

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5659048号
(P5659048)

(45) 発行日 平成27年1月28日(2015. 1. 28)

(24) 登録日 平成26年12月5日(2014. 12. 5)

(51) Int.Cl.

F I

G O 1 N 21/956 (2006.01)

G O 1 N 21/956

A

請求項の数 12 (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2011-45468 (P2011-45468)
 (22) 出願日 平成23年3月2日(2011. 3. 2)
 (65) 公開番号 特開2012-181154 (P2012-181154A)
 (43) 公開日 平成24年9月20日(2012. 9. 20)
 審査請求日 平成25年3月14日(2013. 3. 14)

(73) 特許権者 000005108
 株式会社日立製作所
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
 (74) 代理人 110001689
 青稜特許業務法人
 (74) 代理人 110000350
 ポレール特許業務法人
 (72) 発明者 中平 健治
 神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地
 株式会社日立製作所 生産技術研究所内
 (72) 発明者 本田 敏文
 神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地
 株式会社日立製作所 生産技術研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光検査方法及びその装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光検査装置であって、

試料に光を照射する光照射手段と、

参照光を発射する参照光手段と

前記光照射手段により光が照射された前記試料からの透過光または散乱光または反射光と、
 前記参照光手段から発射された参照光とを干渉させて干渉光を生成する光干渉手段と、
 前記光干渉手段により生成した干渉光を検出する光検出手段と、

前記光検出手段により干渉光を検出して得られた検出信号に基づいて欠陥の有無を識別する欠陥識別手段と、

前記試料からの透過光または散乱光または反射光の状態、または前記参照光手段から発射された参照光の状態、または前記光干渉手段により生成した干渉光の状態のうち、少なくとも一つを変換する光変換手段とを有し、

前記光変換手段は、前記光検出手段により前記干渉光を検出して得られた検出信号において欠陥を含む信号の確率分布と欠陥を含まない信号の確率分布との重なりが小さくなるように前記試料からの透過光または散乱光または反射光の状態、または前記参照光手段から発射された参照光の状態、または前記光干渉手段により生成した干渉光の状態のうち少なくとも何れか一つの状態を予め設定した位相シフト量による位相シフト、または振幅・位相の確率分布の形状が変化するように変換することを特徴とする光検査装置。

【請求項 2】

前記光変換手段は、欠陥検出の要求感度、要求スループット、検出対象とする欠陥の種類の少なくとも一つに応じて、前記参照光の位相または前記光照射手段により照射する光の位相を調整することを特徴とする請求項 1 記載の光検査装置。

【請求項 3】

前記光変換手段は、欠陥がある場合又はない場合の少なくとも何れかの場合における前記光照射手段により光が照射された試料からの透過光または散乱光または反射光の状態を表す量子状態を推定した情報に基づいて前記参照光の位相を調整することを特徴とする請求項 1 記載の光検査装置。

【請求項 4】

前記光変換手段は、前記光照射手段により光が照射された前記試料からの透過光または散乱光または反射光、または前記参照光手段から発射された参照光、または前記光干渉手段により生成した干渉光のうち、少なくとも一つに対してフォトニック結晶を用いてその光の状態を調整することを特徴とする請求項 1 記載の光検査装置。

【請求項 5】

前記光変換手段は、前記参照光に対してフォトニック結晶を用いることにより該参照光の状態を変換することを特徴とする請求項 1 記載の光検査装置。

【請求項 6】

前記欠陥識別手段は、更に欠陥の種類に関する情報も取得することを特徴とする請求項 1 記載の光検査装置。

【請求項 7】

光検査方法であって、
試料に光を照射する光照射ステップと、
参照光を発射するステップと、
前記光が照射された試料からの透過光または散乱光または反射光と、前記発射された参照光とを干渉させて干渉光を生成する光干渉ステップと、
前記光干渉ステップにより生成した干渉光を検出する光検出ステップと、
前記光検出ステップで前記干渉光を検出して得られた検出信号に基づいて欠陥の有無を識別する欠陥識別ステップと、
前記試料からの透過光または散乱光または反射光の状態、または前記発射された参照光の状態、または前記光干渉ステップにより生成された干渉光の状態のうち、少なくとも何れか一つの光の状態を変換する光変換ステップとを有し、

前記光変換ステップにおいて、前記光検出ステップで前記干渉光を検出して得られた検出信号において欠陥を含む信号の確率分布と欠陥を含まない信号の確率分布との重なりが小さくなるように前記試料からの透過光または散乱光または反射光の状態、または前記発射された参照光の状態、または前記光干渉ステップにより生成した干渉光の状態のうち少なくとも何れか一つの光の状態を予め設定した位相シフト量による位相シフト、または振幅・位相の確率分布の形状が変化するように変換することを特徴とする光検査方法。

【請求項 8】

前記光変換ステップは、欠陥検出の要求感度、要求スループット、検出対象とする欠陥の種類の少なくとも一つに応じて、前記参照光の位相または前記光照射ステップにより照射する光の位相を調整することを特徴とする請求項 7 記載の光検査方法。

【請求項 9】

前記光変換ステップは、欠陥がある場合又はない場合の少なくとも何れかの場合における前記光が照射された試料からの透過光または散乱光または反射光の状態を表す量子状態を推定した情報、前記推定した量子状態に基づいて前記参照光の位相を調整することを特徴とする請求項 7 記載の光検査方法。

【請求項 10】

前記光変換ステップは、前記光が照射された試料からの透過光または散乱光または反射光、または前記発射された参照光、または前記生成した干渉光のうち、少なくとも一つに対してフォトニック結晶を用いてその光の状態を調整することを特徴とする請求項 7 記載の

10

20

30

40

50

光検査方法。

【請求項 1 1】

前記光変換ステップは、前記参照光に対してフォトリソグラフィ結晶を用いることにより該参照光の状態を変換することを特徴とする請求項 7 記載の光検査方法。

【請求項 1 2】

前記欠陥識別ステップは、更に欠陥の種類に関する情報も取得することを特徴とする請求項 8 記載の光検査方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光を試料に照射してその反射光を検出することにより試料表面に存在する微小な欠陥を検査する光検査方法及びその装置に関する。

【背景技術】

【0002】

半導体基板や薄膜基板等の製造ラインにおいて、製品の高い歩留まりを得るために、試料表面に存在する微小な欠陥を検査する光検査装置が広く用いられている（例えば、特許文献 1、2）。一般に光検査装置では、数十 μm の幅に集光した光を試料表面上に照射し、欠陥からの透過光または散乱光または反射光を集光・検出して欠陥検出を行う。現在実用化されている装置では、数十 nm 以上の欠陥を検査することができる。

【0003】

一方、微細加工技術の進歩に伴い、より微小な欠陥を検査したいという要求が高まっている。微小な欠陥では、照明光が照射された欠陥から得られる光は微弱となるため、より高感度で高性能な欠陥検出技術が必要となる。特に、微弱光では量子ノイズと呼ばれる量子力学の不確定性原理に基づく不可避な揺らぎの影響が無視できなくなるため、量子ノイズの影響を抑えることが重要となる。

【0004】

この微小な欠陥を検査する方法として、例えば特許文献 3 に記載されているような、ホモダイン検出やヘテロダイン検出のように試料から得られる光と参照光との振幅差・位相差に関する情報に基づいて欠陥の有無を識別する方法がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献 1】特開平 9 - 304289 号公報

【特許文献 2】特開 2006 - 201179 号公報

【特許文献 3】特開 2007 - 232667 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

従来の装置では、まず参照光と干渉させた光を検出器により電気信号に変換した後、得られた電気信号に対して欠陥検出を行っていた。この際、検出器により光を検出した後では本質的に量子ノイズの影響を抑制することはできないため、検出前に量子ノイズの影響を抑制する処理が必要となる。しかし、従来では、参照光との干渉において量子ノイズの影響を抑制するための変換がされていなかったため、光量が微弱になると良好な欠陥検出性能が得られなかった。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明では、以下の光検査方法及びその装置により前記課題を解決する。

すなわち、本発明では、光検査装置を、試料に光を照射する光照射手段と、参照光を発射する参照光手段と、光照射手段により光が照射された試料からの透過光または散乱光または反射光と、参照光手段から発射された参照光とを干渉させて干渉光を生成する光干渉

10

20

30

40

50

手段と、光干渉手段により生成した干渉光を検出する光検出手段と、光検出手段により干渉光を検出して得られた検出信号に基づいて欠陥の有無を識別する欠陥識別手段と、試料からの透過光または散乱光または反射光の状態または参照光手段から発射された参照光の状態または光干渉手段により生成した干渉光の状態のうち少なくとも一つを変換する光変換手段とを備え、光変換手段は、光検出手段により干渉光を検出して得られた検出信号において欠陥を含む信号の確率分布と欠陥を含まない信号の確率分布との重なりが小さくなるように試料からの透過光または散乱光または反射光の状態、または参照光手段から発射された参照光の状態、または光干渉手段により生成した干渉光の状態のうち少なくとも何れか一つの状態を予め設定した位相シフト量による位相シフト、または振幅・位相の確率分布の形状が変化するように変換するように構成した。

10

【0008】

このように、光を検出する前に光の状態を変換することにより、量子ノイズの影響を抑制し、欠陥検出感度を向上する、あるいは、欠陥検出感度を維持した上で検査時間を短縮することが可能となる。

【0009】

また、本発明は、前記光変換手段において、欠陥検出の要求感度、要求スループット、検出対象とする欠陥の種類のうち少なくとも一つに応じて、前記参照光の位相を変更することを特徴とする。

【0010】

量子ノイズの影響を受けにくい参照光の位相は、欠陥検出の要求感度、要求スループット、検出対象とする欠陥の種類によって異なる。これに対し、本発明により、参照光の位相を要求値に応じて最適化することができる。

20

【0011】

また、本発明は、前記光変換手段において、欠陥がある場合とない場合のうち少なくとも一つにおいて試料からの透過光または散乱光または反射光の状態を表す量子状態を計算し、前記量子状態に基づいて前記参照光の位相を変更することを特徴とする。

【0012】

このように、識別したい状態を量子状態としてモデル化することにより、量子ノイズの影響を考慮して参照光の位相を適切に最適化することができる。この際、欠陥がある場合における量子状態を計算することにより、欠陥がある場合に正しく検出する確率（検出正解率）を制御することができるし、欠陥がない場合における量子状態を計算することにより、欠陥がない場合に誤って欠陥があると識別してしまう確率（虚報率）を制御することができる。欠陥がある場合とない場合両方の場合における量子状態を計算すれば、検出正解率と虚報率を制御することができる、高い適切な検出を行うことができる。

30

【0013】

また、本発明は、前記光変換手段において、前記参照光、または前記参照光を干渉させる前の光、または前記参照光を干渉させた後の光に対して、フォトニック結晶を用いることにより、前記欠陥識別手段において欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なりが小さくなるように光の状態を変換することを特徴とする。

【0014】

欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なりが小さくなるように光の状態を変換するためには、非線形変換が必要であることが知られている。非線形変換とは、出力光を表す電磁場が、入力光を表す電磁場に比例しないような変換である。従来の光学媒質では強い非線形光学効果を得ることは困難であったが、近年研究開発が盛んに行われているフォトニック結晶により、強い非線形光学効果が得られることが知られている。フォトニック結晶を光検査装置に適用して、検出器の前に設置することにより、欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なりが小さくなるように光の状態を変換し、量子ノイズの影響を抑えることができる。

40

【0015】

また、本発明は、前記光変換手段において、前記欠陥識別手段において欠陥の有無のそ

50

れそれぞれに対応する確率分布の重なりが小さくなるように前記参照光に対してフォトリック結晶を用いて光の状態を変換することを特徴とする。

【0016】

微小な欠陥を検出するためには、試料から散乱または反射された光に含まれる欠陥からの微弱な信号を検出する必要がある。しかし、光の状態を変換すると、光学媒質の材質の不均一性や光軸調整の精度不足などの要因のため、光変換手段により少なからず意図しない擾乱を与えてしまう。本発明では、欠陥からの微弱な信号を含む光に対しては光変換手段により光の状態を変更することはせず、参照光に対してのみ光変換手段により光の状態を変更することにより、擾乱による性能低下を防ぐことができる。

【0017】

また、本発明は、前記欠陥識別手段において、欠陥の有無だけでなく欠陥の種類に関する情報も取得することを特徴とする。

【0018】

試料から散乱または反射された光には、欠陥の有無だけでなく欠陥の種類に関する情報も含まれる。欠陥検出と同様の装置構成において、欠陥の種類に関する多くの情報が得られるように光変換手段を用いて光の状態を変換することにより、量子ノイズの影響を抑えながら欠陥の種類に関する情報も得ることができる。

【発明の効果】

【0019】

本発明によれば、参照光を干渉させることにより試料から透過または散乱または反射された光の状態を変換する光変換手段において、欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なりが小さくなるように光の状態を変換することにより、量子ノイズの影響を抑制し、欠陥検出を高精度に行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1】図1は、本発明の一実施例における光検査装置の概略の構成を示すブロック図である。

【図2A】図2Aは、欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なり状態を調整する光変換手段106を備えていない場合における確率分布である。

【図2B】図2Bは、図2Aのグラフ201と比較してそれぞれの確率分布213、214の平均の差232を大きくすることにより、確率分布の重なり232の面積を小さくした状態を示すグラフである。

【図2C】図2Cは、それぞれの確率分布の平均の差233は図2Aの差231と同じであるが、確率分布の形状を変えることにより、確率分布の重なり223の面積を小さくした状態を示すグラフである。

【図3】図3は、図1で説明した光変換手段106に替えて光変換手段306を設けて、欠陥検出の要求感度、要求スループット、検出対象とする欠陥の種類の少なくとも一つに応じて、前記参照光の位相を変更して調整できるように構成した光検査装置の概略の構成を示すブロック図である。

【図4】図4は、欠陥サイズと検出率の関係の概略を示したグラフである。

【図5A】図5Aは、ホモダイン検出と呼ばれる検出方法を実現するための光干渉手段の周辺の構成を示すブロック図である。

【図5B】図5Bは、バランス型ホモダイン検出と呼ばれる検出方法を実現するための光干渉手段の周辺の構成を示すブロック図である。

【図5C】図5Cは、ヘテロダイン検出と呼ばれる検出方法を実現するための光干渉手段の周辺の構成を示すブロック図である。

【図6】図6は、位相シフタを備えて光変換手段を構成した実施例における光干渉手段の周辺の構成を示すブロック図である。

【図7A】図7Aは、欠陥の形状や種類の例を示すパターン又は欠陥の断面図である。

【図7B】図7Bは、欠陥がある場合と無い場合における対象光の状態を表す位相空間表

10

20

30

40

50

現の例で、対象光が x_c 軸と x_s 軸とで等方的な揺らぎを持っている状態を示すグラフある。

【図7C】図7Cは、欠陥がある場合と無い場合における対象光の状態を表す位相空間表現の例で、対象光が x_c 軸と x_s 軸とで異なる揺らぎを持っている状態を示すグラフある。

【図8】図8は、参照光の位相を変えることにより量子ノイズの影響を抑えられることを示した検出信号の平均値とその確率分布を示すグラフである。

【図9A】図9Aは、位相空間表現を用いて、参照光の位相シフト量の適切な値を求める方法の例を示す図である。

【図9B】図9Bは、位相空間表現を用いて、参照光の位相シフト量の適切な値を求める方法の例を示す図で、欠陥がない場合の対象光の状態を点線の領域922、欠陥がある場合の対象光の状態を実線の領域923で示している。

【図9C】図9Cのグラフ904は、位相空間表現を用いて、参照光の位相シフト量の適切な値を求める方法の例を示す図で、欠陥がない場合の対象光の状態を点線の領域931、欠陥がある場合の対象光のうち、欠陥の種類が欠陥Aの場合の対象光の状態を破線の領域932、欠陥の種類が欠陥Bの場合の対象光の状態を実線の領域933で示している。

【図10】図10は、光の位相シフト量を変更する位相シフタの概略の構成を示すブロック図である。

【図11A】図11Aはホモダイン検出に対応する構成で、対象光と参照光を光干渉手段で干渉させた後の光に対して、フォトニック結晶を用いた非線形変換器で非線形変換を行い、この非線形変換された干渉光を検出器で検出する構成を示す。

【図11B】図11Bはバランス型ホモダイン検出に対応する構成であり、対象光と参照光を光干渉手段で干渉させた後の光に対して、それぞれフォトニック結晶を用いた非線形変換器で非線形変換を行ってそれぞれの干渉光を検出器で検出し出力信号の差を演算器で算出する構成の例を示す図である。

【図11C】図11Cはバランス型ホモダイン検出に対応する構成であり、図11Bの構成に対して、さらに対象光と参照光に対しても非線形変換を行う例を示す図である。

【図11D】図11Dはバランス型ホモダイン検出に対応する構成であり、参照光に対して非線形変換を行う例を示す図である。

【図12A】図12Aは、屈折率が異なる領域が周期的に配置された構造体の中に周期を乱す構造を意図的に導入することにより、導波路や光の閉じ込めなどの機能を実現したフォトニック結晶の構造に関する例を示す図である。

【図12B】図12Bは、屈折率が異なる領域が周期的に配置された構造体の中に周期を乱す線状の領域を2つ意図的に導入することにより、これら2つの線状の領域を導波路として機能させたフォトニック結晶の構造に関する例を示す図である。

【図13A】図13Aは、フォトニック結晶を用いた非線形変換器の構成の例を示すブロック図である。

【図13B】図13Bは、フォトニック結晶を用いた非線形変換器の具体的な構成の一実施例を示すブロック図である。

【図14】図14は、要求感度等に応じて、非線形変換方法を変更する光変換手段の構成を示すブロック図である。

【図15】図15は、要求感度等に応じて、非線形変換方法を変更する光変換手段を示すブロック図である。

【図16A】図16Aは、非線形変換を行わなかった場合の欠陥がない場合とある場合のそれぞれの対象光の状態を表す位相空間表現のグラフである。

【図16B】図16Bは、非線形変換を行った場合の欠陥がない場合とある場合のそれぞれの対象光の状態を表す位相空間表現のグラフである。

【図17A】図17Aは、検出光学系に、実施例1及び実施例2で説明した光干渉手段、光変換手段、光検出手段を備え落射照明により欠陥を検出する光検査装置の構成を示すブロック図である。

10

20

30

40

50

【図１７Ｂ】図１７Ｂは、検出光学系に、実施例１及び実施例２で説明した光干渉手段、光変換手段、光検出手段を備え斜方照明により欠陥を検出する光検査装置の構成を示すブロック図である。

【図１８Ａ】図１８Ａは、照明光学系に近接場光照明手段を用い、検出光学系に、実施例１及び実施例２で説明した光干渉手段、光変換手段、光検出手段を備えた光検査装置の構成を示すブロック図である。

【図１８Ｂ】図１８Ｂは、照明光学系に先端部分から近接場光を放出する近接場ヘッドを有する照明手段を用い、検出光学系に、実施例１及び実施例２で説明した光干渉手段、光変換手段、光検出手段を備えた光検査装置の構成を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

10

【００２１】

本発明は、光を試料に照射することにより試料表面に存在する微小な欠陥を検査する光検査装置に係り、特に検出する光が微弱な場合に問題となる量子ノイズの影響を抑制する光検査装置および検査方法を提供することにある。以下、本発明に係る実施の形態について図面を用いて説明する。

【実施例１】

【００２２】

[図１説明]図１は、実施例１における光を試料に照射することにより試料表面に存在する微小な欠陥を検査する光検査装置１０１の一例を示す図である。

【００２３】

20

光検査装置１０１は、試料１１１に光を照射する光照射手段１０２と、試料から散乱または反射された光と参照光光源手段１１３から発射された参照光を干渉させる光干渉手段１０３と、干渉後の光を検出する光検出手段１０４と、干渉光を検出した光検出手段１０４から出力された検出信号を処理して欠陥の有無の識別を行う欠陥識別手段１０５を備えて構成される。光照射手段１０２から試料１１１に照射する光は、空間分解能を高めるため試料１１１上で集光させ、その集光した光を試料上で走査することが多いが、これに限らない。光干渉手段１０３では、通常ビームスプリッタ（ＢＳ）１１２を用いて、試料１１１からの反射光のうちビームスプリッタ（ＢＳ）１１２を透過した反射光と参照光光源手段１１３から発射された光のうちビームスプリッタ（ＢＳ）１１２で反射した参照光を干渉させる。

30

【００２４】

さらに、光検査装置１０１は、欠陥の有無のそれぞれに対応する検出信号に対する確率分布の重なりが小さくなるように、光を変換する光変換手段１０６を有する。図１に示した構成では、光変換手段１０６を参照光光源手段１１３から発射された参照光の光路上に配置して参照光の状態を変換する例を示してあるが、光変換手段１０６は、試料からの反射光の光路上に設置して反射光の状態を変換するようにしても良く、または光干渉手段１０３と光検出手段１０４との間に配置して干渉後の光の状態を変換するようにしても良い。

【００２５】

[図１効果]このように、光を検出する前に光の状態を変換することにより、量子ノイズの影響を抑制し、欠陥検出感度を向上する、あるいは、欠陥検出感度を維持した上で検査時間を短縮することが可能となる。

40

【００２６】

[図１補足]なお、光照射手段１０２では、用途等に応じて適した光を照射すれば良い。例えば、単一の発振周波数を持つレーザ光であっても良いし、複数の発振周波数を持っていても良い。また、断続的な光であるパルス光であっても良いし、連続的な光であっても良い。光の状態が偏光していても良いし、光の振幅・位相・周波数のいずれかが変調していても良い。通常のレーザ光の状態であるコヒーレント状態の光であっても良いし、スクイズド状態の光であっても良い。

【００２７】

50

また、図 1 に示した構成では、光照射手段 1 0 2 と参照光光源手段 1 1 3 とが分離されていて別々の光源を備えている構成となっているが、光照射手段 1 0 2 と参照光光源手段 1 1 3 とは光源を共有するように構成しても良い。

【 0 0 2 8 】

光干渉手段 1 0 3 では、一種類の参照光のみと干渉させるだけでなく、二種類以上の参照光と干渉させても良い。参照光光源手段 1 1 3 から発射される参照光の光の種類は、光照射手段 1 0 2 から試料 1 1 1 に照射する光と同じでなくとも良い。例えば、光照射手段 1 0 2 ではコヒーレント状態の光を照射して、参照光光源手段 1 1 3 からはスクイズド状態の光を発射するようにしても良い。

【 0 0 2 9 】

光検出手段 1 0 4 では、検査のスループット向上のため、検出器をアレイ状に並べることも多いが、これに限らない。光検出手段 1 0 4 の出力である検出信号は、通常は電気信号である。欠陥識別手段 1 0 5 では、アナログまたはデジタルの電気回路により、欠陥の有無を識別する。欠陥識別手段 1 0 5 では、欠陥の有無のみでなく、欠陥の種類を識別するような処理を行っても良い。

【 0 0 3 0 】

[図 2 説明] 図 2 A 乃至図 2 C は、欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なりを表す一実施例図である。図 2 A のグラフ 2 0 1 は、欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なり状態を調整する光変換手段 1 0 6 を備えていない場合における確率分布である。欠陥がある場合の確率分布を実線で、欠陥がない場合の確率分布を破線で表している。横軸は光検出手段 1 0 4 で検出される検出信号 I 、縦軸は確率 P である（検出信号が連続値の場合には縦軸は確率密度を表す）。確率分布がインパルス関数の場合には、検出信号には不確定さはないが、実際には検出信号は各種ノイズ等の影響により不確定さを持つ。特に検出する光が微弱な場合には量子ノイズによる揺らぎの影響が支配的となる。

【 0 0 3 1 】

欠陥がある場合の確率分布 2 1 1 : $P_1(I)$ と欠陥がない場合の確率分布 2 1 2 : $P_0(I)$ は、重なり 2 2 1 を持っている。距離 2 3 1 は、それぞれの確率分布の平均の差を表している。検査を行うと、この確率分布にしたがって検出信号 I の値が決まる。欠陥ありの場合と欠陥なしの場合の事前確率が等しい場合、平均誤り率が最も少ない欠陥識別を行うためには、得られた検出信号 x に対して、 $P_1(x) > P_0(x)$ ならば欠陥あり、 $P_1(x) < P_0(x)$ ならば欠陥なしと判定すれば良い。一般には、事前確率は等しくはなく、また平均誤り率ではない別の評価基準で欠陥識別を行いたい場合も多い（例えば、虚報率を一定値以下に抑えた上でできるだけ欠陥を検出したい等）。しかし、いずれの場合にも、それぞれの確率分布の重なり 2 2 1 の面積はできるだけ小さいほうが望ましい。

【 0 0 3 2 】

図 2 B のグラフ 2 0 2 は、図 2 A のグラフ 2 0 1 と比較してそれぞれの確率分布 2 1 3、2 1 4 の平均の差 2 3 2 を大きくすることにより、確率分布の重なり 2 2 2 の面積を小さくしている。また、図 2 C のグラフ 2 0 3 は、それぞれの確率分布の平均の差 2 3 3 は差 2 3 1 と同じであるが、確率分布の形状を変えることにより、確率分布の重なり 2 2 3 の面積を小さくしている。グラフ 2 0 3 の例では、欠陥がある場合の確率分布 2 1 5 は確率分布 2 1 1 と同じだが、欠陥がない場合の確率分布 2 1 6 の形状を確率分布 2 1 2 と比べて変化させている。さらに、欠陥がある場合の確率分布の形状を変えることもできる。

【 0 0 3 3 】

[図 2 効果] 光変換手段 1 0 6 で検出前の光を適切に変換することにより、このように、確率分布の平均の差を大きくするか、確率分布の形状を変える、またはその両方の効果を得ることが可能である。これにより、それぞれの確率分布の重なりを小さくすることができ、欠陥識別を高精度に行えるようになる。

【 0 0 3 4 】

[図 2 補足] なお、図 2 A 乃至図 2 C では検出信号はスカラー値としたが、複数の検出器を用いて検出信号をベクトル値で表すこともできる。例えば、一般に広く用いられている

10

20

30

40

50

ヘテロダイン受信方式では、検出信号は２個のスカラー値からなるベクトル値で表される。以下、特に断りのない限り、検出信号はスカラー値であるとして説明する。

【００３５】

[図３説明]図３は、光を試料に照射することにより試料表面に存在する微小な欠陥を検査する光検査装置の構成を示す図である。図３に示した構成は、図１で説明した光変換手段１０６に替えて光変換手段３０６を設け、欠陥検出の要求感度、要求スループット、検出対象とする欠陥の種類の少なくとも一つに応じて、前記参照光の位相を変更して調整できるように構成したことを特徴とする。

【００３６】

図１と同一の手段については、図１と同じ番号で示してある。以下、同一の手段やデータ等を表す場合には、同一の番号を振って示すものとする。図３に示した構成では、光変換手段３０６に欠陥検出感度の要求値を表す要求感度または要求スループットまたは検出対象とする欠陥の種類を表す要求値３１１を入力している。光変換手段３０６は、参照光光源手段１１３から発射された参照光の位相を制御するための位相制御器３０１および参照光の位相をシフトするための位相シフタ３０２を備えている。図７～図１０で後述するように、要求感度、要求スループット、欠陥種類毎に、光干渉手段１０３にて干渉させる参照光の最適な位相は異なるため、光変換手段３０６において、これらの情報に基づいて参照光の位相を変更する。

【００３７】

参照光光源手段１１３から発射された[図３効果]参照光の位相を変えることは、図２において、欠陥ありの場合と欠陥なしの場合の確率分布の平均の差を変える効果がある。これにより、それぞれの確率分布の平均の差をできるだけ大きくした上での検出が可能となり、量子ノイズの影響を抑制することが可能となる。

【００３８】

[図３補足]なお、図３に示した構成では、参照光光源手段１１３から発射された参照光の位相を光変換手段３０６で変更して調整する構成について説明したが、光照射手段１０２により光が照射された試料１１１からの反射光の位相を変えるように、例えば光変換手段３０６を光照射手段１０２と試料１１１との間に配置して、光照射手段１０２から試料１１１に照射する光の位相を変更して調整できるような構成であっても良い。また、光変換手段３０６を光干渉手段１０３と光検出手段１０４との間に設置して、干渉後の光の位相を変更して調整できるように構成しても良い。

【００３９】

[図４説明]図４は、欠陥サイズと検出率の関係の概略を示したグラフである。横軸が欠陥サイズ、縦軸が検出率を表す。一般に、（同様の形状・材質であれば）欠陥サイズが大きいほど、欠陥からの光の光量は大きくなるため、高い検出率を得ることができる。グラフ４１１、４１２は、それぞれ欠陥サイズがＡ、Ｂの場合にできるだけ高い検出率を得るために参照光の位相を調整した場合の性能を表す。欠陥サイズがＡ、Ｂの場合に、それぞれ点４０１、４０２で示した検出率が得られる。しかし、参照光の位相を調整しない限りそれらの性能を両立させることはできない。一方、要求する欠陥サイズ（すなわち、要求感度）は、用途により異なる。例えば、サイズＡより大きい欠陥を検出できるような高感度な検出を行う必要がある場合もあるし、サイズＢより大きい欠陥が検出できれば良い場合もある。

【００４０】

[図４効果]そこで、要求感度に応じて図１や図３に示した構成で光の状態を変換することにより、それぞれの要求に適した性能を得ることができる。検出器（光検出手段１０４）に到達する光の量を増やすことにより欠陥の検出率を上げることができるが、光量を増やすためには通常スループットが犠牲になる。これに対して本実施例の用に光の状態を調整することにより、感度とスループットまたは検出率の両立を実現することができる。要求スループットや検出対象とする欠陥の種類に対してもトレードオフの関係があるが、同様に光の状態を適切に変更することにより良好な性能を得ることができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 1 】

[図 5 説明]図 5 A ~ 図 5 C は、図 1 における光干渉手段 1 0 3 および光検出手段 1 0 4 の変形例を示す図である。以下、光照射手段 1 0 2 で光が照射された試料 1 1 1 からの反射光を対象光と呼ぶ。また、参照光光源手段 1 1 3 から発射された光を参照光と呼ぶ。

【 0 0 4 2 】

図 5 A は、ホモダイン検出と呼ばれる検出方法を実現するための構成を示す図である。対象光 5 1 1 のうちビームスプリッタ 5 0 1 (図 1 又は図 3 のビームスプリッタ 1 1 2 に相当) を透過した光と参照光 5 1 3 のうちビームスプリッタ 5 0 1 を透過した光とは干渉し、干渉後の光を検出器 5 0 2 (図 1 又は図 3 の光検出手段 1 0 4 に相当) により検出して検出信号 5 1 2 を出力する。ビームスプリッタ 5 0 1 は、光の偏光状態によって反射率が変わる偏光ビームスプリッタであっても良い。

10

【 0 0 4 3 】

図 5 B は、バランス型ホモダイン検出と呼ばれる検出方法を実現するための構成を示す図である。対象光 5 3 1 と参照光 5 3 3 をビームスプリッタ 5 2 1 (透過率 5 0 % のハーフビームスプリッタ) を用いて干渉させる。干渉後の光 5 3 4 、 5 3 5 をそれぞれ検出器 5 2 2 、 5 2 3 で検出し、演算器 5 2 4 で、検出された各々の信号の差を求める。演算器 5 2 4 の出力を検出信号 5 3 2 とする。

【 0 0 4 4 】

図 5 C は、ヘテロダイン検出と呼ばれる検出方法を実現するための構成を示す図である。対象光 5 5 1 と参照光 5 5 4 をビームスプリッタ 5 4 1 を用いて干渉させ、干渉後の光 5 5 5 、 5 5 6 に対して、それぞれホモダイン検出 5 4 2 、 5 4 3 を行うことによって、二種類の検出信号 5 5 2 、 5 5 3 を得る。ホモダイン検出 5 4 2 、 5 4 3 はそれぞれ、図 5 A で説明した構成を用いる。

20

【 0 0 4 5 】

図 5 A ~ 図 5 C で説明した検出方法では、参照光の量子的揺らぎが抑制されて対象光の振幅や位相に関する情報が検出信号に現れるため、検出信号を用いて欠陥検出を行うことができる。

【 0 0 4 6 】

[図 6 説明]図 6 は、図 5 A ~ 図 5 C で説明した光干渉手段および光検出手段に対して、さらに光変換手段を加えた構成の例を示す図である。この図 6 に示した構成は、図 5 B で説明したバランス型ホモダイン検出系に図 3 で説明した光変換手段 3 0 6 を組合わせた構成となっており、要求感度に応じて参照光の位相を変更することができる。

30

【 0 0 4 7 】

対象光 6 1 1 の平均振幅が時間 t の関数として $A \sin(wt + k)$ と表せるとする ($A > 0$ は最大振幅、 w は角周波数)。欠陥がない場合には $k = 0$ 、欠陥がある場合には $k =$ と、欠陥の有無によって対象光の位相 k が変わるものとする。ただし、対象光の振幅は、量子ノイズ等による揺らぎを含む。そこで、検出信号から位相 k を推定し、欠陥の有無を識別したい。参照光の平均振幅を $B \sin(wt)$ と表せるとする ($B > 0$)。要求感度 6 1 3 が入力された位相制御器 6 0 5 により制御された位相シフタ 6 0 6 により、参照光 6 1 2 は光 6 1 4 のように $B \sin(wt + \quad)$ に変換されるとする。対象光 6 1 1 と位相シフタ 6 0 6 で位相制御された参照光 6 1 4 とはハーフビームスプリッタ 6 0 1 でそれぞれ光量の半分が反射し半分が透過してそれぞれ干渉光を発生し、これらの干渉光がそれぞれ検出器 6 0 2 と 6 0 3 で検出される。検出器 6 0 2 と 6 0 3 からの出力は演算器 6 0 4 に入力して演算され、検出信号 6 1 5 として出力される。この場合、バランス型ホモダイン検出を行うと、検出信号 I の平均値 $\langle I \rangle$ は $AB \cos(\quad)$ に比例する。は既知であるため、 AB の積を予め測定しておけば対象光の位相 k を推定することができる。

40

【 0 0 4 8 】

[図 8 説明]次に図 8 を用いて、図 6 の例において量子ノイズの影響を抑えるために参照光の位相 を適切な値に設定する必要があることを示す。量子ノイズが支配的であるよう

50

な微弱光の場合を考える。グラフ 8 0 1 は、図 6 における参照光 6 1 2 の位相シフト量と検出信号の平均値 $\langle I \rangle = I_0 \cos(\theta)$ との関係を示した図である。グラフ 8 1 1、8 1 2 は、それぞれ、欠陥がある場合 ($k = \pi$) と欠陥がない場合 ($k = 0$) のグラフである。この例では、 $0 < \theta < \pi/2$ である。

【0049】

グラフ 8 0 2 に、 $\theta = 0$ と設定したときの、 $k = 0$ 、 π の場合における検出信号 I の確率分布を示す。検出信号の平均値 $\langle I \rangle$ は $k = 0$ 、 π それぞれにおいて I_0 、 $I_0 \cos(\theta)$ となり、その差は $I_0(1 - \cos(\theta))$ となる。量子ノイズが重畳するため、検出信号 I の確率分布はある幅を持つ。検出信号 I の分散は、コヒーレント光の場合には I_0 に比例して、 θ や k には依らない。グラフ 8 0 2 の場合、斜線のハッチで示した領域 8 2 1 が、欠陥がある場合とない場合のそれぞれに対応する確率分布の重なりを表している。

10

【0050】

グラフ 8 0 3 は、 $\theta = (\pi/2 + \phi)/2$ と設定したときの、検出信号 I の確率分布である。検出信号の平均値 $\langle I \rangle$ は $k = 0$ 、 π それぞれにおいて $I_0 \cos((\pi/2 + \phi)/2)$ 、 $I_0 \cos((\pi/2 - \phi)/2)$ となり、その差は $I_0 \sin(\phi)$ と設定した場合と比べると大きくなる。測定値の分散は I_0 の場合と同じであるため、欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なり 8 2 2 は、 I_0 の場合と比べて小さくなる。

【0051】

[図 8 効果] このように、 θ によって欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なり 20 の大きさを変更できることがわかる。欠陥がある場合と欠陥がない場合に推定される光の状態を用いて、 θ を適切な値に設定することが可能となる。なお、この例では光はコヒーレント光としたが、スクイズド光や他の状態の光でも同様の議論が成り立つ。

20

【0052】

[図 7 説明] 図 7 A は、欠陥の形状や種類の例である。(a) は、欠陥がない位置における試料 7 1 5 の例である。7 0 1 の矢印は、試料への照射光を表し、7 0 2 の矢印は試料から反射した対象光を表している。(b) は、欠陥 7 1 1 を含んだ試料の例である。照射光 7 0 1 が欠陥 7 1 1 に当たり、欠陥 7 1 1 からの散乱光を含む反射光である対象光 7 0 2 が発生している。(a) の場合と比べると欠陥の高さの分だけ光路長が異なるため、対象光 7 0 2 の位相が (a) の場合とは異なる。(c) は欠陥 7 1 1 と同じ高さで断面形状が異なる欠陥 7 1 2 を含んだ試料の例である。(b) の欠陥 7 1 1 と (c) の欠陥 7 1 2 30 とは高さが同じであるため光路長は同じであるが、試料の種類や形状が異なると、試料と光の相互作用の仕方が変化するために、一般に対象光の振幅や位相は変化する。(d) は、欠陥がない位置における (a) の例とは異なる試料の例である。この例では、試料 7 1 5 には凹凸パターン 7 1 3 が形成されているが欠陥がない状態を示している。(e) は、試料 7 1 5 には凹凸パターン 7 1 3 が形成されているがその一部の欠陥 7 1 4 を含んだ場合の例である。凹凸パターン 7 1 3 の一部が欠けており、これも欠陥の一種である。(d) に示した欠陥がない試料 7 1 5 と比べると光路長や試料と光の相互作用が異なるため、この場合でも対象光 7 0 2 の振幅や位相に影響を与える。(f) は、欠陥がない位置における試料 7 1 7 の例である。この例では、試料 7 1 7 からの透過光 7 1 8 を対象光として (g) は、欠陥 7 1 9 を含んだ試料 7 1 7 の例である。欠陥 7 1 9 により、透過光 7 1 8 ' の状態が変化する。検査したい試料や欠陥の種類等によって、試料からの透過光を対象光とするか、参照光または反射光を対象光とするかは異なるが、何れの場合でも欠陥がある場合とない場合では対象光の状態は変化するため、その変化を検出することができれば欠陥の有無を識別することができる。

30

40

【0053】

図 7 B、図 7 C は、対象光の状態を表す位相空間表現の例である。原点からの距離が対象光の振幅、 x_c 軸との角度が対象光の位相を表す。ノイズが全く重畳しておらず振幅や位相が決まった値しかとらないならば、光の状態は位相空間表現において 1 点で表されるが、実際には量子ノイズが必ず重畳するために振幅・位相に関して不確定さをもつ。このような不確定さを持った光の状態は、 (x_c, x_s) 座標で表された 2 次元空間に対する

50

確率密度分布で表現される。ここでは、ある一定以上の確率となる領域を円や楕円で示している。

【 0 0 5 4 】

図 7 B において、領域 7 2 1 は、欠陥がない場合（例えば図 7 A (a) の場合）の対象光 7 0 2 の状態である。領域 7 2 2 は、欠陥がある場合（例えば図 7 A (b) の場合）の状態である。領域 7 2 1 と比べると対象光 7 0 2 の平均振幅（原点 O から各領域の中心までの距離）は同じであるが、平均位相（原点 O と各領域の中心を結ぶ線と x_c 軸との成す角）が異なっている。領域 7 2 3 は、領域 7 2 2 とは別の欠陥がある場合（例えば図 7 A (c) の場合）の状態である。領域 7 2 2 と比べると対象光 7 0 2 の平均振幅も異なっている。図 7 C は、図 7 B とは異なる状態の光を試料に照射した場合の例である。この例のように、対象光 7 0 2 の状態は x_c 軸と x_s 軸で等方的な揺らぎを持っているとは限らない。照射光 7 0 1 としてコヒーレント状態の光を用いた場合に試料 7 1 5 で反射した対象光 7 0 2 は図 7 B のように x_c 軸と x_s 軸で等方的な揺らぎを持つことが多いが、照射光 7 0 1 としてスクイズド状態の光を用いた場合には、対象光 7 0 2 は例えば領域 7 3 1 のように x_c 軸の揺らぎを大きくする代わりに、 x_s 軸の揺らぎを抑えることができる。同様に、欠陥がある場合には、領域 7 3 2 , 7 3 3 のような特性を持つ揺らぎにすることができる。照射光 7 0 1 としてコヒーレント状態以外の光を用いることにより、対象光 7 0 2 において欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なりを抑えることができ、欠陥識別をより高精度に行うこともできる。

【 0 0 5 5 】

[図 9 説明] 図 9 A 乃至図 9 C は、図 7 B、図 7 C で説明した位相空間表現に基づいて、図 6 の構成における参照光 6 1 4 の位相シフト量の適切な値を求める方法を示した図である。図 9 A のグラフ 9 0 1 は、図 7 B で説明した位相空間表現である。検出信号の確率分布は、 x_c 、 x_s 軸で張られる 2 次元空間で示された確率分布を、ある直線上に射影することで求められる。例として、 x_s 軸と平行な直線に射影した場合の確率分布をグラフ 9 0 3 に示す。確率分布 9 1 7、9 1 8 が、それぞれ領域 9 1 3、9 1 4 の射影に対応している。このとき、位相シフト量は、 x_c 軸との角度で表される。確率分布の重なり 9 1 6 をできるだけ小さくするためには、直線 9 1 1 のように x_c 軸と角度 θ_B をなす直線上に射影すれば良いことがわかる。欠陥がある場合とない場合の対象光の平均振幅が等しい場合には、 $\theta_B = (\theta_1 + \theta_2) / 2$ となり、図 8 で説明した θ_B の最適値と一致する。

【 0 0 5 6 】

別の欠陥として、欠陥がある場合の状態が図 9 A の領域 9 1 5 で表される場合を考える。この場合、領域 9 1 3 と領域 9 1 5 を直線上に射影して得られる確率分布の重なりをできるだけ小さくするためには、直線 9 1 2 のような直線を選べばよいことがわかる。なお、この例では、領域 9 1 5 と領域 9 1 4 を表す対象光の平均位相は同じだが、平均振幅は異なる。このとき、直線 9 1 2 の x_c 軸との角度 θ_C は θ_B とは異なっている。このように、最適な位相シフト量は、対象光の平均位相のみでなく平均振幅によっても異なることがわかる。

【 0 0 5 7 】

図 9 B のグラフ 9 0 2 は、図 9 A のグラフ 9 0 1 とは異なる例である。欠陥がない場合の対象光の状態を点線の領域 9 2 2、欠陥がある場合の対象光の状態を実線の領域 9 2 3 で示している。検出される欠陥のサイズ、形状、種類等が予め分かっていない場合には、欠陥がある場合の振幅・位相の確率分布は複雑な形状になる（グラフ 9 0 2 では複数の円で表現している）。この場合にも、参照光の位相シフト量を適切に設定したい。設定方法の一つとして、領域 9 2 4 で示したような、想定される欠陥の中で最も検出が困難な欠陥がある場合を表す対象光の状態と、領域 9 2 2 で示した状態ができるだけ分離するような直線 9 2 1 を求め、その直線と x_c 軸とのなす角 θ を算出すれば良い。領域 9 2 4 以外の領域で示された欠陥は領域 9 2 4 で示された欠陥よりは検出率が高いため、総合的に高い検出率を達成することが可能である。

【 0 0 5 8 】

また、別の設定方法として、領域 9 2 3 で示した欠陥がある場合の状態を様々な位相シフト量に対する直線上に射影したときの確率分布を精度良く求め、領域 9 2 2 で示した状態に対応する確率分布との重なりが小さくなる参照光の位相シフト量を算出しても良い。位相シフト量は、試料を光に照射する前に予め算出しておく量であるため、通常は高速に算出する必要はなく、ある程度時間をかけて算出することができる。参照光の位相シフト量を算出するときには、検出され得る欠陥の検出頻度や、その欠陥の検出の重要度等を考慮しても良い。

【 0 0 5 9 】

図 9 C のグラフ 9 0 4 は、図 9 A のグラフ 9 0 1、図 9 B のグラフ 9 0 2 とは別の例である。欠陥がない場合の対象光の状態を点線の領域 9 3 1、欠陥がある場合の対象光のうち、欠陥の種類が欠陥 A の場合の対象光の状態を破線の領域 9 3 2、欠陥の種類が欠陥 B の場合の対象光の状態を実線の領域 9 3 3 で示している。実線で示した直線 9 3 5 に射影したときに、平均誤り率の規準において欠陥の有無を最も高精度に識別できるとする。欠陥の有無のみではなく、欠陥の種類も高精度に識別したい場合には、図 9 B のグラフ 9 0 5 のように、欠陥がない場合の確率分布 9 4 1 と、欠陥の種類別の確率分布（欠陥 A、B の確率分布を 9 4 2、9 4 3 で示す）を求め、その重なりを調べる必要がある。これらの確率分布の重なり 9 4 4 が小さくなるように参照光の位相シフト量を求めればよい。例えば、図 9 C のグラフ 9 0 4 に破線で示した直線 9 3 4 に射影したときに、平均誤り率の規準において欠陥の有無および各欠陥の種類を最も高精度に識別できる。この直線 9 3 4 は、一般に欠陥の種類の識別を考慮せずに最適化を行った直線 9 3 5 とは異なる位相シフト量を持つ。このように、欠陥の種類毎の確率分布を求め、その重なりが小さくなるように光の状態を変換することにより、欠陥の有無および欠陥の種類を高精度に識別することができる。

【 0 0 6 0 】

対象光の振幅や位相の分布を表すためには、状態を量子状態として表現する必要がある。この例のような位相空間表現に対応する量子状態の表現として、Wigner 関数や Glauber の P 関数のような複素平面 z 上で定義される c 数関数 $F(z, z^*)$ がある（ $*$ は複素共役）。量子状態の別の表現としては、波動関数（の集合）や、複素ヒルベルト空間上の半正定値作用素などがある。対象光の状態を量子状態として表現することにより、振幅や位相の揺らぎを求めることができ、欠陥がある場合とない場合の確率分布や、その重なりを計算することができる。

【 0 0 6 1 】

識別したい状態を量子状態としてモデル化することにより、適切な光の変換方法を計算することができる。例えば、量子ノイズの影響を考慮して参照光の位相を適切に最適化することができる。この際、欠陥がある場合における量子状態を計算することにより、欠陥がある場合に正しく検出する確率（検出正解率）を制御することができるし、欠陥がない場合における量子状態を計算することにより、欠陥がない場合に誤って欠陥があると識別してしまう確率（虚報率）を制御することができる。欠陥がある場合とない場合両方の場合における量子状態を計算すれば、検出正解率と虚報率を制御することができる、高い適切な検出を行うことができる。

【 0 0 6 2 】

[図 1 0 説明] 図 1 0 は、光の位相シフト量を変更する位相シフタ（図 3 の 3 0 2 及び図 6 の 6 0 6 に対応）の構成の例を示す図である。まず、入力光 1 0 1 1 である参照光 1 1 3（図 3）または 6 1 2（図 6）が $1/4$ 波長板 1 0 0 1 に入射した後、そこから透過した光が $1/2$ 波長板 1 0 0 2、 $1/4$ 波長板 1 0 0 3 に順次入射する。 $1/4$ 波長板 1 0 0 3 から透過される光が位相シフタの出力光 1 0 1 2 となる。3 枚の波長板 1 0 0 1 ~ 1 0 0 3 は、異方性のある材質で作られている。また、各波長板は円筒形の形状をしており、光はその中心軸を通る。入力光は偏光しているものとする。この構成において、 $1/2$ 波長板を回転させると、入力光の偏光方向との角度に応じて入力光の位相がシフトする。そこで、 $1/2$ 波長板を回転させるための回転器 1 0 0 4 を備え、この回転器を要求感度

10

20

30

40

50

等の要求値 1 0 1 3 に応じて位相制御器 1 0 0 5 により制御することで、要求感度等に応じて光の位相を変更することができる。

【 0 0 6 3 】

[図 1 0 補足] 光の位相シフト量を変更する位相シフタは、図 1 0 で示した実施例とは別の構成であっても良い。例えば、液晶変調器を用いる方法や、MEMS 変調器を用いる方法、可変遅延光路を用いる方法を用いても良い。

【実施例 2】

【 0 0 6 4 】

図 1 に示した構成において、光変換手段 1 0 6 として、非線形変換を行う手段を用いた例を図 1 1 A 乃至図 1 6 を用いて説明する。

10

【 0 0 6 5 】

[図 1 1 説明] 図 1 1 A ~ D は、図 1 に示した光変換手段 1 0 6 を、対象光、または参照光、または対象光と参照光を干渉させた後の光に対して、フォトニック結晶を用いた非線形変換を行うことにより光の状態を変換する光変換手段に置き換えた例を示す図である。非線形変換とは、出力光を表す電磁場が、入力光を表す電磁場に比例しないような変換である。フォトニック結晶とは、屈折率の異なる材料が周期的に並んだ構造体であり、従来の光学素子にはない性質が得られることで知られている。特に、強い非線形性を有する素子を製作することができ、この性質を利用することで量子ノイズの影響を抑制した欠陥検出が可能となる。

【 0 0 6 6 】

20

図 1 1 A は、対象光 1 1 1 1 と参照光 1 1 1 2 を光干渉手段 1 1 0 1 で干渉させた後の光に対して、非線形変換器 1 1 0 2 を用いて非線形変換を行い、この非線形変換された干渉光を検出器 1 1 0 3 で検出して検出信号 1 1 1 3 を出力する例であり、図 5 A で説明したホモダイン検出に対応する構成である。

【 0 0 6 7 】

図 1 1 B は、図 5 B で説明したバランス型ホモダイン検出に対応する構成であり、対象光 1 1 1 1 と参照光 1 1 1 2 を光干渉手段 1 1 2 1 で干渉させた後の光 1 1 3 2、1 1 3 3 に対して、それぞれ非線形変換器 1 1 2 2、1 1 2 3 を用いて非線形変換を行ってそれぞれの干渉光を検出器 1 1 2 4 と 1 1 2 5 とで検出し、それぞれの検出器 1 1 2 4 と 1 1 2 5 とからの出力信号の差を演算器 1 1 2 6 で算出し、その結果を検出信号 1 1 3 1 として出力する構成の例を示す図である。

30

【 0 0 6 8 】

図 1 1 C も図 5 B で説明したバランス型ホモダイン検出に対応する構成であり、図 1 1 B の構成に対して、さらに対象光 1 1 1 1 と参照光 1 1 1 2 に対しても非線形変換を行う例である。非線形変換器 1 1 4 4 に入力する光と出力する光の本数は必ずしも 1 本ずつ（すなわち 1 入力 1 出力）である必要はなく、図 1 1 C に示した例では、非線形変換器 1 1 4 4 に対象光 1 1 1 1 と参照光 1 1 1 2 の 2 本の光を入力し、2 本の光を出力して、この出力された 2 本の光線を光干渉手段 1 1 4 1 で干渉させる。光干渉手段 1 1 4 1 以降の処理は、図 1 1 B で説明したものと同一であるので省略する。

【 0 0 6 9 】

40

図 1 1 D も図 5 B で説明したバランス型ホモダイン検出に対応する構成であり、参照光 1 1 1 2 に対して非線形変換器 1 1 6 2 で非線形変換を行う例である。光干渉手段 1 1 6 1 以降の処理は、図 5 B で説明したものと同一であるので省略する。

【 0 0 7 0 】

[図 1 1 効果] 欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なりが小さくなるように光の状態を変換するためには、非線形変換が必要であることが知られている。従来の光学媒質では強い非線形光学効果を得ることは困難であったが、近年研究開発が盛んに行われているフォトニック結晶により、強い非線形光学効果を得ることができる。フォトニック結晶を光検査装置に適用して、検出器の前に設置することにより、欠陥の有無のそれぞれに対応する確率分布の重なりが小さくなるように光の状態を変換し、量子ノイズの影響を抑

50

えることができる。

【0071】

微小な欠陥を検出するためには、対象光に含まれている欠陥からの微弱な信号を検出する必要がある。しかし、光変換手段により光の状態を変換する際、光学媒質の材質の不均一性や光軸調整の精度不足などの要因のため、光に対して少なからず意図しない擾乱を与えてしまう。本発明では、欠陥からの微弱な信号を含む対象光に対しては光変換手段により光の状態を変換することはせず、参照光に対してのみ光変換手段により光の状態を変換することにより、擾乱による性能低下を防ぐことができる。

【0072】

[図11補足]なお、図11ではホモダイン検出を行う場合に、対象光、または参照光、または対象光と参照光を干渉させた後の光に対して非線形変換を行う構成について説明したが、ヘテロダイン検出や他の検出を行う場合にも同様の非線形変換を行うことができる。

【0073】

[図12説明]図12A、図12Bは、フォトニック結晶の構造の例を示す図である。図12Aのフォトニック結晶1201では、屈折率が異なる領域が周期的に配置された構造体の中に、周期を乱す構造1204を意図的に導入することにより、導波路や光の閉じ込めなどの機能を実現することができる。1205は空洞になっており、光は1211から入力してこの1205の内部を伝搬して1212から出力する。図12Aの例では、面1202上に空孔1203を2次元的に周期的に配列して、その中に周期を乱す線状の領域1204（空孔1203が存在しない帯状の領域）を導入している。領域1204が光の導波路として機能する。また、図12Bのフォトニック結晶1221の例では、同様に周期的に配置した空孔1222に対して、周期を乱す線状の領域1223、1224を導入している。これらの線状の領域が光の導波路として機能する。これらの線状の領域を途中で近接させることにより、線状の領域1223、1224から成る二つの導波路の間に近接場光等による相互作用を発生させることができる。この例では、2本の入力光1231、1232を途中で相互作用させ、2本の光1233、1234を出力する。導波路（線状の領域）1223、1224の間にある空孔1225を他の空孔とは異なる媒質とすることにより、非線形光学効果を高めても良い。

【0074】

[図12効果]フォトニック結晶の屈折率、周期、周期を乱す構造を制御することにより、光の群速度を大きく低下させるなど、従来の素子にはない分散関係を得ることができる。この結果、光カー効果などの3次以上の非線形光学特性が強く現れる素子を実現することが可能である。このような強い非線形光学特性を持つ素子を用いて光を変換することにより、欠陥がある場合とない場合の確率分布の重なりを小さくすることができる。

【0075】

[図12補足]なお、図12A及び図12Bでは、空孔が周期的に並んだ構造に対して周期を乱す線状の構造（領域）を導入するフォトニック結晶の例を示したが、非線形光学特性を示すフォトニック結晶であればこの構造でなくとも良い。

【0076】

[図13説明]図13Aは、フォトニック結晶を用いた非線形変換器の構成の一実施例図である。非線形変換器1301は、フォトニック結晶1302のみから構成される単純な例であり、入力光1311が非線形変換器1301を構成するフォトニック結晶1302に入力し、非線形変換された出力光1312が得られる。フォトニック結晶を含むより複雑な非線形変換器を考えることもでき、例えば図13Bに示した非線形変換器1321では、内部に2種類のフォトニック結晶1326、1327を含む。また、ビームスプリッタ1322、1324や、ミラー1323、1325も備えており、入力光1331をビームスプリッタ1322で2本の光に分割した後、片方の光に対してフォトニック結晶1326により非線形変換を行った後、ミラー1323と1325で形成された光路を通ったもう片方の光とビームスプリッタ1324で干渉させる。干渉後の光に対して、別のフ

フォトニック結晶 1 3 2 7 により非線形変換を行う。非線形変換器は、フォトニック結晶を含んでいればこれ以外の構成であっても良い。

【 0 0 7 7 】

[図 1 4 説明]図 1 4 は、要求感度等に応じて、非線形変換方法を変更する光変換手段の一実施例である。この例では、光変換手段 1 4 0 1 は、参照光の位相を変更する位相シフタ 1 4 0 6 と、複数種類のフォトニック結晶からなる素子 1 4 0 3 とその素子を駆動する駆動部 1 4 0 4 を備え、位相シフタ 1 4 0 6 と駆動部 1 4 0 4 を制御手段 1 4 0 5 により制御する。図 1 4 は、素子 1 4 0 3 と駆動部 1 4 0 4 を横から見た図であるが、上から見た図を図 1 5 に示す。素子 1 4 0 3 は、4 種類のフォトニック結晶 1 5 0 2 ~ 1 5 0 5 からなっており、駆動部 1 4 0 4 により y 方向に駆動させることができる。これにより、入力光 1 5 0 6 (1 4 1 1) を、フォトニック結晶 1 5 0 2 ~ 1 5 0 5 のうちの一つに入力させ出力光 1 5 0 7 を得る。一方、要求感度や要求スループット、欠陥種類などの入力情報 1 4 1 2 に基づいて制御手段 1 4 0 5 で制御された位相シフタ 1 4 0 6 を透過して位相が制御された参照光 1 4 1 3 がビームスプリッタ 1 4 0 2 に入射し、素子 1 4 0 3 から出力された出力光 1 5 0 7 と干渉して干渉光 1 4 1 4 が出力される。これにより、光の非線形変換方法を要求感度等に応じて制御することができる。

10

【 0 0 7 8 】

[図 1 4 補足]なお、非線形変換方法を変える方法としては、図 1 4 のように異なる種類のフォトニック結晶を用いる方法の他に、フォトニック結晶の非線形光学特性を変化させる方法を用いても良い。例えば、熱や電場を与えてフォトニック結晶の屈折率を変化させる方法や、フォトニック結晶の空孔にロッドを挿入する方法、微小なアクチュエータを用いてフォトニック結晶を伸縮させる方法を用いても良い。

20

【 0 0 7 9 】

[図 1 6 説明]図 1 6 A 及び図 1 6 B は、図 1 1 A 乃至図 1 5 で説明した非線形変換手段を用いて非線形変換を行った場合の対象光の状態を表す位相空間表現の概略図である。図 1 6 A のグラフ 1 6 0 1 の領域 1 6 1 1、1 6 1 2 は、非線形変換を行わなかった際の、欠陥がない場合とある場合のそれぞれの対象光の状態である。ホモダイン検出を行うときは、直線 1 6 1 3 の軸に射影すると、それぞれの確率分布の重なりを小さくすることができる。しかし、非線形変換を行わない限り、図 9 で説明したように射影する方向を変える方法以外には、量子ノイズの影響を抑えることはできない。

30

【 0 0 8 0 】

これに対し、フォトニック結晶を用いて非線形変換を行えば、量子ノイズの影響を抑えることが可能となる。図 1 6 B のグラフ 1 6 0 2 の領域 1 6 1 4、1 6 1 5 は、非線形変換を行った際の、欠陥がない場合とある場合のそれぞれの対象光の状態である。確率分布の形状を変えることによって、それぞれの確率分布の重なりを小さくすることができる。この例の場合は、直線 1 6 1 6 の軸に射影することにより、非線形変換を行わない場合に比べてより高い検出率が得られる。この際、参照光の位相シフト量に基づいて非線形変換の方法を変えることにより、確率分布の重なりを小さくすることが可能である。

【実施例 3】

【 0 0 8 1 】

[図 1 7 説明]図 1 7 A、図 1 7 B は、実施例 1 又は 2 で説明した光干渉手段 1 0 3 と光変換手段 1 0 6 又は 3 0 6 試料に対して光を照射して、試料からの反射光を実施例 1 又は 2 で説明した光干渉手段 1 0 3 と光変換手段 1 0 6 又は 3 0 6 など受信する光検査装置の構成を示す図である。

40

【 0 0 8 2 】

図 1 7 A は、光源 1 7 0 1 からテーブル 1 7 2 1 上に載置された試料 1 7 0 5 に対して上方から垂直に光を照射する落射照明により欠陥を検出する検査装置の構成を示す。光源 1 7 0 1 から発射された光 1 7 0 6 は、レンズ 1 7 0 3 により試料 1 7 0 5 上で集光されて試料 1 7 0 5 を落射照明する。試料 1 7 0 5 で反射された光のうちレンズ 1 7 0 4 の方向に反射された光 1 7 0 7 はレンズ 1 7 0 4 により集光され、受信器 1 7 0 2 に入力され

50

る。受信器 1702 は、実施例 1 又は実施例 2 で説明したような光干渉手段 (103)、光変換手段 (106 又は 306 又は 1401 など)、光検出手段 (104 など) を備えている。受信器 1702 は複数個備わっていても良く、例えば、レンズ 1709 と受信器 1708 のように、光 1707 とは異なる方位への散乱光または反射光を受信するような配置であっても良い。受信器 1702、1708 での検出信号を用いて欠陥識別手段 1710 により欠陥の有無や欠陥の種類の識別を行う。試料 1705 はステージ 1721 の上に設置されており、ステージ 1721 を x y 方向に動かすことにより、試料上の光照射位置を制御することができる。

【0083】

図 17B は、試料 1716 に対して垂直方向ではなく斜め方向から光源 1711 から発射された光 1719 をレンズ 1712 で集光し斜方照射して、試料 1716 からレンズ 1715 の方向に反射した散乱光または反射光 1717 を受信器 1713 で受信し、レンズ 1714 の方向へ反射した光を受信器 1718 で受信する。この構成により、試料 1716 に光を集光し、集光位置における欠陥の有無や欠陥の種類に関する情報を受信器 1713 及び 1718 で受信した光を用いて欠陥識別手段 1720 で識別することができる。

【0084】

[図 18 説明] 図 18A、及び図 18B には、試料に対して光を照射して、試料からの光を受信する、図 17 とは別の光検査装置の構成を示す一実施例の図である。図 18A に示した構成では、光源 1801 から発射した光を試料 1804 に照射する。光 1811 は近接場光発生器 1803 に入力され、その先端 1822 から近接場光を放出する。近接場光発生器 1803 は近接場光が試料 1804 に到達する程度にまで試料 1804 に近接させる。試料 1804 からの散乱光または反射光 1812 は、照射光 1811 と同じ光路 1806 を通り、ビームスプリッタ 1802 により反射して受信器 1805 に入力される。ビームスプリッタ 1802 は、光源 1801 からの照射光は透過し、試料からの光は反射するようにしておく。これは、例えば、光源 1801 からの光を偏光させておき、1/4 波長板 1807 を光路に配置し、かつビームスプリッタ 1802 を偏光ビームスプリッタとすることにより実現できる。受信器 1805 は、実施例 1 又は実施例 2 で説明したような光干渉手段 (103)、光変換手段 (106 又は 306 又は 1401 など)、光検出手段 (104 など) を備えている。受信器 1805 での検出信号を用いて欠陥識別手段 1808 により欠陥の有無や欠陥の種類の識別を行う。試料 1804 はステージ 1821 の上に設置されており、ステージ 1821 を x y 方向に動かすことにより、試料上の光照射位置を制御することができる。

【0085】

図 18B は、近接場光を試料に照射する、図 18A とは別の構成の例を示す図である。近接場ヘッド 1812 と近接場ヘッド支持部 1811 を備え、近接場ヘッド 1812 は、その先端から放出される近接場光がステージ 1822 に載置された試料 1814 に到達する程度にまで試料 1814 に近接させる。試料 1814 から散乱または反射した光 1816 をレンズ 1813 で集光して受信器 1815 に入力して受光し、受信器 1815 からの出力信号を欠陥識別手段 1817 で処理することにより欠陥の有無や欠陥の種類の識別を行う。図 17 の構成と比較し、図 18 の構成を用いることにより、試料上のより狭い領域に光を集光することができるため、微小な欠陥からの散乱光または反射光を強い強度で得ることができる。

【符号の説明】

【0086】

101 ... 光検査装置 102 ... 光照射手段 103 ... 光干渉手段 104 ... 光検出手段
105 ... 欠陥識別手段 106 ... 光変換手段 111 ... 試料 112 ... ビームスプリッタ
113 ... 参照光 201 ... 光変換手段を備えていない場合の確率分布
202 ... 光変換手段を備えた場合の確率分布 211 ... 欠陥がある場合の確率分布
212 ... 欠陥がない場合の確率分布 221 ... それぞれの確率分布の重なり
231 ... それぞれの確率分布の平均の差 301 ... 位相制御器 302 ... 位相シフタ

10

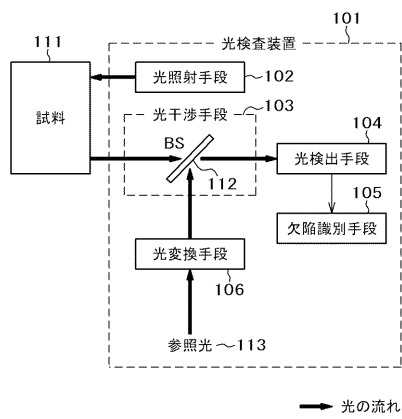
20

30

40

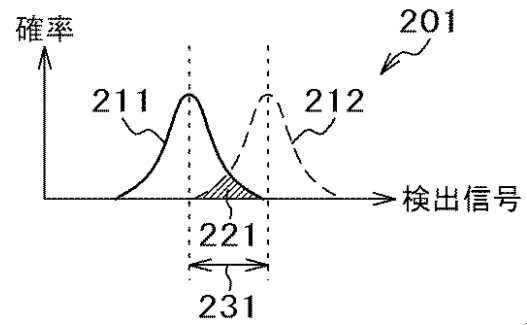
50

【図 1】



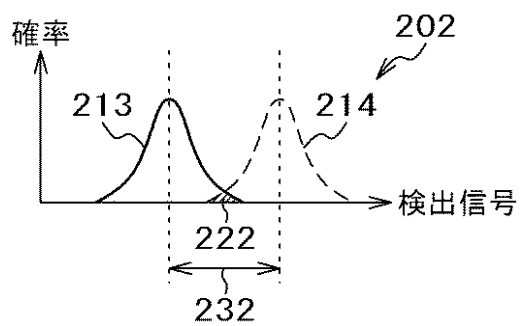
【図 2 A】

図 2 A



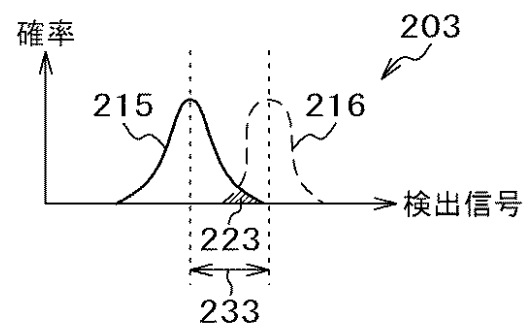
【図 2 B】

図 2 B



【図 2 C】

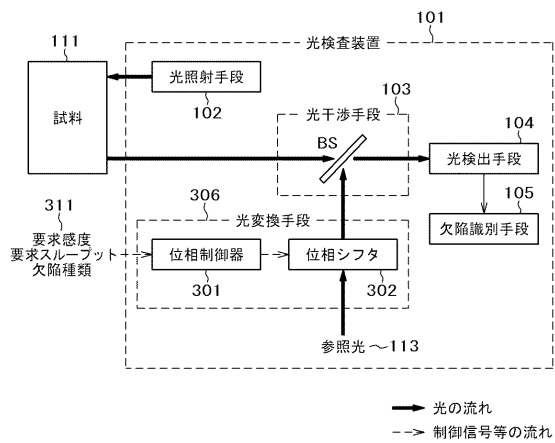
図 2 C



—— 欠陥あり
 --- 欠陥なし

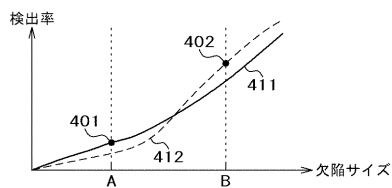
【図 3】

図 3



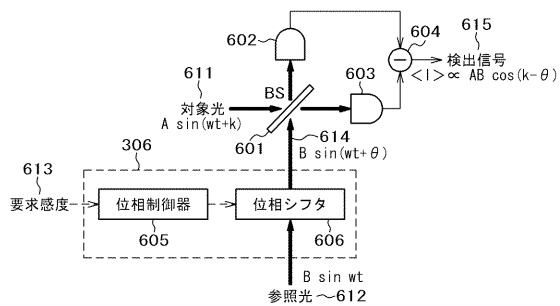
【図 4】

図 4



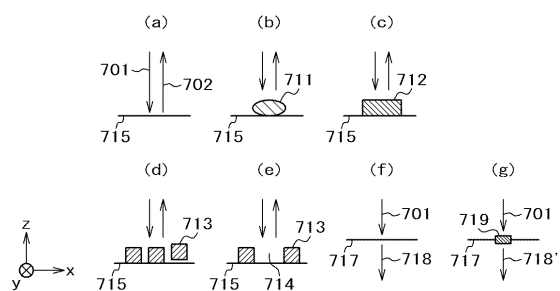
【図 6】

図 6



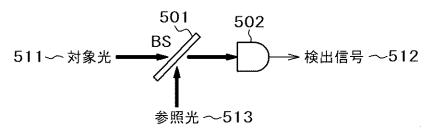
【図 7 A】

図 7 A



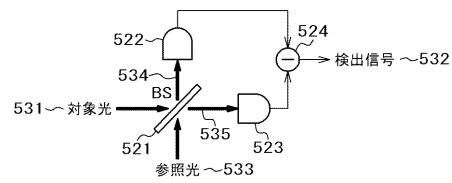
【図 5 A】

図 5 A



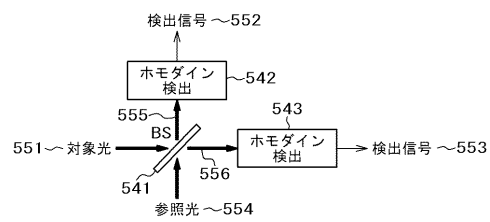
【図 5 B】

図 5 B



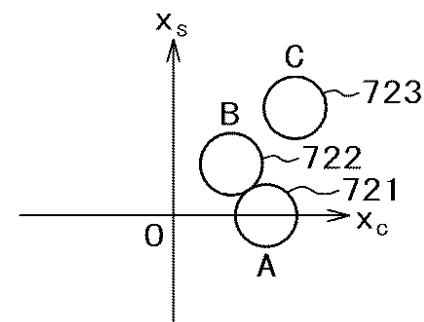
【図 5 C】

図 5 C



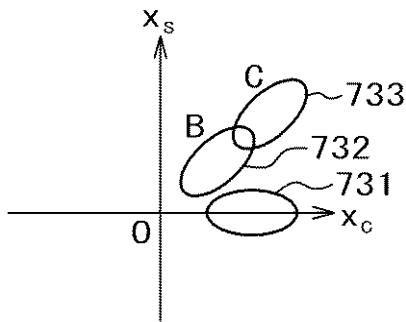
【図 7 B】

図 7 B



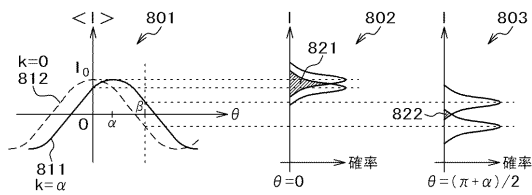
【図 7 C】

図 7 C



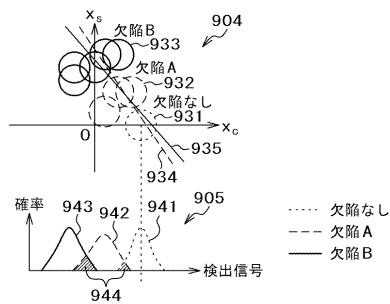
【図 8】

図 8



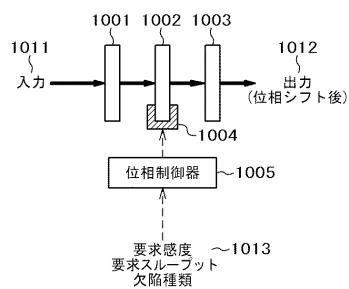
【図 9 C】

図 9 C



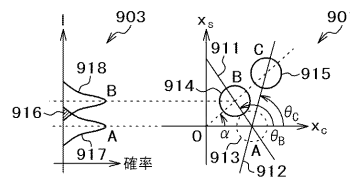
【図 10】

図 10



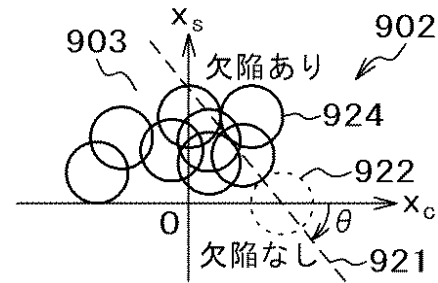
【図 9 A】

図 9 A



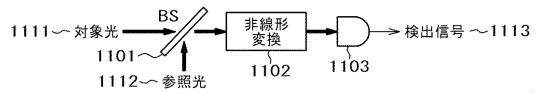
【図 9 B】

図 9 B



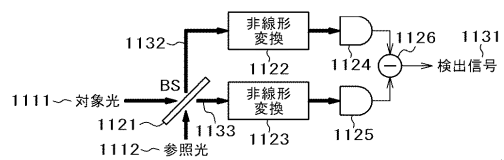
【図 11 A】

図 11 A



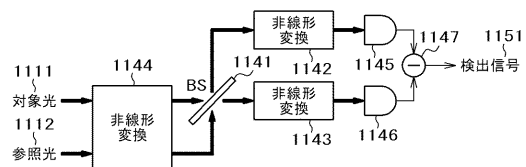
【図 11 B】

図 11 B



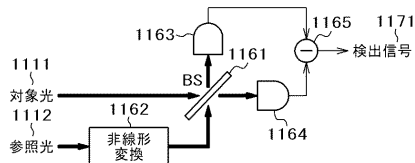
【図 11 C】

図 11 C



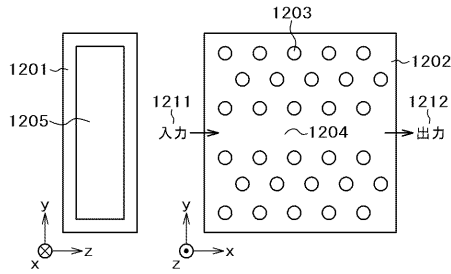
【図 1 1 D】

図 1 1 D



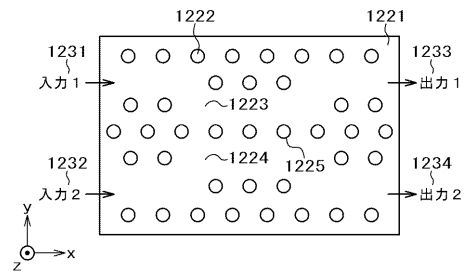
【図 1 2 A】

図 1 2 A



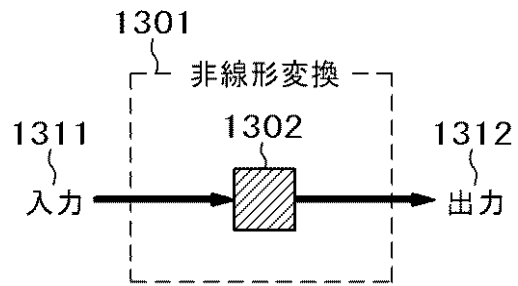
【図 1 2 B】

図 1 2 B



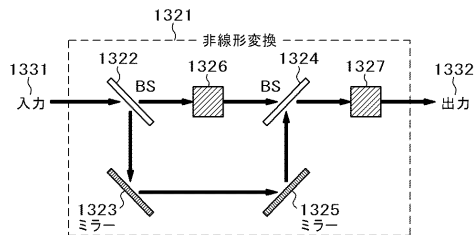
【図 1 3 A】

図 1 3 A



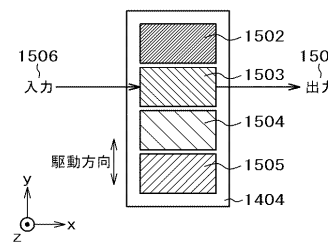
【図 1 3 B】

図 1 3 B



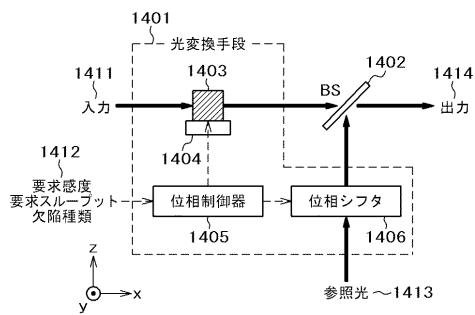
【図 1 5】

図 1 5



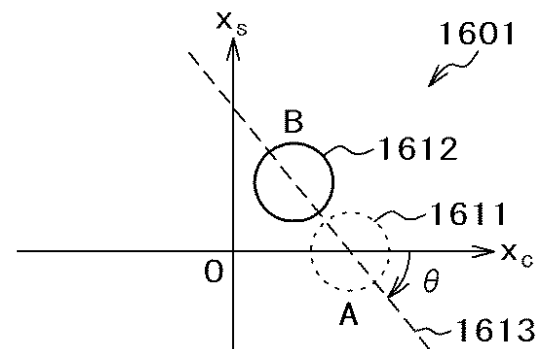
【図 1 4】

図 1 4



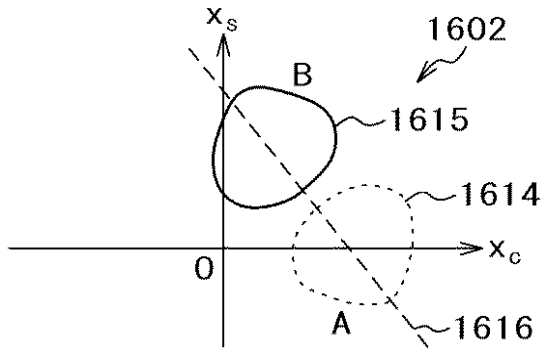
【図 1 6 A】

図 1 6 A



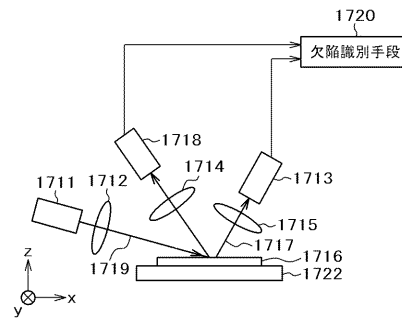
【図 16 B】

図 16 B



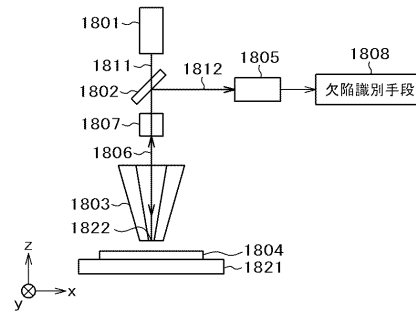
【図 17 B】

図 17 B



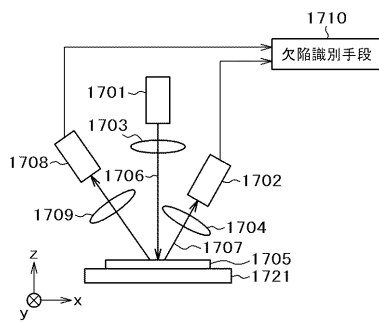
【図 18 A】

図 18 A



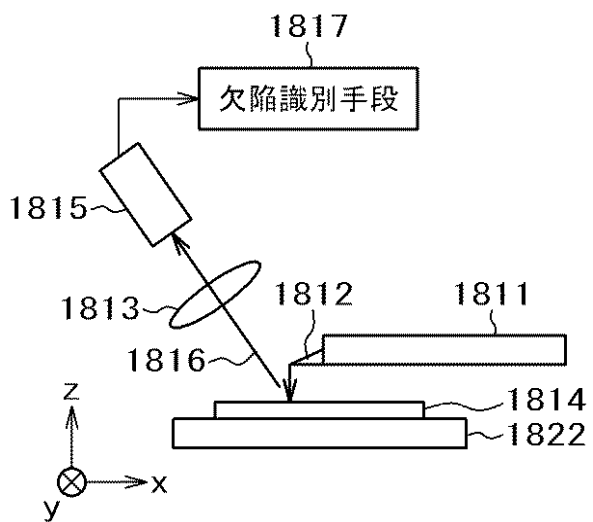
【図 17 A】

図 17 A



【図 18 B】

図 18 B



フロントページの続き

(72)発明者 中田 俊彦

神奈川県横浜市戸塚区吉田町 2 9 2 番地 株式会社日立製作所 生産技術研究所内

審査官 森口 正治

(56)参考文献 特開平 0 8 - 0 8 6 7 4 6 (J P , A)
特開 2 0 0 1 - 2 7 2 6 0 3 (J P , A)
特開平 0 8 - 3 0 4 2 9 6 (J P , A)
特開平 0 6 - 2 3 5 6 2 0 (J P , A)
特開 2 0 0 6 - 2 3 4 6 9 3 (J P , A)
特開 2004 - 286629 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

G 0 1 N 2 1 / 8 4 - 2 1 / 9 5 8