

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2017年6月22日(22.06.2017)



(10) 国際公開番号
WO 2017/104507 A1

- (51) 国際特許分類:
G01B 9/02 (2006.01) **G02B 21/00** (2006.01)
G01N 21/45 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/086391
- (22) 国際出願日: 2016年12月7日(07.12.2016)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2015-243271 2015年12月14日(14.12.2015) JP
- (71) 出願人: 浜松ホトニクス株式会社(HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) [JP/JP]; 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 Shizuoka (JP).
- (72) 発明者: 山内 豊彦(YAMAUCHI Toyohiko); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP). 山田 秀直(YAMADA Hidenao); 〒4358558 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 Shizuoka (JP).
- (74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外(HASEGAWA Yoshiki et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目1番1号丸の内 MY PLAZA (明治安田生命

ビル) 9階 創英国際特許法律事務所 Tokyo (JP).

- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): 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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KW, 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, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

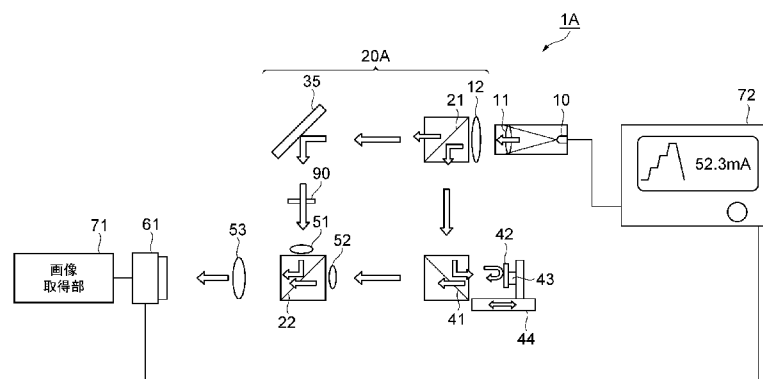
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ユーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: INTERFERENCE OBSERVATION DEVICE AND INTERFERENCE OBSERVATION METHOD

(54) 発明の名称: 干渉観察装置および干渉観察方法



71 Image acquisition unit

(57) Abstract: An interference observation device 1A is provided with a light source 10, a branching beam splitter 21, a converging beam splitter 22, a mirror 35, a beam splitter 41, a mirror 42, a piezo element 43, a stage 44, a photodetector 61, an image acquisition unit 71, and a current control unit 72. An interference optical system 20A that extends from the branching beam splitter 21 to the converging beam splitter 22 constitutes part of a Mach-Zehnder interferometer. The current control unit 72 controls the wavelength of laser light outputted from the light source 10, and adjusts the phase difference between two branched light components at the time of convergence by the converging beam splitter 22. The present invention thereby realizes an interference observation device and an interference observation method with which it is possible to easily make optical adjustments using the optical system of a Mach-Zehnder interferometer and to easily acquire an interference image of a subject under observation.

(57) 要約:

[続葉有]



WO 2017/104507 A1



干渉観察装置 1 A は、光源 1 0、分岐用ビームスプリッタ 2 1、合波用ビームスプリッタ 2 2、ミラー 3 5、ビームスプリッタ 4 1、ミラー 4 2、ピエゾ素子 4 3、ステージ 4 4、光検出器 6 1、画像取得部 7 1 および電流制御部 7 2 を備える。分岐用ビームスプリッタ 2 1 から合波用ビームスプリッタ 2 2 に到る迄の干渉光学系 2 0 A は、マッハツェンダ干渉計を構成している。電流制御部 7 2 は、光源 1 0 から出力されるレーザ光の波長を制御して、合波用ビームスプリッタ 2 2 による合波の際の 2 つの分岐光成分の間の位相差を調整する。これにより、マッハツェンダ干渉計の光学系を用いて容易に光学調整をすることができ容易に観察対象物の干渉画像を取得することができる干渉観察装置および干渉観察方法が実現される。

明 細 書

発明の名称： 干渉観察装置および干渉観察方法

技術分野

[0001] 本発明の一側面は、干渉観察装置および干渉観察方法に関するものである。

背景技術

[0002] 観察対象物の干渉画像を取得する干渉観察装置は、マイケルソン (Michelson) 干渉計またはマッハツェンダ (Mach-Zehnder) 干渉計の光学系を用いて、観察対象物で反射または透過した光と参照光とを干渉させることで、観察対象物の干渉画像を取得することができる。非特許文献1に記載された干渉観察装置は、マッハツェンダ干渉計の光学系を用いるものであって、光源から出力された光を分岐して第1分岐光および第2分岐光とし、第1分岐光を観察対象物で透過させ、第1分岐光と第2分岐光とを合波して、その合波により生じる干渉光の画像を取得する。

先行技術文献

非特許文献

[0003] 非特許文献1: Christopher J. Mann, et al, "High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography," OPTICS EXPRESS, Vol.13, No.22, pp.8693-8698 (2005)

非特許文献2: A. A. Freschi, et al, "Adjustable phase control in stabilized interferometry," OPTICS LETTERS, Vol.20, No.6, pp.635-637 (1995)

非特許文献3: Toyohiko Yamauchi, et al, "Low-coherent quantitative phase microscope for nanometer-scale measurement of living cells morphology," OPTICS EXPRESS, Vol.16, No.16, pp.12227-12238 (2008)

非特許文献4: Hidenao Iwai, et al, "Quantitative phase imaging using a actively stabilized phase-shifting low-coherence interferometry," OPTI

CS LETTERS, Vol.29, No.20, pp.2399-2401 (2004)

非特許文献5: Ichirou Yamaguchi, et al, "Active phase-shifting interferometers for shape and deformation measurements," Opt. Eng., Vol.35, No.10, pp.2930-2937 (1996)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] マイケルソン干渉計の光学系を用いる場合と比較して、マッハツェンダ干渉計の光学系を用いる場合は、分岐から合波までの第1分岐光と第2分岐光との間の光路長差を調整したり変化させたりすることが困難であるので、白色光干渉計や波長掃引タイプの位相シフト干渉計を実現することが困難である。非特許文献1に記載された干渉観察装置は、光路長差を調整する機能を有していない。

[0005] 本発明の一側面は、上記問題点を解消する為になされたものであり、マッハツェンダ干渉計の光学系を用いて容易に光学調整をすることができ容易に観察対象物の干渉画像を取得することができる干渉観察装置および干渉観察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

[0006] 本発明の一側面による干渉観察装置は、(1) レーザ光の波長が可変である光源と、(2) 光源から出力されたレーザ光を分岐して第1分岐光および第2分岐光を出力する分岐用ビームスプリッタと、第1分岐光と第2分岐光とを合波して合波光を出力する合波用ビームスプリッタとを含み、マッハツェンダ干渉計を構成する干渉光学系と、(3) 光源から出力されるレーザ光の波長を制御して、合波用ビームスプリッタによる合波の際の第1分岐光と第2分岐光との間の位相差を調整する制御部と、を備える。

[0007] 本発明の一側面による干渉観察方法は、(1) 波長可変の光源からレーザ光を出力するステップ(光出力ステップ)と、(2) マッハツェンダ干渉計を構成する干渉光学系の分岐用ビームスプリッタにより、光源から出力されたレーザ光を第1分岐光および第2分岐光に分岐するステップ(光分岐ステ

ップ)と、(3)干渉光学系の合波用ビームスプリッタにより、第1分岐光と第2分岐光とを合波して合波光を出力するステップ(光合波ステップ)と、(4)光源から出力されるレーザ光の波長を制御して、合波用ビームスプリッタによる合波の際の第1分岐光と第2分岐光との間の位相差を調整するステップ(調整ステップ)と、を備える。

発明の効果

[0008] 本発明の一側面によれば、マッハツェンダ干渉計の光学系を用いて容易に光学調整をすることができ容易に観察対象物の干渉画像を取得することができる。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]図1は、第1実施形態の干渉観察装置1Aの構成を示す図である。

[図2]図2は、レーザ光波長と位相差シフト量 ϕ_{shift} との間の関係の例を示すグラフである。

[図3]図3は、光源10が縦マルチモード発振するレーザダイオードを含むものである場合における合波光強度と光路長差 ΔL との間の関係の例を示すグラフである。

[図4]図4は、図3の一部について横軸を拡大して示すグラフである。

[図5]図5は、図3の一部について横軸を拡大して示すグラフである。

[図6]図6は、第2実施形態の干渉観察装置1Bの構成を示す図である。

[図7]図7は、第3実施形態の干渉観察装置1Cの構成を示す図である。

[図8]図8は、第4実施形態の干渉観察装置1Dの構成を示す図である。

[図9]図9は、第5実施形態の干渉観察装置1Eの構成を示す図である。

[図10]図10は、第6実施形態の干渉観察装置1Fの構成を示す図である。

[図11]図11は、実施例において光源10のレーザダイオードに供給される電流の時間的変化および光検出器61の撮像期間を示すグラフである。

[図12]図12は、(a)、(b)実施例で得られた強度補正前の干渉画像を示す図である。

[図13]図13は、(a)、(b)実施例で得られた強度補正前の干渉画像を

示す図である。

[図14]図14は、(a)、(b)実施例で得られた強度補正後の干渉画像を示す図である。

[図15]図15は、(a)、(b)実施例で得られた強度補正後の干渉画像を示す図である。

[図16]図16は、実施例で得られた位相アンラッピング処理前の位相画像を示す図である。

[図17]図17は、実施例で得られた位相アンラッピング処理後の位相画像を示す図である。

[図18]図18は、第2実施形態の変形例の干渉観察装置1B'の構成を示す図である。

発明を実施するための形態

[0010] 以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。本発明は、これらの例示に限定されるものではない。

[0011] (第1実施形態)

[0012] 図1は、第1実施形態の干渉観察装置1Aの構成を示す図である。干渉観察装置1Aは、光源10、レンズ11、レンズ12、分岐用ビームスプリッタ21、合波用ビームスプリッタ22、ミラー35、ビームスプリッタ41、ミラー42、ピエゾ素子43、ステージ44、レンズ51、レンズ52、チューブレンズ53、光検出器(受光部)61、画像取得部71および電流制御部(制御部、コントローラ)72を備える。分岐用ビームスプリッタ21から合波用ビームスプリッタ22に到る迄の干渉光学系20Aは、マッハツェンダ干渉計を構成している。また、光検出器61は、例えば撮像部であっても良い。

[0013] この干渉観察装置1Aは、観察対象物90の透過光に基づいて干渉画像を取得する。観察対象物90は、特定の細胞や生体サンプルに限定されるものではない。例えば、観察対象物として、培養細胞、不死化細胞、初代培養細

胞、がん細胞、脂肪細胞、肝臓細胞、心筋細胞、神経細胞、グリア細胞、体性幹細胞、胚性幹細胞、多能性幹細胞、iPS細胞、および、これらの細胞の少なくとも1つの細胞をもとに作られた細胞塊（スフェロイド）などが挙げられる。また、観察対象物として、生体に限らず、透過型の構成で計測可能な工業サンプル、たとえばガラス内部、半導体素子の内部、樹脂素材、液晶、高分子化合物、光学素子なども挙げられる。

[0014] 光源10はレーザ光を出力する。そのレーザ光の波長は可変であり、光源10は波長掃引が可能である。光源10はレーザダイオードを含む構成であってもよい。そのレーザダイオードは、空間シングルモードレーザダイオードであってもよく、空間マルチモードレーザダイオードであってもよい。レンズ11、12は、光源10から出力されたレーザ光を観察対象物90に集光する。

[0015] 分岐用ビームスプリッタ21は、光源10と光学的に結合され、光源10から出力されてレンズ11、12を経たレーザ光を入力し、そのレーザ光を2分岐して第1分岐光および第2分岐光とする。分岐用ビームスプリッタ21は例えばハーフミラーであってもよい。分岐用ビームスプリッタ21は、第1分岐光を測定側光学系のミラー35へ出力し、第2分岐光を参照側光学系のビームスプリッタ41へ出力する。

[0016] 測定側光学系に設けられたミラー35は、分岐用ビームスプリッタ21から出力された第1分岐光を入力して、その第1分岐光を合波用ビームスプリッタ22へ反射させる。

[0017] 参照側光学系には、ビームスプリッタ41、ミラー42、piezo素子43およびステージ44が設けられている。ビームスプリッタ41は、分岐用ビームスプリッタ21から出力された第2分岐光を入力してミラー42へ反射させ、また、ミラー42で反射された第2分岐光を入力して合波用ビームスプリッタ22へ透過させる。ビームスプリッタ41は例えばハーフミラーであってもよい。

[0018] piezo素子43は、ミラー42の反射面に垂直な方向に該ミラー42を移

動させることができる。ステージ４４は、ミラー４２の反射面に垂直な方向に該ミラー４２およびピエゾ素子４３を移動させることができる。ピエゾ素子４３およびステージ４４は、参照側光学系の光路長を調整することができる、第１分岐光と第２分岐光との光路長差を調整することができる。

[0019] 合波用ビームスプリッタ２２は、ミラー３５で反射され観察対象物９０およびレンズ５１を経た第１分岐光を入力するとともに、ビームスプリッタ４１から出力されレンズ５２を経た第２分岐光を入力して、これら第１分岐光と第２分岐光とを合波して合波光を出力する。合波用ビームスプリッタ２２は例えばハーフミラーであってもよい。

[0020] チューブレンズ５３は、合波用ビームスプリッタ２２から出力された合波光を光検出器６１へ導き、その合波光を光検出器６１の撮像面上に結像させる。光検出器６１は、その合波光を受光して検出信号を出力するものであり、特に撮像面上の合波光の強度分布を表す検出信号を出力する。光検出器６１は、例えばＣＣＤエリアイメージセンサやＣＭＯＳエリアイメージセンサなどのイメージセンサである。

[0021] 画像取得部７１は、光検出器６１から出力された検出信号を入力し、その検出信号に基づいて観察対象物９０の干渉画像を取得する。画像取得部７１は、ＦＰＧＡ（Field Programmable Gate Array）やＧＰＵ（Graphics Processing Unit）などの画像処理プロセッサを含んで構成される。画像取得部７１は、例えば、パーソナルコンピュータ、スマートデバイス（例えばタブレット端末等）、クラウドサーバなどのコンピュータである。また、画像取得部７１は、干渉画像等を表示する表示部を備えていてもよい。

[0022] 電流制御部７２は、光源１０に電氣的に接続され、光源１０へ供給する電流を調整することで、光源１０から出力されるレーザ光の波長を制御する。これにより、電流制御部７２は、合波用ビームスプリッタ２２による合波の際の第１分岐光と第２分岐光との間の位相差を調整することができる。

[0023] 本実施形態の干渉観察方法では、干渉観察装置１Ａを用いて以下のようにして観察対象物９０の干渉画像を取得することができる。

[0024] マッハツェンダ干渉計を構成する干渉光学系 20A において、光源 10 から出力されたレーザ光は分岐用ビームスプリッタ 21 により 2 分岐されて第 1 分岐光および第 2 分岐光とされる。そして、干渉光学系 20A において、ミラー 35 で反射され観察対象物 90 を透過した第 1 分岐光と、ビームスプリッタ 41 およびミラー 42 を経た第 2 分岐光とは、合波用ビームスプリッタ 22 により合波されて、合波光が合波用ビームスプリッタ 22 から出力される。その合波光は光検出器 61 により受光されて、光検出器 61 から検出信号が出力される。その検出信号に基づいて画像取得部 71 により観察対象物 90 の干渉画像が取得される。

[0025] 特に本実施形態では、光源 10 から出力されるレーザ光の波長が電流制御部 72 により制御されて、合波用ビームスプリッタ 22 による合波の際の第 1 分岐光と第 2 分岐光との間の位相差が調整されて、検出信号に基づいて観察対象物 90 の干渉画像が取得される。

[0026] 次に、レーザ光の波長と位相差との間の関係について説明する。分岐用ビームスプリッタ 21 から合波用ビームスプリッタ 22 に到るまでの第 1 分岐光と第 2 分岐光との間の光路長差を ΔL とする。レーザ光の波長が λ_0 であるとき、合波用ビームスプリッタ 22 による合波の際の第 1 分岐光と第 2 分岐光との間の位相差 ϕ_0 は下記 (1) 式で表される。レーザ光の波長が λ_1 であるとき、合波用ビームスプリッタ 22 による合波の際の第 1 分岐光と第 2 分岐光との間の位相差 ϕ_1 は下記 (2) 式で表される。ここで、 $\text{mod}(a, b)$ は、 a を b で割ったときの余り（剰余）である。

[数1]

$$\phi_0 = 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Delta L}{\lambda_0}, 1\right) \quad \dots(1)$$

[数2]

$$\phi_1 = 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Delta L}{\lambda_1}, 1\right) \quad \dots(2)$$

[0027] したがって、レーザ光の波長を λ_0 から λ_1 に変化させたときの第 1 分岐光

と第2分岐光との間の位相差シフト量 ϕ_{shift} は下記 (3) 式で表される。この式から分るように、光路長差 $\Delta L = 0$ である場合、レーザ光の波長を変化させても第1分岐光と第2分岐光との間の位相差は変化しない。光路長差 $\Delta L \neq 0$ である場合、レーザ光の波長を変化させると第1分岐光と第2分岐光との間の位相差は変化し、その位相差シフト量 ϕ_{shift} は光路長差 ΔL と波長変化量との積に比例する。すなわち、波長変化量に比例した位相差シフト量 ϕ_{shift} を実現することができる。

[数3]

$$\begin{aligned}\phi_{\text{shift}} &= \phi_1 - \phi_0 = 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Delta L}{\lambda_1}, 1\right) - 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Delta L}{\lambda_0}, 1\right) \\ &= 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Delta L}{\lambda_1} - \frac{\Delta L}{\lambda_0}, 1\right) \\ &= 2\pi \cdot \text{mod}\left(\frac{\Delta L(\lambda_0 - \lambda_1)}{\lambda_0 \lambda_1}, 1\right) \quad \dots(3)\end{aligned}$$

[0028] 光源10がレーザダイオードを含む場合、光源10から出力されるレーザ光の波長は、レーザダイオードに供給される電流に対して線形関係にある。図2は、レーザ光波長と位相差シフト量 ϕ_{shift} との関係の例を示すグラフである。ここでは、レーザ光波長が630nmから630.3nmまで連続的に変化するとし、光路長差 $\Delta L = 1\text{mm}$, 2mm , 5mm それぞれについて上記(3)式により位相差シフト量 ϕ_{shift} を求めた。

[0029] ところで、位相シフト干渉計において、合波の際の第1分岐光と第2分岐光との間の位相差は $0 \sim 2\pi$ の範囲でシフトできることが望ましい。例えば、光源10の出力光波長の可変範囲が630nm～630.3nmであるとする、光路長差 ΔL が1mmでは、位相差の変化幅は 2π に届かない。計算によれば、位相差の変化幅が 2π 以上である為には、光路長差 ΔL は凡そ1.3mm以上であることが必要である。

[0030] 一方、光路長差 ΔL が長すぎる場合には次のような不都合が生じる。例えば、光路長差 ΔL が13mmである場合を考えると、この場合、位相差の変

化幅を 2π とする為には、光源 10 の出力光波長の可変範囲を $630\text{ nm} \sim 630.03\text{ nm}$ とすればよい。光源 10 への供給電流の変調可能な範囲が 50 mA から 70 mA であり、この供給電流の調整によって $630\text{ nm} \sim 630.3\text{ nm}$ の波長変化が生じるとする。波長を 630 nm から 630.03 nm まで僅かに変化させる場合、供給電流を 50 mA から 52 mA まで微小に変化させることとなる。

[0031] このような微小な電流変化を精度よく行うことは困難である。何故なら、位相シフト干渉計測において、位相変化 0 から 2π までの間を正確に 4 等分し、 0 , $\pi/2$, π , $3\pi/2$ というように位相をシフトさせる必要があることから、位相変化幅 2π の $1/100$ 程度の精度が少なくとも必要となるからである。供給電流を 50 mA から 52 mA まで変化させる場合、供給電流変化幅 2 mA の $1/100$ である $20\text{ }\mu\text{A}$ の精度が必要になり、このような高精度の電流源を実装するのは容易ではない。加えて、レーザダイオードの発振波長は該レーザダイオードの温度に依存することから、このような大きすぎる光路長差 ΔL は温度変化に対して脆弱な条件になってしまう。

[0032] 以上のことから、レーザ光の波長掃引を用いた干渉観察装置においては、計測に先立って、使用する光源 10 の特性に合わせて適切に光路長差 ΔL を設定する必要がある。

[0033] また、光源 10 が縦マルチモード発振するレーザダイオードを含む場合、光路長差 ΔL を適切に設定することはより重要である。縦マルチモード発振したレーザ光の干渉においては、干渉度が極大となる光路長差が離散的に現れることが知られている。例えば、図 1 に示される構成において、光源 10 が縦マルチモード発振するレーザダイオードを含むものとし、光検出器 61 を配置して、ピエゾ素子 43 またはステージ 44 により光路長差 ΔL を変化させる。

[0034] 図 3 は、このとき光検出器により検出される合波光強度と光路長差 ΔL との関係の例を示すグラフである。図 4 は、図 3 における光路長差 $\Delta L = 1.7\text{ mm}$ 付近の部分について横軸を拡大して示すグラフである。図 5 は、図

3における光路長差 $\Delta L = 2.3 \text{ mm}$ 付近の部分について横軸を拡大して示すグラフである。これらの図に示されるように、光路長差 $\Delta L = 1.7 \text{ mm}$ 付近では明滅の顕著な干渉信号が得られるのに対し、光路長差 $\Delta L = 2.3 \text{ mm}$ 付近では干渉信号の明滅が顕著でない。干渉信号の明滅が顕著でない光路長差の条件で干渉観察を行うのは好ましくない。

[0035] 干渉度が極大となる光路長差は凡そ等間隔に現れるが、その間隔は個々のレーザダイオードによって異なる。このことから、光源10の波長掃引を用いた位相シフトマッハツェンダ干渉計において、光源10が縦マルチモード発振するレーザダイオードを含む場合、光路長差 ΔL は、事前に適切な位置に調整されているか、または、干渉観察の度に使用者が調整する必要がある。また、前述したとおり、光源10の波長変調範囲との兼ね合いにより光路長差 ΔL は短すぎても長すぎても不都合であるので、計測に利用しうる光路長差 ΔL の条件は限られている。

[0036] 図1に示される干渉観察装置1Aでは、 piezo素子43またはステージ44によりミラー42を移動させることで光路長差 ΔL を適切な値に設定することができる。ステージ44は光路長差 ΔL を粗調整することができ、piezo素子43は光路長差 ΔL を微調整することができる。そして、光路長差 ΔL を適切な値に設定した状態で、光源10から出力されるレーザ光の波長を変化させることで、合波用ビームスプリッタ22による合波の際の第1分岐光と第2分岐光との間の位相差を調整することができる。

[0037] 本実施形態では、マッハツェンダ干渉計の光学系において、レーザ光の波長を変化させることで合波の際の第1分岐光と第2分岐光との間の位相差を調整するので、容易に光学調整をすることができ、容易に観察対象物90の干渉画像や位相画像を取得することができる。

[0038] 位相画像は、位相差が $\pi/2$ ずつ異なる4枚の干渉画像 $I_1(x, y) \sim I_4(x, y)$ を用いて求めることができる。干渉画像 $I_1(x, y)$ を取得する際の位相差を基準として、干渉画像 $I_2(x, y)$ は $\pi/2$ だけ位相差が異なり、干渉画像 $I_3(x, y)$ は π だけ位相差が異なり、干渉画像 $I_4(x, y)$ は $3\pi/2$ だけ位相差が異なる

。一般に、これらの干渉画像 $I_1 \sim I_4$ から下記 (4) 式で定量位相画像 $\Psi(x, y)$ を求めることができる。なお、 x 、 y は、各画像における位置を示す変数である。

[数4]

$$\psi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_2(x, y) - I_4(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad \dots(4)$$

[0039] しかし、レーザダイオードに供給される電流が変化すると、レーザ光波長だけでなくレーザ光強度も変化する。それ故、上記 (4) 式で求められる定量位相画像 $\Psi(x, y)$ は、干渉画像 $I_1 \sim I_4$ の間でレーザ光強度が一定でないことに因る誤差を含むことになる。そこで、干渉画像 $I_1 \sim I_4$ それぞれを取得する際のレーザ光強度 $P_1 \sim P_4$ を用いて、干渉画像 $I_1 \sim I_4$ について、下記 (5 a) ～ (5 d) 式で補正を行う。そして、補正後の干渉画像 $I_{1C} \sim I_{4C}$ から下記 (6) 式で定量位相画像 $\Psi_C(x, y)$ を求める。このようにすることで、レーザ光強度が一定でないことに因る誤差を取り除くことができる。

[数5]

$$I_{1C} = I_1 / P_1 \quad \dots(5 a)$$

$$I_{2C} = I_2 / P_2 \quad \dots(5 b)$$

$$I_{3C} = I_3 / P_3 \quad \dots(5 c)$$

$$I_{4C} = I_4 / P_4 \quad \dots(5 d)$$

[数6]

$$\psi_C(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_{2C}(x, y) - I_{4C}(x, y)}{I_{1C}(x, y) - I_{3C}(x, y)} \right) \quad \dots(6)$$

[0040] 干渉画像 $I_1 \sim I_4$ それぞれを取得する際のレーザ光強度 $P_1 \sim P_4$ を求めるには、光源 10 に内蔵されているモニタ用光検出器によるレーザダイオードの後方出射光の検出結果を用いてもよいし、第 1 分岐光および第 2 分岐光の何れか一方を遮断した状態における光検出器 61 の受光画素値の平均値を用いてもよい。レーザ光強度 $P_1 \sim P_4$ の各値は、観察の度に測定して求めても

よいし、装置の電源投入時に測定して求めてもよい。また、光源 10 のレーザ光出力強度の安定性が信頼できる場合は、レーザ光強度 $P_1 \sim P_4$ の各値は、装置の工場出荷時に予め測定して装置の記憶部に記憶しておき、その記憶部から読み出して用いるようにしてもよい。

[0041] (第 2 実施形態)

[0042] 図 6 は、第 2 実施形態の干渉観察装置 1 B の構成を示す図である。干渉観察装置 1 B は、光源 10、レンズ 11、レンズ 12、分岐用ビームスプリッタ 21、合波用ビームスプリッタ 22、ビームスプリッタ 31、ミラー 32、ビームスプリッタ 41、ミラー 42、ピエゾ素子 43、ステージ 44、レンズ 51、レンズ 52、チューブレンズ 53、光検出器（受光部）61、画像取得部 71 および電流制御部（制御部、コントローラ）72 を備える。分岐用ビームスプリッタ 21 から合波用ビームスプリッタ 22 に到る迄の干渉光学系 20 B は、マッハツェンダ干渉計を構成している。

[0043] 図 1 に示された第 1 実施形態の干渉観察装置 1 A の干渉光学系 20 A はミラー 35 を含むのに対して、図 6 に示される第 2 実施形態の干渉観察装置 1 B の干渉光学系 20 B はビームスプリッタ 31 およびミラー 32 を含む点で相違する。ビームスプリッタ 31 およびミラー 32 は測定側光学系に設けられている。ビームスプリッタ 31 は、分岐用ビームスプリッタ 21 から出力された第 1 分岐光を入力してミラー 32 へ透過させ、また、ミラー 32 で反射された第 1 分岐光を入力して合波用ビームスプリッタ 22 へ反射させる。ビームスプリッタ 31 は例えばハーフミラーであってもよい。

[0044] なお、ミラー 32 の反射面に垂直な方向に該ミラー 32 を移動させることができるピエゾ素子が設けられてもよい。また、ミラー 32 の反射面に垂直な方向に該ミラー 32 およびピエゾ素子を移動させることができるステージが設けられてもよい。

[0045] 本実施形態でも、第 1 実施形態と同様の効果が得られる他、以下のような効果も得られる。

[0046] 本実施形態では、第 1 分岐光は、ビームスプリッタ 31 およびミラー 32

それぞれにより反射されて、2回の像反転を受ける。第2分岐光は、ビームスプリッタ41およびミラー42それぞれにより反射されて、同様に2回の像反転を受ける。その結果、合波用ビームスプリッタ22による合波の際の第1分岐光および第2分岐光それぞれの像の方向は互いに一致する。一般に、第1分岐光および第2分岐光それぞれの反射による像反転の回数の和が偶数であれば、合波用ビームスプリッタ22による合波の際の第1分岐光および第2分岐光それぞれの像の方向は互いに一致する。

[0047] 合波用ビームスプリッタ22による合波の際の第1分岐光および第2分岐光それぞれの像の方向が互いに一致していれば、空間的にマルチモード（横マルチモード）であっても、第1分岐光と第2分岐光とは光検出器61の撮像面の広い範囲において効率よく干渉することができる。

[0048] なお、第1分岐光および第2分岐光が横マルチモードとなるのは、光源10が横マルチモード発振する場合の他、光源10から分岐用ビームスプリッタ21に到るまでの光学系によって横マルチモードに変化する場合もある。例えば、光源10から出力されたレーザ光をマルチモード光ファイバにより導光して分岐用ビームスプリッタ21に入射させる場合、光源10が横シングルモード発振する場合であっても、レーザ光はマルチモード光ファイバによる導光の間に横マルチモードに変化する。

[0049] また、本実施形態では、測定側光学系（第1分岐光の光学系）と参照側光学系（第2分岐光の光学系）とが互いに同様の構成を有しているので、第1分岐光と第2分岐光との間の光路長差 ΔL を値0付近においても調整することができる。このことから、光路長差 ΔL の設定の自由度が高く、光源10から出力されるレーザ光の波長の可変範囲の設定の自由度が高い。

[0050] さらに、本実施形態では、測定側光学系（第1分岐光の光学系）と参照側光学系（第2分岐光の光学系）とが互いに同様の構成を有しているので、合波光に現れる色分散の影響を抑制することができる。したがって、光源10の出力光スペクトルから計算される理想的なコヒーレンス関数より干渉縞の鮮明度（visibility）が劣化することが抑制される。

[0051] この干渉観察装置 1 B の構成においては、サンプル 90 を別のサンプルに変更した際に、サンプルの厚み又は屈折率が変化して、ステージ 44 を長い距離にわたって移動させる必要が生じ得る。たとえば厚さ $170\text{ }\mu\text{m}$ のカバーガラスをサンプルとした場合、ガラスの屈折率を 1.5 として計算すると、サンプルが無い場合と比べて、サンプルがある場合に生じる光路長の増分は $85\text{ }\mu\text{m}$ ($=170 \times (1.5 - 1)$) である。一方、底面厚さ 1 mm のプラスチックディッシュ上に深さ 3 mm の水が満たされているようなサンプルの場合、プラスチックの屈折率を 1.7 とし、水の屈折率を 1.33 とすると、サンプルが無い場合と比べて、サンプルがある場合に生じる光路長の増分は $1690\text{ }\mu\text{m}$ ($=1000 \times (1.7 - 1) + 3000 \times (1.33 - 1)$) となる。

[0052] したがって、前述のカバーガラスがサンプルであった状態から、前述のプラスチックディッシュ上に水が満たされている物体がサンプルである状態に変更した場合、 $1605\text{ }\mu\text{m}$ 分の光路長差が余分に生じることとなる。この光路長差を補償し、サンプルの変更前と同じ次数で干渉度が極大となる光路長差を得るためには、ステージ 44 を光路長が長くなる方向に $802.5\text{ }\mu\text{m}$ 動かさなくてはならない。このような 1 mm 近いステージの移動は、例えば手動ステージを利用した場合には操作性の低下を招き、あるいは自動ステージを利用する場合は重量の大きなステッピングモータステージを必須としてしまう。

[0053] そこで、ステージ 44 の移動量を小さくするための手法として、第 2 実施形態の変形例として、図 18 に示される干渉観察装置 1 B' の構成を考えることができる。図 18 は、第 2 実施形態の変形例の干渉観察装置 1 B' の構成を示す図である。この干渉観察装置 1 B' は、干渉観察装置 1 B の構成に加えて、参照側光学系上に光路長・分散補償板 91 を備える。

[0054] 光路長・分散補償板 91 は、使用者が用いるサンプルのバリエーションに合わせて、用いるサンプルと概して同じ材質を用いて、ほぼ同じ光路長になるように作成されたものであり、光を透過する板である。たとえば、使用者

が、厚さ $170\text{ }\mu\text{m}$ のカバーガラス、厚さ 1 mm のスライドガラス、底面厚さ 1 mm のプラスチックディッシュ上に深さ 3 mm の水が満たされているような容器、の三種類の保持体の上に被検体が塗布あるいは培養されたサンプルを用いる場合、光路長がそれぞれの保持体と等しい光を透過する板として、光路長・分散補償板 A（カバーガラス用）、光路長・分散補償板 B（スライドガラス用）および光路長・分散補償板 C（プラスチックディッシュ上に水が満たされた容器用）を予め用意することができる。

[0055] このような光路長・分散補償板 A～C を予め用意しておき、例えば厚さ $170\text{ }\mu\text{m}$ のカバーガラスが保持体である場合は光路長・分散補償板 A を、厚さ 1 mm のスライドガラスが保持体である場合は光路長・分散補償板 B を、底面厚さ 1 mm のプラスチックディッシュ上に深さ 3 mm の水が満たされているような保持体の場合は光路長・分散補償板 C を、それぞれ参照光路内の任意の位置に挿入することで、サンプルを変更した後も変更前と同様に干渉度が極大となる光路長差を変更前と同じ次数で得ることができる。

[0056] ただし、ほぼ同質のサンプル、例えば市販の公称厚さ $170\text{ }\mu\text{m}$ のカバーガラスを用いた場合でも、製造誤差や温度等の条件による材料の屈折率差により、光路長・分散補償板 91 の挿入だけで干渉度が極大となる光路長差を実現できるとは限らない。たとえば公称厚さ $170\text{ }\mu\text{m}$ のカバーガラスには $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ の製造誤差があり得る。また、プラスチックディッシュ上に水あるいは培養液を満たした保持体の場合、実際にはディッシュ底面上に細胞等の被測定物体を培養した状態で観察することになるため、細胞の厚みや培養液の組成によって光路長の値は変化する。そのため、光路長・分散補償板 91 を用いた場合でも、ステージ 44 あるいはそれに類する機械的な光路長差調整機構が不要となるわけではない。

[0057] 光路長・分散補償板 91 を用い、ステージ 44 として手動のステージを用いた場合、好適には差動マイクロメーターを用いたステージを用いることができる。差動マイクロメーターとは、粗動（長距離を移動できるが分解能が低い）と微動（短距離しか移動できないが分解能が高い）の 2 つの調整機構

が一体となったマイクロメーターである。工場出荷時には、サンプルなしの状態にて粗動ステージにより干渉度が極大となる光路長差とし、粗動ステージを固定する。使用者が観察する際には、被観察サンプルの光路長に対応する光路長・分散補償板 91 を挿入することで、おおよそ干渉度が極大となる光路長差とした後、微動ステージのみを用いて干渉度が厳密に極大となる光路長差に調整することで、適切な干渉度でのレーザ光の干渉を得ることができる。本実施形態においては、使用者は微動ステージのみを操作すればよいので、粗動ステージを用いた場合と比べて調整範囲が狭く、干渉度が極大となる地点を見落とすおそれが少ない。

[0058] 光路長・分散補償板 91 を用い、ステージ 44 として自動のステージを用いた場合、好適には piezo 素子を用いたステージを用いることができる。piezo 素子は、長いものでは $100\ \mu\text{m}$ 程度の伸長距離を持つ。工場出荷時には、サンプルなしの状態にて所定のレーザ光源を用いた際に干渉度が極大となる光路長差となるよう設計し製造する。使用者が観察する際には、被観察サンプルの光路長に対応する光路長・分散補償板 91 を挿入して干渉度がおおよそ極大となる光路長差とした後、piezo 素子を用いたステージ 44 を用いて干渉度が厳密に極大となる光路長差とすることで、適切な干渉度でのレーザ光の干渉を得ることができる。また、本実施形態の場合は、piezo 素子 43 を不要とし、piezo 素子を用いたステージ 44 のみによって本発明の機能を実現することも可能である。

[0059] なお、本実施形態の説明において光路長差補正用の板のことを「光路長・分散補償板」と呼称しているのは、本光学板を挿入することにより、光路長のみならず種々のサンプルにおいて生じる分散の影響も補償できるからである。二光束干渉計においては、分散（＝光路長の波長依存性）を等しくすることで、干渉縞の鮮明度（visibility）を最も高くすることができる。サンプルの種類にあわせて光路長・分散補償板 91 を用いることの副次的な効果として、干渉縞の鮮明度（visibility）が高い状態でイメージングが行えるということが挙げられる。

[0060] また、光路長・分散補償板 9 1 は参照光路内の任意の位置に挿入することによってその効果を発揮しえるが、好ましくは参照側光学系のレンズ 5 2 の光源側焦点付近に光路長・分散補償板 9 1 を挿入することで、参照光と物体光との間の波面収差を低減することができる。また、更に好ましくは、光路長・分散補償板 9 1 の挿入位置は、参照側光学系のレンズ 5 2 の光源側焦点付近でありながらも、厳密な焦点位置よりも数 mm（レンズ 5 2 の焦点深度の数倍程度）、光源側もしくは光検出器側にずらして挿入することで、光路長・分散補償板 9 1 の表面のゴミなどが光検出器 6 1 の撮像面に映りこむことを避けることができる。また、光路長・分散補償板 9 1 を光路長調整用の折り返し部分（ビームスプリッタ 4 1 とミラー 4 2 との間）に挿入する場合は、参照光が光路長・分散補償板 9 1 を二回透過するので、被観察サンプルの光学的厚さの半分の光学的厚さとなるよう製造した光路長・分散補償板 9 1 を用いるのが望ましい。

[0061] 光路長・分散補償板 9 1 を用いる構成は、第 2 実施形態の変形としてのみならず、前述の第 1 の実施形態および後述する第 3～第 6 の実施形態の変形としても同様に実施し得る。

[0062] （第 3 実施形態）

[0063] 図 7 は、第 3 実施形態の干渉観察装置 1 C の構成を示す図である。干渉観察装置 1 C は、光源 1 0、レンズ 1 1、レンズ 1 2、分岐用ビームスプリッタ 2 1、合波用ビームスプリッタ 2 2、像反転プリズム 3 6、ビームスプリッタ 4 1、ミラー 4 2、ピエゾ素子 4 3、ステージ 4 4、レンズ 5 1、レンズ 5 2、チューブレンズ 5 3、光検出器（受光部）6 1、画像取得部 7 1 および電流制御部（制御部、コントローラ）7 2 を備える。分岐用ビームスプリッタ 2 1 から合波用ビームスプリッタ 2 2 に到る迄の干渉光学系 2 0 C は、マッハツェンダ干渉計を構成している。

[0064] 図 1 に示された第 1 実施形態の干渉観察装置 1 A の干渉光学系 2 0 A はミラー 3 5 を含むのに対して、図 7 に示される第 3 実施形態の干渉観察装置 1 C の干渉光学系 2 0 C は像反転プリズム 3 6 を含む点で相違する。像反転プ

リズム 36 は測定側光学系に設けられている。像反転プリズム 36 は例えばペンタプリズムである。

[0065] 像反転プリズム 36 は、第 1 側面 36 a、第 2 側面 36 b、第 3 側面 36 c および第 4 側面 36 d を有する多角柱形状のプリズムである。像反転プリズム 36 は、分岐用ビームスプリッタ 21 から到達した第 1 分岐光を第 1 側面 36 a から内部へ透過させ、その第 1 分岐光を第 2 側面 36 b および第 3 側面 36 c で順次に反射させた後、その第 1 分岐光を第 4 側面 36 d から外部へ透過させて合波用ビームスプリッタ 22 へ出力する。

[0066] 本実施形態でも、第 1 実施形態と同様の効果が得られる他、以下のような効果も得られる。

[0067] 本実施形態では、第 1 分岐光は、像反転プリズム 36 において 2 回反射されるので、2 回の像反転を受ける。第 2 分岐光は、ビームスプリッタ 41 およびミラー 42 それぞれにより反射されて、同様に 2 回の像反転を受ける。第 2 実施形態の場合と同様に、第 1 分岐光および第 2 分岐光それぞれの反射による像反転の回数の和が偶数であるので、合波用ビームスプリッタ 22 による合波の際の第 1 分岐光および第 2 分岐光それぞれの像の方向が互いに一致し、空間的にマルチモード（横マルチモード）であっても、第 1 分岐光と第 2 分岐光とは光検出器 61 の撮像面の広い範囲において効率よく干渉することができる。

[0068] また、本実施形態では、第 2 実施形態の場合と同様に、第 1 分岐光と第 2 分岐光との間の光路長差 ΔL を値 0 付近においても調整することができる。このことから、光路長差 ΔL の設定の自由度が高く、光源 10 から出力されるレーザ光の波長の可変範囲の設定の自由度が高い。

[0069] （第 4 実施形態）

[0070] 図 8 は、第 4 実施形態の干渉観察装置 1D の構成を示す図である。干渉観察装置 1D は、光源 10、レンズ 11、レンズ 12、分岐用ビームスプリッタ 21D、合波用ビームスプリッタ 22、ミラー 35、旋光子 37、ビームスプリッタ 41D、ミラー 42、ピエゾ素子 43、ステージ 44、旋光子 4

7、レンズ5 1、レンズ5 2、チューブレンズ5 3、光検出器（受光部）6 1、画像取得部7 1および電流制御部（制御部、コントローラ）7 2を備える。分岐用ビームスプリッタ2 1 Dから合波用ビームスプリッタ2 2に到る迄の干渉光学系2 0 Dは、マッハツェンダ干渉計を構成している。

[0071] 図1に示された第1実施形態の干渉観察装置1 Aの構成と比較すると、図8に示される第4実施形態の干渉観察装置1 Dは、分岐用ビームスプリッタ2 1に替えて分岐用ビームスプリッタ2 1 Dを備える点で相違し、ビームスプリッタ4 1に替えてビームスプリッタ4 1 Dを備える点で相違し、また、旋光子3 7および旋光子4 7を更に備える点で相違する。

[0072] 分岐用ビームスプリッタ2 1 Dは偏光ビームスプリッタである。分岐用ビームスプリッタ2 1 Dは、光源1 0から出力されてレンズ1 1, 1 2を経たレーザ光を入力して、そのレーザ光をp偏光成分とs偏光成分とに分岐する。分岐用ビームスプリッタ2 1 Dは、第1分岐光（p偏光成分）を透過させてミラー3 5へ出力し、第2分岐光（s偏光成分）を反射させてビームスプリッタ4 1 Dへ出力する。

[0073] ビームスプリッタ4 1 Dも偏光ビームスプリッタである。ビームスプリッタ4 1 Dは、分岐用ビームスプリッタ2 1 Dから出力された第2分岐光（s偏光成分）を入力してミラー4 2へ反射させる。旋光子4 7は、ビームスプリッタ4 1 Dとミラー4 2との間の第2分岐光の光路上に設けられている。旋光子4 7は例えばファラデーローテータであってもよい。旋光子4 7およびミラー4 2は、一体化されたものであってもよく例えばファラデーミラーであってもよい。

[0074] 旋光子4 7は、ビームスプリッタ4 1 Dからミラー4 2へ透過する第2分岐光の偏光面を45°回転させ、また、ミラー4 2からビームスプリッタ4 1 Dへ透過する第2分岐光の偏光面を45°回転させる。したがって、旋光子4 7からビームスプリッタ4 1 Dに入力する第2分岐光はp偏光成分となる。ビームスプリッタ4 1 Dは、この第2分岐光（p偏光成分）を透過させて合波用ビームスプリッタ2 2へ出力する。

[0075] 旋光子 37 は、観察対象物 90 と合波用ビームスプリッタ 22 との間の第 2 分岐光の光路上に設けられている。旋光子 37 は例えばファラデーローテータであってもよい。旋光子 37 は、第 1 分岐光の偏光面を回転させる。第 1 分岐光は、観察対象物 90 を透過する前は p 偏光であるが、観察対象物 90 を透過した後は p 偏光と異なる場合がある。合波用ビームスプリッタ 22 による合波により第 1 分岐光と第 2 分岐光とを効率よく干渉させるためには、第 1 分岐光と第 2 分岐光とは偏光方位が互いに同じであることが望ましい。そこで、旋光子 37 は、第 1 分岐光の偏光面を必要な角度だけ回転させることで、合波用ビームスプリッタ 22 による合波の際の第 1 分岐光および第 2 分岐光それぞれの偏光方位を互いに一致させる。第 1 分岐光および第 2 分岐光それぞれの偏光方位を互いに一致させる為には、旋光子 37 による第 1 分岐光の偏光面の回転の角度を変化させながら合波光の強度をモニタして、合波光の強度が最大となるように第 1 分岐光の偏光面の回転の角度を調整すればよい。

[0076] 本実施形態でも、第 1 実施形態と同様の効果が得られる他、以下のような効果も得られる。本実施形態では、分岐用ビームスプリッタ 21D およびビームスプリッタ 41D として偏光ビームスプリッタを用いるとともに、ビームスプリッタ 41D とミラー 42 との間の第 2 分岐光の光路上に旋光子 47 を設けることにより、第 2 分岐光の光量のロスを抑制することができる。

[0077] (第 5 実施形態)

[0078] 図 9 は、第 5 実施形態の干渉観察装置 1E の構成を示す図である。干渉観察装置 1E は、光源 10、レンズ 11、レンズ 12、モニタ用光検出器 13、分岐用ビームスプリッタ 21、合波用ビームスプリッタ 22、ミラー 35、ビームスプリッタ 41、ミラー 42、ピエゾ素子 43、ステージ 44、レンズ 51、レンズ 52、チューブレンズ 53、光検出器（受光部）61、光検出器（受光部）62、画像取得部 71、電流制御部（制御部、コントローラ）72 およびフィードバック制御部（制御部、コントローラ）73 を備える。分岐用ビームスプリッタ 21 から合波用ビームスプリッタ 22 に到る迄

の干渉光学系 20A は、マッハツェンダ干渉計を構成している。

[0079] 図 1 に示された第 1 実施形態の干渉観察装置 1A の構成と比較すると、図 9 に示される第 5 実施形態の干渉観察装置 1E は、モニタ用光検出器 13、光検出器 62 およびフィードバック制御部 73 を更に備える点で相違する。

[0080] モニタ用光検出器 13 は、光源 10 から出力されるレーザ光の強度を検出して、その検出信号を出力する。光源 10 がレーザダイオードを含む場合、モニタ用光検出器 13 は、このレーザダイオードの後方出射光の強度を検出すればよい。

[0081] 合波用ビームスプリッタ 22 は、第 1 分岐光と第 2 分岐光とを合波して、その合波光の一部を光検出器 61 へ出力し、一部を光検出器 62 へ出力する。光検出器 62 は、その合波光を受光して、合波光の強度を表す検出信号を出力する。光検出器 62 は、例えば、フォトダイオードあるいは光電子増倍管である。

[0082] フィードバック制御部 73 は、光検出器 62 から出力された検出信号が示す合波光強度に基づいて、ピエゾ素子 43 およびステージ 44 の双方または何れか一方を駆動してミラー 42 の位置を制御して光路長差を調整し、または、電流制御部 72 から光源 10 への供給電流によりレーザ光波長を制御して位相差を調整する。フィードバック制御部 73 は、この制御に際して、モニタ用光検出器 13 から出力された検出信号が示すレーザ光強度に基づいて、光検出器 62 から出力された検出信号が示す合波光強度を補正するのが好適である。

[0083] 本実施形態では、光学系において外乱により生じる位相差のブレを検知し、フィードバック制御部 73 によるミラー 42 の位置の制御またはレーザ光波長の制御により位相ロックおよび位相シフトを行って、観察対象物 90 の干渉画像や位相画像を取得する。なお、合波時の第 1 分岐光と第 2 分岐光との間の位相差を維持する技術を「位相ロック」といい、また、該フィードバック制御により位相ロックにより維持される該光路長差の値を変更する技術を「位相シフト」という。また、ここで言う外乱には、光学系の機械的振動

によるものだけでなく、観察対象物 90 が液体中の細胞であった場合に液面と空気との境界が振動することによる光路長のブレも含まれる。フィードバック制御部 73 による制御について以下に詳細に説明する。

[0084] 位相ロックとしては、非特許文献 2, 3, 4 に記載された技術（以下、「第 1 位相ロック技術」という）を用いることができる。これらの非特許文献に記載された位相ロック技術は、光源 10 の出力光の波長に比べて十分小さい振幅でミラー 42 を正弦波的に高速に振動させ、そのときに光検出器 62 から出力される検出信号をミラー 42 の振動周波数の 1 倍波および 2 倍波で同期検波することで、干渉光の位相を得るというものである。フィードバック制御部 73 は、この得られた位相値を目標値に近づけるべくフィードバック制御することで、位相差をロックすることが可能となる。

[0085] フィードバック制御部 73 は、光検出器 62 からのアナログ信号である検出信号を入力し、ピエゾ素子 43 またはステージ 44 を駆動制御するためのアナログ信号を出力する。フィードバック制御部 73 は、内部でアナログ処理をしてもよいしデジタル処理をしてもよい。後者の場合、例えば、フィードバック制御部 73 は、入力した検出信号を A/D 変換してデジタル信号とし、そのデジタル信号を処理し、その処理により得られたデジタル信号を D/A 変換してアナログ信号とし、そのアナログ信号を出力してもよい。デジタル信号の処理には、マイクロプロセッサや FPG A (Field Programmable Gate Array) が用いられてもよい。

[0086] 合波の際の第 1 分岐光と第 2 分岐光との間の位相差が $\Delta\phi$ であるとき、光検出器 62 が受光する光の強度 V は下記 (7) 式で表される。受光強度 V は、何れも未知数であるオフセット成分 DC および振幅 AC を含む。それ故、何等かの処理により、 DC および AC を含まない形で位相差 $\Delta\phi$ を抽出する必要がある。

[数 7]

$$V = DC + AC \cdot \sin(\Delta\phi) \quad \dots(7)$$

[0087] 光源 10 の出力光の波長に比べて十分小さい振幅でピエゾ素子 43 により

ミラー 4 2 を正弦波的に高速に振動させると、光検出器 6 2 が受光する光の強度 V は下記 (8) 式で表される。 α は、ミラー 4 2 の振動の振幅に応じて決まる変調度である。 ω は、振動の角周波数である。 t は時間変数である。

[数8]

$$V(t) = DC + AC \cdot \sin(\Delta\phi + \alpha \cdot \sin(\omega t)) \quad \dots(8)$$

[0088] この (8) 式の右辺をフーリエ級数展開すると、近似式として下記 (9 a) ~ (9 c) 式が得られる。 J_1 および J_2 は第一種ベッセル関数である。(9 a) 式の右辺の第 2 項は振幅 $A_{\omega t}$ および角周波数 ω で振動する。また、(9 a) 式の右辺の第 3 項は振幅 $A_{2\omega t}$ および角周波数 2ω で振動する。したがって、光検出器 6 2 から出力される検出信号を角周波数 ω で同期検波することで振幅 $A_{\omega t}$ を得ることができ、検出信号を角周波数 2ω で同期検波することで振幅 $A_{2\omega t}$ を得ることができる。

[数9]

$$V(t) = DC' + A_{\omega t} \sin(\omega t) + A_{2\omega t} \cos(2\omega t) + \dots \quad \dots(9 a)$$

$$A_{\omega t} = 2 \cdot AC \cdot J_1(\alpha) \cdot \cos(\Delta\phi) \quad \dots(9 b)$$

$$A_{2\omega t} = 2 \cdot AC \cdot J_2(\alpha) \cdot \sin(\Delta\phi) \quad \dots(9 c)$$

[0089] 振幅 $A_{\omega t}$ と振幅 $A_{2\omega t}$ との比は下記 (10) 式で表される。また、 AC は合波光の干渉強度を表しており、その干渉強度 AC は下記 (11) 式で表される。ミラー 4 2 の振動の振幅が一定であるので、その振幅に基づいて $J_1(\alpha)$ および $J_2(\alpha)$ を求めることができる。(10) 式に基づいて光路長差に応じた位相差 $\Delta\phi$ を求めることができ、(11) 式に基づいて干渉強度 AC をも求めることができる。フィードバック制御部 7 3 は、以上のような処理を行なう為に、同期検波回路、加算回路および乗除算回路を含む。

[数10]

$$\frac{A_{2\omega t}}{A_{\omega t}} = \frac{2 \cdot AC \cdot J_2(\alpha) \cdot \sin(\Delta\phi)}{2 \cdot AC \cdot J_1(\alpha) \cdot \cos(\Delta\phi)} = \frac{J_2(\alpha)}{J_1(\alpha)} \tan(\Delta\phi) \quad \dots(10)$$

[数11]

$$AC^2 = \left(\frac{A_{\omega}}{2 \cdot J_1(\alpha)} \right)^2 + \left(\frac{A_{2\omega}}{2 \cdot J_2(\alpha)} \right)^2 \quad \dots(11)$$

[0090] 非特許文献5に記載された "spatial filtering detector" を用いた位相ロック技術（以下、「第2位相ロック技術」という）も採用可能である。この技術では、光検出器62は、一次元光検出器（受光部）を用いる。このような一次元光検出器としては、例えば、ラインセンサあるいはマルチアノード光電子増倍管、1次元方向に配列された複数の光検出器である。以下では、等間隔に配列された4個の光検出器を用いる場合について説明する。測定側光学系および参照側光学系の双方または何れか一方に傾きを与えることで干渉縞が現れるようにし、この状態において、4個の光検出器の受光強度 $V_1 \sim V_4$ が下記（12a）～（12d）式となるように干渉縞の傾きを調整する。

[数12]

$$V_1 = DC + AC \cdot \sin(\Delta\phi) \quad \dots(12a)$$

$$V_2 = DC + AC \cdot \sin(\Delta\phi + \pi/2) = DC - AC \cdot \cos(\Delta\phi) \quad \dots(12b)$$

$$V_3 = DC + AC \cdot \sin(\Delta\phi + \pi) = DC - AC \cdot \sin(\Delta\phi) \quad \dots(12c)$$

$$V_4 = DC + AC \cdot \sin(\Delta\phi + 3\pi/2) = DC + AC \cdot \cos(\Delta\phi) \quad \dots(12d)$$

[0091] 測定側光学系および参照側光学系の双方または何れか一方に傾きを与えるために、例えば、ミラー35またはミラー42を傾斜させてもよいし、何れかのレンズを傾けてもよいし、また、所定方向に沿って厚みが異なる楔形状のプリズムを光路上に挿入してもよい。

[0092] この受光強度 $V_1 \sim V_4$ から下記（13a）、（13b）式により A_1 、 A_2 が求められ、下記（14）式により A_1 と A_2 との比が求められる。また、干渉強度 AC は下記（15）式で表される。これらの式から、光路長差に応じた位相差 $\Delta\phi$ を求めることができ、干渉強度 AC をも求めることができる。フィードバック制御部73は、以上のような処理を単純な電気回路系で実現でき

ることができる。

[数13]

$$A_1 = V_1 - V_3 = 2 \cdot AC \cdot \sin(\Delta\phi) \quad \cdots(13a)$$

$$A_2 = V_4 - V_2 = 2 \cdot AC \cdot \cos(\Delta\phi) \quad \cdots(13b)$$

[数14]

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{2 \cdot AC \cdot \sin(\Delta\phi)}{2 \cdot AC \cdot \cos(\Delta\phi)} = \tan(\Delta\phi) \quad \cdots(14)$$

[数15]

$$AC^2 = \left(\frac{A_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{2}\right)^2 \quad \cdots(15)$$

[0093] なお、フィードバック制御部73は、第1位相ロック技術により位相ロックを行うに際して、光検出器62から出力される検出信号に基づいて上記(7)式～(11)式に従って位相差 $\Delta\phi$ を求める為に、 piezo素子43またはステージ44の駆動によりミラー42を正弦波的に高速に振動させて光路長差を正弦波変調してもよいし、また、電流制御部72から光源10へ供給される電流を正弦波的に高速に変調してレーザ光波長を正弦波変調してもよい。

[0094] また、フィードバック制御部73は、第1位相ロック技術または第2位相ロック技術により位相ロックを行うに際して、求めた位相差 $\Delta\phi$ が一定に維持されるようにする為に、 piezo素子43またはステージ44の駆動によりミラー42の位置を制御して光路長差を調整してもよいし、また、電流制御部72から光源10へ供給される電流を制御してレーザ光波長を調整してもよい。

[0095] 例えば、フィードバック制御部73は、第1位相ロック技術により位相ロックを行うに際して、電流制御部72から光源10へ供給される電流を正弦波的に高速に変調して光検出器62から出力される検出信号に基づいて位相差 $\Delta\phi$ を求め、電流制御部72から光源10へ供給される電流を制御して該位相差 $\Delta\phi$ を一定に維持するようにしてもよい。この場合、電流制御部72

から光源 10 へ供給される電流は、位相シフトの為のオフセット電流が位相差 $\Delta\phi$ に応じて修正された上で、これに小振幅・高速の正弦波的な変調電流が重畳されたものとなる。

[0096] 前述したとおり、光源 10 がレーザダイオードを含む場合、レーザダイオードに供給される電流が変化すると、レーザ光波長だけでなくレーザ光強度も変化する。そこで、フィードバック制御部 73 は、電流制御部 72 から光源 10 へ供給される電流を正弦波的に高速に変調する場合、または、その電流を制御して該位相差 $\Delta\phi$ を一定に維持する場合、光検出器 62 から出力された検出信号が示す合波光強度を、モニタ用光検出器 13 から出力された検出信号が示すレーザ光強度で除算し、その除算後の合波光強度に基づいて位相ロックを行うのが好適である。

[0097] (第 6 実施形態)

[0098] 図 10 は、第 6 実施形態の干渉観察装置 1F の構成を示す図である。干渉観察装置 1F は、光源 10、レンズ 11、レンズ 12、分岐用ビームスプリッタ 21、合波用ビームスプリッタ 22、ビームスプリッタ 31、ミラー 32、ビームスプリッタ 41、ミラー 42、ピエゾ素子 43、ステージ 44、レンズ 51、レンズ 52、チューブレンズ 53、光検出器（受光部）61、画像取得部 71 および電流制御部（制御部、コントローラ）72 を備える。本実施形態における分岐用ビームスプリッタ 21 から合波用ビームスプリッタ 22 に到る迄の干渉光学系 20F は、マッハツェンダ干渉計を構成しており、第 2 実施形態における干渉光学系 20B と同様の構成を有する。

[0099] 本実施形態では、光源 10 および干渉光学系 20F は筐体 80 により保持されている。また、筐体 80 には第 1 取付部 81 が設けられている。この第 1 取付部 81 は、干渉光学系 20F の合波用ビームスプリッタ 22 から出力された合波光を外部へ出力する開口を有する。これら光源 10、干渉光学系 20F、筐体 80 および第 1 取付部 81 を含んで干渉光学装置 2 が構成される。

[0100] また、本実施形態では、チューブレンズ 53、光検出器 61、ミラー 54

および第２取付部８２を含んで顕微鏡装置３が構成される。第２取付部８２は、第１取付部８１の開口と光学的に結合される開口を有し、第１取付部８１に対して光学的結合が自在である。光検出器６１は、干渉光学系２０Ｆから出力された合波光を受光して検出信号を出力する。干渉光学系２０Ｆから出力された合波光は、第１取付部８１の開口、第２取付部８２の開口、ミラー５４およびチューブレンズ５３を経て、光検出器６１により受光される。この顕微鏡装置３は、市販のものが用いられ得る。すなわち、通常の市販の顕微鏡装置において対物レンズが取り付けられる取付部を上記の第２取付部８２とすればよい。

[0101] 本実施形態の干渉観察装置１Ｆは、光源１０および干渉光学系２０Ｆを筐体８０により保持して小型化・一体化した干渉光学装置２と通常の顕微鏡装置３とを組み合わせることで構成することができる。本実施形態では、既存の顕微鏡装置３を用いることができるので、干渉観察装置１Ｆを安価に構成することができる。

[0102] 本実施形態では、ビームスプリッタ３１、観察対象物９０、合波用ビームスプリッタ２２、第１取付部８１の開口および第２取付部８２の開口が縦一列に配列されている。したがって、ビームスプリッタ３１の上方に設けられた照明装置で観察対象物９０を照明することで、観察対象物９０の明視野画像を光検出器６１により取得することができる。また、顕微鏡装置３が蛍光顕微鏡である場合、合波用ビームスプリッタ２２の下方に設けられた励起照明装置で観察対象物９０を照明し励起することで、観察対象物９０の蛍光画像を光検出器６１により取得することができる。

[0103] なお、本実施形態の構成と同様に、第１～第５の実施形態の干渉観察装置１Ａ～１Ｅにおいても、分岐用ビームスプリッタ２１から合波用ビームスプリッタ２２に到るまでの干渉光学系２０Ａ～２０Ｅおよび光源１０を筐体により保持して干渉光学装置とし、この干渉光学装置と顕微鏡装置３とを互いに光学的に結合することで構成してもよい。

[0104] （実施例）

- [0105] 図6に示された構成の干渉観察装置1Bを用いた実施例について説明する。本実施例では、観察対象物90として、ガラス板に油性インクで線を書いたものを用いた。光源10として、発振波長638nmのマルチモードレーザダイオードを用いた。図11は、実施例において光源10のレーザダイオードに供給される電流の時間的変化および光検出器61の撮像期間を示すグラフである。この図に示されるように、光源10に供給される電流の時間的変化を4段のステップ型変調波形とした。供給電流の最低値を83mAとし、供給電流の最高値を92mAとし、ステップ幅を3mAとした。変調波形の1周期を160msとし、各ステップの期間を40msとし、光検出器61の露光時間を20msとした。第1分岐光と第2分岐光との間の光路長差を約12mmとした。
- [0106] 図12および図13は、強度補正前の干渉画像を示す図である。図12(a)に示される干渉画像 $I_1(x, y)$ に対し、図12(b)に示される干渉画像 $I_2(x, y)$ は $\pi/2$ だけ位相が異なり、図13(a)に示される干渉画像 $I_3(x, y)$ は π だけ位相が異なり、図13(b)に示される干渉画像 $I_4(x, y)$ は $3\pi/2$ だけ位相が異なる。これらの画像から、供給電流変調により干渉縞の位相が変調されている様子が見て取れる。
- [0107] また、撮像に先立って、第1分岐光の光路を遮った状態で第2分岐光のみを光検出器61により受光し、レーザ光の強度変調量を調べた。その結果、レーザ光の強度は、供給電流の低い場合から順に、任意単位で88.1, 92.5, 94.6, 94.9となった。上記(5a)～(5d)式に従い、この強度変調量で図12および図13の干渉縞画像を除算して、強度補正後の干渉画像を求めた。
- [0108] 図14および図15は、強度補正後の干渉画像を示す図である。図14(a)に示される干渉画像 $I_1(x, y)$ に対し、図14(b)に示される干渉画像 $I_2(x, y)$ は $\pi/2$ だけ位相が異なり、図15(a)に示される干渉画像 $I_3(x, y)$ は π だけ位相が異なり、図15(b)に示される干渉画像 $I_4(x, y)$ は $3\pi/2$ だけ位相が異なる。

[0109] 図14および図15の干渉画像 $I_1 \sim I_4$ から上記(6)式で定量位相画像 $\Psi(x, y)$ を求めた。この $\Psi(x, y)$ を位相アンラッピング処理し、ゼルニケ多項式を用いたシェーディング補正の計算によって背景の歪み成分を平坦化して、定量位相画像を得た。図16は、位相アンラッピング処理前の位相画像を示す図である。図17は、位相アンラッピング処理後の位相画像を示す図である。

[0110] 図17において、左下から右上にかけての光路長の長い領域（濃度が薄い領域）は、観察対象物90のガラス板に描かれた油性ペンのインクの跡である。このようにして、マルチモードレーザダイオードの供給電流変調により、位相シフトした干渉画像および定量位相画像が得られることが示された。

[0111] 本発明による干渉観察装置及び干渉観察方法は、上記した実施形態及び構成例に限られるものではなく、様々な変形が可能である。

[0112] 上記実施形態による干渉観察装置では、(1)レーザ光を出力し、そのレーザ光の波長が可変である光源と、(2)光源から出力されたレーザ光を分岐して第1分岐光および第2分岐光を出力する分岐用ビームスプリッタと、第1分岐光と第2分岐光とを合波して合波光を出力する合波用ビームスプリッタとを含み、マッハツェンダ干渉計を構成する干渉光学系と、(3)光源から出力されるレーザ光の波長を制御して、合波用ビームスプリッタによる合波の際の第1分岐光と第2分岐光との間の位相差を調整する制御部と、を備える構成としている。

[0113] あるいは、上記実施形態による干渉観察装置では、(1)レーザ光の波長が可変である光源と、(2)光源から出力されたレーザ光を分岐して第1分岐光および第2分岐光を出力する分岐用ビームスプリッタと、第1分岐光と第2分岐光とを合波して合波光を出力する合波用ビームスプリッタとを含み、マッハツェンダ干渉計を構成する干渉光学系と、(3)光源から出力されるレーザ光の波長を制御して、合波用ビームスプリッタによる合波の際の第1分岐光と第2分岐光との間の位相差を調整する制御部と、を備える構成としている。

- [0114] 上記の干渉観察装置は、合波光を受光して検出信号を出力する受光部を更に備える構成としても良い。
- [0115] 上記の干渉観察装置は、第1分岐光または第2分岐光の光路上に置かれた観察対象物の干渉画像を検出信号に基づいて取得する画像取得部を更に備える構成としても良い。
- [0116] 上記の干渉観察装置は、（1）光源および干渉光学系を保持する筐体と、（2）筐体に設けられ、干渉光学系から出力された合波光を外部へ出力する開口を有する第1取付部と、（3）第1取付部の開口と光学的に結合される開口を有する第2取付部と、干渉光学系から出力され第1取付部の開口および第2取付部の開口を経た合波光を受光して検出信号を出力する受光部と、を含む顕微鏡装置と、を備える構成としても良い。
- [0117] 上記実施形態による干渉観察方法では、（1）波長可変の光源からレーザ光を出力し、（2）マッハツェンダ干渉計を構成する干渉光学系において、光源から出力されたレーザ光を分岐用ビームスプリッタにより分岐して第1分岐光および第2分岐光を出力し、第1分岐光と第2分岐光とを合波用ビームスプリッタにより合波して合波光を出力し、（3）受光部により合波光を受光して検出信号を出力し、（4）光源から出力されるレーザ光の波長を制御して、合波用ビームスプリッタによる合波の際の第1分岐光と第2分岐光との間の位相差を調整し、第1分岐光または第2分岐光の光路上に置かれた観察対象物の干渉画像を検出信号に基づいて取得する構成としている。
- [0118] あるいは、上記実施形態による干渉観察方法では、（1）波長可変の光源からレーザ光を出力し、（2）マッハツェンダ干渉計を構成する干渉光学系の分岐用ビームスプリッタにより、光源から出力されたレーザ光を第1分岐光および第2分岐光に分岐し、（3）干渉光学系の合波用ビームスプリッタにより、第1分岐光と第2分岐光とを合波して合波光を出力し、（4）光源から出力されるレーザ光の波長を制御して、合波用ビームスプリッタによる合波の際の第1分岐光と第2分岐光との間の位相差を調整する構成としている。

- [0119] 上記の干渉観察方法において、（５）受光部により合波光を受光して検出信号を出力するステップ（検出ステップ）と、（６）検出信号に基づいて、第１分岐光または第２分岐光の光路上に置かれた観察対象物の干渉画像を取得するステップ（画像取得ステップ）と、をさらに備えても良い。
- [0120] 上記の干渉観察装置及び干渉観察方法において、光源は、縦マルチモード発振するレーザダイオードを含む構成としても良い。
- [0121] 上記の干渉観察装置及び干渉観察方法において、干渉光学系は、第１分岐光の光路上に第１ビームスプリッタおよび第１ミラーを含み、分岐用ビームスプリッタから第１ビームスプリッタに到達した第１分岐光を第１ビームスプリッタで透過または反射させた後に第１ミラーにより反射させ、第１ミラーにより反射されて第１ビームスプリッタに到達した第１分岐光を第１ビームスプリッタで反射または透過させて、分岐用ビームスプリッタから第１ビームスプリッタへの第１分岐光の入力方向と異なる方向へ第１ビームスプリッタから第１分岐光を出力する構成としても良い。
- [0122] 上記の干渉観察装置及び干渉観察方法において、干渉光学系は、第２分岐光の光路上に第２ビームスプリッタおよび第２ミラーを含み、分岐用ビームスプリッタから第２ビームスプリッタに到達した第２分岐光を第２ビームスプリッタで透過または反射させた後に第２ミラーにより反射させ、第２ミラーにより反射されて第２ビームスプリッタに到達した第２分岐光を第２ビームスプリッタで反射または透過させて、分岐用ビームスプリッタから第２ビームスプリッタへの第２分岐光の入力方向と異なる方向へ第２ビームスプリッタから第２分岐光を出力する構成としても良い。
- [0123] 上記の干渉観察装置及び干渉観察方法において、第１分岐光および第２分岐光の何れか一方の光路上に観察対象物が配置され、他方の光路上に光路長・分散補償板が設けられ、光路長・分散補償板が、観察対象物の配置による光路長の変化および分散の影響を補償する構成としても良い。

産業上の利用可能性

- [0124] 本発明は、マッハツェンダ干渉計の光学系を用いて容易に光学調整をする

ことができ、容易に観察対象物の干渉画像を取得することができる干渉観察装置及び干渉観察方法として利用可能である。

符号の説明

[0125] 1 A～1 F…干渉観察装置、2…干渉光学装置、3…顕微鏡装置、10…光源、11, 12…レンズ、13…モニタ用光検出器、20 A～20 F…干渉光学系、21…分岐用ビームスプリッタ、22…合波用ビームスプリッタ、31…第1ビームスプリッタ、32…第1ミラー、35…ミラー、36…像反転プリズム、37…旋光子、41…第2ビームスプリッタ、42…第2ミラー、43…ピエゾ素子、44…ステージ、47…旋光子、51, 52…レンズ、53…チューブレンズ、54…ミラー、61…光検出器（受光部）、62…光検出器（受光部）、71…画像取得部、72…電流制御部（制御部）、73…フィードバック制御部（制御部）、80…筐体、81…第1取付部、82…第2取付部、90…観察対象物（サンプル）、91…光路長・分散補償板。

請求の範囲

- [請求項1] レーザ光の波長が可変である光源と、
前記光源から出力されたレーザ光を分岐して第1分岐光および第2分岐光を出力する分岐用ビームスプリッタと、前記第1分岐光と前記第2分岐光とを合波して合波光を出力する合波用ビームスプリッタとを含み、マッハツェンダ干渉計を構成する干渉光学系と、
前記光源から出力されるレーザ光の波長を制御して、前記合波用ビームスプリッタによる合波の際の前記第1分岐光と前記第2分岐光との間の位相差を調整する制御部と、
を備える干渉観察装置。
- [請求項2] 前記光源が縦マルチモード発振するレーザダイオードを含む、請求項1に記載の干渉観察装置。
- [請求項3] 前記干渉光学系が、前記第1分岐光の光路上に第1ビームスプリッタおよび第1ミラーを含み、前記分岐用ビームスプリッタから前記第1ビームスプリッタに到達した前記第1分岐光を前記第1ビームスプリッタで透過または反射させた後に前記第1ミラーにより反射させ、前記第1ミラーにより反射されて前記第1ビームスプリッタに到達した前記第1分岐光を前記第1ビームスプリッタで反射または透過させて、前記分岐用ビームスプリッタから前記第1ビームスプリッタへの前記第1分岐光の入力方向と異なる方向へ前記第1ビームスプリッタから前記第1分岐光を出力する、請求項1または2に記載の干渉観察装置。
- [請求項4] 前記干渉光学系が、前記第2分岐光の光路上に第2ビームスプリッタおよび第2ミラーを含み、前記分岐用ビームスプリッタから前記第2ビームスプリッタに到達した前記第2分岐光を前記第2ビームスプリッタで透過または反射させた後に前記第2ミラーにより反射させ、前記第2ミラーにより反射されて前記第2ビームスプリッタに到達した前記第2分岐光を前記第2ビームスプリッタで反射または透過させ

て、前記分岐用ビームスプリッタから前記第2ビームスプリッタへの前記第2分岐光の入力方向と異なる方向へ前記第2ビームスプリッタから前記第2分岐光を出力する、請求項1～3の何れか1項に記載の干渉観察装置。

[請求項5] 前記合波光を受光して検出信号を出力する受光部を更に備える、請求項1～4の何れか1項に記載の干渉観察装置。

[請求項6] 前記検出信号に基づいて、前記第1分岐光または前記第2分岐光の光路上に置かれた観察対象物の干渉画像を取得する画像取得部を更に備える、請求項5に記載の干渉観察装置。

[請求項7] 前記第1分岐光および前記第2分岐光の何れか一方の光路上に観察対象物が配置され、他方の光路上に光路長・分散補償板が設けられ、
前記光路長・分散補償板が、前記観察対象物の配置による光路長の変化および分散の影響を補償する、請求項1～6の何れか1項に記載の干渉観察装置。

[請求項8] 前記光源および前記干渉光学系を保持する筐体と、
前記筐体に設けられ、前記干渉光学系から出力された前記合波光を外部へ出力する開口を有する第1取付部と、
前記第1取付部の開口と光学的に結合される開口を有する第2取付部と、前記干渉光学系から出力され前記第1取付部の開口および前記第2取付部の開口を経た前記合波光を受光して検出信号を出力する受光部と、を含む顕微鏡装置と、
を備える請求項1～7の何れか1項に記載の干渉観察装置。

[請求項9] 波長可変の光源からレーザ光を出力し、
マッハツェンダ干渉計を構成する干渉光学系の分岐用ビームスプリッタにより、前記光源から出力されたレーザ光を第1分岐光および第2分岐光に分岐し、
前記干渉光学系の合波用ビームスプリッタにより、前記第1分岐光と前記第2分岐光とを合波して合波光を出力し、

前記光源から出力されるレーザ光の波長を制御して、前記合波用ビームスプリッタによる合波の際の前記第 1 分岐光と前記第 2 分岐光との間の位相差を調整する、

干渉観察方法。

[請求項10] 前記光源が縦マルチモード発振するレーザダイオードを含む、請求項 9 に記載の干渉観察方法。

[請求項11] 前記干渉光学系が、前記第 1 分岐光の光路上に第 1 ビームスプリッタおよび第 1 ミラーを含み、前記分岐用ビームスプリッタから前記第 1 ビームスプリッタに到達した前記第 1 分岐光を前記第 1 ビームスプリッタで透過または反射させた後に前記第 1 ミラーにより反射させ、前記第 1 ミラーにより反射されて前記第 1 ビームスプリッタに到達した前記第 1 分岐光を前記第 1 ビームスプリッタで反射または透過させて、前記分岐用ビームスプリッタから前記第 1 ビームスプリッタへの前記第 1 分岐光の入力方向と異なる方向へ前記第 1 ビームスプリッタから前記第 1 分岐光を出力する、請求項 9 または 10 に記載の干渉観察方法。

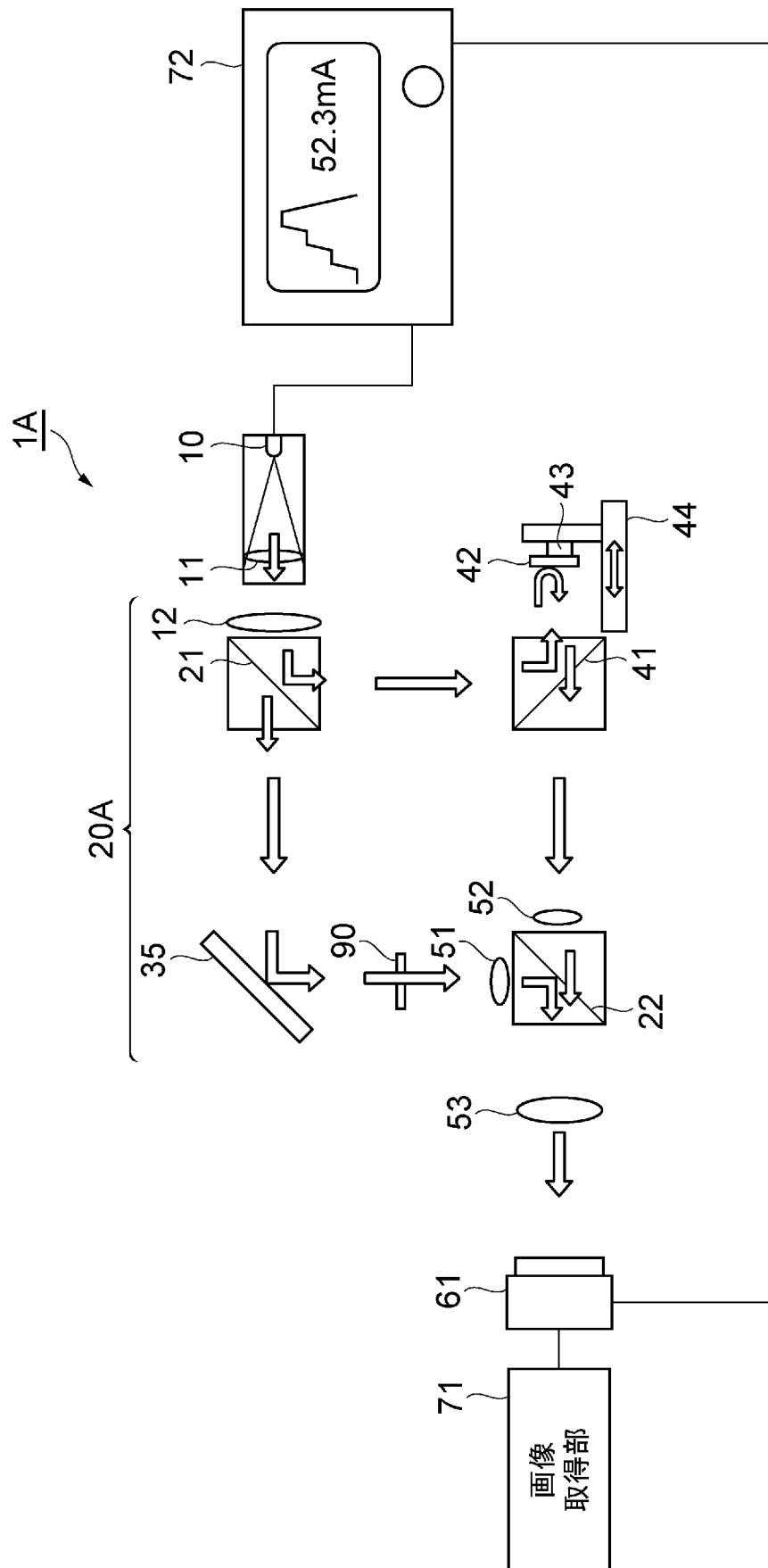
[請求項12] 前記干渉光学系が、前記第 2 分岐光の光路上に第 2 ビームスプリッタおよび第 2 ミラーを含み、前記分岐用ビームスプリッタから前記第 2 ビームスプリッタに到達した前記第 2 分岐光を前記第 2 ビームスプリッタで透過または反射させた後に前記第 2 ミラーにより反射させ、前記第 2 ミラーにより反射されて前記第 2 ビームスプリッタに到達した前記第 2 分岐光を前記第 2 ビームスプリッタで反射または透過させて、前記分岐用ビームスプリッタから前記第 2 ビームスプリッタへの前記第 2 分岐光の入力方向と異なる方向へ前記第 2 ビームスプリッタから前記第 2 分岐光を出力する、請求項 9 ～ 11 の何れか 1 項に記載の干渉観察方法。

[請求項13] 受光部により前記合波光を受光して検出信号を出力し、
前記検出信号に基づいて、前記第 1 分岐光または前記第 2 分岐光の

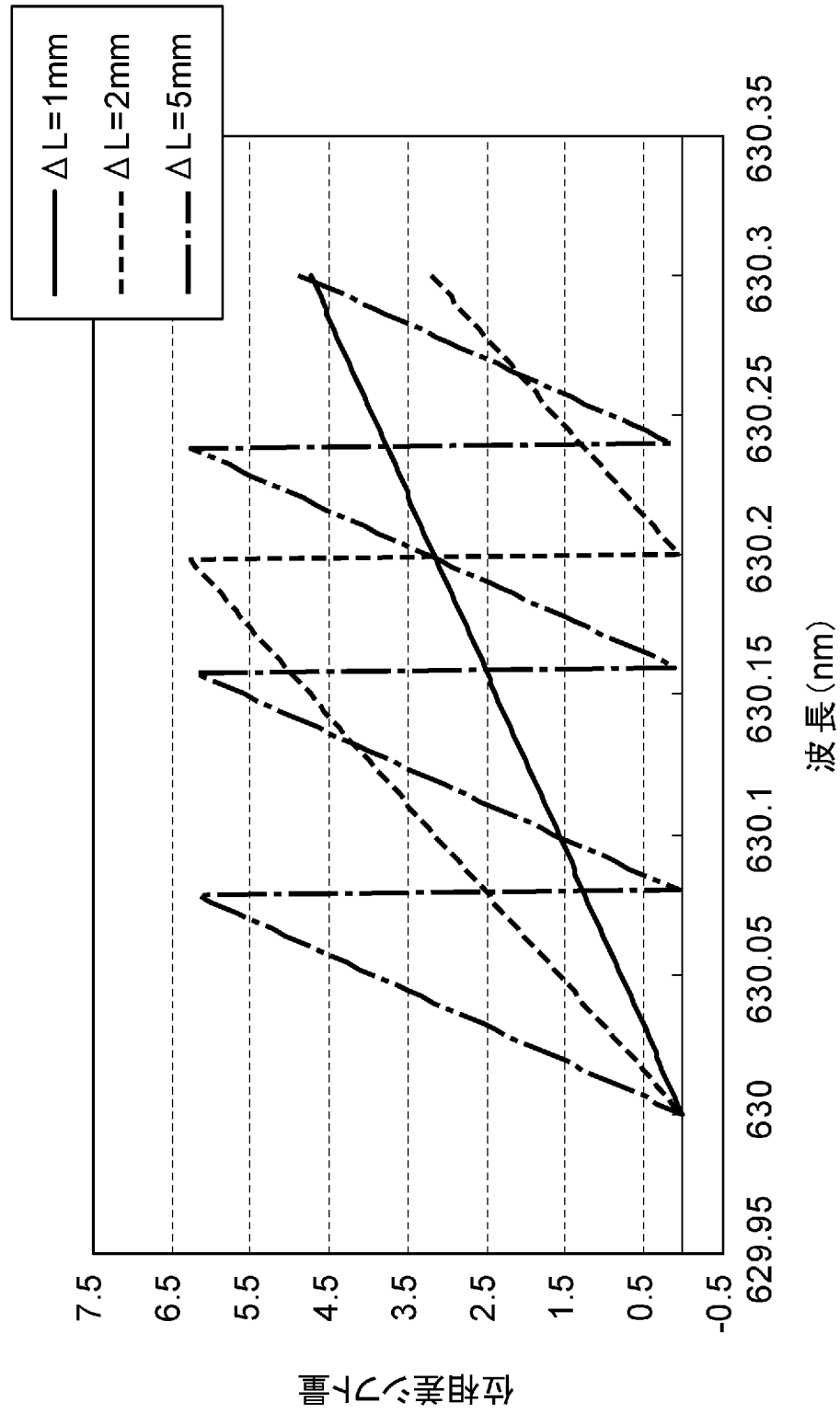
光路上に置かれた観察対象物の干渉画像を取得する、請求項 9 ～ 1 2 の何れか 1 項に記載の干渉観察方法。

- [請求項14] 前記第 1 分岐光および前記第 2 分岐光の何れか一方の光路上に観察対象物が配置され、他方の光路上に光路長・分散補償板が設けられ、
前記光路長・分散補償板が、前記観察対象物の配置による光路長の変化および分散の影響を補償する、請求項 9 ～ 1 3 の何れか 1 項に記載の干渉観察方法。

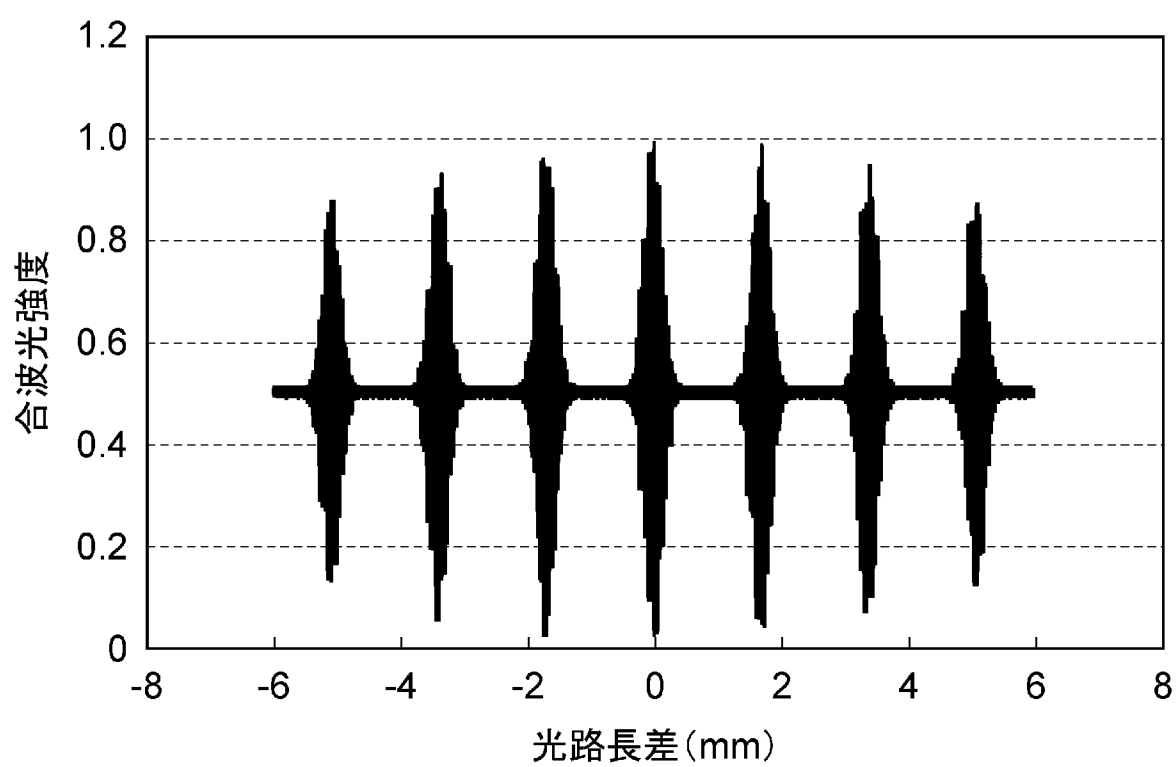
[図1]



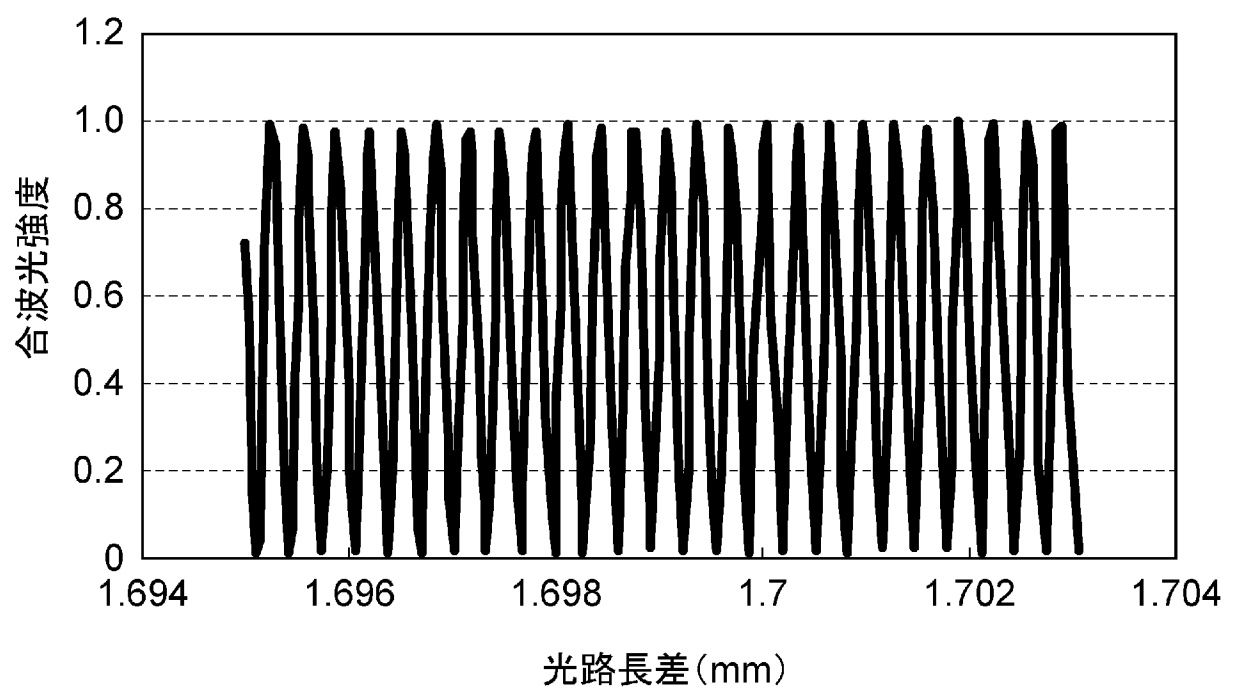
[図2]



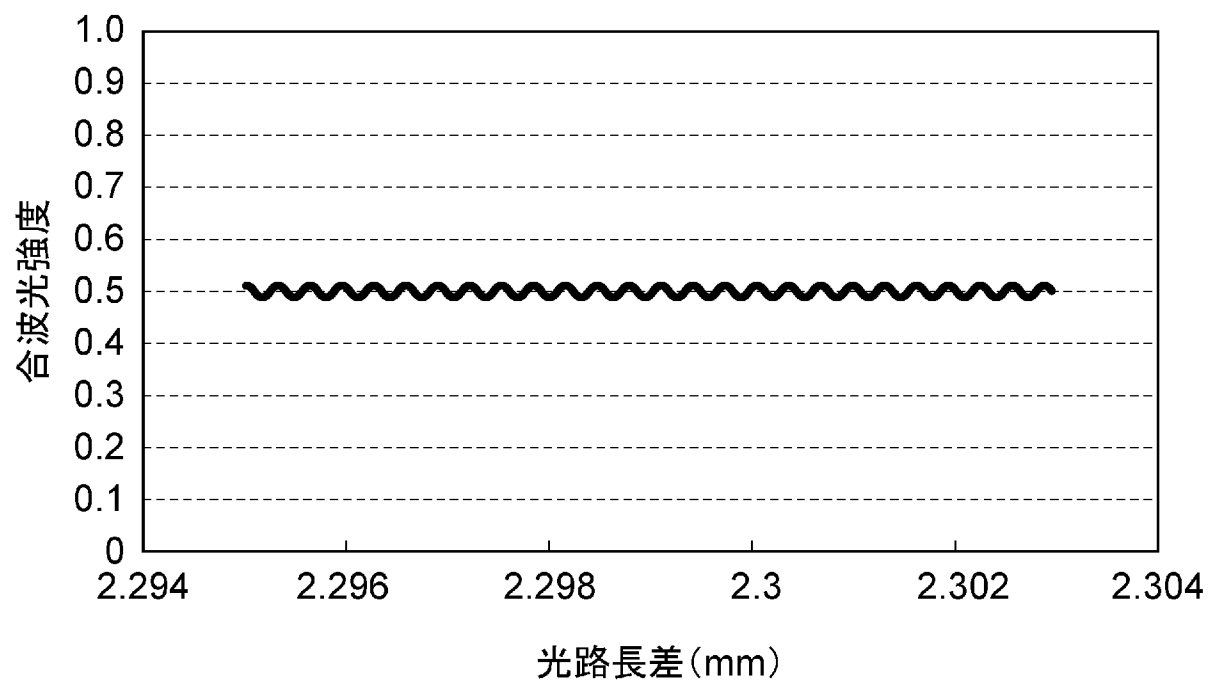
[図3]



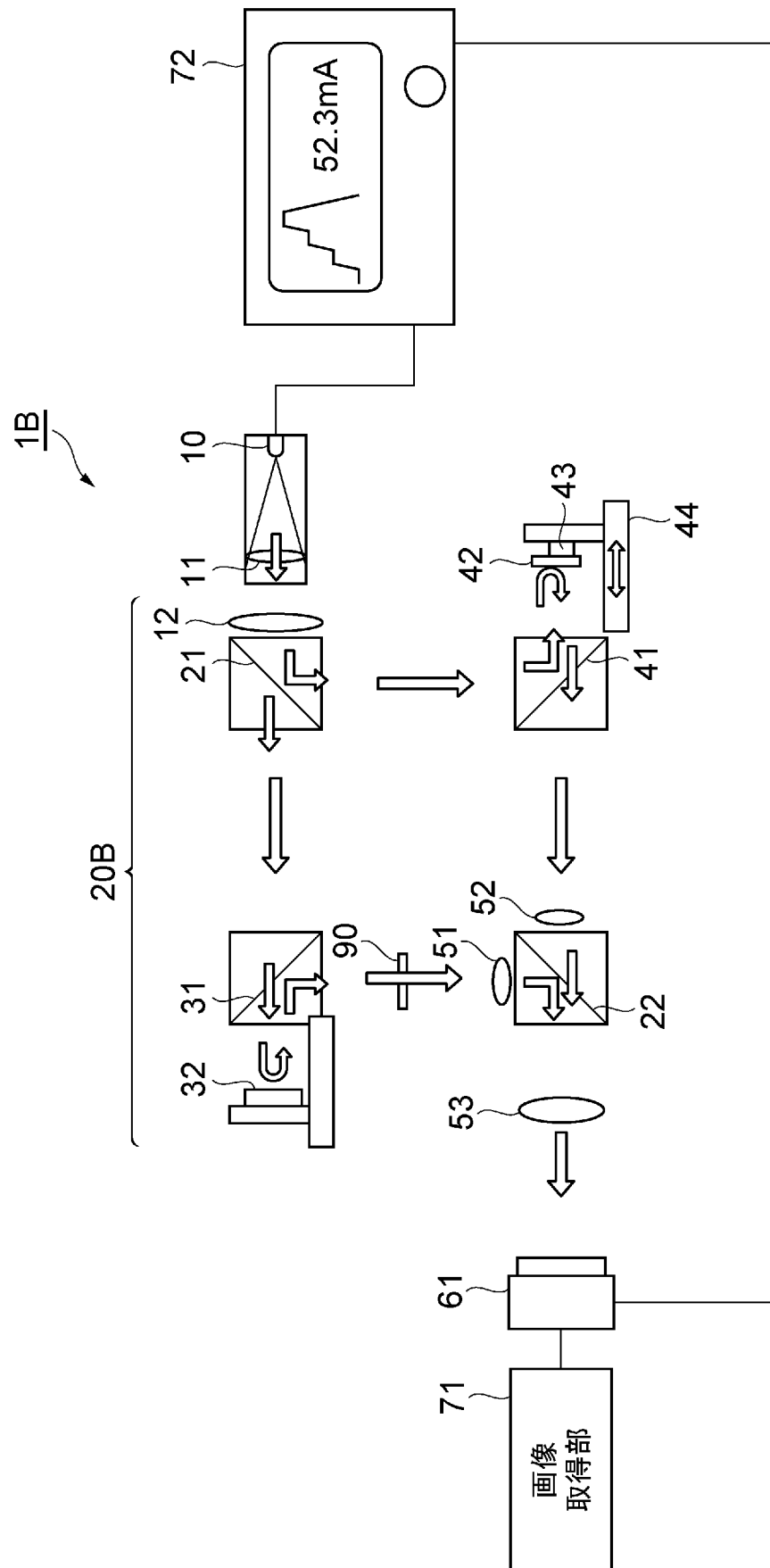
[図4]



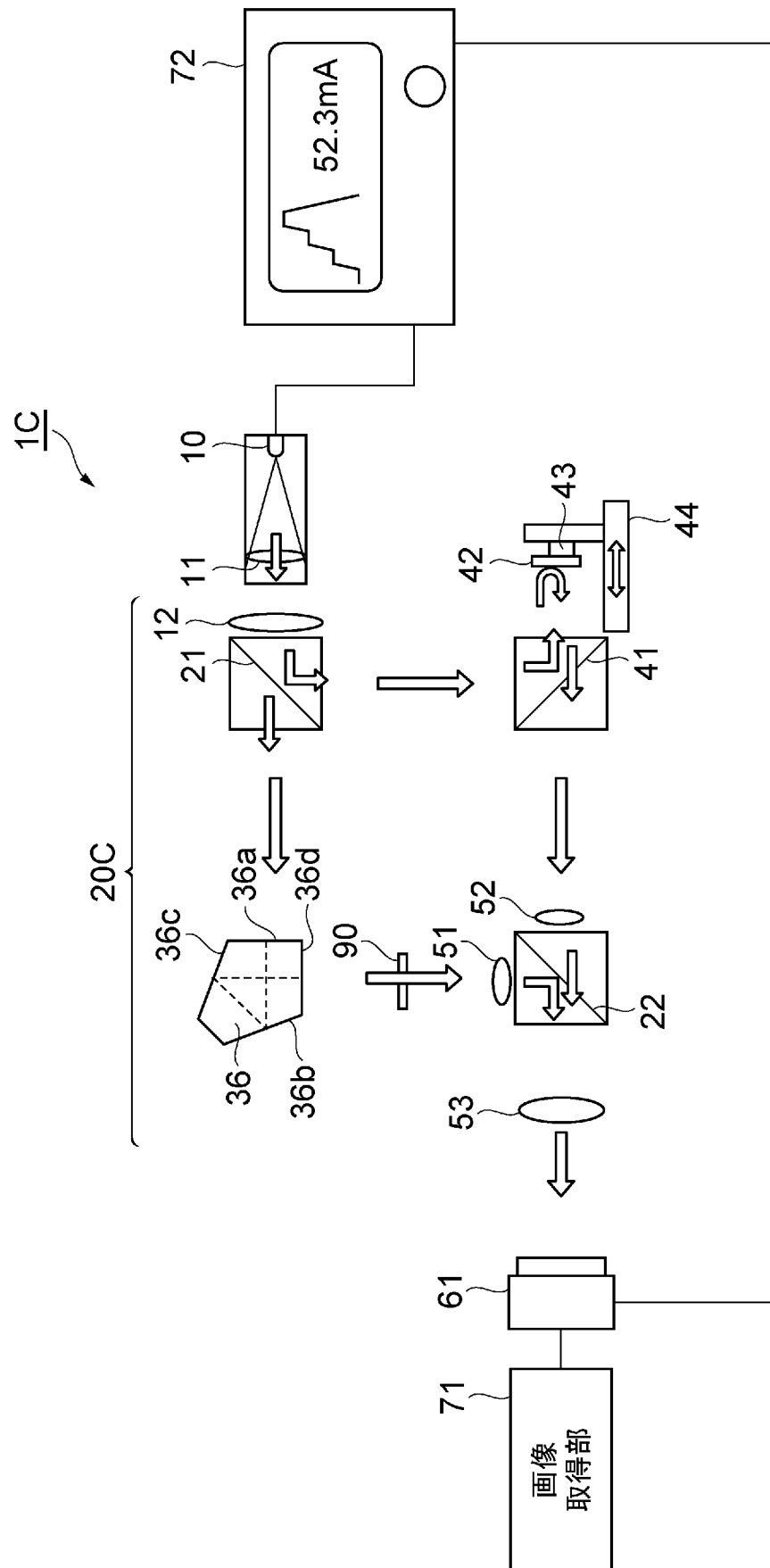
[図5]



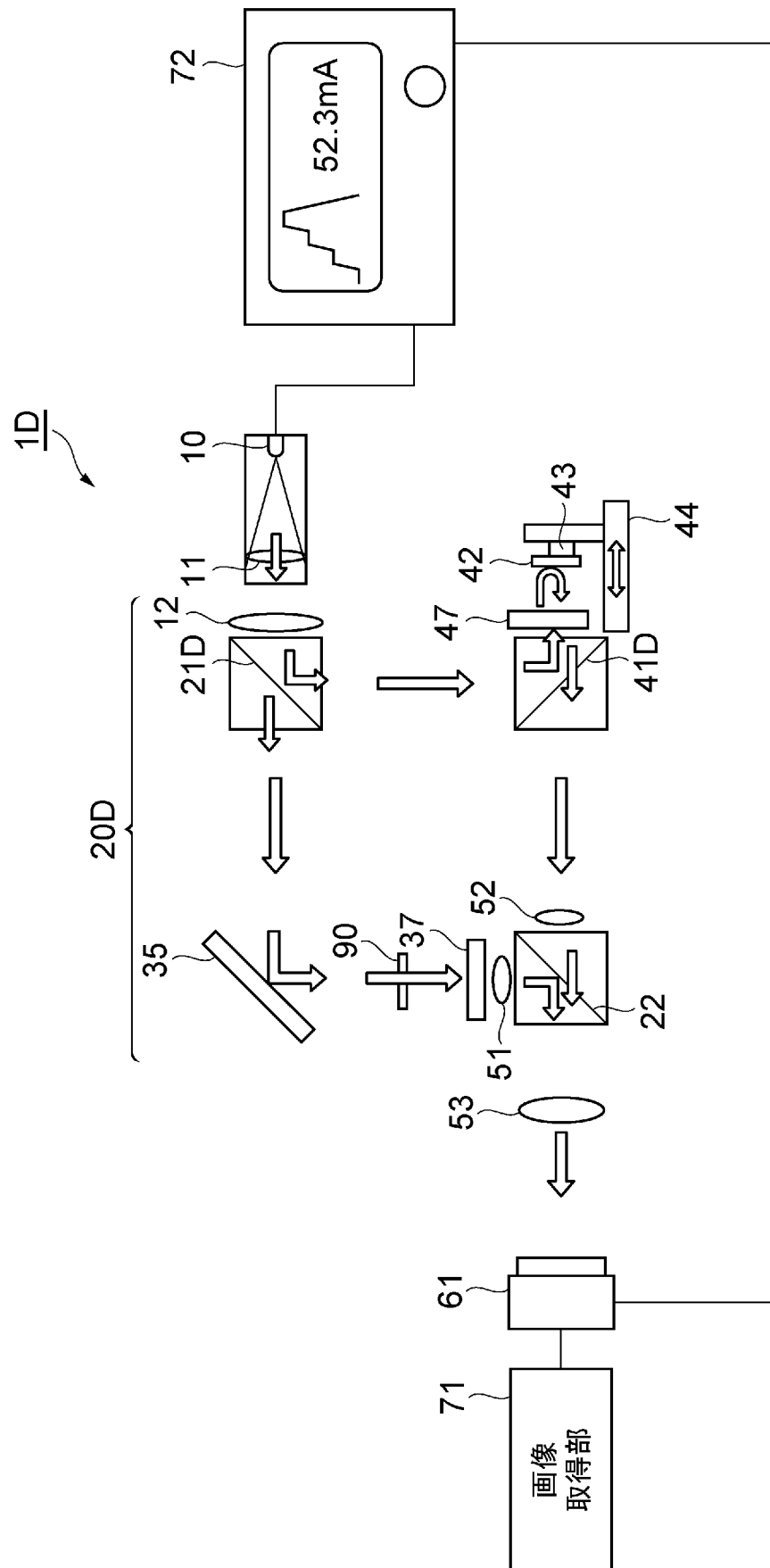
[図6]



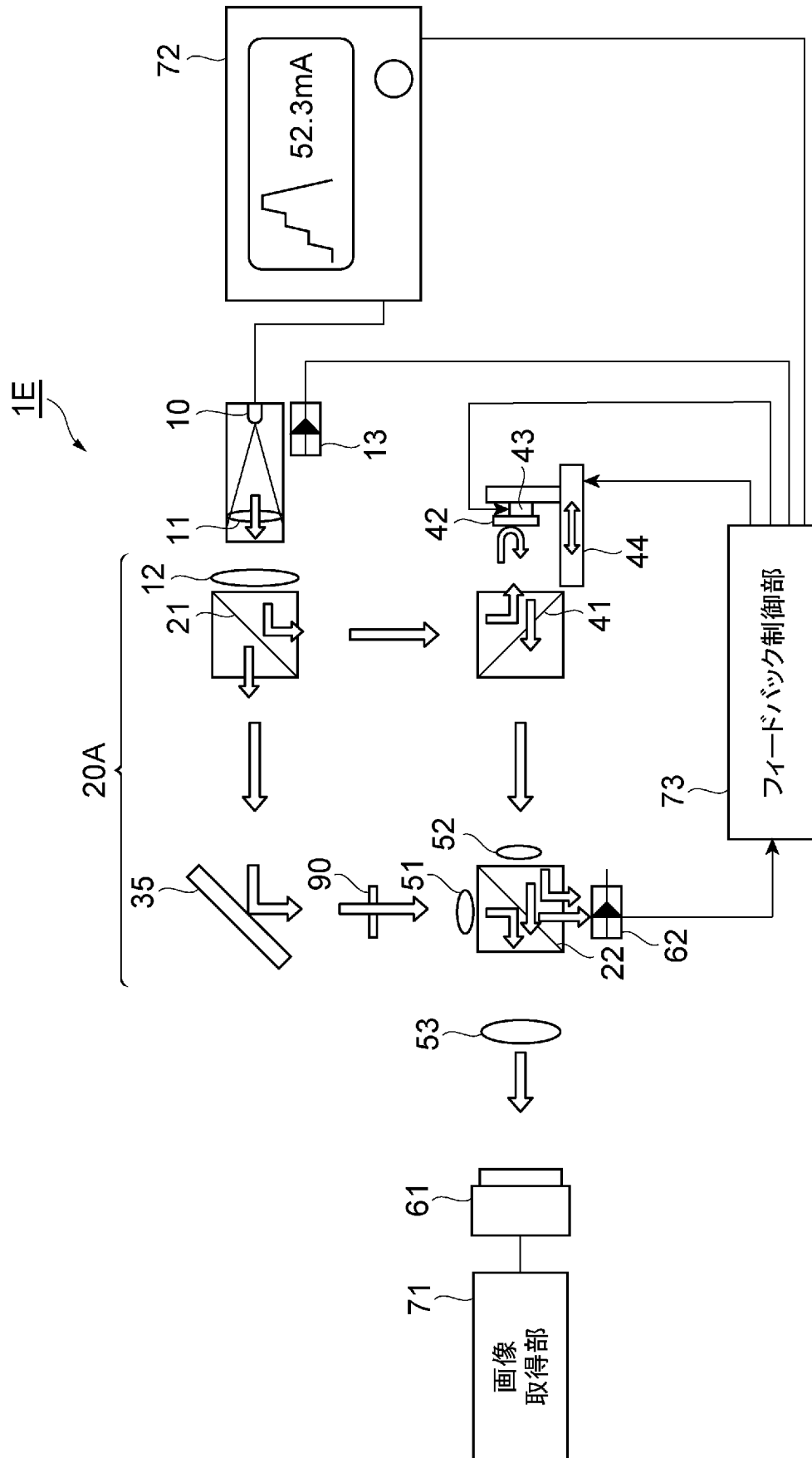
[図7]



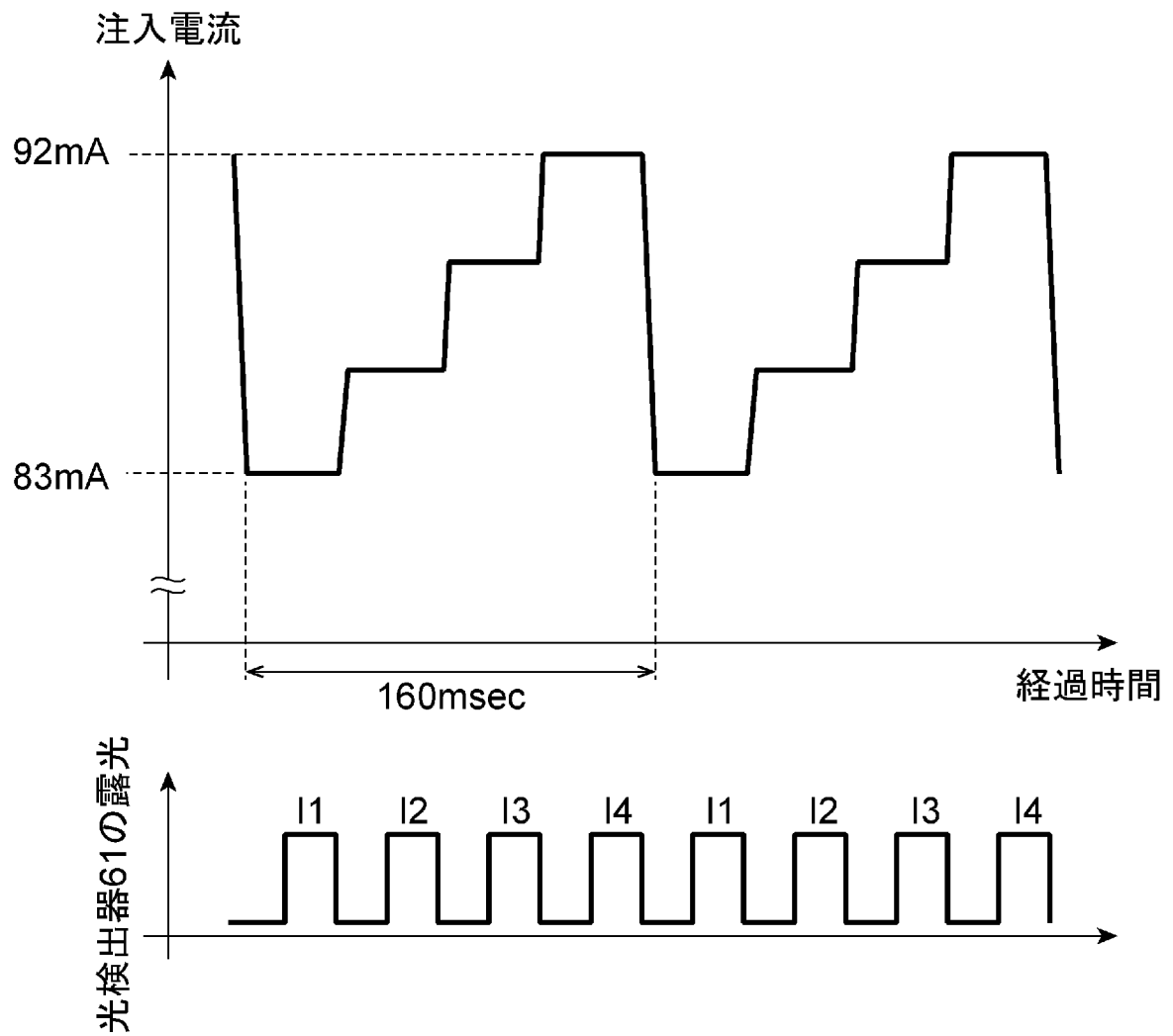
[図8]



[図9]

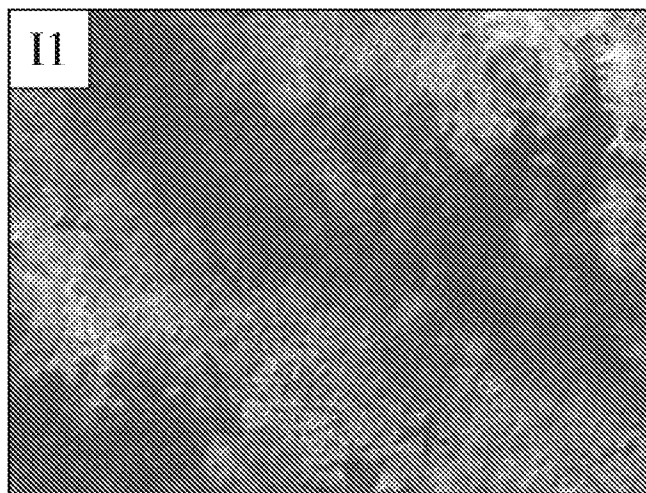


[図11]



[図12]

(a)

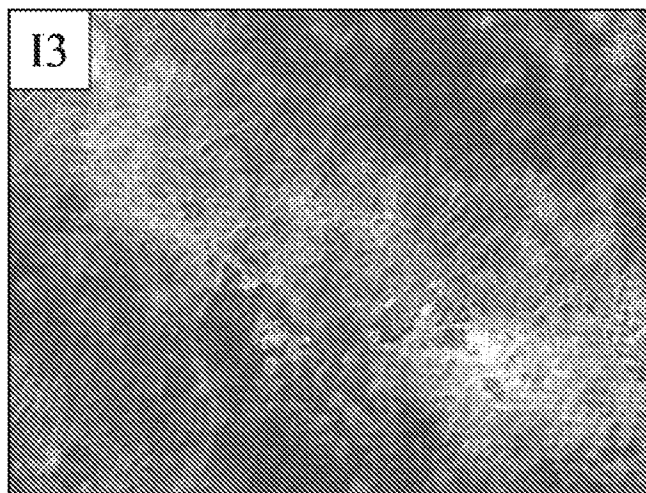


(b)

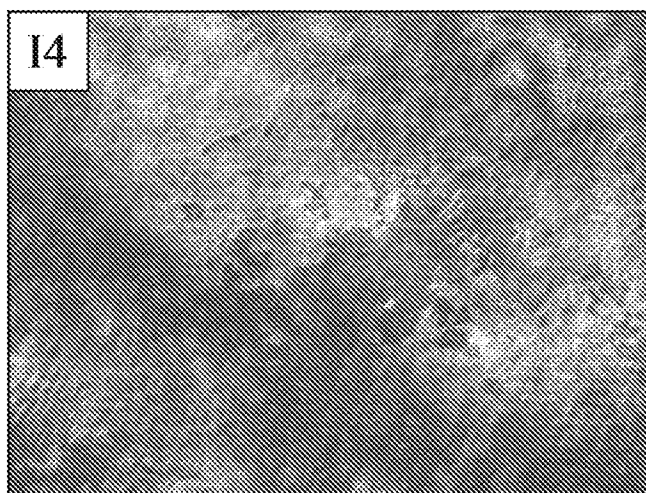


[図13]

(a)

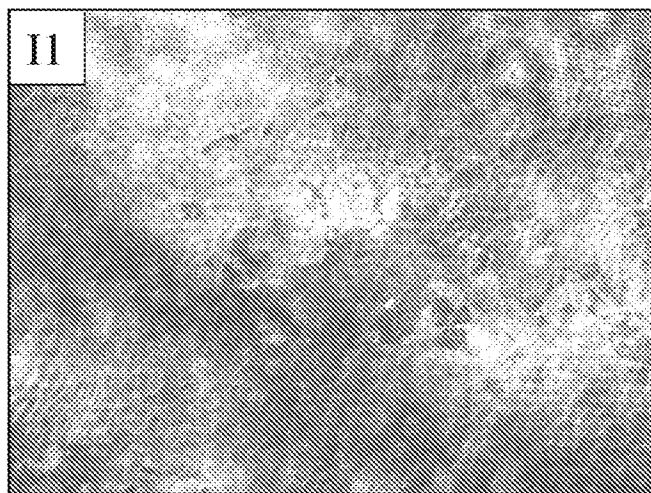


(b)

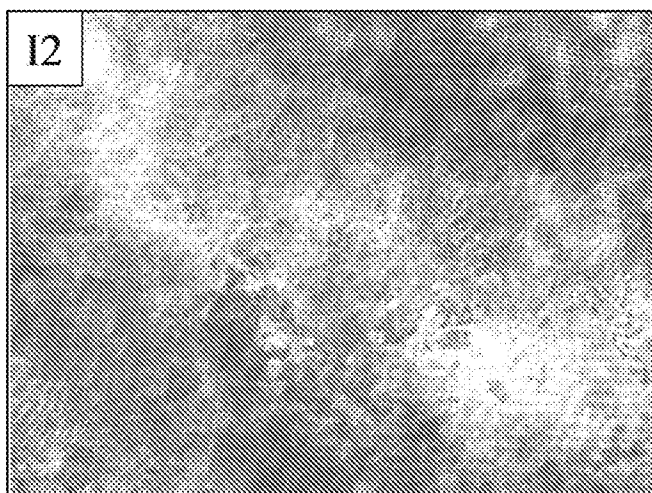


[図14]

(a)

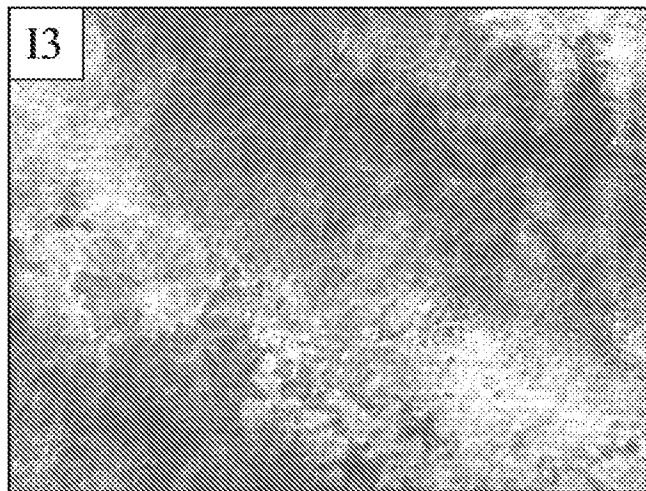


(b)

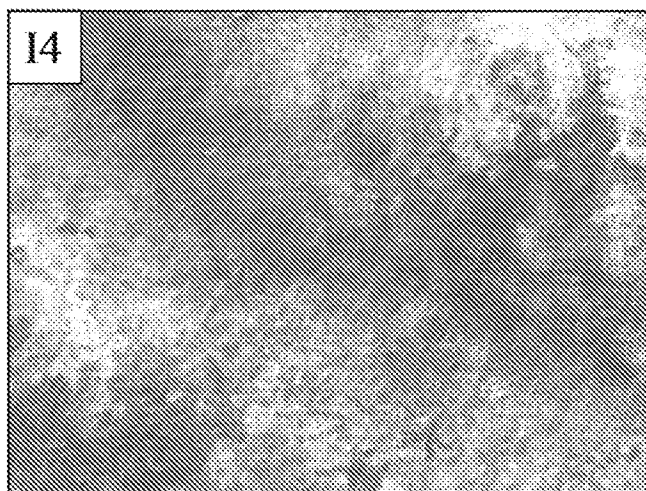


[図15]

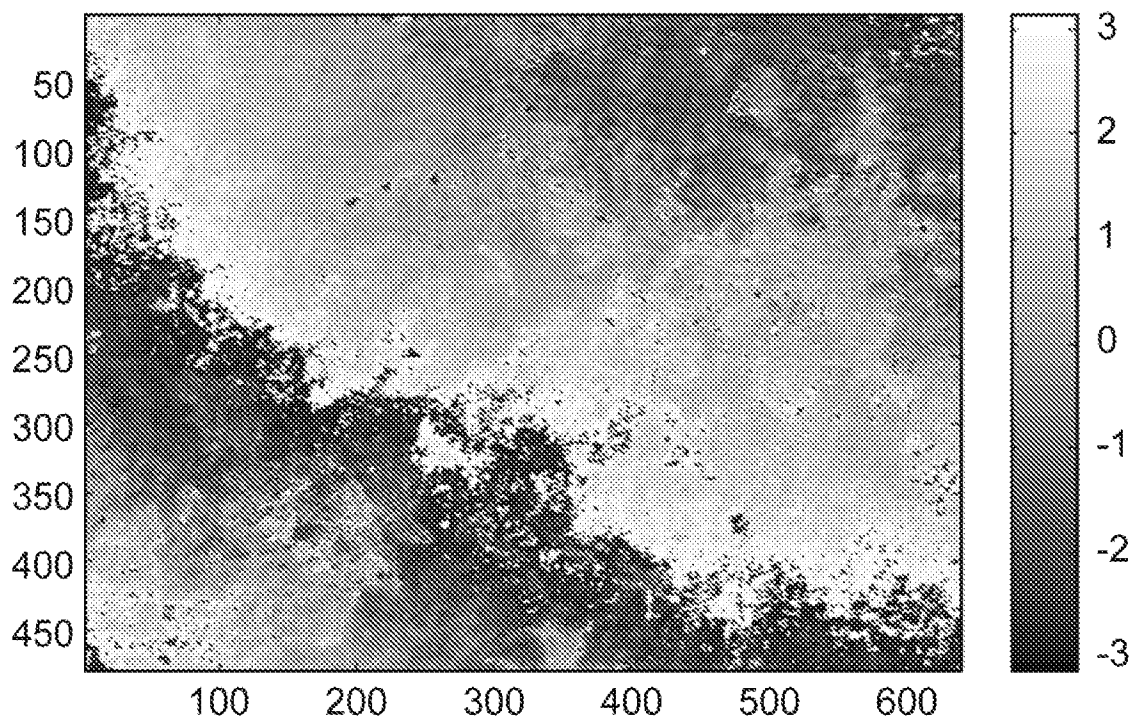
(a)



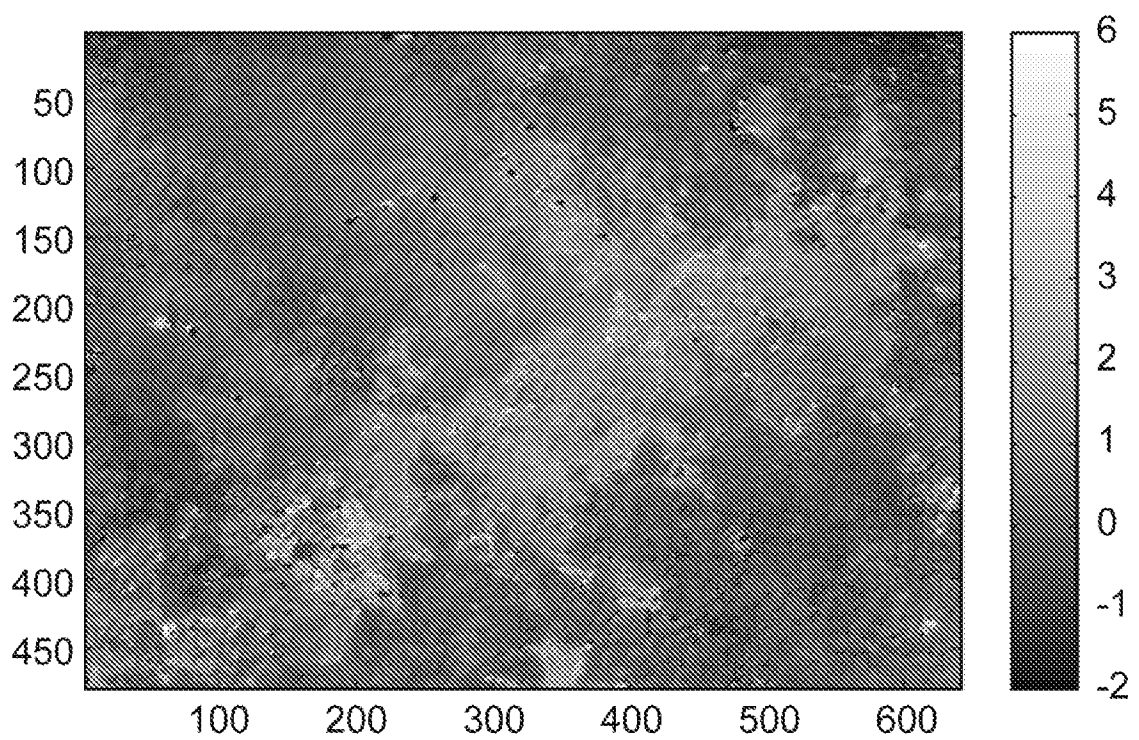
(b)



[図16]



[図17]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/086391

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01B9/02(2006.01)i, G01N21/45(2006.01)i, G02B21/00(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)

G01B9/00-9/10, G01N21/00-21/01, G01N21/17-21/61, G02B19/00-21/00, G02B21/06-21/36

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 1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2017 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

OSA Publishing & Keyword: Mach-Zehnder, interferometry, optical length, phase, SPIE Digital Library & Keyword: Mach-Zehnder, interferometry,

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 10-232204 A (Biophotonics Information Laboratories, Ltd.), 02 September 1998 (02.09.1998), paragraphs [0002] to [0006], [0028], [0036] to [0051]; fig. 9 to 10 (Family: none)	1-14
Y	JP 2012-132838 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 12 July 2012 (12.07.2012), paragraphs [0062] to [0064] (Family: none)	1-14
Y A	JP 6-273112 A (Fuji Photo Optical Co., Ltd.), 30 September 1994 (30.09.1994), paragraphs [0010], [0013] (Family: none)	2-8, 10-14 1, 9

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ 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
21 February 2017 (21.02.17)

Date of mailing of the international search report
28 February 2017 (28.02.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/086391

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2001-4538 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 12 January 2001 (12.01.2001), paragraph [0133]; fig. 1 (Family: none)	7-8, 14 1-6, 9-13
Y A	JP 61-158311 A (VEB Karl Zais Ierna), 18 July 1986 (18.07.1986), page 3, upper right column, line 9 to lower left column, line 20; attached drawings & DE 3537284 A1	8 1-7, 9-14
A	JP 2002-71518 A (Ando Electric Co., Ltd.), 08 March 2002 (08.03.2002), paragraphs [0012] to [0019], [0037]; all drawings (Family: none)	1-14
P, A	WO 2016/121248 A1 (Hamamatsu Photonics Kabushiki Kaisha), 04 August 2016 (04.08.2016), entire text; all drawings & WO 2016/121250 A1	1-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/086391

Continuation of B. FIELDS SEARCHED

Electronic data base consulted during the international search
(name of data base and, where practicable, search terms used)

optical length, phase

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01B9/02(2006.01)i, G01N21/45(2006.01)i, G02B21/00(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. G01B9/00-9/10, G01N21/00-21/01, G01N21/17-21/61,
G02B19/00-21/00, G02B21/06-21/36

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	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017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)

OSA Publishing & キーワード: Mach-Zehnder, interferometry, optical length, phase
 SPIE Digital Library & キーワード: Mach-Zehnder, interferometry, optical length, phase

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
Y	JP 10-232204 A (株式会社生体光情報研究所) 1998.09.02, 段落 [0002]-[0006], [0028], [0036]-[0051], 図 9-10 (ファミリーなし)	1-14
Y	JP 2012-132838 A (日本電信電話株式会社) 2012.07.12, 段落 [0062]-[0064] (ファミリーなし)	1-14
Y A	JP 6-273112 A (富士写真光機株式会社) 1994.09.30, 段落 [0010], [0013] (ファミリーなし)	2-8, 10-14 1, 9

C欄の続きにも文献が列挙されている。

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

21.02.2017

国際調査報告の発送日

28.02.2017

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)

神谷 健一

2 S

9705

電話番号 03-3581-1101 内線 3216

C (続き) . 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
Y A	JP 2001-4538 A (松下電器産業株式会社) 2001.01.12, 段落[0133], 図 1 (ファミリーなし)	7-8, 14 1-6, 9-13
Y A	JP 61-158311 A (ベブ・カール・ツアイス・イエーナ) 1986.07.18, 3 頁右上欄 9 行-同頁左下欄 20 行, 添付図 & DE 3537284 A1	8 1-7, 9-14
A	JP 2002-71518 A (安藤電気株式会社) 2002.03.08, 段落 [0012]-[0019], [0037], 全図 (ファミリーなし)	1-14
P, A	WO 2016/121248 A1 (浜松ホトニクス株式会社) 2016.08.04, 全文, 全図 & WO 2016/121250 A1	1-14