

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5305732号
(P5305732)

(45) 発行日 平成25年10月2日(2013.10.2)

(24) 登録日 平成25年7月5日(2013.7.5)

(51) Int.Cl.

G01B 9/02 (2006.01)
G01B 11/00 (2006.01)

F 1

G01B 9/02
G01B 11/00

G

請求項の数 5 (全 12 頁)

(21) 出願番号	特願2008-125655 (P2008-125655)
(22) 出願日	平成20年5月13日 (2008.5.13)
(65) 公開番号	特開2009-276114 (P2009-276114A)
(43) 公開日	平成21年11月26日 (2009.11.26)
審査請求日	平成23年5月13日 (2011.5.13)

(73) 特許権者	000001007 キヤノン株式会社 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(74) 代理人	100110412 弁理士 藤元 亮輔
(74) 代理人	100104628 弁理士 水本 敦也
(72) 発明者	加藤 成樹 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ ヤノン株式会社内

審査官 有家 秀郎

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】干渉計

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光源からの光をリファレンス光及び測定光に分割する光分割素子と、
前記光分割素子で分割されて第1の方向から入射する前記リファレンス光を反射するリ
ファレンスマラーと、
前記光分割素子で分割されて第2の方向から入射する前記測定光を反射し、前記第2の
方向に沿って変位可能な測定ミラーと、

前記リファレンスマラーからの反射光及び前記測定ミラーからの反射光が前記光分割素
子を介して入射する光学系と、

前記光学系を介して入射する2つの反射光を反射し、それぞれ前記光学系及び前記光分
割素子を介して前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーに再入射させる反射素子と、

前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーでそれぞれ二度反射された2つの光が合波
された光を受光する受光素子と、を有し、

前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーでそれぞれ二度反射された前記2つの光は
、前記光分割素子により合波され、

前記光源からの光の反射によって前記光分割素子から射出する光と該光によって生じて
前記合波されるべく前記光分割素子に再入射する光とを含む第1平面内、及び、前記光源
から前記光分割素子に入射する光と前記合波された光とを含む第2平面内において、前記
光源からの光は、前記光分割素子を介して、前記リファレンスマラー及び前記測定ミラー
に対して角度をもって入射し、前記合波されるべき光は、前記リファレンスマラー及び前

10

20

記測定ミラーから前記角度をもって射出し、

前記光学系は、前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーでそれぞれ反射された2つの光を前記第2平面に平行とし、

前記反射素子は、前記光学系により前記第2平面に平行とされた2つの光を、反射後の2つの光が前記第2平面に平行となるように反射し、

前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーの少なくとも一つは、前記第1平面及び前記第2平面に直交する直交面内において、その法線方向が前記第1の方向及び前記第2の方向のうち対応する方向とは異なるように傾いて配置されている、ことを特徴とする干渉計。

【請求項2】

10

前記リファレンスマラーは、前記直交面内において、その法線方向が前記第1の方向とは異なるように傾いて配置され、

前記測定ミラーは、前記直交面内において、その法線方向が前記第2の方向とは異なるように傾いて配置されている、ことを特徴とする請求項1に記載の干渉計。

【請求項3】

前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーは、それからの反射光の前記光学系における通過位置が前記光学系の中心軸に対して対称になるように、それぞれ傾いていることを特徴とする請求項1又は2に記載の干渉計。

【請求項4】

20

前記受光素子の受光領域に現れる干渉縞のピッチは、該受光領域の直径より小さい、ことを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項に記載の干渉計。

【請求項5】

前記光学系は、レンズ系または反射系を含む、ことを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1項に記載の干渉計。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は干渉計に係り、特に、リファレンスマラー及び測定ミラーのそれぞれで二度反射した光から被測定物の変位情報を得るダブルパス干渉計に関する。

【背景技術】

30

【0002】

従来から、物体の変位を測定しステージの制御、様々な測長をする装置として、高精度、高分解能な特徴から、レーザー干渉計が使用してきた。

【0003】

図3は、従来の干渉計の構成図である。光源10から出射した波長($\lambda = 633\text{ nm}$)のレーザー光110は、PBS20(偏光ビームスプリッタ)に入射し、PBS面20pでリファレンスマート光120aと測定光120bに分割される。リファレンスマート光120aは、リファレンスマラー40aで反射され、元の光路を通って再びPBS20に入射する。このとき、1/4板30aを2回透過することで、P波がS波に変換される。このため、今度はPBS面20pで透過してリファレンスマート光130aとなり、反射素子50に入射する。

40

【0004】

一方、測定光120bは、測定ミラー40bで反射され、元の光路を通って再びPBS20に入射する。このとき、測定光120bの光束は、1/4板30bを二回透過することにより、S波がP波に変換されるため、今度はPBS面20pで反射され、光束130bとなり、リファレンスマート光130aと同様に、反射素子50に入射する。

【0005】

その後、リファレンスマート光140aは再びPBS20を透過してリファレンスマート光140aとなり、測定光140bは再びPBS20を反射して測定光140bとなる。リファレンスマート光140a及び測定光140bは、それぞれ、1/4板30a、30bを二回透過

50

する。PBS20に再び入射したリファレンス光140a及び測定光140bは、合波されて合波光150となる。合波光150を受光素子160で受光することにより、測定ミラー40bの変位に応じた1/4周期の干渉信号が得られる。

【特許文献1】特開2006-112974号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

図3に示されるように、従来の一般的な干渉計では、光路中に多数の反射面が存在する。境界面210bで反射した成分は、通常の測定光と同様の光路をたどり、最終的には合波光150と重なる。この反射成分は、測定ミラー40bの移動によって変調されるが、測定ミラー40bに一回のみの反射で到達している。境界面210a、210aa、210bbについても同様である。このため、変調量は通常の反射成分の半分であり、1/2周期の干渉信号(ゴースト光信号)として得られることになる。

【0007】

例えば、境界面210bにおけるARコート(反射防止膜)の反射率を0.2%とすると、境界面210bで反射したゴースト光から生じる干渉信号は、波動光学的には主信号の干渉強度と比較して、約9%もの干渉強度となる。仮に0.01%の超低反射ARコートを施したとしても、2.5%の干渉強度となる。

【0008】

図4(a)は理想的干渉信号の波形であり、図4(b)は1/2周期誤差が重畠された干渉信号の波形である。図4(b)に示される干渉信号は、ダブルパス干渉計のゴースト光に起因する誤差を含んだ周期信号である。

【0009】

受光素子160から出力された電気信号は、全てのゴースト光に起因する正弦波信号が重畠されている。このため、従来の干渉計で得られる干渉信号は、図4(b)に示されるような波形となる。

【0010】

図5は、受光素子の出力(センサ変位出力)と被測定物の変位との関係を示す図である。

【0011】

通常は、被測定物の変位に応じて変調された正弦波周期信号を電気分割することにより、サブnmの分解能を得ることができる。しかし、ゴースト光に起因する成分が重畠されている場合、図5に示されるように、被測定物の変位に対するセンサ変位出力のリニアリティが悪化する。すなわち、センサ変位出力と被測定物の変位との間には内挿誤差が含まれる。この誤差量は数~数十nmに達するため、超高精度用途の干渉計では大きな問題となる。

【0012】

そこで本発明は、ゴースト光の影響を低減した高精度の干渉計を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明の一側面としての干渉計は、光源からの光をリファレンス光及び測定光に分割する光分割素子と、前記光分割素子で分割されて第1の方向から入射する前記リファレンス光を反射するリファレンスマラーと、前記光分割素子で分割されて第2の方向から入射する前記測定光を反射し、前記第2の方向に沿って変位可能な測定ミラーと、前記リファレンスマラーからの反射光及び前記測定ミラーからの反射光が前記光分割素子を介して入射する光学系と、前記光学系を介して入射する2つの反射光を反射し、それぞれ前記光学系及び前記光分割素子を介して前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーに再入射させる反射素子と、前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーでそれぞれ二度反射された2つの光が合波された光を受光する受光素子と、を有し、前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーでそれぞれ二度反射された前記2つの光は、前記光分割素子により合波され、前

10

20

30

40

50

記光源からの光の反射によって前記光分割素子から射出する光と該光によって生じて前記合波されるべく前記光分割素子に再入射する光とを含む第1平面内、及び、前記光源から前記光分割素子に入射する光と前記合波された光とを含む第2平面内において、前記光源からの光は、前記光分割素子を介して、前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーに対して角度をもって入射し、前記合波されるべき光は、前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーから前記角度をもって射出し、前記光学系は、前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーでそれぞれ反射された2つの光を前記第2平面に平行とし、前記反射素子は、前記光学系により前記第2平面に平行とされた2つの光を、反射後の2つの光が前記第2平面に平行となるように反射し、前記リファレンスマラー及び前記測定ミラーの少なくとも一つは、前記第1平面及び前記第2平面に直交する直交面内において、その法線方向が前記第1の方向及び前記第2の方向のうち対応する方向とは異なるように傾いて配置されている、ことを特徴とする。

【0014】

本発明のその他の目的及び特徴は、以下の実施例において説明される。

【発明の効果】

【0015】

本発明によれば、ゴースト光の影響を低減した高精度の干渉計を提供することができる。

10

20

【発明を実施するための最良の形態】

【0016】

以下、本発明の実施例について、図面を参照しながら詳細に説明する。各図において、同一の部材については同一の参照番号を付し、重複する説明は省略する。

【0017】

本実施例の干渉計は、物体（被測定物）の変位情報を光の位相情報をとして検出し、この光の位相情報を電気信号に変換することにより物体の変位情報を得る干渉計である。

【0018】

図1Aは、本実施例における干渉計の構成を示す上面図である。また、図1Bは、本実施例における干渉計の構成を示す正面図である。

30

【0019】

1は光源（光源装置）である。光源1は、波長（ $\lambda = 633 \text{ nm}$ ）を有するレーザー光11（コリメート光束）を射出する。ただし、レーザー光11の波長はこれに限定されるものではなく、他の波長を有するレーザー光を射出するものであってもよい。

【0020】

2はPBS（偏光ビームスプリッタ）である。PBS2は、入射光の偏光成分に従つて光束を二つに分割する光分割素子である。図1Aの上面図において、光源1から射出したレーザー光11は、角度（例えば、 $\theta = 5^\circ$ ）でPBS2に入射する。PBS2はPBS面2p（偏光ビームスプリッタ面）を有し、このPBS面2pにおいて、PBS2への入射光は、リファレンスマラー光12a及び測定光12bに分割される。なお、図1Aの上面図はPBS面2pの平面を見た図であり、図1Bの正面図はPBS面2pの断面を見た図である。

40

【0021】

4aはリファレンスマラーであり、4bは測定ミラーである。光源1からPBS2へ入射した光は、その一部の光がPBS面2pにおいて第1の方向に反射し、リファレンスマラー光12aとして、リファレンスマラー4aに入射する。また、PBS2への入射光の他の一部は、PBS面2pを透過して、測定光12bとして第2の方向から測定ミラー4bに入射する。図1Bに示されるように、リファレンスマラー4aは、PBS2で分割されて第1の方向から入射するリファレンスマラー光12aを反射する。同様に、測定ミラー4bは、PBS2で分割されて第2の方向から入射する測定光12bを反射する。測定ミラー4b

50

は、被測定物に取り付けられる。測定ミラー4 b（被測定物）が光軸方向（第2の方向）に変位することにより、測定光12 bの位相情報が変化する。リファレンスマラー4 a及び測定ミラー4 bは、後述の反射素子5と共に役関係にある。

【0022】

リファレンスマラー4 aは、そのミラー面の法線方向がPBS面2 pで反射したリファレンスマラー4 aの光軸方向（第1の方向）とは異なるように、角度だけ傾いて配置されている。同様に、測定ミラー4 bは、そのミラー面の法線方向がPBS面2 pを透過した測定光12 bの光軸方向（第2の方向）とは異なるように、角度だけ傾いて配置されている。本実施例において、角度は例えば0.5°に設定される。なお、本実施例の説明において、角度は、図1Bの正面図で見た場合における、第1の方向とリファレンスマラー面の法線方向とのなす角度、及び、第2の方向と測定ミラー面の法線方向とのなす角度である。10

【0023】

このため、リファレンスマラー4 aで反射した後のリファレンスマラー13 aは、リファレンスマラー4 aに入射する前のリファレンスマラー12 aに対して角度2だけ傾いた光束となる。同様に、測定ミラー4 bで反射した後の測定光13 bは、測定ミラー4 bに入射する前の測定光12 bに対して角度2だけ傾いた光束となる。

【0024】

6はレンズ系（光学系）である。リファレンスマラー4 aで反射したリファレンスマラー13 aは、PBS面2 pで反射し、レンズ系6に角度2で入射する。同様に、測定ミラー4 bで反射した測定光13 bは、PBS面2 pを透過し、レンズ系6に角度2で入射する。このように、レンズ系6（光学系）は、PBS2を介して、リファレンスマラー4 aからの反射光（リファレンスマラー13 a）及び測定ミラー4 bからの反射光（測定光13 b）を入射する。図1Bの正面図に示されるように、レンズ系6は、角度2で入射したリファレンスマラー13 a及び測定光13 bを元の角度（光源1からのレーザー光11同一の方向）に変更する。20

【0025】

なお、本実施例では、リファレンスマラー13 a及び測定光13 bを入射する光学系としてレンズ系6が用いられているが、これに限定されるものではない。レンズ系6の代わりに反射系を用いることもできる。30

【0026】

本実施例では、リファレンスマラー4 a及び測定ミラー4 bは、レンズ系6における反射光それぞれの通過位置がレンズ系6の中心軸に対して対称位置になるように配置されている。すなわち、図1Bに示されるように、リファレンスマラー4 a及び測定ミラー4 bの両方を基準位置から右周りに角度だけ傾け、レンズ系6に入射するリファレンスマラー13 aと測定光13 bの各光束の高さが上下対称になるように構成している。

【0027】

ただし、これに限定されるものではなく、リファレンスマラー4 aの角度を測定ミラー4 bの角度とは異なる角度に設定することや、これらのミラーを互いに異なる方向に傾けてよい。また、本実施例では、リファレンスマラー4 a及び測定ミラー4 bの少なくとも一つが傾いて配置されていればよい。このとき、リファレンスマラー4 a及び測定ミラー4 bの少なくとも一つの法線方向は、第1の方向及び第2の方向に対して傾いていることになる。40

【0028】

5は反射素子である。レンズ系6に角度2で入射したリファレンスマラー13 a及び測定光13 bは、図1Bの正面図に示されるように、レンズ系6で屈折して互いに平行な光になる。そして、反射素子5は、リファレンスマラー4 a及び測定ミラー4 bからの反射光（リファレンスマラー13 a、測定光13 b）をそれぞれリファレンスマラー4 a及び測定ミラー4 bに再照射するため、レンズ系6からの互いに平行な光を反射する。

【0029】

50

反射素子 5 は、リファレンスミラー 4 a 及び測定ミラー 4 b と共に役割関係にある。このため、リファレンス光 1 3 a 及び測定光 1 3 b は、図 1 B の正面図において、光源 1 からのレーザー光 1 1 と平行であり、反射素子 5 でこの角度を維持するように反射される。反射素子 5 で反射した光束は、レンズ系 6 及び P B S 2 を通って、再び、リファレンスミラー 4 a 又は測定ミラー 4 b のいずれかに照射する。

【0030】

16 は受光素子（光検出器）である。受光素子 1 6 は、リファレンスミラー 4 a 及び測定ミラー 4 b のそれぞれに二度照射して合波された合波光 1 5 を受光する。合波光 1 5 はレーザー光 1 1 と同じ角度で受光素子 1 6 に入射する。

【0031】

このように、合波光 1 5（ダブルパス干渉計における本来の光束）は受光素子 1 6 にレーザー光 1 1 と同一の角度で入射する。このため、受光素子 1 6 の全面に一様な明滅を繰り返す最大 1 / 4 周期の干渉信号となる。

【0032】

次に、本実施例の干渉計で発生する迷光（ゴースト光）について説明する。

【0033】

本実施例において、反射素子 5 から戻った光束であるリファレンス光 1 3 a 及び測定光 1 3 b に関して考える。リファレンス光 1 3 a 及び測定光 1 3 b が P B S 2 に入射した後、その一部は、P B S 2（プリズム）と空気との境界面 2 1 a a、2 1 b b の A R コート面（反射防止膜面）でそれぞれ反射する。境界面 2 1 a a、2 1 b b の A R コート面で反射したゴースト光 1 5 a、1 5 b は、主光束（リファレンス光、測定光）と同様に、受光素子 1 6 に入射して干渉信号を発生させる。

【0034】

しかし、ゴースト光 1 5 a、1 5 b は、図 1 B の正面図において、合波光 1 5 の方向に対してそれぞれ角度 2 だけ傾いた角度で受光素子 1 6 に入射する。このため、受光素子 1 6 の受光領域（受光面）には、所定のピッチ p を有する干渉縞が発生する。干渉縞のピッチ p は、波長 λ と角度 θ を用いて、式（1）で表される。

【0035】

【数 1】

$$p = \frac{\lambda}{\sin 2\theta} \quad \cdots (1)$$

【0036】

図 2 は、受光素子 1 6 の受光領域において現れる干渉縞の一例である。図 2 の右側の「明」と左側の「暗」は、いずれも、受光素子 1 6 の受光領域に現れる干渉縞を示している。測定ミラー 4 b を変位させることにより、受光領域に現れる干渉縞は、図 2 に示される「明」と「暗」を繰り返す。この周期は波長 λ に依存し、例えば、波長 λ が 850 nm の光を用いて測定ミラー 4 b を 200 nm 程度変位させると、「明」から「暗」に変化する。

【0037】

本実施例では、図 2 に示されるように、式（1）で表されるピッチ p を有する干渉縞が得られる。この干渉縞はゴースト光に起因するものである。このため、受光素子 1 6 の受光領域が、ピッチ P に比較して十分大きければ、受光素子 1 6 で検出される光量が平均化される（平均化効果）ことにより、内挿誤差を十分低減させることができ、センサ変位出力の直線性を向上させることが可能となる。

【0038】

例えば、境界面 2 1 a a で反射したゴースト光 1 5 a の干渉縞強度が、主光束の干渉縞強度に比較して、従来例で述べたように 9 % 程度発生した場合を考える。このとき、重厚領域が 2 mm、リファレンスミラー 4 a 及び測定ミラー 4 b の傾き角度 θ を 0.5° とすると、ゴースト光を起因として発生する干渉パターンは、ピッチ p が 36 μm の縞模様となる。電気信号に重畠されるゴースト光を起因とした 1 / 2 周期の信号の割合は、

10

20

30

40

50

主信号の 0.16 % だけである。これは、リニアリティとしては $\pm 0.04 \text{ nm}$ の悪化に過ぎず、サブ nm レベルの超高精度測長においても全く問題の無いレベルまで誤差を低下させることができる。以上の点については、その他の境界面 21b、21bb、21a でも同様の効果がある。このため、これら 4ヶ所の境界面全ての悪化要因を足し合わせたとしても、 $\pm 0.16 \text{ nm}$ の周期的誤差が発生するに過ぎない。従って、極めて高精度な測長が可能となる。

【0039】

本実施例において、受光素子 16 の受光領域が直径 D の円であるとすると、ピッチ p が直径 D より小さくなるように設定すればよい。また、 $\sin 2\theta$ は 1 以下であるから、ピッチ p が波長より小さくなることはない。従って、ピッチ p を式(2)で表される範囲に設定することにより、本実施例における平均化効果を得ることができる。10

【0040】

【数2】

$$\lambda \leq p = \frac{\lambda}{\sin 2\theta} < D \quad \dots \quad (2)$$

【0041】

また、リファレンスマラー 4a と PBS 2 との間の距離 x、及び、測定ミラー 4b と PBS 2 との間の距離 r を等しくすれば、リファレンスマート光及び測定光の波動光学的等光路位置となる。このため、ガラス光路中を通過する光路長と空気中を通過する光路長とが一致する。20

【0042】

このため、気圧、気温、湿度等の空気屈折率に関係する雰囲気の状態変化に影響されること無く、長期的に安定した測定が可能となる。

【0043】

本実施例における光源装置（光源 1）は、コリメート光を発生させる装置であるが、これに限定されるものではない。例えば、コリメート光を発生させる光源の代わりに発散光源を用いた場合でも、発散光束をコリメートするコリメート手段としてのレンズ系を用いることにより、光源 1 と同様の効果を得ることができる。このとき、コリメート手段としてのレンズ系と、本実施例におけるレンズ系 6 を共通化する（すなわち、レンズ系 6 が光源装置の一部を構成する）ことにより、簡便な構成で光源 1 と同様の効果を得ることができる。このとき、発散光源からの光は、レンズ系 6 によりコリメート光に変更され、PBS 2 に入射する。30

【0044】

本実施例の干渉計によれば、リファレンスマラー及び / 又は測定ミラーが常に傾いた状態で設置される。このため、リファレンスマラーで 1 回、測定ミラーで 1 回反射したゴースト光は、リファレンスマラーで 2 回反射した光束、測定光で 2 回反射した光束とは異なる角度で合波される。よって、受光素子上では多数の干渉縞（干渉パターン）が現れ平均化され、誤差量は大幅に改善される。また、リファレンスマラーで 2 回、測定ミラーで 2 回反射した本来の光束は、それぞれ同一の角度で合波される。このため、均一な干渉状態となり、最大の干渉強度を得ることができる。40

【0045】

従って、本実施例によれば、ゴースト光の影響を抑制した高精度の干渉計を提供することができる。

【0046】

以上、本発明の実施例について具体的に説明した。ただし、本発明は上記実施例として記載された事項に限定されるものではなく、本発明の技術思想を逸脱しない範囲内で適宜変更が可能である。例えば、本実施例ではマイケルソン干渉計について説明したが、これに限定されるものではなく、フィゾー干渉計など他の干渉計に適用することもできる。

【図面の簡単な説明】

【0047】

10

20

30

40

50

【図1A】本実施例における干渉計の構成を示す上面図である。

【図1B】本実施例における干渉計の構成を示す正面図である。

【図2】本実施例における受光素子の受光領域において現れる干渉縞の一例である。

【図3】従来のダブルパス干渉計の構成図である。

【図4】(a)理想的干渉信号の波形、(b)1/2周期誤差が重畠された干渉信号の波形である。

【図5】従来のダブルパス干渉計におけるセンサ変位出力と被測定物の変位との関係を示す図である。

【符号の説明】

【0048】

1：光源

2：PBS

2p：PBS面

4a：リファレンスマラー

4b：測定ミラー

5：反射素子

6：レンズ系

11：レーザー光

12a、13a：リファレンス光

12b、13b：測定光

15：合波光

15a、15b：ゴースト光

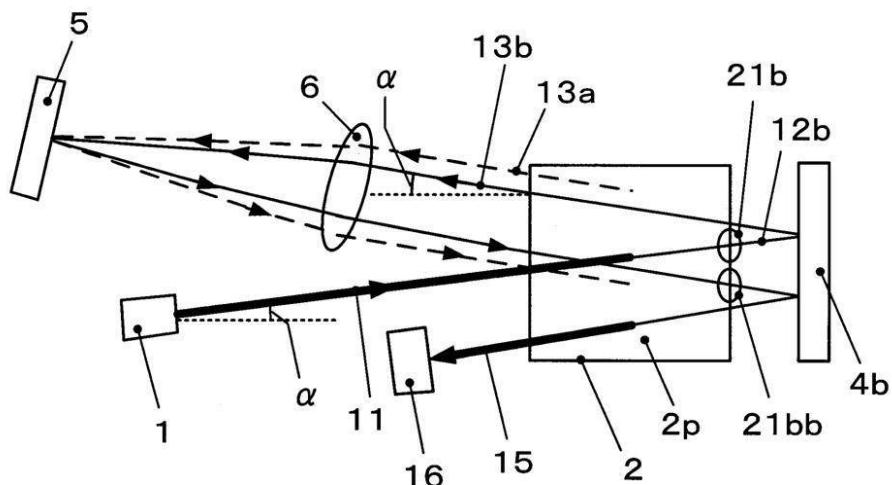
16：受光素子

21a、21aa、21b、21bb：境界面

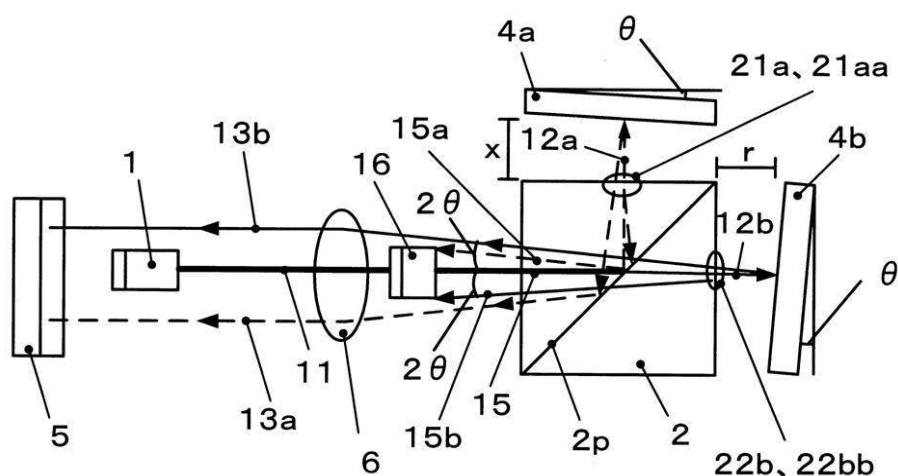
10

20

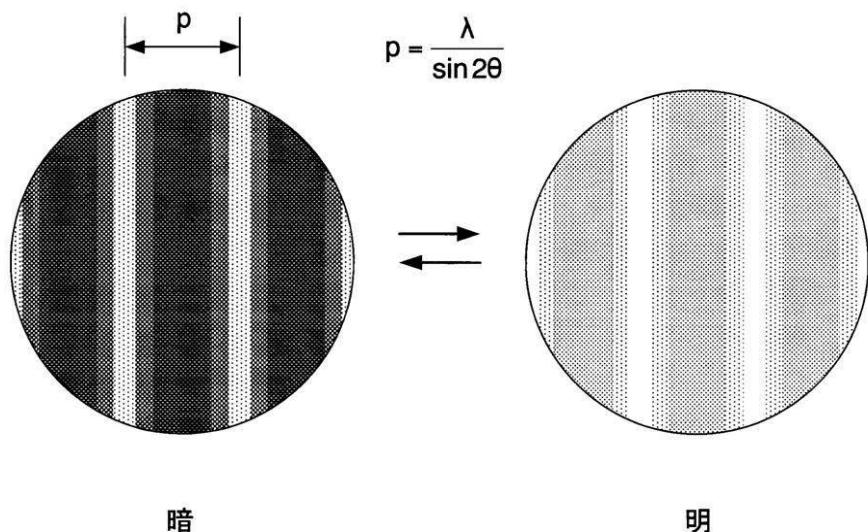
【図1A】



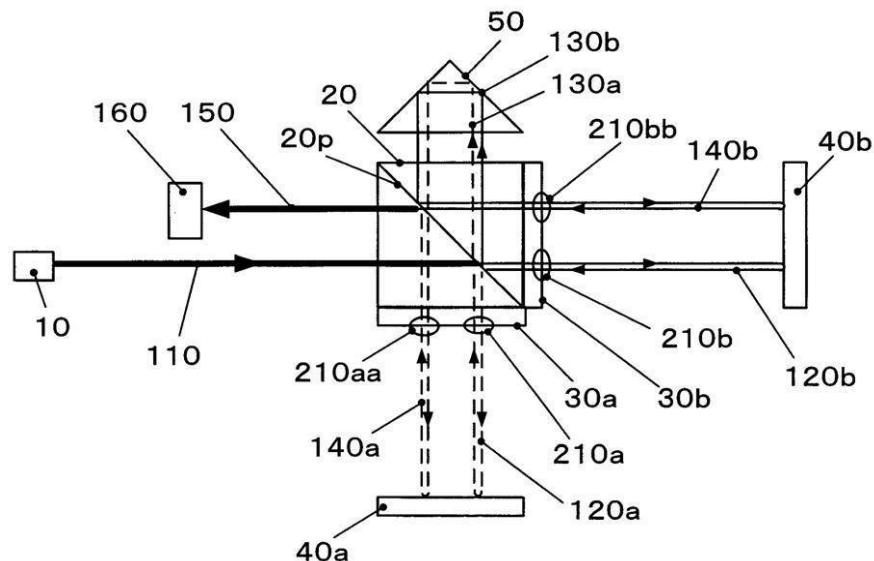
【図1B】



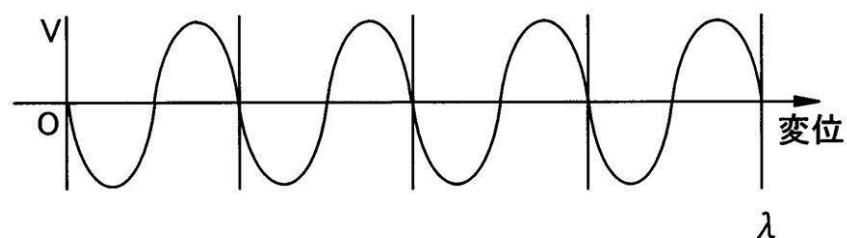
【図2】



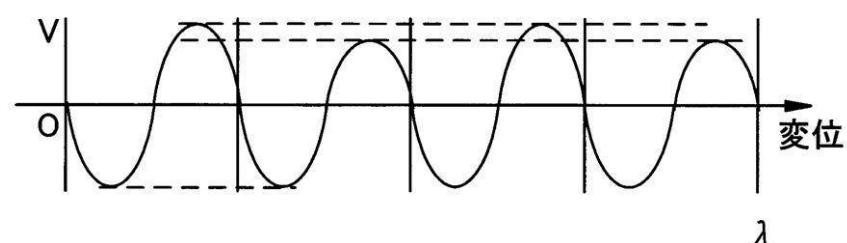
【図3】



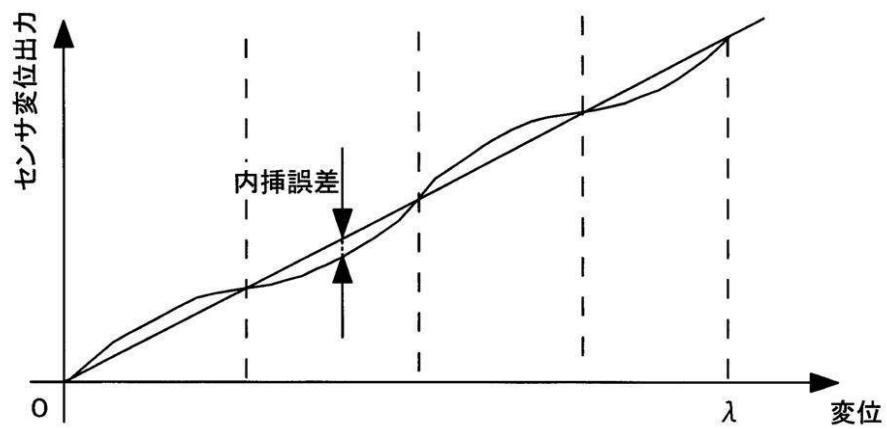
【図4】



(a)理想的干渉信号

(b) $1/2\lambda$ 周期誤差が重畠された干渉信号

【図5】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2006-112974(JP,A)
特開平11-125503(JP,A)
特開2005-117051(JP,A)
特開昭61-128104(JP,A)
特表2007-537436(JP,A)
特開平05-316284(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 01 B 9 / 00 - 11 / 30