

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2007-198896

(P2007-198896A)

(43) 公開日 平成19年8月9日(2007.8.9)

(51) Int.CI.	F 1	テーマコード (参考)
GO1M 11/02 (2006.01)	GO1M 11/02	B 2G059
GO1J 4/04 (2006.01)	GO1J 4/04	Z 2G086
GO1N 21/23 (2006.01)	GO1N 21/23	5FO46
GO1N 21/45 (2006.01)	GO1N 21/45	A
HO1L 21/027 (2006.01)	HO1L 21/30	516A
審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 31 頁)		最終頁に続く
(21) 出願番号	特願2006-17561 (P2006-17561)	(71) 出願人 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
(22) 出願日	平成18年1月26日 (2006.1.26)	(74) 代理人 100110412 弁理士 藤元 亮輔 (72) 発明者 塙出 吉宏 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 Fターム (参考) 2G059 AA02 BB08 BB15 EE05 EE09 JJ19 MM01 2G086 HH07 5F046 BA03 CB12 CB25 DA13 DB05

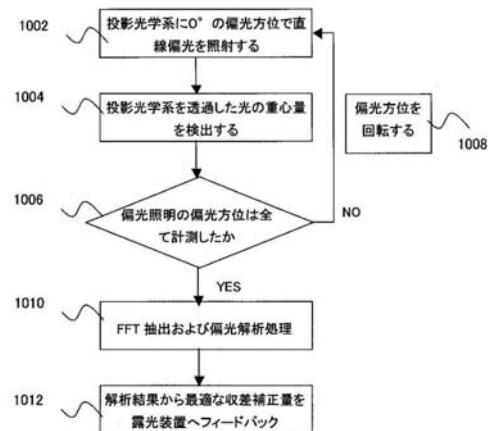
(54) 【発明の名称】計測方法

(57) 【要約】

【課題】波長板や偏光子などの光学素子を使用しないで被検光学系の偏光光学特性を従来よりも単純に計測する方法に関する。

【解決手段】被検光学系に複数の異なる偏光状態の光を照射し、前記被検光学系の複屈折量 R と進相軸 c を含む偏光光学特性を計測する方法であって、前記被検光学系に方位 θ の前記光を照射し、前記被検光学系を透過した前記光の重心量 P を取得するステップと、 $P = -R \cdot c \cos(\theta)$ 又は $R = c \cos(\theta)$ から前記複屈折量 R と前記進相軸 c を取得するステップとを有することを特徴とする方法を提供する。

【選択図】図 2 6



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

被検光学系に複数の異なる偏光状態の光を照射し、前記被検光学系の複屈折量 R と進相軸 を含む偏光光学特性を計測する方法であって、

前記被検光学系に方位 の前記光を照射し、前記被検光学系を透過した前記光の重心量 P を取得するステップと、

$P = -R \cdot \cos(2\theta) + R \cdot \cos(2\phi)$ から前記複屈折量 R と前記進相軸 を取得するステップとを有することを特徴とする方法。

【請求項 2】

前記複屈折量 R と進相軸 を取得するステップは、n を整数とし、前記被検光学系のジョーンズ行列の固有ベクトルの一対の直交する方向の要素の位相差を n と近似することを特徴とする請求項 1 記載の方法。 10

【請求項 3】

前記偏光光学特性は次式で定義されるジョーンズ行列 M を更に含み、

前記方法は、異なる 2 つの偏光状態の前記光を前記被検光学系に照射した場合の透過率 A 及び A' を計測することによって前記ジョーンズ行列 M を取得するステップを更に有することを特徴とする請求項 1 記載の方法。 20

$$\begin{aligned} M &= [A \cdot \exp(-i \cdot m), a \cdot \exp(-i \cdot b); a \cdot \exp(i \cdot b), A' \cdot \exp(i \cdot m)] \\ a &= 2A'' \cdot \sin R \cdot Ex \cdot Ey, \\ A'' &= (A+A')/2, \\ b &= \pm \pi/2, \\ m &= \arg\{A \cdot Ey^2 \cdot \exp(-i \cdot R) + A' \cdot Ex^2 \cdot \exp(i \cdot R)\}, \\ Ex &= \sqrt{(1 + \cos \phi)/2}, \\ Ex^2 + Ey^2 &= 1, \end{aligned}$$

【請求項 4】

被検光学系に複数の異なる偏光状態の光を照射し、前記被検光学系の偏光光学特性を計測する方法であって、

前記被検光学系のジョーンズ行列の固有ベクトルを直線偏光と近似計算した結果から得られる前記偏光光学特性の値と前記被検光学系の前記偏光光学特性の実測値との関係を取得するステップと、 30

前記被検光学系の複屈折により分かれた前記光の 2 つの光線のそれぞれの位相と光強度で決定される前記光の重心量を取得するステップと、

前記重心量と前記関係に基づいて前記偏光光学特性を算出するステップとを有することを特徴とする方法。 30

【請求項 5】

前記関係は 1 対 1 の比例関係であることを特徴とする請求項 4 記載の方法。

【請求項 6】

前記被検光学系は複屈折量が 30 度以下であることを特徴とする請求項 1 又は 4 記載の方法。 40

【請求項 7】

前記光の偏光方位を回転するステップを更に有することを特徴とする請求項 1 又は 4 記載の方法。

【請求項 8】

前記光の重心量を取得するステップは、点回折干渉法、シェアリング干渉法又はハルトマン法を利用することを特徴とする請求項 1 又は 4 記載の方法。

【請求項 9】

前記被検光学系は露光装置の投影光学系であり、請求項 1 又は 4 に記載の方法によって計測された前記偏光光学特性に基づいて調整されたことを特徴とする露光装置。

【請求項 10】

10

20

30

40

50

請求項 8 記載の露光装置を利用して被露光体を露光するステップと、
露光された前記被露光体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製造
方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、被検光学系の偏光光学特性を計測する計測方法に関する。本発明は、例えば、投影露光装置の投影光学系の偏光光学特性（複屈折量、進相軸及びジョーンズ行列）の計測に好適である。

【背景技術】

【0002】

フォトリソグラフィー技術を用いて微細な半導体デバイスを製造する際、投影露光装置が従来から使用されている。投影露光装置は、レチクル（又はマスク）に形成されたパターンを、投影光学系を介して、ウェハ等の被処理体に転写する。かかる露光装置は、レチクル上のパターンを、所定の倍率で正確に被処理体に転写することが要求されるため、結像性能のよい投影光学系を用いることが重要である。また、結像性能を向上させるため偏光照明も使用されるようになってきた。そこで、投影光学系の偏光光学特性を高精度に測定する需要が存在する。なお、生産性や経済性を高めるためには計測の単純化も重要である。

【0003】

複屈折は通常はある厚さの試料を光が通過した後の位相差を測定し、それを試料の厚さで規格化することで求められる。以下、この量を「複屈折量又はリターダンス」という。また、リターダンスに加えて投影光学系の進相軸やジョーンズ行列を取得することも重要なである。

【0004】

リターダンスの典型的な計測法であるセナルモン法は1/4波長板と偏光子を組み合わせて試料透過後の楕円偏光を直線偏光に戻して楕円率と楕円主軸の方向を決定し、楕円偏光解析することでリターダンスを求める。回転検光子（偏光子）・位相子法などの強度からリターダンスを求める方法も1/4波長板と偏光子を使用する。光ヘテロダイン干渉法では1/2波長板と偏光子とを使用してリターダンスを求める。

【0005】

従来技術としては、例えば、特許文献1及び2、非特許文献1がある。

【特許文献1】特開2004-61515号公報

【特許文献2】特開平11-054411号公報

【非特許文献1】Yasuyuki Unno ‘Influence of birefringence on the image formation of high-resolution projection optics’ 1 July 2000 / Vol. 39, No. 19 / APPLIED OPTICS

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

従来のリターダンス（偏光解析）計測では1/2波長板や1/4波長板、偏光子・検光子などの光学素子を利用していた。本来複雑なシステムにこれらの光学素子を組み込むことは設計的負荷が大きくコストアップを招く。

【0007】

本発明は、波長板や偏光子などの光学素子を使用しないで被検光学系の偏光光学特性を従来よりも単純に計測する方法に関する。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の一側面としての計測方法は、被検光学系に複数の異なる偏光状態の光を照射し

10

20

30

40

50

、前記被検光学系の複屈折量 R と進相軸 を含む偏光光学特性を計測する方法であって、前記被検光学系に方位 の前記光を照射し、前記被検光学系を透過した前記光の重心量 P を取得するステップと、 $P = -R \cdot \cos(2\theta_j)$ 又は $R \cdot \cos(2\theta_j)$ から前記複屈折量 R と前記進相軸 を取得するステップとを有することを特徴とする。

【0009】

本発明の別の側面としての計測方法は、被検光学系に複数の異なる偏光状態の光を照射し、前記被検光学系の偏光光学特性を計測する方法であって、前記被検光学系のジョーンズ行列の固有ベクトルを直線偏光と近似計算した結果から得られる前記偏光光学特性の値と前記被検光学系の前記偏光光学特性の実測値との関係を取得するステップと、前記被検光学系の複屈折により分かれた前記光の 2 つの光線のそれぞれの位相と光強度で決定される前記光の重心量を取得するステップと、前記重心量と前記関係に基づいて前記偏光光学特性を算出するステップとを有することを特徴とする。

10

【0010】

前記被検光学系は露光装置の投影光学系であり、上述の計測方法によって計測された前記偏光光学特性に基づいて調整されたことを特徴とする露光装置も本発明の一側面を構成する。本発明の更に別の側面としてのデバイス製造方法は、上述の露光装置を用いて被露光体を露光するステップと、露光された前記被露光体を現像するステップとを有することを特徴とする。

20

【0011】

本発明の更なる目的又はその他の特徴は、以下、添付図面を参照して説明される好ましい実施例によって明らかにされるであろう。

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、波長板や偏光子などの光学素子を使用しないで被検光学系の偏光光学特性を従来よりも単純に計測する方法を提供することができる。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

本実施例は、被検光学系に複数の異なる偏光状態の光を照射することで観測されるそれぞれの偏光照射ごとの観測光を、光学素子等による特定の偏光方向の光抽出を行うことなく得られた光情報を評価することで、近似的に被観測物の偏光光学特性を解析する。ここで、「光情報」とは複屈折により分かれた 2 つの光線それぞれの位相と光強度で決定される光の重心量であり、これから近似的に偏光光学特性を算出する。

30

【0014】

理想的な透過率 100% のレンズは対角なユニタリ行列である。そしてその主軸に回転を与える行列 $\text{Rot}(\theta_j)$ と $\text{Rot}(-\theta_j)$ を挟み込んで掛けてやれば、1 枚の理想レンズをジョーンズ行列で表現することができる。ジョーンズ行列は偏光計算を行なう上で一般に使用される便利な行列である。光をジョーンズベクトルという偏光した光だけで記述し（通常 XY 平面内で偏光を記述する場合 2×1 行列）、それに対し同じく試料又は光学素子を偏光表記した 2×2 行列で表すことで、演算を単純化できる。

40

【0015】

先の行列式に戻って Rot 行列もまたユニタリなため両者の積はやはりユニタリとなる。次に露光装置などにおける投影光学系全体のジョーンズ行列を考える。露光装置の投影光学系は多くのレンズで構成されている。従って、ジョーンズ行列は、1 枚レンズのジョーンズ行列をレンズ枚数又はレンズ面数分掛け合わせて数式 1 に示すように、表現することができる。

【0016】

【数 1】

$$M' = \prod \text{Rot}(-\theta_j) \cdot [\exp(-iR_j/2), 0; 0, \exp(iR_j/2)] \cdot \text{Rot}(\theta_j)$$

50

【0017】

ここで、Rはリターダンス、 θ_j はM'の主軸と入射偏光方位のなす角、jはレンズ番号である。

【0018】

数式1は 2×2 の行列を $[(1, 1), (1, 2); (2, 1), (2, 2)]$ と表記している。明らかにジョーンズ行列M'もユニタリ行列である(非特許文献1)。

【0019】

実際のレンズでは透過率が僅かながら落ちるため、投影光学系全体の透過率は波長や硝材にも依るが数%~数10%のオーダーで低下する。従って、実際の投影光学系のジョーンズ行列は数式2で示され、ユニタリ行列ではなくなるとも考えられる。ここで、A, A'は実数又は透過率である。

10

【0020】

【数2】

$$M'' = [R \cdot \text{Rot}(-\theta_j) \cdot [A_j \cdot \exp(-iR_j/2), 0; 0, A'_j \cdot \exp(iR_j/2)] \cdot R \cdot \text{Rot}(\theta_j)]$$

【0021】

しかし、投影光学系は高透過率で複屈折量も小さく抑えられ、理想レンズに近いと考えられるため、数式2のジョーンズ行列M''の特性も未だユニタリ性を持つとみなせる。実際にM''を解析するとM''には2つの固有ベクトルが存在し、それらはほぼ等しい長さを持ったベクトルであるが、互いに共役な関係ではなくほぼ直交することがわかった。解析は数式3の固有値問題を解くことで行った。

20

【0022】

【数3】

$$M \cdot X = X \cdot L$$

【0023】

数式3より固有ベクトルXの要素である2つのベクトルを直交するようにとる。そこで、この2つの固有ベクトルの方向について、その関係を複素座標系でずれた関係であると仮定して以下の検討を行った。

30

【0024】

【数4】

$$X = [E_x, E_y \cdot \exp(i \cdot (\pi + \xi)); E_y \cdot \exp(i \cdot \xi), E_x]$$

【0025】

【数5】

$$L = [A \cdot \exp(-i \cdot R), 0; 0, A' \cdot \exp(i \cdot R)]$$

【0026】

【数6】

$$M = X \cdot L \cdot \text{inv}(X)$$

40

【0027】

【数7】

$$E_x^2 + E_y^2 = 1$$

【0028】

【数8】

$$\text{Det}(X) \simeq 1$$

【0029】

数式8は後程述べる $= n$ 、 n は整数という条件より成り立つ。

【0030】

ここで、 M は被検光学系のジョーンズ行列、 X は固有ベクトル、 L は固有値、 A, A' は実数、 E_x, E_y は実数の単位ベクトルの要素、 θ は E_x と E_y の位相差である。 10

【0031】

被検光学系 S に方位 θ の直線偏光を入射させ、 透過後の光を E' とするとき次式で表される。

【0032】

【数9】

$$E' = M \cdot [\cos \theta; \sin \theta]$$

【0033】

次に、 2つの固有ベクトル X の大きさ E_x, E_y を等しくしたことから 20

$$A \simeq A'$$

【0034】

すると数式9は数式10のようになる。

【0035】

【数10】

$$E' = A \cdot [E_x^2 \exp(-i \cdot R) + E_y^2 \exp(i \cdot (2\xi+R)), 2E_x \cdot E_y \cdot \sin R \exp(i \cdot (\xi+\pi/2)); 2E_x \cdot E_y \cdot \sin R \exp(i \cdot (\xi+\pi/2)), E_x^2 \exp(i \cdot R) + E_y^2 \exp(i \cdot (2\xi-R))] \cdot [\cos \theta; \sin \theta]$$

【0036】

数式11によって数式10を書き直すと数式12及び13のようになる。 30

【0037】

【数11】

$$E' = [E_x'; E_y']$$

【0038】

【数12】

$$1/A \cdot E_x' = (E_x^2 \exp(-i \cdot R) + E_y^2 \exp(i \cdot (2\xi+R))) \cos \theta - (2E_x \cdot E_y \cdot \sin R \exp(i \cdot (\xi+\pi/2))) \sin \theta$$

【0039】

【数13】

$$1/A \cdot E_y' = (E_x^2 \exp(i \cdot R) + E_y^2 \exp(i \cdot (2\xi-R))) \sin \theta - (2E_x \cdot E_y \cdot \sin R \exp(i \cdot (\xi+\pi/2))) \cos \theta$$

【0040】

ここで、 数式14及び15を仮定する。

【0041】

【数14】

$$\text{Tan}(Px) = \text{imaginary}(Ex') / \text{real}(Ex')$$

【0042】

【数15】

$$\text{Tan}(Py) = \text{imaginary}(Ey') / \text{real}(Ey')$$

【0043】

すると、数式14は数式16のようになる。

【0044】

【数16】

$$\begin{aligned} \text{Tan}(Px) &= \{(-Ex^2 \cdot \sin R + Ey^2 \cdot \sin(2\xi+R)) \cos \theta - 2Ex \cdot Ey \\ &\quad \cdot \sin R \cdot \sin(\xi + \pi/2) \cdot \sin \theta\} / \{(Ex^2 \cdot \cos R + Ey^2 \cdot \cos(2\xi+R)) \\ &\quad \cos \theta - 2Ex \cdot Ey \cdot \sin R \cdot \cos(\xi + \pi/2) \cdot \sin \theta\} \\ &= \{\sin R \cdot (-Ex^2 + Ey^2 \cdot \cos(2\xi)) \cdot \cos \theta - 2Ey^2 \cdot \\ &\quad \cos R \cdot \sin(\xi) \cdot \cos(\xi) \cdot \cos \theta - 2Ex \cdot Ey \cdot \sin R \cdot \cos(\xi) \cdot \sin \theta\} \\ &/ \{\cos R \cdot (Ex^2 + Ey^2 \cdot \cos(2\xi)) \cdot \cos \theta + 2Ey^2 \cdot \sin R \cdot \sin(\xi) \\ &\quad \cdot \cos(\xi) \cdot \cos \theta + 2Ex \cdot Ey \cdot \sin R \cdot \sin(\xi) \cdot \sin \theta\} \end{aligned}$$

【0045】

ここで、ユニタリ性の調査を行った。調査はレンズの透過率が劣化しない理想的な状態のものを仮定して1個の光学素子の複屈折量を1°、10°、20°、30°、40°、50°。それぞれの条件の範囲内で一様分布発生させた。各光学素子の主軸を2°の範囲内で同じく一様分布発生させた。この条件で30個の光学素子全体のジョーンズ行列を計算し、固有値問題として先のジョーンズ行列を解き、固有ベクトルを求め更にについて調査を行った。結果を図27に示す。

【0046】

ここで、縦軸はがn±10°よりも小さい割合を表し、横軸は複屈折量を表す。同図に示すように、複屈折量が小さい場合（例えば、30°以内）、はほぼn（nは整数）に収束する。30°を超えるといきなりはn±10°より外れた値を多くとるようになる。投影光学系は複屈折量を限界まで抑えて製造されており、その量は1枚のレンズ当たり1~2°であるため、の取る値を数式17のようにnとみなして問題ない。

【0047】

【数17】

$$\xi \approx n\pi$$

【0048】

数式17により、数式16は以下のようになる。

【0049】

【数18】

$$\begin{aligned} \text{Tan}(Px) &\approx \{\sin R \cdot (-Ex^2 + Ey^2 \cdot 2) \cdot \cos \theta - 2Ex \cdot Ey \cdot \sin R \cdot \cos(\xi) \cdot \sin \theta\} / \cos R \cdot (Ex^2 + Ey^2 \cdot 2) \cdot \cos \theta \\ &= \text{Tan}R \cdot \{-S2 \cdot \cos \theta - S3 \cdot \sin \theta\} / \cos \theta \end{aligned}$$

【0050】

【数19】

$$Px \approx R \cdot \{-S2 \cdot \cos \theta - S3 \cdot \sin \theta\} / \cos \theta$$

【0051】

同様に、

【0052】

【数20】

$$P_y \approx R \cdot \{S_2 \cdot \sin \theta - S_3 \cdot \cos \theta\} / \sin \theta$$

【0053】

ここで、

【0054】

【数21】

$$S_2 = E_x^2 - E_y^2$$

【0055】

【数22】

$$S_3 = 2E_x \cdot E_y \cdot \cos(\xi)$$

【0056】

【数23】

$$\tan(P_x), \tan(P_y) \approx P_x, P_y$$

【0057】

P_x, P_y は被検光学系 S を通過した後の X 偏光、Y 偏光それぞれの位相変化である。従来の偏光計測では偏光子を使用すれば、それら X 偏光、Y 偏光だけを抽出可能である。しかしながら偏光子のような光学素子をシステム内に組み込むことが容易でないことから、従来の収差計測系で前記計測を行なえば P_x, P_y が足しあわされた状態で計測することになる。この時 X 偏光、Y 偏光それぞれの光束の強度が同じであれば単純に計測される値は P_x と P_y の平均値と考えられる。ところがこれら X 偏光、Y 偏光それぞれの光束の強度が等しくない場合、次のような光重心を計測すると予想できる。

【0058】

【数24】

$$P = (P_x \cdot I_x + P_y \cdot I_y) / (I_x + I_y)$$

30

【0059】

ここで、 P は重心、 I_x は X 偏光の光強度、 I_y は Y 偏光の光強度である。

【0060】

すると、次式が成立する。

【0061】

【数25】

$$I_x = E_x' \cdot E_x'^* = A^2 \cdot \{\cos^2 \theta + (2E_x \cdot E_y \cdot \sin R \cdot \sin \theta)^2\}$$

$$\approx A^2 \cdot \cos^2 \theta$$

40

【0062】

同様に、

【0063】

【数26】

$$I_y \approx A^2 \cdot \sin^2 \theta$$

【0064】

よって、次式が成立する。

【0065】

【数27】

$$\begin{aligned}
 P &= R \cdot \{-S2 \cdot \cos \theta - S3 \cdot \sin \theta\} / \cos \theta \cdot \cos^2 \theta + R \cdot \{S2 \cdot \sin \theta - \\
 &\quad S3 \cdot \cos \theta\} / \sin \theta \cdot \sin^2 \theta \\
 &= R \cdot \{-S2 \cdot \cos \theta - S3 \cdot \sin \theta\} \cdot \cos \theta + R \cdot \{S2 \cdot \sin \theta - S3 \cdot \cos \theta\} \\
 &\quad \cdot \sin \theta \\
 &= R \cdot \{S2 \cdot (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) - 2 \cdot S3 \cdot \sin \theta \cos \theta\} \\
 &= R \cdot \{-S3 \cdot \sin(2\theta) - S2 \cdot \cos(2\theta)\}
 \end{aligned}$$

【0066】

ここで、数式28及び数式29を仮定すると、数式27は数式30のようになる。

【0067】

【数28】

$$S2 = k \cdot \cos \phi$$

【0068】

【数29】

$$S3 = k \cdot \sin \phi$$

【0069】

【数30】

$$P = -R \cdot k \cdot \cos(2\theta - \phi)$$

【0070】

ここで、数式31から は固有ベクトルXから求められた被検光学系Sの進相軸といえる。

【0071】

【数31】

$$S3 / S2 = \tan \phi$$

【0072】

更に、kについて調べると固有ベクトルXをストークスパラメータで表すと次式のようになる。

【0073】

【数32】

$$E_x^2 + E_y^2 = 1$$

【0074】

【数33】

$$E_x^2 - E_y^2 = k \cdot \cos \phi$$

【0075】

【数34】

$$2E_x \cdot E_y \cdot \cos(\xi) = k \cdot \sin \phi$$

10

20

30

40

50

【0076】

ここで、 k は係数である。 (E_x, E_y) を極座標系($\cos\phi, \sin\phi$)にとると数式34は次式に変換される。

【0077】

【数35】

$$\cos(2\theta) = k \cdot \cos\phi$$

【0078】

【数36】

$$\sin(2\theta) = k \cdot \sin\phi / \cos(\xi)$$

10

【0079】

よって、次式が成立する。

【0080】

【数37】

$$(k \cdot \cos\phi)^2 + (k \cdot \sin\phi / \cos(\xi))^2 = 1$$

【0081】

20

【数38】

$$k = \cos(\xi) / \sqrt{\cos^2(\xi) + \cos^2\phi + \sin^2\phi}$$

【0082】

数式17から

$$k \approx \pm 1$$

【0083】

(但し、 n が偶数なら $k = 1$ 、 n 奇数なら $k = -1$)となり、数式30は数式39のようになる。

30

【0084】

【数39】

$$P = -R \cdot \cos(2\theta - \phi) \quad (n \text{が偶数の場合})$$

$$P = R \cdot \cos(2\theta - \phi) \quad (n \text{が奇数の場合})$$

【0085】

数式39より、重心量 P を計測可能な計測系では、複数の異なる方位の直線偏光を被検光学系 S に照射することで、得られた多くの計測量 P をFFT解析する。これにより、数式

40

$$\xi \approx n\pi$$

【0086】

となるような固有ベクトルを持つ被検光学系 S のリターダンス R 及び進相軸 ξ を近似的に求めることができる。

【0087】

次に、近似的に被検光学系 S のジョーンズ行列を求める方法について説明する。

【0088】

【数40】

$$M = [A \cdot \exp(-i \cdot m), a \cdot \exp(-i \cdot b); a \cdot \exp(-i \cdot b), A' \cdot \exp(i \cdot m)]$$

【0089】

数式9及び数式40から、次式が成立する。

【0090】

【数41】

$$a \approx 2A'' \cdot \sin R \cdot Ex \cdot Ey \quad (\text{但し } a, A'' > 0, A'' = (A+A')/2)$$

【0091】

【数42】

$$b \approx \xi + \pi/2$$

10

【0092】

数式17から数式43が成立する。

【0093】

【数43】

$$b \approx \pm \pi/2$$

20

【0094】

透過率A及びA'を計測することで次式のmが求められる。

【0095】

【数44】

$$m \approx \arg \{A \cdot Ey^2 \cdot \exp(-i \cdot R) + A' \cdot Ex^2 \cdot \exp(i \cdot R)\}$$

30

【0096】

以上の結果を数式40に代入すれば、近似的に被検光学系Sのジョーンズ行列Mを求めることができる。

【0097】

本実施例の検証を下記条件で行なった。数式2において1個の光学素子の複屈折量を±5°の範囲内を一様分布発生させ、各光学素子の主軸を2°の範囲内で同じく一様分布発生させた。透過率Aについては1個の光学素子につき0.985±0.005の範囲内で同じく一様分布発生させた。透過率A'は1に固定した。この条件で30個の光学素子全体の被検光学系のジョーンズ行列を計算し、固有値問題として先のジョーンズ行列を解き、固有ベクトル及び固有値を求めた。次いで、これらからリターダンス及び進相軸を求め、それらを理論値とした。計算は市販のMatlab計算ソフトのライブラリーを使用した。

【0098】

本実施例の方法に従い、ジョーンズ行列に偏光方位の異なる10°刻みで直線偏光照明を0°~180°与え、透過した光重心をそれぞれ求め、最小自乗法あるいは高速フーリエ変換(FFT)解析によりリターダンスと進相軸を算出した。これら2つの結果からリターダンス及び進相軸を相關プロットした結果を図1及び図2に示す。ここではジョーンズ行列の試料100個の結果を示してある。

【0099】

図1は、ジョーンズ行列の固有ベクトルの一対の直交する方向の要素の位相差をnと近似した場合のリターダンスの値とリターダンスの実測値とが1対1で比例することを示している。図2は、同様にジョーンズ行列の固有ベクトルの一対の直交する方向の要素の位相差をnと近似した場合の進相軸の値と進相軸の実測値とがほぼ1対1で比例するこ

40

50

とを示すグラフである。

【0100】

図1よりリターダンスは問題なく計測されている。図2の進相軸の結果を見ると、データにはらつきが若干見られる。近似直線から大きくはずれた点はリターダンス量が少ないものであった。このことから進相軸の計測精度はリターダンス量の大きさに比例するものと考えられる。このことは露光機の場合、収差の調整が必要な大きなリターダンスには精度の高い進相軸計測が必要だが、リターダンスが小さければ調整の必要もないため、リターダンス量を正しく測れれば、実質問題は少ない。

【0101】

他の例として上記検討を投影光学系の瞳位置と対応させて計算を行なった。結果を図3(a)乃至図4(b)に示す。使用したサンプルは瞳内 63×63 個のジョーンズ行列で、実際に露光装置評価用に設計されたものである。図3(a)及び図3(b)は投影光学系の瞳内に分布するリターダンス量を色分けしたMAPである。図3(a)は理論値であり、図3(b)は本実施例の近似計測方法によって得られた結果である。同様に、図4(a)及び図4(b)は投影光学系の瞳内に分布する進相軸を色分けしたMAPである。図4(a)は理論値で、図4(b)は本実施例の近似計測方法によって得られた結果である。本結果からも本実施例での偏光解析は露光装置の光学系計測に十分使用可能であると言える。

【0102】

重心量Pは点回折干渉法、シェアリング干渉法と呼ばれる位相差計測方式やハルトマン法と呼ばれる横ずれ計測方式で計測することができる。

【0103】

まず、点回折干渉法を計測系に持つ露光装置における計測方法を図5を参照して説明する。偏光照明ユニット2を持つ照明光学系1から偏光方位 0° でピンホールもしくはライン開口を1つ以上持つプレート3に光を照射する。図6に偏光照明ユニット2の詳細図を示す。拡散素子21で拡散された光は回転可能な偏光子22と同じく回転可能な波長板を通過することで投影光学系4のNAより大きなNAを持った任意な偏光状態を作ることができる。ここで、開口3が波長並に小さい場合、Maxwellの方程式から導かれる厳密解から、開口が偏光状態を変えてしまうことが知られている。そこで、開口3は照明偏光状態を変えることのないよう開口の大きさや断面形状、膜の材質など考慮される必要がある。開口3を通過した光は理想的な球面波となり、投影光学系4を通過する。そして投影光学系4の波面の影響を受けピンホールもしくはライン開口を1つ以上持つプレート10を通過する。そうすることで、前記光を2つの光束に分けそれら2つの光束がリレー光学系11を経由して投影光学系4の瞳とほぼ共役な位置に設けられた検出系12に干渉縞を形成する。またリレー光学系11が無くても検出系12をファーフィールドとみなせる位置に置くことでも可能である。更に照明の偏光方位を回転させて同様に干渉縞を計測することを繰り返し、得られた干渉縞と偏光方位の値から本発明のFFT解析と同時に前述した偏光解析を処理系43で行なう。

【0104】

点回折干渉計測法には図7及び図9のような形態が挙げられる。図7ではピンホールもしくはライン開口が2つありその大きさが異なるプレート30がある。それぞれを通過した光束31と32は投影光学系4を通過後、ピンホールもしくはライン開口が2つあり大きさが異なるプレート10を通過する。この時ピンホールプレート30とピンホールプレート10は光線31と32の強度がプレート10を通過後等しくなるようピンホールもしくはライン開口の大きさを対応させている。光束31と32は等しい投影光学系4の波面情報を持っている。

【0105】

しかし、ピンホールプレート10で小さな開口を通過した一方の光束は球面もしくはシリンドリカルな波面(参照波面)となり、位相情報を無くし、もう一方の大きな開口を通過した光束は位相情報を保持する。そして、それらの光束が干渉を起こす。図9も同様で

10

20

30

40

50

、1つの開口3を通過した光束は回折格子5により光束33と34に分けられこれらが開口3および回折格子5に対応して、2つの大きさが異なる開口13により干渉を起こす。図9における露光装置の形態を図8に示す。また開口プレート3同様、開口10、30、13も偏光状態を変えない考慮が必要である。

【0106】

点回折干渉計測法では検出系12上に形成した干渉縞の各点はX,Y両方の偏光の位相情報が足し合わされている。しかも両偏光の強度は位相波、参照波どちらも投影光学系4の影響を同じように受けるため、強度についても情報を保持したまま干渉していることになり、干渉縞は光重心の情報と等しいと言える。従って、点回折干渉計測系を持つ露光装置で本実施例の計測方法が適用可能である。

10

【0107】

以下、シェアリング干渉法を計測系に持つ露光装置における計測方法を図10を参照して説明する。照明光学系1から偏光方位0°の直線偏光を開口プレート3に照射する。開口3を通過した光は理想的な球面波となり、投影光学系4の波面情報を持って回折格子14を通過してリレー光学系11を経由して投影光学系4の瞳共役位置である検出器12上に到達する。この際、リレー光学系11を経由せず、ファーフィールドに検出器12を配置してもよい。いずれにせよこの場合、回折格子14が像面位置から離れた場所にあるため、回折格子14を通過した光は回折され、2つ以上の光束に分かれる。図11にその様子を示す。

20

【0108】

回折された2つの光束35と36は同じ波面情報を保持しているが回折角度に差が生じるためその両者の干渉縞は、自身の波面の差分干渉縞となる。ここで干渉縞のコントラストを上げるために光束35と36の強度を等しくされているものとする。（例えば+1次と-1次回折光を取り出すなどして）このような干渉計測をシェアリング干渉法と呼ぶ。次に照明の偏光方位を回転させて同様に干渉縞を計測することを繰り返し、得られた複数の異なる偏光方位の値と干渉縞からFFT解析を行なう。

30

【0109】

この場合も、先と同様得られた干渉縞の各点はX,Y両方の偏光の位相情報が足し合わされる。また、光束35と36の強度はどちらも投影光学系4の影響を同じように受けており、強度についても情報を保持したまま干渉していることになり、干渉縞も光重心の情報と等しいと言える。但し、シェアリング干渉計測の場合、今までの位相情報の重心とは異なり、差分位相（波面傾き）の重心情報であるため、一度波面再生をして位相変換する必要がある。波面再生を行なうことにより、先と同様な扱いが可能である。但し、差分波面からの波面再生では再生された波面のオフセット分は計算できないため、少なくとも1つ以上の瞳上のリターダンス量と進相軸の情報を別途計測し、加算する必要がある。

30

【0110】

以上から、シェアリング干渉計測系を持つ露光装置で本実施例の計測方法を適用可能である。

40

【0111】

また、開口プレート3と同様に、回折格子14も偏光状態を変えない考慮が必要である。

【0112】

次に、ISIマスクによるハルトマン法を計測系に持つ露光装置における計測方法を図12を参照して説明する。先の実施例と同様に、照明光学系1から偏光方位0°の直線偏光をISIマスク24に照射する。

【0113】

図13に示すように、ISIマスクは凸レンズ25、パターン26、ピンホール27を有する。凸レンズ25は集光可能な光学素子を使用することも可能である。パターン26は図14のような格子状でも図15に示すグリッド形状でもよい。

40

【0114】

50

マスク 24 を通過した光は、投影光学系 4 を通過する。その際、投影光学系 4 を通過する際に波面 37 の影響を受け光線 38 の進行方向が曲がり、結果的に横ずれとなってウェハ 28 上で結像する。ウェハ 28 には感光材が塗布してあり、現像もしくは潜像でパターン 26 の像から横ずれ計測を行なう。フォーカス系 19、ウェハステージ 18、ウェハホルダー 17 はウェハ 28 を像面位置に送り込むことができる。

【 0115 】

先の実施例と同様に、図 16 に示すように、検出系 12 に像を再結像させて位置ずれ計測してもよい。次に、照明の偏光方位を回転させて同様に横ずれ量を計測することを繰り返し、得られた複数の異なる偏光方位の値と横ずれ量から本実施例の FFT 解析を行なう。

10

【 0116 】

この場合も、先と同様に、得られた像の位置は X, Y 両方の偏光の位相情報が足し合わされている。しかも光束 38 の偏光強度は投影光学系 4 の影響を受けており、強度についても情報を保持したまま結像していることになり、像の位置ずれは光重心の情報と等しいと言える。但し、波面の傾きの重心情報であるため、一度波面再生をして位相変換する必要がある。以上から ISI マスクによるハルトマン法を計測系に持つ露光装置で本実施例による計測方法が適用可能である。また開口プレート 27 や凸レンズ 25 もしくは同様な性能を持つ光学素子も偏光状態を変えない考慮が必要である。

【 0117 】

それ以外にも図 19 のように検出系 29 を像面位置でステージ 18 を移動させながら空中像強度を計測することで、像の位置ずれを計測する方法でも原理的には差がないため適用可能である。検出系 29 は図 20 に示したように上部に開口 43 を設け、開口 43 を通過してきた光量を光量センサー 44 で計測する仕組みになっている。

20

【 0118 】

次に、アレイレンズを使用したハルトマン法を計測系に持つ露光装置における計測方法を図 17 を参照して説明する。先の実施例と同様に、照明光学系 1 から偏光方位 0° の直線偏光を開口プレート 3 に照射する。開口プレート 3 を通過した光は理想的な球面波となり、投影光学系 4 を通過する。その際、波面 37 の影響を受けた光束 38 がマイクロレンズアレイユニット 40 を介して検出系 12 に到達する。マイクロレンズアレイユニット 40 を通過した光束 38 は図 18 に示すようリレー光学系 41 で光束 38 を平行光にしてマイクロレンズアレイ 42 に導かれる。マイクロレンズアレイ 42 は光束 38 を検出系 12 上に離散的に光を集光させる。この時検出系 12 の位置は像面と共に配置されている。このため検出系 12 に結像した離散的なドット像は波面 37 の影響を受けて曲げられているため、横ずれを起こす。次に照明の偏光方位を回転させて同様に横ずれ量を計測することを繰り返し、得られた複数の異なる偏光方位の値と横ずれ量から本発明の FFT 解析を行なう。

30

【 0119 】

この場合も、先と同様得られた像の位置は X, Y 両方の偏光の位相情報が足し合わされている。しかも光束 38 の偏光強度は投影光学系 4 の影響を受けており、強度についても情報を保持したまま結像していることになり、像の位置ずれは光重心の情報と等しいと言える。但し、波面の傾きの重心情報であるため、一度波面再生をして位相変換する必要がある。以上からアレイレンズを使用したハルトマン法を計測系に持つ露光装置も本実施例の計測方法を適用可能である。

40

【 0120 】

次に、SPIN マスクによるハルトマン法を計測系に持つ露光装置における計測方法を図 21 を参照して説明する。先の実施例と同様に、照明光学系 1 から偏光方位 0° の直線偏光を SPIN マスク 7 に照射する。図 22 に示すよう SPIN マスク 7 は開口に拡散光学素子 8、パターン 9 を有する。パターン 9 は図 23 のようなグリッド形状をしており、更にそのラインは全て Yamato マークと呼ぶ回折光を抑制する特殊なパターンからなっている。マスク 7 を通過した光は投影光学系 4 を通過する。その際、投影光学系 4 を通過

50

する際に波面 37 の影響を受け光線 38 の進行方向が曲がり、結果的に横ずれとなつてウェハ 28 上で結像する。ウェハ 28 には感光材が塗布してあり、現像もしくは潜像でパターン 26 の像から横ずれ計測を行なう。フォーカス系 19、ウェハステージ 18、ウェハホルダ 17 はウェハ 28 を像面位置に送り込むことができる。

【0121】

次に、照明の偏光方位を回転させて同様に横ずれ量を計測することを繰り返し、得られた複数の異なる偏光方位の値と横ずれ量から本発明の FFT 解析を行なう。この場合も、先と同様得られた像の位置は X, Y 両方の偏光の位相情報が足し合わされている。しかも光束 38 の偏光強度は投影光学系 4 の影響を受けており、強度についても情報を保持したまま結像していることになり、像の位置ずれは光重心の情報と等しいと言える。但し、波面の傾きの重心情報であるため、一度波面再生をして位相変換する必要がある。但し、差分波面からの波面再生では再生された波面のオフセット分は計算できないため、少なくとも 1 つ以上の瞳上のリターダンス量と進相軸の情報を別途計測し、加算する必要がある。

【0122】

以上から SPIN マスクによるハルトマン法を計測系に持つ露光装置も本実施例の計測方法を適用することができる。

【0123】

また拡散光学素子 8 や Yamato パターン 9 は偏光状態を変えない考慮が必要である。

【0124】

それ以外の応用の一例として、図 24 (a) 及び図 24 (b) に示すように、偏光子 44 の上部に拡散光学素子開口 8 と下部に Yamato マーク 9 を配置した偏光モジュール 45 を複数個マスクに見立てて 46 のように配置する。ここで、図 24 (a) は図 24 (b) の各偏光モジュール 45 の概略断面図である。

【0125】

その際、各偏光モジュール 45 の偏光子 44 の主軸を少しづつ回転させておく。この結果、照明光学系 1 から適当な光を照射することで、偏光ユニット 2 を介さないでも異なる偏光状態での計測が可能となる。このため、本実施例による計測が可能となる。またモジュール 45 の構成は上部開口 8 や下部パターン 9 を変更することにより SPIN 法だけではなく、ISI 法やその他干渉計測でも使用した開口プレート 3 に応用可能である。その例を図 25 (a) 及び図 25 (b) に示す。また、図 24 に示したマスク及び計測用光学部品を用いた点回折干渉法、シェアリング干渉法、各種ハルトマン法による本計測方法は上述と同様である。

【0126】

次に、偏光照明露光条件で最適な収差状態に補正可能な露光装置について図 26 の計測シーケンスフローをもとに説明する。照明光学系 1 から偏光方位が 0° の直線偏光を照射する (ステップ 1002)。次に、上述の各種計測法により、投影光学系 4 を透過した光の重心量を計測し、データ処理系 43 に保管する (ステップ 1004)。次に、偏光ユニット 2 を回して、先と異なる偏光方位の照明で計測及び結果の保管を設定された全ての偏光方位に対して繰り返す (ステップ 1006, 1008)。保管された計測結果及びそれに対応する偏光方位の値からデータ処理系 43 にて偏光解析及び最適な投影光学系 4、レチクルパターン及び照明光学系 1 の補正量を算出する (ステップ 1010)。かかる補正量の算出には特許文献 2 を使用することができる。その後、補正量が露光装置へフィードバックされる (ステップ 1012)。フィードバックは、例えば、レンズ駆動系 20、偏光照明を制御する照明光学系 1 の図示しない偏光制御部などによって実行される。

【0127】

次に、図 28 及び図 29 を参照して、上述の露光装置を利用したデバイスの製造方法の実施例を説明する。図 28 は、デバイス (IC や LSI などの半導体チップ、LCD、CCD 等) の製造を説明するためのフローチャートである。ここでは、半導体チップの製造を例に説明する。ステップ 1 (回路設計) では、デバイスの回路設計を行う。ステップ 2

10

20

30

40

50

(レチクル製作)では、設計した回路パターンを形成したレチクルを製作する。ステップ3(ウェハ製造)では、シリコンなどの材料を用いてウェハを製造する。ステップ4(ウェハプロセス)は、前工程と呼ばれ、レチクルとウェハを用いて本発明のリソグラフィー技術によってウェハ上に実際の回路を形成する。ステップ5(組み立て)は、後工程と呼ばれ、ステップ4によって作成されたウェハを用いて半導体チップ化する工程であり、アッセンブリ工程(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で作成された半導体デバイスの動作確認テスト、耐久性テストなどの検査を行う。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。

【0128】

10

図29は、ステップ4のウェ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、ウェハの表面を酸化させる。ステップ12(CVD)では、ウェハの表面に絶縁膜を形成する。ステップ13(電極形成)では、ウェハ上に電極を蒸着などによって形成する。ステップ14(イオン打ち込み)では、ウェハにイオンを打ち込む。ステップ15(レジスト処理)では、ウェハに感光剤を塗布する。ステップ16(露光)では、上述の露光装置によってレチクルの回路パターンをウェハに露光する。ステップ17(現像)では、露光したウェハを現像する。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ェハ上に多重に回路パターンが形成される。かかるデバイス製造方法によれば、従来よりも高品位のデバイスを製造することができる。このように、露光装置を使用するデバイス製造方法、並びに結果物としてのデバイスも本発明の一側面を構成する。

20

【0129】

以上、本発明の好ましい実施例について説明したが、本発明はこれらの実施例に限定されることはいうまでもなく、その要旨の範囲内で種々の変形及び変更が可能である。例えば、本実施形態では、露光装置に搭載された投影光学系を被検光学系としているが、被検光学系は露光装置の投影光学系に限定されるものではなく、式17が成立する程度に複屈折量が抑えられていればよい。

【図面の簡単な説明】

【0130】

30

【図1】ジョーンズ行列の固有ベクトルの一対の直交する方向の要素の位相差をnと近似した場合のリターダンスの値とリターダンスの実測値とが1対1で比例することを示すグラフである。

【図2】ジョーンズ行列の固有ベクトルの一対の直交する方向の要素の位相差をnと近似した場合の進相軸の値と進相軸の実測値とが1対1で比例することを示すグラフである。

【図3】図3(a)及び図3(b)は、投影光学系の瞳内のリターダンスの分布図である。図3(a)は理論値であり、図3(b)は本実施例の近似計測方法の結果である。

【図4】図4(a)及び図4(b)は、投影光学系の瞳内の進相軸の分布図である。図4(a)は理論値であり、図4(b)は本実施例の近似計測方法の結果である。

40

【図5】重心量を点回折干渉計測法で算出するための露光装置の概略ブロック図である。

【図6】図5に示す偏光ユニットの構成を示す概略ブロック図である。

【図7】点回折干渉計測法を説明するための概略ブロック図である。

【図8】図5とは別の露光装置の概略ブロック図である。

【図9】図8に示す露光装置の点回折干渉計測法を説明するための概略ブロック図である。

【図10】重心量をシェアリング干渉計測法で算出するための露光装置の概略ブロック図である。

【図11】図10に示す露光装置のシェアリング干渉計測法を説明するための概略ブロック図である。

50

【図12】重心量をISI横ずれ計測法で算出するための露光装置の概略ブロック図である。

【図13】図12に示す露光装置のISI横ずれ計測法を説明するための概略ブロック図である。

【図14】図13に示すISIマスクパターンを示す概略平面図である。

【図15】図13に示す別のISIマスクパターンを示す概略平面図である。

【図16】重心量をISI横ずれ計測法で算出するための別の露光装置の概略ブロック図である。

【図17】重心量をハルトマン計測法で算出するための露光装置の概略ブロック図である。
10

【図18】図17に示す露光装置のハルトマン計測法を説明するための概略ブロック図である。

【図19】重心量をハルトマン計測法で算出するための別の露光装置の概略ブロック図である。

【図20】図19に示す露光装置のハルトマン計測法を説明するための概略ブロック図である。

【図21】重心量をSPIN計測法で算出するための露光装置の概略ブロック図である。

【図22】図21に示す露光装置のSPIN計測法を説明するための概略ブロック図である。

【図23】図21の被計測マークの概略平面図である。

【図24】図24(a)及び図24(b)は、図22に示す応用例を示す断面図及び平面図である。

【図25】図25(a)及び図25(b)は、図24(a)及び図24(b)に示すマスクをISI横ずれ計測法そのほかの計測法に適用可能な構成とした概略断面図である。

【図26】本実施例の計測方法を説明するためのフローチャートである。

【図27】複屈折量が小さい場合に、ジョーンズ行列の固有ベクトルの一対の直交する方向の要素の位相差をnと近似できることを示すグラフである。

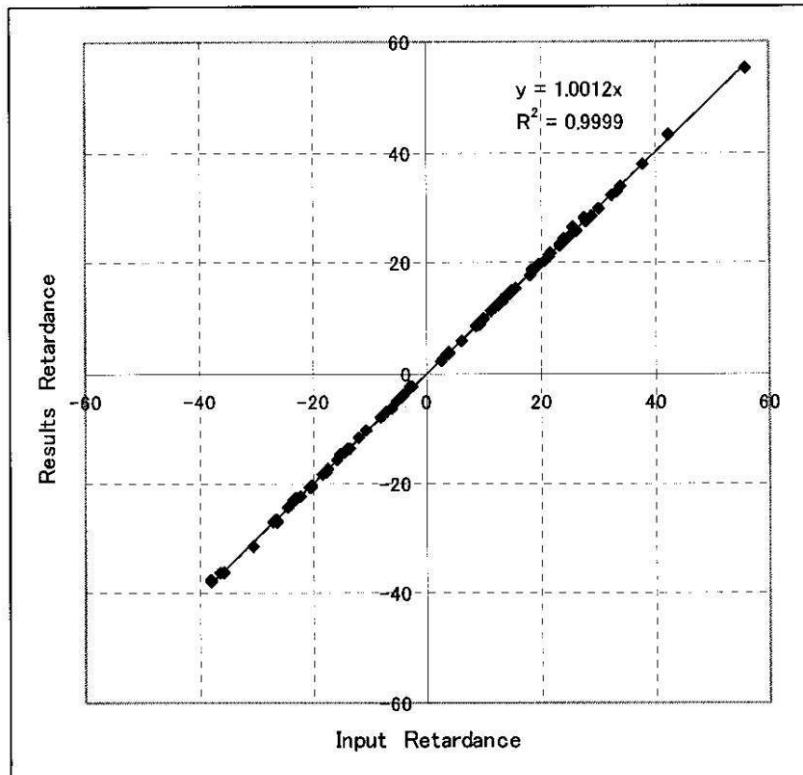
【図28】デバイス(ICIやLSIなどの半導体チップ、LCD、CCD等)の製造を説明するためのフローチャートである。

【図29】図28に示すステップ4のウェハプロセスの詳細なフローチャートである。
20

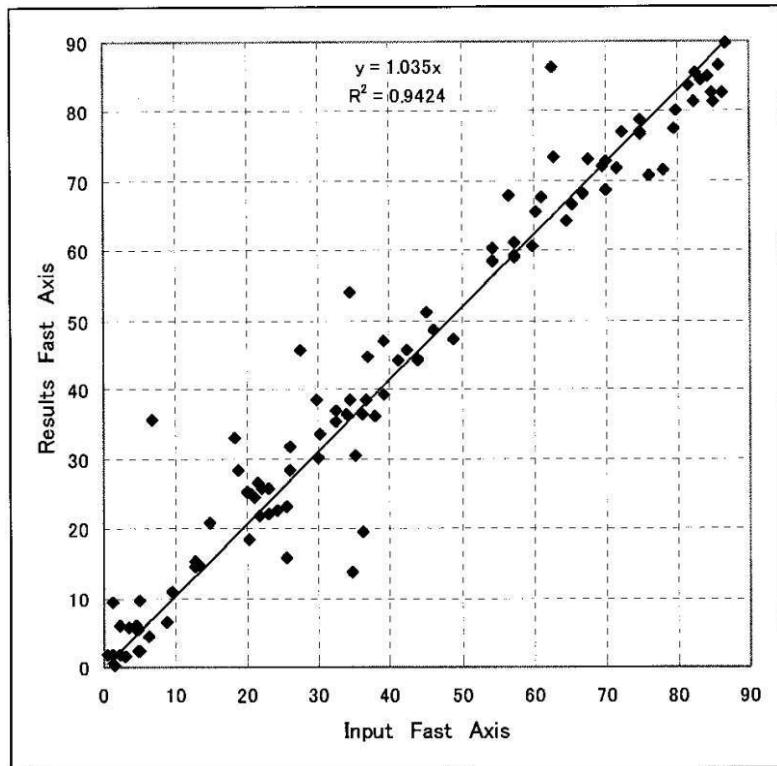
【符号の説明】

【0131】

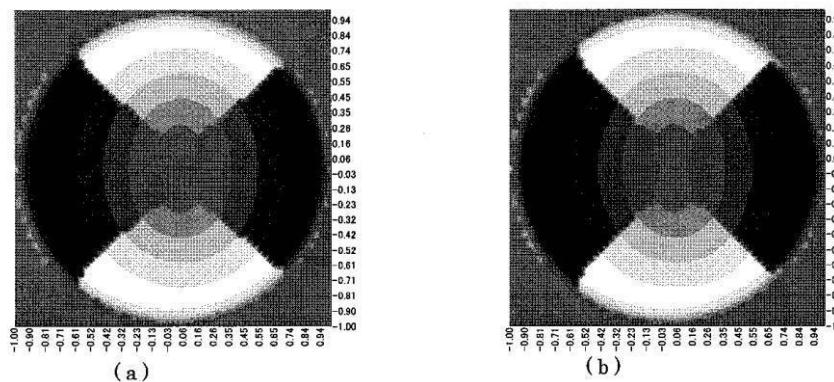
【図1】



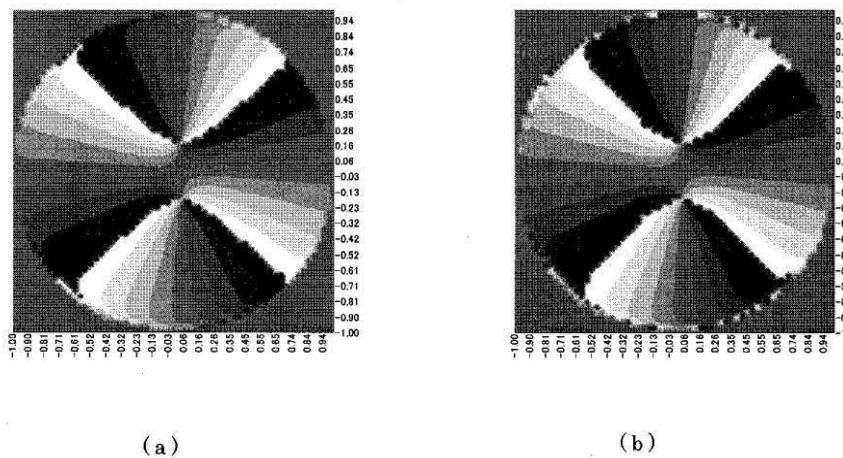
【図2】



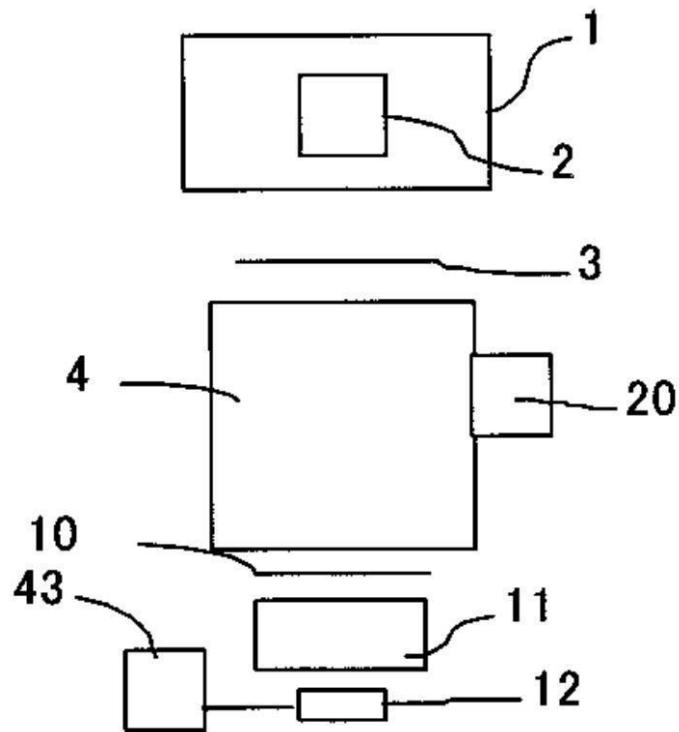
【図3】



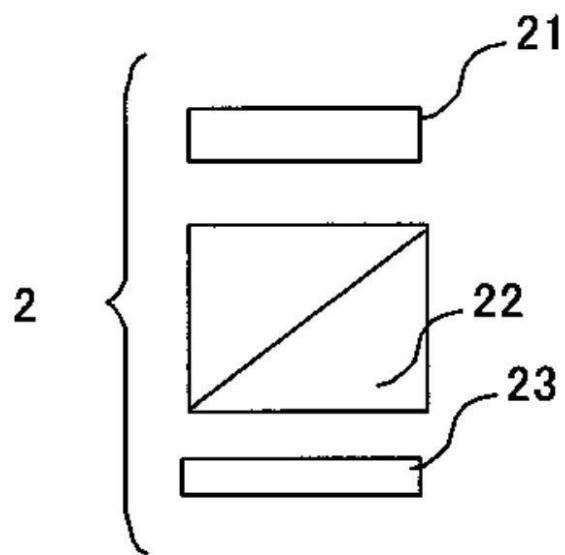
【図4】



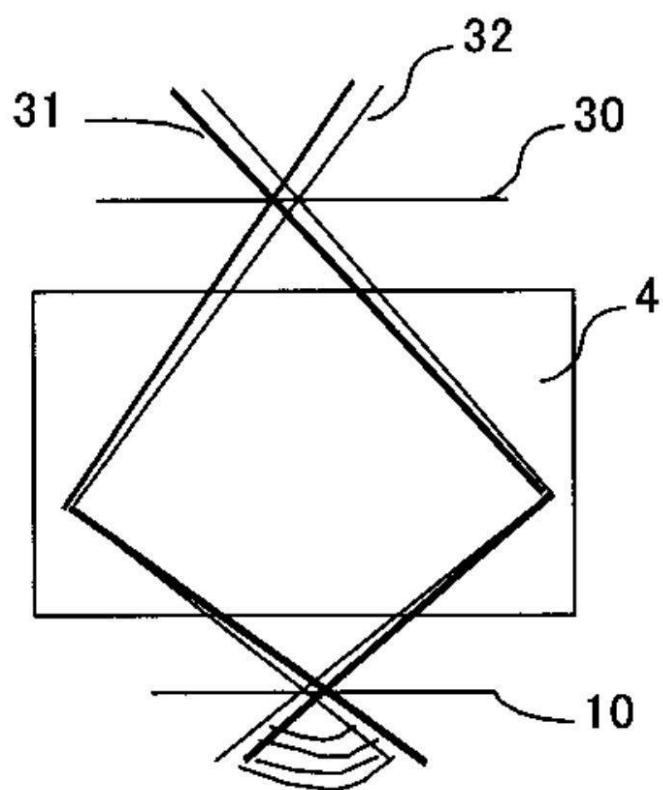
【図5】



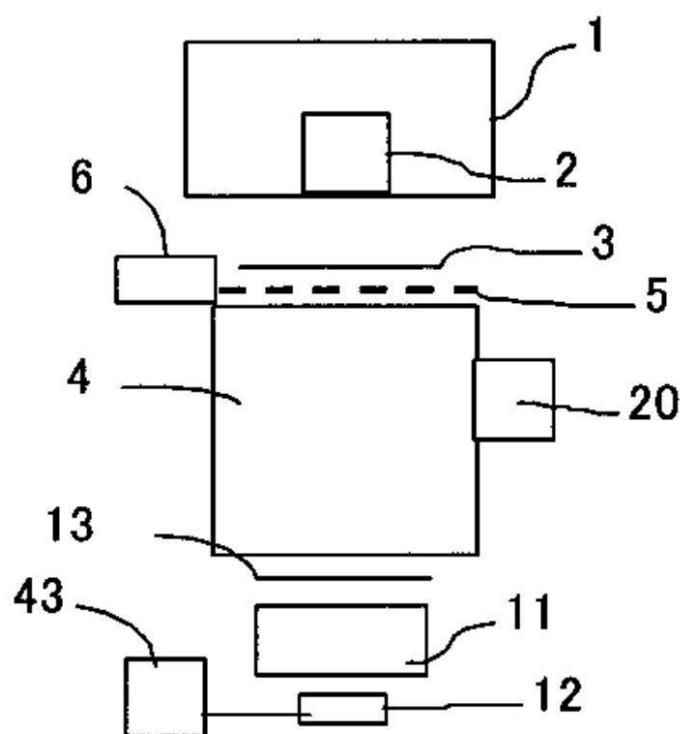
【図6】



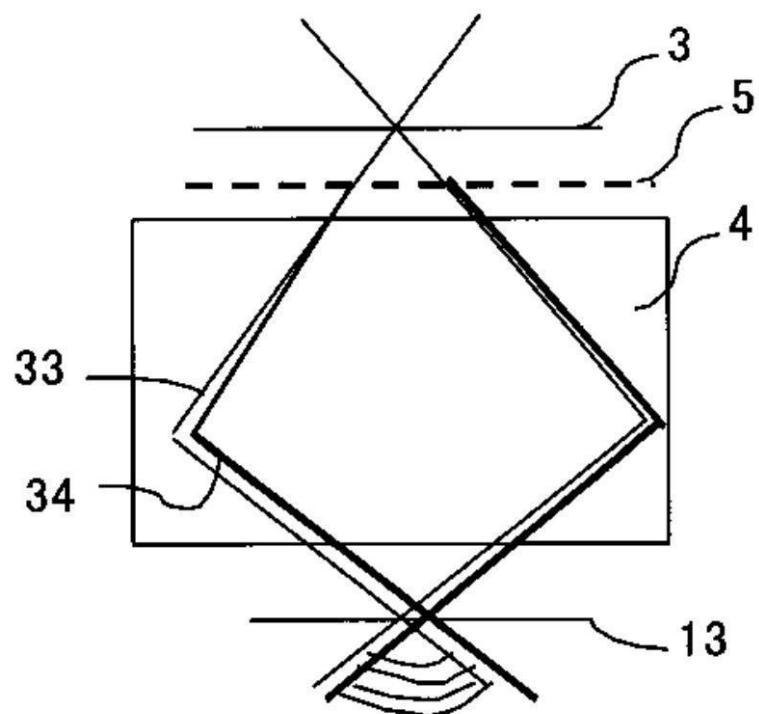
【図7】



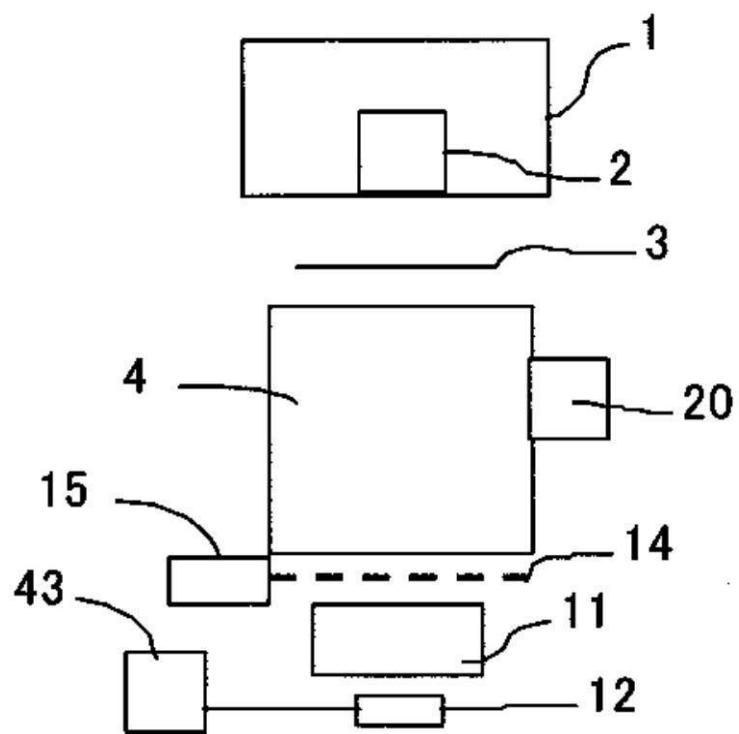
【図8】



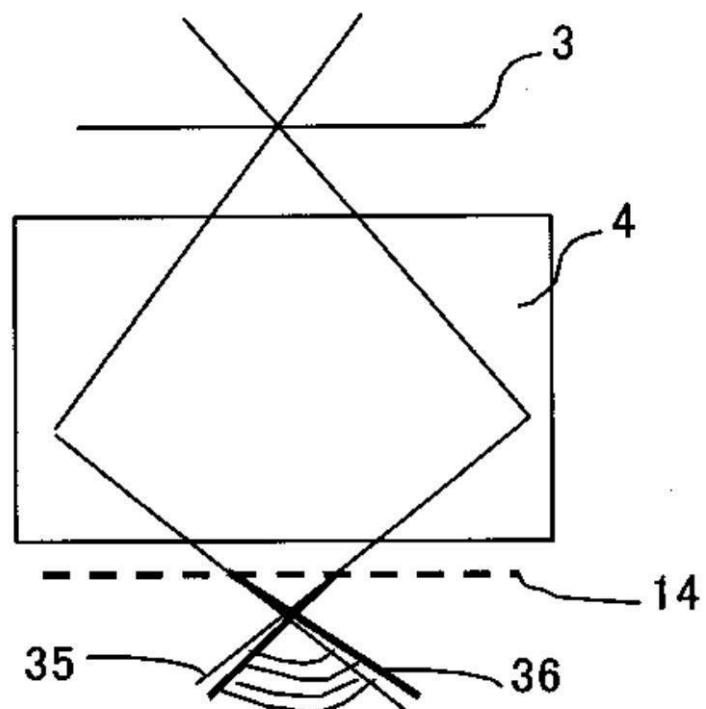
【図9】



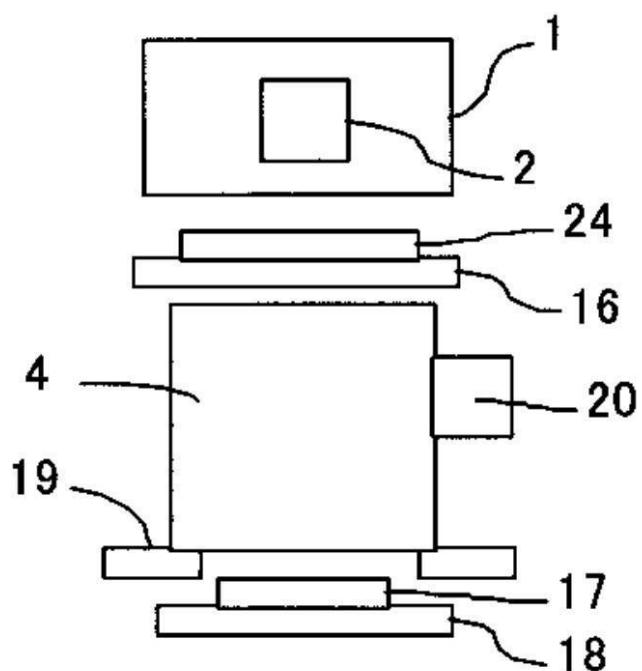
【図10】



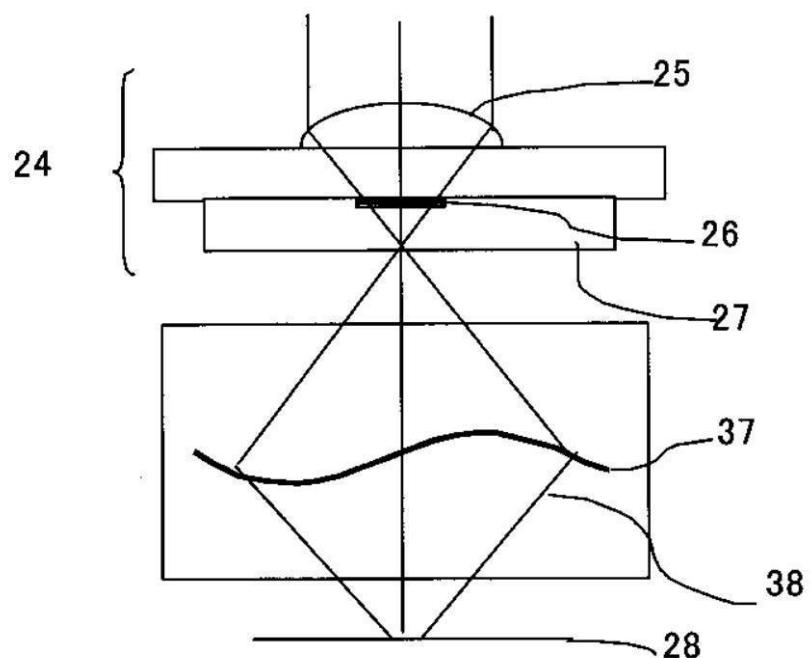
【図11】



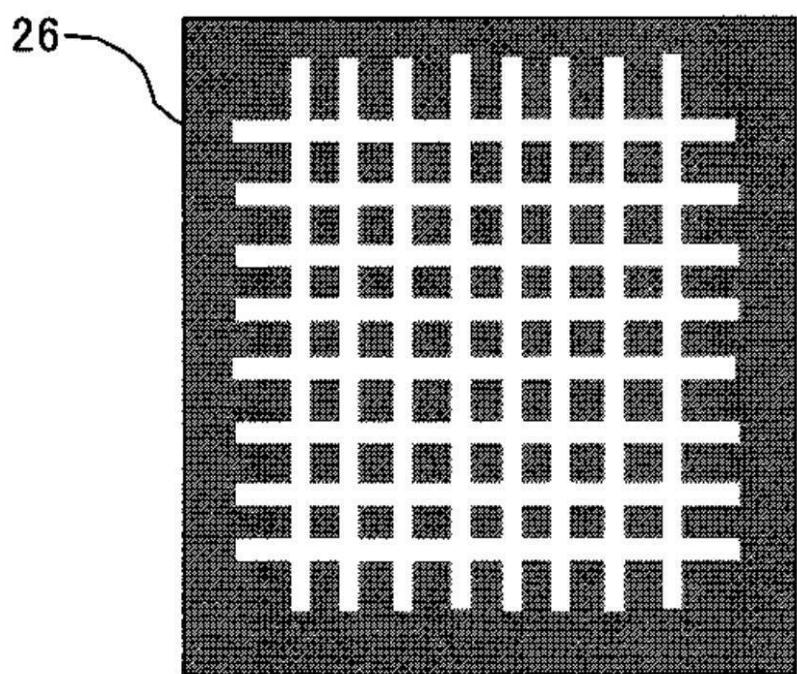
【図12】



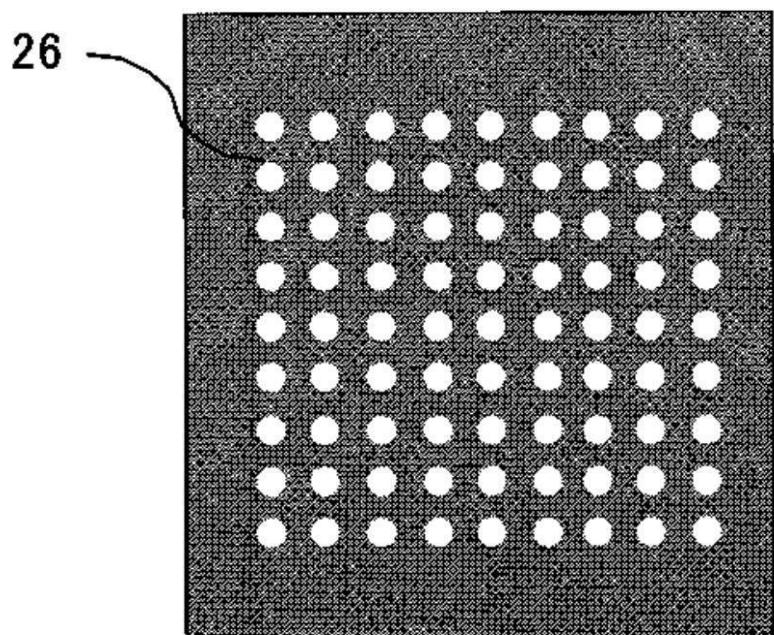
【図13】



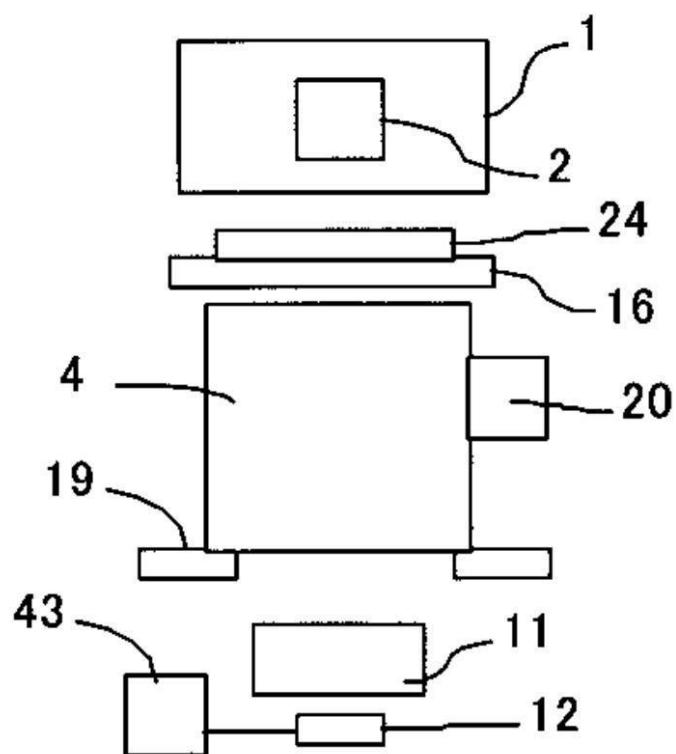
【図14】



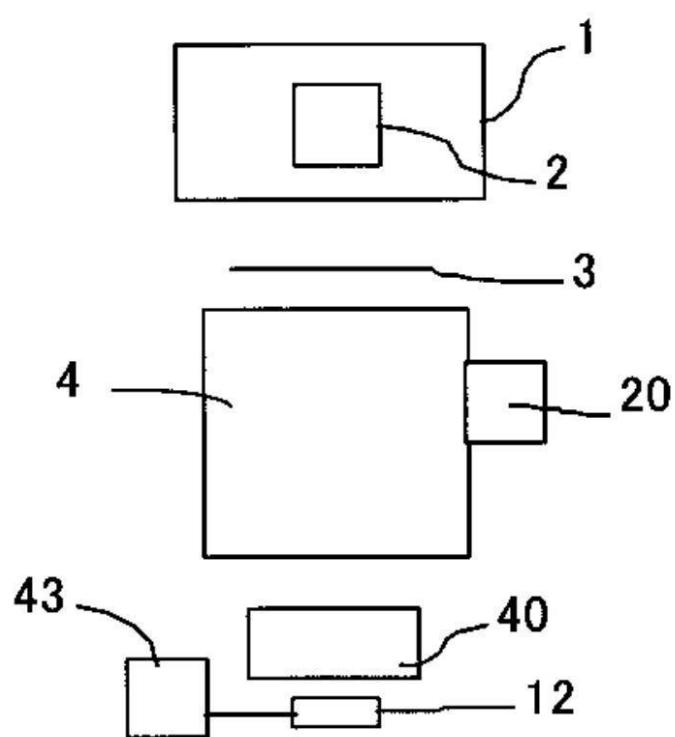
【図15】



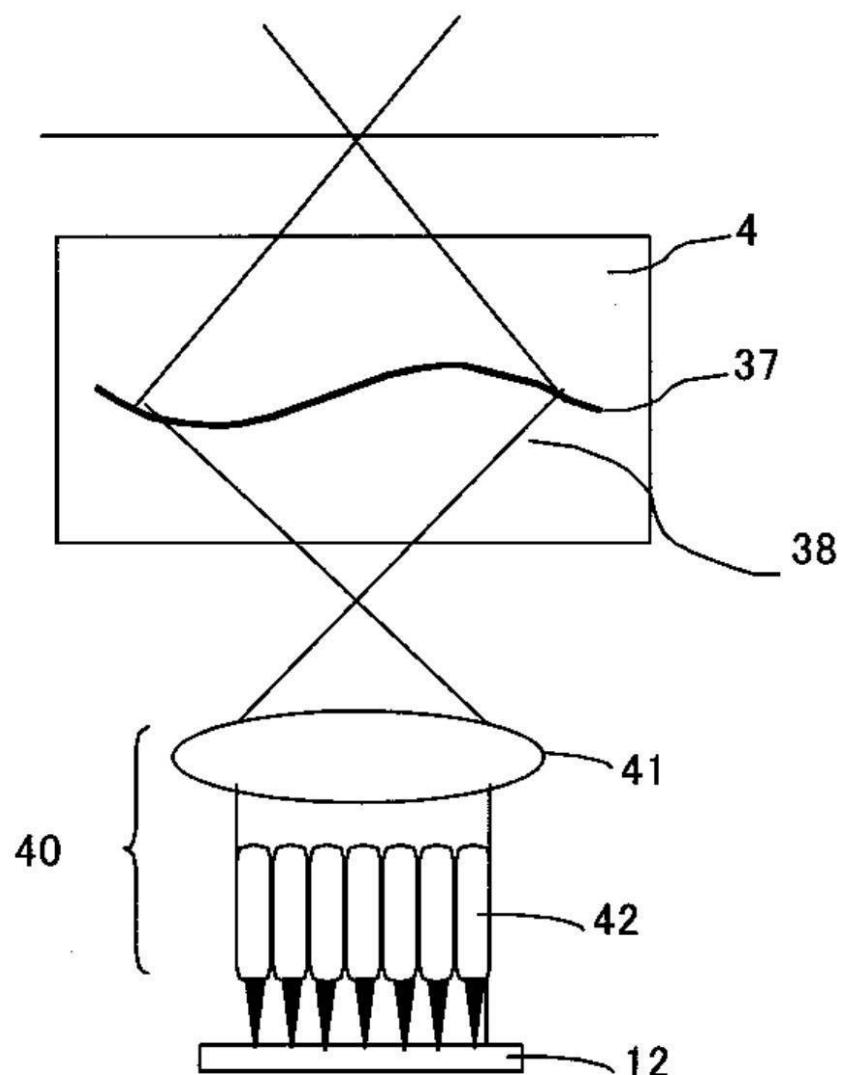
【図16】



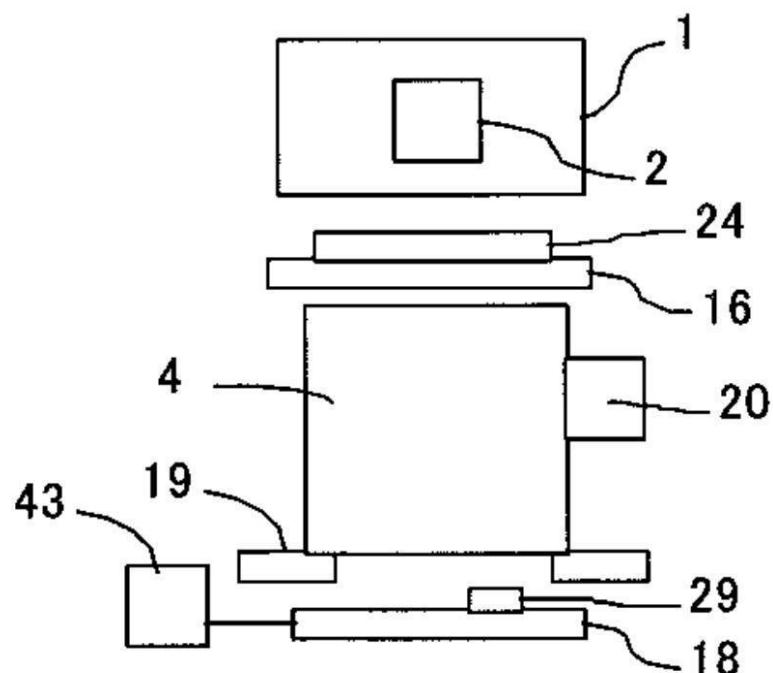
【図17】



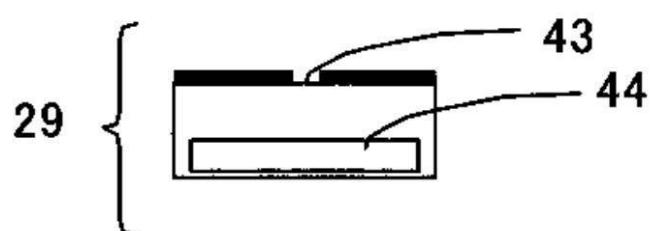
【図18】



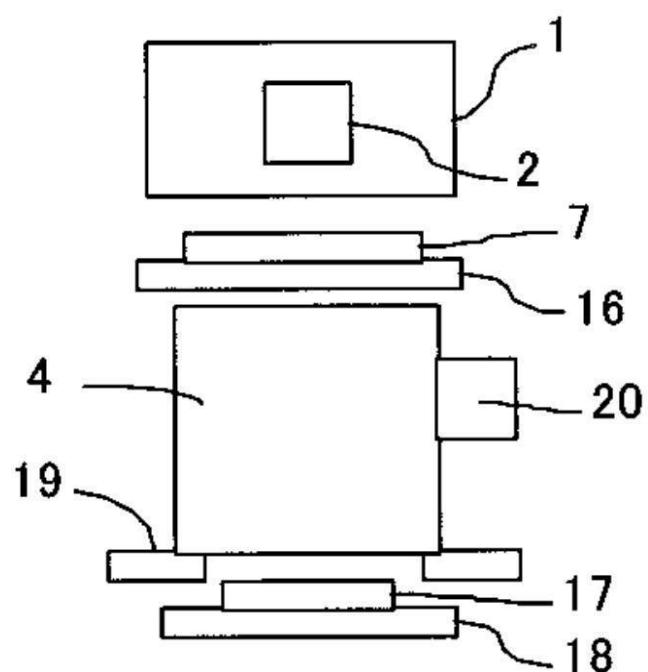
【図19】



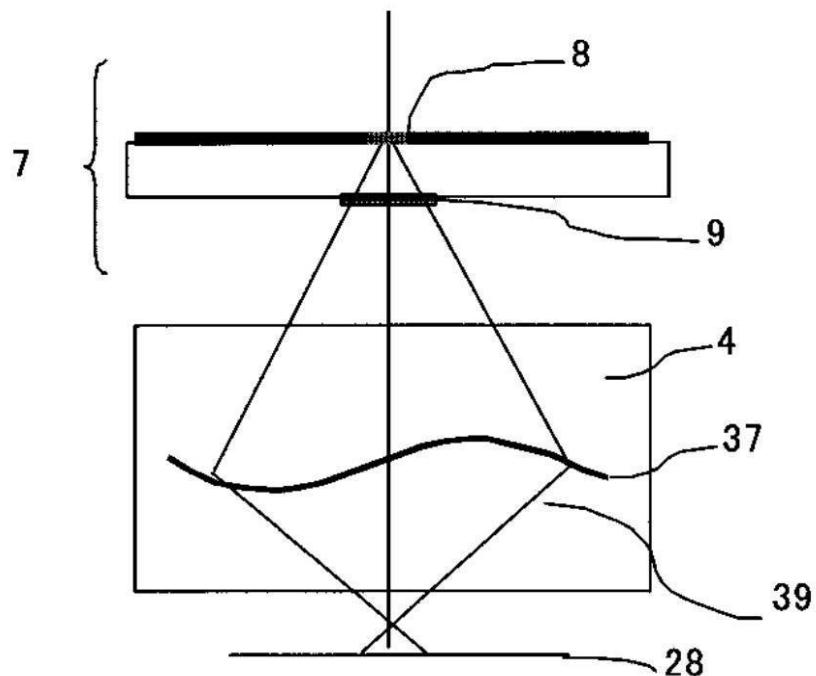
【図20】



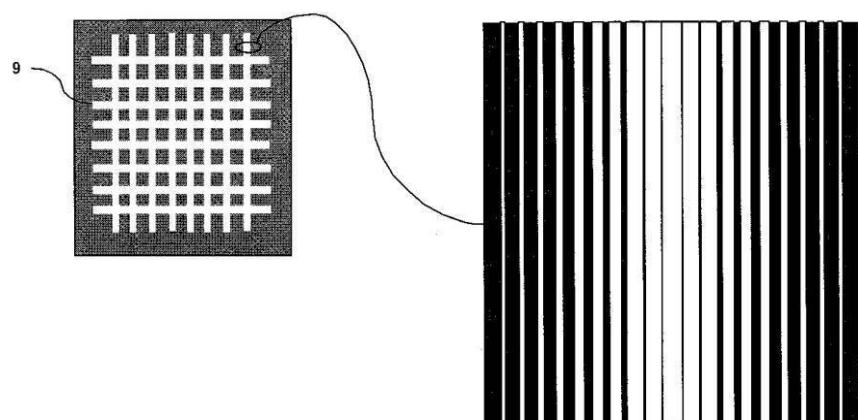
【図21】



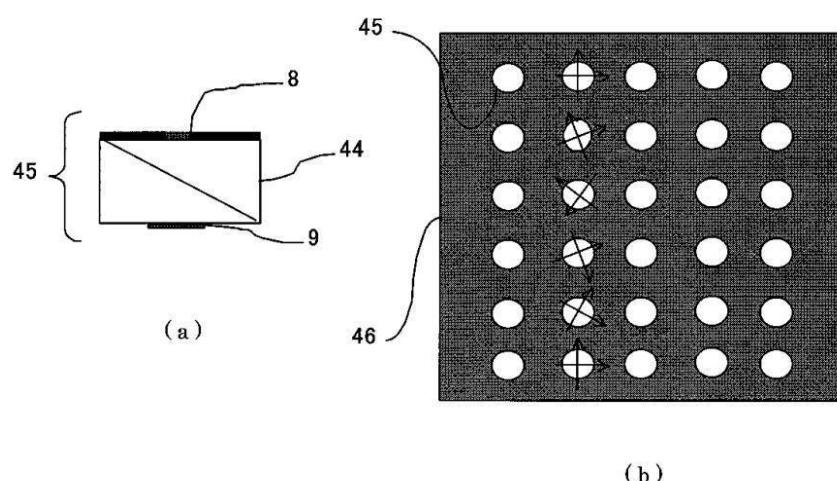
【図22】



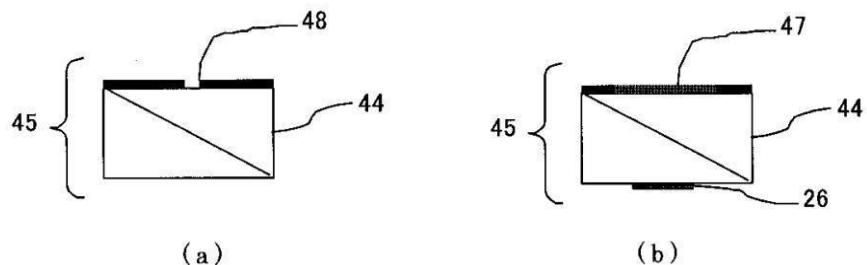
【図23】



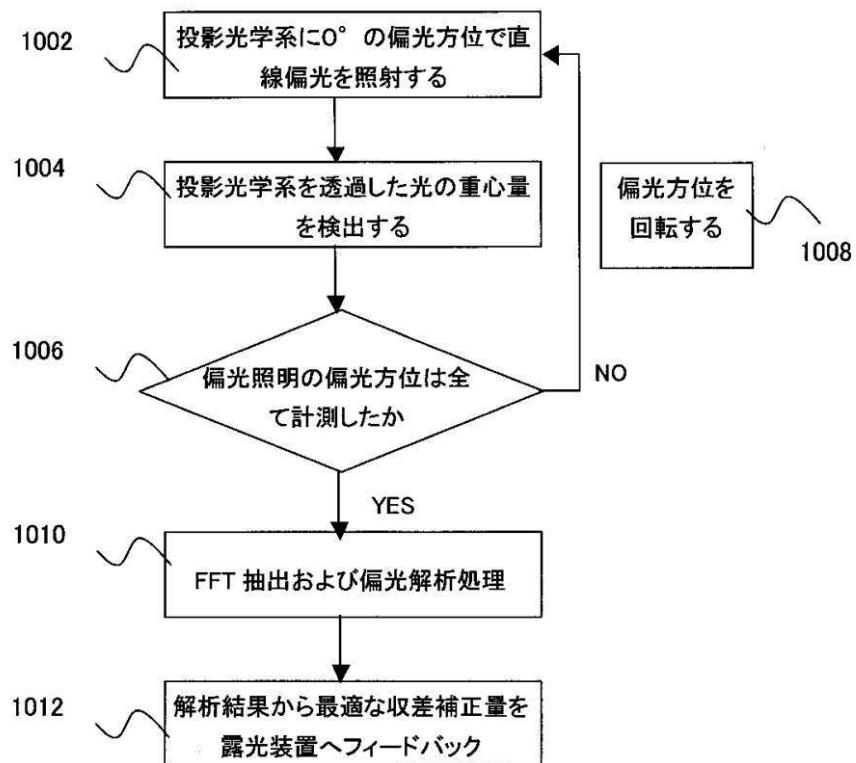
【図24】



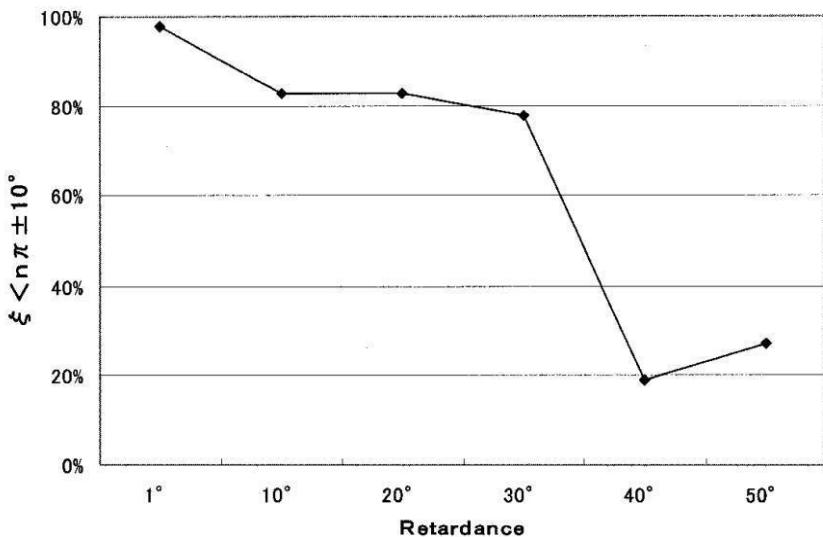
【図25】



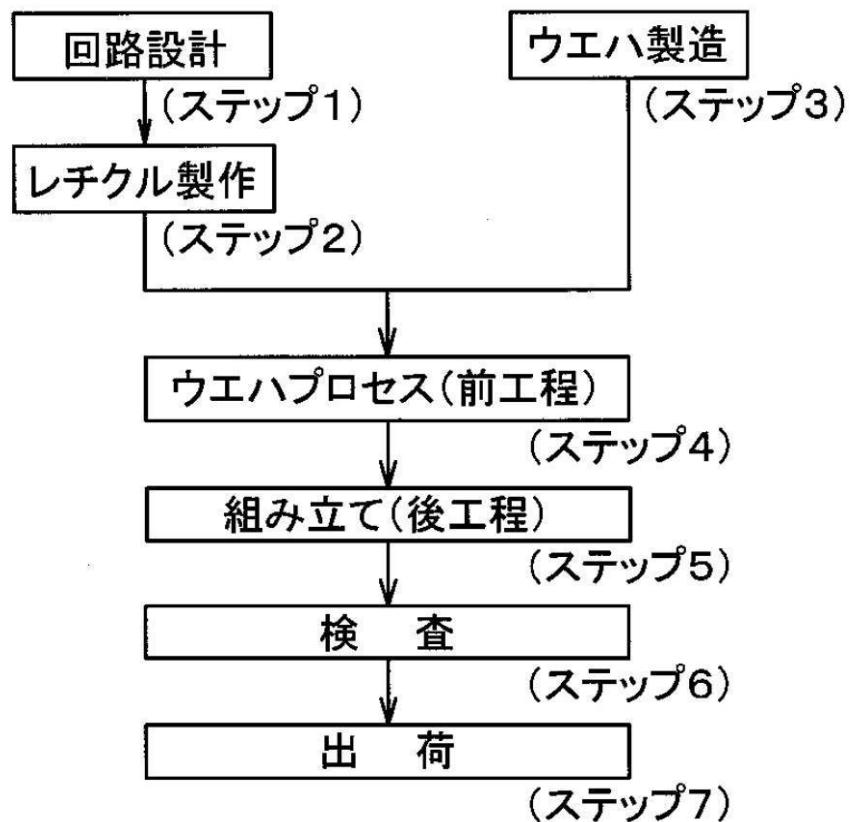
【図26】



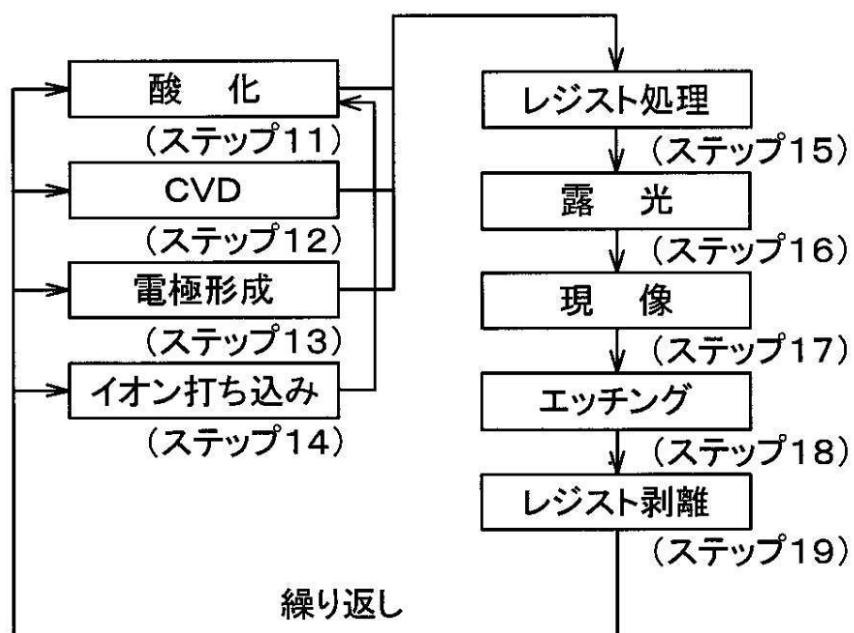
【図27】



【図28】



【図29】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.

G 03 F 7/20 (2006.01)

F I

G 03 F 7/20 5 2 1

テーマコード(参考)