

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4731951号
(P4731951)

(45) 発行日 平成23年7月27日 (2011.7.27)

(24) 登録日 平成23年4月28日 (2011.4.28)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 L 21/027 (2006.01)

H O 1 L 21/30 5 1 4 E

G O 1 B 9/02 (2006.01)

H O 1 L 21/30 5 1 6 A

G O 1 J 9/02 (2006.01)

G O 1 B 9/02

G O 1 M 11/02 (2006.01)

G O 1 J 9/02

G O 3 F 7/20 (2006.01)

G O 1 M 11/02

B

請求項の数 10 (全 16 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2005-53445 (P2005-53445)
 (22) 出願日 平成17年2月28日 (2005.2.28)
 (65) 公開番号 特開2006-237494 (P2006-237494A)
 (43) 公開日 平成18年9月7日 (2006.9.7)
 審査請求日 平成20年2月25日 (2008.2.25)

(出願人による申告) 平成13年度新エネルギー・産業
 技術総合開発機構民間基盤技術試験研究業務委託研究、
 産業活力再生特別措置法第30条の適用を受けるもの

(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 100126240
 弁理士 阿部 琢磨
 (74) 代理人 100124442
 弁理士 黒岩 創吾
 (72) 発明者 加藤 正磨
 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 秋田 将行

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 干渉縞の解析方法及び装置、測定装置、露光装置及びデバイス製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光の干渉によって生じる干渉縞の解析方法であって、
 2つの光の干渉によって生じる第1の干渉縞の情報を取得する工程と、
 前記2つの光の少なくとも一方の位相を、 n を整数とすると、 $(2n+1)$ ラジアン
 変化させて生成される第2の干渉縞の情報を取得する工程と、
 前記取得された第1と第2の干渉縞の情報に基づき、フーリエ変換を利用して前記第1
 と第2の干渉縞の位相情報を平均した情報を求める工程とを有することを特徴とする干渉
 縞の解析方法。

【請求項2】

前記平均した情報を求める工程は、前記第1の干渉縞の情報からフーリエ変換を利用し
 て該干渉縞の位相情報を求める工程と、前記第2の干渉縞の情報からフーリエ変換を利用
 して該干渉縞の位相情報を求める工程と、前記干渉縞の2つの位相情報を平均する工程と
 を含むことを特徴とする請求項1記載の解析方法。

【請求項3】

前記平均した情報を求める工程は、前記第1と第2の干渉縞の情報を平均する工程と、
 前記平均された干渉縞の情報からフーリエ変換を利用して該平均された干渉縞の位相情
 報を求める工程とを含むことを特徴とする請求項1記載の解析方法。

【請求項4】

前記第1と第2の干渉縞は、点回折干渉又はシアリング干渉を利用して生成されること

を特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項記載の解析方法。

【請求項 5】

前記シアリング干渉は、直交する 2 つの方向に周期を有する直交回折格子を用いた 2 次元シアリング干渉であることを特徴とする請求項 4 記載の解析方法。

【請求項 6】

前記直交回折格子を、前記 2 つの周期方向のいずれに対しても 4 5 度異なる方向に前記直交回折格子を移動することにより前記干渉する 2 つの光の少なくとも一方の位相を変化させることを特徴とする請求項 5 記載の解析方法。

【請求項 7】

干渉縞を解析する解析装置であって、2 つの光の干渉によって生じる第 1 の干渉縞の情報と、前記 2 つの光の少なくとも一方の位相を、 n を整数とすると、 $(2n + 1)$ ラジアン変化させて生成される第 2 の干渉縞の情報とを検出する検出手段と、

前記検出手段により検出された前記第 1 と第 2 の干渉縞の情報に基づき、フーリエ変換を利用して前記第 1 と第 2 の干渉縞の位相情報を平均した情報を求める演算手段と、を有することを特徴とする解析装置。

【請求項 8】

被検光学系の波面収差を測定する測定装置において、前記被検光学系を透過した 2 つの光の干渉によって生じる第 1 の干渉縞と、前記 2 つの光の少なくとも一方の位相を、 n を整数とすると、 $(2n + 1)$ ラジアン変化させて生成される第 2 の干渉縞とを測定する測定手段と、

前記測定手段により測定された前記第 1 と第 2 の干渉縞の情報に基づき、フーリエ変換を利用して前記第 1 と第 2 の干渉縞の位相情報を平均した情報を求めて前記被検光学系の波面収差を求める演算手段と、を有することを特徴とする測定装置。

【請求項 9】

光源からの光束を用いてマスクを照明し、投影光学系を介して前記マスクのパターンの像を基板に投影する露光装置において、

請求項 8 に記載の測定装置を有し、

前記測定装置は前記投影光学系の波面収差を測定することを特徴とする露光装置。

【請求項 10】

請求項 9 に記載の露光装置を用いて基板を露光するステップと、

該露光された基板を現像するステップとを有することを特徴とするデバイスの製造方法

。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は干渉計、該干渉計で得られる干渉縞の解析方法、該干渉計を搭載する露光装置及び該露光装置を用いた半導体デバイスの製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、光学系の光学特性、特に光学系を透過或いは反射する光の波面又は波面収差の測定に干渉計が利用されている。干渉計を利用した光学系の波面計測は、高精度に被検光学系を透過或いは反射する光の波面を測定できるため、収差を厳しく管理する必要のある光学系の光学特性の測定に適している。

【0003】

このような光学系の一例として、半導体素子や液晶デバイス等を製造する際のフォトリソグラフィ工程で使用される投影型露光装置（以下、露光装置）の光学系がある。かかる露光装置は、マスク（レチクル）のパターンを所定の倍率で正確に被露光体に転写することが要求され、このために結像性能のよい、収差を抑えた投影光学系を用いることが重要である。

【0004】

10

20

30

40

50

特に近年、半導体デバイスの一層の微細化の要求により、転写するパターンもより微細なものが求められている。これを実現するため、露光装置の光学系の収差をより高精度に管理する必要があり、このため高精度に投影光学系の波面を高精度に測定する需要が存在する。

【0005】

光学系の波面を高精度に測定する干渉方式としては、例えば点回折干渉計測法 (Point Diffraction Interferometry) 及びシアリング干渉計測法 (Lateral Shearing Interferometry) が知られている (例えば、特許文献1、2、3及び非特許文献1)。

【0006】

ところで、点回折干渉計測法やシアリング干渉計測法も含め、干渉法を用いた波面計測では、干渉計によって計測された干渉縞を解析し、波面収差 (波面の位相分布) を求める工程が必要である (本明細書では、この干渉縞から波面収差を求める作業を波面回復、或いは波面を回復する、と表現する)。この、干渉縞から波面を回復する方法として、位相シフト法と、フーリエ変換 (高速フーリエ変換含む) を用いたフーリエ変換法とが知られている。

【0007】

位相シフト法による波面回復は、干渉させる2つの光の位相差を互いに異ならせて (位相シフトさせて) 観察した複数枚の干渉縞画像を利用する方法である。複数枚の干渉縞の強度変化から干渉縞を検出する検出器上の各画素の初期位相を決定し、求めた位相マップを波長スケールに換算したものが波面となる。

【0008】

一方、フーリエ変換法による波面回復は、波面に含まれる被検光学系の収差成分が干渉縞のキャリア縞を乱す性質を利用してキャリア縞と収差成分を分離する方法である。具体的には干渉縞に2次元FFT (高速フーリエ変換) を行い、周波数マップに変換する。周波数マップ上のキャリア周波数近傍のみを切り出してキャリア周波数が原点になるように座標変換をした上で、iFFT (逆高速フーリエ変換) を行い複素振幅マップの位相項を求める。その結果得られた位相マップが波面収差となる。フーリエ変換法については、非特許文献1の491 - 494頁に記載がある。

【0009】

フーリエ変換法は1枚の干渉縞画像から波面を回復することができる。これに対し、位相シフト法は、例えば5枚、7枚、13枚といった複数枚の干渉縞画像を観察する必要がある。このため、計測時間の点において、フーリエ変換法は位相シフト法に対して有利である。また、位相シフト法は、複数枚の干渉縞を観察する際、光源の光量変動があると測定結果に誤差が生じる。これに対し、フーリエ変換法は干渉縞画像の空間周波数を解析することにより波面を回復するので、原理的に光量変動の影響を受けない。この点においてもフーリエ変換法は位相シフト法に対して有利である。

【特許文献1】特開昭57-064139号

【特許文献2】米国特許第5835217号

【特許文献3】特開2000-097666号

【非特許文献1】Daniel Malacara, "Optical Shop Testing", John Wiley & Sons, Inc. 231 (1978)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

しかしながらFFT法には位相シフト法にはない課題が存在する。一般的に被検光学系の集光点は被検光学系の収差や他の要因によりある広がりを持っている。その広がりの裾が干渉縞に寄与する別の集光点に及ぶと誤差要因になる。本明細書では集光点の広がりによる裾の光を便宜的に集光点のフレアと呼ぶことにする。フーリエ変換法では干渉縞の空間的な変移から波面収差を求めるため被検光以外の光がフレアとして混入すると干渉縞の

10

20

30

40

50

位置が動き本来には無い収差が得られてしまう。尚、フレアについては発明を実施するための最良の形態の欄についてより詳細に説明する。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明の一形態は、光の干渉によって生じる干渉縞の解析方法であって、2つの光の干渉によって生じる第1の干渉縞の情報を取得する工程と、前記2つの光の少なくとも一方の位相を、 n を整数とすると、 $(2n+1)$ ラジアン変化させて生成される第2の干渉縞の情報を取得する工程と、前記取得された第1と第2の干渉縞の情報に基づき、フーリエ変換を利用して前記第1と第2の干渉縞の位相情報を平均した情報を求める工程とを有することを特徴としている。

10

【0012】

また、本発明の別の形態は、干渉縞を解析する解析装置であって、2つの光の干渉によって生じる第1の干渉縞の情報と、前記2つの光の少なくとも一方の位相を、 n を整数とすると、 $(2n+1)$ ラジアン変化させて生成される第2の干渉縞の情報を検出する検出手段と、前記検出手段により検出された前記第1と第2の干渉縞の情報に基づき、フーリエ変換を利用して前記第1と第2の干渉縞の位相情報を平均した情報を求める演算手段と、を有することを特徴としている。また、本発明の別の形態は、被検光学系の波面収差を測定する測定装置において、前記被検光学系を透過した2つの光の干渉によって生じる第1の干渉縞と、前記2つの光の少なくとも一方の位相を、 n を整数とすると、 $(2n+1)$ ラジアン変化させて生成される第2の干渉縞とを測定する測定手段と、前記測定手段により測定された前記第1と第2の干渉縞の情報に基づき、フーリエ変換を利用して前記第1と第2の干渉縞の位相情報を平均した情報を求めて前記被検光学系の波面収差を求める演算手段と、を有することを特徴としている。

20

【発明の効果】

【0013】

本発明により、被検光学系の光学特性を高精度に測定することが可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

まず、フレアについて、点回折干渉計(PDI)を例に挙げて、より詳細に説明する。それに先立ち、点回折干渉計の原理について述べる。

30

【0015】

図1は、点回折干渉計の概略模式図である。図1において、13が光学特性を測定する被検光学系である。不図示の光源から射出した光束10は、不図示の照明光学系を経て被検光学系13の物体面に配置されたマスク11を照明する。マスク11には微小なピンホール11aが形成されており、光束10はピンホール11aを透過し、後段の回折格子12に入射する。ピンホール11aは光束10の波長に対して十分小さく、ここを透過した光は理想的な球面波となって射出される。

【0016】

ピンホール11aから射出した理想球面波は、回折格子12により、0次光19(実線)と1次光18に分離し、被検光学系13に入射する。そして、被検光学系13を射出した光は像面に結像する。このとき、被検光学系13に収差があると、0次光19と1次光18の波面は収差に応じて変形し、収差情報を有する波面となって像面に結像している。

40

【0017】

像面にはマスク14面が配置されている。マスク14には、図2に示すようにピンホール14aと窓(開口)14bとが形成されており、0次光19はピンホール14a、1次光18は窓14bの位置に結像するように配置されている。

【0018】

ピンホール14aはピンホール11aと同様、入射光の波長に対して十分小さく、ピンホール14aに入射する光を理想球面波として射出する機能を有する。他方、窓14bは入射光に対して十分大きく、この窓に入射する光は波面の形を殆ど変えずに射出する。

50

【 0 0 1 9 】

故に、ピンホール 1 4 a を射出した 0 次光 1 9 は再び理想球面波になり、参照波面となる。一方窓 1 4 b を通過した 1 次光 1 8 は、被検光学系 1 3 b の収差情報を含んだままであるので被検波面となる。

【 0 0 2 0 】

参照波面である 0 次光 1 9 と被検波面である 1 次光 1 8 は共に検出器 1 5 に入射し、両者の干渉縞が検出器 1 5 により観察される。検出器は、C C D のような受光手段が用いられる。

【 0 0 2 1 】

以上が点回折干渉法の基本的な原理であり、検出器 1 5 により観察された干渉縞からフーリエ変換法により波面を回復することができる。

10

【 0 0 2 2 】

続いて、点回折干渉法におけるフレアについて説明する。

【 0 0 2 3 】

点回折干渉法では、像面側のマスク 1 4 のピンホール 1 4 a と窓 1 4 b にそれぞれ 0 次光 1 9 と 1 次光 1 8 が集光する。理想的には、0 次光 1 9 のみがピンホール 1 4 a を通過し、1 次光 1 8 のみが窓 1 4 b を通過することが望ましい。

【 0 0 2 4 】

ところが、現実には 0 次光 1 9 が窓 1 4 b を通過してしまう場合がある。図 3 にマスク 1 4 上での 0 次光 1 9 と 1 次光 1 8 の強度分布を示す。図 3 は理解を助けるため、誇張した状態での強度分布を記している。0 次光 1 9 と 1 次光 1 8 は、それぞれピンホール 1 4 a と窓 1 4 b 付近にピークを有し、その左右に裾野をひいて広がる強度分布を有する。そして、0 次光 1 9 の分布の裾が窓 1 4 b にさしかかっている。これは、0 次光 1 9 の一部が窓 1 4 b に入射していることを示している。理想的には、0 次光 1 9 はピンホール 1 4 a にのみ入射することが望ましいので、窓 1 4 b に 0 次光 1 9 が入射することは望ましくない。この入射することが望ましくない光がフレアである。この状態で得られる干渉縞は、窓 1 4 b から射出した光は被検波面である 1 次光 1 8 に、0 次光 1 9 のフレアが重なった波面となるので、被検光学系の収差情報の他にフレアの影響を含む干渉縞となってしまう。つまり、フレアがない場合とフレアがある場合とで、干渉縞の位置が変化してしまう。

20

30

【 0 0 2 5 】

フーリエ変換法による波面回復は干渉縞の空間的な変移から波面を求めている。このため、被検光 (1 次光 1 8) 以外の光が混入すると干渉縞の位置が変化し、回復した波面は被検光以外の光の影響を受ける。このような光のうち最も影響の大きいものが前述の集光点の広がりによるフレアである。

【 0 0 2 6 】

このような干渉縞からフーリエ変換法により波面回復を行うと、得られる波面は被検光学系 1 3 の収差の他にフレアの影響を含んだ波面となるため、被検光学系 1 3 の波面を正確に知ることが困難になる。

【 0 0 2 7 】

以上が、フレアとその干渉縞への影響である。

40

【 0 0 2 8 】

続いて、本発明を実施例を交えて説明する。

【 0 0 2 9 】

以下の様々な実施例では、フレアが干渉縞に影響を及ぼしている場合の、そのフレアの影響を低減する手法について示している。実施例 1 では点回折干渉方式 P D I の構成を例に用いてフレアが波面に影響を及ぼすプロセスとそれをキャンセルする方法を示している。実施例 2 では直交格子 (2 次元回折格子) を用いたシアリング方式 (C r o s s G r a t i n g L a t e r a l S h e a r i n g I n t e r f e r o m e t r y ; C G L S I) を用いて 2 つの干渉縞をフーリエ変換法により波面回復した後に平均化する場合

50

の実施形態を示している。実施例 3 では直交格子を用いたシアリング方式 C G L S I を用いて請求項 1 記載の 2 つの干渉縞を干渉縞の時点で平均化し、その後 Fourier 変換法により波面回復を行い、被検光学系 13 の透過波面を求める場合の実施例を示している。

【 0 0 3 0 】

(実施例 1)

実施例 1 は、点回折干渉法を用いた波面計測において、フレアの影響を低減して波面を回復する方法に関する実施例である。干渉計の構成は図 1 と同じである。

【 0 0 3 1 】

図 1 の回折格子 12 により回折された光のうち像面で 0 次光のフレアが 1 次光の集光点位置まで広がっていると、1 次回折光の複素振幅に 0 次光のフレアの複素振幅が加わり、正しい位相を求めることができなくなる。ここでいう正しい位相とは 1 次回折光の複素振幅の位相項にあたる数値のことである。窓 14 b の透過光の、1 次光とフレアの合成複素振幅は式 (1) で表される。

10

【 0 0 3 2 】

【 数 1 】

$$Te^{i\theta} + fe^{i(\theta-\alpha)} \quad \begin{pmatrix} T: \text{被検光の振幅} \\ f: \text{フレアの振幅} \end{pmatrix}$$

$$\approx Te^{i(\theta - \frac{f}{T} \sin \alpha)} \quad (\text{但し } f \ll T) \quad (1)$$

20

【 0 0 3 3 】

ここで α は被検光に相当する 1 次光とフレアの位相差である。 α は求める被検光学系 13 の透過波面である、1 次光 18 の位相である。フレアの影響による位相変化は α とする。検出器 15 で検出される干渉縞は、式 (1) に相当する窓 14 b 透過光とピンホール 14 a から射出される理想球面波との干渉により生じる干渉縞である。理想球面波の複素振幅を S とすると、検出器 15 で検出される干渉縞強度 I は式 (2) で表され、フレアによる位相変化 (= 誤検出量) φ を求めることができる。

【 0 0 3 4 】

【 数 2 】

$$I = \left| S + Te^{i(\theta - \frac{f}{T} \sin \alpha)} \right|^2$$

$$= |S|^2 + |T|^2 + 2|S||T| \cos(\theta - \frac{f}{T} \sin \alpha)$$

$$\therefore \varphi = -\frac{f}{T} \sin \alpha \quad [\text{rad.}] \quad (2)$$

30

【 0 0 3 5 】

被検光 (1 次光 18) がフレアの影響を最も受けるのは、フレアと被検光の位相差が $\pi/2$ のときである。このときフレアによる位相エラーは式 (3) で表される。

40

【 0 0 3 6 】

【 数 3 】

$$\varphi \cong \frac{f}{T} \quad (3)$$

【 0 0 3 7 】

またフレアによる位相は瞳上では十分にランダムとみなせるため位相エラーの実効値は式 (4) になる。

【 0 0 3 8 】

【数 4】

$$\varphi_{ave} \cong \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{f}{T} \quad (4)$$

【0039】

上記のようなフレアの影響をキャンセルするために以下を行う。まず、所定の状態 1 で検出器 15 により干渉縞を計測する。この干渉縞の強度 I 及びフレアによる位相変化は式 (2) に記した通りである。次に、この所定の状態から、回折格子 12 を格子の周期方向、すなわち図 1 の x 軸方向に格子ピッチの半分だけ移動させる。この状態を状態 2 とする。回折格子 12 を格子ピッチの半分移動させると、0 次光 19 の位相は変化しないが、1 次光 18 の位相は移動させる前に比べ進む。そして、この状態 2 で検出器 15 により干渉縞を計測する。これにより得られる干渉縞の干渉縞強度 I_1 とフレアによる位相変化 φ_1 は次の式 (5) により表される。

10

【0040】

【数 5】

$$Te^{i(\theta+\pi)} + fe^{i(\theta-\alpha)} \approx Te^{i(\theta+\frac{f}{T}\sin\alpha_1)} \quad (\text{但し } f \ll T)$$

$$I_1 = |S|^2 + |T|^2 + 2|S||T|\cos(\theta + \frac{f}{T}\sin\alpha)$$

$$\varphi_1 \approx +\frac{f}{T}\sin\alpha \quad [\text{rad.}] \quad (5)$$

20

【0041】

式 (1) と式 (5) を比較すると、フレアによる位相変化 φ_1 の値が格子を移動する前の値 φ_1 と符号が反転している。このため、2 つの波面を平均すればフレアの影響をキャンセルすることが可能となる。

【0042】

即ち、状態 1 と状態 2 で得られる干渉縞から、フーリエ変換法によりそれぞれ波面を回復し、これらの回復された 2 つの波面を平均することによりフレアの影響をキャンセルした波面を得ることができる。平均化された波面は、フレアの影響がキャンセルもしくは大幅に低減されたものであるため、被検光学系 13 の透過波面を高精度に求めることができ、被検光学系 13 の収差 (光学特性) を高精度に測定することが可能となる。

30

【0043】

図 4 に実際にフレアの影響が反転した実験結果を示す。実験は点回折干渉計にて回折格子を格子ピッチの $1/4$ ずつ動かして十分多い数の干渉縞を取得し、フーリエ変換法で回復した多数の波面を平均した波面を基準とし、格子が初期状態 (状態 1) の波面収差と格子が $1/2$ ピッチ移動した状態 (状態 2) の波面収差がこの基準波面に対しどの程度差があるかを示している。図 4 の横軸は、表示は波面に対し Zernike 級数展開を行った際に得られる Zernike 係数の第 5 - 36 項で表し、各項が波面収差の独立な成分を示している。縦軸は、各係数の値を示しており、単位は RMS である。

40

【0044】

図 4 において、実線 (0 pitch) は状態 1 から得られる波面収差の測定結果、破線 ($1/2$ pitch) は状態 2 から得られる波面収差の測定結果である。両者ともに、フレアの影響により収差の測定結果が基準波面と一致していない。ただし、両者は横軸に対しほぼ対称である。つまり、両者を平均することにより、互いのフレアの影響がキャンセルされ、ほぼ基準波面と一致した測定結果が得られるということである。

【0045】

以上が実施例 1 の説明である。本実施例ではフレアとなる光と被検光との位相差を異ならせた 2 つの状態干渉縞を観察し、これらの干渉縞からフーリエ変換法により回復した波面を平均することにより、フレアの影響をキャンセルした波面を求めている。

50

【 0 0 4 6 】

また、実施例 1 では、位相を 異ならせた 2 つの状態 で干渉縞を観察しているが、位相が の奇数倍、即ち $(2n + 1)$ 異なれば同様の効果を得られる。

【 0 0 4 7 】

また、2 回干渉縞を観察しているにもかかわらず、観察中の時間的な光量変動の影響を受けないというフーリエ変換法の長所が残る点も特筆すべき点である。これはフーリエ変換法によって波面を回復した後に 2 つの波面を平均するため、互いの干渉縞強度には影響されないためである。

【 0 0 4 8 】

(実施例 2)

次に、実施例 2 について説明する。実施例 1 は点回折干渉法を用いたのに対し、実施例 2 はシアリング干渉法を用いている。シアリング干渉法には幾つか種類が存在するが、本実施例では直交回折格子 (2 次元回折格子) を用いた方式、Cross Grating Lateral Shearing Interferometry (以下、CGLSI) を用いている。

【 0 0 4 9 】

図 5 は CGLSI の概略模式図である。図 1 と共通する構成については、同じ符号で示している。図 5 において、物体面に配置されたピンホール 1 1 から射出した理想球面波は、回折格子 4 0 に入射する。回折格子 4 0 は図 6 (a) に示すように、格子が x 軸方向と y 軸方向の直交する 2 方向に刻まれた 2 次元回折格子である。回折格子 4 0 に入射した光は、x 軸方向と y 軸方向のそれぞれにおいて、所定の次数の回折光が生じる。図 5 では、0 次光 3 0 と x 軸方向の + 1 次回折光 3 1 (点線) と、- 1 次回折光 3 2 (点線) を記している。図 5 には不図示であるが、y 軸方向にも同様に ± 1 次光が生じ、これらの回折光が被検光学系 1 3 に入射している。

【 0 0 5 0 】

被検光学系を透過した回折光は、被検光学系に収差が存在する場合は各々その収差に応じて波面形状が理想球面波から変形した状態で、像面の所定位置にそれぞれ結像する。像面にはマスク 4 1 が配置されている。

【 0 0 5 1 】

マスク 4 1 の構成を図 7 に示す。マスク 4 1 には、開口である窓 4 1 a が 4 箇所形成されている。被検光学系を透過した x 軸、y 軸方向、 ± 1 次光の 4 つの回折光は、対応する 4 つの窓 4 1 a に各々集光し、窓 4 1 a を通過し、検出器 1 5 上に干渉縞を形成する。これに対し、0 次光はマスク 4 1 の窓 4 1 a に囲まれた領域に集光し、ここでマスク 4 1 によって遮光される。本実施例の CGLSI において、0 次光は干渉計測には不要な 0 次光である。

【 0 0 5 2 】

ここで、0 次光の強度分布の裾野が窓 4 1 a にまで広がりを持つと、実施例 1 と同じ理由により 0 次光の一部がフレアとなり、干渉縞に影響を及ぼす。

【 0 0 5 3 】

本実施例の CGLSI では、x 軸、y 軸方向の ± 1 次光の 4 つの回折光が干渉するため、検出器 1 5 では格子状の干渉縞が計測される。CGLSI では被検光学系の透過波面を横ずらし (シア) した差分波面に対応する干渉縞が観察される。そこで、x 方向にシアした干渉縞情報から回復できる差分波面を X シア波面、y 方向にシアした干渉縞情報から回復できる差分波面を Y シア波面と呼ぶ。このとき X シア波面はと Y シア波面は、格子状の干渉縞の縦方向の縞と横方向の縞からそれぞれ独立に求めるため、フレアの影響も同様に独立して考えることが可能である。

【 0 0 5 4 】

本実施例の CGLSI は実施例 1 の点回折干渉 (PDI) とは異なる点が 2 点ある。具体的には、(1) ± 1 次回折光を干渉させる点、(2) 直交格子を使用する点である。従って、検出器 1 5 の受光面上には (1) の理由により + 1 次光と - 1 次光にそれぞれフレ

10

20

30

40

50

アの影響が含まれる。+ 1 次光の位相 p 、- 1 次光の位相 m とすると、シアリングではシア位相 $p - m$ を求める必要がある。C G L S I の受光面上のある位置における複素振幅は式 (6) で表され、このとき干渉縞強度 I_2 とフレアによる位相変化 φ_2 は式 (7) で示される。

【 0 0 5 5 】

【数 6】

$$Te^{i\theta p} + fe^{i(\theta p - \alpha p)} + Te^{i\theta m} + fe^{i(\theta m - \alpha m)} \\ \approx Te^{i(\theta p - \frac{f}{T} \sin \alpha p)} + Te^{i(\theta m - \frac{f}{T} \sin \alpha m)} \quad (\text{但し } f \ll T) \quad (6)$$

10

【 0 0 5 6 】

【数 7】

$$I_2 = \left| Te^{i(\theta p - \frac{f}{T} \sin \alpha p)} + Te^{i(\theta m - \frac{f}{T} \sin \alpha m)} \right|^2 \\ = 2|T|^2 + 2|T|^2 \cos(\theta p - \theta m - \frac{f}{T} \sin \alpha p + \frac{f}{T} \sin \alpha m) \\ \therefore \varphi_2 = -\frac{f}{T} (\sin \alpha p - \sin \alpha m) \quad [\text{rad.}] \quad (7)$$

20

【 0 0 5 7 】

式中の p は + 1 次光の集光点に及ぶ 0 次光のフレアの位相と + 1 次光の位相 p との差である。式中の m は - 1 次光の集光点に及ぶ 0 次光のフレアの位相と + 1 次光の位相 m との差である。上式のフレアの影響 φ_2 に注目すると実施例 1 と同様に、格子位置が 1 / 2 ピッチ異なる状態を取得した 2 つの干渉縞を各々フーリエ変換法で波面回復し、平均することによりフレアの影響 φ_2 がキャンセルされた波面が得られることがわかる。

【 0 0 5 8 】

故に、 x 軸方向に直交格子の位置を 1 / 2 ピッチ異ならせた状態で 2 つの干渉縞を取得し、これらを各々フーリエ変換法による波面回復を行い、平均することでフレアの影響をキャンセルした X シア波面を得ることができる。同様に、 y 軸方向に直交格子の位置を 1 / 2 ピッチ異ならせた状態で 2 つの干渉縞を取得し、これらを各々フーリエ変換法による波面回復を行い、平均することでフレアの影響をキャンセルした Y シア波面を得ることができる。

30

【 0 0 5 9 】

また、C G L S I は (2) の理由により直交格子を x 軸又は y 軸方向に移動させても 2 次元格子のうち 1 次元しか格子の位置が動かない。このため、格子の移動方向を x 軸又は y 軸に沿って動かすと、少なくとも 2 回格子を移動させて干渉縞を観察する必要がある。そこで格子の移動方向を x 軸と y 軸の両方に対して 45 度傾けた方向 ($x - y$ 座標面内において直線 $y = \pm x$ に沿った方向) に移動させる。この方向に x 軸、 y 軸とも 1 / 2 ピッチ移動させると、 x 、 y 両方向の干渉縞の観察を 1 回の移動により行うことができ、計測時間を短縮することができる。この様子を図 6 (b) に示した。図 6 (b) は、図 6 (a) の状態から $y = x$ の方向に格子が移動した様子を示しており、格子の移動量の x 方向、 y 方向成分は各々 1 / 2 ピッチである。

40

【 0 0 6 0 】

以上により、フレアの影響をキャンセルした X、Y シア波面を得ることが可能となる。そして、これら得られた X、Y シア波面を公知の積分作業と合成作業を行うことにより、フレアの影響を除いて被検光学系 13 の透過波面を測定することができる。

【 0 0 6 1 】

(実施例 3)

続いて、実施例 3 について説明する。実施例 3 は、実施例 2 と同じく C G L S I を用い

50

ている。CGLSIを用いて、干渉縞を観察する工程までは実施例2と同じなので、説明は省略する。

【0062】

実施例2では、検出器15で観察される複数枚の干渉縞それぞれについてフーリエ変換法を用いて波面回復を行い、回復した波面を適宜平均している。これに対し、本実施例では観察される干渉縞を平均した後にフーリエ変換法による波面回復を行っている。

【0063】

±1次光を干渉させるシアリング干渉方式の場合、格子位置を1/2ピッチ移動させると、+1次光の位相は進み、-1次光の位相は遅れるため、結果として±1次光の干渉により得られる干渉縞の位相は2変化する。このため、格子を移動させる前と1/2ピッチ移動させた後では検出器15の受光面上での干渉縞位置が変わらない。一方フレアの影響は実施例2で説明したとおり、格子の移動前後で反転する。

【0064】

つまり、格子移動前後で得られる2つの干渉縞は、縞の位置が変化しないにもかかわらずフレアの影響が反転している。このため、2つの干渉縞画像を平均すると被検光としての被検光学系の収差情報を保存したまま、フレアの影響がキャンセルされた干渉縞を得ることができる。

【0065】

以下に格子位置を1/2ピッチ移動させたときの検出器15の受光面上のある位置の干渉縞強度 I_3 とフレアによる誤検出量 I_3 を式(8)に示す。

【0066】

【数8】

$$I_3 = 2T^2 + 2T^2 \cos(\theta p - \theta m + \frac{f}{T} \sin \alpha p - \frac{f}{T} \sin \alpha m)$$

$$\therefore \varphi_3 = + \frac{f}{T} (\sin \alpha p - \frac{f}{T} \sin \alpha m) \quad [rad.] \quad (8)$$

【0067】

式(7)と式(8)の干渉縞強度を平均すると式(9)のようになり

【0068】

【数9】

$$I_2 + I_3 = 2T^2 + 2T^2 \cos(\theta p - \theta m) \cos\left\{\frac{2f}{T} (\sin \alpha p - \sin \alpha m)\right\}$$

$$\approx 2|T|^2 + 2|T|^2 \cos(\theta p - \theta m) \quad (\because f \ll T) \quad (9)$$

【0069】

これから、検出面上でフレアの影響が除去されたシア波面 $p - m$ に対応する干渉縞が検出されることがわかる。この干渉縞をフーリエ変換法により波面回復を行うと、フレアの影響が除去されたシア波面を得ることができる。

【0070】

この方式は、個々の干渉縞をフーリエ変換法により波面回復した後に平均する方法に比べ、波面回復を行う回数を少なくできるため計測時間の短縮に有利である。また、フーリエ変換及び関連する諸演算を行う回数が少ないので、演算による誤差を低減することができる点においても有利である。

【0071】

(露光装置の実施例)

次に、実施例1～3の干渉測定装置を搭載した投影露光装置の実施例について説明する。

【0072】

10

20

30

40

50

実施例 1 ~ 3 では、フレアの影響をキャンセルして被検光学系を透過する波面を計測する干渉測定方法及び干渉測定装置について説明した。これらの干渉測定装置は高精度に被検光学系の透過波面を計測することが可能なため、高精度な収差管理が要求される露光装置の光学系の光学特性の測定に適している。

【 0 0 7 3 】

特に、近年露光装置の光源波長は短波長化する傾向にあり、それに伴い光学系に許容される波面収差の値も極めて小さくなっている。例えば、光源波長約 1 3 . 5 n m の極端紫外光 (E x t r e m e U l t r a v i o l e t L i g h t ; E U V 光) を用いた E U V 露光装置の投影光学系に許容される波面収差は 0 . 4 n m (R M S) 程度である。

【 0 0 7 4 】

この投影光学系を $\lambda = 1 3 . 5 \text{ nm}$ の波長を使った点回折干渉計を用いて測定する場合のフレアの影響を具体的な数値を用いて示す。0 次光の広がりによって発生するフレアの強度は 0 次光の強度の 0 . 0 4 % で、1 次光の強度は 0 次光強度の 8 . 2 % である場合、実施例 1 の式 (4) にこれらの値を代入し $\lambda / 2$ を掛けて長さスケールに換算すると $a_{v e} = 0 . 1 \text{ nm (RMS)}$ と計算される。つまり、フレアの影響が約 0 . 1 n m (R M S) 存在することになり、0 . 4 n m (R M S) 程度の波面収差の計測を行うには無視できない大きさである。

【 0 0 7 5 】

また、前述の各実施例の干渉計を露光装置本体に搭載することにより、露光装置のメンテナンス時等に光学系の光学特性の測定を行えるようになり、有利である。以下、前述の各実施例の干渉計を露光装置本体に搭載した実施例について説明する。

【 0 0 7 6 】

レチクル (マスク) のパターンを投影光学系を介してレジストの塗布されたウエハに露光する投影露光装置に、本発明の干渉測定装置を露光装置に搭載することにより、露光装置本体上での投影光学系の光学特性 (波面収差) を高精度に測定することが可能となる。

【 0 0 7 7 】

図 8 は本実施例の投影露光装置の概略構成図である。図 8 において、5 1 はエキシマレーザ等の露光光源、5 2 は引き回し光学系、5 3 は照明光学系である。5 4 はレチクルステージ、5 5 はレチクル、5 6 は投影光学系、5 7 はウエハステージ、5 8 はウエハである。露光の際は、露光光源から射出した露光光は、引き回し光学系 5 2、照明光学系 5 3 を経てレチクルステージ 5 4 に配置されたレチクル 5 5 を照明する。露光光で照明されたレチクル上の回路パターンは、投影光学系 5 6 によりウエハステージ 5 7 に設置されたウエハ面に結像することにより、レチクルのパターンがウエハに露光される。

【 0 0 7 8 】

次に、本実施例の干渉測定装置により投影光学系 5 6 の光学特性 (波面収差) を測定する場合について説明する。本実施例では、干渉測定用の光源として、露光光、照明光学系として、露光用の照明光学系 5 3 を兼用している。5 9 はピンホールが形成された物体側マスクであり、レチクルステージ 5 4 に保持されている。6 0 は光分割手段としての回折格子であり、不図示の保持部材により所定の位置に保持されている。6 1 はウエハステージに保持された像側マスクであり、スリットと窓が形成されている。6 2 は C C D である。

【 0 0 7 9 】

露光光源か 5 1 からの光は、物体側マスク 5 9 を照明し、物体側マスク 5 9 からは理想球面波が射出される。射出された球面波は回折格子 6 0 により分割され、0 次光は投影光学系 5 6 を経て像側マスク 6 1 のスリットに集光し、1 次光は像側マスク 6 1 の窓に集光する。そして、各々参照光と被検光となり、干渉縞を C C D 6 2 に形成する。C C D 6 2 で得られたデータは通信手段 6 3 により不図示の演算器に送信され、該演算器により干渉縞に基づいて投影光学系 5 6 の光学特性が算出される。

【 0 0 8 0 】

本実施例では、干渉測定装置により投影光学系 5 6 の光学特性を高精度に測定すること

10

20

30

40

50

ができるため、投影光学系 5 6 の収差を良好に抑えることができ、引いてはレチクルのパターンを高精度にウエハに露光することが可能となる。

【 0 0 8 1 】

また、本実施例では露光光源と干渉測定用の光源を流用しているが、干渉測定用の光源として別の光源、例えばアライメント用の光源を用いることも可能である。

【 0 0 8 2 】

また、本実施例では、露光光源としてエキシマレーザ光を使用しているが、露光光源もこれに限られるものではない。例えば、EUV光を露光光源とする露光装置にも本発明は適用可能である。EUV光の場合は、光学系はレンズ等の屈折光学素子ではなく、全てミラー等の反射光学素子により構成される。

【 0 0 8 3 】

次に、本発明の干渉測定装置を搭載した露光装置を用いたデバイスの製造方法の実施例について説明する。図 9 は、半導体デバイス（IC や LSI 等の半導体チップ、あるいは液晶パネルや CCD 等）の製造を説明するためのフローチャートである。ステップ 1（回路設計）では、半導体デバイスの回路設計を行う。ステップ 2（マスク製作）では、設計した回路パターンを形成したマスクを製作する。一方、ステップ 3（ウエハ製造）では、シリコン等の材料を用いてウエハを製造する。ステップ 4（ウエハプロセス）は、前工程と呼ばれ、上記用意したマスクとウエハを用いて、リソグラフィ技術によってウエハ上に実際の回路を形成する。次のステップ 5（組み立て）は後工程と呼ばれ、ステップ 4 によって作製されたウエハを用いて半導体チップ化する工程であり、アセンブリ工程（ダイシング、ボンディング）、パッケージング工程（チップ封入）等の工程を含む。ステップ 6（検査）では、ステップ 5 で作製された半導体デバイスの動作確認テスト、耐久性テスト等の検査を行う。こうした工程を経て半導体デバイスが完成し、これが出荷（ステップ 7）される。

【 0 0 8 4 】

図 10 は、図 9 のステップ 4 のウエハプロセスの詳細なフローチャートである。ステップ 11（酸化）では、ウエハの表面を酸化させる。ステップ 12（CVD）では、ウエハ表面に絶縁膜を形成する。ステップ 13（電極形成）では、ウエハ上に電極を蒸着等によって形成する。ステップ 14（イオン打ち込み）ではウエハにイオンを打ち込む。ステップ 15（レジスト処理）ではウエハに感光材を塗布する。ステップ 16（露光）では、露光装置 10 によってマスクパターンをウエハに露光する。ステップ 17（現像）では露光したウエハを現像する。ステップ 18（エッチング）では、現像したレジスト像以外の部分を削り取る。ステップ 19（レジスト剥離）では、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除く。これらのステップを繰り返し行うことによって、ウエハ上に多重に回路パターンが形成される。本実施形態の製造方法を用いれば、投影光学系 5 6 の結像性能を迅速かつ簡易に取得することができるので、露光のスループットも低下せず、また、波面収差が高精度に補正された投影光学系 5 6 を使用することができる。このため、従来は製造が難しかった高解像度のデバイス（半導体素子、LCD 素子、撮像素子（CCD など）、薄膜磁気ヘッドなど）を経済性及び生産性よく製造することができる。波面収差が補正された投影光学系 5 6 は、ウエハステージのアライメントを高精度に行う。また、このように、露光装置を使用するデバイス製造方法、並びに結果物（中間、最終生成物）としてのデバイスも本発明の一側面を構成する。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 8 5 】

【図 1】PDI の光学配置

【図 2】ピンホール付マスクの図

【図 3】マスク面上での回折光の強度分布を示す図

【図 4】フレアの影響が反転する実験結果

【図 5】CGLSI の光学配置

【図 6】直交格子 42 の移動方向

10

20

30

40

50

【図 7】C G L S I 用 4 窓付きマスクの図

【図 8】干渉計を搭載した露光装置の図

【図 9】図 8 の露光装置を使用したデバイスの製造方法を示すフローチャート

【図 10】図 9 のフローチャートのステップ 4 のウエハプロセスの詳細なフローチャート

【符号の説明】

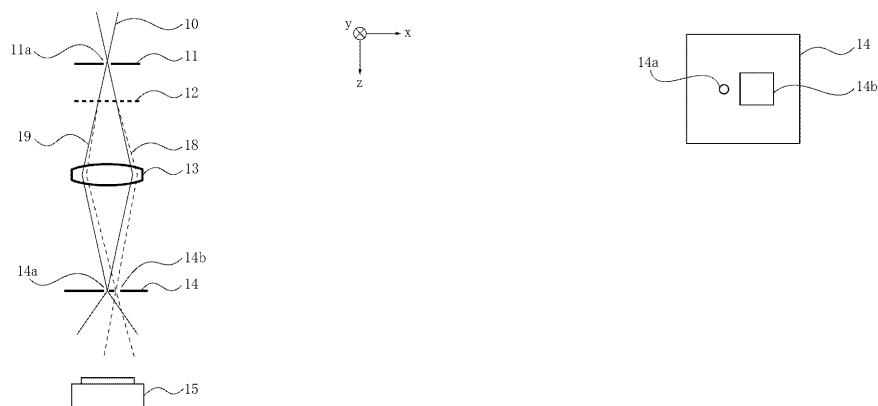
【 0 0 8 6 】

- 1 0 照明光
- 1 1 物面マスク
- 1 2 1 次元回折格子
- 1 3 被検光学系
- 1 4 像面マスク
- 1 5 検出器
- 4 0 直交回折格子
- 4 1 4 つ窓付像面マスク

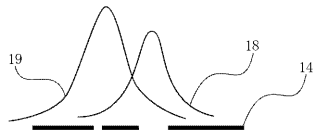
10

【図 1】

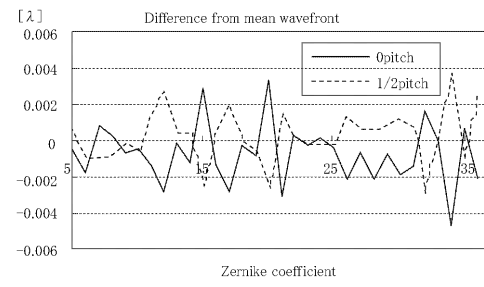
【図 2】



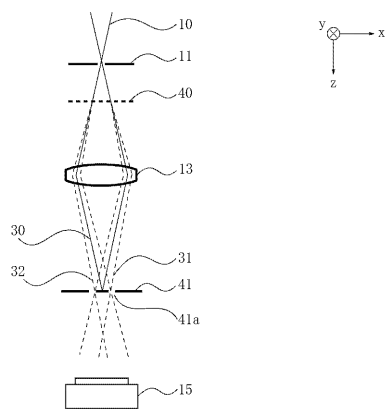
【図 3】



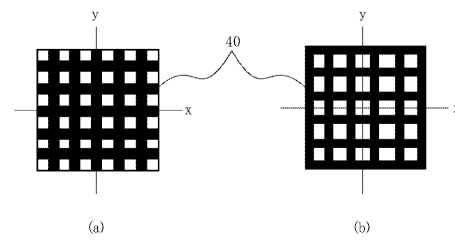
【図 4】



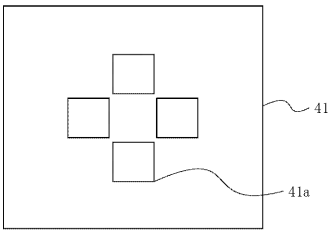
【図 5】



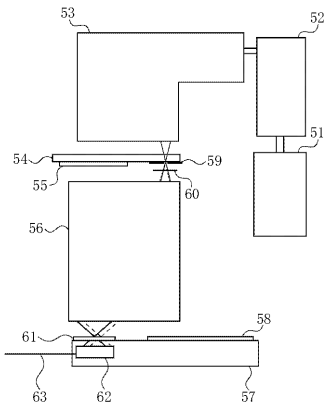
【図 6】



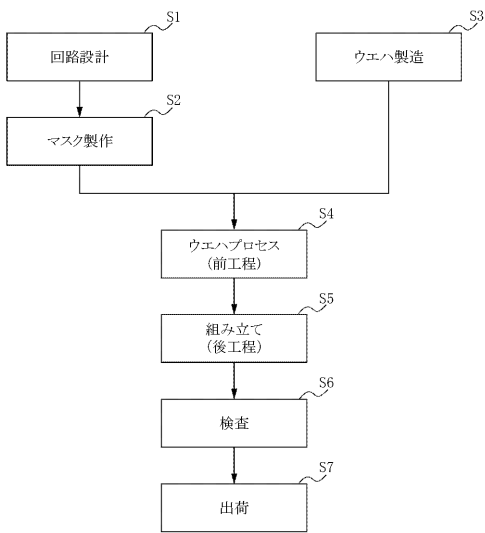
【図 7】



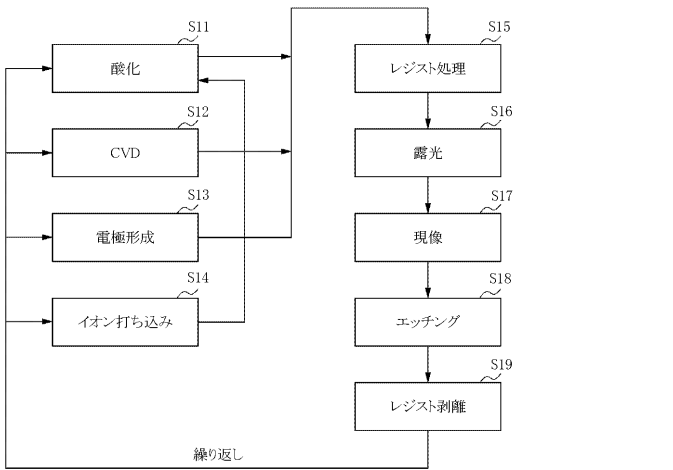
【図 8】



【図 9】



【図 10】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
G 0 3 F 7/20 5 2 1

(56)参考文献 特開 2 0 0 3 - 3 0 2 2 0 5 (J P , A)
特開 2 0 0 2 - 3 0 3 5 0 8 (J P , A)
特開 2 0 0 2 - 1 6 2 2 1 4 (J P , A)
特開 2 0 0 1 - 9 9 6 2 4 (J P , A)
米国特許出願公開第 2 0 0 5 / 0 0 0 7 6 0 2 (U S , A 1)
特開 2 0 0 3 - 1 2 4 1 0 9 (J P , A)
特開 2 0 0 0 - 9 7 6 1 6 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)
H 0 1 L 2 1 / 0 2 7
G 0 1 M 1 1 / 0 2
G 0 1 B 9 / 0 2