

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5699105号
(P5699105)

(45) 発行日 平成27年4月8日(2015.4.8)

(24) 登録日 平成27年2月20日(2015.2.20)

(51) Int. Cl. F I
GO 1 B 9/02 (2006.01) GO 1 B 9/02
GO 1 B 11/00 (2006.01) GO 1 B 11/00 G

請求項の数 10 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2012-89807 (P2012-89807)	(73) 特許権者	000005108
(22) 出願日	平成24年4月11日(2012.4.11)		株式会社日立製作所
(62) 分割の表示	特願2007-128718 (P2007-128718) の分割		東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
原出願日	平成19年5月15日(2007.5.15)	(74) 代理人	100100310 弁理士 井上 学
(65) 公開番号	特開2012-177701 (P2012-177701A)	(72) 発明者	中田俊彦
(43) 公開日	平成24年9月13日(2012.9.13)		神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地
審査請求日	平成24年4月11日(2012.4.11)		株式会社日立製作所 生産技術研究所内
審判番号	不服2014-661 (P2014-661/J1)	(72) 発明者	渡辺正浩
審判請求日	平成26年1月15日(2014.1.15)		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】 表面計測方法とその装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

アクチュエータにより探針を対象物に対して相対的に走査し、
 所定の接触力になるまで前記探針を対象物に対して接触させ、
 光源からの光を偏光素子にて前記偏光素子を透過する第1の光と前記偏光素子に反射される第2の光に分離し、

前記第1の光を前記アクチュエータに照射し、

前記アクチュエータからの反射光と前記第2の光を前記偏光素子にて合成させ、前記合成された光に同一平面上にて複数の光位相差を生じさせて干渉光を生じさせ、

前記干渉光に同一平面上にて複数の光位相差を生じさせ、前記探針の位置を求めることを特徴とする表面計測方法。

10

【請求項2】

偏光素子アレイにより前記アクチュエータからの反射光と前記第2の光との間に複数の光位相差を生じさせることを特徴とする請求項1記載の表面計測方法。

【請求項3】

前記偏光素子アレイは、フォトリソグラフィで構成されたことを特徴とする請求項2記載の表面計測方法。

【請求項4】

前記光源からの光を第1の光と第2の光に分離する方法は、回折偏光素子によることを特徴とする請求項1記載の表面計測方法。

20

【請求項 5】

前記光源からの光を第 1 の光と第 2 の光に分離する方法は、フォトニック結晶によることを特徴とする請求項 1 記載の表面計測方法。

【請求項 6】

探針と、

前記探針を前記対象物に対して相対的に走査し、前記探針を前記対象物に対して接触させるアクチュエータと、

前記探針と前記対象物との間の接触力を検出する 4 分割ポジションセンサと、
光源と、

光源からの光を第 1 の光と第 2 の光とに分離する分離手段と、

前記分離手段を透過し、前記アクチュエータで反射した前記第 1 の光と前記分離手段で反射した第 2 の光との間に同一平面上にて複数の光位相差を生じさせて干渉光を生じさせる干渉手段と、

前記干渉光から前記探針の位置を求める検出手段とを備えたことを特徴とする表面計測装置。

【請求項 7】

前記干渉手段は、偏光素子アレイであることを特徴とする請求項 6 記載の表面計測装置。

【請求項 8】

前記偏光素子アレイは、フォトニック結晶アレイで構成されたことを特徴とする請求項 7 記載の表面計測装置。

【請求項 9】

前記分離手段は、回折偏光素子によることを特徴とする請求項 6 記載の表面計測装置。

【請求項 10】

前記分離手段は、フォトニック結晶によることを特徴とする請求項 6 記載の表面計測装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、表面計測方法とその装置に関する。

【背景技術】

【0002】

対象物の変位量あるいは移動量を計測する方法として、光干渉を用いる方法が広く知られている。例えば、微細立体形状の計測ツールとして知られる走査プローブ顕微鏡 (SPM: Scanning Probe Microscope) の一種である原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscope) において、探針の位置を計測する変位センサとして、従来の静電容量センサに変わり、より微小な変位を高感度に測定できる手段として、非特許文献 1 に開示されているような光干渉を用いた変位センサが適用されようとしている。この光干渉変位センサでは、レーザ光源からのレーザ光を 2 つに分けて、一方を参照ミラーに照射し、他方を探針走査機構に装着したターゲットミラーに照射し、両反射光 (参照光と測定光) の間に 0、 $\pi/2$ 、 $3\pi/2$ の位相差を設けた上で干渉させ、生じた 4 つの位相シフト干渉光を受光して電気信号に変換した後、4 つの位相シフト干渉信号に所望の演算処理を施し探針の移動量を求める。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献 1】半導体 M I R A I プロジェクト リソグラフィ関連計測技術ワークショップ (2004 年 10 月 19 日) 資料, p.28 (2004)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

20

30

40

50

【0004】

しかしながら、上記した光干渉変位センサでは、参照光と測定光の間に0、 $\pi/2$ 、 $3\pi/2$ の位相差を設ける方法として、参照光と測定光を合成するためのプリズムと、合成光を2つの光路に分離するための無偏光ビームスプリッタと、2つの光路中の合成光を構成する参照光と測定光の間に位相シフトを与えるための2つの偏光ビームスプリッタを用いているため、光学系全体が大きくなり、光干渉変位センサが大形化し適用対象が限定されるという問題を抱えていた。

【0005】

このため、半導体製造工程などの量産ラインに適用するAFMに、従来の静電容量センサに比べこのように大形の光干渉変位センサをx、y、z軸用に3台搭載することは不可能に近かった。さらに、位相シフトが与えられた4つの干渉光の光路が互いに離れているため、4つの光路に異なる温度分布、湿度分布、気圧分布、密度分布、気流変化などの外乱が重畳されると、4つの位相シフト干渉信号から対象物の移動量を求める演算処理の際の誤差となってしまうという本質的な問題を抱えていた。

【0006】

そこで本発明では、少なくとも4つの位相シフト干渉光を大形の光学系を用いることなく生成可能とし、対象物の変位量あるいは移動量を外乱の影響なく高精度に求めることが可能な変位計測方法とその装置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】

【0007】

上記目的を達成するために、本発明では、表面計測装置を、探針と、前記探針を前記対象物に対して相対的に走査し、前記探針を前記対象物に対して接触させるアクチュエータと、前記探針と前記対象物との間の接触力を検出する4分割ポジションセンサと、光源と、光源からの光を第1の光と第2の光とに分離する分離手段と、前記分離手段を透過し、前記アクチュエータに反射した前記第1の光と前記分離手段で反射した第2の光との間に同一平面上にて複数の光位相差を生じさせて干渉光を生じさせる干渉手段と、前記干渉光から前記探針の位置を求める検出手段とを備えて構成した。

【0008】

また、本発明では、前記対象物からの反射光と該第2の光との間に同一平面上で複数の光位相差を生じさせて干渉せしめて複数の干渉光を生じさせる干渉手段は、偏光素子アレイで構成した。

【0009】

また、本発明では、前記偏光素子アレイは、フォトリソニック結晶アレイで構成した。

【0010】

また、本発明では、前記光源からの光を第1の光と第2の光に分離する方法は、回折偏光素子で構成した。

また、本発明では、前記光源からの光を第1の光と第2の光に分離する方法は、フォトリソニック結晶で構成した。

【発明の効果】

【0011】

本発明によれば、少なくとも4つの位相シフト干渉光を大形の干渉計を用いることなく極めて小形の光干渉変位センサで生成可能となり、対象物の変位量あるいは移動量を外乱の影響なく高精度に求めることが可能となるばかりか、適用対象も大幅に拡大する。その結果、サブナノメートル以下の精度で、AFMを始めとする走査プローブ顕微鏡の探針走査が可能となり、サブナノメートル以下の分解能でかつ高い再現性で、半導体デバイスを始めとする微細な立体構造素子の光学情報や微小凹凸情報の測定が可能になるという効果を奏する。また、半導体ウェハや磁気ディスク、磁気ヘッド浮上面のサブナノメートル以下の微小凹凸分布や微小凹凸欠陥の検査が可能になるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図 1】実施例 1 における光干渉変位センサの構成を示す斜視図とブロック図である。

【図 2】回折偏光素子を用いた参照ミラーの構成と機能を示す斜視図である。

【図 3】実施例 1 におけるフォトニック結晶を用いた位相シフト素子の構成を示す斜視図である。

【図 4】フォトニック結晶を用いた参照ミラーと 1 / 4 波長板の構成を示す斜視図である。

【図 5】実施例 2 における A F M の概略の構成を示す斜視図とブロック図である。

【図 6】実施例 2 における A F M の探針のステップイン走査を示す試料断面及びカンチレバーの斜視図である。

【図 7】実施例 2 におけるステップイン走査と探針 - 試料間接触力との関係を示すグラフである。

10

【図 8】実施例 3 における表面凹凸欠陥検査装置の概略の構成を示す斜視図とブロック図である。

【図 9】実施例 4 における光干渉変位センサの構成を示す斜視図とブロック図である。

【図 10】実施例 4 におけるフォトニック結晶を用いた位相シフト素子の構成を示す斜視図である。

【図 11】実施例 4 における分割形光電変換素子の受光面を示す正面図である。

【図 12】実施例 5 における光干渉変位センサの構成を示す斜視図とブロック図である。

【図 13】実施例 5 におけるフォトニック結晶を用いた位相シフト素子の構成を示す斜視図である。

20

【図 14】実施例 5 における分割形光電変換素子の受光面を示す正面図である。

【発明を実施するための形態】

【0013】

波長以下の微細構造により入射光の偏光や透過・反射特性を制御できるフォトニック結晶が近年注目されている。本発明は、このフォトニック結晶を利用して位相シフト干渉光を生成し、対象物の変位量あるいは移動量を外乱の影響なく高精度に求めるものである。

【0014】

本発明の実施の形態を、図を用いて説明する。

【実施例 1】

【0015】

30

本発明の第 1 の実施例を、図 1 ~ 図 4 に基づいて説明する。図 1 に示すように、本実施例の光干渉変位センサは、図示しない光源ユニットと、センサユニット 100 及び変位出力ユニット 70 から成る。

【0016】

光源ユニットでは、例えば周波数安定化 He - Ne レーザからの波長 632.8 nm の直線偏光レーザ光を、偏波面保存ファイバ 2 で 45° の偏光方向でセンサユニット 100 に導光する。

【0017】

センサユニット 100 は、干渉計 600 及び変位演算処理ユニット 50 から成る。干渉計 600 では、偏波面保存ファイバ 2 から出射した 45° 偏光をコリメータ 3 で平行光 4 にし、さらにグラントムソンプリズムなどの偏光素子 5 を透過させ、透過光 6 をプリズムミラー 7 及び無偏光ビームスプリッタ 8 で反射させて、参照ミラー 9 に入射させる。参照ミラー 9 は、図 2 に示すように、合成石英基板 9a 上に Al 等の金属材料で回折格子 9b が形成された構成となっている。この回折格子に入射する 45° 方向の偏光ビーム 6 はベクトル分解された 2 つの直交偏光成分から成り、回折格子の長手方向と平行な S 偏光成分 25s は回折格子で反射し、直交する P 偏光成分 25p は回折格子を透過する。すなわち、この回折格子は、いわゆる回折偏光素子 (Wire Grid Polarizer) としての性質を示す。本実施例の場合、回折格子 9b のピッチは 144 nm、線幅は 65 nm、高さは 165 nm とした。

40

【0018】

50

参照ミラー 9 で反射された S 偏光ビーム 6 r は参照光として用いる。透過した P 偏光ビーム 6 m は測定光として用いる。P 偏光ビーム 6 m は 1 / 4 波長板 1 0 を透過した後円偏光となり、測定対象物 3 1 上に載置されたターゲットミラー 1 2 で反射され、再び 1 / 4 波長板 1 0 を透過後 S 偏光となり、参照ミラー 9 で反射され、1 / 4 波長板 1 0 を透過後円偏光としてターゲットミラー 1 2 で反射され、1 / 4 波長板 1 0 を透過後 P 偏光となり、参照ミラー 9 を透過する。即ち、測定光 6 m は参照ミラー 9 とターゲットミラー 1 2 との間の光路を 2 往復することになり、測定対象物 3 1 の移動量 3 1 d を 2 倍に拡大して検出することになる。参照ミラー 9 で反射された S 偏光ビーム 6 r と透過した P 偏光ビーム 6 m は、直交偏光ビーム 1 4 として合成され、無偏光ビームスプリッタ 8 を透過する。

【 0 0 1 9 】

この直交偏光ビーム 1 4 は、迷光除去のための開口 1 3 を通過した後、対向させた 2 つのピラミッド形状の四角錐プリズム 1 5 a 及び 1 5 b により、4 つの直交偏光ビームビーム 1 7 に分割される。ビーム分割の方法は、このようなプリズムに限定されるものではなく、回折光学素子なども適用可能である。4 つの直交偏光ビームビーム 1 7 は、位相シフト素子 1 8 及び 1 9 を透過することにより、直交偏光成分の間に、0、 $\pi/2$ 、 $3\pi/2$ の位相シフトが与えられた状態で偏光干渉し、4 つの位相シフト干渉光 2 0 が生成される。

【 0 0 2 0 】

位相シフト素子 1 8 は、図 3 に示すように 2 分割され、下半分が合成石英 1 8 d で構成され、上半分はフォトニック結晶 1 8 c で構成される。フォトニック結晶 1 8 c は、拡大図に示すように、合成石英基板 1 8 c 1 に入射光の波長よりも小さなピッチの水平方向のライン & スペース状の回折格子を形成し、その上に屈折率の異なる誘電体薄膜 1 8 c 2 及び 1 8 c 3 を積層して構成される。回折格子に堆積した薄膜層の断面は、回折格子の凹凸によって膜厚方向に三角波形の凹凸形状が維持される。薄膜材料としては、Si、SiO₂、TiO₂、Ta₂O₅、Nb₂O₅ が適用可能である。このような回折格子をベースとする多層薄膜構造は、回折格子の方向を結晶軸方向とするフォトニック結晶となり、多層薄膜間の回折、干渉作用により複屈折特性を示し、入射光の偏光や透過・反射特性を制御することが可能となる（参照：(株)フォトニックラティス製品カタログ）。

【 0 0 2 1 】

入射光の波長及び得たい特性を考慮して、回折格子ピッチ、深さ、各薄膜の膜厚は制御される。また、半導体素子製造に用いられるフォトリソグラフィ技術やスパッタリングなどの膜付け技術を用いることにより、1 枚の基板の上に結晶軸方向の異なる偏光素子や波長素子をアレイ状に形成できる点も大きな特徴である。フォトニック結晶 1 8 c は 1 / 4 波長板としての機能を有しており、太い矢印がその結晶軸方向を示している。すなわち、図 1 に示すように、4 つの直交偏光ビーム 1 7 のうちフォトニック結晶 1 8 c を透過する 2 つの直交偏光ビームに関して、2 つの偏光成分の間に $\pi/2$ の位相差が生じる。一方、残りの 2 つの直交偏光ビームは合成石英 1 8 d を透過し、位相差は生じない。

【 0 0 2 2 】

位相シフト素子 1 9 は、図 3 に示すように 2 分割され、左半分が 45° の結晶軸方向を有するフォトニック結晶 1 9 a で構成され、右半分が逆向きの 45° の結晶軸方向を有するフォトニック結晶 1 9 b で構成される。フォトニック結晶 1 9 a は、フォトニック結晶 1 8 c と同様、拡大図に示すように、合成石英基板 1 9 a 1 に入射光の波長よりも小さなピッチの 45° 方向のライン & スペース状の回折格子を形成し、その上に屈折率の異なる誘電体薄膜 1 9 a 2 及び 1 9 a 3 を積層して構成される。フォトニック結晶 1 9 b の構造も同様である。フォトニック結晶 1 9 a 及び 1 9 b は偏光素子としての機能を有しており、太い矢印がその結晶軸方向を示している。すなわち、図 1 に示すように、4 つの直交偏光ビームビーム 1 7 のうちフォトニック結晶 1 9 a を透過する 2 つの直交偏光ビームを構成する 2 つの偏光成分と、フォトニック結晶 1 9 b を透過する 2 つの直交偏光ビームを構成する 2 つの偏光成分との間に、相対的に $\pi/2$ の位相差が与えられた状態で、両偏光成分は干渉する。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 3 】

すなわち、位相シフト素子 1 8 及び 1 9 を透過した 4 つの直交偏光ビーム 1 7 の各直交偏光成分の間に、 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ の位相シフトが与えられた状態で偏光干渉し、4 つの位相シフト干渉光 2 0 が生成される。4 つの位相シフト干渉光 2 0 は、外乱光の影響を避けるため、波長 632.8 nm に透過中心波長を有する干渉フィルタ 2 1 を透過した後、フォトダイオードなどの 4 つの光電変換素子で 2 2 で各々受光され、増幅器 2 3 で増幅された後、4 つの位相シフト干渉信号 4 1 a、4 1 b、4 1 c、4 1 d として出力される。

【 0 0 2 4 】

4 つの位相シフト干渉信号 4 1 a、4 1 b、4 1 c、4 1 d は、各々 (数 1) ~ (数 4) で与えられる。 10

$$I_a = I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 \pi n D / \lambda) \quad \dots (\text{数 1})$$

$$\begin{aligned} I_b &= I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 \pi n D / \lambda + \pi/2) \\ &= I_m + I_r - 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \sin (4 \pi n D / \lambda) \quad \dots \end{aligned} \quad (\text{数 2})$$

$$\begin{aligned} I_c &= I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 \pi n D / \lambda + \pi) \\ &= I_m + I_r - 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 \pi n D / \lambda) \quad \dots \end{aligned} \quad (\text{数 3}) \quad 20$$

$$\begin{aligned} I_d &= I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 \pi n D / \lambda + 3\pi/2) \\ &= I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \sin (4 \pi n D / \lambda) \quad \dots \end{aligned} \quad (\text{数 4})$$

ここで、 I_m はプローブ光の検出強度、 I_r は参照光の検出強度、 n は空気の屈折率、 D は測定対象物 3 1 の移動量 3 1 d、 λ はレーザ光 4 の波長である。

【 0 0 2 5 】

変位演算処理ユニット 5 0 では、(数 5) に基づいて測定対象物 3 1 の移動量 D が算出されて、移動量信号 6 1 として変位出力ユニット 7 0 に表示される。 30

$$D = (\lambda / 4 \pi n) \tan^{-1} \{ (I_c - I_d) / (I_a - I_b) \} \quad \dots (\text{数 5})$$

本実施例では、参照ミラー 9 として回折偏光素子 (Wire Grid Polarizer) を用いたが、前述の説明から明らかなように、図 4 に示すような水平方向に結晶軸方向を有するフォトリック結晶 9 c を用いることも可能である。また、 $1/4$ 波長板 1 0 も同様に、 45° 方向に結晶軸方向を有するフォトリック結晶 1 0 c を用いることも可能である。また、干渉計 6 0 0 をさらに簡素化するために、図 3 において位相シフト素子 1 9 をフォトリック結晶 1 9 a のみで構成し、(数 1) 及び (数 3) で表される位相シフト干渉信号 4 1 a 及び 4 1 c を得て、この 2 つの干渉信号から測定対象物 3 1 の移動量 D を求めることも可能である。 40

【 0 0 2 6 】

図 1 から明らかなように、ターゲットミラー 1 2 に向かう測定光 6 m と参照光 6 r の 2 つのビームは、光源ユニットから出射されてセンサユニット 1 0 0 に入射し、参照ミラー 9 に至るまで、更に参照ミラー 9 から 4 つの光電変換素子 2 2 で受光されるに至るまで、完全に同一の光路を通る。即ち、共通光路形干渉計の構成となる。従って、仮に光路中に空気の揺らぎ等による温度分布や屈折率分布、あるいは機械振動が生じたとしても、これ 50

らの外乱は両ビームに等しく影響を及ぼすため、両ビームが干渉した際にこれら外乱の影響は完全に相殺され、干渉光は外乱の影響を受けない。

【0027】

唯一、参照ミラー9とターゲットミラー12との間の光路において測定光6mのみが存在するが、例えば、走査プローブ顕微鏡等のストロークは高々数百マイクロン程度であるので、参照ミラー9とターゲットミラー12との間隙は1mm以下に設定することが可能であり、このような微小間隙での外乱の影響は無視できる。また、レーザー光自身の強度変動は、(数1)~(数4)においてプローブ光検出強度 I_m 、参照光検出強度 I_r の変動となるが、変位演算処理ユニット50における(数5)の中の減算処理及び除算処理により相殺される。

10

【0028】

さらに本実施例の光干渉変位センサでは、単純な構成で4つの直交偏光ビームを生成し、かつアレイ状に配置した位相シフト素子により空間的に並列に4つの位相シフト干渉光を生成し受光する構成となっているので、従来の位相シフト干渉計に比べ光学部品が大幅に低減し、変位センサが格段に小形化するというメリットがある。具体的には干渉計600の寸法を20×15×50mm以下程度に縮小化可能である。また、4つの位相シフト干渉光が近接した光路を通過するため、光路間に空気の揺らぎ等による温度分布、湿度分布、気圧分布、密度分布、気流変化などの外乱が重畳されたとしても、その影響を最小限に抑えることが可能になる。

【0029】

以上より、本実施例の光干渉変位センサにより、温度、湿度、気圧、密度、音響振動といった環境因子を高精度に制御することなく、測定対象物の移動量や位置をサブナノメートルからピコメートル以下の精度で安定に計測することが可能である。

20

【実施例2】

【0030】

本発明の第2の実施例を、図5~図7に基づいて説明する。図5に示すように、本実施例は、第1の実施例で示した光干渉変位センサをAFMに搭載したものである。本実施例におけるAFMは、試料を載置してXYZの3次元方向に移動可能なステージユニット700と、探針を走査して試料表面を計測するAFMユニット800、計測データからAFM画像を生成し、また全体を制御する信号処理・制御ユニット900、及び試料上の被測定部を観察し位置決めするためのモニタ光学系ユニット500とを備えて構成される。ステージユニット700は、試料200を載置してXYZの3次元方向に移動可能なXYZステージ300とドライバ301とを備えている。試料200はXYZステージ300上に載置され、ドライバ301で駆動されてモニタ光学系ユニット500で試料200の表面を観察しながら所望の測定位置に位置決めされる。

30

【0031】

AFMユニット800は、先端部にHDC(High Density Carbon)などで形成された探針170を固定したカンチレバー160、XYZ圧電素子アクチュエータ150、ドライバ151、探針170の位置(XYZ圧電素子アクチュエータ150の位置)を測定するx、y、z軸用センサユニット100x、100y、100z、光源ユニット1、光源ユニット1から直線偏光レーザー光を各光干渉変位センサに導光する偏波面保存ファイバ2x、2y、2z、カンチレバー160の背面にレーザー光(波長405nm)185を照射する半導体レーザー180、カンチレバー160からの反射光を検出する4分割ポジションセンサ190、および半導体レーザー180を制御する駆動回路181を備えている。XYZ圧電素子アクチュエータ150の表面には、光干渉変位センサのためのターゲットミラー12x(図示せず)、12y(図示せず)、12zが装着されている。

40

【0032】

モニタ光学系ユニット500は結像レンズと撮像カメラを備えており、撮像カメラで試料200表面の光学像を観察しながら、試料200を載置したXYZステージ300をド

50

ライバ301で駆動して、試料200の所望の測定位置を探針170の下に位置決めする。

【0033】

信号処理・制御ユニット900の画像形成ユニット410では、4分割ポジションセンサ190からの出力信号195に基づいて、XYZ圧電素子アクチュエータ150の位置測定信号61x、61y、61zを処理してAFM画像を生成する。画像形成ユニット410で生成されたAFM画像は全体制御ユニット420に送られ、ディスプレイ等の出力ユニット430の出力画面に表示される。

【0034】

次に、光でこの原理を用いてAFM画像を測定する方法について説明する。AFM画像は、探針170と試料200との間の接触力を一定に保ちながら、探針170を試料200上を走査し、その時の探針170の移動量(XYZ圧電素子アクチュエータ150の移動量)から求める。初めに、探針170と試料200との間の接触力の求め方を説明する。先端部に探針170が固定されたカンチレバー160の背面には、駆動回路181によって駆動された半導体レーザ180からのレーザ光(波長405nm)185が照射され、その反射光が4分割ポジションセンサ190で受光される。ドライバ151でXYZ圧電素子アクチュエータ150を駆動してカンチレバー160を下降させ、先端部に固定された探針170を試料200に接触させる。この状態でカンチレバー160を更に下降させると、カンチレバー160の傾きが変化してカンチレバー160の背面に照射されているレーザの反射方向が変化し、4分割ポジションセンサ190上のレーザ光の入射位置が変化して4分割ポジションセンサ190からの出力信号195が変化する。この変化した信号を、予め求めておいた4分割ポジションセンサ190からの出力信号とカンチレバー160の傾きとの関係に基づく接触力のデータと比較して、接触力を求めることができる。

【0035】

次に、試料の表面を計測する手順について説明する。まず、XYZステージ300を駆動して、試料200の測定領域をカンチレバー160の先端部に取り付けられた探針170の下部に位置決めさせる。次に、図6に示すように、試料200の測定領域において、探針170と試料表面200aとの接触の状態(接触力)を4分割ポジションセンサ190からの出力信号でモニタしながら、カンチレバー160をXYZ圧電素子アクチュエータ150により下降させていき(Z方向走査175)、所定の設定接触力になった時点で下降を停止する。

【0036】

下降点176において探針170の位置(XYZ圧電素子アクチュエータ150の位置)を光干渉変位センサ100x、100y、100zにより測定した後、カンチレバー160を上昇させ(Z方向走査177)、4分割ポジションセンサ190からの出力信号に基づいて、探針170が完全に試料200から離脱したならば、測定領域の計測が終了したか否かを判定し、終了していない場合にはXYZ圧電素子アクチュエータ150を駆動してカンチレバー160を次の測定点に移動させる(X走査178)。X走査における移動量(送りピッチ)は、観察において必要とする分解能に応じて決められる。次の測定点において、再度カンチレバー160を下降させ、探針170の位置の測定を行う。

【0037】

以上のステップイン動作を、XYZ圧電素子アクチュエータ150により2次元の測定領域(XY領域)に渡って繰り返し行った後、測定を完了する。ここで、上記2次元の測定領域を測定する方法は、テレビにおけるラスタスキャンと同じように走査する。このときのY方向への送りピッチ(隣り合う走査の間隔)は、観察において必要とする分解能に応じて決められる。

【0038】

ドライバ151によって駆動されるXYZ圧電素子アクチュエータ150のXYZ方向走査、XYZステージ300による試料200の位置決めは、信号処理・制御ユニット9

10

20

30

40

50

00の走査制御ユニット400により統括制御される。また探針170と試料200との接触力の制御、及び光干渉変位センサ100x、100y、100zによる探針170の位置(XYZ圧電素子アクチュエータ150の位置)の測定は、総て信号処理・制御ユニット900中の全体制御ユニット420により統括制御される。走査制御ユニット400からXYZ圧電素子アクチュエータ150のXYZ走査信号が、また全体制御ユニット420から探針170の位置測定信号が、各々画像形成ユニット410に送られ、2次元AFM画像が生成されて、全体制御ユニット420を介してディスプレイ等の出力ユニット430に出力される。

【0039】

ステップイン走査と探針 - 試料間接触力との関係を、図7に示す。接触力変化曲線179に示すように、また探針170が上昇して試料200から退避するに従い、接触力は押し込み方向から引き込み方向に以降し、試料から離脱する瞬間に引き込み力は最大となる。離脱後、次の測定点に移動し再び試料に接近する間は、接触力をまったく受けない状態となる。探針170が再び接近し始め、試料200に接触した瞬間に押し込み方向の力が加わり、設定接触力に達した時点で、カンチレバー160は下降を停止する。設定接触力は1nN以下、好ましくは、サブnN~pNで実行することが望ましい。尚、接触力の検知は、上記光てこ方式に限定されるものではなく、別途設けた圧電素子アクチュエータよりカンチレバーをサブナノメートルオーダの振幅、MHzオーダの周波数でZ方向に微小振動させ、振動振幅あるいは振動周波数の変化から、検知することも可能である。

【0040】

また、本発明は、ステップイン走査AFMに限定されるものではなく、タッピング走査他のAFMにおける探針位置の測定にも適用可能である。また、本発明はAFMに限定されるものではなく、その他の走査プローブ顕微鏡、例えばSNOM(Scanning Near-Field Optical Microscope:近接場走査顕微鏡)やSTM(Scanning Tunneling Microscope)などにおける探針の位置計測・制御にも適用可能である。

【0041】

図5に示すように、本実施例によれば、第1の実施例で示した小形の光干渉変位センサをAFMに搭載して探針の位置の測定を行うことができるため、第1の実施例と同様の効果が得られ、探針の位置をサブナノメートルからピコメートル以下の精度で安定に計測することが可能である。その結果、2次元AFM画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。

【実施例3】

【0042】

本発明の第3の実施例を、図8に基づいて説明する。図8に示すように、本実施例は、第1の実施例で示した光干渉変位センサを表面凹凸欠陥検査装置に搭載したものである。本実施例における表面凹凸欠陥検査装置は、試料を載置してXYZの3次元方向に走査可能なステージユニット1000と、探針を相対的に走査して試料表面を検査する表面検査ユニット1100、計測データから欠陥検出画像を生成し、また全体を制御する信号処理・制御ユニット1200、及び試料上の被検査部を観察し位置決めするためのモニタ光学系ユニット500とを備えて構成される。

【0043】

ステージユニット1000は、試料210を載置してXYZの3次元方向に走査可能なXYZステージ350とドライバ351とを備えている。試料210はXYZステージ350上に載置され、ドライバ351で駆動されてモニタ光学系ユニット500で試料210の表面を観察しながら所望の検査位置に位置決めされた後、XY方向に走査されて表面凹凸の検査が実行される。

【0044】

表面検査ユニット1100は、試料210表面の凹凸状態を検査する光干渉変位センサ100、集光レンズ215、光源ユニット1、光源ユニット1から直線偏光レーザ光を光

10

20

30

40

50

干渉変位センサ100に導光する偏波面保存ファイバ2を備えている。光源ユニットには例えば、波長532nmの固体レーザーが使用される。光干渉変位センサ100の構成と機能は第1の実施例と同一であるので、説明を省略する。光干渉変位センサ100から出射された測定光6mは、集光レンズ215により試料210の表面上に集光される。集光レンズ215のNA(Numerical Aperture:開口数)を0.8とすると、集光スポット径は約0.8 μ mとなる。尚、試料210のXY走査中にこのスポット径を維持するため、必要に応じて図示しない自動焦点ユニットを設ける場合がある。

【0045】

モニタ光学系ユニット500は結像レンズと撮像カメラを備えており、撮像カメラで試料210表面の光学像を観察しながら、試料210を載置したXYZステージ350をドライバ351で駆動して、試料210の所望の検査位置を、予め記憶しておいた集光レンズ215の下に位置決めする。

10

【0046】

信号処理・制御ユニット1200の欠陥検出ユニット460では、光干渉変位センサ100の測定信号61、230とXYZステージ350のXY駆動信号に基づいて、表面凹凸画像を生成する。さらに、欠陥検出ユニット460では、予め設定しておいた高さ以上の凹凸を有する欠陥が抽出されて、表面凹凸画像と共に全体制御ユニット470に送られ、ディスプレイ等の出力ユニット480の出力画面に表示される。

【0047】

次に、試料210の表面の凹凸状態を検査する手順について説明する。まず、表面検査ユニット1100をモニタ光学系ユニット500の光軸上から退避させておき、XYZステージ350を駆動して、試料210の検査領域を、予め記憶しておいた集光レンズ215の下部に位置決めさせる。次に、図8に示すように、表面検査ユニット1100をモニタ光学系ユニット500の光軸上に移動させた後、XYZステージ350をXY方向に駆動して、テレビにおけるラスタスキャンと同じように試料210を走査する(X方向は連続走査)。このときのY方向への送りピッチ(隣り合う走査の間隔)は、検査において必要とする分解能に応じて決められる。(数5)に基づいて各走査位置における試料210の表面凹凸量Dが算出され、凹凸測定信号61、230として出力されるので、XYZステージ350のXY走査信号と測定信号61、230から検査領域の表面凹凸画像を生成することができる。

20

30

【0048】

XYZステージ350による試料210の位置決めと検査のためのXY走査は、信号処理・制御ユニット1200の走査制御ユニット450により統括制御される。また光干渉変位センサ100による試料210表面の検査は、信号処理・制御ユニット1200中の全体制御ユニット470により統括制御される。走査制御ユニット450からXYZステージ350のXY走査信号が、また全体制御ユニット470から光干渉変位センサ100の測定信号61、230が、各々欠陥検出ユニット460に送られ、表面凹凸画像が生成されると共に、予め設定しておいた高さ以上の凹凸を有する欠陥が抽出されて、全体制御ユニット470を介してディスプレイ等の出力ユニット480に出力される。

【0049】

40

図8に示すように、本実施例によれば、第1の実施例で示した小形の光干渉変位センサによって試料表面の凹凸欠陥を検査することができるため、第1の実施例と同様の効果が得られ、試料表面の凹凸欠陥をサブナノメートルからピコメートル以下の感度で安定に計測することが可能である。その結果、例えば、半導体ウエハや、磁気ディスク、磁気ヘッド浮上面などの凹凸欠陥検査の感度を飛躍的に向上させることが可能となる。

【実施例4】

【0050】

本発明の第4の実施例を、図9～図11に基づいて説明する。図8に示すように、本実施例の光干渉変位センサは、図示しない光源ユニットと、センサユニット100及び変位出力ユニット70から成る。

50

【 0 0 5 1 】

光源ユニットでは、例えば周波数安定化 He - Ne レーザからの波長 632.8 nm の直線偏光レーザ光を、偏波面保存ファイバ 2 で 45° の偏光方向でセンサユニット 100 に導光する。

【 0 0 5 2 】

センサユニット 100 は、干渉計 600 及び変位演算処理ユニット 51 から成る。干渉計 600 では、第 1 の実施例と同様、偏波面保存ファイバ 2 から出射した 45° 偏光をコリメータ 3 で平行光 4 にし、さらにグラントムソンプリズムなどの偏光素子 5 を透過させ、透過光 6 をプリズムミラー 7 及び無偏光ビームスプリッタ 8 で反射させて、参照ミラー 9 に入射させる。参照ミラー 9 は、図 2 に示すように、合成石英基板 9a 上に Al 等の金属材料で回折格子 9b が形成された構成となっている。この回折格子に入射する 45° 方向の偏光ビーム 6 はベクトル分解された 2 つの直交偏光成分から成り、回折格子の長手方向と平行な S 偏光成分 25s は回折格子で反射し、直交する P 偏光成分 25p は回折格子を透過する。すなわち、この回折格子は、いわゆる回折偏光素子 (Wire Grid Polarizer) としての性質を示す。本実施例の場合、回折格子 9b のピッチは 144 nm、線幅は 65 nm、高さは 165 nm とした。

【 0 0 5 3 】

参照ミラー 9 で反射された S 偏光ビーム 6r は参照光として用いる。透過した P 偏光ビーム 6m は測定光として用いる。P 偏光ビーム 6m は 1/4 波長板 10 を透過した後円偏光となり、測定対象物 31 上に載置されたターゲットミラー 12 で反射され、再び 1/4 波長板 10 を透過後 S 偏光となり、参照ミラー 9 で反射され、1/4 波長板 10 を透過後円偏光としてターゲットミラー 12 で反射され、1/4 波長板 10 を透過後 P 偏光となり、参照ミラー 9 を透過する。即ち、測定光 6m は参照ミラー 9 とターゲットミラー 12 との間の光路を 2 往復することになり、測定対象物 31 の移動量 31d を 2 倍に拡大して検出することになる。参照ミラー 9 で反射された S 偏光ビーム 6r と透過した P 偏光ビーム 6m は、直交偏光ビーム 14 として合成され、無偏光ビームスプリッタ 8 を透過する。

【 0 0 5 4 】

この直交偏光ビーム 14 は、迷光除去のための開口 13 を通過した後、回折光学素子やホログラム素子、あるいはアナモルフィックプリズムペアのようなビーム整形素子 80 により、矩形状ビーム 81 に変換される。この矩形状直交偏光ビーム 81 は、位相シフト素子 82、83 及び 84 を透過することにより、直交偏光成分の間に、0、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$ 、 π 、 $5\pi/4$ 、 $3\pi/2$ 、 $7\pi/4$ の位相シフトが与えられた状態で偏光干渉し、8 つの位相シフト干渉光 85 が生成される。

【 0 0 5 5 】

位相シフト素子 82 は、図 10 に示すように 2 分割され、左半分が合成石英 82d で構成され、右半分はフォトニック結晶 82c で構成される。フォトニック結晶 82c の構成と原理は第 1 の実施例と同様であるので、説明を省略する。フォトニック結晶 82c は 1/8 波長板としての機能を有しており、太い矢印がその結晶軸方向を示している。すなわち、図 9 に示すように、矩形状直交偏光ビーム 81 のうちフォトニック結晶 82c を透過する直交偏光ビームに関して、2 つの偏光成分の間に $\pi/4$ の位相差が生じる。一方、合成石英 82d を透過する直交偏光ビームに関しては、2 つの偏光成分の間に位相差は生じない。

【 0 0 5 6 】

位相シフト素子 83 は、図 10 に示すように 4 分割され、左から合成石英 83d、フォトニック結晶 83c、合成石英 83d、フォトニック結晶 83c が並んでいる。位相シフト素子 82 と同様、フォトニック結晶 83c は 1/4 波長板としての機能を有しており、太い矢印がその結晶軸方向を示している。すなわち、図 9 に示すように、矩形状直交偏光ビーム 81 のうちフォトニック結晶 83c を透過する直交偏光ビームに関しては、2 つの偏光成分の間に $\pi/2$ の位相差が生じる。一方、合成石英 83d を透過する直交偏光ビームに関しては、2 つの偏光成分の間に位相差は生じない。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 7 】

位相シフト素子 8 4 は、図 1 0 に示すように 8 分割され、4 5 ° の結晶軸方向を有するフォトニック結晶 8 4 a と、逆向きの 4 5 ° の結晶軸方向を有するフォトニック結晶 8 4 b が交互に並んでいる。フォトニック結晶 8 4 a 及び 8 4 b は偏光素子としての機能を有しており、太い矢印がその結晶軸方向を示している。すなわち、図 9 に示すように、矩形状直交偏光ビーム 8 1 のうちフォトニック結晶 8 4 a を透過する直交偏光ビームを構成する 2 つの偏光成分と、フォトニック結晶 8 4 b を透過する直交偏光ビームを構成する 2 つの偏光成分との間に、相対的に の位相差が与えられた状態で、両偏光成分は干渉する。

【 0 0 5 8 】

すなわち、位相シフト素子 8 2、8 3 及び 8 4 を透過した矩形状直交偏光ビーム 8 1 の各直交偏光成分の間に、0、 / 4、 / 2、3 / 4、 、5 / 4、3 / 2、7 / 4 の位相シフトが与えられた状態で偏光干渉し、8 つの位相シフト干渉光 8 5 が生成される。8 つの位相シフト干渉光 8 5 は、外乱光の影響を避けるため、波長 6 3 2 . 8 nm に透過中心波長を有する干渉フィルタ 8 6 を透過した後、位相シフト素子 8 4 の 8 つの領域に対応した 8 つの受光領域から成る 8 分割フォトダイオードアレイなどの分割形光電変換素子 8 7 で各々受光され、増幅器 8 8 で増幅された後、8 つの位相シフト干渉信号 8 9 a、8 9 b、8 9 c、8 9 d、8 9 e、8 9 f、8 9 g、8 9 h として出力される。図 1 1 に分割形光電変換素子 8 7 の受光面を示す。受光領域 8 7 a 及び 8 7 b がそれぞれ図 1 0 の位相シフト素子 8 4 のフォトニック結晶 8 4 a 及び 8 4 b に対応する。

【 0 0 5 9 】

4 つの位相シフト干渉信号 8 9 a、8 9 b、8 9 c、8 9 d、8 9 e、8 9 f、8 9 g、8 9 h は、各々 (数 6) ~ (数 1 3) で与えられる。

$$I_a = I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 n D /) \quad \dots (\text{数} 6)$$

$$I_b = I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 n D / +) \\ = I_m + I_r - 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 n D /) \quad \dots (\text{数} 7)$$

$$I_c = I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 n D / + / 2) \\ = I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \sin (4 n D /) \quad \dots (\text{数} 8)$$

$$I_d = I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 n D / + 3 / 2) \\ = I_m + I_r - 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \sin (4 n D /) \quad \dots (\text{数} 9)$$

$$I_e = I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 n D / + / 4) \\ = I_m + I_r + (2 I_m \cdot I_r)^{1/2} \{ \cos (4 n D /) - \sin (4 n D /) \} \quad \dots (\text{数} 1 0)$$

$$I_f = I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 n D / + 5 / 4) \\ = I_m + I_r - (2 I_m \cdot I_r)^{1/2} \{ \cos (4 n D /) - \sin (4 n D /) \} \quad \dots (\text{数} 1 1)$$

$$I_g = I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 n D / + 3 / 4) \\ = I_m + I_r + (2 I_m \cdot I_r)^{1/2} \{ \sin (4 n D /) + \cos (4 n D /) \} \quad \dots (\text{数} 1 2)$$

10

20

30

40

50

$n D / \lambda$) } ・・・ (数
 1 2)

$$I_h = I_m + I_r + 2 (I_m \cdot I_r)^{1/2} \cos (4 \pi n D / \lambda + 7 \pi / 4)$$

$$= I_m + I_r - (2 I_m \cdot I_r)^{1/2} \{ \sin (4 \pi n D / \lambda) + \cos (4 \pi n D / \lambda) \}$$

・・・ (数
 1 3)

変位演算処理ユニット51では、(数14)に基づいて測定対象物31の移動量Dが算出されて、移動量信号61として変位出力ユニット70に表示される。

10

$$D = (\lambda / 4 n) \tan^{-1} [\{ 2^{1/2} (I_g - I_h) - (I_a - I_b) \} / \{ 2^{1/2} (I_e - I_f) + (I_c - I_d) \}]$$

・・・ (数
 4)

本実施例では、参照ミラー9として回折偏光素子(Wire Grid Polarizer)を用いたが、第1の実施例と同様、図4に示すような水平方向に結晶軸方向を有するフォトリック結晶9cを用いることも可能である。また、1/4波長板10も同様に、45°方向に結晶軸方向を有すフォトリック結晶10cを用いることも可能である。

20

【0060】

図9から明らかのように、ターゲットミラー12に向かう測定光6mと参照光6rの2つのビームは、光源ユニットから出射されてセンサユニット100に入射し、参照ミラー9に至るまで、更に参照ミラー9から4つの光電変換素子22で受光されるに至るまで、完全に同一の光路を通る。即ち、共通光路形干渉計の構成となる。従って、仮に光路中に空気の揺らぎ等による温度分布や屈折率分布、あるいは機械振動が生じたとしても、これらの外乱は両ビームに等しく影響を及ぼすため、両ビームが干渉した際にこれら外乱の影響は完全に相殺され、干渉光は外乱の影響を受けない。唯一、参照ミラー9とターゲットミラー12との間の光路において測定光6mのみが存在するが、例えば、走査プローブ顕微鏡等のストロークは高々数百ミクロン程度であるので、参照ミラー9とターゲットミラー12との間隙は1mm以下に設定することが可能であり、このような微小間隙での外乱の影響は無視できる。また、レーザー光自身の強度変動は、(数6)~(数13)においてプローブ光検出強度 I_m 、参照光検出強度 I_r の変動となるが、変位演算処理ユニット50における(数5)の中の減算処理及び除算処理により相殺される。

30

【0061】

さらに本実施例の光干渉変位センサでは、単純な構成で8つの直交偏光ビームを生成し、かつアレイ状に配置した位相シフト素子により空間的に並列に8つの位相シフト干渉光を生成し受光する構成となっているので、従来の位相シフト干渉計に比べ光学部品が大幅に低減し、変位センサが格段に小形化するというメリットがある。具体的には干渉計600の寸法を20×15×50mm以下程度に縮小化可能である。また、8つの位相シフト干渉光が近接した光路を通過するため、光路間に空気の揺らぎ等による温度分布、湿度分布、気圧分布、密度分布、気流変化などの外乱が重畳されたとしても、その影響を最小限に抑えることが可能になる。さらに、本実施例では位相シフト量が $\lambda/4$ と、第1の実施例に比べて1/2になっているので、より精度の高い移動量Dの算出が可能である。

40

【0062】

また、位相シフト素子82、83、84の分割数、及び分割形光電変換素子87の分割数を増やすことで、さらに測定精度を向上させることが可能である。

【0063】

以上より、本実施例の光干渉変位センサにより、温度、湿度、気圧、密度、音響振動といった環境因子を高精度に制御することなく、測定対象物の移動量や位置をサブナノメートルからピコメートル以下の精度で安定に計測することが可能である。また、本実施例の

50

光干渉変位センサを第2の実施例と同様に、図5に示すAFMに搭載することにより、第2の実施例と同様の効果が得られ、探針の位置をサブナノメートルからピコメートル以下の精度で安定に計測することが可能である。その結果、2次元AFM画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。

【0064】

また、本実施例の光干渉変位センサを第3の実施例と同様に、図8に示す表面凹凸欠陥検査装置に搭載することにより、第3の実施例と同様の効果が得られ、試料表面の凹凸欠陥をサブナノメートルからピコメートル以下の感度で安定に計測することが可能である。その結果、例えば、半導体ウェハや、磁気ディスク、磁気ヘッド浮上面などの凹凸欠陥検査の感度を飛躍的に向上させることが可能となる。

10

【実施例5】

【0065】

本発明の第5の実施例を、図12～図14に基づいて説明する。図12に示すように、本実施例の光干渉変位センサは、図示しない光源ユニットと、センサユニット100及び変位出力ユニット70から成る。

【0066】

光源ユニットでは、例えば周波数安定化He-Neレーザからの波長632.8nmの直線偏光レーザ光を、偏波面保存ファイバ2で45°の偏光方向でセンサユニット100に導光する。

【0067】

センサユニット100は、干渉計600及び変位演算処理ユニット52から成る。干渉計600では、第1の実施例と同様、偏波面保存ファイバ2から出射した45°偏光をコリメータ3で平行光4にし、さらにグラントムソンプリズムなどの偏光素子5を透過させ、透過光6を回折光学素子やホログラム素子、あるいはアナモルフィックプリズムペアのようなビーム整形素子80により、矩形形状ビーム91に変換する。矩形形状ビーム91をプリズムミラー7及び無偏光ビームスプリッタ8で反射させて、参照ミラー9に入射させる。

20

【0068】

参照ミラー9は、図2に示すように、合成石英基板9a上にAl等の金属材料で回折格子9bが形成された構成となっている。この回折格子に入射する45°方向の矩形形状偏光ビーム6はベクトル分解された2つの直交偏光成分から成り、回折格子の長手方向と平行なS偏光成分25sは回折格子で反射し、直交するP偏光成分25pは回折格子を透過する。すなわち、この回折格子は、いわゆる回折偏光素子(Wire Grid Polarizer)としての性質を示す。本実施例の場合、回折格子9bのピッチは144nm、線幅は65nm、高さは165nmとした。

30

【0069】

参照ミラー9で反射された矩形形状S偏光ビーム6rは参照光として用いる。透過した矩形形状P偏光ビーム6mは測定光として用いる。矩形形状P偏光ビーム6mは1/4波長板10を透過した後円偏光となり、集光レンズ215により試料210の表面上に直線状に集光される(216)。集光レンズ215のNA(Numerical Aperture: 開口数)を0.8とすると、直線状集光スポット217のスポット幅(長手方向と直交する方向)は約0.8μmとなる。試料210表面からの反射光は集光レンズ215透過後矩形形状ビームとなり、再び1/4波長板10を透過後S偏光となり、参照ミラー9で反射され、1/4波長板10を透過後円偏光として再度集光レンズ215により試料210表面上に直線状に集光される(216)。

40

【0070】

試料210表面からの反射光は集光レンズ215透過後矩形形状ビームとなり、1/4波長板10を透過後P偏光となり、参照ミラー9を透過する。即ち、測定光6mは参照ミラー9と試料210表面との間の光路を2往復することになり、試料210表面の凹凸量を2倍に拡大して検出することになる。参照ミラー9で反射された矩形形状S偏光ビーム6r

50

と透過した矩形状P偏光ビーム6mは、矩形状直交偏光ビーム218として合成され、無偏光ビームスプリッタ8を透過する。直線状集光スポット217の長手方向と矩形状直交偏光ビーム218の長手方向とは共役関係にある。すなわち、矩形状P偏光ビーム6mには、この方向の試料210表面の凹凸分布情報が光位相分布として保存されている。

【0071】

この矩形状直交偏光ビーム218は、位相シフト素子219及び220を透過することにより、直交偏光成分の間に、 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ の位相シフトが与えられた状態で偏光干渉し、直線状集光スポット217の長手方向と直交する方向に分割された4つの位相シフト干渉光221が生成される。

【0072】

位相シフト素子219は、図13に示すように直線状集光スポット217の長手方向と直交する方向に2分割され、下半分が合成石英219dで構成され、上半分はフォトニック結晶219cで構成される。フォトニック結晶219cの構成と原理は第1の実施例と同様であるので、説明を省略する。フォトニック結晶219cは $1/4$ 波長板としての機能を有しており、太い矢印がその結晶軸方向を示している。すなわち、図12に示すように、矩形状直交偏光ビーム218のうちフォトニック結晶219cを透過する直交偏光ビームに関して、2つの偏光成分の間に $\pi/2$ の位相差が生じる。一方、合成石英219dを透過する直交偏光ビームに関しては、2つの偏光成分の間に位相差は生じない。

【0073】

位相シフト素子220は、図13に示すように直線状集光スポット217の長手方向と直交する方向に4分割され、 45° の結晶軸方向を有するフォトニック結晶220aと、逆向きの 45° の結晶軸方向を有するフォトニック結晶220bが交互に並んでいる。フォトニック結晶220a及び220bは偏光素子としての機能を有しており、太い矢印がその結晶軸方向を示している。すなわち、図12に示すように、矩形状直交偏光ビーム218のうちフォトニック結晶220aを透過する直交偏光ビームを構成する2つの偏光成分と、フォトニック結晶220bを透過する直交偏光ビームを構成する2つの偏光成分との間に、相対的に π の位相差が与えられた状態で、両偏光成分は干渉する。

【0074】

すなわち、位相シフト素子219及び220を透過した矩形状直交偏光ビーム218の長手方向と直交する方向の各直交偏光成分の間に、 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ の位相シフトが与えられた状態で偏光干渉し、直線状集光スポット217の長手方向と直交する方向に4分割され、かつ直線状集光スポット217の長手方向に共役な位相シフト干渉光221が生成される。位相シフト干渉光221は、外乱光の影響を避けるため、波長 632.8nm に透過中心波長を有する干渉フィルタ86を透過した後、図14に示すように、直線状集光スポット217の長手方向と位相シフト素子220の4つの領域に対応したN画素 $\times 4$ の受光領域から成るフォトダイオードアレイなどの分割形光電変換素子222で各々受光され、増幅器223で増幅された後、 $N \times 4$ 個の位相シフト干渉信号224として出力される。

【0075】

図14に示すように、受光領域222a及び222bがそれぞれ図13の位相シフト素子220のフォトニック結晶220a及び220bに対応する。N画素分に対応した4つの位相シフト干渉信号は、第1の実施例と同様、各々(数1)~(数4)で与えられ、変位演算処理ユニット52では、(数5)に基づいてN個の各画素毎に試料210の表面凹凸量Dの1次元分布が算出されて、表面凹凸信号230として変位出力ユニット70に表示される。

【0076】

本実施例では、参照ミラー9として回折偏光素子(Wire Grid Polarizer)を用いたが、第1の実施例と同様、図4に示すような水平方向に結晶軸方向を有するフォトニック結晶9cを用いることも可能である。また、 $1/4$ 波長板10も同様に、 45° 方向に結晶軸方向を有すフォトニック結晶10cを用いることも可能である。

10

20

30

40

50

た、第4の実施例と組み合わせて、位相シフト量を / 8 ずつに増やすことも可能である。その場合は、分割形光電変換素子 2 2 2 は、2次元の固体撮像素子を用いることも可能である。

【0077】

図12から明らかなように、試料 2 1 0 表面に向かう測定光 6 m と参照光 6 r の2つのビームは、光源ユニットから出射されてセンサユニット 1 0 0 に入射し、参照ミラー 9 に至るまで、更に参照ミラー 9 から光電変換素子 2 2 2 で受光されるに至るまで、完全に同一の光路を通る。即ち、共通光路形干渉計の構成となる。従って、仮に光路中に空気の揺らぎ等による温度分布や屈折率分布、あるいは機械振動が生じたとしても、これらの外乱は両ビームに等しく影響を及ぼすため、両ビームが干渉した際にこれら外乱の影響は完全に相殺され、干渉光は外乱の影響を受けない。また、レーザ光自身の強度変動は測定光 6 m と参照光 6 r に等しく影響するので干渉の際に相殺され、また測定された8つ位相シフト干渉光にも等しく重畳されるため、変位演算処理ユニット 5 2 における(数5)の中の減算処理においても相殺される。

10

【0078】

さらに本実施例の光干渉変位センサでは、単純な構成で4つの直交偏光ビームを生成し、かつアレイ状に配置した位相シフト素子により空間的に並列に4つの位相シフト干渉光を生成し受光する構成となっているので、従来の位相シフト干渉計に比べ光学部品が大幅に低減し、変位センサが格段に小形化するというメリットがある。また、4つの位相シフト干渉光が近接した光路を通過するため、光路間に空気の揺らぎ等による温度分布、湿度分布、気圧分布、密度分布、気流変化などの外乱が重畳されたとしても、その影響を最小限に抑えることが可能になる。

20

【0079】

以上より、本実施例の光干渉変位センサにより、温度、湿度、気圧、密度、音響振動といった環境因子を高精度に制御することなく、測定対象物の移動量や位置をサブナノメートルからピコメートル以下の精度で安定に計測することが可能である。また、本実施例の光干渉変位センサから変位出力ユニット 7 0 を撤去した上で、第3の実施例と同様に図8に示す表面凹凸欠陥検査装置に搭載することにより、第3の実施例と同様の効果が得られ、試料表面の凹凸欠陥をサブナノメートルからピコメートル以下の感度で安定に計測することが可能である。その結果、例えば、半導体ウェハや、磁気ディスク、磁気ヘッド浮上面などの凹凸欠陥検査の感度を飛躍的に向上させることが可能となる。特に、本実施例の場合、直線状集光スポット 2 1 7 を用いることにより、XもしくはYの1方向のみの走査で2次元領域の凹凸分布情報が短時間で得られるという利点を有する。

30

【産業上の利用可能性】

【0080】

以上説明したように、本発明によれば、極めて小形の光干渉変位センサで対象物の変位量あるいは移動量を外乱の影響なく高精度に求めることが可能となり、さらに適用対象も大幅に拡大する。その結果、サブナノメートル以下の精度で、AFMを始めとする走査プローブ顕微鏡の探針走査が可能となり、サブナノメートル以下の分解能でかつ高い再現性で、半導体デバイスを始めとする微細な立体構造素子の光学情報や微小凹凸情報の測定が可能になるという効果を奏する。また、半導体ウェハや磁気ディスク、磁気ヘッド浮上面のサブナノメートル以下の微小凹凸分布や微小凹凸欠陥の検査が可能になるという効果を奏する。さらに、これらの測定結果を素子製造プロセス条件にフィードバックすることで、信頼性の高いデバイス、メディアの高歩留まり生産が可能になる。

40

【符号の説明】

【0081】

1・・・光源ユニット 2、2x、2y、2z・・・偏波面保存ファイバ 3・・・コリメータ 5・・・偏光素子 7・・・プリズムミラー 8・・・無偏光ビームスプリッタ 9・・・参照ミラー 10・・・1/4波長板 12、12x、12y、12z・・・ターゲットミラー 14、17、81、218・・・直交偏光ビーム

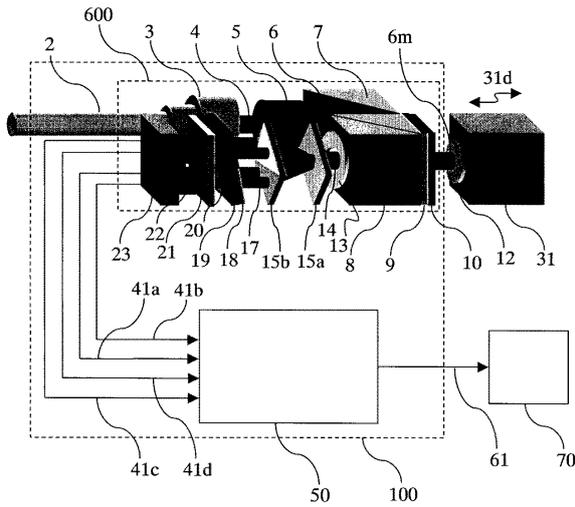
50

13・・・開口 15a、15b・・・四角錐プリズム 18、19、82、83、84、219、220・・・位相シフト素子
 9c、10c、18c、19a、19b、82c、82d、83c、83d、84a、84b、219c、220a、220b・・・フォトニック結晶 20、85、221・・・位相シフト干渉光
 21、86・・・干渉フィルタ 22・・・光電変換素子 23、88、223・・・増幅器
 31・・・測定対象物 41a、41b、41c、41d、89a、89b、89c、89d、89e、89f、89g、89h、224・・・位相シフト干渉信号
 50、51、52・・・変位演算処理ユニット 61、61x、61y、61z、230・・・移動量信号、凹凸測定信号 70・・・変位出力ユニット 80・・・ビーム整形素子
 87、222・・・分割形光電変換素子 100、100x、100y、100z・・・センサユニット 150・・・XYZ圧電素子アクチュエータ
 160・・・カンチレバー 170・・・探針 180・・・半導体レーザ 181・・・駆動回路
 190・・・4分割ポジションセンサ 200、210・・・試料 215・・・集光レンズ
 300、350・・・XYZステージ 400、450・・・走査制御ユニット 410・・・画像形成ユニット
 420、470・・・全体制御ユニット 430、480・・・出力ユニット 460・・・欠陥検出ユニット
 500・・・モニタ光学系ユニット 600・・・干渉計 700、1000・・・ステージユニット
 800・・・AFMユニット 900、1200・・・信号処理・制御ユニット
 1100・・・表面検査ユニット

10

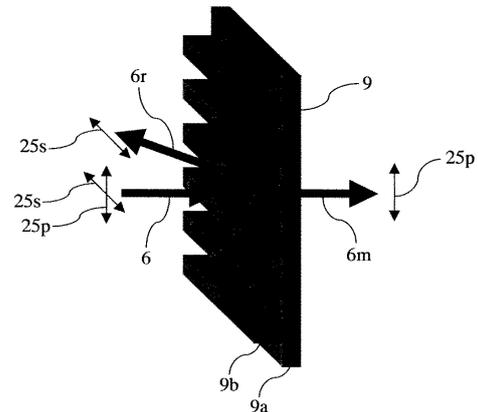
【図1】

図1

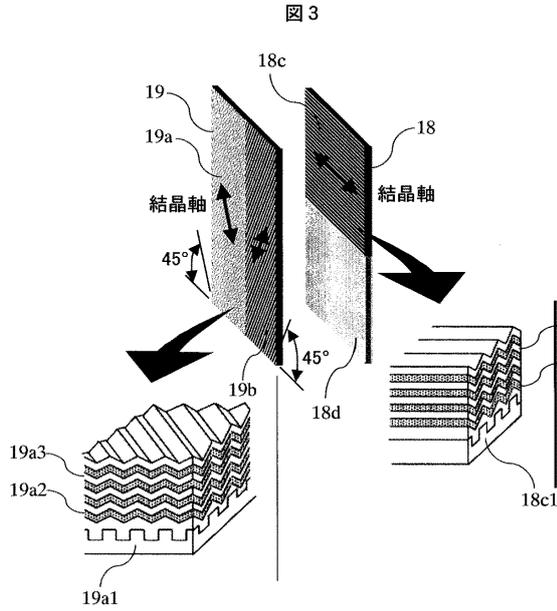


【図2】

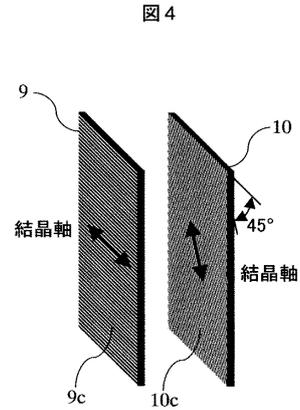
図2



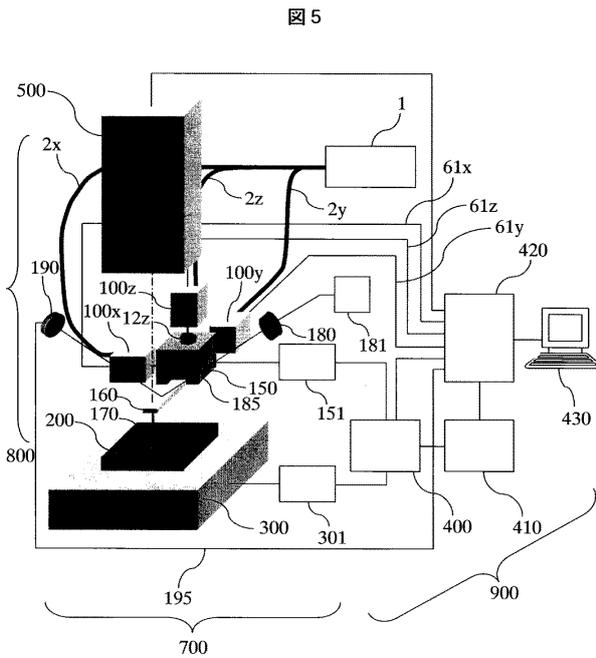
【 図 3 】



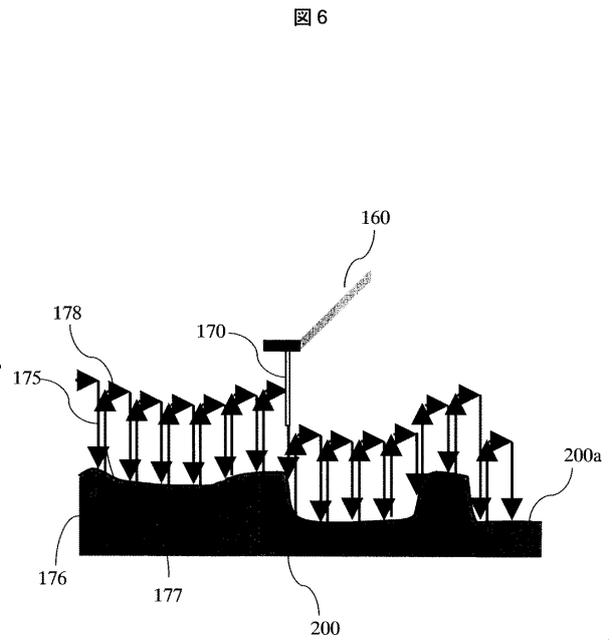
【 図 4 】



【 図 5 】

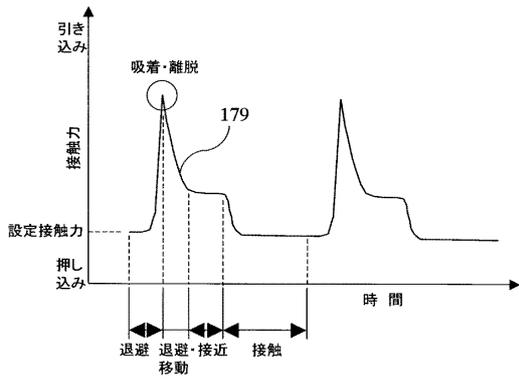


【 図 6 】



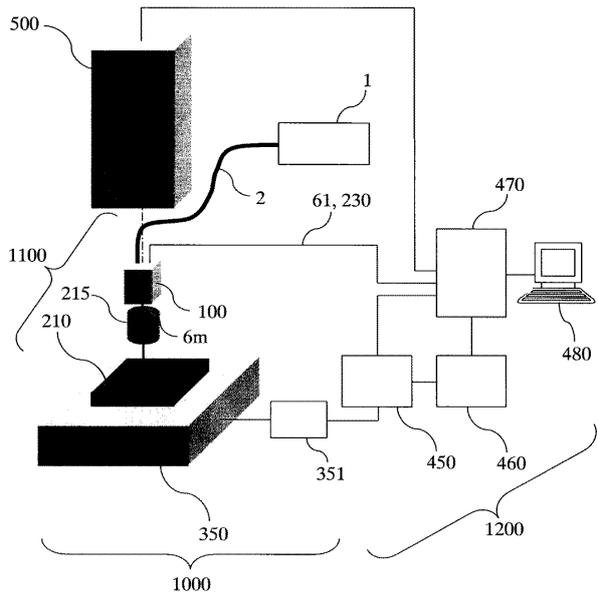
【図7】

図7



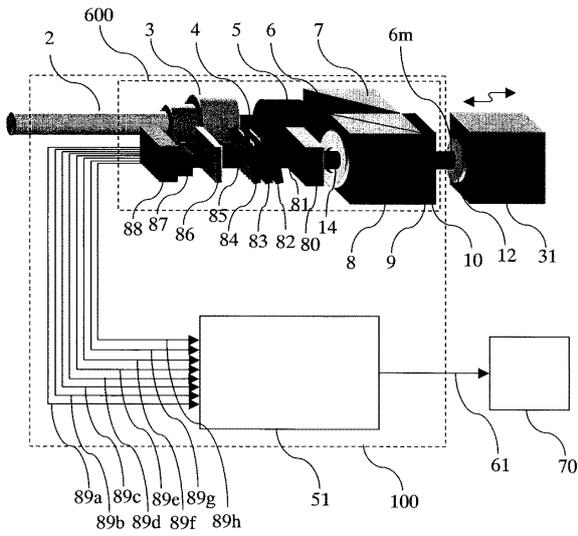
【図8】

図8



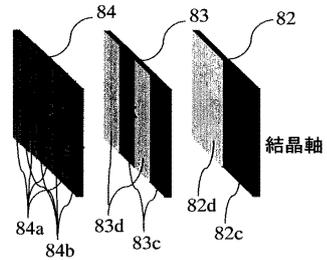
【図9】

図9



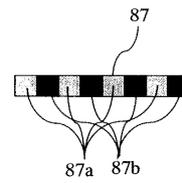
【図10】

図10



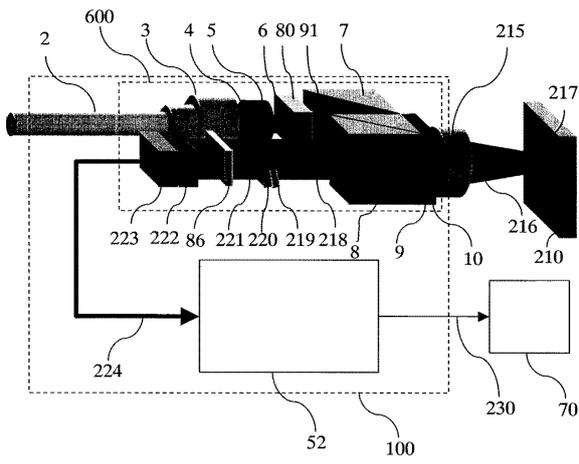
【図11】

図11



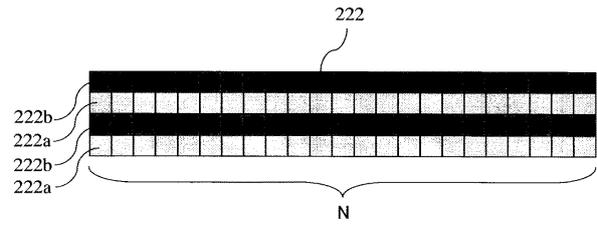
【 図 1 2 】

図 1 2



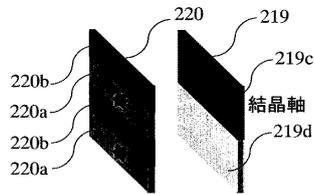
【 図 1 4 】

図 1 4



【 図 1 3 】

図 1 3



フロントページの続き

合議体

審判長 清水 稔

審判官 関根 洋之

審判官 森 竜介

- (56)参考文献 特開2007-51900(JP,A)
特開2000-258124(JP,A)
特開2007-46938(JP,A)
特開2007-86720(JP,A)
国際公開第2004/008196(WO,A1)
特開2007-17388(JP,A)
特開2007-85764(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B9/02

G01B11/00-11/30

G01Q10/00-90/00

G02B5/30