目5-1 国立 大学法人静岡大学大学院総合科学技術研究 科工学専攻内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 観察システム

(57) 【要約】

安価なシステムで、外乱が生じた場合であっても正しい高分解能画像を安定して得ることを目的とする。所定範囲のコヒーレント長を有する光源2と、光源2からの第1及び第2の光を観察対象物Sへ導く第1及び第2の光路3, 4と、第1及び第2の光による第1の干渉縞を生成させる干渉縞生成部6と、第1及び第2の光の内の観察対象物Sによる第1及び第2の反射光による第2の干渉縞の光強度分布を測定する測定部12と、第2の干渉縞の光強度分布の変位量に基づき第1の干渉縞における位相のシフト量を算出する演算部13と、を備える。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

所定範囲のコヒーレント長を有する光源と、

第 1 の光路長を有し、前記光源から発せられる光の一部である第 1 の光を前記光源から観察対象物へ導く第 1 の光路と、

第 2 の光路長を有し、前記光の残部である第 2 の光を前記光源から前記観察対象物へ導く第 2 の光路と、

前記第 1 の光及び前記第 2 の光を干渉させて前記観察対象物上に第 1 の干渉縞を生成させる干渉縞生成部と、

前記第 1 の光の内の前記観察対象物によって反射された第 1 の反射光と、前記第 2 の光の内の前記観察対象物によって反射された第 2 の反射光との干渉によって生成される第 2 の干渉縞の光強度分布を測定する測定部と、

前記測定部に接続された演算部と、

を備え、

前記演算部は、

前記第 2 の干渉縞における前記光強度分布の変位量に基づいて前記第 1 の干渉縞における位相のシフト量を算出する、

観察システム。

10

【請求項 2】

前記第 1 の光路長又は前記第 2 の光路長を伸縮させる第 1 の光路長調整部と、

前記第 1 の干渉縞を呈する前記第 1 の光及び前記第 2 の光の内の前記観察対象物によって散乱された光の像分布を撮像する撮像部と、

第 3 の光路長を有し、前記第 1 の反射光を導く第 3 の光路と、

第 4 の光路長を有し、前記第 2 の反射光を導く第 4 の光路と、をさらに備え、

前記測定部は、前記第 3 の光路及び前記第 4 の光路の終端に設けられ、

前記演算部は、前記撮像部にも接続され、前記シフト量に応じた前記位相と、当該位相を有する前記第 1 の干渉縞に対応した前記像分布と、に基づいて前記観察対象物の形状分布を算出する、

請求項 1 記載の観察システム。

20

【請求項 3】

前記演算部は、

互いに異なる少なくとも 3 つの前記位相と、これらの前記位相をそれぞれ有する少なくとも 3 つの前記第 1 の干渉縞に対応した少なくとも 3 つの前記像分布と、に基づいて前記観察対象物の形状分布を算出する、

請求項 2 記載の観察システム。

30

【請求項 4】

前記測定部は、互いに異なる少なくとも 3 つの前記位相に対応する前記シフト量が前記演算部によって算出されるまで、前記光強度分布の測定を継続する、請求項 3 記載の観察システム。

【請求項 5】

前記干渉縞生成部は、

前記第 1 の光路の終端に設けられ、前記第 1 の光を前記観察対象物上へ投光する第 1 の投光部と、

前記第 3 の光路の始端に設けられ、前記観察対象物を介して前記第 1 の投光部と対向する位置に配置され、前記第 1 の反射光を受光する第 1 の受光部と、

前記第 2 の光路の終端に設けられ、前記第 2 の光を前記観察対象物上へ投光する第 2 の投光部と、

前記第 4 の光路の始端に設けられ、前記観察対象物を介して前記第 2 の投光部と対向する位置に配置され、前記第 2 の反射光を受光する第 2 の受光部と、

を有する、

40

50

請求項 2 ~ 4 の何れか一項記載の観察システム。

【請求項 6】

前記第 1 の投光部から前記第 1 の受光部へ前記第 1 の光が進行する第 1 の方向と、前記第 2 の投光部から前記第 2 の受光部へ前記第 2 の光が進行する第 2 の方向と、が前記観察対象物に対する平面視において略直交する、

請求項 5 記載の観察システム。

【請求項 7】

前記第 3 の光路長又は前記第 4 の光路長を伸縮させる第 2 の光路長調整部を更に備える、

請求項 2 ~ 6 の何れか一項記載の観察システム。

10

【請求項 8】

前記所定範囲のコヒーレント長は、レーザ光源のコヒーレント長より短い、

請求項 1 ~ 7 の何れか一項記載の観察システム。

【請求項 9】

前記所定範囲のコヒーレント長は、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $100\ \mu\text{m}$ 以下である、

請求項 1 ~ 8 の何れか一項記載の観察システム。

【請求項 10】

前記光源は、SLD光源又はLED光源である、

請求項 1 ~ 9 の何れか一項記載の観察システム。

【請求項 11】

前記測定部は、ラインセンサである、

請求項 1 ~ 10 の何れか一項記載の観察システム。

20

【請求項 12】

前記観察対象物から前記撮像部へ向かう軸線回りに回転可能に前記観察対象物を保持する回転台を更に備える、請求項 2 ~ 7 の何れか一項記載の観察システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、観察システムに関する。

【背景技術】

30

【0002】

従来、光学顕微鏡を用いて高い空間分解能を実現する顕微法として、変調照明顕微法 (SIM: Structured Illumination Microscopy) が知られている。変調照明顕微法では、観察対象物について計測、外観検査等といった観察を行う場合、縞模様の光強度分布を有する光 (変調照明) を観察対象物へ照射し、これにより引き起こされるモアレ効果によって、光学顕微鏡の回折限界よりも高い空間周波数の情報を低周波側にシフトさせる。そして、その情報を有する像分布を光学顕微鏡により取得し、その像分布に対して信号処理を行うことで高周波の情報を再現する。このようにして、変調照明顕微法を用い高分解能画像を得ることができる。

【0003】

40

変調照明顕微法を用いた観察システムとして、例えば非特許文献 1 には、レーザ光源と、レーザ光源から発せられるレーザ光の一部を観察対象物へ導く光路と、レーザ光の残部を観察対象物へ導く別の光路と、上記光路の光路長を伸縮させるステージと、を備える観察システムが開示されている。この観察システムでは、レーザ光の一部及び残部を干渉させて観察対象物上に干渉縞を生成させ、観察対象物により散乱された光を撮像し、撮像された像分布に基づいて観察対象物の形状分布を算出している。

【0004】

ところで、この観察システムは、互いに異なる位相を有する干渉縞を生成するために、ステージを動作させて各光路の光路長差を増減させる。しかしながら、この観察システムでは、光源としてコヒーレント長の長いレーザ光源を用いるため、干渉縞と、その位相が

50

1 波長シフトする毎に生成される干渉縞と、を外観上見分けることは困難である（波長毎の不確定性）。一方、観察対象物の形状分布を正しく算出するためには、干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出する必要がある。そこで、この観察システムでは、ステージの駆動にピエゾアクチュエータを用いることで、ステージを微小な変位量で精密に駆動可能とし、干渉縞の位相を精度良く制御して当該位相のシフト量を精度良く検出している。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】臼杵深、高田智裕、三浦憲二郎、「2014年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集」、2014年、p.69-70

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ところで、変調照明顕微鏡は、光学顕微鏡を用いた観察方法であることから、他の顕微鏡法に比較して観察に要する時間が短く、且つ、非破壊での検査が可能であるという利点を有しているため、例えば工場の生産現場等においても実施されることが望まれている。しかしながら、生産現場等では、実験室等に比較して振動や温度変化といった外乱が生じ易い。このため、上記の観察システムでは、例えば振動により各光路の光路差が変動したり、温度変化により温度ドリフトが生じたりする場合がある。このような場合、干渉縞と観察対象物とが相対的に移動してしまい、波長毎の不確定性のために干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することが困難となり、その結果、正しい高分解能画像を安定して得ることが難しくなる。このような事情から、変調照明顕微鏡は、外乱の生じ難い実験室等における生物学分野の蛍光観察においてのみ実施されている。

20

【0007】

また、変調照明顕微鏡は、干渉縞の位相を精度良く検出するためにピエゾアクチュエータ等の高精度な位置決め機構を必要とするため、一般に高価であり、より安価に提供されることが望まれている。

【0008】

本発明の一形態は、上記課題に鑑みて為されたものであり、安価で、外乱が生じた場合であっても正しい高分解能画像を安定して得ることが可能な観察システムを提供することを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記課題を解決するため、本発明の一側面の観察システムは、所定範囲のコヒーレント長を有する光源と、第1の光路長を有し、光源から発せられる光の一部である第1の光を光源から観察対象物へ導く第1の光路と、第2の光路長を有し、光の残部である第2の光を光源から観察対象物へ導く第2の光路と、第1の光及び第2の光を干渉させて観察対象物上に第1の干渉縞を生成させる干渉縞生成部と、第1の光の内の観察対象物によって反射された第1の反射光と、第2の光の内の観察対象物によって反射された第2の反射光との干渉によって生成される第2の干渉縞の光強度分布を測定する測定部と、測定部に接続された演算部と、を備え、演算部は、第2の干渉縞における光強度分布の変位量に基づいて第1の干渉縞における位相のシフト量を算出する。

40

【0010】

このような観察システムによれば、光源から観察対象物へ第1の光路によって導かれた第1の光、及び、光源から観察対象物へ第2の光路によって導かれた第2の光が干渉縞生成部によって干渉し第1の干渉縞が生成される。一方、第1の光の内の観察対象物によって反射された第1の反射光と、第2の光の内の観察対象物によって反射された第2の反射光とが干渉し第2の干渉縞が生成され、その第2の干渉縞の光強度分布が測定部によって測定される。光源は所定範囲のコヒーレント長を有するため、第2の干渉縞の光強度分布は、その包絡線に一つのピークを有している。第2の干渉縞の光強度分布の変位量は、包

50

絡線のピークの変位量を測定することによって取得される。従って、第1の干渉縞の位相が1波長以上シフトした場合であっても、第1の干渉縞における波長毎の不確定性の影響を受けず、第2の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの変位量に基づいて第1の干渉縞の位相のシフト量を検出することができる。また、例えば振動や温度変化といった外乱が生じた場合であっても、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することができる。これにより、演算部は、観察対象物の形状分布を正しく算出できる。更に、この観察システムは、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出するためにピエゾアクチュエータ等の高精度な位置決め機構を必要とせず、一例としてステップモータを利用したアクチュエータ等の比較的精度の低い位置決め機構を用いることが可能であるため、安価に提供される。以上により、安価なシステムによって、外乱が生じた場合であっても正しい高分解能画像を安定して得ることが可能となる。

10

【発明の効果】

【0011】

本発明の一側面によれば、安価なシステムによって、外乱が生じた場合であっても正しい高分解能画像を安定して得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】本発明の実施形態に係る観察システムを示す概略構成図である。

【図2】図1の干渉縞生成部を示す概略側面図である。

【図3】図1の干渉縞生成部を示す概略側面図である。

20

【図4】低コヒーレンス光による第1の干渉縞の形状特性を示す図である。

【図5】図4の部分拡大図である。

【図6】測定部によって測定された光強度分布を示す図である。

【図7】周波数空間における顕微鏡の通過帯域を示す図である。

【図8】変調照明により周波数空間において3方向へ移動した通過帯域を示す図である。

【図9】観察対象物の一例を示す図である。

【図10】撮像部によって撮像された像分布を示す図である。

【図11】図10の像分布に対しフーリエ変換を行った画像を示す図である。

【図12】図11の画像に対し干渉系情報による周波数分離を行った画像を示す図である。

30

【図13】画像再構成を行った高分解能画像を示す図である。

【図14】従来の観察システムを示す概略構成図である。

【発明を実施するための形態】

【0013】

以下、図面を参照しつつ本発明に係る観察システムの好適な実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明においては、同一又は相当部分には同一符号を付し、重複する説明を省略する。

【0014】

図1は、本発明の実施形態に係る観察システムを示す概略構成図、図2及び図3は、図1の干渉縞生成部を示す概略側面図である。図1に示すように、観察システム1は、変調照明顕微法を用い、観察対象物Sの高分解能画像を得ることが可能な変調照明顕微鏡である。観察システム1は、光源2と、光源2から発せられる光を導く第1の光路3及び第2の光路4と、第2の光路4の途中に設けられた第1の光路長調整部5と、第1の光路3及び第2の光路4の終端に設けられた干渉縞生成部6と、観察対象物Sが載置される回転台7と、回転台に載置された観察対象物Sを撮像する撮像部8と、干渉縞生成部6から出力される光を導く第3の光路9及び第4の光路10と、第4の光路10の途中に設けられた第2の光路長調整部11と、第3の光路9及び第4の光路10の終端に設けられた測定部12と、撮像部8及び測定部12からの情報に基づき観察対象物Sの形状分布を算出する演算部13と、を備えている。

40

【0015】

50

光源 2 は、低コヒーレンス光源である。低コヒーレンス光源から発せられる光（低コヒーレンス光）は、例えばレーザ光に比較してスペクトル幅が広く、可干渉距離（コヒーレント長）が短い。すなわち、光源 2 は、長い（例えば、数十 m 程度）コヒーレント長を有するレーザ光源に比較して短い（例えば、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $100\ \mu\text{m}$ 以下）コヒーレント長を有する光源である。光源 2 は、例えば SLD（Super Luminescent Diode）光源、LED（Light Emitting Diode）光源等とすることができる。本実施形態では、光源 2 は、波長 $669\ \text{nm}$ 、スペクトル半値全幅 $7\ \text{nm}$ 、コヒーレント長 $32\ \mu\text{m}$ の SLD である。

【0016】

第 1 の光路 3 は、第 1 の光路長を有し、光源 2 から発せられる光の一部である第 1 の光を光源 2 から観察対象物 S へ導く光路である。第 2 の光路 4 は、第 2 の光路長を有し、光源 2 から発せられる光の残部である第 2 の光を光源 2 から観察対象物 S へ導く光路である。第 1 の光及び第 2 の光は、光源 2 から発せられ、光路上に設けられたビームスプリッタ 20 によって互いに分岐され、各々干渉縞生成部 6 に至る。第 1 の光及び第 2 の光は、光源 2 からビームスプリッタ 20 までの間においては、互いに区別なく同一の光路とされている。ここでは、第 1 の光はビームスプリッタ 20 を透過する光であり、第 2 の光はビームスプリッタ 20 により反射される光である。第 1 の光路 3 及び第 2 の光路 4 は、光源 2 からビームスプリッタ 20 までの間にコリメートレンズ 21 を備えている。これにより、第 1 の光路 3 及び第 2 の光路 4 を各々進行する第 1 の光及び第 2 の光は、コリメートレンズ 21 によって平行光とされる。

【0017】

第 1 の光路 3 には、ビームスプリッタ 20 の出射側に別のビームスプリッタ 22 が設けられている。第 1 の光路 3 は、ビームスプリッタ 22 の出射側に、ビームスプリッタ 22 により反射された光の光路 3 a を有する。これにより、第 1 の光路 3 を進行する第 1 の光は、ビームスプリッタ 20 を透過した後、ビームスプリッタ 22 により反射され、その後、干渉縞生成部 6 に入力される。

【0018】

第 2 の光路 4 を進行する第 2 の光は、ビームスプリッタ 20 の出射側で第 1 の光路長調整部 5 に到達し、第 1 の光路長調整部 5 にて折り返されて再びビームスプリッタ 20 に到達する。第 2 の光路 4 は、ビームスプリッタ 20 の折り返された光の出射側に、ビームスプリッタ 20 を透過した第 2 の光の光路 4 a を有する。これにより、第 2 の光路 4 を進行する第 2 の光は、ビームスプリッタ 20 により一度反射され、第 1 の光路長調整部 5 にて折り返された後、ビームスプリッタ 20 を透過し、その後、干渉縞生成部 6 に入力される。このように、第 1 の光及び第 2 の光は、何れもビームスプリッタを一度透過し、且つ、一度反射されるため、干渉縞生成部 6 に至るときには、互いに略同等の光強度となっている。

【0019】

第 1 の光路長調整部 5 は、ミラー 23 と、ミラー 23 を移動させるモジュレータ 24 と、を有している。第 1 の光路長調整部 5 は、第 2 の光路 4 を進行する第 2 の光をミラー 23 で反射させて折り返させると共に、モジュレータ 24 によりミラー 23 を移動させて第 2 の光路長を伸縮させる機構である。

【0020】

モジュレータ 24 は、ミラー 23 を第 2 の光路 4 に沿って往復移動させる。これにより、モジュレータ 24 は、ビームスプリッタ 20 とミラー 23 との間の距離を伸縮させ、その結果、第 2 の光路長を伸縮させる。モジュレータ 24 としては、 piezoelectric actuator 等の極めて高精度に変位量を制御可能なモジュレータに限らず、 piezoelectric actuator 等に比較して変位量の制御の精度が低いステッピングモータを利用したアクチュエータ等を用いることもできる。なお、モジュレータ 24 は、ステッピングモータを利用したアクチュエータ等に限定されず、ミラー 23 を第 2 の光路 4 に沿って移動可能な機構であればよい。

【0021】

10

20

30

40

50

回転台 7 は、観察対象物 S を保持するステージを含み、そのステージが水平面（図中の X - Y 平面）内に位置するように配置されて構成される。回転台 7 は、観察対象物 S の観察しようとする面が上向きとなるように、観察対象物 S をステージ上に保持する。回転台 7 は、ステージを鉛直方向（図中の Z 軸方向）の軸線 A 回りに回転可能とする。従って、ステージ上に載置された観察対象物 S は、ステージにより鉛直方向の軸線 A 回りに回転可能に保持される。なお、軸線 A は、必ずしも鉛直方向に限らず、観察対象物 S から撮像部 8 へ向かう方向であればよい。この場合、回転台 7 は、ステージが軸線 A に対する垂直平面上に位置し、観察対象物 S の観察しようとする面が撮像部 8 側を向くように配置されればよい。

【 0 0 2 2 】

干渉縞生成部 6 は、第 1 の光及び第 2 の光を干渉させて観察対象物 S 上に第 1 の干渉縞を生成させる。干渉縞生成部 6 によって生成された第 1 の干渉縞が、観察システム 1 における変調照明（すなわち、光の干渉を用いた定在波照明）として利用される。図 4 は、低コヒーレンス光による第 1 の干渉縞の形状特性を示す図、図 5 は、図 4 の部分拡大図である。ここでは、光源 2 として低コヒーレンス光源を用いているため、第 1 の干渉縞は、低コヒーレンス光源のコヒーレント長程度の範囲（例えば、30 μ m 程度の範囲）で生成されており（図 4 参照）、一定の周期で強度が変化している（図 5 参照）。干渉縞生成部 6 は、回転台 7 を取り囲むように配置された第 1 の投光部 3 0、第 1 の受光部 3 1、第 2 の投光部 3 2 及び第 2 の受光部 3 3 を有する。

【 0 0 2 3 】

第 1 の投光部 3 0 は、第 1 の光路 3 の終端に設けられており、観察対象物 S に対し第 1 の光を斜め上方から投光する。第 1 の投光部 3 0 は、ミラー 3 0 a 及びミラー 3 0 b を含み、略水平方向に進行する第 1 の光を、ミラー 3 0 a によって略鉛直方向の上方に反射させた後、ミラー 3 0 b によって斜め下方に反射させ、観察対象物 S に対し投光する。一例として、第 1 の投光部 3 0 は、観察対象物 S に対する入射角（すなわち、観察対象物 S に対して投光される第 1 の光の光路と、軸線 A と、のなす角度）が 45 deg となるように第 1 の光を投光する。なお、第 1 の光の入射角の下限は、対物レンズ 3 4 によって第 1 の光の光路が妨げられない範囲の最小の角度である。また、第 1 の投光部 3 0 は、ミラーを用いた構成に限定されず、例えば、第 1 の光路 3 を、光ファイバーによって屈曲させることによって、観察対象物 S に対し斜め上方から投光する構成としてもよい。

【 0 0 2 4 】

第 1 の受光部 3 1 は、第 3 の光路 9（詳しくは後述）の始端に設けられており、第 1 の光の内の観察対象物 S によって反射された第 1 の反射光を、観察対象物 S に対し斜め上方にて受光する。第 1 の受光部 3 1 は、観察対象物 S を介して第 1 の投光部 3 0 と対向する位置に配置されている。第 1 の受光部 3 1 は、ミラー 3 1 a 及びミラー 3 1 b を含み、観察対象物 S から受光した第 1 の反射光を、ミラー 3 1 a によって略鉛直方向の下方に反射させた後、ミラー 3 1 b によって略水平方向に反射させ、第 3 の光路 9 へ出力する。なお、第 1 の受光部 3 1 は、ミラーを用いた構成に限定されず、例えば、観察対象物 S に対し斜め上方にて第 1 の反射光を受光し、光ファイバーによって屈曲させることによって、第 3 の光路 9 へ出力する構成としてもよい。

【 0 0 2 5 】

第 2 の投光部 3 2 は、第 2 の光路 4 の終端に設けられており、観察対象物 S に対し第 2 の光を斜め上方から投光する。第 2 の投光部 3 2 は、ミラー 3 2 a 及びミラー 3 2 b を含み、略水平方向に進行する第 2 の光を、ミラー 3 2 a によって略鉛直方向の上方に反射させた後、ミラー 3 2 b によって斜め下方に反射させ、観察対象物 S に対し投光する。一例として、第 2 の投光部 3 2 は、観察対象物 S に対する入射角（すなわち、観察対象物 S に対して投光される第 2 の光と、軸線 A と、のなす角度）が 45 deg となるように第 2 の光を投光する。なお、第 2 の光の入射角の下限は、対物レンズ 3 4 によって第 2 の光の光路が妨げられない範囲の最小の角度である。また、第 2 の投光部 3 2 は、ミラーを用いた構成に限定されず、例えば、第 2 の光路 4 を、光ファイバーによって屈曲させることによ

10

20

30

40

50

って、観察対象物 S に対し斜め上方から投光する構成としてもよい。

【0026】

第2の受光部33は、第4の光路10（詳しくは後述）の始端に設けられており、第2の光の内の観察対象物 S によって反射された第2の反射光を、観察対象物 S に対し斜め上方にて受光する。第2の受光部33は、観察対象物 S を介して第2の投光部32と対向する位置に配置されている。第2の受光部33は、ミラー33a及びミラー33bを含み、観察対象物 S から受光した第2の反射光を、ミラー33aによって略鉛直方向の下方に反射させた後、ミラー33bによって略水平方向に反射させ、第4の光路10へ出力する。なお、第2の受光部33は、ミラーを用いた構成に限定されず、例えば、観察対象物 S に対し斜め上方にて第2の反射光を受光し、光ファイバーによって屈曲させることによって、第4の光路10へ出力する構成としてもよい。

10

【0027】

干渉縞生成部6において、第1の投光部30から第1の受光部31へ第1の光が進行する第1の方向（図中のX軸方向）と、第2の投光部32から第2の受光部33へ第2の光が進行する第2の方向（図中のY軸方向）と、は観察対象物 S に対する平面視（図中のZ軸方向視）において略直交する。また、干渉縞生成部6において、各投光部及び各受光部に設けられたミラー30a, 30b, 31a, 31b, 32a, 32b, 33a, 33bは可動とされ、観察対象物 S の最適な位置に第1の光及び第2の光を投光可能である。

【0028】

第1の投光部30及び第2の投光部32によって各々観察対象物 S 上に投光される第1の光及び第2の光は、観察対象物 S 上において第1の干渉縞を生成する。第1の光路3及び第2の光路4は、各々第1の光路長及び第2の光路長を有しており、第1の干渉縞は、これら第1の光路長及び第2の光路長の光路長差に応じて位相が異なる。従って、第1の光路長調整部5の動作によって第2の光路長が伸縮すると、第1の光路長及び第2の光路長の光路長差が伸縮し、第1の干渉縞の位相がシフトする。

20

【0029】

撮像部8は、第1の干渉縞を呈する第1の光及び第2の光の内の観察対象物 S によって散乱された光の像分布を撮像する。撮像部8は、回転台7のZ軸方向上方に配置され、観察対象物 S を上方から撮像する。撮像部8は、散乱光の像を拡大するための対物レンズ34及び光学顕微鏡35と、拡大された散乱光の像を像分布として検出する検出器36と、を備えている。対物レンズ34としては、例えば10倍（NA0.28）、20倍（NA0.28）、50倍（NA0.42）、100倍（NA0.55）等の対物レンズを好適に用いることができる。また、検出器36としては、例えばCCDカメラ等を用いることができる。

30

【0030】

第3の光路9は、第3の光路長を有し、第1の光の内の観察対象物 S によって反射された第1の反射光を測定部12へ導く光路である。第4の光路10は、第4の光路長を有し、第2の光の内の観察対象物 S によって反射された第2の反射光を測定部12へ導く光路である。

【0031】

第3の光路9には、その始端に第1の受光部31が設けられ、その出射側にビームスプリッタ26が設けられている。第3の光路9は、ビームスプリッタ26の出射側に、ビームスプリッタ26により反射された第1の反射光の光路9aを有する。また、第3の光路9には、ビームスプリッタ26の出射側に別のビームスプリッタ27が設けられている。第3の光路9は、ビームスプリッタ27の出射側に、ビームスプリッタ27を透過した第1の反射光の光路を有する。これにより、第3の光路9を進行する第1の反射光は、ビームスプリッタ26により反射された後、ビームスプリッタ27を透過し、その後、測定部12へ入力される。

40

【0032】

第4の光路10には、その始端に第2の受光部33が設けられ、その出射側にビームス

50

プリッタ 27 が設けられている。第 4 の光路 10 は、ビームスプリッタ 27 の出射側に、ビームスプリッタ 27 を透過した第 2 の反射光の光路 10 a を有する。また、第 4 の光路 10 を進行する第 2 の反射光は、ビームスプリッタ 27 の出射側で第 2 の光路長調整部 11 に到達し、第 2 の光路長調整部 11 にて折り返されて再びビームスプリッタ 27 に到達する。第 4 の光路 10 は、ビームスプリッタ 27 の折り返された光の出射側に、ビームスプリッタ 27 により反射された第 2 の反射光の光路を有する。これにより、第 4 の光路 10 を進行する第 2 の反射光は、ビームスプリッタ 27 を一度透過し、第 2 の光路長調整部 11 にて折り返された後、ビームスプリッタ 27 にて反射され、その後、測定部 12 に入力される。このように、第 1 の反射光及び第 2 の反射光は、何れもビームスプリッタを一度透過し、且つ、一度反射されるため、測定部 12 に至るときには、互いに略同等の光強度となっている。

10

【 0 0 3 3 】

第 2 の光路長調整部 11 は、可動式のミラー 25 を有している。第 2 の光路長調整部 11 は、第 4 の光路 10 を進行する第 2 の反射光をミラー 25 で反射させて折り返させると共に、ミラー 25 を移動させて第 4 の光路長を伸縮させる機構である。第 2 の光路長調整部 11 は、ミラー 25 を移動させることによりビームスプリッタ 27 とミラー 25 との間の距離を伸縮させ、その結果、第 4 の光路長を伸縮させる。なお、第 2 の光路長調整部 11 は、ミラー 23 の移動を手動で行う構成としてもよく、或いは、ステップングモータを利用したアクチュエータ等を用いて電動で行う構成としてもよい。

20

【 0 0 3 4 】

測定部 12 は、第 3 の光路 9 及び第 4 の光路 10 の終端に設けられ、第 1 の反射光及び第 2 の反射光の干渉によって生成される第 2 の干渉縞の光強度分布を測定する。測定部 12 は、本実施形態においては、第 2 の干渉縞の光強度分布を 2 次元的に測定可能なエリアセンサである。

【 0 0 3 5 】

第 2 の干渉縞は、第 1 の光における光源 2 から測定部 12 までの光路長と、第 2 の光における光源 2 から測定部 12 までの光路長と、の光路差に応じて、光強度分布が位相方向（すなわち、各縞に直交する方向）に変位する。このため、第 1 の光における光源 2 から測定部 12 までの光路長と、第 2 の光における光源 2 から測定部 12 までの光路長と、の光路差に変化が生じた場合、その変化量は、第 2 の干渉縞の光強度分布の基準位置からの変位量に基づいて算出可能である。図 6 は、測定部によって測定された光強度分布を示す図である。図 6 では、第 1 の光路長調整部 5 により第 2 の光路長を伸縮させたときの第 2 の干渉縞の光強度分布の変位を示している。図 6 の (a) は、第 2 の光路長を任意の値（初期値）としたときの第 2 の干渉縞の光強度分布を示しており、図 6 の (b) は、第 2 の光路長が初期値から $0.1 \mu\text{m}$ 変化するように第 1 の光路長調整部 5 を操作したときの第 2 の干渉縞の光強度分布を示しており、図 6 の (c) は、第 2 の光路長が初期値から $0.2 \mu\text{m}$ 変化するように第 1 の光路長調整部 5 を操作したときの第 2 の干渉縞の光強度分布を示している。

30

【 0 0 3 6 】

上述したように、第 3 の光路長及び第 4 の光路長が変化しない場合、第 2 の干渉縞の光強度分布の変位量に基づいて、第 1 の光路長及び第 2 の光路長の光路長差の変化量を算出可能である。また、第 1 の光路長及び第 2 の光路長の光路長差の変化量に応じて、第 1 の干渉縞の位相がシフトする。以上により、第 2 の干渉縞の光強度分布の変位量を測定することにより、第 1 の干渉縞の位相の正確なシフト量を得ることが可能である。

40

【 0 0 3 7 】

演算部 13 は、撮像部 8 及び測定部 12 に接続され、撮像部 8 によって撮像された像分布と、測定部 12 によって測定された第 2 の干渉縞の光強度分布と、を取得する。そして、演算部 13 は、第 2 の干渉縞における光強度分布の変位量に基づいて第 1 の干渉縞における位相のシフト量を算出する。また、演算部 13 は、算出した第 1 の干渉縞における位相のシフト量に応じた位相と、当該位相を有する第 1 の干渉縞を呈する第 1 の光及び第 2

50

の光の内の観察対象物 S によって散乱された光の像分布と、に基づいて観察対象物 S の形状分布を算出する。

【 0 0 3 8 】

具体的には、演算部 1 3 は、変調照明顕微法に基づき、観察対象物 S の形状分布を算出するために以下の処理を行う。図 7 は、周波数空間における顕微鏡の通過帯域を示す図、図 8 は、変調照明により周波数空間において 3 方向へ移動した通過帯域を示す図である。図 7 において k_x 及び k_y は周波数空間座標系であり、円の内側が顕微鏡で解像できる周波数であることを概念的に表している。図 7 の (a) は、空間周波数における顕微鏡の通過帯域を表し、原点から k_1 離れた周波数まで解像できることを表している。図 7 の (b) は、変調照明による通過帯域の移動を表している。観察対象物 S に対し干渉縞生成部 6 によって生成された第 1 の干渉縞が照射されると、観察対象物 S によって散乱された光の像分布では、通過帯域が周波数空間座標系の原点から k_2 だけ離れた位置に移動している。これにより、顕微鏡の分解能は、 k_2 の矢印正方向において $k_1 + k_2$ に分解能が向上することとなる一方、 k_2 の矢印負方向において $k_1 - k_2$ に分解能が低下することとなる。このように、第 1 の干渉縞として一方向の縞模様のみを用いた場合には、通過帯域が移動するのみであり全体として高分解能画像を得ることはできない。そこで、図 8 に示すように、観察システム 1 では、第 1 の干渉縞として複数方向（ここでは、3 方向）の縞模様を用い、且つ、各々正負両方向に通過帯域を移動させている。これにより、周波数空間座標系における略全方向へ通過帯域が拡張され、顕微鏡の分解能が向上することとなる。

【 0 0 3 9 】

ただし、このようにして得られる像分布は、モアレ効果により得られたモアレ信号であり、この像分布から直接高周波成分を得ることはできない。そこで、下記式 (1) を解いて画像の再構成処理を行う。ここで、 k は空間周波数、 f_m は変調照明の空間周波数、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ は変調照明の互いに異なる 3 つの位相であり、 $D(k)$ は結像帯域、 $OFT(k)$ は光学的伝達関数、 $S(k)$ は観察対象物帯域を表す。 $OFT(k)$ は、顕微鏡の対物レンズ 3 4 や光源波長等により定められる点像分布関数を、フーリエ変換により周波数空間で表したものである。下記式 (1) によれば、観察対象物帯域を高周波側に $\pm f_m$ だけ平行移動させた情報が得られる。下記式 (1) は、 $S(k), S(k - f_m), S(k + f_m)$ の 3 つの未知数が含まれているため、3 つの変調照明に対応した 3 つの像分布を取得することにより $D_1(k), D_2(k), D_3(k)$ を得て、3 つの方程式を連立させるものである。このようにして得られた $S(k), S(k - f_m), S(k + f_m)$ を適切な重みづけを行い足し合わせることで、数値計算により高分解能画像が再構成される。以上より、変調照明顕微法を用いて高分解能画像を得るためには、第 1 の干渉縞 (変調照明) の位相を正しく検出することが必要であることがわかる。

【 数 1 】

$$\begin{bmatrix} D_1(k) \\ D_2(k) \\ D_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \exp(i\theta_1) & \frac{1}{4} \exp(-i\theta_1) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \exp(i\theta_2) & \frac{1}{4} \exp(-i\theta_2) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \exp(i\theta_3) & \frac{1}{4} \exp(-i\theta_3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} OFT(k) \cdot S(k) \\ OFT(k) \cdot S(k - f_m) \\ OFT(k) \cdot S(k + f_m) \end{bmatrix} \quad \dots(1)$$

【 0 0 4 0 】

上述したように、上記式 (1) を解くためには、変調照明の互いに異なる 3 つの位相 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ が必要である。測定部 1 2 は、変調照明の互いに異なる 3 つの位相 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ に対応する第 1 の干渉縞のシフト量が、演算部 1 3 によって算出されるまで、光強度分布の測定を継続する (繰り返す) 。これにより、例えば演算部 1 3 によって算出されたシフト量に応じた 3 つの位相 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の内の複数が、互いに同じ位相であったときでも、上記式 (1) を解くために必要となる互いに異なる 3 つの位相が揃うまで、測定部 1 2 は、光強度分布の測定を継続することとなる。

【 0 0 4 1 】

続いて、観察システム 1 による観察対象物 S の観察結果の具体例を説明する。

【0042】

図 9 は、観察対象物 S の一例を示す図である。図 9 に示すように、観察対象物 S として、二種のピッチを有するスクエアドット群を用いて観察を行った。この観察対象物 S は、平板上に周期的に突起を配列したものである。各突起は、図中の L 1, L 2 等で示す一辺が $0.2 \mu\text{m}$ の立方体状を呈する。突起は、図中の L 3 で示すピッチが $0.4 \mu\text{m}$ であるドットペア（一对のドット）を形成しており、これらドットペアは、図中の L 4, L 5 で示すピッチが $2.2 \mu\text{m}$ となるように配列している。

【0043】

第 1 の光路長調整部 5 としては、ステップモータを利用したアクチュエータを用いた。このステップモータを利用したアクチュエータは、1 パルス $2 \mu\text{m}$ であり、且つ、パルス分割可能である。ここでは、パルスを 20 分割して 1 パルス $0.1 \mu\text{m}$ とした。また、光源 2 の波長を 669 nm 、入射角を 45 deg とした。以上により、ステップモータを利用したアクチュエータが初期値から 1 パルス分 ($0.1 \mu\text{m}$) 及び 2 パルス分 ($0.2 \mu\text{m}$) 変化するように当該ステップモータを利用したアクチュエータを操作したとき、第 1 の干渉縞の位相のシフト量の操作値（指示値）は、それぞれ 1.33 rad 、 2.66 rad と算出された。一方、このとき第 2 の干渉縞の光強度分布の変位量に基づいて検出した第 1 の干渉縞の位相のシフト量は、それぞれ 6.33 rad 、 4.98 rad であった。このように、ステップモータを利用したアクチュエータの実際の移動量は、操作値とは異なっていることが確認された。

【0044】

画像再構成を行うためには、撮像部 8 により散乱光の像分布を撮像する際における第 1 の干渉縞の位相が分かればよい。しかし、第 1 の光路長調整部 5 の操作値に基づいて第 1 の干渉縞の位相の正しいシフト量を安定して算出するためには、第 1 の光路長及び第 2 の光路長を高精度に維持し、且つ、支持台等の振動といった外乱も排除する必要があることがわかる。

【0045】

一方、観察システム 1 では、散乱光の像分布を撮像する際における第 1 の干渉縞の位相を測定部 12 によって算出できる。このため、観察システム 1 では、撮像部 8 による散乱光の像分布の撮像と、測定部 12 による第 2 の干渉縞の光強度分布の測定と、が同期していれば、画像再構成を行うことができる。ここでいう「同期」とは、撮像部 8 による散乱光の像分布の撮像した時の第 2 の干渉縞の光強度分布を、測定部 12 によって測定することであり、例えば、撮像部 8 と測定部 12 の露光（シャッタ）タイミングを揃えるということである。

【0046】

従って、観察システム 1 では、第 1 の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出するためにピエゾアクチュエータ等の高精度な位置決め機構を必要とせず、また、振動や温度変化といった外乱の影響を排除し易い。以上により、観察システム 1 では、安価で、外乱が生じた場合であっても正しい高分解能画像を安定して得ることが可能となる。

【0047】

図 10 は、撮像部によって撮像された像分布を示す図である。図 10 は、光源 2 から発せられる低コヒーレンス光を、第 1 の光路 3 を進行する第 1 の光と、第 2 の光路 4 を進行する第 2 の光と、に分岐させ、干渉縞生成部 6 により観察対象物 S 上に第 1 の干渉縞を生成させ、第 1 の干渉縞を呈する第 1 の光及び第 2 の光の内の観察対象物 S によって散乱された光の像分布を撮像部 8 によって撮像したものである。図 10 の (a) は、第 2 の光路長を任意の値（初期値）としたとき（すなわち、図 6 の (a) の状態）の像分布である。図 10 の (b) は、第 2 の光路長が初期値から $0.1 \mu\text{m}$ 変化するように第 1 の光路長調整部 5 を操作したとき（すなわち、図 6 の (b) の状態）の像分布である。図 10 の (c) は、第 2 の光路長が初期値から $0.2 \mu\text{m}$ 変化するように第 1 の光路長調整部 5 を操作したとき（すなわち、図 6 の (c) の状態）の像分布である。なお、図 10 においてはモ

アレ効果によりドットが部分的に解像できるが、全体として分解能が向上したものではない。図11は、図10の像分布に対しフーリエ変換を行った画像を示す図である。図11の(a)~(c)は、それぞれ図10の(a)~(c)に対応する画像である。

【0048】

図12は、図11の画像に対し干渉系情報による周波数分離を行った画像を示す図である。すなわち、図12は、図11に示す像分布と、これらの像分布に対応する第2の干渉縞の光強度分布の変位量に基づいて算出された第1の干渉縞の位相と、から算出された周波数分離画像であり、上記式(1)における $S(k)$ 、 $S(k - f_m)$ 、 $S(k + f_m)$ に対応する。図12の(a)~(c)は、それぞれ図11の(a)~(c)に対応する画像である。図12の画像は、図11の画像に比較して、図12の(b)、(c)において高周波成分が分離されて明瞭に観察される一方で、原点付近の光強度は低下している。

10

【0049】

図13は、画像再構成を行った高分解能画像を示す図である。すなわち、図13の画像は、図12の(a)、(b)、(c)の画像を足し合わせ、逆フーリエ変換した画像である。図13の画像は、図9に示す観察対象物Sについて、L3で示す各ドットペアが正しく分離され、且つ、L4、L5で示すピッチについても正しく表されている。従って、正しい高分解能画像が得られたことがわかる。

【0050】

ここで、従来の観察システムについて説明する。図14は、従来の観察システムを示す概略構成図である。図14に示すように、従来の観察システムは、光源102として、コヒーレント長の長いレーザ光源を用いると共に、第2の光路4の光路長を伸縮させる光路長調整部105として、ピエゾアクチュエータ124により第2の光路4に沿ってミラー23を往復移動させる機構を用いている。

20

【0051】

このような従来の観察システムでは、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度よく検出するために、光路長調整部137にピエゾアクチュエータ124を用いている。しかしながら、生産現場等では、実験室等に比較して振動や温度変化といった外乱が生じ易く、例えば振動により各光路の光路差が変動したり、温度変化により温度ドリフトが生じたりする場合がある。この場合、干渉縞と観察対象物とが相対的に移動してしまい、波長毎の不確定性のために干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することが困難となる。従って、従来の観察システムでは、正しい高分解能画像を安定して得ることが難しかった。

30

【0052】

なお、従来の観察システムは、干渉縞生成部106として、第1の光を観察対象物Sに投光する投光部130と、観察対象物Sを介して投光部130に対向する位置に配置され、第2の光を観察対象物Sに投光する投光部132と、を備えた機構を用いている。また、従来の観察システムは、観察システム1に対し、第1の光路3にミラー128及び第1の光路長を伸縮させる光路長調整部137が追加されると共に、第2の光路4にミラー129が追加されている。光路長調整部137は、ミラー138を移動させることにより第1の光路長を伸縮させる機構である。また、従来の観察システムは、回転台7の代わりに、観察対象物Sを固定して保持する固定台を備えている。

40

【0053】

本実施形態に係る観察システム1では、光源2から観察対象物Sへ第1の光路3によって導かれた第1の光、及び、光源2から観察対象物Sへ第2の光路4によって導かれた第2の光が干渉縞生成部6によって干渉し第1の干渉縞が生成される。そして、第1の干渉縞を呈する第1の光及び第2の光の内の観察対象物Sによって散乱された光の像分布が撮像部8によって撮像される。一方、第1の光の内の観察対象物Sによって反射され第3の光路9によって導かれた第1の反射光、及び、第2の光の内の観察対象物Sによって反射され第4の光路10によって導かれた第2の反射光が干渉し第2の干渉縞が生成される。そして、第2の干渉縞の光強度分布が測定部12によって測定される。ここで、第1の光路長調整部5により第2の光路長が伸縮されると、第1の干渉縞の位相がシフトすると共

50

に第2の干渉縞の光強度分布が変位する。光源2は所定範囲のコヒーレント長を有するため、第2の干渉縞の光強度分布は、その包絡線に一つのピークを有している。第2の干渉縞の光強度分布の変位量は、包絡線のピークの変位量を測定することによって取得される。従って、第1の干渉縞の位相が1波長以上シフトした場合であっても、第1の干渉縞における波長毎の不確定性の影響を受けず、第2の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの変位量に基づいて第1の干渉縞の位相のシフト量を検出することができる。また、例えば振動や温度変化といった外乱が生じた場合であっても、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することができる。これにより、演算部13は、観察対象物Sの形状分布を正しく算出できる。更に、観察システム1は、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出するためにピエゾアクチュエータ等の高精度な位置決め機構を必要とせず、一例としてステップモータを利用したアクチュエータ等の比較的精度の低い位置決め機構を用いることが可能であるため、安価に提供される。以上により、安価で、外乱が生じた場合であっても正しい高分解能画像を安定して得ることが可能となる。

10

20

30

40

50

【0054】

また、演算部13は、互いに異なる3つの位相と、これらの位相をそれぞれ有する3つの第1の干渉縞に対応した3つの像分布と、に基づいて観察対象物Sの形状分布を算出する。これにより、3つの位相及び像分布の情報によって上記式(1)を解くことが可能となる。その結果、周波数空間において、従来の光学顕微鏡で解像できる情報に加えて、観察対象物Sの帯域を第1の干渉縞の空間周波数分だけ高周波側に平行移動させた情報を取得できる。従って、演算部13は、観察対象物Sの形状分布を正しく算出可能となる。なお、第1の干渉縞の1周期は 2π radであるため、互いに異なる3つの位相としては、例えば $2\pi/3$ radを3等分した 0 rad、 $2\pi/3$ rad、 $4\pi/3$ radとすることができる。上記式(1)を解く際の計算の安定化のためには、これら3つの位相同士の差が大きいほど良く、このため、互いに異なる3つの位相を 0 rad、 $2\pi/3$ rad、 $4\pi/3$ radとしたときに最も良く画像再構成を行うことが可能である。ただし、互いに異なる3つの位相は、必ずしも上記のように $2\pi/3$ radを3等分しなくてもよい。これら3つの位相の値によって、観察対象物Sの形状分布が正しく算出される(抽出される)度合いが異なる。

【0055】

また、測定部12は、互いに異なる少なくとも3つの位相に対応するシフト量が演算部13によって算出されるまで、光強度分布の測定を継続する。このため、演算部13によって第1の干渉縞のシフト量が複数回算出された場合において、各シフト量に応じた複数の位相が互いに同じ位相であったときでも、所定の連立方程式を解くために必要となる少なくとも3つの位相及び像分布の情報が不足することを防止することができる。従って、演算部13は、観察対象物Sの形状分布を正しく算出可能となる。

【0056】

また、干渉縞生成部6は、第1の光路3の終端に設けられ、第1の光を観察対象物S上へ投光する第1の投光部30と、第3の光路9の始端に設けられ、観察対象物Sを介して第1の投光部30と対向する位置に配置され、第1の反射光を受光する第1の受光部31と、第2の光路4の終端に設けられ、第2の光を観察対象物S上へ投光する第2の投光部32と、第4の光路10の始端に設けられ、観察対象物Sを介して第2の投光部32と対向する位置に配置され、第2の反射光を受光する第2の受光部33と、を有する。このため、第1の光及び第2の光を観察対象物S上の適切な位置に確実に照射できると共に、第1の反射光及び第2の反射光をそれぞれ第3の光路9及び第4の光路10へ確実に出力することができる。

【0057】

また、第1の投光部30から第1の受光部31へ第1の光が進行する第1の方向と、第2の投光部32から第2の受光部33へ第2の光が進行する第2の方向と、が観察対象物Sに対する平面視において略直交する。このため、第1の投光部30、第1の受光部31、第2の投光部32及び第2の受光部33を互いに干渉しない位置に配置可能であるため、干渉縞生成部6を簡素な構成とすることができる。

【0058】

また、第3の光路長又は第4の光路長を伸縮させる第2の光路長調整部11を更に備える。第2の干渉縞は、第1の光における光源2から測定部12までの光路長と、第2の光における光源2から測定部12までの光路長と、の光路差に応じて光強度分布が変位する。このため、第2の干渉縞は、光路長の調整により、その光強度分布の包絡線のピークが測定部12の測定レンジの中央に近づくようにされる必要がある。しかし、第2の干渉縞を測定部12の測定レンジに収めるには、第1の光路長調整部5による第2の光路長の伸縮だけでは第2の干渉縞の光強度分布の変位量が不十分である場合がある。そこで、第2の光路長調整部11により第4の光路長を伸縮させることで、第2の干渉縞を十分に変位させることができる。このように、観察を行う準備段階において、第2の干渉縞における光強度分布の包絡線のピークを測定部12の測定レンジの中央に近づける操作が容易となるため、操作性が向上する。

10

【0059】

また、所定範囲のコヒーレント長は、レーザ光源のコヒーレント長より短い。このため、第2の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの幅が十分に狭く、当該ピークの変位量を測定することが容易である。このため、第2の干渉縞の光強度分布の変位量を容易に取得できることから、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することが容易となる。

【0060】

また、所定範囲のコヒーレント長は、 $1\mu\text{m}$ 以上 $100\mu\text{m}$ 以下である。このため、第2の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの幅が十分に狭く、当該ピークの変位量を測定することが容易である。このため、第2の干渉縞の光強度分布の変位量を容易に取得できることから、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することが容易となる。

20

【0061】

また、光源2は、SLD光源である。このため、第2の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの幅が十分に狭く、当該ピークの変位量を測定することが容易である。このため、第2の干渉縞の光強度分布の変位量を容易に取得できることから、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することが容易となる。

【0062】

また、観察システム1は、観察対象物Sから撮像部8へ向かう軸線A回りに回転可能に観察対象物Sを保持する回転台7を備える。この観察システム1では、第1の干渉縞の位相をシフトさせる方向について、従来の光学顕微鏡に比較して観察対象物Sの形状分布をより高分解能で算出することが可能である。そこで、観察対象物Sと第1の干渉縞とを軸線A回りに相対回転させた複数の相対角度の状態において観察を行うことにより、軸線Aに垂直な各方向について、観察対象物Sの形状分布の正しい高分解能画像を安定して得ることが可能となる。ここで、上記構成とした場合、観察対象物Sと第1の干渉縞とを軸線A回りに相対回転させる操作が容易となるため、操作性が向上する。

30

【0063】

このように、観察システム1は、観察対象物Sへ照射する変調照明として低コヒーレンス光による第1の干渉縞を用いている。低コヒーレンス光による第1の干渉縞は、高コヒーレンス光による干渉縞に比較して、干渉縞が生成する範囲が狭い。このため、観察システム1によって広い範囲を観察するためには、第1の干渉縞を観察対象物S上でスキャンする必要がある。しかし、従来の観察システムにおいて用いられているピエゾアクチュエータはストロークが短いため、従来の観察システムでは広い範囲を観察することは困難である。また、ピエゾアクチュエータはストロークの速度が遅いため、従来の観察システムでは観察に長時間を要する。これに対し、観察システム1では、ピエゾアクチュエータに比較してストロークが長く、且つ、ストロークの速度が速いステップモータを利用したアクチュエータ等を用いることができる。このため、観察システム1では、従来の観察システムに比較して、容易に且つ短時間で広い範囲の観察をすることができる。

40

50

【 0 0 6 4 】

なお、本発明は上述した実施形態に限定されるものではない。例えば、測定部 1 2 は、第 2 の干渉縞の光強度分布を、その位相方向に沿って 1 次元的に測定可能なラインセンサであってもよい。第 2 の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの変位量の測定においては、必ずしも第 2 の干渉縞を 2 次元的に測定する必要はなく、第 2 の干渉縞を、その位相方向に沿って 1 次元的に測定できればよい。従って、測定部 1 2 をラインセンサとすることが可能であり、この場合、第 2 の干渉縞における光強度分布の変位量に基づいて第 1 の干渉縞における位相のシフト量を算出する際に、演算部 1 3 における演算量を削減できる。また、測定部 1 2 は、撮像部 8 よりも高いフレームレートを必要とする。測定部 1 2 は、ラインセンサとされることによりフレームレートを高くし易いため、撮像部 8 よりも高いフレームレートを容易に実現することができる。

10

【 0 0 6 5 】

また、上記実施形態では、第 1 の光路長調整部 5 は、第 2 の光路 4 の途中に設けられて第 2 の光路長を伸縮させているが、第 1 の光路 3 の途中に設けられて第 1 の光路長を伸縮させてもよい。

【 0 0 6 6 】

また、上記実施形態では、第 2 の光路長調整部 1 1 は、第 4 の光路 1 0 の途中に設けられて第 4 の光路長を伸縮させているが、第 3 の光路 9 の途中に設けられて第 3 の光路長を伸縮させてもよい。

【 0 0 6 7 】

ここで、本発明の他の側面の観察システムは、所定範囲のコヒーレント長を有する光源と、第 1 の光路長を有し、光源から発せられる光の一部である第 1 の光を光源から観察対象物へ導く第 1 の光路と、第 2 の光路長を有し、光の残部である第 2 の光を光源から観察対象物へ導く第 2 の光路と、第 1 の光路長又は第 2 の光路長を伸縮させる第 1 の光路長調整部と、第 1 の光及び第 2 の光を干渉させて観察対象物上に第 1 の干渉縞を生成させる干渉縞生成部と、第 1 の干渉縞を呈する第 1 の光及び第 2 の光の内の観察対象物によって散乱された光の像分布を撮像する撮像部と、第 3 の光路長を有し、第 1 の光の内の観察対象物によって反射された第 1 の反射光を導く第 3 の光路と、第 4 の光路長を有し、第 2 の光の内の観察対象物によって反射された第 2 の反射光を導く第 4 の光路と、第 3 の光路及び第 4 の光路の終端に設けられ、第 1 の反射光及び第 2 の反射光の干渉によって生成される第 2 の干渉縞の光強度分布を測定する測定部と、撮像部及び測定部に接続された演算部と、を備え、演算部は、第 2 の干渉縞における光強度分布の変位量に基づいて第 1 の干渉縞における位相のシフト量を算出し、シフト量に応じた位相と、当該位相を有する第 1 の干渉縞に対応した像分布と、に基づいて観察対象物の形状分布を算出する。

20

30

【 0 0 6 8 】

このような観察システムによれば、光源から観察対象物へ第 1 の光路によって導かれた第 1 の光、及び、光源から観察対象物へ第 2 の光路によって導かれた第 2 の光が干渉縞生成部によって干渉し第 1 の干渉縞が生成される。そして、第 1 の干渉縞を呈する第 1 の光及び第 2 の光の内の観察対象物によって散乱された光の像分布が撮像部によって撮像される。一方、第 1 の光の内の観察対象物によって反射され第 3 の光路によって導かれた第 1 の反射光、及び、第 2 の光の内の観察対象物によって反射され第 4 の光路によって導かれた第 2 の反射光が干渉し第 2 の干渉縞が生成される。そして、第 2 の干渉縞の光強度分布が測定部によって測定される。ここで、第 1 の光路長調整部により第 1 の光路長又は第 2 の光路長が伸縮されると、第 1 の干渉縞の位相がシフトすると共に第 2 の干渉縞の光強度分布が変位する。光源は所定範囲のコヒーレント長を有するため、第 2 の干渉縞の光強度分布は、その包絡線に一つのピークを有している。第 2 の干渉縞の光強度分布の変位量は、包絡線のピークの変位量を測定することによって取得される。従って、第 1 の干渉縞の位相が 1 波長以上シフトした場合であっても、第 1 の干渉縞における波長毎の不確定性の影響を受けず、第 2 の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの変位量に基づいて第 1 の干渉縞の位相のシフト量を検出することができる。また、例えば振動や温度変化とい

40

50

った外乱が生じた場合であっても、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することができる。これにより、演算部は、観察対象物の形状分布を正しく算出できる。更に、この観察システムは、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出するためにピエゾアクチュエータ等の高精度な位置決め機構を必要とせず、一例としてステップモータを利用したアクチュエータ等の比較的精度の低い位置決め機構を用いることが可能であるため、安価に提供される。以上により、安価なシステムによって、外乱が生じた場合であっても正しい高分解能画像を安定して得ることが可能となる。

【0069】

上記実施形態において、演算部は、互いに異なる少なくとも3つの位相と、これらの位相をそれぞれ有する少なくとも3つの第1の干渉縞に対応した少なくとも3つの像分布と、に基づいて観察対象物の形状分布を算出してもよい。これにより、少なくとも3つの位相及び像分布の情報によって所定の連立方程式を解くことが可能となる。その結果、周波数空間において、従来の光学顕微鏡で解像できる情報に加えて、観察対象物の帯域を第1の干渉縞の空間周波数分だけ高周波側に平行移動させた情報を取得できる。従って、演算部は、観察対象物の形状分布を正しく算出可能となる。

10

【0070】

また、測定部は、互いに異なる少なくとも3つの位相に対応するシフト量が演算部によって算出されるまで、光強度分布の測定を継続してもよい。この場合、演算部によって第1の干渉縞のシフト量が複数回算出された場合において、各シフト量に応じた複数の位相が互いに同じ位相であったときでも、所定の連立方程式を解くために必要となる少なくとも3つの位相及び像分布の情報が不足することを防止することができる。従って、演算部は、観察対象物の形状分布を正しく算出可能となる。

20

【0071】

また、干渉縞生成部は、第1の光路の終端に設けられ、第1の光を観察対象物上へ投光する第1の投光部と、第3の光路の始端に設けられ、観察対象物を介して第1の投光部と対向する位置に配置され、第1の反射光を受光する第1の受光部と、第2の光路の終端に設けられ、第2の光を観察対象物上へ投光する第2の投光部と、第4の光路の始端に設けられ、観察対象物を介して第2の投光部と対向する位置に配置され、第2の反射光を受光する第2の受光部と、を有してもよい。この場合、第1の光及び第2の光を観察対象物上の適切な位置に確実に照射できると共に、第1の反射光及び第2の反射光をそれぞれ第3の光路及び第4の光路へ確実に出力することができる。

30

【0072】

また、第1の投光部から第1の受光部へ第1の光が進行する第1の方向と、第2の投光部から第2の受光部へ第2の光が進行する第2の方向と、が観察対象物に対する平面視において略直交してもよい。この場合、第1の投光部、第1の受光部、第2の投光部及び第2の受光部を互いに干渉しない位置に配置可能であるため、干渉縞生成部を簡素な構成とすることができる。

【0073】

また、第3の光路長又は第4の光路長を伸縮させる第2の光路長調整部を更に備えてもよい。この場合、観察を行う準備段階において、第2の干渉縞における光強度分布の包絡線のピークを測定部の測定レンジの中央に近づける操作が容易となるため、操作性が向上する。

40

【0074】

また、所定範囲のコヒーレント長は、レーザ光源のコヒーレント長より短くてもよい。この場合、第2の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの幅が十分に狭いため、当該ピークの変位量を測定することが容易である。このため、第2の干渉縞の光強度分布の変位量を容易に取得できることから、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することが容易となる。

【0075】

また、所定範囲のコヒーレント長は、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $100\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。この

50

場合、第2の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの幅が十分に狭いため、当該ピークの変位量を測定することが容易である。このため、第2の干渉縞の光強度分布の変位量を容易に取得できることから、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することが容易となる。

【0076】

また、前記光源は、SLD光源又はLED光源であってもよい。この場合、第2の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの幅が十分に狭いため、当該ピークの変位量を測定することが容易である。このため、第2の干渉縞の光強度分布の変位量を容易に取得できることから、第1の干渉縞の位相のシフト量を精度良く検出することが容易となる。

【0077】

また、測定部は、ラインセンサであってもよい。第2の干渉縞の光強度分布における包絡線のピークの変位量の測定においては、必ずしも第2の干渉縞を2次元的に測定する必要はなく、第2の干渉縞を、その位相方向に沿って1次元的に測定できればよい。すなわち、測定部としてラインセンサを用いることが可能である。この場合、第2の干渉縞における光強度分布の変位量に基づいて第1の干渉縞における位相のシフト量を算出する際に、演算部における演算量を削減できる。また、測定部は、撮像部よりも高いフレームレートを必要とする。測定部は、ラインセンサとされることによりフレームレートを高くし易いため、撮像部よりも高いフレームレートを容易に実現することができる。

【0078】

また、観察対象物から撮像部へ向かう軸線回りに回転可能に観察対象物を保持する回転台を更に備えてもよい。この観察システムでは、第1の干渉縞の位相をシフトさせる方向について、従来の光学顕微鏡に比較して観察対象物の形状分布をより高分解能で算出することが可能である。そこで、観察対象物と第1の干渉縞とを軸線回りに相対回転させた複数の相対角度の状態において観察を行うことにより、軸線に垂直な各方向について、観察対象物の形状分布の正しい高分解能画像を安定して得ることが可能となる。ここで、上記構成とした場合、観察対象物と第1の干渉縞とを軸線回りに相対回転させる操作が容易となるため、操作性が向上する。

【産業上の利用可能性】

【0079】

本発明の一側面は、観察システムを使用用途とし、安価なシステムによって、外乱が生じた場合であっても正しい高分解能画像を安定して得ることができるものである。

【符号の説明】

【0080】

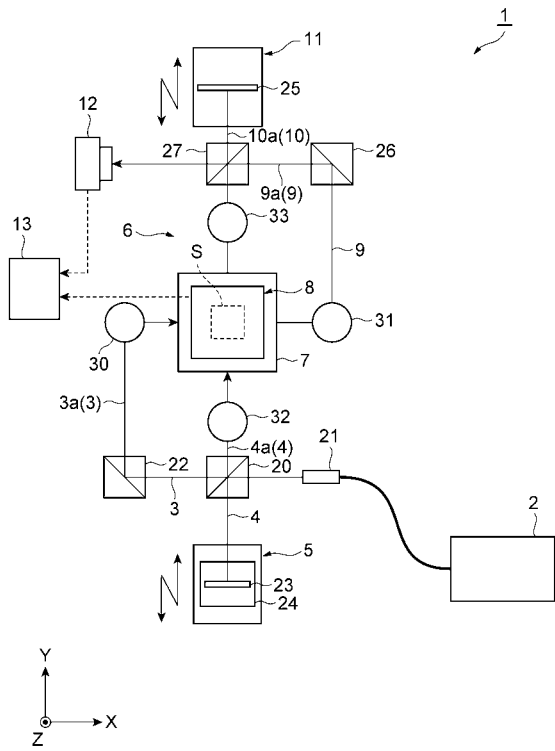
1 ... 観察システム、2 ... 光源、3 ... 第1の光路、4 ... 第2の光路、5 ... 第1の光路長調整部、6 ... 干渉縞生成部、7 ... 回転台、8 ... 撮像部、9 ... 第3の光路、10 ... 第4の光路、11 ... 第2の光路長調整部、12 ... 測定部、13 ... 演算部、30 ... 第1の投光部、31 ... 第1の受光部、32 ... 第2の投光部、33 ... 第2の受光部、A ... 軸線、S ... 観察対象物。

10

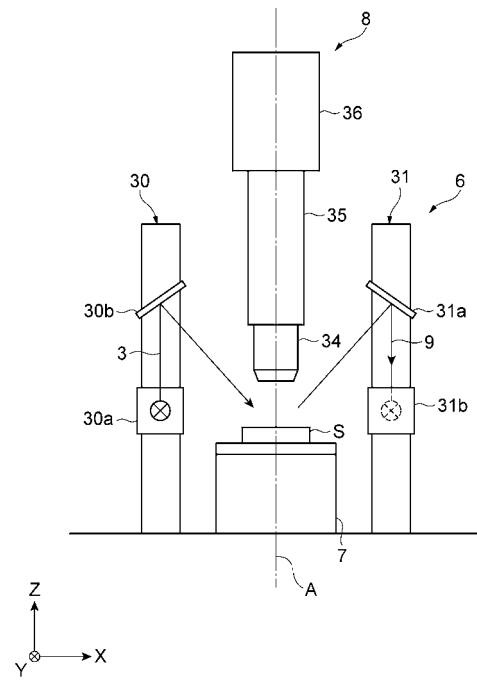
20

30

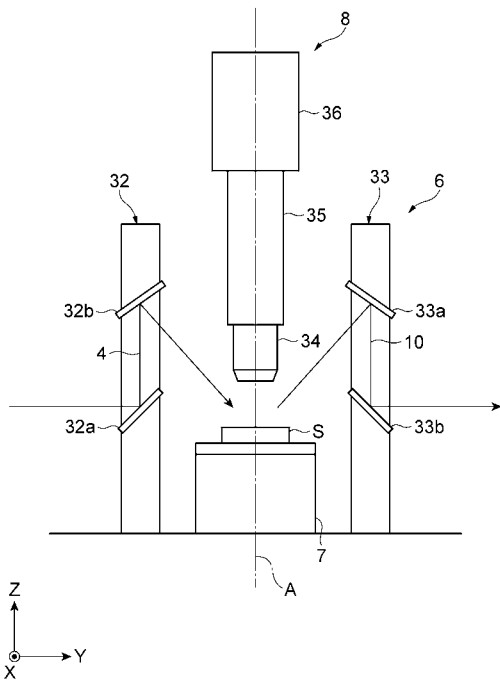
【 図 1 】



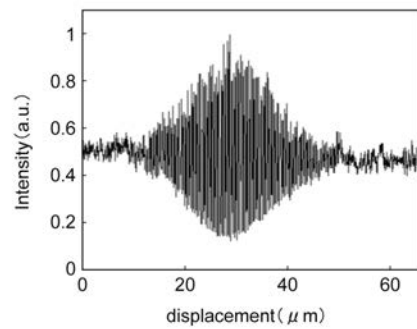
【 図 2 】



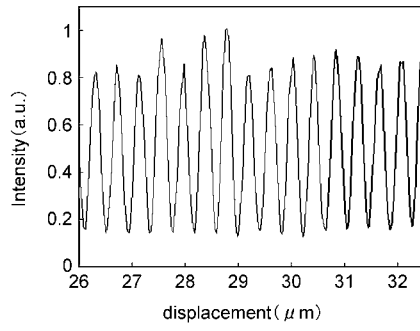
【 図 3 】



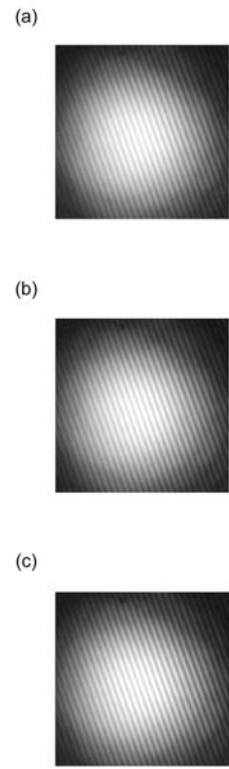
【 図 4 】



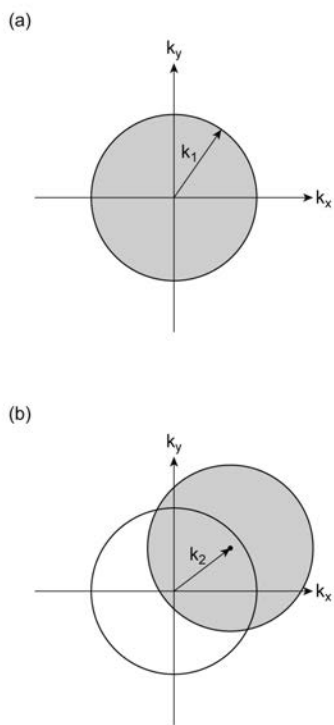
【 図 5 】



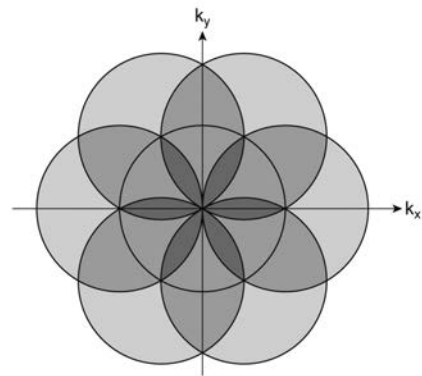
【 図 6 】



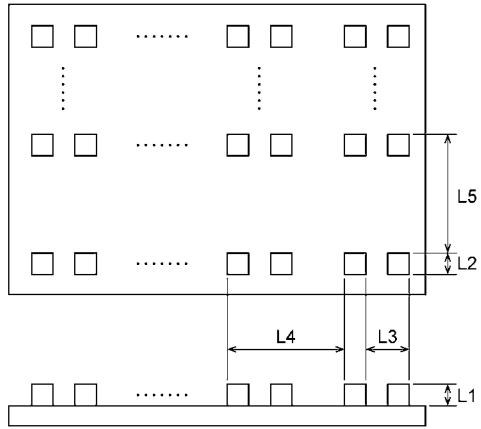
【 図 7 】



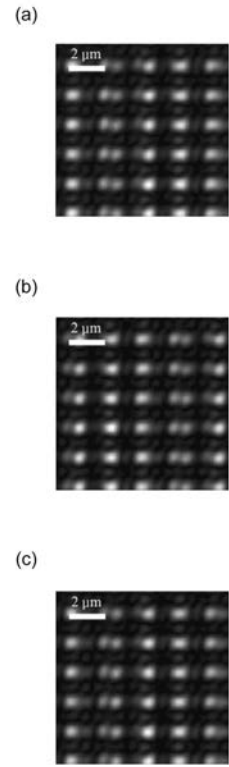
【 図 8 】



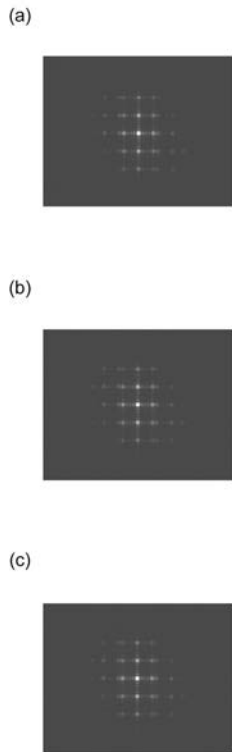
【 図 9 】



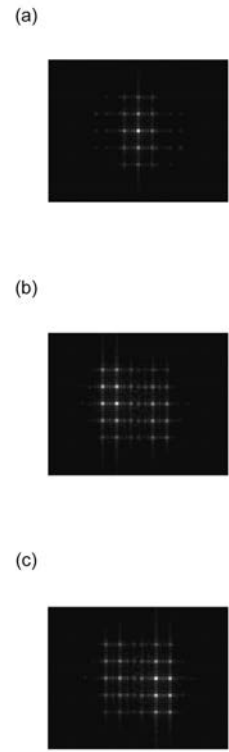
【 図 1 0 】



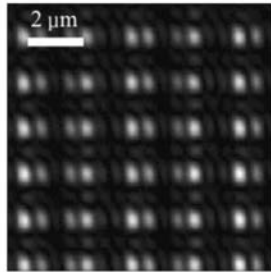
【 図 1 1 】



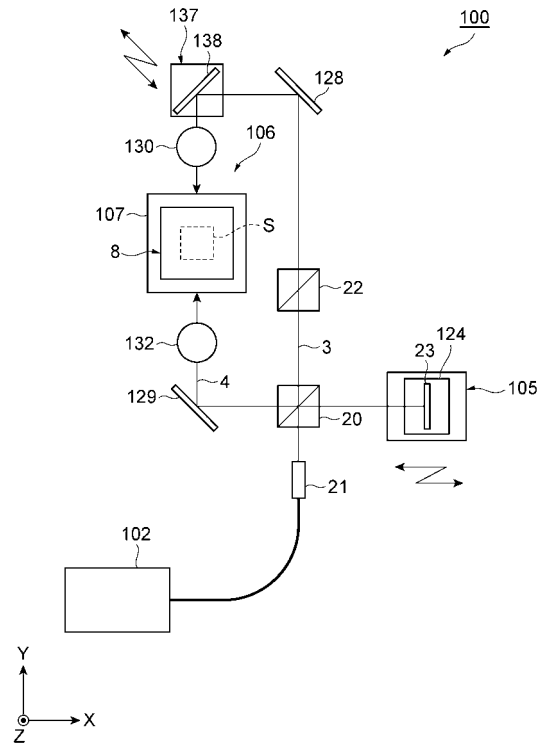
【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2016/074265
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G02B21/06(2006.01)i, G01B11/25(2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G02B21/06, G01B11/25 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2016 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2016 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2016 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2014-137501 A (Nikon Corp.), 28 July 2014 (28.07.2014), entire text; all drawings (Family: none)	1-12
A	JP 2007-86428 A (Fujinon Corp.), 05 April 2007 (05.04.2007), entire text; all drawings & US 2007/0064238 A1 the whole document	1-12
A	JP 2008-111726 A (Olympus Corp.), 15 May 2008 (15.05.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-12
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 16 September 2016 (16.09.16)		Date of mailing of the international search report 27 September 2016 (27.09.16)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan		Authorized officer Telephone No.

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 6 / 0 7 4 2 6 5	
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G02B21/06(2006,01)i, G01B11/25(2006,01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G02B21/06, G01B11/25			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2016年 日本国実用新案登録公報 1996-2016年 日本国登録実用新案公報 1994-2016年			
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号	
A	JP 2014-137501 A (株式会社ニコン) 2014.07.28, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-12	
A	JP 2007-86428 A (フジノン株式会社) 2007.04.05, 全文、全図 & US 2007/0064238 A1, the whole document	1-12	
A	JP 2008-111726 A (オリンパス株式会社) 2008.05.15, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-12	
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。		<input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。	
* 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願		の日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献	
国際調査を完了した日 16.09.2016		国際調査報告の発送日 27.09.2016	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 瀬戸 息吹	2 V 5 3 6 2 電話番号 03-3581-1101 内線 3271

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US

Fターム(参考) 2H052 AA00 AB26 AB29 AC09 AC27 AC33 AD16 AF02 AF25

(注) この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。