

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2020-204775
(P2020-204775A)

(43) 公開日 令和2年12月24日(2020. 12. 24)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO3H 1/04 (2006.01)	GO3H 1/04	2F064
GO1B 9/02 (2006.01)	GO1B 9/02	2K008

審査請求 有 請求項の数 1 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2020-147071 (P2020-147071)	(71) 出願人	504133110 国立大学法人電気通信大学 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1
(22) 出願日	令和2年9月1日(2020.9.1)	(74) 代理人	100106909 弁理士 棚井 澄雄
(62) 分割の表示	特願2016-4384 (P2016-4384) の分割	(74) 代理人	100175824 弁理士 小林 淳一
原出願日	平成28年1月13日(2016.1.13)	(74) 代理人	100169764 弁理士 清水 雄一郎
(31) 優先権主張番号	特願2015-4055 (P2015-4055)	(72) 発明者	渡邊 恵理子 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内
(32) 優先日	平成27年1月13日(2015.1.13)	(72) 発明者	岡本 勝就 茨城県水戸市東原2丁目1番33号
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		

最終頁に続く

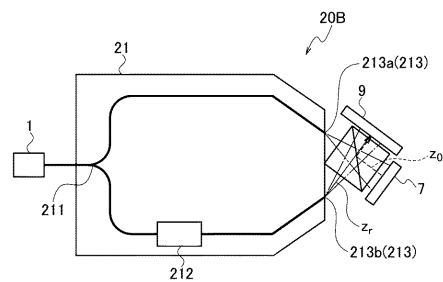
(54) 【発明の名称】 光学測定装置

(57) 【要約】

【課題】 光学調整が容易で小型化された光学測定装置を提供する。

【解決手段】 本発明に係る光学測定装置は、光源と、光源で発光されて測定対象物に照射させる物体波が伝搬する物体波用コア、及び光源で発光されて物体波と干渉させるための参照波が伝搬し、且つ物体波用コアとは異なる位置に設けられた参照波用コアを有する光導波路と、測定対象物から反射した球面物体波と球面参照波とを合成する合成部と、合成部によって合成された光の干渉縞を電気信号として受光して電子計算機に出力する撮像素子と、を備える。平面視したときに、物体波用コアと参照波用コアとは変換部に近づくにしたがって互いに近づくように形成され、且つ光導波路は物体波用コア及び参照波用コアに平行になるように変換部に向かってテーパ形状を有する。

【選択図】 図13



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

光源と、

前記光源で発光された光を、測定対象物に照射させる物体波と、前記物体波と干渉させるための参照波とに分岐する分岐部と、前記分岐部で分岐された前記物体波又は前記参照波のいずれか一方の位相を変調する変調器と、前記物体波及び前記参照波を球面物体波及び球面参照波に変換して出力する変換部とを備える光導波路と、

測定対象物から反射した前記球面物体波と、前記球面参照波とを合成する合成部と、前記合成部によって合成された光の干渉縞を電気信号として受光し、電子計算機に出力する撮像素子と、

10

を備え、

前記光導波路は、

シリコン基板と、

前記シリコン基板の表面に積層されたバッファと、

前記バッファの表面に形成され、前記分岐部と前記変換部との間で前記物体波が伝搬する物体波用コアと、

前記バッファの表面に積層され、前記物体波用コアとは異なる位置に設けられ、且つ前記分岐部と前記変換部との間で前記参照波が伝搬し、参照波用コアと、

前記バッファの表面に積層され、前記物体波用コア及び前記参照波用コアの側方及び上方を覆うクラッドと、

20

を備え、

前記物体波用コア及び前記参照波用コアの屈折率は、前記バッファ及び前記クラッドの屈折率よりも高く、

前記物体波用コアと前記参照波用コアとが、前記測定対象物に入射する球面物体波と前記球面参照波とが合成される際に互いになす角度と同じ角度をなして互いに異なる方向に沿って設けられ、

前記変換部は、前記物体波及び前記参照波を前記光導波路から出射する出射口であり、

平面視したときに、前記物体波用コアと前記参照波用コアとは前記変換部に近づくにしたがって互いに近づくように形成され、且つ前記光導波路は前記物体波用コア及び前記参照波用コアに平行になるように前記変換部に向かってテーパ形状を有する、

30

光学測定装置。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、球面物体波と球面参照波の光干渉を用いた光学測定装置に関する。

【背景技術】**【0002】**

光を電気信号に変換する撮像素子を用いた光学的手法による画像計測は、非侵襲・非接触・非染色で物体の形状、変形、応力分布、歪み、蛍光又は偏光等の計測を行うことができる手法である。そのため、情報通信、セキュリティ、3次元変位・変形センシング、粒子速度計測等の流体の計測、医療分野における定量的細胞検査等、様々な分野へ応用が見込まれている。

40

【0003】

デジタルホログラフィック顕微鏡 (Digital Holographic Microscopy、以下DHMという) は、非侵襲・非接触・非染色で微小物体の厚みや屈折率の情報である定量位相情報の計測が可能な光学測定装置の一種である。DHMは、光源から発せられる光を物体へ照射する物体波と、物体を介さずに基準となる光である参照波とに分け、物体に照射後の物体波と、参照波との2波を合波し干渉させることで干渉縞を形成し、撮像素子を用いて干渉縞の電気信号を画像として記録する。干渉により、参照波に対しての物体波の強度と位相の変位量が記録でき、物体波の位相情報は干渉縞の強度情報に変換して記録される。干渉

50

縞記録後に電子計算機上で、空間を伝わる光の波動を、取得した画像情報から数値計算することにより、物体波の強度分布と位相分布の情報を表す複素振幅分布を再生する。

【 0 0 0 4 】

通常のDHMでは、微小物体を対物レンズで拡大して結像させた後、撮像素子で干渉縞を撮像する。そのため物体の拡大結像用対物レンズを用いて空間で拡大結像させる場合、直径20mm、幅30mm程度の対物レンズが必要となり、装置は大型になる。たとえば、対物レンズから撮像素子部分のみの基本的な構成で幅120mm×奥行き120mm×高さ150mm程度の大きさになる。このように従来手法では空間光学系において干渉系を構築するためには、装置の小型化に制限があり、一つの大型なDHM装置としての利用に限られていた。そのため付属品として顕微鏡やその他の計測装置に装着することは困難であった。ましてやポータブルに計測する装置としての位置づけは困難であった。

10

【 0 0 0 5 】

DHMの小型化を可能とする手法の一つとして、デジタルホログラフィにおいて、拡大レンズを必要としない球面参照波を利用する手法がある。たとえば、特許文献1に記載の発明では球面参照波を用いた位相シフトデジタルホログラフィの再生方法、変位分布計測方法及び装置が記載されている。しかしながら、空間光学系のため光学調整が困難である。また、位相シフト型の光学測定装置では、 piezo素子などの位相変調デバイスや、並列位相シフト用偏光アレイ等の高価な装置を必要とする。

【 0 0 0 6 】

また、DHMで高速・高解像の画像を得るためには、計測する視野(ピクセル数)が広いほど再構成の計算負荷が大きくなるデジタルホログラフィにおいて、高精細な位相分布の測定だけでなく高速な位相再構成が必須である。従来のDHMでは、再構成する際の結像面と撮像素子の電気信号検出面が近いため、回折伝搬距離が短くなる。従って、1回のFFT(Fast Fourier Transform)で計算を行うSingle-FFT型フレネル回折計算(以下、Single-FFT法という)は、伝搬距離が長いときのみ利用できるため利用できず、位相再構成にはレイリーゾンマーフェルトの厳密解である2回のFFTを必要とする角スペクトル法が用いられている(例えば非特許文献1、2参照)。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 7 】

【特許文献1】特開2007-71593号公報

【非特許文献】

【 0 0 0 8 】

【非特許文献1】C. J. Mann, L. Yu, C M. Lo, and M. K. Kim, "High resolution quantitative phase contrast microscopy by digital holography," Opt. Express 13(22), 8693-8698 (2005).

【非特許文献2】Y. Park, W. Choi, Z. Yaqoob, R. Dasari, K. Badizadegan, and M. S. Feld, "Speckle field digital holographic microscopy," Opt. Express 17(15), 12285-12292 (2009).

【非特許文献3】M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier transform method of fringe pattern analysis for computer based topography and interferometry," J. Opt. Soc. Am. 72(1), 156-160 (1982).

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 9 】

前述した通り、従来のDHMでは空間光学系において干渉系を構築するためには、装置の小型化や光軸合わせに制限があった。また、位相シフト型の測定をする場合は、高価な piezo素子などの位相変調デバイスや並列位相シフト用偏光アレイ等を用いる必要があった。

【 0 0 1 0 】

50

上述したことを鑑み、本発明では、光学測定装置の光学調整を容易にするとともに、装置を小型化することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

上記目的を達成するために、本発明に係る光学測定装置は、光源と、前記光源で発光された光を、測定対象物に照射させる物体波と、前記物体波と干渉させるための参照波とに分岐する分岐部と、前記分岐部で分岐された前記物体波又は前記参照波のいずれか一方の位相を変調する変調器と、前記物体波及び前記参照波を球面物体波及び球面参照波に変換して出力する変換部とを備える光導波路と、測定対象物から反射した前記球面物体波と、前記球面参照波とを合成する合成部と、前記合成部によって合成された光の干渉縞を電気信号として受光し、電子計算機に出力する撮像素子と、を備える。前記光導波路は、シリコン基板と、前記シリコン基板の表面に積層されたバッファと、前記バッファの表面に形成され、前記分岐部と前記変換部との間で前記物体波が伝搬する物体波用コアと、前記バッファの表面に積層され、前記物体波用コアとは異なる位置に設けられ、且つ前記分岐部と前記変換部との間で前記参照波が伝搬し、参照波用コアと、前記バッファの表面に積層され、前記物体波用コア及び前記参照波用コアの側方及び上方を覆うクラッドと、を備える。前記物体波用コア及び前記参照波用コアの屈折率は、前記バッファ及び前記クラッドの屈折率よりも高い。前記物体波用コアと前記参照波用コアとが、前記測定対象物に入射する球面物体波と前記球面参照波とが合成される際に互いになす角度と同じ角度をなして互いに異なる方向に沿って設けられている。前記変換部は、前記物体波及び前記参照波を前記光導波路から出射する出射口であり、平面視したときに、前記物体波用コアと前記参照波用コアとは前記変換部に近づくにしたがって互いに近づくように形成され、且つ前記光導波路は前記物体波用コア及び前記参照波用コアに平行になるように前記変換部に向かってテーパ形状を有する。

10

20

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、光学測定装置の光学調整を容易にするとともに、装置を小型化することができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

30

【図1】原理実験装置である光学測定装置10を示す図である。

【図2】光学測定装置10のサンプルと撮像面の関係を示す図である。

【図3】光学測定装置10の記録と再生の座標系を示す図である。

【図4】光学測定装置10の設計距離を決める設計フローチャートを示す図である。

【図5】光学測定装置10における再生距離が異なる1951 USAFテストターゲット再構成強度像を示す図である。再生距離は、図5(a)は83.7mm、図5(b)は177.5mm、図5(c)は622.0mmである。

【図6】光学測定装置10における再生距離が異なる位相デバイスの位相アンラッピング後再構成位相像を示す図である。図6(a)は99.0mm、図6(b)は177.2mm、図6(c)は2750.0mmである。

40

【図7】光学測定装置10における異なるX positionにおけるY positionに対しての位相変化を示す図である。図7(a)はX position = 840 μ m、図7(b)はX position = 1000 μ m、図7(c)はX position = 1300 μ mである。

【図8】光学測定装置10で取得した2048 \times 2048ピクセルのホログラムにおいて、異なる計算手法を採用した場合の位相再構成処理時間の比較を示す図である。

【図9】第1実施形態に係る光学測定装置20を示す図である。

【図10】光学測定装置20の光導波路21の構造を示す図である。

【図11】第2実施形態に係る光学測定装置30を示す図である。

【図12】第3実施形態に係る光学測定装置20Aを示す図である。

50

【図 1 3】第 4 実施形態に係る光学測定装置 2 0 B を示す図である。

【図 1 4】第 5 実施形態に係る光学測定装置 2 0 C を示す図である。

【図 1 5】第 6 実施形態に係る光学測定装置 5 0 を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0 0 1 4】

以下、本発明の光学測定装置の原理及び各実施形態を図 1 ~ 図 1 5 に基づいて説明する。以下の説明において、同一の構成については同一の符号を用いて説明を省略する。

【0 0 1 5】

図 1 は、本発明の光学測定装置 1 0 の原理実験装置である。光学測定装置 1 0 の光学系は、物体波と参照波を同じ角度から干渉させるインライン型であり、光源にはレーザ 1 を用いた。このレーザ 1 は、具体的には、波長が 6 3 2 . 8 n m のヘリウムネオンレーザである。

10

【0 0 1 6】

光学測定装置 1 0 は、レーザ 1 からの光を偏光ビームスプリッタ 4 において物体波と参照波の 2 つの光に分岐させる。また、光学測定装置 1 0 は、レンズ 6 を用い球面波を生成し、サンプル 7 を透過した物体波ともう一方の光である参照波とを、ビームスプリッタ 8 を介して干渉させ、C C D (Charge Coupled Device) カメラ 9 を用い干渉縞の画像 (ホログラム) を記録する。C C D カメラ 9 には、画素数が 2 0 4 8 × 2 0 4 8 ピクセル、ピクセルピッチが 7 . 4 μ m × 7 . 4 μ m、受光面積が 1 5 . 1 6 m m × 1 5 . 1 6 m m、ビット深度が 1 6 b i t のカメラを使用した。

20

【0 0 1 7】

光学測定装置 1 0 は、偏光ビームスプリッタ 4 の前と、偏光ビームスプリッタ 4 の後の物体波側とに、それぞれ半波長板 3 を備え、偏光ビームスプリッタ 4 によって分岐させた物体波と参照波の強度を等しく調整する。また、光学測定装置 1 0 は、参照波側に 3 枚、物体波側に 2 枚のミラー 2 をそれぞれ備え、2 つに分岐させた光路の長さを等しく調整する。

【0 0 1 8】

ミラー 2 の内 1 枚はピエゾ素子 5 付きのミラー 2 であり、再生時の 0 次回折光と共役光除去のため物体波の位相を電子計算機 1 1 により制御し $= / 2$ ずつシフトさせ、合計 3 枚の干渉縞の画像を撮像する。C C D カメラ 9 で取得する強度分布を $I_H(x, y; \cdot)$ 、参照波の複素振幅分布の複素共役を $U_R^*(x, y)$ とすると、3 段階位相シフトさせた時の物体波の複素振幅分布 $U(x, y)$ は式 (1) で表される。

30

【0 0 1 9】

【数 1】

$$U(x, y) = \frac{1}{4U_R^*(x, y)} \left\{ I_H(x, y; 0) - I_H(x, y; \pi) + i \left[I_H(x, y; \pi/2) - I_H(x, y; 3\pi/2) \right] \right\} \quad (1)$$

【0 0 2 0】

位相シフトさせたホログラムから、電子計算機 1 1 を用いて物体のもつ強度と位相の分布である複素振幅分布を再生する。

40

【0 0 2 1】

なお、図 1 に示す例では、参照波側のミラー 2 のうち 1 枚がピエゾ素子 5 付きのミラー 2 であるものとするが、物体波側のミラーのうちの 1 枚をピエゾ付きミラーとしてもよい。ただし、物体波側のミラー 2 の 1 枚にピエゾ素子 5 を付けて物体波の位相をシフトするよりも、参照波側のミラー 2 の 1 枚にピエゾ素子 5 を付けて参照波の位相をシフトする方が、ピエゾ素子 5 によってノイズ等の影響を受けた光をサンプル 7 に照射することがない点で好ましい。

【0 0 2 2】

図 2 は、光学測定装置 1 0 における物体面と撮像面の関係を示す図であり、サンプル 7 と C C D カメラ 9 の間の距離が $|z_0| = 2 3 . 4 m m$ 、撮像面から参照点間の距離が $|$

50

$z_r = 27.0 \text{ mm}$ である。

【0023】

以下に、電子計算機11におけるSingle-FFT法を用いた計算手法について述べる。

【0024】

図3は、球面参照波を用いた光学測定装置10の記録と再生の座標系を示す。撮像面13での物体波は、物体面12の複素振幅 $U_0(x', y')$ のフレネル回折によって表される。簡易化のために定数項は省略し1次元で記述すると、撮像面13の複素振幅分布 $U(x)$ のフレネル領域における回折像を計算することで、フレネル回折像 $U_i(X, Z)$ を求めることができる。この際、 $U(x)$ の大きさを x, y とする。フレネル・キルヒホッフの回折式を放物面近似することにより、 $U_i(X, Z)$ は式(2)で表される。

10

【0025】

【数2】

$$U_i(X, Z) = \int U(x) \cdot \exp\left[i\pi \frac{(x-X)^2}{\lambda Z}\right] dx = \exp\left(i\frac{\pi}{\lambda Z} X^2\right) \cdot F\left[U(x) \exp\left(i\frac{\pi}{\lambda Z} x^2\right)\right] \quad (2)$$

【0026】

ここで、 λ は光波の波長、 Z は伝搬距離、 F はフーリエ変換演算を表す。式(2)に含まれる位相因子の周波数が伝搬距離 Z により変化し、サンプリング定理を満たさない状態を生じるため、式(2)をFFT法により計算できるように標本化する。この際、サンプリング間隔を Δx 、サンプル点数を N とし、 $U(x)$ を標本化するときサンプリング定理を満たすものとする。回折面の計算領域を $D_{xz} = Z / \Delta x$ とすると式(2)は式(3)になる。

20

【0027】

【数3】

$$U_i\left(n' \frac{\lambda Z}{\Delta x N}\right) = \exp\left[i\pi \frac{\lambda Z}{(\Delta x N)^2} n'^2\right] \text{FFT}\left[U\left(n \frac{\Delta x}{N}\right) \exp\left(i\pi \frac{(\Delta x)^2}{\lambda Z} n^2\right)\right] \quad (3)$$

【0028】

ここで n, n' は整数を表す。式(3)に含まれる位相因子の最高周波数に対してサンプリング定理を満たす伝搬距離 Z の条件は(4)式で表される。

【0029】

【数4】

$$Z = \frac{N(\Delta x)^2}{\lambda} \quad (4)$$

【0030】

式(3)による一回のフーリエ変換でのフレネル領域の回折計算では、式(4)を満たす条件時に位相分布が正確な回折像を得られる。この条件はCCDカメラ9のピクセルピッチと測定波長のみ依存する。ここで、球面参照波を用いた場合に電子計算機11における物体を結像させる伝搬距離(再生距離) Z と、物体面12から撮像面13までの距離 z_0 と、撮像面13から参照点15までの距離 z_r との関係式は式(5)で表される。

40

【0031】

【数5】

$$Z = -\left(\frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_r}\right)^{-1} \quad (5)$$

【 0 0 3 2 】

このときの結像面 1 4 での再生像の拡大率 M は式 (6) で表される。

【 0 0 3 3 】

【 数 6 】

$$M = \left(1 - \frac{z_o}{z_r} \right)^{-1} \quad (6)$$

【 0 0 3 4 】

また、開口数 NA は CCD カメラ 9 の画像サイズ $x \cdot N$ と距離 $|z_o|$ から式 (7) で決まる。

10

【 0 0 3 5 】

【 数 7 】

$$NA = n \sin \theta = n \frac{0.5 \delta x \cdot N}{|z_o|} \quad (7)$$

【 0 0 3 6 】

はサンプル (物体面 1 2) と撮像面 1 3 が作る角度、 n は媒質の屈折率 (空気 : 1 . 0 0 0 3) である。このときの顕微鏡の解像度を示す空間分解能 X は式 (8) で表され、また、計測可能な視野 (FOV : F i e l d o f v i e w) は式 (9) で表される。

20

【 0 0 3 7 】

【 数 8 】

$$\delta X = \frac{\lambda}{\delta x \cdot N} |z_o| \quad (8)$$

【 0 0 3 8 】

【 数 9 】

$$FOV = \delta X \cdot N \quad (9)$$

【 0 0 3 9 】

式 (8) から分かるように、光学測定装置 1 0 の空間分解能は使用するレーザ 1 の波長が一定の場合、記録面に対するサンプルの位置で決まる。従って、サンプル (物体面 1 2) と撮像面 1 3 の距離を近づけ NA を高めることにより空間分解能が向上する。

【 0 0 4 0 】

このとき、試料の FOV は空間分解能と CCD カメラ 9 のピクセル数の積で決まるため、空間分解能と計測範囲間にはトレードオフの関係があることに留意しなくてはならない。球面参照波による拡大光学系では、拡大率や位相再構成の結像位置をわずかに動かすのみで変更できるため、あらかじめ CCD カメラ 9 の画素ピッチと参照点位置に加えサンプル位置を設計しておくことで、Single - FFT 法でのフレネル回折計算においても、ノイズを除去した位相像の再構成が可能である。

40

【 0 0 4 1 】

設計方法

次に、光学測定装置 1 0 の設計手法について述べる。図 4 は光学測定装置 1 0 の設計距離を決める設計フローチャートを示す図である。

【 0 0 4 2 】

まず計測用の撮像素子を決定し、撮像素子の仕様から式 (4) のサンプリング定理を用いて再生距離 Z が求まる (ステップ S 1) 。次に、測定したいサンプルに必要な空間分解能 X を決定することで、式 (8) により距離 $|z_o|$ を算出する (ステップ S 2 ~ S 3) 。そして、再生距離 Z と距離 $|z_o|$ を式 (5) に代入し距離 $|z_r|$ を算出する。算

50

出したそれぞれの距離を設計に反映する（ステップS4）。

【0043】

光学測定装置10では、サンプル7を細胞とした場合、細胞の測定に必要な空間分解能を $1\mu\text{m}$ 以下として、より広視野での計測を実現するため、空間分解能 $X = 0.98\mu\text{m}$ ($NA = 0.32$)、計測範囲 $2.0\text{mm} \times 2.0\text{mm}$ で設計した。このときの再生像は式(6)から、7.6倍の拡大率で再生できる。

【0044】

図5(b)は、前記設計手法による適切な結像距離関係時 ($|z_0| = 23.4\text{mm}$) の、図5(a)及び図5(c)は、設計値以外の距離 $|z_0|$ にサンプルを設置した場合の1951USAFテストターゲットの強度像である。図5(a) ($|z_0| = 20.4\text{mm}$) 及び図5(c) ($|z_0| = 25.8\text{mm}$) では強度分布を結像する再生距離（伝搬距離）Zの値が(4)式から大きく外れる。図5(a)では再生像に重畳したノイズがみられ、図5(c)では再生像が縮小していることによる空間分解能の低下があるが、強度分布においては再生距離（伝搬距離）が大きく異なっても像の再生自体は可能である。

10

【0045】

一方、図6(b)は、前記設計手法による適切な結像距離関係時 ($|z_0| = 23.4\text{mm}$) の、図6(a) ($|z_0| = 21.2\text{mm}$) 及び図6(c) ($|z_0| = 26.7\text{mm}$) は、設計値以外の距離 $|z_0|$ にサンプルを設置した場合の位相デバイスの位相像である。図7(a)、図7(b)、及び図7(c)は、図6(a)、図6(b)、及び図6(c)のA-A'間である、 $X_{\text{position}} = 840\mu\text{m}$ 、 $1000\mu\text{m}$ 、 $1300\mu\text{m}$ における Y_{position} に対しての位相の変化を示している。図6(b)、図7(b)では精確な位相分布が取得できているが、図6(a)、図6(c)、図7(a)及び図7(c)では位相ノイズの影響を受け、精確な位相像の再生が困難であることが分かる。

20

【0046】

光学測定装置10の計算時間を評価するため、式(3)を用いたSingle-FFT法と、2回のFFTを行う角スペクトル法との 2048×2048 ピクセルホログラムの位相再構成にかかる平均処理時間を比較した結果について述べる。再構成に使用した計算機はIntel Core(TM) i5-2410M、2.30GHz CPU、RAM 8GBである。図8は、計測時に 2rad の位相差があるときに生じる位相のとびを補正する位相アンラッピング処理を含まない位相再構成の計算時間を示している。この図から、本計算手法であるSingle-FFT法の使用時は、角スペクトル法の使用時より2.06倍速く位相再構成処理となることが確認できる。

30

【0047】

<第1実施形態>

図9は、第1実施形態に係る光学測定装置20を示す図である。この光学測定装置20は、透過型の光学測定装置の一例であり、光源であるレーザ1と、レーザ1で発光された光が入力されて球面物体波と球面参照波を出力する光導波路21と、参照波の光路調整に利用する補正ガラス23と、光導波路21から出力された光を合成して干渉させる合成部であるビームスプリッタ8と、ビームスプリッタ8で得られた干渉縞を電気信号として取得するCCDカメラ9とを備える。また、CCDカメラ9は、電子計算機（図示せず）と接続される。光学測定装置20は、光導波路21と、ビームスプリッタ8との間にサンプル7を挟むように配置し、サンプル7に光を照射した場合の位相情報を測定する。具体的には、電子計算機により、CCDカメラ9が取得した電気信号が入力されると、この電気信号を用いて、位相情報を演算する。

40

【0048】

レーザ1には、例えば、ヘリウムネオンレーザを用いる。光導波路21は、レーザ1から光が入力される光を物体波と参照波に分岐させる分岐部211、参照波の位相を変調する変調器であるヒータ212、光を球面波に変換して出射する出射口213（213a、

50

2 1 3 b) を有する。分岐部 2 1 1 は、Y 分岐または方向性結合器で構成される。

【 0 0 4 9 】

ヒータ 2 1 2 は、再生時の 0 次回折光と共役光除去のため、熱光学効果を利用した位相制御である熱光学位相シフトを行う変調器、すなわち、位相シフタである。ヒータ 2 1 2 は、参照波の位相を、 $\pi/2$ ずつシフトさせる。これにより、CCD カメラ 9 で、合計 3 枚の干渉縞の画像（ホログラム）を撮像することができる。

【 0 0 5 0 】

出射口 2 1 3 (2 1 3 a , 2 1 3 b) は、変換部として物体波及び参照波がそれぞれ球面波として出射される。例えば、光導波路 2 1 の出射口 2 1 3 は、使用するレーザ 1 に対し、『伝搬光の波長 > 出射口の幅』となるように設計され、球面波を出射するようにしてもよい。この場合なお、使用するレーザ 1 が発光する光の波長に対して出射口 2 1 3 の幅を決めてもよいし、出射口 2 1 3 の幅に合わせて使用するレーザ 1 を選択してもよい。また、出射口 2 1 3 は、出射する物体波と参照波とが 90 度で交わるように形成される。

【 0 0 5 1 】

補正ガラス 2 3 は、物体波と参照波のサンプル 7 の影響による光路差を補正する。光導波路 2 1 の物体波と参照波の出射口 2 1 3 a , 2 1 3 b の端部間の距離を 13 mm とした場合、原理実験装置を用いて上述した空間分解能、計測範囲を用いた前記設計手法（図 4）により設計し、距離 $|z_o| = 7.6 \text{ mm}$ 、距離 $|z_r| = 9.2 \text{ mm}$ となる。

【 0 0 5 2 】

ビームスプリッタ 8 は、光導波路 2 1 から出力され、サンプル 7 を透過した物体波と、もう一方の参照波とを 90 度の角度で合成する。また、CCD カメラ 9 は、物体波と参照波の干渉縞画像を電気信号に変換する。

【 0 0 5 3 】

電子計算機は、CCD カメラ 9 で受光した電気信号を用いて空間を伝わる光の波動を数値的に計算し、サンプル 7 の拡大像を適切な距離で結像させて、物体の強度分布と位相分布である複素振幅分布を測定結果として算出する。具体的には、電子計算機は、CCD カメラ 9 で変換された電気信号、すなわち、位相シフトさせたホログラムが入力されると、式 (3) を用いて上述したように、このホログラムを用いて複素振幅分布を再生して画像を得る。

【 0 0 5 4 】

図 10 は図 9 に示す光学測定装置 20 における光導波路 2 1 の A - A 線で矢視した断面構造を示す図である。光導波路 2 1 は、シリコン基板 2 2 1 上にバッファ 2 2 2 とコア 2 2 3 (2 2 3 a , 2 2 3 b)、クラッド 2 2 4 が配置される構成である。ここで、一方のコア（物体波用コア）2 2 3 a は物体波用であり、他方のコア（参照波用コア）2 2 3 b は参照波用である。コア 2 2 3 の屈折率は周囲のバッファ 2 2 2 及びクラッド 2 2 4 の屈折率より高いため、光を閉じ込めて伝搬させることができる。

【 0 0 5 5 】

光導波路 2 1 の材質は、石英ガラスやシリコン、高純度ポリイミド系樹脂、ポリアミド系樹脂、 Si_3N_4 などが好適である。これら材質の選定は、使用する光の透過性、屈折率、波長特性、分散性を考慮して適宜選択を行う。また、光導波路 2 1 は、スラブ型に限らず、埋め込み型であってもよい。

【 0 0 5 6 】

光導波路 2 1 を用いることにより、図 1 を用いて上述した光学測定装置 10 の空間光学系に必要な、レーザ 1 からの光を物体波と参照波を分けるのに用いるビームスプリッタ 8 と物体波と参照波を合波するため角度を調整する複数のミラー 2 が不要となるため光軸調整の簡易化及び小型化が可能となる。

【 0 0 5 7 】

上述したように、第 1 実施形態に係る光学測定装置 20 は、レーザ 1 と光導波路 2 1 のみにより球面波を形成することが可能であり、容易に光学調整できるとともに、装置を小型化することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 8 】

< 第 2 実施形態 >

図 1 1 は、第 2 実施形態に係る光学測定装置 3 0 を示す図である。この光学測定装置 3 0 も透過型の光学測定装置であり、第 1 実施形態の光学測定装置 2 0 と比較して、ヒータ 2 1 2 を備えない点で異なる。

【 0 0 5 9 】

第 1 実施形態に係る光学測定装置 2 0 は、変調器としてヒータ 2 1 2 を備え、位相シフト法を利用していた。これに対し、光学測定装置 3 0 は、電子計算機 1 1 において、再構成計算処理にオフアクシス法を利用することで、ヒータ 2 1 2 を備えない場合でも対応することができる。オフアクシス法は一回の撮像で、干渉縞強度を取得し、再構成の演算部分においてフーリエ変換法やヒルベルト変換法を利用して強度と位相を再構成する方法である。

10

【 0 0 6 0 】

位相シフト法では複数の画像を用いるのに対し、フーリエ変換法やフーリエ変換解析法では 1 回の撮影で得られた干渉縞画像から位相分布の抽出を行う。これは、インライン（完全な同軸）状態から干渉光を傾けて、干渉縞を意図的に作り、その縞をキャリア空間周波数として重畳する方法である。物体により波面が変化するが、キャリア空間周波数を基本搬送波とするパターンの位相変調とみなせる。この点に着目すると、二次元フーリエ変換・逆変換を用いたフィルタリングにより、複素振幅分布を計測できる。

【 0 0 6 1 】

光導波路 2 1 の構成材質は、図 1 0 を用いて上述した通り、石英ガラスやシリコン、高純度ポリイミド系樹脂、ポリアミド系樹脂などが好適である。

20

【 0 0 6 2 】

なお、この光学測定装置 3 0 を利用する場合、一回の撮像で再構成が可能であること、変調器であるヒータが不要であるというメリットがある。しかしながら、光学測定装置 3 0 を利用して再構成される画像の面積は、光学測定装置 2 0 を利用して再構成される画像の面積と比較して、概ね 1 / 8 倍に制限される。

【 0 0 6 3 】

上述したように、第 2 実施形態に係る光学測定装置 3 0 は、光学測定装置 2 0 と同様に、レーザ 1 と光導波路 2 1 のみにより球面波を形成することが可能であり、容易に光学調整できるとともに、装置を小型化することができる。また、光学測定装置 3 0 では、光導波路 2 1 が変調器であるヒータを有する必要がない。さらに、光学測定装置 3 0 は、変調器が不要であるため画像を複数回撮像する必要がなく、一回の撮像で再構成が可能である。

30

【 0 0 6 4 】

< 第 3 実施形態 >

図 1 2 は、第 3 実施形態に係る光学測定装置 2 0 A を示す図である。この光学測定装置 2 0 A も、透過型の光学測定装置である。光学測定装置 2 0 A は、図 9 を用いて上述した第 1 実施形態に係る光学測定装置 2 0 と比較して、ビームスプリッタ 8 の向きと CCD カメラ 9 の位置が異なる。光学測定装置 2 0 A の光導波路 2 1 は、図 1 0 を用いて上述した光学測定装置 2 0 の光導波路 2 1 と同一である。また、光学測定装置 2 0 A においても、参照波（参照光）とサンプル 7 を透過した物体波（物体光）とをビームスプリッタ 8 により合成し、CCD カメラ 9 を介して電子計算機（図示せず）で記録する。

40

【 0 0 6 5 】

具体的には、図 9 の光学測定装置 2 0 では、サンプル 7 を透過した物体波はビームスプリッタ 8 で反射し、参照波はビームスプリッタ 8 を透過し、この物体波と参照波とが合成される。これに対し、図 1 2 の光学測定装置 2 0 A では、サンプル 7 を透過した物体波はビームスプリッタ 8 を透過し、参照波はビームスプリッタ 8 において反射し、この物体波と参照波とが合成される。

【 0 0 6 6 】

50

上述したように、第3実施形態に係る光学測定装置20Aは、光学測定装置20と同様に、レーザ1と光導波路21のみにより球面波を形成することが可能であり、容易に光学調整できるとともに、装置を小型化することができる。

【0067】

<第4実施形態>

図13は、第4実施形態に係る光学測定装置20Bを示す図である。この光学測定装置20Bは、反射型の光学測定装置の一例である。図9を用いて上述した第1実施形態に係る光学測定装置20は、サンプル7を透過させた物体波を測定に利用する。これに対し、光学測定装置20Bは、サンプル7を反射させた物体波を測定に利用する。したがって、光学測定装置20Bは、光学測定装置20と比較して、サンプル7の位置が異なり、ビームスプリッタ8の向きが90°異なる。また、光学測定装置20Bは、参照波とサンプル7を反射して得られた物体波とをビームスプリッタ8により合成し、CCDカメラ9を介して、電子計算機(図示せず)で記録する。なお、反射型の光学測定装置の場合、物体波と参照波のサンプル7の影響による光路差補正は不要であるため、光学測定装置20Bは、補正ガラス23を有しない。

10

【0068】

具体的には、図13の光学測定装置20Bでは、光導波路21から出力された物体波はビームスプリッタ8を透過してサンプル7で反射した後、ビームスプリッタ8においてCCDカメラ9の方向に反射し、ビームスプリッタ8を透過する参照光と合成される。

【0069】

なお、光学測定装置20Bの光導波路21は、図10を用いて上述した光学測定装置20の光導波路21と同一であるが、図9、図11、図12等の光導波路21は四角形であるのに対し、六角形である点で異なる。このように、光導波路21の構造上、光の伝搬に影響を与えない部分を切断することで、より小型化を図ることができる場合もある。

20

【0070】

上述したように、第4実施形態に係る光学測定装置20Bは、光学測定装置20と同様に、レーザ1と光導波路21のみにより球面波を形成することが可能であり、容易に光学調整できるとともに、装置を小型化することができる。

【0071】

また、光学測定装置20Bでは、ビームスプリッタ8の向きを光学測定装置20と異なるように配置し、サンプル7を反射して得られた物体波を利用する。これにより、光学測定装置20Bでは、透過型の光学測定装置20、20Aとは異なり、ペン型タイプの光学測定装置としてサンプル7の測定をすることができる。これにより、例えば、医療用の内視鏡等の小型な装置に利用することができる。

30

【0072】

<第5実施形態>

図14は、第5実施形態に係る光学測定装置20Cを示す図である。この光学測定装置20Cは、反射型の光学測定装置の他の例である。光学測定装置20Cは、図13を用いて上述した第4実施形態に係る光学測定装置20Bと比較して、光導波路21の出射口213の角度が異なるとともに、ビームスプリッタ8の向きが異なり、さらに、参照波の方向を調整するミラー24を備える点で異なる。なお、光学測定装置20Cにおいても、参照波とサンプル7を反射して得られた物体波とをビームスプリッタ8により合成し、CCDカメラ9を介して電子計算機で記録する。

40

【0073】

具体的には、図13の光学測定装置20Bの光導波路21は、物体波と参照波とが90°で合波するよう物体波用の出射口213aと参照波用の出射口213bとが形成されていた。これに対し、図14の光学測定装置20Cの光導波路21において、物体波用の出射口213aと参照波用の出射口213bは、各光を並行に出力する。したがって、光学測定装置20Cでは、ミラー24を用いて参照波がビームスプリッタ8に照射するように調整する。

50

【0074】

光学測定装置20Cでは、光導波路21から出力される物体波は、ビームスプリッタ8を透過してサンプル7で反射した後、ビームスプリッタ8でCCDカメラ9の方向に反射する。また、光導波路21からの参照波は、ミラー24においてCCDカメラ9の方向に反射し、ビームスプリッタ8を透過する。これにより、ビームスプリッタ8で物体波と参照波とが合成され、CCDカメラ9で記録される。

【0075】

上述したように、第5実施形態に係る光学測定装置20Cは、光学測定装置20と同様に、レーザ1と光導波路21のみにより球面波を形成することが可能であり、容易に光学調整できるとともに、装置を小型化することができる。また、光学測定装置20Cは、光学測定装置20Bと同様にペン型タイプの光学測定装置としてサンプル7の測定をすることができる。これにより、光学測定装置20Cも、医療用内視鏡等の小型な装置に利用することができる。

10

【0076】

<第6実施形態>

図15は、第6実施形態に係る光学測定装置50を示す図である。この光学測定装置50は、第1実施形態に係る光導波路21に波長合分波器40を結合させた一例である。また、光学測定装置50は、レーザ1と、ビームスプリッタ8と、電子計算機(図示せず)に接続されるCCDカメラ9と、補正ガラス23とを備える。なお、補正ガラス23は無くても解像度やシステムとして十分な性能が得られる場合もある。

20

【0077】

波長合分波器40は、入力部41と分波器42と合波器44と出力部45を備える。また、波長合分波器40は、分波器42と合波器44の間に複数の光スイッチ43(43-1~43-n)を備える。光スイッチ43は、レーザ1から出力される光の波長毎に、それぞれ設けられている。たとえば、レーザ1から赤色、緑色、青色の光が出力される場合、3個の光スイッチを備える。また、光スイッチ43は、一般的な光スイッチであって、第1の結合部43a及び第2の結合部43bが設けられ、2入力2出力の構成を有し、光信号の通過と遮断を切り替え可能に構成される。さらに、光スイッチ43は、結合部43a、43bの間にSW43cが設けられている。ここで、光スイッチ43が熱光学光スイッチの場合、SW43cは、例えばヒータ等である。

30

【0078】

このような構成において、光源であるレーザ1から出力される光が波長多重光として分波器42に入力されると、分波器42で分波され、対応する波長の光が各光スイッチ43-1、・・・43-m、43-nに入射される。そして光学測定装置50の利用者により入力された選択信号で選択された光スイッチ43を伝搬した光のみが合波器44に出力される。すなわち、選択された波長の光のみが合波器44に出力される。

【0079】

例えば、光学測定装置では、測定に使用する光の波長の違いで観察できる深度が異なる。すなわち、同一のサンプルであっても、異なる複数の波長の光を利用して、測定が必要な場合もある。このような波長合分波器40を光導波路21に結合し、波長多重光を利用すると、選択した波長の光を測定に利用することができるので、測定対象物毎にそれに適した光学測定装置を用意する必要がない。したがって、利用者は、複数台の光学測定装置を容易する必要がなく、必要に応じて容易に波長を選択して測定することができる。

40

【0080】

このとき、レーザ1は、光スイッチ43の数に応じた複数個のレーザを容易する必要があるが、仮に、白色レーザを利用する場合、レーザ1の数は1つでよい。すなわち、白色レーザから発光される光は複数の波長の光が含まれるため、分波器42を利用し、白色レーザから発光された光から各光スイッチ43に応じた波長の光を分波し、利用することができる。

【0081】

50

ここで、異なる波長で再生する場合は、結像位置（伝搬距離） Z 及び横倍率 M の算出に、下記の式（10）及び（11）を利用する。ここで、記録波長を λ_1 、再生波長を λ_2 、再生光源位置、 z_p 、参照光源位置 z_r 、物体位置 z_0 とする。再生では $z_p = 0$ であるため、第一項は0となる。

【0082】

【数10】

$$Z = \left(\frac{1}{z_p} \pm \frac{\lambda_2}{\lambda_1 z_r} \mp \frac{\lambda_2}{\lambda_1 z_0} \right)^{-1} \quad (10)$$

$$M = \left| 1 - \frac{z_0}{z_r} \mp \frac{\lambda_1 z_0}{\lambda_2 z_p} \right|^{-1} \quad (11)$$

【0083】

ここで異なる波長を利用する場合は記録波長が異なることになり、再生位置や倍率が変化するが、電子計算機による計算により問題なく再生できる。

【0084】

なお、上述した光導波路21と波長合分波器40は同一基板上に形成しても良い。同一基板上に両方の光デバイスを形成した場合は、別々に製造するよりも製造工程を簡略化することができ、製造コストも軽減することができる。また光導波路21と波長合分波器40の接続部分における光ロスを最小限に抑えることができる。

20

【0085】

上述したように、第6実施形態に係る光学測定装置50は、光学測定装置20と同様に、レーザ1と光導波路21のみにより球面波を形成することが可能であり、装置を小型化することができる。また、1つのレーザ1のみで複数の波長の光を選択して利用することが可能であるため、複数のレーザ1を使用する場合や複数の光学測定装置を利用する場合と比較して装置を簡易化することが可能であるとともに、製造コストを低減することができる。また、複数の波長による測定を容易に切り替えることができるため、利用者にとって、測定の際の利便性が向上される。

【0086】

<第7実施形態>

続いて、第7実施形態に係る光学測定装置について説明する。図を用いた説明は省略するが、第7実施形態に係る光学測定装置は、第1乃至第6実施形態に係るいずれかの光学測定装置を複数配列し、各光学測定装置のCCDカメラが1台の電子計算機と接続される、アレイ顕微鏡である。複数の光学測定装置の配列方法については、限定されないが、複数の光学測定装置を1列に配置してもよいし、複数列に配置してもよい。また、複数のレーザを利用してよいし、1つのレーザのみを利用し、この1つのレーザから出力される光を各光導波路に出力してもよい。電子計算機では、各CCDカメラで取得された電気信号を利用して位相情報をそれぞれ演算し、複数の演算結果を合成する。これにより、第7実施形態に係る光学測定装置では、サンプル7の広範囲の観察領域を一回で測定することが可能になる。

30

40

【0087】

以上、実施形態を用いて本発明を説明したが、本発明は、本明細書中に説明した実施形態に限定されるものではない。本発明の範囲は、特許請求の範囲の記載及び特許請求の範囲と均等の範囲に決定されるものである。また、各実施形態の各構成を組み合わせてもよい。

【符号の説明】

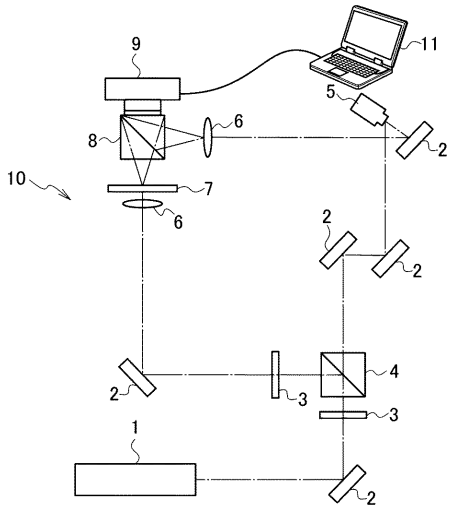
【0088】

- 1 レーザ（光源）
- 2 ミラー
- 3 半波長板

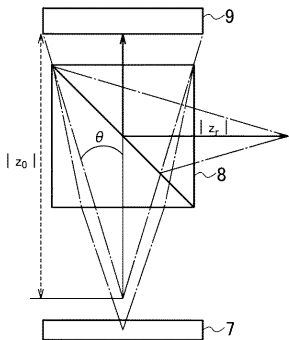
50

- 4 偏光ビームスプリッタ
- 5 ピエゾ素子
- 6 レンズ
- 7 サンプル
- 8 ビームスプリッタ (合成部)
- 9 CCDカメラ (撮像素子)
- 10、20、20A、20B、20C、30、50 光学測定装置
- 11 電子計算機
- 12 物体面
- 13 撮像面 10
- 14 結像面
- 15 参照点
- 21、31 光導波路
- 23 補正ガラス
- 24 ミラー
- 40 波長合分波器
- 41 入力部
- 42 分波器
- 43 光スイッチ
- 44 合波器 20
- 45 出力部
- 211 分岐部
- 212 ヒータ (変調器)
- 221 シリコン基板
- 222 バッファ
- 223 (223a、223b) コア
- 224 クラッド
- z₀ 第1距離
- z_r 第2距離

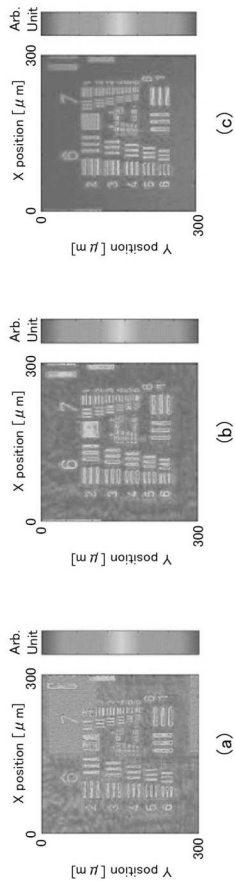
【図1】



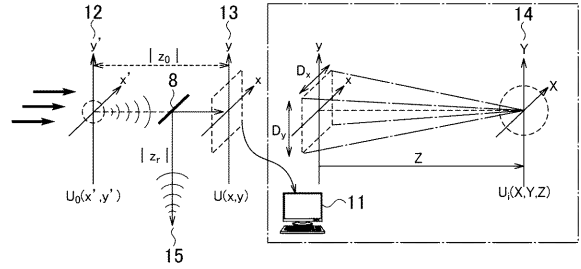
【図2】



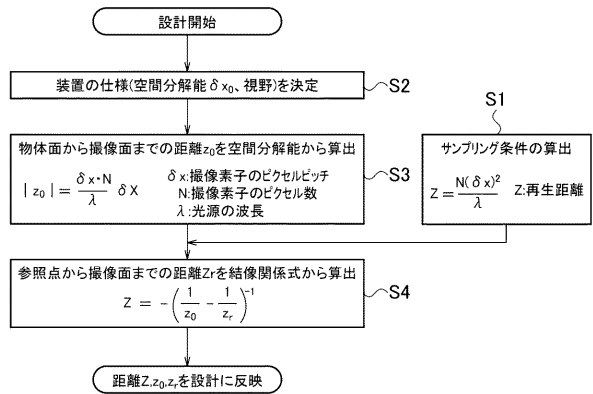
【図5】



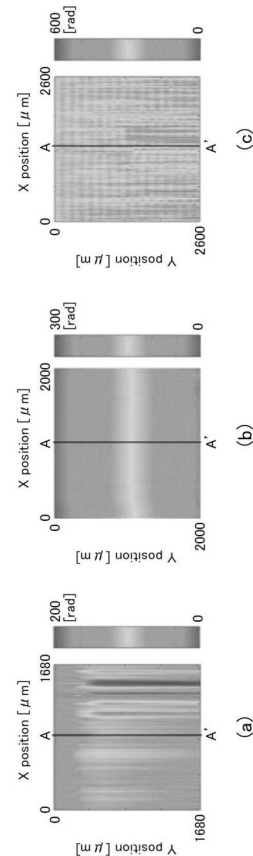
【図3】



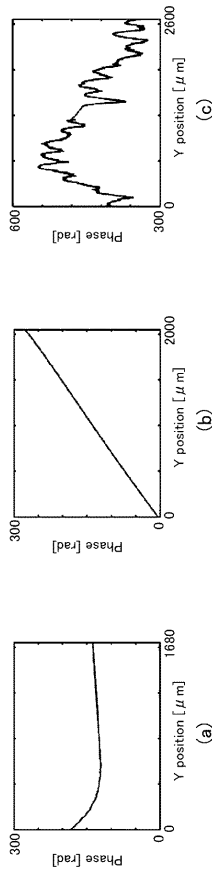
【図4】



【図6】



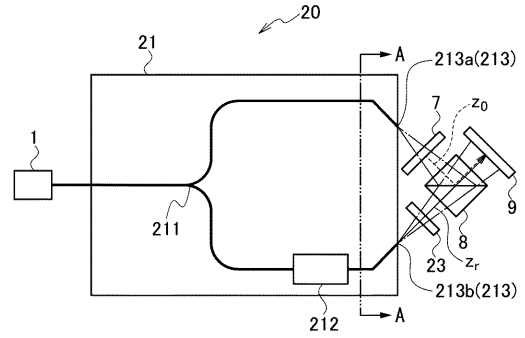
【図7】



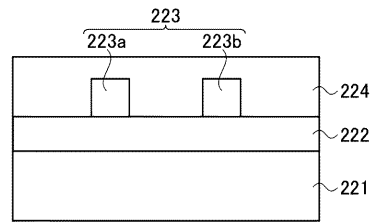
【図8】

計算手法	FFT回数	位相シフト(秒)	高速フーリエ変換(秒)	その他(秒)	合計(秒)
Single-FFT法	1回	0.113	0.111	0.107	0.331
角スペクトル法	2回	0.113	0.274	0.296	0.683

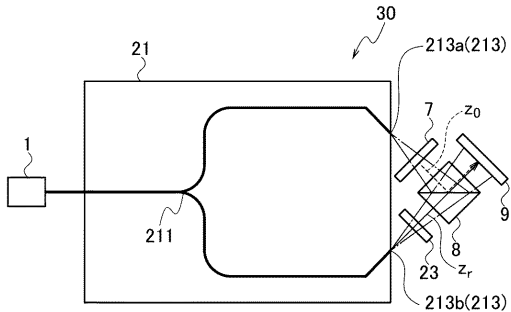
【図9】



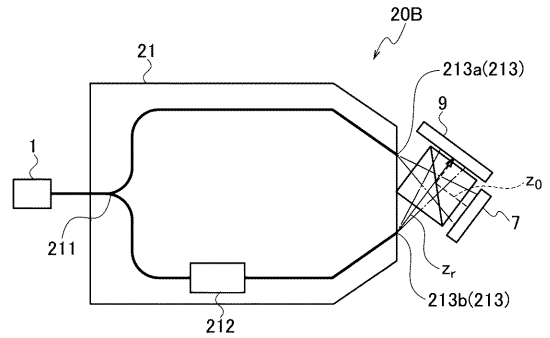
【図10】



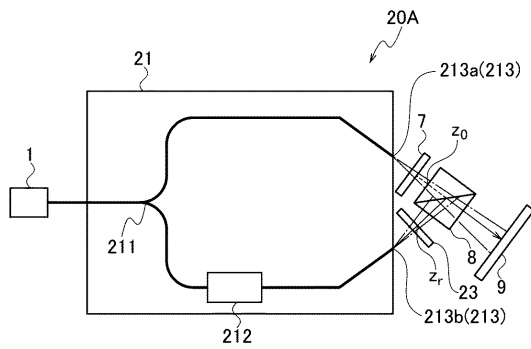
【図11】



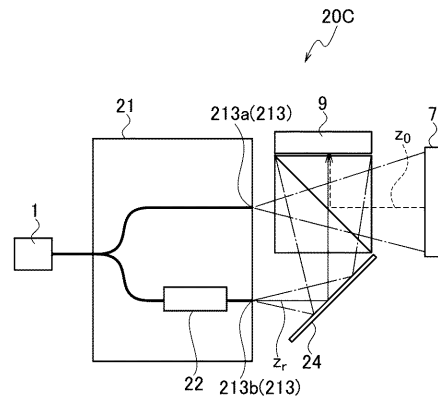
【図13】



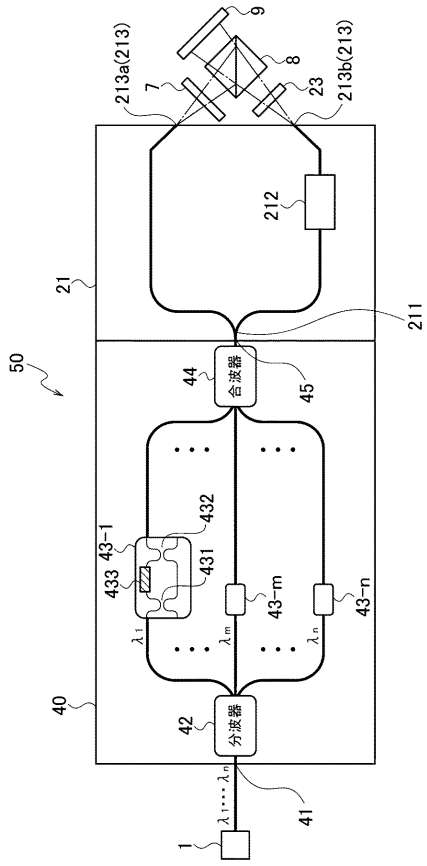
【図12】



【図14】



【図 15】



フロントページの続き

(72)発明者 水野 潤

東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内

(72)発明者 星野 和博

東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内

(72)発明者 池田 佳奈美

東京都調布市調布ヶ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内

Fターム(参考) 2F064 AA09 EE04 FF01 GG06 GG12 GG23 GG39 HH08 JJ15

2K008 AA06 BB04 HH01 HH24 HH28