

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6554483号
(P6554483)

(45) 発行日 令和1年7月31日(2019.7.31)

(24) 登録日 令和1年7月12日(2019.7.12)

(51) Int. Cl.	F I
G03F 7/20 (2006.01)	G03F 7/20 503
G03F 1/24 (2012.01)	G03F 1/24
G01B 11/24 (2006.01)	G01B 11/24 Z
G03F 1/60 (2012.01)	G01B 11/24 M
	G03F 7/20 521
請求項の数 54 (全 71 頁) 最終頁に続く	

(21) 出願番号	特願2016-559363 (P2016-559363)	(73) 特許権者	511186631
(86) (22) 出願日	平成27年3月24日 (2015. 3. 24)		カール ツァイス エスエムエス リミテッド
(65) 公表番号	特表2017-517759 (P2017-517759A)		イスラエル 21613 カルミエル マール カモン 44
(43) 公表日	平成29年6月29日 (2017. 6. 29)	(73) 特許権者	503263355
(86) 国際出願番号	PCT/EP2015/056250		カール・ツァイス・エスエムティー・ゲーエムペーハー
(87) 国際公開番号	W02015/144700		ドイツ連邦共和国、73447 オーバーコッペン、ルドルフ・エーバー・シュトラーセ 2
(87) 国際公開日	平成27年10月1日 (2015. 10. 1)	(74) 代理人	100086771
審査請求日	平成28年11月28日 (2016. 11. 28)		弁理士 西島 孝喜
(31) 優先権主張番号	61/970, 289	(74) 代理人	100088694
(32) 優先日	平成26年3月25日 (2014. 3. 25)		弁理士 弟子丸 健
(33) 優先権主張国	米国 (US)		最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光学構成要素及び／又はウェーハの予め決められた3次元輪郭を発生させる方法及び装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光学構成要素及び／又はウェーハの予め決められた3次元輪郭を発生させる方法であって、

a．前記予め決められた3次元輪郭からの前記光学構成要素及び／又は前記ウェーハの現存3次元輪郭の偏差を決定する段階と、

b．前記予め決められた3次元輪郭からの前記3次元輪郭の前記決定された現存偏差を補正するためのレーザパルスを決める1又は2以上のパラメータセットを有するレーザパルスの少なくとも1つの3次元配置を計算する段階と、

を含み、

c．前記b．の段階は、更に、

(i) 予め定められたパラメータセットを有し、及び／又はレーザパルスの配置内で平面にない3つの方向にレーザパルスの予め定められた距離を有する、レーザパルスの予め定められた3次元配置を連続して適用することによって前記光学構成要素及び／又は前記ウェーハの材料内に基本体積変形を誘起する段階と、

(ii) 特定の材料及び／又は特定の偏差に対して、前記光学構成要素及び／又は前記ウェーハの前記材料内に誘起された前記基本体積変形から前記レーザパルスを定める前記1又は2以上のパラメータセットを計算する段階と、

を含み、

d．前記予め決められた3次元輪郭を発生させるために、レーザパルスの前記計算され

10

20

た少なくとも 1 つの 3 次元配置を前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハ上に適用する段階

を含むことを特徴とする方法。

【請求項 2】

段階 b. は、予め定められたパラメータセットを有し、及び / 又はレーザパルスの配置内で平面にない 3 つの方向にレーザパルスの予め定められた距離を有するレーザパルスの予め定められた 3 次元配置によって前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハ内に誘起される基本体積変形を決定する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

レーザパルスの前記少なくとも 1 つの 3 次元配置を計算する段階は、

10

e. 前記予め決められた 3 次元輪郭からの前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハの前記現存 3 次元輪郭の偏差と、レーザパルスの前記少なくとも 1 つの 3 次元配置によって誘起された体積変形とを含むターゲット汎関数を設定する段階と、

f. レーザパルスの前記少なくとも 1 つの 3 次元配置を変化させることによって前記ターゲット汎関数を最小にする段階と、

を含む、

ことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記ターゲット汎関数を最小にするためにラグランジュ変分原理を使用する段階を更に含むことを特徴とする請求項 3 に記載の方法。

20

【請求項 5】

前記レーザパルスを定める前記パラメータセットは、前記レーザパルスのエネルギー、パルス長、繰り返し数、前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハの 1 つの場所の上に向けられるレーザパルスの個数、ビーム偏光、開口数、フォーカスサイズ、ビーム形状、及び / 又は非点収差を含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 6】

レーザパルスの前記少なくとも 1 つの 3 次元配置のパラメータが、3 つの方向の該配置のサイズと、3 次元における 2 又は 3 以上の入射レーザパルスの間の距離とを含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 5 のいずれか 1 項に記載の方法。

30

【請求項 7】

レーザパルスによって引き起こされる歪み分布によって誘起される応力分布により、前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハの質量密度及び / 又は光透過率を修正する段階を更に含み、

前記応力分布及び前記歪み分布は、フックの法則によって結び付けられる、

ことを特徴とする請求項 1 から請求項 6 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 8】

前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハを貫通して基本体積 を定めるノード N_i を有する 3 次元格子を導入する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 7 のいずれか 1 項に記載の方法。

40

【請求項 9】

前記 3 次元格子ノード N_i の変位 u_i が、前記レーザパルスの前記パラメータセット及び / 又はレーザパルスの前記少なくとも 1 つの配置の前記パラメータの関数であることを特徴とする請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

MS_i が、単一書込モードシグニチャーの成分を表し、 m が、複数の該書込モードシグニチャーの計数値である時に、少なくとも 1 つの 3 次元書込密度 a と複数の書込モードシグニチャー MS_i^m とを決定する段階を更に含むことを特徴とする請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

50

テンソル $(P_{no}^g)^{-1}$ が、変位空間内で作用するポテンシャルの逆テンソルであり、 P_{oks}^w が、正常基本体積変形モードの空間内で作用するテンソルの要素であり、両方のテンソルが、前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハの材料パラメータを含み、

$$\sum_{J=0}^{17} \eta_{ij} MS_j$$

が、単位書込に対する平衡変形変位の前記書込モードシグニチャー MS_i への投影である時に、基本体積内の前記 3 次元書込密度 a 及び該書込モードシグニチャー MS_i は、

10

$$\xi_n = \sum_{o=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{k=0}^7 \sum_{s=0}^2 \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{i=0}^{17} (P_{no}^g)^{-1} P_{oks\alpha}^w a^\alpha \eta_{(3k+s)i} MS_i$$

によって与えられる変位 ξ_n を導入することを特徴とする請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

テンソル $(P_{no}^g)^{-1}$ が、変位空間内で作用するポテンシャルの逆テンソルであり、かつ

20

$$A_{n\alpha} = \sum_{l=0, t=0}^{7, 2} P_{nlt\alpha}^w e_{lt}$$

であり、 P_{nlt}^w が、正常基本体積変形モードの空間内で作用するポテンシャルを説明するテンソルの要素であり、両方のテンソルが、前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハの材料パラメータを含み、 e_{lt} が、単位書込密度に対する基本体積内の前記格子ノード N_i の平衡変形変位である時に、該光学構成要素及び / 又は該ウェーハにわたるレーザパルスの配置の 3 次元書込密度 a が、

30

$$\xi_n = \sum_{0=1, \alpha=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, K_x \cdot L_y \cdot M_z} (P_{no}^g)^{-1} A_{o\alpha} a^\alpha$$

によって与えられる該光学構成要素及び / 又は該ウェーハの該基本体積内の該格子ノード N_n の変位 ξ_n を誘起することを特徴とする請求項 8 に記載の方法。

40

【請求項 13】

基本体積内で重なる前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハにわたるレーザパルスの R 個の配置の 3 次元書込密度 a_m は、

$$\xi_n = \sum_{0=1, \alpha=1, m=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, K_x \cdot L_y \cdot M_z, R} \left(P_{no}^g \right)^{-1} A_{o\alpha} a_m^\alpha$$

によって与えられる変位 ξ_n を導入することを特徴とする請求項 8 に記載の方法。

【請求項 14】

前記レーザパルスの前記少なくとも 1 つの書込密度は、前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハの損傷閾値よりも低いことを特徴とする請求項 11 から請求項 13 のいずれか 1 項に記載の方法。

10

【請求項 15】

前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハの基本体積 V_n の前記変位 ξ_n を該基本体積 V_n の該光学構成要素及び / 又は該ウェーハの他の基本体積との相互作用なしに決定する段階を更に含むことを特徴とする請求項 9 に記載の方法。

【請求項 16】

前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハの合計変形を該光学構成要素及び / 又は該ウェーハの前記基本体積を組み合わせる該組み合わせた基本体積の累積ポテンシャルエネルギーを最小にすることによって決定する段階を更に含むことを特徴とする請求項 15 に記載の方法。

20

【請求項 17】

段階 a . は、前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハの前記現存 3 次元輪郭を測定する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 16 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 18】

前記現存 3 次元輪郭を測定する段階は、接触表面形状測定装置、擬似接触表面形状測定装置、非接触表面形状測定装置、干渉計、白色光干渉計、共焦点顕微鏡、フォトマスク計測ツール、走査電子顕微鏡、及び / 又はこれらのデバイスの組合せを使用する段階を含むことを特徴とする請求項 17 に記載の方法。

【請求項 19】

30

段階 a . は、位置 i での前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハの前記 3 次元輪郭の偏差 $\Delta\phi_i$ を決定された現存場所 i^{det} と予め決められた場所 i^{predet} の差から決定する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 18 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 20】

段階 b . は、 λ_j^a が、 R 個の書込密度 a_j^m によって発生された前記位置 i での変位であり、最終項が、正規化係数 λ_j^a を有するチコノフ正規化である時に、ターゲット汎関数を最小にする段階：

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^L (\Delta\phi_i + \xi_i)^2 + \sum_{m=1, j=1}^{R, K_x \cdot L_y \cdot M_z} \lambda_m^a a_j^{m2} \right\}$$

40

を更に含むことを特徴とする請求項 19 に記載の方法。

【請求項 21】

前記光学構成要素及び / 又は前記ウェーハを実質的に透過することができるレーザパルスを該光学構成要素及び / 又は該ウェーハに印加する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 20 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 22】

50

前記レーザパルスの波長を該レーザパルスの光子エネルギーが前記光学構成要素及び／又は前記ウェーハのバンドギャップエネルギーよりも低いように選択する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 1 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 2 3】

前記レーザパルスの前記光子エネルギーは、前記光学構成要素及び／又は前記ウェーハの前記バンドギャップエネルギーの 0.95 倍よりも低いことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 2 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 2 4】

前記レーザパルスの前記光子エネルギーは、最低バンドギャップエネルギーを有する処理されたウェーハの材料のバンドギャップエネルギーの 0.95 倍よりも低く、

10

前記処理されたウェーハは、1 又は 2 以上の集積回路又は 1 又は 2 以上の集積回路の少なくとも一部を含む、

ことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 2 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 2 5】

前記構成要素は、極紫外波長放射線のための光学構成要素、特に、極紫外放射線のためのミラー又はフォトリソグラフィマスクを含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 2 6】

極紫外波長放射線のための前記光学構成要素は、多層構造を有する前面の反対側である裏面上の透過性導電コーティングを含み、

20

前記透過性導電層は、近赤外、可視、及び／又は近紫外波長領域で光透過性である、ことを特徴とする請求項 2 5 に記載の方法。

【請求項 2 7】

前記透過性導電コーティングは、錫酸化物、インジウム錫酸化物、アンチモン錫酸化物、アルミニウム亜鉛酸化物、又はこれらの材料の組合せを含むことを特徴とする請求項 2 6 に記載の方法。

【請求項 2 8】

段階 a . は、極紫外放射線のための前記光学構成要素の前記裏面の平面度偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、極紫外放射線のための該光学構成要素の該裏面を平坦化するために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルスを印加する段階を含むことを特徴とする請求項 2 6 に記載の方法。

30

【請求項 2 9】

段階 a . は、前記前面上に前記多層構造及び吸収剤層を配置した後であるが、該吸収剤層をパターン化する前に、極紫外放射線のためのフォトリソグラフィマスクの前記裏面の前記平面度偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、極紫外放射線のための該フォトリソグラフィマスクの該裏面を平坦化するために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルスを印加する段階を含むことを特徴とする請求項 2 6 に記載の方法。

【請求項 3 0】

段階 a . は、前記前面の周囲区域から前記多層構造を除去した後に極紫外放射線のための前記光学構成要素の前記裏面の前記平面度偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、極紫外放射線のための該光学構成要素の該裏面を平坦化するために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルスを印加する段階を含むことを特徴とする請求項 2 6 に記載の方法。

40

【請求項 3 1】

段階 a . は、極紫外放射線のための前記光学構成要素の前記多層構造の該多層構造の予め決められた平面度からの平面度偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、極紫外放射線のための該光学構成要素の該多層構造の該予め決められた平面度を発生させるために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルスを印加する段階を含むことを特徴とする請求項 2 6 に記載の方法。

【請求項 3 2】

50

段階 a . は、透過フォトリソグラフィマスクのパターン要素の予め決められたパターンからの偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、該予め決められたパターンを発生させるために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルス印加する段階を含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 3 3】

段階 a . は、透過フォトリソグラフィマスクにわたる光透過率の予め定められた光透過率からの偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、該予め定められた光透過率を発生させるために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルス印加する段階を含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 3 4】

段階 a . は、透過フォトリソグラフィマスクにわたるパターン要素及び光透過率の予め決められたパターン及び予め定められた光透過率からの偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、該透過フォトリソグラフィマスクにわたる該予め決められたパターン及び該予め定められた光透過率を同時に発生させるために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルス印加する段階を含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 3 5】

段階 a . は、予め決められた 3 次元光学輪郭からの平坦な光学構成要素の偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、元は平坦な該光学構成要素の該予め決められた 3 次元光学輪郭を発生させるために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルス印加する段階を含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 3 6】

段階 a . は、光学構成要素の球面輪郭の予め決められた非球面輪郭からの偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、該光学構成要素の該予め決められた非球面輪郭を発生させるために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルス印加する段階を含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 3 7】

段階 a . は、妨害内部全反射シャッターの接触面の該妨害内部全反射シャッターの予め決められた接触面からの偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、該妨害内部全反射シャッターの該予め決められた接触面を発生させるために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルス印加する段階を含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 3 8】

段階 a . は、ナノインプリントリソグラフィテンプレートの 3 次元輪郭の該ナノインプリントリソグラフィテンプレートの予め決められた 3 次元輪郭からの偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、該ナノインプリントリソグラフィテンプレートの該予め決められた 3 次元輪郭を発生させるために前記計算された少なくとも 1 つの 3 次元配置のレーザパルス印加する段階を含むことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 3 9】

前記ウェーハは、半導体材料を含み、又は

前記ウェーハは、複合半導体材料を含む、

ことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 4 0】

前記半導体材料は、シリコンを含むことを特徴とする請求項 3 9 に記載の方法。

【請求項 4 1】

前記ウェーハは、1 又は 2 以上の集積回路の少なくとも一部分を含むことを特徴とする請求項 3 9 又は請求項 4 0 に記載の方法。

【請求項 4 2】

前記ウェーハは、シリコンを含み、前記レーザパルスの波長が、 $1.0\ \mu\text{m} - 8.0\ \mu\text{m}$

10

20

30

40

50

mの範囲にあることを特徴とする請求項39から請求項41のいずれか1項に記載の方法。

【請求項43】

レーザパルスの前記計算された少なくとも1つの3次元の配置を前記ウェーハ内に導入する段階が、該ウェーハを曲げることを特徴とする請求項39から請求項42のいずれか1項に記載の方法。

【請求項44】

レーザパルスの前記計算された少なくとも1つの3次元レーザパルスの配置を前記ウェーハ内に導入する段階が、該ウェーハの処理中に起こる該ウェーハの曲げを補償することを特徴とする請求項39から請求項43のいずれか1項に記載の方法。

10

【請求項45】

レーザパルスの前記少なくとも1つの3次元配置は、前記ウェーハの深さに関して該ウェーハ内に非対称に導入されることを特徴とする請求項39から請求項44のいずれか1項に記載の方法。

【請求項46】

前記ウェーハは、マイクロ電気機械システム(MEMS)及び/又は光子集積回路を含むことを特徴とする請求項39から請求項45のいずれか1項に記載の方法。

【請求項47】

g. 前記光学構成要素及び/又は前記ウェーハの発生された3次元輪郭の前記予め決められた3次元輪郭からの残存偏差を決定する段階と、

20

h. 前記残存偏差が予め決められた閾値よりも低い場合に方法を終了する段階と、

i. 前記残存偏差が前記予め決められた閾値よりも高いか又はそれに等しい場合に段階b. 及び段階c. を繰り返す段階と、

を更に含むことを特徴とする請求項1から請求項46のいずれか1項に記載の方法。

【請求項48】

前記光学構成要素及び/又は前記ウェーハは、近赤外、可視、及び/又は近紫外波長領域において光透過性であることを特徴とする請求項1から請求項47のいずれか1項に記載の方法。

【請求項49】

光学構成要素及び/又はウェーハの予め決められた3次元輪郭を発生させるための装置であって、

30

a. 前記光学構成要素及び/又は前記ウェーハの現存3次元輪郭の前記予め決められた3次元輪郭からの偏差を決定するように作動可能な計測ツールと、

b. 前記予め決められた3次元輪郭からの前記3次元輪郭の前記決定された現存偏差を補正するためのレーザパルスを定める1又は2以上のパラメータセットを有するレーザパルスの少なくとも1つの3次元の配置を計算するように作動可能な計算ユニットと、

c. 前記光学構成要素及び/又は前記ウェーハの前記予め決められた3次元輪郭を発生させるために前記計算された少なくとも1つのレーザパルスの3次元配置を適用するように作動可能な光源と、

を含み、

40

d. 前記光源は更に、予め定められたパラメータセットを有し、及び/又はレーザパルスの配置内で平面にない3つの方向にレーザパルスの予め定められた距離を有する、レーザパルスの予め定められた3次元配置を連続して適用することによって前記光学構成要素及び/又は前記ウェーハの材料内に基本体積変形を誘起するように作動可能であり、前記計算ユニットは更に、特定の材料及び/又は特定の偏差に対して、前記光学構成要素及び/又は前記ウェーハの前記材料内に誘起された前記基本体積変形から前記レーザパルスを定める前記1又は2以上のパラメータセットを計算するように作動可能であることを特徴とする装置。

【請求項50】

前記計測ツールは、接触表面形状測定装置、擬似接触表面形状測定装置、非接触表面形

50

状測定装置、干渉計、白色光干渉計、共焦点顕微鏡、フォトマスク計測ツール、及び／又は走査電子顕微鏡を含むことを特徴とする請求項４９に記載の装置。

【請求項５１】

前記計算ユニットは、マイクロプロセッサ、汎用プロセッサ、専用プロセッサ、中央演算処理装置、及び／又はその組合せを含むことを特徴とする請求項４９又は請求項５０に記載の装置。

【請求項５２】

前記光源は、超短レーザパルスのビームを発生するように作動可能なレーザ源と、レーザパルスの前記少なくとも１つの配置を発生するように作動可能な走査手段とを含むことを特徴とする請求項４９から請求項５１のいずれか１項に記載の装置。

10

【請求項５３】

前記レーザ源は、Ｔｉ：サファイアレーザ系、及び／又はネオジウム（Ｎｄ）、ツリウム（Ｔｍ）、ホルミウム（Ｈｏ）、及びエルビウム（Ｅｒ）を含む群のうちの少なくとも１つの元素でドープされたＹＡＧレーザ系を含むことを特徴とする請求項５２に記載の装置。

【請求項５４】

半導体工場における半導体製造機器に一体化されるようになっていたことを特徴とする請求項４９から請求項５３のいずれか１項に記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

20

【０００１】

本発明は、光学構成要素及び／又はウェーハの予め決められた３次元輪郭を発生させる分野に関する。

【背景技術】

【０００２】

光学系は、その性能に関して高まりゆく要求を満たさなければならない。例えば、望遠鏡の光学構成要素のサイズは、遠隔物体から発する限られた個数の光子を集光するために着々と増大している。光学構成要素の予め定められた面形態からのごく僅かな偏差であっても、望遠鏡の光学性能又は一般的に光学系の光学性能の低下をもたらす。

【０００３】

30

一方、顕微鏡は、例えば、周囲と比較して非常に低いコントラストを有する物体を解像しなければならない。更に、リソグラフィデバイスの投影系は、益々小さい構造を解像することが要求される。

【０００４】

集積回路（ＩＣ）は、絶え間なく高まる要求を同じく満たさなければならない別の種類のデバイスである。ムーアの法則により、ＩＣを製作するためにウェーハ上に発生される構造要素の最小寸法は絶え間なく縮小する。

【０００５】

以下では、光学系に対して益々高まる要求を投影系に関して、特にフォトリソグラフィ投影露光系に関して例証する。

40

【０００６】

半導体産業において絶えず高まる集積密度の結果として、フォトリソグラフィ投影露光系及びフォトリソグラフィマスクは、益々小さい構造をウェーハ上に配置されたフォトレジスト上に投影しなければならない。この要求を満たすために、投影露光系の露光波長は、電磁スペクトルの近紫外領域から中紫外領域にわたって深紫外領域までシフトしてきた。現在、ウェーハ上のフォトレジストの露光には、１９３ｎｍの波長が一般的に使用されている。

【０００７】

その結果、投影露光系の光学構成要素の製造は、より一層複雑になってきており、従って、より一層高価にもなっている。将来、投影露光系は、電磁スペクトルの極紫外（

50

EUV) 波長領域 (例えば、10 nm - 15 nm の範囲) にある有意により短い波長を使用することになる。

【0008】

そのような波長領域では、例えば、ミラー又はフォトリソグラフィマスクのようなEUV光学要素は、平面性、純度、及び温度安定性に関する極めて高い要求を満たさなければならない。基板面上に配置された多層構造から反射された電磁波の位相面をそれ程外乱しないように、平面性に関するこれらの光学要素の基板の許容可能偏差は、露光波長のごく僅かな部分波長でしかない。EUVミラー及びEUVマスクの基板の平面性の大きい偏差は、ウェーハのフォトレジストにおける波面の強め合う又は弱め合う(部分的な)加算に起因して、フォトレジストにおける光学強度分布の変化をもたらす可能性がある。ウェーハの更に別の処理において、光学強度の変化は、欠陥を有する例えばICのような半導体素子の製作をもたらす場合がある。

10

【0009】

製造業者から供給されるEUV基板は、EUVミラー及びEUVマスクに対する平面性条件を満たしていない可能性さえもある。更に、多層構造の1つの面上にそれぞれ多層構造及び微小パターンを形成するミラー及びマスクの製造工程は、基板の平面性を低下させる可能性さえもある。

【0010】

本出願人の出願であるUS 13/179 799及びUS 13/252 480は、位置合わせ誤差、透過マスクの透過誤差、及び異なるマスクの重ね合わせ誤差を記載している。これらの文献は、その全体が引用によって本明細書に組み込まれている。

20

【0011】

本出願人の出願US 13/084 991は、EUVマスクの基板厚欠陥を基板面の内側の色中心の発生によって局所的に補正する方法を開示している。この文献も、その全体が引用によって本明細書に組み込まれている。

【0012】

更に、フォトリソグラフィマスクの基板の曲げは、EUVマスクの結像誤差をもたらす可能性もある。US 2008/0322 206 A1は、発生されたフォトリソグラフィマスクの平面性を改善する方法を記載している。この文献は、基板の曲げを調節するために又は基板の凹凸を平滑にするために、曲げ領域を含む予め定められた基板領域内に膨張応力及び/又は収縮応力の発生部分を形成することを提案している。膨張応力及び収縮応力の発生部分は、基板の結合状態を局所的に修正するフェムト秒レーザパルスがこの領域内にフォーカスすることによって発生される。

30

【0013】

上述の文献は、既存の光学構成要素の欠陥の補正のための近似を提供する。しかし、将来の高性能光学構成要素の高まり続ける欠陥補正要件は、それにも関わらず満たされることはない。

【0014】

更に、ウェーハは、製造工程中に時として真空チャックでウェーハを締め付けることが困難である程に曲がることが見受けられる。曲げは、ICの製造工程中にウェーハ内に導入される応力によって引き起こされるように思われる。現在、ウェーハの処理中に発生するウェーハの曲げは、製造工程の様々な処理段階によって誘起される応力を低減することによる以外は低下させることができない。この目的のために、処理段階を修正しなければならない。これは、最新のICを製作するのに必要とされる処理段階の非常に複雑なシーケンスに起因して厄介な作業である。その上、製作されたICの電氣的な機能における性能低下を許容することが必要である場合もある。

40

【0015】

代替手法として、現時点で、ウェーハの裏面に付加することができ、かつ様々な処理段階の曲げ効果を低減する層が開発されている。補助的な層をウェーハの裏側に追加することは、最新のICの既に厄介な製造工程の中に更に別の処理段階を導入することになる。

50

【先行技術文献】

【特許文献】

【0016】

【特許文献1】US 13/179 799

【特許文献2】US 13/252 480

【特許文献3】US 13/084 991

【特許文献4】US 2008/0 322 206 A1

【非特許文献】

【0017】

【非特許文献1】<http://micro.com/technical-notes/bk7-quartz-ge-si> 10【非特許文献2】<http://de.wikipedia.org/wiki/Silizium>

【非特許文献3】P. DAntonio及びJ. H. Konner t 著論文、Appl. Phys. Lett. 第64巻第4号437~439ページ、1994年1月、ISSN: 0003-6951、デジタルオブジェクト識別子: 10.1063/11.111121

【非特許文献4】M. A. Green 著「Solar cell research and development in Australia (オーストラリアにおける太陽電池の研究開発)」、Solar Cells 第26巻、1~166ページ(1989年) 20

【非特許文献5】P. L. Liu、R. Ren 及び N. Bloembergen 著論文「Picosecond laser-induced melting and morphology on Si (Si に対するピコ秒レーザー誘導融解及び形態論)」、Appl. Phys. Lett. 第34巻864~66ページ、1979年

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0018】

従って、本発明の1つの目的は、高性能の光学構成要素及び/又はウェーハを生成するための改善された方法及び装置を提供することである。

30

【課題を解決するための手段】

【0019】

本発明の第1の態様により、請求項1に記載の方法を提供する。一部の実施形態において、光学構成要素及び/又はウェーハの予め決められた3次元輪郭を発生させる方法は、(a) 光学構成要素の予め決められた3次元輪郭からの現存3次元輪郭の偏差を決定する段階と、(b) 予め決められた3次元輪郭からの3次元輪郭の決定された現存偏差を補正するためのレーザーパルス进行を定める1又は2以上のパラメータセットを有する少なくとも1つの3次元レーザーパルス配置を計算する段階と、(c) 予め決められた3次元輪郭を発生させるために、計算された少なくとも1つの3次元レーザーパルス配置を光学構成要素及び/又はウェーハ上に適用する(印加する: applying) 段階とを含む。

40

【0020】

本発明の3次元(3D)手法は、一方でレーザービームパラメータ及び3Dレーザーパルス配置と、他方で3Dレーザーパルス配置によって光学構成要素及び/又はウェーハに誘起される体積変形との間の関係を確立する。そのような関係の確立は、光学構成要素及び/又はウェーハの予め決められた3D輪郭の発生に必要なレーザービームのパラメータ及び3Dレーザーパルス配置の決定を可能にする。

【0021】

従って、3Dレーザーパルス配置の計算のための本発明の方法の手法は、光学構成要素及び/又はウェーハの3D性質を考慮に入れる。従って、この手法は、2次元近似、並びに現在まで一般的に使用されてきた現象学的手法の欠点の大部分を解消する。従って、本発

50

明の方法は、光学構成要素及び／又はウェーハの予め決められた３Ｄ輪郭から決定された偏差を補正するレーザパルスを決める１つ又はいくつかのパラメータセットを有する１又は２以上の３Ｄレーザパルス配置を計算することを可能にする。一実施形態において、本発明の方法は、光学構成要素及び／又はウェーハの面と平行及び垂直な３Ｄ輪郭偏差の同時補正を可能にする。更に、本発明の方法は、光学構成要素又はウェーハの欠陥の補正だけではなく、ブランク又は標準光学構成要素からの特定の光学構成要素の製作をも可能にする。

【００２２】

更に別の態様により、方法段階（ｂ）は、予め定められたパラメータセットを有し、及び／又はレーザパルス配置内で平面にない３つの方向に予め定められたレーザパルス距離を有する予め定められた３次元レーザパルス配置によって光学構成要素及び／又はウェーハ内に誘起される基本体積変形を決定する段階を更に含む。

10

【００２３】

更に別の態様により、段階（ｂ）は、予め定められたパラメータセットを有し、及び／又は３次元レーザパルス配置内で平面にない３つの方向に予め定められたレーザパルス距離を有するレーザパルスを含む予め定められた３次元レーザパルス配置を連続して適用することによって光学構成要素及び／又はウェーハ内に誘起される基本体積変形を決定する段階を更に含む。

【００２４】

特定の材料及び／又は特定の偏差に対しては、光学構成要素及び／又はウェーハの材料内に特定の予め定められた３Ｄ配置を書き込むことによる特定の予め定められたレーザパルス配置の効果を決定することが有利である場合がある。いくつかの予め定められた３Ｄレーザパルス配置によって誘起された体積変形の測定結果から、光学構成要素及び／又はウェーハの予め定められた輪郭から決定された偏差を補正するためのレーザパルスのパラメータ及び３Ｄレーザパルス配置のパラメータが計算される。この手法は、材料パラメータからの変形体積の決定及び複雑な計算を回避する。

20

【００２５】

この状況を簡単な例で例示する。例えば、レーザパルスの（線形）密度がｙ方向よりもｘ方向に高い第１の３Ｄレーザパルス配置が光学構成要素及び／又はウェーハに適用される。次いで、次の段階で、レーザパルスの（線形）密度がｘ方向よりもｙ方向に高い第２の３Ｄレーザパルス配置が光学構成要素及び／又はウェーハに適用される。これに代えて、３Ｄレーザパルス配置内で密度を固定状態に保つことができ、レーザパルスパラメータを変化させることができる。

30

【００２６】

別の態様において、少なくとも１つの３次元レーザパルス配置を計算する段階は、（ｄ）光学構成要素及び／又はウェーハの予め決められた３次元輪郭からの現存３次元輪郭の偏差と、少なくとも１つの３次元レーザパルス配置によって誘起された体積変形とを含むターゲット汎関数を設定する段階と、（ｅ）少なくとも１つの３次元レーザパルス配置を変化させることによってターゲット汎関数を最小にする段階とを含む。少なくとも１つの３次元レーザパルス配置を変化させる段階は、少なくとも１つのレーザパルスパラメータを変化させる段階を含む。

40

【００２７】

更に別の態様は、ターゲット汎関数を最小にするためにラグランジュ変分原理を使用する段階を更に含む。

【００２８】

更に別の態様により、レーザパルスを決めるパラメータセットは、レーザビームのエネルギー、パルス長、繰り返し数、光学構成要素及び／又はウェーハの１つの場所の上に向けられるパルスの個数、ビーム偏光、開口数、フォーカスサイズ、ビーム形状、及び／又は非点収差を含む。

【００２９】

50

更に別の態様において、少なくとも1つの3次元レーザパルス配置のパラメータは、3つの方向の配置のサイズと、2又は3以上の入射レーザパルスの場所の間の3次元距離とを含む。一態様において、異なるレーザパルスは、ビーム方向に対して直角な区域内で重ならないピクセルを3次元レーザパルス配置内に発生する。別の態様において、レーザパルスは、ビーム方向に対して直角な区域内で部分的又は実質的に完全に重なる2又は3以上のピクセルを3次元レーザパルス配置内に発生する。更に別の態様において、ビーム方向に対して直角な区域内で重なる2又は3以上のピクセルは、ビーム方向に完全又は部分的に重なる。

【0030】

非重ね合わせピクセルの場合に、光学構成要素及び/又はウェーハに対するレーザパルス配置の効果は、個々のピクセルの効果を加え合わせることによって計算することができる。部分的又は完全に重なるピクセルの場合に、ピクセルを形成する個々のレーザパルスの効果を単純に加算することによって3次元レーザパルス配置の効果を決することは可能ではない。

【0031】

更に別の態様は、レーザパルスによって引き起こされる歪み分布によって誘起される応力分布により、光学構成要素及び/又はウェーハの質量密度及び/又は光透過率を修正する段階を更に含み、応力分布と歪み分布は、フックの法則によって結び付けられる。

【0032】

更に別の好ましい態様は、光学構成要素及び/又はウェーハを貫通し、基本体積 V_0 を定めるノード N_i を有する3次元格子を導入する段階を更に含む。本出願では、基本体積という用語と基本セルという用語を同義語として使用する。

【0033】

更に別の態様により、3次元格子ノード N_i の変位 u_i は、レーザパルスのパラメータセット及び/又は少なくとも1つのレーザパルス配置のパラメータの関数である。別の態様は、 MS_i が、単一書込モードシグニチャーの成分を表し、添字 m が、複数の書込モードシグニチャーの計数値である時に、少なくとも1つの3次元書込密度 a と、複数の書込モードシグニチャー MS_i^m とを決定する段階を更に含む。いくつかの3次元書込密度 a_m の場合に、添字 m は、書込密度の個数の計数値でもある。

【0034】

好ましい態様において、テンソル $(P_{no}^g)^{-1}$ が、変位空間内で作用するポテンシャルエネルギーの逆テンソルであり、 P_{oks}^w が、正常基本体積変形モード空間内で作用するポテンシャルを説明するテンソルの要素であり、両方のテンソルが、光学構成要素及び/又はウェーハの材料パラメータを含み、

$$\sum_{j=0}^{17} \eta_{ij} MS_j$$

が、単位書込に対する平衡変形変位の書込モードシグニチャー MS_i への投影である時に、基本体積 V_0 内の3次元書込密度 a と書込モードシグニチャー MS_i は、

$$\xi_n = \sum_{o=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{k=0}^7 \sum_{s=0}^2 \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{i=0}^{17} (P_{no}^g)^{-1} P_{oks\alpha}^w a^\alpha \eta_{(3k+s)i} MS_i$$

によって与えられる変位 u_n を導入する。

【0035】

この式は、レーザパルス及び/又は3Dレーザパルス配置のパラメータを光学構成要素及び/又はウェーハに対するその効果と結び付ける。これは、レーザパルスのビームが光学構成要素及び/又はウェーハの基板材料内に誘起する効果を決定するために、本発明の方法が、光学構成要素及び/又はウェーハの材料パラメータと基本的な物理法則とを使用

10

20

30

40

50

することを意味する。

【 0 0 3 6 】

別の態様において、テンソル $(P_{n_0}^g)^{-1}$ が、変位空間内で作用するポテンシャルの逆テンソルであり、かつ

$$A_{n\alpha} = \sum_{l=0, t=0}^{7,2} P_{nl\alpha}^w e_{lt}$$

であり、 P_{nlt}^w が、正常基本体積変形モードの空間内で作用するポテンシャルを説明するテンソルの要素であり、両方のテンソルが、光学構成要素及び／又はウェーハの材料パラメータ含み、 e_{lt} が、単位書込密度に対する基本体積の格子ノード N_l の平衡変形変位である時に、光学構成要素及び／又はウェーハにわたるレーザパルス配置の 3 次元書込密度 a は、

$$\xi_n = \sum_{0=1, \alpha=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, K_x \cdot L_y \cdot M_z} (P_{no}^g)^{-1} A_{o\alpha} a^\alpha$$

によって与えられる光学構成要素及び／又はウェーハの格子ノード N_n の変位 ξ_n を誘起する。

【 0 0 3 7 】

更に別の態様により、基本体積内で重なる光学構成要素及び／又はウェーハにわたる R 個のレーザパルス配置の 3 次元書込密度 a_m は、

$$\xi_n = \sum_{0=1, \alpha=1, m=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, K_x \cdot L_y \cdot M_z, R} (P_{no}^g)^{-1} A_{o\alpha} a_m^\alpha$$

によって与えられる変位 ξ_n を導入する。

【 0 0 3 8 】

更に別の態様において、レーザビームの少なくとも 1 つの書込密度は、光学構成要素及び／又はウェーハの損傷閾値よりも低い。別の態様により、レーザビームの少なくとも 1 つの書込密度は、光学構成要素及び／又はウェーハの損傷閾値よりも高い。

【 0 0 3 9 】

別の態様は、光学構成要素及び／又はウェーハの基本体積内の 3 次元格子 N_n の変位 ξ_n を基本体積と光学構成要素及び／又はウェーハの他の基本体積との相互作用なく決定する段階を更に含む。更に別の態様は、基本体積を組み合わせることで組合せ基本体積の累積ポテンシャルエネルギーを最小にすることによって光学構成要素及び／又はウェーハの基本体積を組み合わせることにより、光学構成要素及び／又はウェーハの合計変形を決定する段階を含む。

【 0 0 4 0 】

最後の態様の手法は、レーザパルス及び 3 D レーザパルス配置のパラメータの複雑な計算を容易にする。更に、レーザパルスの効果は、光学構成要素及び／又はウェーハの材料内で小さく、実験的解明は現時点では限られているので、この手法が唯一可能なものであると考えられる。

【 0 0 4 1 】

別の態様により、段階 (a) は、光学構成要素及び／又はウェーハの現存 3 次元輪郭を測定する段階を更に含む。別の態様において、現存 3 次元輪郭を測定する段階は、接触表面形状測定装置、擬似接触表面形状測定装置、非接触表面形状測定装置、干渉計、白色光干渉計、共焦点顕微鏡、フォトマスク計測 (metrology) ツール、走査電子顕微鏡、及び／又はこれらのデバイスの組合せを使用する段階を更に含む。

【 0 0 4 2 】

10

20

30

40

50

更に別の態様により、段階（a）は、決定された現存場所 i^{det} と予め決められた場所 i^{predet} との差から位置 i における光学構成要素及び／又はウェーハの３次元輪郭の偏差 $\Delta\varphi_i$ を決定する段階を更に含む。更に別の態様において、段階（b）は、 $\Delta\varphi_i$ が、位置 i において R 個の書込密度 a_j^m によって発生された変位であり、最終項が、正規化係数を有するチコノフ正規化である時に、ターゲット汎関数を最小にする段階

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^L (\Delta\varphi_i + \zeta_i)^2 + \sum_{m=1, j=1}^{R, K_x \cdot L_y \cdot M_z} \lambda_m^a a_j^{m^2} \right\}$$

を更に含む。

10

【0043】

有益な態様は、光学構成要素及び／又はウェーハを実質的に透過することができるレーザパルスが光学構成要素及び／又はウェーハに印加する段階を更に含む。

【0044】

この関連で、並びに本明細書の更に別の箇所において、「本質的に」という用語は、測定限界の範囲にある量の数値を意味する。

【0045】

別の態様は、レーザパルスの光子エネルギーが光学構成要素及び／又はウェーハのバンドギャップエネルギーよりも低いようにレーザパルスの波長を選択する段階を更に含む。

【0046】

20

更に別の態様において、レーザパルスの光子エネルギーは、光学構成要素及び／又はウェーハのバンドギャップエネルギーの 0.95 倍よりも低く、好ましくは、0.9 倍よりも低く、より好ましくは、0.8 倍よりも低く、最も好ましくは、0.7 倍よりも低い。

【0047】

有利な態様により、レーザパルスの光子エネルギーは、最低バンドギャップエネルギーを有する処理されたウェーハの材料のバンドギャップエネルギーの 0.95 倍よりも低く、好ましくは、0.9 倍よりも低く、より好ましくは、0.8 倍よりも低く、最も好ましくは、0.7 倍よりも低く、処理されたウェーハは、1 又は 2 以上の集積回路、又は 1 又は 2 以上の集積回路の少なくとも一部を含む。

【0048】

30

更に別の態様において、光学構成要素は、極紫外波長放射線のための光学構成要素、特に極紫外放射線のためのミラー又はフォトリソグラフィマスクを含む。

【0049】

別の態様により、極紫外波長放射線のための光学構成要素は、多層構造を有する前面と反対の裏面上に透過性導電コーティングを含み、透過性導電層は、近赤外線、可視、及び／又は紫外線の波長領域で光透過性を有する。更に別の態様において、透過性導電コーティングは、錫酸化物、インジウム錫酸化物、アンチモン錫酸化物、アルミニウム亜鉛酸化物、又はこれらの材料の組合せを含む。

【0050】

更に別の態様において、段階（a）は、極紫外放射線のための光学構成要素の裏面の平面度偏差を決定する段階を含み、段階 c は、極紫外放射線のための光学構成要素の裏面を平坦化するために、計算された少なくとも 1 つの 3 次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。更に別の態様により、段階（a）は、極紫外放射線のためのフォトリソグラフィマスクの裏面の平面度偏差を前面上に多層構造と吸収剤層とを配置した後であるが吸収剤層をパターン化する前に決定する段階を含み、段階（c）は、極紫外放射線のためのフォトリソグラフィマスクの裏面を平坦化するために、計算された少なくとも 1 つの 3 次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。

40

【0051】

更に別の態様において、段階（a）は、極紫外放射線のための光学構成要素の裏面の平面度偏差を前面の周囲区域から多層構造を除去した後に決定する段階を含み、段階（c）

50

は、極紫外放射線のための光学構成要素の裏面を平坦化するために、計算された少なくとも1つの3次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。更に別の有益な態様により、段階(a)は、極紫外放射線のための光学構成要素の多層構造の予め決められた平面度からの多層構造の平面度偏差を決定する段階を含み、段階(c)は、極紫外放射線のための光学構成要素の多層構造の予め決められた平面度を発生させるために、計算された少なくとも1つの3次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。

【0052】

本発明の方法は、マスク製作工程中の欠陥の発生を回避するためにEUVマスクの製作工程における様々な段階間に適用することができる。

【0053】

別の態様により、段階(a)は、予め決められたパターンからの透過フォトリソグラフィマスクのパターン要素の偏差を決定する段階を含み、段階(c)は、予め決められたパターンを発生させるために、計算された少なくとも1つの3次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。有益な態様により、段階(a)は、予め定められた光透過率からの透過フォトリソグラフィマスクにわたる光透過率の偏差を決定する段階を含み、段階cは、予め定められた光透過率を発生させるために、計算された少なくとも1つの3次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。別の態様において、段階(a)は、予め決められたパターン及び予め定められた光透過率からの透過フォトリソグラフィマスクにわたるパターン要素及び光透過率の偏差を決定する段階を含み、段階(c)は、透過フォトリソグラフィマスクにわたる予め決められたパターンと予め定められた光透過率とを同時に発生させるために、計算された少なくとも1つの3次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。

【0054】

本発明の方法の3D手法の利点のうちの1つは、単一3Dレーザパルス配置の適用又は単一書込段階の適用により、光学構成要素のいくつかの欠陥の補正を可能にすることである。

【0055】

更に別の態様において、段階(a)は、予め決められた3次元光学輪郭からの平坦な光学構成要素の偏差を決定する段階を含み、段階(c)は、元は平坦な光学構成要素の予め決められた3次元光学輪郭を発生させるために、計算された少なくとも1つの3次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。

【0056】

3D手法を使用することにより、本発明の方法は、与えられたブランクから特定の光学構成要素を製作する潜在力を有する。

【0057】

更に別の態様において、段階(a)は、予め決められた非球面輪郭からの光学構成要素の球面輪郭の偏差を決定する段階を含み、段階(c)は、光学構成要素の予め決められた非球面輪郭を発生させるために、計算された少なくとも1つの3次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。

【0058】

更に、本発明の方法は、標準の費用効果的光学構成要素からの特定の光学構成要素の製作を可能にする。標準光学構成要素の3D輪郭が標準構成要素の製造業者から提供される場合に、本発明の方法段階(a)を実施しなくてもよい。

【0059】

別の好ましい態様により、段階(a)は、妨害内部全反射シャッターの予め決められた接触面からの妨害内部全反射シャッターの接触面の偏差を決定する段階を含み、段階cは、妨害内部全反射シャッターの予め決められた接触面を発生させるために、計算された少なくとも1つの3次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。

【0060】

更に別の態様において、段階(a)は、ナノインプリントリソグラフィテンプレートの予め決められた3次元輪郭からのナノインプリントリソグラフィテンプレートの3次元輪

10

20

30

40

50

郭の偏差を決定する段階を含み、段階 c . は、ナノインプリントリソグラフィテンプレートの予め決められた 3 次元輪郭を発生させるために、計算された少なくとも 1 つの 3 次元レーザパルス配置を適用する段階を含む。

【 0 0 6 1 】

別の有益な態様により、ウェーハは、半導体材料を含み、又はウェーハは、複合半導体材料を含む。有利な態様において、半導体材料は、シリコンを含む。好ましい態様において、ウェーハは、1 又は 2 以上の集積回路の少なくとも一部を含む。

【 0 0 6 2 】

光学構成要素以外では、ウェーハは、上記で定めた方法を適用することができる第 2 の種類の構成要素又はデバイスである。本明細書の第 2 部で上述したように、ウェーハは、半導体工場における製作段階中に曲がる可能性がある。曲げは、小型化してゆく構造要素及びより複雑な IC では悪化する。上記で記述した方法は、半導体工場における製造工程中に累積される処理された又は部分的に処理されたウェーハの曲げを補正するために IC の製造工程内で使用することができる。従って、この定義された方法は、将来の IC の性能低下を少なくとも部分的に回避することができる。

【 0 0 6 3 】

別の態様において、ウェーハは、シリコンを含み、レーザパルスの波長は、 $1.0\ \mu\text{m} - 8.0\ \mu\text{m}$ の範囲、好ましくは、 $1.3\ \mu\text{m} - 7.0\ \mu\text{m}$ の範囲、最も好ましくは、 $1.5\ \mu\text{m} - 6.0\ \mu\text{m}$ の範囲にある。

【 0 0 6 4 】

更に別の態様は、レーザパルスのエネルギーがウェーハのバンドギャップエネルギーに近いようにレーザパルスに対する波長を選択する段階を含む。更に別の態様において、ウェーハは、シリコンを含み、レーザパルスの波長は、 $< 1300\ \text{nm}$ 、より好ましくは、 $< 1200\ \text{nm}$ 、最も好ましくは、 $< 1100\ \text{nm}$ である。

【 0 0 6 5 】

好ましい態様により、計算された少なくとも 1 つの 3 次元レーザパルス配置のウェーハ内への導入は、ウェーハを曲げる。有益な態様において、計算された少なくとも 1 つの 3 次元レーザパルス配置のウェーハ内への導入は、ウェーハの処理中に発生するウェーハの曲げを補償する。

【 0 0 6 6 】

別の態様において、少なくとも 1 つの 3 次元レーザパルス配置は、ウェーハの深さに関してウェーハ内に非対称に導入される。

【 0 0 6 7 】

更に別の態様において、ウェーハは、マイクロ電気機械システム (MEMS) 及び / 又は光子集積回路を含む。

【 0 0 6 8 】

更に別の態様は、1 又は 2 以上の集積回路を生成するために、計算された少なくとも 1 つの 3 次元レーザパルス配置をウェーハ内にウェーハが処理されるウェーハ前面を通して導入する段階を含む。更に別の態様により、レーザパルスのエネルギーは、最も低いバンドギャップエネルギーを有する集積回路の材料よりも低い。

【 0 0 6 9 】

別の態様は、1 又は 2 以上の集積回路を生成するために、計算された少なくとも 1 つの 3 次元レーザパルス配置をウェーハ内にウェーハが処理される前面とは反対の裏面を通して導入する段階を含む。

【 0 0 7 0 】

更に有益な態様は、(f) 予め決められた 3 次元輪郭からの光学構成要素及び / 又はウェーハの発生された 3 次元輪郭の残存偏差を決定する段階と、(g) 残存偏差が予め決められた閾値よりも低い場合に本方法を終了する段階と、(h) 残存偏差が予め決められた閾値よりも高いか又はそれに等しい場合に段階 (b) 及び段階 (c) を繰り返す段階とを更に含む。

10

20

30

40

50

【0071】

別の有利な態様において、光学構成要素は、近赤外線、可視、及び／又は近紫外線の波長領域で光透過性を有する。

【0072】

この態様は、本発明の方法段階(c)を光学構成要素及び／又はウェーハ上で実際に実施することができることを保証する。

【0073】

更に別の態様により、光学構成要素及び／又はウェーハの予め決められた3次元輪郭を発生させるための装置は、(a)予め決められた3次元輪郭からの光学構成要素及び／又はウェーハの現存3次元輪郭の偏差を決定するように作動可能な計測ツールと、(b)予め決められた3次元輪郭からの3次元輪郭の決定された現存偏差を補正するためのレーザパルスを決める1又は2以上のパラメータセットを有する少なくとも1つの3次元レーザパルス配置を計算するように作動可能な計算ユニットと、(c)光学構成要素及び／又はウェーハの予め決められた3次元輪郭を発生させるために、計算された少なくとも1つの3次元レーザパルス配置を適用するように作動可能な光源とを含む。

10

【0074】

別の態様において、計測ツールは、接触表面形状測定装置、擬似接触表面形状測定装置、非接触表面形状測定装置、干渉計、白色光干渉計、共焦点顕微鏡、フォトマスク計測ツール、及び／又は走査電子顕微鏡を含む。

【0075】

更に有益な態様により、計算ユニットは、マイクロプロセッサ、汎用プロセッサ、専用プロセッサ、中央演算処理装置、及び／又はその組合せを含む。

20

【0076】

更に別の態様において、光源は、超短レーザパルスのビームを発生するように作動可能なレーザ源と、少なくとも1つのレーザパルス配置を発生するように作動可能な走査手段とを含む。更に別の態様において、レーザ源は、Ti:サファイアレーザ系、及び／又はネオジウム(Nd)、ツリウム(Tm)、ホルミウム(Ho)、及びエルビウム(Er)を含む群のうちの少なくとも1つの元素でドープされたYAGレーザ系を含む。最後に、装置は、半導体工場内の半導体製造機器に一体化されるようになっている。

【0077】

本発明をより明快に理解し、その実際的な適用を認識するために、以下の図を提供し、以下の本文で参照する。図は、単なる例として提供するものに過ぎず、決して本発明の範囲を限定するわけではないことに注意しなければならない。

30

【図面の簡単な説明】

【0078】

【図1】透過フォトリソグラフィマスクの概略断面図である。

【図2】反射フォトリソグラフィマスクの概略断面図である。

【図3】凹凸のある裏面を有する極紫外(EUV)マスクブランクの概略断面図である。

【図4】光学構成要素の現存3次元輪郭(3D)の決定のための共焦点顕微鏡の概略断面図である。

40

【図5】3次元(3D)レーザパルス配置を計算し、予め定められた輪郭を発生させるために計算された3Dレーザパルス配置を光学構成要素に適用するための装置のブロック図を表す概略図である。

【図6】計算された3Dレーザパルス配置をEUVマスクに適用するための構成を示す概略図である。

【図7】マスクブランクを主として垂直方向に局所膨張させるピクセルを発生する2つの2次元(2D)レーザパルス配置を適用することによる元は平坦なマスクブランクのマスクブランク面に対して垂直な膨張を例示する概略図である。

【図8】ビーム方向に対して垂直な平面に実質的に等方性の膨張をもたらすレーザパルス配置の適用によって基本区域内に誘起された変形を示す概略図である。

50

【図 9】x 方向に実質的に 1 次元の膨張をもたらすレーザパルス印加によって基本区域内に誘起された変形を表す概略図である。

【図 10】3 D レーザパルス配置が適用されたマスクブランクの一部分を示す図である。

【図 11】図 8 に示す基本区域の変形をもたらすレーザパルスを用いた 2 D レーザパルス配置によって誘起されたマスクブランクのビーム方向 (z 方向) の変形を示す図である。

【図 12】図 9 に示す基本区域の変形をもたらすレーザパルスを用いた 2 D レーザパルス配置によって誘起されるマスクブランクのビーム方向の変形を表す図である。

【図 13】発生される回転対称 3 D ターゲット輪郭の断面を示す図である。

【図 14】図 13 の 3 D ターゲット輪郭をマスクブランク上の 2 D 表現として示す図である。

10

【図 15】図 14 のマスクブランクの x 方向の膨張を実施するのに使用される 2 D レーザパルス配置又は書込マップの計算結果を示す図である。

【図 16】図 14 のマスクブランクの y 方向の膨張を実施するのに使用される 2 D レーザパルス配置の計算結果を表す図である。

【図 17】図 15 及び図 16 の書込マップを含む 3 D レーザパルス配置によってマスクブランク内に誘起された 3 D 輪郭の測定結果を示す図である。

【図 18】平滑化薄板スプライン (TPS) 当て嵌めを適用した後の図 17 の 3 D 輪郭の測定結果を表す図である。

【図 19】図 13 の 3 D ターゲット輪郭 (y 軸によって示す y 方向の尺度) を図 18 に示す断面において得られた 2 つのプロット (図 19 の右側に示す y 方向の尺度) と比較する図である。

20

【図 20】3 D レーザパルス配置の適用による元は平坦なマスクブランクからの大きい焦点距離を有するレンズの製作を示す概略図である。

【図 21】鞍部のプロファイルを有する 3 D ターゲット輪郭の 2 D 表現を示す図である。

【図 22】元は平坦なマスクブランクをその前面の近くで水平方向 (x 方向) に膨張させるために使用される 2 D レーザパルス配置の計算結果を示す図である。

【図 23】元は平坦なマスクブランクをその前面の近くで垂直方向 (y 方向) に膨張させるために使用される 2 D レーザパルス配置の計算結果を示す図である。

【図 24】元は平坦なマスクブランクを裏マスクブランク面の近くで水平方向に膨張させるために使用される 2 D 書込モードの計算結果を例示する図である。

30

【図 25】元は平坦なマスクブランクを裏マスクブランク面の近くで垂直方向に膨張させるために使用される 2 D 書込モードの計算結果を表す図である。

【図 26】図 23 から図 26 の書込マップを含む 3 D 配置の適用によって誘起されたマスクブランクの 3 D 輪郭の測定結果を示す図である。

【図 27】マスクブランクの 3 D 輪郭の測定結果を示す図である。

【図 28】TPS 当て嵌めを適用した後の図 27 の 3 D 輪郭の測定結果を示す図である。

【図 29】3 D 輪郭を除去するために、すなわち、マスクブランク面を平坦化するために図 27 の 3 D 輪郭を水平方向に膨張させるための 2 D レーザパルス配置又は書込マップの計算結果を表す図である。

【図 30】3 D 輪郭を除去するために、すなわち、マスクブランク面を平坦化するために図 27 の 3 D 輪郭を垂直方向に膨張させるための 2 D レーザパルス配置の計算結果を表す図である。

40

【図 31】図 29 及び図 30 の書込マップを含む 3 D レーザパルス配置を適用した後の図 27 の 3 D 輪郭を示す図である。

【図 32】高さの尺度を $8\ \mu\text{m}$ ($-4000\ \text{nm}$ から $+4000\ \text{nm}$ まで) から $1\ \mu\text{m}$ ($-500\ \text{nm}$ から $+500\ \text{nm}$ まで) に下げた後の図 31 の 3 D 輪郭を示す図である。

【図 33】平滑化 TPS 当て嵌めを適用した後の図 32 の 3 D 輪郭を表す図である。

【図 34】 $0.1\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ までの波長領域のシリコン (Si) の透過率スペクトルの概要を示す図である。

【図 35】 $1\ \mu\text{m}$ から $9\ \mu\text{m}$ までの波長領域の Si の透過率スペクトルを描示し、かつこ

50

の波長領域の透過率の温度挙動を示す図である。

【図 3 6】250 nm から 1400 nm までの波長領域にわたる吸収係数の変化を示す図である。

【図 3 7】ガウスビームのフォーカス範囲を示し、この範囲に円筒体を表す図である。

【図 3 8】ガウスビームフォーカス内の図 3 7 の円筒体内にレーザパルスによって累積されるエネルギーを例示する図である。

【図 3 9】個々のパルスがパルス幅 t_{pulse} 及び周期 T を有する規則的パルス列を表す図である。

【図 4 0】バンドエッジ範囲、すなわち、950 nm から 1200 nm までの波長領域の S_i の透過率を示す図である。

【図 4 1】図 3 7 のガウスビームフォーカスを S_i の融点よりも大きい温度まで加熱するための推定パルスエネルギーを示す図である。

【図 4 2】ウェーハの前面上に集積回路を製作する工程の開始前のウェーハを通る断面を示す概略図である。

【図 4 3】処理段階の一部又は全てが実施された後の図 3 4 のウェーハを略示し、処理されたウェーハ内に 2 つの 3 次元 (3D) レーザパルス配置を導入される場所を示す図である。

【図 4 4】2 つの 3D レーザパルス配置が処理されたウェーハ内に導入された後の図 3 5 の処理されたウェーハを示す概略図である。

【図 4 5】本発明の方法の流れ図である。

【図 4 6 a】EUV マスクの予め決められた 3D 輪郭を発生させるために EUV マスクの製造工程中に本発明の方法を使用する段階の流れ図である。

【図 4 6 b】EUV マスクの予め決められた 3D 輪郭を発生させるために EUV マスクの製造工程中に本発明の方法を使用する段階の流れ図である。

【図 4 7】光学構成要素の基本体積又は基本セルを示す概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0079】

本明細書のこの部分は、現存 3D 輪郭を予め決められた 3D 輪郭と一致させるために、レーザパルスの 3D 配置の計算及び計算された 3D レーザパルス配置の適用に向けて光学構成要素の現存 3 次元 (3D) 輪郭の決定に使用されるいくつかの光学構成要素及びいくつかの例示的な装置の説明で始まるように編成したものである。「適用例」という名称の第 2 部では、本発明の方法を a 部においてフォトリソグラフィマスク及び b 部においてウェーハの予め決められた 3D 輪郭を発生させるために適用する。最後に、本章における様々な例の解説に必要な本発明の方法の理論的及び / 又は数学的な背景を「理論的背景」という章題の単独の章において提供する。

【0080】

5. 1. 光学構成要素、計測ツール、及びレーザ系の例

以下では、本発明をその例示的实施形態を示す添付図面を参照してより完全に説明する。しかし、本発明は、異なる形態に具現化することができ、本明細書に示す実施形態に限定されるものと解釈すべきではない。限定されるのではなく、これらの実施形態は、本発明の開示が完全なものになり、本発明の範囲を当業者に伝えることになるように提供するものである。

【0081】

以下では、本発明をフォトリソグラフィマスク及びウェーハを例示的に採用して説明する。しかし、本発明は、いくつかの例を挙げると、望遠鏡、顕微鏡、及び / 又はレーザ系に使用される光学要素に適用することができる。更に、光学構成要素の動作波長領域は、リソグラフィに使用される波長に限定されない。限定されるのではなく、本発明の方法を用いて処理される光学構成要素は、全光学範囲にわたる。更に、本発明は、下記で説明するシリコンウェーハに限定されない。限定されるのではなく、本発明は、あらゆる種類の集積回路の製作工程中に全ての種類のウェーハに適用することができる。

【 0 0 8 2 】

最後に、本明細書の第3章で定める方法は、電磁スペクトルの特定の波長領域に対して透過性を有する材料を有する全ての構成要素に適用することができる。構成要素の材料がこの要件を満たす場合に、構成要素の材料内にピクセルを導入することができる。構成要素の材料内にピクセルを書き込むためのレーザパルスが発生させるために一般的にレーザ系が利用されるので、透過波長領域は、小さいものである（ $< 100\text{ nm}$ ）ことしか必要ではない。電磁スペクトルの紫外部分、可視部分、及び/又は赤外部分では多くのレーザ源が利用可能であるので、構成要素の材料の透過波長領域がこれらのスペクトル範囲にあることが現時点では好ましい。

【 0 0 8 3 】

図1は、透過フォトリソグラフィマスク100の概略断面図を表している。マスク100は、第1の面又は前面130と、第2の面又は裏面140とを有する基板110を含む。基板110は、ウェーハ上のフォトレジストの照明に使用される波長に対して透過性を有するべきである。露光波長は、電磁スペクトルの深紫外（DUV）スペクトル範囲にあるもの、特に 193 nm 前後とすることができる。基板材料は、一般的に石英を含む。基板は、 $152\text{ mm} \times 152\text{ mm}$ の標準横寸法と、実質的に 6.35 mm の厚み又は高さを有する。フォトリソグラフィマスク100の基板110は、半導体素子を製造する元になる予め定められた構造要素をフォトレジスト上に形成する通常はクロムから製作されたパターン要素120を前面130上に有する。フォトリソグラフィマスク100の基板110のうちでパターン要素120を有する部分をマスクの活性区域150と呼び、それに対してパターン要素120を持たない境界部分又は周囲部分を不活性区域160と呼ぶ。露光波長にあるレーザビーム170が、基板110の第2の面又は裏面140を通してマスク100の基板110を照明する。

【 0 0 8 4 】

図2は、電磁スペクトルの極紫外（EUV）スペクトル範囲における将来の使用のための特に 10 nm から 15 nm の範囲の露光波長のための反射フォトリソグラフィマスク200の概略断面図を示している。図1のフォトリソグラフィマスク100とは異なり、マスク200は、多層ミラー構造255に基づく反射光学構成要素である。フォトリソグラフィマスク200の多層ミラー系255は、溶融シリカ基板のような適切な基板210の前基板面230上に堆積される。例えば、ZERO-DUR（登録商標）、ULE（登録商標）、又はCLEARCERAM（登録商標）のような他の透過誘電材料、ガラス材料、又は半導体材料を適用することができる。

【 0 0 8 5 】

多層ミラー系255は、例えば、交替するモリブデン（Mo）層250とシリコン（Si）層260とで構成される約40個の対を含む。各Mo層250の厚みは 4.15 nm であり、Si層260は 2.80 nm になる。多層構造255を保護するために、深さ 7 nm の自然酸化物を有するシリコンのキャップ層270が構造255の上部に配置される。多層ミラー系255内では、Mo層250は散乱層として機能し、それに対してシリコン層260は分割層として機能する。散乱層に対しては、Moの代わりに、コバルト（Co）、ニッケル（Ni）、タングステン（W）、レニウム（Re）、及びイリジウム（Ir）のような高いZ数を有する他の元素を利用することができる。

【 0 0 8 6 】

基板210上の多層構造255は、EUV電磁放射線に対するミラーとして機能する。フォトリソグラフィマスク200にするために、キャップ層270上にバッファ構造280と吸収構造290とが更に堆積される。バッファ層280は、処理中、例えば、吸収構造290のエッチング中に多層ミラー構造255を保護するために堆積させることができる。可能なバッファ構造材料は、例えば、溶融シリカ（ SiO_2 ）、シリコン - 酸素 - 窒化物（ SiON ）、ルテニウム（Ru）、クロム（Cr）、及び/又はクロム窒化物（ CrN ）である。吸収構造290は、EUV波長領域にある光子に対して大きい吸収率を有する材料を含む。これらの材料の例は、クロム（Cr）及び/又はタンタル窒化物（Cr

N)である。一般的に、吸収構造290上に入射する実質的に全てのEUV光子295を吸収するには約50nmの厚みで十分である。それとは対照的に、キャップ層270上に入射する光子295の大多数は光子297として反射される。

【0087】

一般的に、EUVマスク200の基板210も、152mm×152mmの横寸法と、実質的に6.35mmの厚み又は高さとを有する。基板210の裏面225又は基板210の裏面225は、薄い金属コーティング220を有する。一般的に、このコーティング220はクロムを含む。金属コーティング220は、フォトリソグラフィマスク200をEUVスキャナに静電力の適用によって固定するのに使用される。

【0088】

例えば、以下で説明するEUVマスク200のような光学構成要素の予め決められた3D輪郭を発生させる方法では、光ビームの光パルスからのエネルギーが、EUVマスク200の基板210内に局所的に堆積される。しかし、光ビームの光パルスは、多層ミラー構造255によって吸収されることで前基板面230を貫通することができず、裏基板面225上の金属コーティング220によっても吸収されることで裏基板面225を貫通することができない。

【0089】

従って、EUVマスク200の裏基板面225上の金属コーティング220は、図2に示すように、透過性導電コーティング222によって置換される。そのような透過性導電コーティング222は、例えば、インジウム錫酸化物(ITO)を含むことができる。透過性導電コーティングという用語は、コーティング222が、近赤外、可視、及び/又は近紫外の波長領域の光に対して光透過性を有することを意味する。

【0090】

透過性導電コーティングのための別の材料は、例えば、フッ素錫酸化物(FTO)、アルミニウム亜鉛酸化物(AZO)、及び/又はアンチモン錫酸化物(ATO)である。これらの材料は、熔融シリカ基板210の裏基板面225に容易に付加することができ、マスク200をEUVスキャナに固定するほど十分に高い導電率を有する。透過性導電コーティング222は、完全に発生されたEUVマスク200をレーザビームの光パルスで裏基板面225を通して照射することを可能にする。透過性導電コーティング222は、マスク製造工程中に、その最初の段階においてコーティング222がマスクブランク上又は裏基板面225上に配置される場合に、超短レーザパルスをEUVマスク200に適用することを可能にする。

【0091】

EUVミラーは、バッファ層280及び吸収構造290を持たない限り、フォトリソグラフィマスク200の構造を有することができる。従って、EUVミラーでは、光パルスが裏基板面から基板内に入射すること(図2には示していない)ができるように、金属コーティング220を透過性導電コーティング222で置換することができる。

【0092】

図3の模式図は、裏基板面340が平坦ではなく、予め定められた面輪郭350からの2つの偏差部360及び370を有するEUVマスク300のマスクブランク又は基板310を略示している。多層構造255を堆積させるためにマスクブランク310をチャックに固定するときに、チャックは、ブランク300の裏面340を平坦化することができ、それによって前面330の変形がもたらされる。従って、多層構造255は、基板310の凹凸のある前面330上に堆積される。それによって最終的には多層構造255の凹凸面が引き起こされることになる。

【0093】

チャックを用いてブランク310を固定するときに、基板310からのEUVマスクの発生中にブランク310の裏面340が平坦化されないようにすることで、EUVマスクの平らな又は予め定められた前面輪郭を製作することができる。しかし、基板310から発生されたマスクをEUVスキャナ上に固定するときに、その台の静電力が、裏基板面3

10

20

30

40

50

40の偏差部360及び370を実質的に平坦な面350に平坦化することになる。この平坦化は、更に図2の実質的に理想的なEUVマスク200と比較して、基板310上に配置された多層構造255の収差をもたらすことになる。偏差部360及び370によって引き起こされる収差は、ウェーハの位置を変化させることによって、複製スケールを変更することによっても除去することができない。既に解説したように、収差を誘起するのには前基板面330の平面度の1ナノメートルの範囲の偏差で既に十分である。

【0094】

現在、EUVマスク200の吸収構造290は、一般的に電子ビーム書込器を用いて吸収性材料の層をパターン化することによって発生される。この工程では、EUVマスク200は、静電チャックによって固定されない。これは、マスクブランク310の平坦ではない裏面340がパターン化工程中に実質的に変更されないことを意味する。従って、図3に示すような裏基板面輪郭340を有するEUVマスクは、照明工程中に静電チャック上に固定される時に異なる形状を有することになる。それによってウェーハの像配置の変形がもたらされる。標準的なマスクの曲げでは、この問題は、補正された座標で電子ビーム書込器を制御することによって部分的に数学的に解決される。しかし、それにも関わらず、EUVマスクの裏基板面の曲げが複雑な形状を有する可能性があることで問題が存在する。更に、パターン化工程自体が、非平面上では理想的ではない。

【0095】

図4は、光学構成要素又はウェーハの2次元(2D)像又は3D像を決定するために使用することができる計測ツールの例400を略示している。図4の共焦点顕微鏡400は、光学構成要素又はウェーハの3D輪郭を測定するために適用することができる部類の計測ツールの一例に過ぎない。例えば、光学構成要素、並びにウェーハの面プロファイル又は2D又は3Dの微小輪郭又は極微小輪郭を分析するために、表面形状測定装置を使用することができる。接触法又は擬似接触法を利用する表面形状測定装置が利用可能である。スタイラス表面形状測定装置又は機械表面形状測定装置、原子間力顕微鏡、走査トンネル顕微鏡がこの種類の表面形状測定装置の例である。更に、例えば、光学的方法を適用するいくつかの非接触表面形状測定装置も利用可能である。この種類の表面形状測定装置の例は、垂直走査干渉計、白色光干渉計、位相シフト干渉計、及び/又は微分干渉コントラスト顕微鏡である。

【0096】

以下では、共焦点センサ400又は共焦点顕微鏡400の作動原理を概説する。共焦点顕微鏡400は、フォーカス外れ信号成分を除去するために、検出器の前にある光学的に共役な平面内のピンホールの点照明を使用する。図4の例では、点照明は、光源420と、光源420の光をピンホール430を通じ、対物系440を通してフォトマスク410の焦点面450内に結合する光ファイバ425とを用いて発生される。焦点面450から反射された光は、ダイクロイックミラー435により、検出器475の前に配置されたピンホール465に向けられる。光のうちで焦点面450を外れた場所から反射される部分は、焦点面450から反射される光よりも実質的に小さい。更に、焦点面を外れた場所から反射された光は、ピンホール465上にフォーカスされない。

【0097】

例えば、光源420はレーザ源とすることができる。光源からピンホール430に電磁放射線を案内するために光ファイバ425が使用される場合に、ファイバ425がピンホール430と類似の効果を有するので、ピンホール430を省くことができる。検出器475は、例えば、フォトダイオード、アバランシェフォトダイオード、又は光電子増倍管とすることができる。

【0098】

フォトマスク又は一般的に光学構成要素410は、試料台405上に配置することができる。試料台405は移動可能とすることができ、入射光ビームに対して垂直な平面内で(x方向及び/又はy方向に)走査ユニット480によって移動される。試料台405を移動するために、例えば、マイクロマニピュレータ又はサーボモータを使用することがで

10

20

30

40

50

きる（図4には示していない）。試料台405をビーム方向と平行に移動すること、及び／又は対物系440をずらすことにより、光学構成要素410を通して焦点面を走査することができる。別の実施では、試料台は固定され、光ビーム455が、フォトマスク410を通して走査される。この実施を共焦点レーザ走査顕微鏡（CLSM）と呼ぶ（図4には描示していない）。

【0099】

制御ユニット470は、光源420、検出器675、並びに走査ユニット480を制御する。制御ユニット470が対物系440の移動を制御することも可能である（図4には示していない）。更に、制御ユニット470は、少なくともプロセッサと、ストレージユニットと、I/O（入力/出力）ユニットと、ディスプレイとを有するコンピュータシステム内に具現化することができる（図4には表していない）。制御ユニット又はコンピュータシステムは、検出器475から受け入れたデータを格納する。更に、制御ユニットの処理ユニット又はコンピュータシステムのプロセッサ（同じく図4には示していない）は、検出器475の測定データを処理することができる。最後に、制御ユニット470又はコンピュータシステムは、測定されたデータ及び／又は処理されたデータを図5の装置500に伝達するために、装置500への接続を有することができる。

【0100】

共焦点顕微鏡400の横方向解像能は、回折によって制限を受ける。これは、横解像能が、ピンホール430及び465の直径又は開口部、対物系440の開口数（NA）、並びに光源420の波長に依存することを意味する。横方向には、解像能は光源420の波長の範囲にある。ビーム方向の解像能は回折制限を受けないが、最大強度の位置の決定によって制限を受ける。ビーム方向の解像能は、1桁ナノメートル範囲に達する。

【0101】

図5は、レーザパルス配置を計算し、それを光学構成要素及び／又はウェーハに適用するために使用することができる装置500の略ブロック図を描示している。図1及び図2のマスクの例に関して原理を示している。光学構成要素の他の例は、ナノインプリント技術に使用されるテンプレート及び／又は光学系のレンズとすることができる。更に別の例は、上部に集積回路（IC）が発生されるウェーハである。装置500は、3次元で移動可能とすることができるチャック520を含む。光学構成要素510、例えば、マスク510は、例えば、挟着のような様々な技術を使用することによってチャック520に固定することができる。フォトリソグラフィマスク510は、裏基板面140が対物系540の方向に向くように逆さに装着された図1の透過マスク100とすることができる。

【0102】

装置500は、パルス又は光パルスのビーム又は光ビーム535を発生するパルスレーザ源530を含む。レーザ源530は、可変持続時間の光パルスを発生する。パルス持続時間は、10fs程度まで短くすることができるが、100psまで連続的に増大させることができる。パルスレーザ源530によって発生される光パルスのパルスエネルギーを0.001μJ毎パルスから10mJ毎パルスまでに達する広大な範囲にわたって調節することができる。更に、光パルスの繰り返し数は、1Hzから100MHzの範囲を含む。好ましい実施形態において、光パルスは、約800nmの波長で作動するTi:サファイアレイザによって発生することができる。しかし、以下で説明する方法は、このレーザタイプに限定されず、原理的に、フェムト秒範囲の持続時間を有する超短パルスを発生することができ、光学構成要素510に対するバンドギャップよりも小さい光子エネルギーを有する全てのレーザタイプを使用することができる。この基準は、ウェーハに対しても適用される。一般的に、装置500の放出波長は、光学構成要素510又はウェーハのバンドギャップに適応させなければならない。

【0103】

従って、例えば、ネオジウム（Nd）、トリウム（Tm）、ホルミウム（Ho）、及びエルビウム（Er）という元素のうちの少なくとも1つでドープされたYAGレーザ系を使用することができる。更に別の例として、色素レーザ系を適用することができる。装置5

10

20

30

40

50

00は、同じ種類又は異なる種類の1よりも多いパルスレーザ源530を含むことができる(図5には示していない)。

【0104】

光学構成要素510のバンドギャップが、超短レーザパルスを印加するのに使用されるレーザ源の放出波長よりも大きいという要件は、光学構成要素510が、近赤外、可視、及び/又は近紫外の波長領域で光透過性を有するという要件と一般的に同等である。これらの波長領域では、大きいエネルギー密度を有する超短パルスを発生することができるレーザ源が利用可能である。

【0105】

以下の表は、本発明の方法の実施形態に使用される周波数2倍Nd-YAGレーザ系のレーザビームパラメータの概要を表している。

【0106】

(表1)

表1: Nd-YAGレーザ系に関する代表的なレーザビームパラメータ

概要		
パラメータ	数値	単位
パルスエネルギー	0.05~5	μJ
パルス長	0.05~100	ps
繰り返し数	1~10 000	kHz
パルス密度(2D、横)	1 000~10 000 000	mm^{-2}
NA	0.1 0.9	
波長	532	nm

【0107】

パルス密度は、ビーム方向に対して垂直な平面(横平面)内の2D密度を意味する。

【0108】

表1に示すように、ピクセルの発生に使用されるレーザパルスのパラメータ範囲は大きい。従って、ピクセルの特性も非常に異なる。一般的にレーザパルスは、球体の形態にあるピクセルを発生せず、楕円体又は回転楕円体と類似の形態を有するピクセルを発生する。回転楕円体の長さは、 $1\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ の範囲にあり、その幅又は厚みは、例えば、 $0.5\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ を延びる。特徴的な長さ対厚みの比は2から10の範囲にある。表1に示すように、横平面内のピクセル密度は、 10^3 ピクセル毎平方mmから 10^7 ピクセル毎平方mmである。ビーム方向の1次元ピクセル密度は、1ピクセル毎mmから 10^0 ピクセル毎mmの範囲にわたる。

【0109】

以下の表は、フォトリソマスク100の基板110の密度分布及び/又は光透過率分布に様々な影響を及ぼすパラメータを示している。表2は、標準プロセスウィンドウ(s t d P W)と呼ぶ、ピクセルを導入するか又は書き込むモードに向けて周波数2倍Nd-YAGレーザ系を使用する実施形態のパラメータを示している。

【0110】

(表2)

表2: 標準プロセスウィンドウのためのNd-YAGレーザ系に関する代表的なレーザビームパラメータの数値

Std PW (標準プロセスウィンドウ)		
パラメータ	数値	単位
パルスエネルギー	0.45	μJ
パルス長	8	ps
繰り返し数	50 000	kHz
パルス密度(2D、横)	1 000~100 000	mm^{-2}
NA	0.3	
波長	532	nm

10

【0111】

表3は、ここでもまた、周波数2倍Nd-YAGレーザ系を使用する実施形態の低位置合わせプロセスウィンドウ(Low Reg PW)と呼ぶモードのパラメータを要約している。レーザ系530のこの作動モードは、std PWよりも低いエネルギーを有するが、より高いピクセル密度を導入する光パルスを使用する。

【0112】

(表3)

表3：低位置合わせプロセスウィンドウ(Low Reg PW)のためのNd-YAGレーザ系に関する代表的なレーザビームパラメータの数値

Low Reg PW (低位置合わせプロセスウィンドウ)		
パラメータ	数値	単位
パルスエネルギー	0.32	μJ
パルス長	8	ps
繰り返し数	50 000	kHz
パルス密度(2D、横)	5 000~500 000	mm^{-2}
NA	0.3	
波長	532	nm

20

【0113】

以下の表は、レーザ系530の光パルスのエネルギーを更に低減することによって特徴付けられる位置合わせなしプロセスウィンドウ(No Reg PW)と呼ぶモードに関するパラメータを列挙している。

【0114】

(表4)

表4：位置合わせなしプロセスウィンドウ(No Reg PW)のためのNd-YAGレーザ系に関する代表的なレーザビームパラメータの数値

No Reg PW (位置合わせなしプロセスウィンドウ)		
パラメータ	数値	単位
パルスエネルギー	0.19	μJ
パルス長	8	ps
繰り返し数	80 000	kHz
パルス密度(2D、横)	1 000~100 000	mm^{-2}
NA	0.4	
波長	532	nm

40

【0115】

表5は、ピクセルなしプロセスウィンドウ(pixelless PW)と呼ぶモードのパラメータを示している。この場合に、光学構成要素の密度分布及び/又は光透過率分

50

布の修正に向けてTi：サファイアレーザ系が使用される。このレーザ系は、約800nmの放出波長で超短レーザパルスが発生する。pixelless PWのパルス密度は非常に高い。

【0116】

(表5)

表5：ピクセルなしプロセスウィンドウ(pixelless PW)のためのTi：サファイアレーザ系に関する選択されたレーザビームパラメータの数値

Pixelless PW (ピクセルなしプロセスウィンドウ)		
パラメータ	数値	単位
パルスエネルギー	0.1~0.5	μJ
パルス長	0.15	ps
繰り返し数	10 000	kHz
パルス密度 (2D、横)	1 000 000~100 000 000	mm^{-2}
NA	0.33	
波長	800	nm

10

【0117】

ステアリングミラー590は、パルスレーザビーム535をフォーカス対物系530内に向ける。対物系540は、パルスレーザビーム535を裏基板面を通してフォトリソグラフィマスク510の基板内にフォーカスする。適用される対物系のNA(開口数)は、フォーカスの予め定められたスポットサイズと、裏基板面に対する透過マスク510の基板内部のフォーカスの位置とに依存する。表1に示すように、対物系540のNAは最大で0.9とすることができ、この値は、実質的に1 μm のフォーカススポット直径と、実質的に10²⁰W/cm²の最大強度とをもたらす。

20

【0118】

装置500は、レーザビームに対して垂直な平面における(x方向及びy方向の)試料台520の2軸位置決め台の並進を管理するコントローラ580及びコンピュータ560を更に含む。コントローラ580及びコンピュータ560は、チャック520の平面に対して垂直な(z方向の)対物系540の並進を対物系540が固定された1軸位置決め台550を通して制御する。装置500の他の実施では、チャック520に、光学構成要素510又はマスク510をターゲット場所に移動するための3軸位置決め系を装備することができ、かつ対物系540を固定することができ、又はチャック520を固定することができ、かつ対物系540を3次元で移動可能とすることができることに注意しなければならない。現時点では好ましくはないが、対物系540とチャック520の両方に3軸位置決め系を装備することも考えられる。パルスレーザビーム535のターゲット場所への例えば透過マスクのような光学構成要素510のx方向、y方向、及びz方向の移動に向けて手動位置決め台を使用することができ、及び/又は対物系540が、3次元移動のための手動位置決め台を有することができることに注意しなければならない。

30

40

【0119】

更に、装置500は、例えば、チャック520に配置された光源(図5には示していない)からダイクロイックミラー545を通して光を受光する例えばCCD(電荷結合デバイス)のような検出器565を含む観察システムを設けることができる。観察システムは、ターゲット位置への光学構成要素510の進路決定を容易にする。更に、観察システムは、光源530のレーザビーム535によってレーザパルス配置を光学構成要素510内に書き込むことによる光学構成要素510における修正区域の形成を観察するために使用することができる。

【0120】

コンピュータ560は、マイクロプロセッサ、汎用プロセッサ、専用プロセッサ、CP

50

U (中央演算処理装置)、GPU (グラフィック処理ユニット) などとすることができる。このコンピュータは、コントローラ 580 に配置することができ、又は PC (パーソナルコンピュータ)、ワークステーション、メインフレームのような別個のユニットとすることができる。コンピュータ 560 は、キーボード、タッチパッド、マウス、ビデオ/グラフィックディスプレイ、プリンタのような I/O (入力/出力) ユニットの更を含むことができる。更に、コンピュータ 560 は、実験データの要求を図 4 の共焦点顕微鏡 400 の制御ユニット 470 に送ることを可能にする 1 つ又はいくつかの接続ポートを含むことができる。更に、コンピュータ 560 は、揮発性メモリ及び/又は不揮発性メモリを含むことができる。コンピュータ 560 は、ハードウェア、ソフトウェア、ファームウェア、又はこれらのあらゆる組合せで実現することができる。更に、コンピュータ 560 は、

10

【0121】

コンピュータ 560 の不揮発性ストレージは、光学構成要素の 3 次元輪郭を格納することができる。コンピュータ 560 は、共焦点顕微鏡 400 の制御ユニット 470 から実験生データを受け入ることができる。これに代えて、コンピュータ 560 は、制御ユニット 470 から処理されたデータを受け入ることができる。コンピュータ 560 の計算ユニットは、光学構成要素 510 の予め決められた 3D 輪郭と、制御ユニット 470 から受け入れたデータとで、光学構成要素の予め決められた 3D 輪郭からの光学構成要素の測定 3D 輪郭又は現存 3D 輪郭の 1 つ又はいくつかの偏差を決定する。光学構成要素の供給者が、

20

【0122】

コンピュータ 560 は、これらのデータと、第 3 章 (「理論的背景」) で説明するアルゴリズムとで、光学構成要素 510 の現存 3D 輪郭をその予め決められた 3D 輪郭と一致させるのに適切な少なくとも 1 つのレーザパルス配置を計算する。

【0123】

図 6 の模式図 600 は、EUV マスク 610 への 1 又は 2 以上のレーザパルス配置の適用を略示している。EUV マスク 610 は、その前面上に EUV パターン 615 を有し、その裏面上に光透過性導電コーティング 665 を有する。マスク 610 は、特定のハウジング 620 に配置され、マスクパターン 615 を下にしてブラケット 625 上に装着される。ハウジング 620 は、保護ガラス窓 630 で密封される。特定のハウジング 620 は、マスク 610 の環境を制御することを可能にする。特に、ハウジング 620 を排気することを可能とすることができる (図 6 には示していない)。レーザビーム 650 は、対物系 640 によって EUV マスク 610 の基板 660 内にフォーカスされる。交換可能補償ガラス板 670 が、レーザビーム 650 のフォーカスをマスク 610 の基板 660 内の深さに調節する。ハウジング 620 は、いかなる移動可能部分も持たない。

30

【0124】

5.2. 適用例

5.2a. フォトリソグラフィマスク

図 7 の図 700 は、マスクブランク 710 の高さの局所変化を略示している。マスクブランク 710 は、その初期状態において平坦である。レーザパルス 720 の 2D 配置を適用することにより、面の高さが局所的に修正される。物理用語で表現すると、高さ変化又は垂直変形又は z 方向変形は、z 方向の膨張又は収縮と曲げとの組合せである。局所変形は、局在化された効果を生じ、それに対して曲げは広域効果をもたらす。z 方向の局所変形 730 は、2D 又は D3 のレーザパルス配置 720 の適用の結果とすることができ、局所変形を有する局所区域と、2D 又は D3 のレーザパルス配置が書き込まれた区域とのポアソン比によって表現される相互作用からもたらされることも可能である (第 3 節「理論的背景」)。第 3 節の理論的考察は、z 方向曲げと z 方向 (局所) 変形とが実質的に異なる大きさを有するので、殆どの場合にこれらを切り離すことができることも明らかにしている。

40

【0125】

50

図7は、光学構成要素の平面度制御が、曲げとレーザパルス配置によって誘起される面輪郭の両方の制御を必要とすることを指定している。従って、光学構成要素の予め定められた曲げの発生又は決定された曲げの補正は、3Dレーザパルス配置の計算をもたらす3D変形モデルの機能を明らかにするための良い例である。

【0126】

以下で説明する実験の目的は、光学構成要素の曲げの概念を検証することである。更に、3D変形モデルを検査し、3Dレーザパルス配置の発生のためのマルチモード手法の利点を明らかにすることも目標である。

【0127】

以下で説明する実験に対して用いた例示的な光学構成要素は、6インチ(152mm)のマスクブランクである。結果の殆どは、その体積内への3Dレーザパルス配置の適用を可能にして実験結果の殆どを他の形状を有する多くの他の光学構成要素、すなわち、近赤外、可視、及び/又は近紫外の波長領域で光透過性を有する光学構成要素にも適用することができる。

【0128】

異なる2Dレーザパルス配置の適用をマスクブランクの前面及び裏面と平行であるそれぞれの面から異なる深さにある平面内で、異なる書込モードを用いて、すなわち、レーザパルスに関して異なるパラメータ及び/又は異なるパルス密度を有する2Dレーザパルス配置を用いて実施した。2D配置のサイズは、マスクブランクの全活性区域を含む。これらの配置からもたらされる変形を測定格子を約 30×30 個のノードとする $146 \text{ mm} \times 146 \text{ mm}$ の区域内で測定した。

【0129】

この節で記述した適用例に対して使用する共焦点顕微鏡400は、10mmの作動距離と、400nmのビーム方向解像能又はz方向解像能とを有するMicro Epsilon IF S 3401-10共焦点センサである。測定センサのノイズは1000nm前後である。約100nmの距離サンプリング再現性(z方向の)に達するように、全てのサンプリング点で100回の距離サンプリングを加えた。図4の対物系440の位置決め台(Schneeburgerの)は、z方向に約200nmの再現性を有する。z方向の分散への位置決め台の寄与を低減するために、5回の連続走査を取得した。従って、光学構成要素の現存3D輪郭の決定の再現性は、約200nmに低減される可能性がある。マスクブランクの傾斜を常に数学的に補正した。

【0130】

以下の適用例は、マスクブランクの局所膨張をもたらす3Dレーザパルス配置の適用の結果を明らかにしている。しかし、この実証は、本発明の方法の限定ではない。本節で説明する全ての結果は、マスクブランクの局所収縮をもたらす3Dレーザパルス配置の場合に当て嵌めることができる。更に、マスクブランクの第1の区域内に局所収縮をもたらし、マスクブランクの第2の区域内に膨張をもたらす3Dレーザパルス配置を定めることができる。

【0131】

第1の適用例として、マスクブランクの1次元(1D)曲げを説明する。マスクブランクの平面(x/y平面)内に等方性膨張を誘起する2Dレーザパルス配置が適用される場合に、このレーザパルス配置は、マスクブランク平面(x/y平面)の全ての方向に同じ曲率で上述のマスクブランク内の曲げを誘起することになる。従って、局所的等方性膨張をもたらす2Dレーザパルス配置は、1D曲げ、すなわち、例えばx方向に定められ、y方向には存在しないマスクブランクの曲げを発生することを許さない。これは、マスクブランク平面に等方性膨張をもたらす2Dレーザパルス配置を使用する手法の主な又は基本的な制約である。

【0132】

一方、パルス密度以外に、レーザパルスの形状は、マスクブランクの又は一般的に光学構成要素の異方性膨張を導入するのに有効なパラメータである。

【 0 1 3 3 】

次いで、この仮定を実験的に証明する。2 D レーザパルス配置をマスクブランク内で上面の近くに書き込んだ。図 8 に示すように、横平面に等方性膨張をもたらす 2 D レーザパルス配置をマスクブランク内に書き込んだ。ビーム方向に対して垂直な平面内の等方性膨張を例えば円形形状を有するレーザパルスによって発生することができる。図 8 の楕円 8 2 0 は、得られるマスクブランクの膨張を表している。2 つの線 8 6 0 及び 8 7 0 は、空間内の方向に対する膨張の大きさを示している。2 つの軸 8 6 0 及び 8 7 0 は、膨張の主軸を示している。楕円 8 2 0 の離心率は非常に低く、これは、横平面内のマスクブランクの膨張がほぼ均一であることを示している。

【 0 1 3 4 】

楕円 8 2 0 は、マスクブランクの全ての可能な膨張を視覚化することができないので、正方形が、レーザパルス配置を内部に書き込む前のマスクブランクの基本区域 8 1 0 を示している。基本区域 8 1 0 は、第 3 節で紹介する基本体積 の 2 D 投影である。楕円 8 2 0 を用いて既に例示したように、等方性膨張をマスクブランク内に均一な 2 D レーザパルス配置を書き込むことによって基本区域 8 1 0 内に導入した。基本区域 8 1 0 の変形は、その 4 つの頂点での矢印 8 3 0 の長さ及び方向である 8 つのパラメータによって表される。マスクブランク面に対して垂直な軸の周りの基本区域 8 1 0 の回転及びマスクブランク平面における並進は変形を変化させないので、8 つのパラメータのうちの 5 つは独立している。平行六面体 8 4 0 は、実質的に円形のビーム形状を有するレーザパルスを有する均一な 2 D レーザパルス配置によって基本区域 8 1 0 に導入された変形を示している。正方形 8 5 0 は、理想的な等方性膨張による基本区域 8 1 0 の正規化変形を表している。図 8 は、実質的に円形の形状を有する等方性 2 D レーザパルス配置が、基本区域 8 1 0 の等方性膨張を実質的にもたらすことを明らかにしている。

【 0 1 3 5 】

図 9 は、均一な 2 D レーザパルス配置がマスクブランク内に書き込まれ、レーザパルスが、基本区域 9 1 0 の実質的に 1 D の膨張をもたらす場合の状況を描述している。図 9 に示す強度に異方性の膨張は、例えば、円柱レンズ等によって発生されたスリット状ビーム形状を有するレーザビームによって発生することができる。これに代えて、基本区域 9 1 0 の異方性膨張は、1 つの方向に重なるピクセルをもたらす、又は異方性ピクセルを発生する重ね合わせパルスをマスクブランク内に書き込むことによって発生することができる。図 9 では、マスクブランクの異方性膨張を楕円 9 2 0 で象徴している。図 8 の楕円 8 2 0 とは対照的に、楕円 9 2 0 は大きい離心率を有し、ほぼ線に縮退されている。矢印 9 3 0 は、基本区域 9 1 0 内の頂点で誘起された変形を前と同じく象徴している。図 9 に平行六面体 9 4 0 に示すように、レーザパルスの異方性ビーム形状は、基本区域 9 1 0 の高度に異方性の又はほぼ 1 D の変形をもたらす。上述の場合のように、正方形 9 5 0 は、基本区域 9 1 0 の正規化変形を表している。

【 0 1 3 6 】

図 1 0 は、1 5 2 m m × 1 5 2 m m の寸法を有するマスクブランクを示している。マスクブランクの中心において、約 3 9 m m の幅を有するストライプが、2 D レーザパルス配置によって含まれる。単層の 2 D レーザパルス配置がマスクブランクの上面の近くに書き込まれ、それによって得られる結果の解釈が容易になる。図 1 0 の左の尺度上に示すように、マスクブランクの光透過率は、垂直ストライプ内で実質的に 4 . 5 % だけ変更（低減）されている。ピクセルを光学構成要素内書き込むことによって光学構成要素内に導入される光透過率の変化又は光減衰率の増大は、光学構成要素内へのピクセルの書込み量を定量化するための履歴的な尺度である。4 . 5 % の減衰率は、2 D レーザパルス配置によって含まれるストライプ内への過激なピクセル書込を意味する。

【 0 1 3 7 】

図 1 1 は、レーザパルスが、実質的に等方性の膨張をもたらすパラメータを有する図 8 の均一な 2 D 配置によって誘起された高さ変化を示している。図 1 2 は、レーザパルスが、強度に異方性の膨張をもたらすパラメータを有する図 9 の均一な 2 D レーザパルス配置

によって誘起されたビーム方向又は z 方向の変化を描示している。両方の図に関し、高さ変動は、 -3000 nm から $+3000\text{ nm}$ までの大きさにわたって、かつ 152 mm の長さにわたって約 $6\text{ }\mu\text{m}$ のマスキングの合計高さ変化をもたらす。同時に、提供する方法は、ナノメートルレベルで面輪郭を制御することを可能にし、それによってパーミル範囲の不正確性しかもたらされない。EUVマスクの3D輪郭の予め定められた輪郭からの偏差が、光学構成要素の機能を実質的に低減する収差を既にもたらしめているので、EUVマスクの処理にはナノメートル範囲の精密度が必要である。

【0138】

最後に、図11と図12の比較により、異なる方向に異なる曲率を有する曲げを発生させるために、基本区域810内で等方性膨張820を使用することができないという仮定が裏付けられる。図11及び図12の例では、ピクセルは、マスキング面から遠い場所に導入され、面プロファイル又は輪郭の変化へのピクセル書込からの寄与は低い。本解説の例では、面プロファイルは 1 nm よりも小さくしか修正されない。従って、曲げ量に対する面変動の比は、この例では 1% よりも小さい。従って、光学要素の面輪郭の最小限の効果しか伴わない光学構成要素の異方性又はほぼ1Dの曲げを発生させるためには、基本区域の異方性又は強度に等方性の膨張が非常に適している。

【0139】

次の適用例では、この定義された方法が、初期の光学構成要素が回転対称性を持たない場合であっても回転対称性を有する予め決められた3D輪郭又は予め決められた曲げプロファイルを発生することができることを明らかにしている。上述の場合のように、初期光学構成要素としてマスキングを用いた。マスキングは、この場合にも $152\text{ mm} \times 152\text{ mm}$ の寸法を有する。図13は、ターゲットプロファイルの断面を示している。単位は、 x 方向には μm であり、 y 方向には nm である。マスキングの中心部分はほぼ平坦である。マスキングの中心部分の縁部から外縁までの合計曲げ量は、約 500 nm だけ対称に増大する。

【0140】

図10では、曲げは、マスキングの対称性に適応される。この制約は、以下の例では排除される。これは、回転対称曲げが正方形マスキングに適用されることを意味する。このターゲットは、図13の平頂形3D輪郭が、曲げプロファイルの異なる部分において x 方向と y 方向とで異なる曲げ曲率を有することで選択したものである。これは、図13の3D輪郭を1つの膨張特性のみを有するレーザパルス配置を用いて達成することができないことを意味する。

【0141】

図14は、図13の3Dターゲット輪郭を表す2Dマップを示している。マスキングの右側に示すように、全体的な高さ変動は 900 nm になる。計算には 10×10 個の等距離段階格子を用いた。マスキング平面のプロファイルを 29×29 個の場所でサンプリングした。

【0142】

意図することは、2つの異なる2Dレーザパルス配置にある2つの膨張書込モードを使用することにより、選択される3Dターゲット輪郭に従ってマスキングの裏面の中心部分又は底部を曲げることである。マスキングを望ましい方向に変形するためには、マスキングの幾何学中心の下に3Dレーザパルス配置を書き込む又は適用することが必要である。解説している例では、3Dレーザパルス配置をマスキングの底面の $250\text{ }\mu\text{m}$ 上に書き込んだ。底面からのこの距離は、底面の損傷を回避するほど十分に大きい。

【0143】

選択される2つの書込モードに対する2Dレーザパルス配置を既知の2Dモードシグニチャーに関する情報を用いて計算した。重ならない2Dレーザパルス配置を使用する場合に、ビーム方向又は z 方向の膨張への2Dレーザパルス配置の寄与は、2Dレーザパルス配置の層毎に、又は書込層毎に約 0.01 nm であるので、この計算は適切な仮定である

10

20

30

40

50

。この寄与は無視することができる。

【 0 1 4 4 】

図 1 5 は、マスクブランクの x 方向の膨張に使用される書込マップ又は 2 D レーザパルス配置の計算結果を示しており、図 1 6 は、マスクブランクの y 方向の膨張のための対応する書込マップを示している。

【 0 1 4 5 】

図 1 5 は、x 方向の膨張を受け持つ 2 D レーザパルス配置又は 2 D 書込マップが、マスクブランクのうちで得られる 3 D 輪郭が x 方向に最大曲げ曲率を有するべきである区域内に高めの密度を有することを示している。この対称性は、y 方向の膨張に対する 2 D 書込マップを示す図 1 6 においても反映される。更に、この 2 D レーザパルス配置又は 2 D 書込マップは、マスクブランク及び 2 つの 2 D 書込モードのモードシグニチャーが 180° 回転対称性を有することに起因して、この対称性を示している。しかし、同じくこれらの対称性関係に起因して、図 1 5 及び図 1 6 の 2 D 書込モードは、いくつかの 90° 回転対称性を示している。この対称性は、図 1 5 の書込モードシグニチャーと図 1 6 の書込モードシグニチャーの間の 90° 対称性の不在に起因して完全なものではない。3 D レーザパルス配置を形成する図 1 5 及び図 1 6 の 2 つの 2 D 書込モードは、垂直方向に約 $15 \mu\text{m}$ だけ分離される。

【 0 1 4 6 】

マスクブランクの底面の 3 D 輪郭の得られる変化を図 1 7 に描示している。図 1 5 及び図 1 6 の 2 つの書込モードの書込層を含む 3 D レーザパルス配置を書き込んだ後のマスクブランクの 3 D 輪郭の変化範囲は、図 1 7 の右側の尺度によって示すように、 -800 nm から $+1500 \text{ nm}$ まで又は $2.3 \mu\text{m}$ 延びる。この広がり、図 1 3 に示す 3 D ターゲット輪郭に対して約 2.5 倍だけ異なる。これは、2 D 表現から 3 D 表現へのモードシグニチャー (MS) の変換に対する正規化における間違いからもたらされたものである。

【 0 1 4 7 】

測定データは、約 200 nm のノイズ幅を含む。測定を図 1 5 及び図 1 6 に示す書込マップを含む 3 D レーザパルス配置の適用の前の初期マスクブランクに対して実施した。3 D 輪郭の得られる変化は、 300 nm の幅を有するノイズ成分を本質的に含む。実験結果を図 1 3 の 3 D ターゲット輪郭と比較するために、 300 nm よりも小さい幅を有するデータ変化を排除する平滑化薄板スプライン (TPS) 当て嵌めを適用した。

【 0 1 4 8 】

図 1 8 は、3 D レーザパルス配置によって誘起されたマスクブランクの曲げの測定結果の TPS 当て嵌めを示している。測定結果を図 1 3 の 3 D ターゲット輪郭と比較するために、修正されたマスクブランクを横断する 2 つの断面プロットを線 1 8 1 0 及び 1 8 2 0 に示す位置に与えた。

【 0 1 4 9 】

図 1 9 は、3 D ターゲット輪郭 1 9 1 0 と、図 1 8 の位置 1 8 1 0 及び 1 8 2 0 における 2 つの断面プロットの間の比較を示している。3 D ターゲット輪郭 1 9 1 0 は、y 方向に指示す尺度を使用する。2 つの断面プロット 1 8 1 0 及び 1 8 2 0 は、y 軸とは異なる尺度を有する、図 1 9 の右側に示す尺度を使用する。これは、上述の正規化問題に起因する。

【 0 1 5 0 】

この問題は別にして、3 D ターゲット輪郭 1 9 1 0 と 2 つの測定 3 D 輪郭 1 8 1 0 及び 1 8 2 0 とは良好に一致している。ターゲットプロファイル 1 9 1 0 は、回転対称中心に小さい隆起を含む。マスク体の片側に配置された膨張書込モードしか使用されないため、ピクセル書込からもたらされる曲げはこの隆起を有することができない。提供している例から、光学構成要素の体積内に 1 又は 2 以上の 3 D レーザパルス配置を書き込むことにより、約 1 nm から $50 \mu\text{m}$ の範囲にある高さ変化をもたらし曲率を光学構成要素内に向けることができることが予想される。第 1 の例の場合と同様に、面輪郭の変動は、ここでもまた、約 1 nm よりも小さい。

【 0 1 5 1 】

図 2 0 に略示するように、光学構成要素を曲げる工程は、例えば、元は平坦な光学構成要素 2 0 0 0 から極めて大きい焦点距離を有するレンズ 2 0 1 0 を製作することを可能にする。図 1 4 から図 1 8 の関連における解説と同様に、回転対称性を有する曲げを誘起し、従って、平坦な構成要素 2 0 0 0 を大きい焦点距離を有するレンズ 2 0 1 0 に変換する 3 D レーザパルス配置 2 0 2 0 が、光学構成要素 2 0 0 0 の裏面 2 0 7 0 の近く書き込まれる。レンズ 2 0 1 0 の前面 2 0 6 0 上に入射する平行光 2 0 4 0 は、レンズ 2 0 1 0 の裏面 2 0 7 0 を若干発散する光 2 0 5 0 として射出する。それとは逆に、裏面 2 0 7 0 上に入射する平行光は、前面を若干収束して射出する（図 2 0 には示していない）。

【 0 1 5 2 】

次の適用例は、予め定められた任意形状を有する光学構成要素の発生を提供する。これは、1 又は 2 以上の 3 D レーザパルス配置を光学構成要素内に書き込むことにより、任意の曲げ形状を有する 3 D ターゲット輪郭を製作する機能を明らかにすることが以下の例の目的であることを意味する。異なる方向に 2 つの異なる符号を有する曲率を有する形状を有するターゲットが選択される。この特定の 3 D 輪郭は、主として 2 D レーザパルス配置の平面に膨張を誘起する単一平面 2 D レーザパルス配置を使用することに基づいて実施することができない。

【 0 1 5 3 】

異なる符号を有する曲率を有する単一 3 D 輪郭を 2 次多項式から計算することができる。以下の多項式を選択した。

$$F(x,y)=a\cdot x^2+b\cdot x\cdot y+c\cdot y^2 \quad (6\ 1)$$

式中の定数には、次式のように数値を与えた。

$$a=-1.6\cdot 10^{-10},\quad b=+1.6\cdot 10^{-10},\quad c=+4.0\cdot 10^{-11} \quad (6\ 2)$$

【 0 1 5 4 】

図 2 1 に示すように、式 6 1 は、x 方向と y 方向とで異なる曲率の大きさを有する鞍形状を有する 3 D 輪郭を表している。3 D 輪郭の複雑さを増すために、垂直軸の周りに鞍部を若干回転させる項 $x \cdot y$ を追加した。

【 0 1 5 5 】

以下の 2 つの段落は、光学構成要素又はウェーハの基本体積又は基本区域の異方性膨張の重要点を強調し直すために、いくつかの技術用語を詳細に定める。ピクセル重ね合わせの場合に、又はいずれかの種類のピクセルダビングの場合に、又はピクセルなし書込による場合にのみ、基本区域の異方性膨張を達成することができる。ダビング対、又は 2 又は 3 以上の重ね合わせピクセルの群の場合に、1 又は 2 以上のレーザパルスが存のピクセルの側に放出され、従って、異方性ピクセルがもたらされる。重ね合わせピクセルの全体の複雑な群は、広域書込工程の要素であるので、この群をこれまでと同じくピクセルと呼ぶ場合がある。本出願では、重ね合わせピクセル又は部分重ね合わせピクセルの群を書込モードで表している。この場合に、光学構成要素又はウェーハに対する望ましい膨張プロファイルを発生させるために、書込モード（又は重ね合わせピクセル又は異方性ピクセル）の 2 D 配置を選択する。

【 0 1 5 6 】

しかし、単一レーザパルスによって達成され、特定の要素膨張を有するピクセルが、必要とされる変形を発生するためのツールとして使用されるので、上述の計算及び提供する例は、それにも関わらずかなり特定の変形に基づいている。これは、単一レーザパルスによって発生される個々のピクセルが、それ自体で、基本体積の非対称又は異方性の膨張を誘起するということが新しい特徴であることを意味する。単一ピクセルの定量表現が、モードシグニチャーに対して M S と略記する書込モードシグニチャーであり、この書込モー

10

20

30

40

50

ドシグニチャーは、単一種類のピクセルを使用する場合に得られる膨張の量を表す（同じく第3節を参照されたい）。1つの書込モードは、一様に1mm×1mmの区域を処理する。

【0157】

図22及び図24は、実質的にx方向の膨張をもたらす書込モードに対する書込マップ又は2Dレーザパルス配置の計算結果を示している。同じく図23及び図25は、主としてy方向の膨張をもたらす書込モードに対する2D書込マップの計算結果を表している。図22及び図23の2Dレーザパルス配置は、マスクブランクの裏面又は底面の近くに書き込まれる。その一方、図24及び図25の2D書込モードは、マスクブランクの前面又は上面の近くに導入される。この例では、「に近い」という用語は、それぞれの面からの100μmから800μmの範囲を表している。マスクブランクのそれぞれの面の近くの2つの2D書込モードは、15μmから50μmの範囲によってビーム方向に分離される。図22から図25の4つの書込マップは、3Dターゲット輪郭を発生させるのに使用される3Dレーザパルス配置を形成する。

【0158】

一方で図21から、他方で図22から図25までから分るように、式61に対して、2D書込マップの詳細と3D輪郭又はターゲット曲げプロファイルとを関連付けるのは容易ではない。これは、3D輪郭と、マスクブランク（又はその初期状態では、一般的に光学構成要素）の形状と、3Dレーザパルス配置を形成する2D書込モードとの間の共変動を破壊する式61の3D輪郭によって導入される軽微な回転の結果である。特定の3D輪郭、すなわち、水平方向と垂直方向とで異なる曲率を有する鞍部は、異なる書込モードを組み合わせた3Dレーザパルス配置によってのみ達成することができ、各場合に異なる書込モードのうちの2つがマスクブランクの各面の近くに適用される。

【0159】

一方、マスクブランク及び式61の鞍部の180°回転対称性（図21）は、図22から図25に示す2Dレーザパルス配置の180°回転対称性において依然として反映される。

【0160】

図22から図25からは、マスクブランクを分離する9×9個のセル又は正方形の大部分が、マスクブランク区域のより大きい部分にわたって書込密度が修正されるように2Dレーザパルス配置によって占有されることを見ることができる。これは、マスクブランクの全ての特定の位置又は場所で、得られる曲げが、全ての可能な要素変形に異なる重みを加算したものの組合せであることを意味する。書込モードの膨張方向の任意の向き（図9を参照されたい）を柔軟に選択することを容易にすることができる場合に、鞍部の主軸に沿う膨張と、この主軸に対して直角な膨張とを有する3Dレーザパルス配置にある書込モードを適用することが最適になる。それによって書込モードの量が実質的に低減される。従って、理想的な場合に、膨張方向の向きを局所単位で制御することができる書込モードを有することが可能になる。この書込モードを達成するのが困難である限り、3Dレーザパルス配置へのより多くの予め定められた書込モードの追加は、発生される3D輪郭を図21の予め決められた3Dターゲット輪郭により近づける。

【0161】

図26は、図22から図25の書込モード配置を含む3Dレーザパルス配置によってマスクブランク内に導入された3D輪郭の測定結果を示している。誘起された3D輪郭を式61の関数に対して検証するために、この関数の係数を測定データから導出した。係数に関して計算した数値は次式の通りである。

$$a = -1.69 \cdot 10^{-10}, \quad b = +1.61 \cdot 10^{-10}, \quad c = +3.8 \cdot 10^{-11} \quad (63)$$

【0162】

発生された3D輪郭の精密な測定に関して上記で解説した実験上の課題を踏まえると、

式 6 2 と式 6 3 の一致は、予想したものよりも良好である。一般的に、書込密度は、3 % から 5 % の範囲で光透過率を変化させる。この実験では、フォーカス対物系 5 4 0 をその補償された深度から遠くに用いた。それによって 3 D レーザパルス配置内に含まれる書込モードの書込深さの決定において誤差がもたらされる可能性がある。更に、本明細書で説明するこれらの適用例は、マスクブランクの配置の z 方向の再現性に頼っている。マスクブランク配置の z 方向の変動は、約 5 0 μm であると推定される。更に、マスクブランク厚の変動も約 5 0 μm であると考えられている。これらのファクタは、3 D レーザパルス配置を形成するのに使用される書込モードの各々に対して 1 0 % から 1 5 % の再現性誤差を追加する可能性がある。従って、マスクブランクの発生された 3 D 輪郭又は誘起された曲げは、異なるモードの 2 D 配置の全てによって誘起された変形の組合せの結果であり、それによって約 2 0 % から 3 0 % の可能な曲げ誤差が引き起こされる。

10

【 0 1 6 3 】

以下の例では、本発明の方法は、光学構成要素内に 3 D レーザパルス配置を適用することによって光学構成要素の面の平面度を改善する機能を明らかにするために適用された。この適用例では、相応の S N 比を有するように有意な曲げを有する劣化した石英板又はマスクブランクを用いた。例えば、マスクブランクの平面度に関する A S A H I の規格は、最新のマスクブランクに対する平面度偏差が 2 μm 及び 0 . 5 μm であるとして定めている。

【 0 1 6 4 】

図 2 7 は、マスクブランクの 3 D 輪郭又は 3 D プロファイルの測定結果を示している。合計高さ変動は 8 μm (- 4 0 0 0 nm から + 4 0 0 0 nm まで) の範囲にわたって、測定されたマスクブランクは、A S A H I 規格のうちのいずれも満たさない。測定された 3 D 輪郭又は面曲率は、マスクブランクを通してその符号を変化させない。従って、マスクブランクの面を前面又は上面の近くに 3 D レーザパルス配置を適用することによって補正することができる。(a) 約 3 0 0 nm の平面度偏差が最新のマスクブランクの A S A H I 規格を満たすこと、(b) 上記で解説したように、マスクブランクの 3 D 輪郭を決定するのに使用される計測ツールのノイズが 3 0 0 nm の範囲にあることという 2 つの理由から、平面度偏差を約 3 0 0 nm まで低減することを意図している。

20

【 0 1 6 5 】

図 1 8 と同様に、図 2 7 の 3 D 輪郭には、3 0 0 nm よりも小さい大きさを有する 3 D 輪郭の変化を排除する平滑化薄板スプライン (T P S) 当て嵌めを適用した。図 2 8 は、3 D 輪郭の測定結果の T P S 当て嵌めを実施した後の図 2 7 のマスクブランクを示している。

30

【 0 1 6 6 】

図 2 9 及び図 3 0 は、3 D レーザパルス配置内に含まれ、図 2 8 の 3 D 輪郭を平坦化するのに使用される 2 つの書込モードを描示している。3 D 配置の計算に向けて、9 \times 9 \times 3 の格子をマスクブランクを通して用いた。これら 2 つの書込モードは、光透過率の変化を 0 % から 5 % の範囲で誘起することができる。両方の 2 D レーザパルス配置が、マスクブランクをレーザービームに垂直な平面内で主として局所的に膨張させる。シミュレーションにより、平滑化 T P S 当て嵌めの 3 D 輪郭の最大で 9 4 % を平坦化することができる

40

【 0 1 6 7 】

図 3 1 は、2 つの書込モードを含む 3 D 配置の適用の後の図 2 7 及び図 2 8 の 3 D 輪郭を示している。平面度変動は、図 2 7 の 1 0 0 0 nm の標準偏差 (1) を有する 6 5 0 0 nm の範囲から、約 2 5 0 nm の標準偏差を有する約 1 3 0 0 nm の平面度偏差に低減されている。これは、図 2 7 の 3 D 輪郭を 4 倍だけ平坦化することができることを意味する。

【 0 1 6 8 】

図 3 2 は、高さの尺度を 8 μm (- 4 0 0 0 nm から + 4 0 0 0 nm まで) から 1 μm (- 5 0 0 nm から + 5 0 0 nm まで) に下げて図 3 1 の 3 D 輪郭の測定結果を再度表し

50

ている。図 3 2 は、マスクブランクの y 方向の膨張を受け持つ書込モードがある程度のアンダーシュートを示し、改善の余地があることを明らかにしている。その一方、マスクブランクの x 方向の膨張は、この方向のターゲット膨張に近い。

【 0 1 6 9 】

更に、図 3 2 で明確に分るように、3 D 輪郭の測定結果は、図 2 7 の測定ノイズの有意な寄与を含む。マスクブランクの初期 3 D 輪郭は平滑な曲率を有すると再度仮定する。更に、3 D レーザパルス配置を適用することによって高い周波数を有する前面変調を前面から 6 mm (又は 10^6 nm) (又はマスクブランクの裏面から 350 nm) まで遠くには誘起することができない。これらの仮定に基づいて、図 3 2 から計測ツールの測定ノイズを排除するために、図 3 2 の 3 D 輪郭の測定結果に平滑化 T P S 当て嵌めを適用した。

10

【 0 1 7 0 】

図 3 3 は、平滑化 T P S 当て嵌めの後の図 3 2 の残存 3 D 輪郭を示している。この 3 D 輪郭は、180 nm の標準偏差を有する約 700 nm の高さ変化を示している。3 D レーザパルス配置の適用の結果を比較する正しい方式は、初期 3 D 輪郭の T P S データと、3 D レーザパルス配置の適用の完了後の残存 3 D 輪郭の T P S データとを比較することである。この手法は、計測ツール 400 のノイズを排除し、初期 3 D 輪郭及び残存 3 D 輪郭の特性を抽出することのある程度まで可能にする。

【 0 1 7 1 】

3 D 輪郭の標準偏差を 1000 nm から 180 nm まで低減することができ、それによって 82 % の改善がもたらされる。これは、最初は不合格品であったマスクブランク (標準のマスクブランクに対する A S A H I 規格を満たさないことで) が最新のマスクブランクに対する A S A H I 規格の範囲に入れられることを意味する。

20

【 0 1 7 2 】

低ノイズ寄与を有する (例えば、標準偏差によって表される) 3 D 輪郭の測定データが利用可能である場合に、本説明の方法は、3 D 輪郭を 1 桁よりも大きく改善することができ、それによって現存 3 D 輪郭を予め決められた 3 D 輪郭と緊密に適合させる。

【 0 1 7 3 】

5 . 2 b . ウェーハ

第 2 の適用例では、この定義された方法は、1 又は 2 以上の 3 次元 (3 D) レーザパルス配置をウェーハ内に書き込むために適用される。本節の第 1 部において、シリコンウェーハ内にピクセルを書き込むために使用することができるレーザパルスのパラメータを推定する。シリコンは一般的な半導体材料であるので、以下の例ではシリコンを使用する。しかし、本出願において定める方法はシリコン (S i) ウェーハに限定されない。限定されるのではなく、本方法は、例えば、ゲルマニウム (G e) のような異なる半導体材料を含むウェーハに対して使用することができる。更に、本方法は、2 又は 3 以上の半導体元素を有する複合半導体を含むウェーハに適用することができる。二元複合半導体の例は、いくつかを含むと、ガリウムヒ化物、(G a A s)、インジウム燐化物 (I n P)、及びガリウム窒化物 (G a N) である。

30

【 0 1 7 4 】

以下では、「ウェーハ」という用語をそれが半導体製造工程に対する投入材料を含み、すなわち、一般的に半導体ディスクを含み、半導体工程の製造物、すなわち、ウェーハから分離される直前の製作される構成要素を含むという意味に使用する。更に、「ウェーハ」という用語は、半導体製造工程におけるウェーハの全ての中間段階を含む。

40

【 0 1 7 5 】

図 3 4 は、0 . 1 μ m から 100 μ m までの波長領域に対するシリコンの透過率スペクトルの概要を片対数表現で、すなわち、この波長に対して 4 桁を網羅して示している。このスペクトルは、インターネット : <http://micro.com/technical-notes/bk7-quartz-ge-si> から引用したものである。純 S i の間接遷移のバンドギャップエネルギーは、300 K において約 1 . 14 e V であり、この値は 1 . 09 μ m の波長に対応する。このバンドギャップエネルギーは、1 μ m 前後の波長

50

領域における透過率形状の増大に示している。このバンドギャップエネルギーよりも高いエネルギーを有する電磁放射線に対しては、シリコンの吸光係数は、 $0.1\ \mu\text{m}$ から $1.0\ \mu\text{m}$ までの波長領域で高い。シリコンは、紫外放射線及び可視放射線に対する検出器材料として使用される。

【0176】

シリコンは、約 $1.1\ \mu\text{m}$ から $6.0\ \mu\text{m}$ までの波長領域の電磁放射線に対して透過性を有し、再度約 $40\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ までの電磁放射線に対して透過性を有する。図34の矢印は、純シリコン内にピクセルを書き込むために使用することができる $1.2\ \mu\text{m}$ から $7.0\ \mu\text{m}$ までの着目波長領域を示している。

【0177】

図35は、 $1\ \mu\text{m}$ から $9\ \mu\text{m}$ までの波長領域をより高いスペクトル解像能を用いて描写している。この曲線は、インターネット：<http://micro.com/technical-notes/bk7-quartz-ge-si>から引用したものである。更に、図35は、透過率変化を温度の関数として示している。この図は、シリコンを加熱すると光透過率が実質的に低下することを明確に示している。この効果は、より長い波長に対してより有意である。 $5\ \mu\text{m}$ 前後の波長を使用することを有利とすることができる。

【0178】

図36は、Siの吸収係数を $200\ \text{nm}$ から $1400\ \text{nm}$ の範囲の波長の関数として片対数表現に示している。このグラフも、ここでもまたシリコンを $200\ \text{nm}$ から約 $1000\ \text{nm}$ までの波長領域の電磁放射線に対する検出器材料として使用することができることを示している。 $1000\ \text{nm}$ ($300\ \text{K}$ における純Siの大体のバンドエッジ) から $1400\ \mu\text{m}$ までの波長領域で、吸収は8桁よりも大きく降下している。図36から理解することができるように、吸収係数は、 $1000\ \text{nm}$ において約 $a = 100\ \text{cm}^{-1}$ であり、 $1100\ \text{nm}$ において約 $a = 2\ \text{cm}^{-1}$ であり、 $1200\ \text{nm}$ において約 $a = 0.02\ \text{cm}^{-1}$ である。

【0179】

図35は、Siが電磁放射線に対して又はSi内にピクセルを導入するために使用されるレーザパルスに対して透過性を有する必要があるという要件に関して、 $5\ \mu\text{m}$ の範囲の波長が、Siウェーハ内へのピクセルの書込に好ましいことを示唆している。しかし、図36に示すSiの吸収係数に注意すると、レーザパルスの波長は $1300\ \mu\text{m}$ よりも下に留まる必要があるように思われる。

【0180】

(表6)

表6：293 Kにおけるシリコン材料パラメータ

パラメータ	数値	単位	情報源
融点	1683	K	a
密度(結晶)	2.336	g/cm^3	a
密度(アモルファス)	2.29	g/cm^3	b
比熱容量	703	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	a
吸収係数	0.01 ($3\ \mu\text{m}$ で)	cm^{-1}	c
熱導電率	150	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	a

a: <http://de.wikipedia.org/wiki/Silizium>

b: P. D Antonio及びJ. H. Konner t著論文、Appl. Phys. Lett. 第64巻第4号437~439ページ、1994年1月、ISSN: 0003-6951、デジタルオブジェクト識別子: 10.1063/1.111121

c: M. A. Green著「Solar cell research and development in Australia (オーストラリアにおける太陽電池の研究開発)」、Solar Cells 第26巻、1~166ページ(1989年)

【0181】

Siを局所的に融解させるためには、シリコンウェーハ内に $> 1683\text{ K}$ 又は 1410 の温度を局所的に発生しなければならない。Si結晶が局所的に融解すると、融解した体積が、結晶Siのものよりも 1.8% 低い密度を有するアモルファスSiとして凝固する。従って、局所アモルファス体積又はピクセルは、周囲の結晶Siよりも 1.8% 大きい体積を必要とし、それによってSi結晶内に応力を誘起する。

【0182】

融点よりも大きい局所体積の発生は、非常に短いレーザパルス又は超短レーザパルスを必要とする。1又は2以上の超短レーザパルスを印加するだけで、発生熱がレーザパルスのフォーカススポットを取り囲む体積内にそれ程散逸することができない程十分に速い小Si体積の加熱をもたらすことができる。著者P. L. Liu、R. Ren及びN. Bloembergenは、論文「Picosecond laser-induced melting and morphology on Si (Siに対するピコ秒レーザ誘導融解及び形態論)」、Appl. Phys. Lett. 第34巻864～66ページ、1979年の中で、ピコ秒パルスに対して 10^{14} K/s までの加熱速度及び冷却速度を達成することができることを報じている。これは、1ps内にSi結晶を 100 K まで加熱及び冷却することができることを意味する。従って、少なくとも1psよりも短いパルス持続時間を有するレーザパルスを発生することができるレーザ系が必要である。

【0183】

以下では、Si結晶又はSiウェーハ内の小体積の局所融解を誘起するレーザパラメータを推定する。小体積は、ガウスビームを有するレーザパルスのフォーカス内で局所的に加熱されると仮定する。図37はこの状況を示している。 w_0 がビームくびれ部であり、 b が焦点深度である時に、半径 w_0 と長さ b との円筒体がSiの融点よりも大きい温度まで加熱されると仮定する。ガウスビームでは、ビームくびれ部は次式によって決定される。

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot \alpha} = \frac{\lambda_0}{\pi \cdot n \cdot \sin \alpha} = \frac{\lambda_0}{\pi \cdot NA} \quad (64)$$

上式では、シリコン結晶内の波長 λ が、真空波長又は空気中波長 λ_0 とシリコンの屈折率 n とで置換されている。 NA は、レーザパルスを図37の円筒体内にフォーカスするのに使用される光学系の開口数を表している。更に、小さい角度に対して $\sin \alpha \approx \alpha$ という近似を使用する。角度 α は、ガウスビームの合計角度分布の半分である。

【0184】

図37から分るように、焦点深度は、レイリー距離 Z_R の2倍であり、レイリー距離又はレイリー長は次式で与えられる。

$$Z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} \quad (65)$$

【0185】

従って、円筒体の長さ b は次式になる。

$$b = 2 \cdot Z_R = 2 \cdot \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot n \cdot w_0^2}{\lambda_0} = 2 \cdot n \cdot \frac{\lambda_0}{\pi \cdot (NA)^2} \quad (66)$$

上式では、最後の変形では式(64)を用いている。

【0186】

長さ b 及び半径 w_0 を有する円筒体は次式の体積を有する。

$$V = \pi \cdot w_0^2 \cdot b = \pi \cdot \frac{\lambda_0^2}{\pi^2 \cdot (NA)^2} \cdot 2 \cdot n \cdot \frac{\lambda_0}{\pi \cdot (NA)^2} = 2 \cdot n \cdot \frac{\lambda_0^3}{\pi^2 \cdot (NA)^4} \quad (67)$$

【 0 1 8 7 】

比熱容量は、次式によって与えられる。

$$c = \frac{W}{m \cdot \Delta T} \quad (68)$$

10

上式では、室温から加熱工程が始まる時に $T = 1683 \text{ K} - 293 \text{ K} = 1390 \text{ K}$ である。式 (67) 及び (68) から Si 結晶の小体積 V を局所的に融解させるのに必要なエネルギー

$$\left(\rho = \frac{m}{V} \right)$$

を推定することができる。

$$W = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T = 2 \cdot n \cdot c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \cdot \frac{\lambda_0^3}{\pi^2 \cdot (NA)^4} \quad (69)$$

20

【 0 1 8 8 】

ガウスフォーカスの内部、すなわち、長さ b の円筒体内で吸収されるエネルギーは、ランベルト - ベールの法則によって近似される。図 38 は、次式のガウスフォーカス内の強度損失 $I(z)$ を略示している。

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-az} \quad (70)$$

ここで、 a は、図 36 に表す Si 結晶の吸収係数を表している。この強度損失は、次式のガウスビームのフォーカス内のエネルギー損失に等しい。

30

$$W(b) = W_0 \cdot e^{-ab} \quad (71)$$

ここで、 W_0 は、ガウスフォーカスに到達するエネルギーであり、 $W(b)$ は、フォーカス又は長さ b の円筒体を射出するエネルギーである。ここで、積 $a \cdot b < 1$ 、すなわち、レーザパルスのエネルギーの一部分のみがガウスビームフォーカス内の円筒体内で次式が成り立つように吸収されると仮定する。

$$\Delta W = W_0 - W(b) = W_0(1 - e^{-ab}) \approx W_0(1 - (1 - a \cdot b)) = W_0 \cdot a \cdot b \quad (72)$$

40

【 0 1 8 9 】

図 39 は、パルス長又はパルス幅 t_{pulse} のパルスを有するレーザ系のパルス列を示している。2つのレーザパルスの間の期間 T は、矢印に示すように2つのパルスの間で均一である。従って、接続された周期的パルス列は、

$$\Delta T = \frac{1}{f}$$

という周波数を有する。

【 0 1 9 0 】

レーザ系によって図 39 のパルス列で放出される平均電力は、次式で与えられる。

50

$$\bar{P} = \frac{1}{\Delta T} \cdot \int_0^{\Delta T} P(t) \cdot dt \approx \frac{1}{\Delta T} \cdot P_{Pulse} \cdot \Delta t_{Pulse} = f \cdot P_{Pulse} \cdot \Delta t_{Pulse} \quad (73)$$

式中の P_{Pulse} はパルス電力である。従って、パルス電力は、レーザ系の平均電力と、その周波数と、個々のパルスのパルス幅との関数として次式のように表すことができる。

$$P_{Pulse} = \frac{\bar{P}}{f \cdot \Delta t_{Pulse}} \quad (74)$$

10

【 0 1 9 1 】

入射レーザパルスのパルスエネルギー w_0 は、パルス電力とパルス幅によって次式のように表すことができる。

$$W_0 = P_{Pulse} \cdot \Delta t_{Pulse} \quad (75)$$

【 0 1 9 2 】

ここで、式 (7 2) で与えられるガウスフォーカス内のレーザビームのエネルギー損失は、次式のようにこのフォーカス内で Si 結晶によって吸収されると仮定する。

20

$$\begin{aligned} W_{absorbed} = \Delta W &= W_0 \cdot a \cdot b = P_{Pulse} \cdot \Delta t_{Pulse} \cdot a \cdot b = \frac{\bar{P}}{f} \cdot a \cdot b = \\ &= \frac{\bar{P}}{f} \cdot a \cdot 2 \cdot n \frac{\lambda_0}{\pi \cdot (NA)^2} = \frac{2 \cdot n \cdot a \cdot \bar{P} \cdot \lambda_0}{\pi \cdot f \cdot (NA)^2}, \end{aligned} \quad (76)$$

上式では式 (7 5) を用いた。

【 0 1 9 3 】

式 (6 9) は、ガウスフォーカス内の温度を少なくとも温度差 ΔT だけ増大させるのに必要とされる電力を表している。式 (7 6) は、レーザパルスによって供給されるエネルギーを表している。式 (6 9) と式 (7 6) とを等しいと考えることによって次式が向けられる。

30

$$2 \cdot n \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot \frac{\lambda_0^3}{\pi^2 (NA)^2} = \frac{\bar{P}}{f} \cdot a \cdot 2 \cdot n \frac{\lambda_0}{\pi \cdot (NA)^2} = \frac{2 \cdot n \cdot a \cdot \bar{P} \cdot \lambda_0}{\pi \cdot f \cdot (NA)^2} \quad (77)$$

【 0 1 9 4 】

式 (7 7) から、温度差 ΔT は、次式のように平均パルスエネルギー

$$\frac{\bar{P}}{f}$$

40

の関数として表すことができる。

$$\Delta T = \frac{a(\lambda_0) \cdot \pi \cdot (NA)^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda_0^2} \cdot \frac{\bar{P}}{f} \quad (78)$$

【 0 1 9 5 】

更に、ガウスフォーカス内の Si 結晶を局所的に融解させるのに必要とされるレーザの必要平均電力は、必要温度差 ΔT から次式のように推定することができる。

50

$$\bar{P} = \frac{\Delta T \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda_0^2 \cdot f}{a(\lambda_0) \cdot \pi \cdot (NA)^2} \quad (79)$$

【0196】

式(78)及び(79)では、図36から分るように、Siの吸収係数が、ピクセルをSi結晶内に導入するために適用されるレーザ系の波長に強度に依存することが示されている。シリコン結晶の材料パラメータ $a(\lambda_0)$ 及び ρ の他に、式(78)及び(79)は、光学系のパラメータNAとレーザ系の周波数 f とを更に含む。以下の考察では、フォーカス光学系がNA=0.8を満たすと仮定する。図37から分るように、高エネルギー区

10

域、すなわち、ガウスフォーカスを伝播方向であるz方向に拘束するために、NAが2よりも大きいことを可能にするようになる固体液浸レンズ(SIL)を使用するフォーカス光学系を使用することができる。

【0197】

図40は、775 μ mの厚みを有する純Siウェーハの内部光透過率のそのバンドエッジの範囲の変化を示している。ピクセルをSiウェーハ内に書き込むために使用されるレーザパルスの波長は、一方でレーザパルスの光子がSiウェーハ内、特にガウスビームフォーカス内に吸収されるほど十分に短いように選択しなければならない。他方で、レーザパルスの波長は、ピクセルを予め決められた場所に配置することができるよう全ウェーハ厚を貫通する相応の透過率を有するために十分に長くなければならない。

20

【0198】

図41は、パルスエネルギーを純Si結晶のバンドエッジ付近の波長の関数として表している。図41から分るように、パルスエネルギーは、1050nmの波長に対して0.4 μ Jになる。パルスエネルギーは、約1100nmの波長を有するレーザパルスでは約1 μ Jに増大する。従って、Si結晶内にピクセルを書き込むための推定エネルギー範囲は、表1に示すフォトリソグラフィマスクの基板内にピクセルを導入するためと同様である。図41内の2つの点は、シリコン結晶を局所的に融解させるほど十分なパルスエネルギーを供給することができるレーザ系が利用可能であることを示している。

【0199】

図41のHE1060は、1064 μ mにおいてレーザパルスを放出するNd-YAGレーザ系である。このレーザ系は、ガウスビームフォーカス内にあるウェーハ内部のSi結晶を局所的に融解させるほど十分なエネルギーを供給することができる。ウェーハ内部で融解したSi体積は、結晶シリコンのものよりも1.8%小さい質量密度を有するアモルファスシリコンとして凝固することになる。従って、ピクセルは、Siウェーハの面輪郭を修正するために使用することができる応力を周囲Si結晶内に向けることになる。

30

【0200】

上記に提供したレーザパラメータに対する評価は、大まかな推定でしかない。入射レーザパルスがどのようにSiウェーハを通して伝播するかということ、特にガウスフォーカス内の温度がSi結晶の光学特性をどのように動的に変化させるかということの有限要素計算を実施することにより、ピクセルをSiウェーハ内に書き込むためのレーザパラメータのより正確な推定を達成することができる。例えば、図35から分るように、シリコン内の吸収は、Si結晶の温度の関数として増大する。更に、より正確な推定は、ガウスビームフォーカス内に累積されるエネルギーが、周囲結晶材料内にどのように散逸するかということも考慮する。従って、上記に提供した推定は、ピクセル配置をSi結晶内に、又はより一般的には半導体結晶内に定められた方式で書き込むことができることを示す真の1次近似である。

40

【0201】

以下では、ウェーハの曲げ及びその補正を解説する。図42の模式図は、ウェーハ4210の前面4420上に集積回路を製作する工程の開始時のウェーハ4210を通る断面を略示している。点線4250は、ウェーハ4210の深さの半分を示しており、これを

50

中間平面とも呼ぶ。ウェーハ 4 2 1 0 は、チャック、例えば、真空チャックを用いてこのウェーハの裏面 4 2 3 0 上で固定される。図 4 2 に示す例では、ウェーハ 4 2 1 0 はシリコンウェーハである。

【 0 2 0 2 】

図 4 2 は、ウェーハ 4 2 1 0 が、その前面 4 2 2 0 上に 1 又は 2 以上の集積回路 (I C) を製作する処理段階の開始前に実質的に平面であることを示している。図 4 3 は、 I C 4 3 6 0、 4 3 7 0、及び 4 3 8 0 を発生させるためにいくつかの処理段階が実施された後の状況を略示している。前面 4 3 2 0 の処理は、ウェーハ 4 3 1 0 の曲げをもたらす応力をウェーハ 4 3 1 0 内に誘起している。

【 0 2 0 3 】

図 4 3 に示す例では、 I C はウェーハ 4 3 1 0 の前面 4 3 2 0 上に製作される。当業者は、ウェーハ 4 3 1 0 上にはあらゆる種類の I C を製作することができることを認めるであろう。更に、本出願において定める方法は、ウェーハ 4 3 1 0 内に応力をもたらすあらゆる製造工程に適用することができる。

【 0 2 0 4 】

曲げの大きさは、ウェーハ、その寸法、及びウェーハ上に製作される I C に依存する。曲げは、 1 0 0 μ m までの範囲にあるとすることができ、好ましくない条件に対しては、更に大きいとすることができる。曲げ効果は、例えば、 3 D N a n d のような最新のストレージ技術と共に増大する傾向を有する。

【 0 2 0 5 】

図 4 の装置 4 0 0 は、ウェーハ 4 3 1 0 の曲げ量を測定するために使用することができる。ウェーハの曲げ量を決定するにはウェーハ 4 3 1 0 の前面 4 3 2 0 を使用することが好ましい。ウェーハ 4 3 1 0 はチャックに固定されるので、前面 4 3 2 0 を使用することにより、ウェーハ 4 3 1 0 を測定することが可能になる。別の手法では、様々な処理段階に起因するプロファイル又はトポグラフィを持たないウェーハ 4 3 1 0 の裏面 4 3 3 0 をウェーハ 4 3 1 0 の曲げ効果を決定するために使用することができる。

【 0 2 0 6 】

次の段階では、測定された曲げデータを入力データとして用いて、 3 次元 (3 D) レーザパルス配置が計算される。この段階は、図 5 の装置 5 0 0 の解説の状況でより詳細に記述した。

【 0 2 0 7 】

最後に、計算された 3 D レーザパルス配置は、ウェーハ 4 3 1 0 の上側部分内に書き込まれ、それによって点 4 3 9 0 に示す 3 D ピクセル配置がウェーハ 4 3 1 0 内に発生される。図 4 3 から分るように、計算された 3 D レーザパルス配置は、問題の対称性、すなわち、ウェーハ 4 3 1 0 の曲げを考慮したものである。

【 0 2 0 8 】

図 4 4 は、ピクセル書込工程の完了の後のウェーハ 4 4 1 0 を略示している。図 4 3 のウェーハ 4 3 1 0 の曲げは、ウェーハ 4 4 1 0 では実質的に除去されている。図 4 3 及び図 4 4 に示す例では、超短レーザパルスを発生するのに、 2 μ m 前後の波長で放出するレーザ系を使用することができる。この波長領域で放出するレーザは、例えば、 H o - Y A G レーザ系及び T m - Y A G レーザ系である。上記で推定したように、 1 0 6 4 n m の波長で放出し、現時点ではウェーハからダイを切断するのに使用されている N d - Y A G レーザ系を使用することができる。これは、ウェーハ 4 3 1 0 内への 3 D レーザパルス配置の導入に既に利用可能なレーザ系を適用することができることで有利である。

【 0 2 0 9 】

レーザパルスのパラメータ及びレーザパルスの 3 D 配置は、様々な処理段階によって導入されて曲げ効果を招く応力を相殺するために、ピクセルが、ウェーハ 4 4 1 0 の質量密度を低減する応力を S i 結晶内に局所的に向けるように選択される。

【 0 2 1 0 】

ウェーハ 4 3 1 0 の前面 4 3 2 0 を通してレーザパルスを導入することが好ましく、こ

10

20

30

40

50

れは、この導入が、ウェーハ 4 3 1 0 の最低限の取り扱いの手間しかかからず実施することができることによる。そうすることにおいて、処理段階が変化する可能性があること、すなわち、純シリコンウェーハ 4 3 1 0 に対する IC 4 3 6 0、4 3 7 0、及び 4 3 8 0 の材料のバンドギャップを減幅する可能性があることを考慮しなければならない。これは、放射線がいかなる吸収もなく IC 4 3 6 0、4 3 7 0、及び 4 3 8 0 を実質的に透過することができるようにレーザパルスに対する波長を選択する必要があることを意味する。別の手法では、裏基板面 4 3 3 0 を通して 3 D レーザパルス配置を導入することができる。

【 0 2 1 1 】

図 4 2 及び図 4 3 から分るように、3 D ピクセル配置は、IC 4 3 6 0、4 3 7 0、及び 4 3 8 0 の機能層内ではなく、これらの IC の基板に配置される。従って、ピクセル書込工程は、IC 4 3 6 0、4 3 7 0、及び 4 3 8 0 にいかなる損傷も導かない。

【 0 2 1 2 】

図 4 5 は、本発明の方法の実施形態の流れ図 4 5 0 0 を描示している。本方法は、ブロック 4 5 1 0 で始まる。第 1 の段階 4 5 2 0 において、光学構成要素又はウェーハの現存 3 D 輪郭が測定される。例えば、図 4 に描示する計測ツール 4 0 0 がこの段階を実施することができる。第 2 の段階 4 5 3 0 において、予め決められた 3 D 輪郭からの現存 3 D 輪郭の偏差が決定される。この方法段階は、例えば、図 5 のコンピュータ 5 6 0 又はコンピュータシステム 5 6 0 によって実行することができる。次いで、段階 4 5 4 0 において、3 D レーザパルス配置が、段階 4 5 3 0 において決定された偏差から計算される。一例として、この場合にもコンピュータ 5 6 0 がこの計算を実施することができる。段階 4 5 5 0 において、計算された 3 D レーザパルス配置が光学構成要素上に適用される。例えば、図 5 のレーザ系 5 0 0 がこの方法段階を実行することができる。

【 0 2 1 3 】

図 4 5 の流れ図の更に別の段階は任意的なものである。段階 4 5 6 0 において、3 D レーザパルス配置の適用によって発生された 3 D 輪郭が測定される。次いで、段階 4 5 7 0 において、予め決められた 3 D 輪郭からの発生 3 D 輪郭の残存偏差が決定される。判断ブロック 4 5 8 0 において、発生 3 D 輪郭と予め決められた 3 D 輪郭の間の残存偏差が予め決められた閾値よりも低い又はそれに等しいか否かが判断される。もしそうであった場合に、本方法は、ブロック 4 5 9 0 において終了する。依然として残存偏差が予め決められた閾値よりも高い場合に、本方法は、ブロック 3 7 4 0 に進行し、発生 3 D 輪郭を予め決められた 3 D 輪郭と緊密に適合させる新しい 3 D レーザパルス配置が計算される。

【 0 2 1 4 】

最後に、図 4 6 a 及び図 4 6 b の流れ図 4 6 0 0 は、EUV マスクの製造工程中のこの定義された方法の適用を示している。類似の方式で、この定義された方法は、ウェーハ上での IC の製造工程中に他の光学構成要素、並びにウェーハに適用することができる。EUV マスクブランク及び EUV マスクは、理想的に平坦でなければならない。EUV マスクブランクの裏面が 1 μm の範囲で平坦でない場合に、EUV マスクの製造工程中に機械チャックにより、及び / 又は照明工程における EUV マスクの適用中にスキャナの静電チャックによって異なるように把持される。EUV マスクの異なる把持に起因する異なる面プロファイルは、トポグラフィ誤差をもたらし、これらの誤差は、その形状がこれら 2 つの装着原理で異なる場合に、完全に補償することができない。更に、EUV マスクが完全に平坦ではない場合に、このマスクがチャックに装着される度に曲げられ、それによって更に粒子の発生がもたらされる可能性がある。従って、EUV マスク製造工程の開始時に EUV マスクブランクが完全に平坦であり、製造工程の様々な段階中に平坦に保たれることは必須である。図 4 6 a 及び図 4 6 b の流れ図 4 6 0 0 は、製造工程に入るマスクブランクが理想的に平坦であると仮定する。

【 0 2 1 5 】

製造工程は、図 4 6 a のブロック 4 6 0 5 で始まる。第 1 の段階 4 6 1 0 において、図 2 の多層構造 2 5 5 がマスクブランク又は基板 2 1 0 上に配置される。次いで、吸収剤層

10

20

30

40

50

290が多層構造255上に配置される。段階4615において、ブロック4610の製造工程段階によって引き起こされた裏基板面225の平面度偏差が決定される。判断ブロック4620において、裏基板面225の平面度偏差が予め決められた閾値よりも低いか又はそれに等しいか否かが判断される。もしそうであった場合に、本方法は、段階4640に進行する。この条件が満たされていない場合に、本方法は、ブロック4625に進行し、そこで裏基板面225を平坦化する3Dレーザパルス配置が計算される。段階4630において、計算された3Dレーザパルス配置がEUVマスクの基板210に適用される。判断ブロック4635において、裏基板面225が平面度要件を今度は満たしているか否かが検査される。依然としてそうでなかった場合に、段階4625及び4830が繰り返される。方法段階4625及び4630は、決定されたEUVマスクの偏差が予め決められた閾値よりも小さくなるまで繰り返される。次いで、本方法は、ブロック4640に進行する。

10

【0216】

ブロック4640において、吸収剤層がパターン化され、多層構造255の周囲部が除去される。次いで、段階4645において、ブロック4640の工程によって引き起こされた平面度偏差が決定される。当然ながら、ブロック4640の工程の各々によって個々に引き起こされた平面度変化を決定することができる。判断ブロック4645において、平面度変化又は平面度偏差が予め決められた閾値よりも低いか又はそれに等しいか否かが判断される。この条件が満たされている場合に、本方法は、ブロック4655において終了する。この条件が満たされていない場合に、図46bの段階4660において、ブロック4640の製造段階によって引き起こされた平面度変化を排除するか又は少なくとも低減するための第2の3Dレーザパルス配置が計算される。次いで、段階4665において、計算された3Dレーザパルス配置がEUVマスク200の基板210上に適用される。更に、判断ブロック4760において、裏基板面225の平面度偏差が予め決められた閾値よりも低いか否かが検査される。もしそうであった場合に、本方法は、ブロック4675において終了する。この条件が満たされていない場合に、本方法は、ブロック4660に進行し、段階4660及び4665を繰り返す。段階4660及び4665は、決定されたEUVマスクの裏基板面の平面度が予め決められた閾値よりも小さくなるまで繰り返される。

20

【0217】

30

6. 理論的背景

以下では、先行の節で提供した本発明の方法の様々な態様の解説の根底にある理論的背景のうちの一部を概説する。

【0218】

光学要素又はウェーハの予め定められた3次元(3D)輪郭を発生させるために、様々なピクセル配置で配置された様々な種類のピクセルが使用される。様々な種類のピクセル及び様々な配置の適用は、測定された3D輪郭又は決定された3D輪郭を光学構成要素及び/又はウェーハの予め定められた輪郭に対して調節することを可能にする。3Dという用語は、光学構成要素又はウェーハの横寸法の変化、すなわち、x方向とy方向によって定められる入射レーザパルスに対して垂直な平面における変化、並びにz方向であるレーザビーム方向の変化を意味する。例えば、光学要素及び/又はウェーハの横変化を主として実現するために、又はその高さを主として変化させるために、光学構成要素及び/又はウェーハ内に様々な種類のピクセルを導入することができる。横変化とz方向変化の両方を局所変化及び/又は広域変化として実施することができる。本出願では光学構成要素という用語と光学要素という用語とを同義語として使用する。

40

【0219】

一般的に、先行の節で既に概説したように、ピクセルは、光学要素材料又はウェーハ材料の密度を局所的に変化させることによって光学要素又はウェーハ内に応力を導入する。超短レーザ源のレーザビームのパルス持続時間、パルスエネルギー、ビーム形状、及び/又は繰り返し数のようないくつかのパラメータを変化させることにより、膨張ピクセル及び

50

収縮ピクセルを光学要素内に導入することができるか又は光学要素内に書き込むことができる。膨張ピクセルを書き込むことにより、光学要素材料又はウェーハ材料の密度が局所的に低下し、それに対して収縮ピクセルを書き込むことにより、光学要素材料又はウェーハ材料の密度が局所的に増大する。

【0220】

光学要素又はウェーハ内へのピクセルの書込は、2つのパラメータセットによって特徴付けられる。(a)第1のセットは、個々のピクセルの3D寸法を定める。(b)第2のセットは、3D配置内の個々のピクセルの集合を定める。

(a)レーザビームパラメータ、書込モード、又は書込モードシグニチャー：様々な物理的条件を用いた光学要素又はウェーハ内への個々のピクセルの書込は、様々な特性及び/又は様々な形状を有する様々な種類のピクセルをもたらす。3D寸法及び個々のピクセルの効果を特徴付けるパラメータは以下の通りである。(I)ピクセルのサイズを変化させるレーザ源の光ビームのパルス電力。レーザパルスエネルギーを低減することによって小さなピクセルがもたらされる。実際にピクセル発生では、最小パルスエネルギーは、光学要素又はウェーハの材料の破壊閾値によって制限される。ピクセルなし書込では、明確に定められた閾値は存在しない。高効率ピクセルなし書込工程を達成するためには、破壊閾値を僅かに下回るパルスエネルギーを使用するのが有利である。(II)レーザビームパルスのパルス持続時間も、個々のピクセルのサイズに影響を及ぼす。(III)光学構成要素の単一場所に適用されるレーザパルスの個数もピクセル寸法に影響を及ぼし、従って、個々のピクセルの効果に影響を及ぼす。(IV)超短光パルスのビームの偏光は、個々のピクセルの横効果に対する影響を有する。(V)光ビームのNA(開口数)及び/又はビーム広がり、光学要素又はウェーハの材料の破壊閾値に影響を及ぼす。従って、NAをパルスエネルギーとの組合せで制御しなければならない。更に、NAは、個々のピクセルのビーム方向(z方向)のサイズに実質的な影響を有する。(VI)レーザ光パルスの波長も、光学要素又はウェーハの特定の材料に関して個々のピクセルの効果に影響を及ぼす。(VII)ピクセルが単一レーザパルスによって発生される場合に、光パルスの横形状が発生ピクセルの横形態を誘起し、従って、ピクセルによって光学要素又はウェーハ内に誘起される変形に影響を及ぼす。

(b)3Dピクセル配置：個々のピクセル(レーザビームパラメータによって決定される)に加えて、光学要素又はウェーハ内のピクセルの集合が、3Dピクセル配置によって発生される3D輪郭の変化を定める。一般的に3Dピクセル配置は、6つのパラメータによって特徴付けられる。3つのパラメータは、x方向、y方向、及びz方向のピクセル配置の寸法を決定する。更に、3つのパラメータは線形集合を決定し、従って、x方向、y方向、及びz方向の線形ピクセル密度を決定する。光学要素又はウェーハの面と平行な様々な方向の異なる線形ピクセル密度の書込は、特に重ね合わせピクセル又は部分重ね合わせピクセルの場合に、光学要素又はウェーハの非対称膨張をもたらす。

多くの適用に関して、ピクセルサイズは、隣接ピクセルまでの距離の半分よりも小さい。一方、ピクセルは、隣接ピクセルの間の距離が個々のピクセルサイズよりもかなり短い状態でレーザビームによって書き込むことができる。従って、疑似連続構造が光学要素内に書き込まれる。この種類のピクセルに対しては、好ましくは、非常に低いレーザパルス電力が使用される。そのような種類のピクセルを使用する利点は、これらのピクセルが光散乱を引き起こさず、光学要素の光透過率のみを変化させる点である。可視スペクトル範囲で目視可能なピクセルを持たないこの構造は、光学要素の材料のバルク内で異なる物理特性を有する層にかなり似ている。この層が十分に均一な場合に、この層は、UVビーム又はDUVビームの特性にそれ程影響を及ぼさず、散乱は発生せず、更にこの層はいかなる人為的周期性も導入せず、従って、いかなる回折効果も発生しない。そのようなレーザビームパラメータを有するレーザビームを光学要素に向けることをピクセルなし書込と呼ぶ。

【0221】

書込モードの2つのパラメータセット及び書込モード密度又は簡潔に書込密度は、互い

に独立ではない。例えば、小さめのピクセルの効果は、ピクセル密度を高めることによって補償することができる。更に、ピクセル配置は、単一レーザビームパラメータセット又は単一書込モードを用いて書き込まれたピクセルを含むことができる。更に、書込モードは、2又は3以上のレーザビームパラメータを用いて発生された2又は3以上のピクセルを含むことができる。最後に、光学要素の決定された3D輪郭をその予め決められた3D輪郭に可能な限り近づけるために、2又は3以上のピクセル配置を光学要素内に導入することができる。様々なピクセル配置が、光学要素内で異なる位置を有することができ、部分的に重なることができ、又は完全に重なることができる。

【0222】

光学要素の予め決められた3D輪郭を確実に発生するために、光学要素に対して様々なパラメータを有する超短光パルスの効果を把握しなければならない。この目的のために、様々なパラメータ及び/又は書込モードを有する超短光パルス全体を光学要素に対して決定しなければならない。更に別の計算を実施するために、光学要素の体積は、基本体積要素又は基本セルに仕切られる。基本体積は任意に選択することができるが、縁部として直線を有し、正面又は側面として平面を有する基本体積を使用することが好ましい。基本体積の頂点は、光学要素の体積にわたる3D格子点を形成する。好ましい基本体積は、平行六面体、直方体、又は四面体である。1つの基本体積内に、単一書込モード及び書込モード密度を有するピクセルが書き込まれる。

【0223】

順問題の手法は、基本体積の変形をレーザビームの作用から計算することになり、すなわち、基本体積の体積変形を書込モード又はレーザビームパラメータ及び書込モード密度又は書込密度の関数として計算することになる。適用されるレーザパルスの配置を決定するためには、逆問題を解かなければならない。これは、光学要素の決定された3D輪郭をその予め決められた3D輪郭に変換する書込モード又はレーザビームパラメータ及び書込モード密度又は書込密度の3Dマップを計算することが問題であることを意味する。

【0224】

通常、光学要素は非常に硬質の材料で発生される。例えば、光学系のレンズ及びフォトリソグラフィ照明系のためのフォトマスクは、好ましくは、石英で発生される。予め決められた3D輪郭からの偏差の補正に必要な変形は振幅が非常に小さく、一般的に光学要素の材料の弾性限界を超えない。

【0225】

以下の手法では、静的方程式、幾何学方程式、及び物理方程式という3つの異なる方程式群が重要である。静的方程式では、例えば、静的なニュートンの法則の場合のように、面力と、バルク力と、応力との平衡状態が光学要素のあらゆる基本体積に作用する。幾何学方程式であるコーシー公式を利用することによって変位場から歪みテンソルを導出することができる。変位場から全ての歪み場をもたらしことができるわけではないので、適合条件を考察することが必要である。熱平衡及び断熱近似においては、一般化されたフックの法則(物理方程式)が、弾性体では歪みテンソルと応力テンソルの間に線形結合が存在することを説明する。

【0226】

既に上述のように、一般性を失うことなく、完全な光学要素を直方体の系として表すことができ、この場合に、全ての直方体が一定の書込モード及び書込モード密度を有する。直方体は、ヤング率、ポアソン比のような光学要素の新しいか又は修正された物理パラメータを有する新しいか又は修正された平衡形状によって特徴付けることができる。直方体内に誘起される変化は、良い近似で書込負荷に比例し、すなわち、光学要素の物理パラメータに比例する。

【0227】

得られる変位場をレーザビームパラメータ及び/又は書込モードの関数(すなわち、順問題)として計算するために、以下の2つの手法の一方を使用することができる。

1. 基本体積の境界において作用する全ての内力/応力を均等化する歪み場の計算、又は

10

20

30

40

50

２．全体的な光学要素に対するポテンシャルエネルギーの最小値を求めることによる歪み場の計算。

【０２２８】

両方の手法は、書込モードの与えられた分布において書込モード密度への変位の線形依存性を与える。両方の手法は、書込モード及び書込モード密度の知識に基づくレーザビームによって誘起される基本体積の修正の計算を可能にする。

【０２２９】

逆問題は、一般的な場合に策定することができる。光学要素又はウェーハの決定された３Ｄ輪郭を予め決められた３Ｄ輪郭と一致させる基本体積のターゲット変動をもたらす書込モードに対する３Ｄマップを求めなければならない。一般的に、上記に定めたように、書込モードは、１つ又はいくつかの重ね合わせレーザパルス又は部分重ね合わせレーザパルスによって発生される特定のピクセルであり、これらのピクセルは、レーザビームの離散パラメータセットを用いて発生され、問題を最適化問題として策定しなければならない。光学要素又はウェーハの決定された３Ｄ輪郭をその予め決められた３Ｄ輪郭に変換する望ましい変位場において最小値（又は上限）を有するターゲット汎関数を設定しなければならない。最適化された書込モード又は最適化されたレーザビームパラメータ及び書込モード密度は、ターゲット汎関数を最小にする変位場を発生し、従って、光学要素又はウェーハの予め決められた３Ｄ輪郭を発生させる。

【０２３０】

逆問題を解く可能な方式、すなわち、光学要素又はウェーハの望ましい予め決められた３Ｄ輪郭を与える書込モードの３Ｄマップを計算する可能な方式は、以下の通りである。

１．書込モードの最適化は、ＭＬＳ手法（移動最小二乗法）を用いて実施することができるが、離散書込モードマップの完全な列挙は、小さい基本直方体の場合は非常に困難である可能性がある。

２．３Ｄモードマップの離散パラメータは、１つの基本直方体が、様々な書込モード密度を有する様々な書込モードの重ね合わせを有することができるという仮定の下に、連続的なアナログに変換することができる。基本直方体の全ての物理特性変化及び形状特性変化が、対応する書込モードの寄与に比例する場合に、ターゲット汎関数は、決定された３Ｄ輪郭のその予め決められた３Ｄ輪郭からの残存偏差の二乗である。この場合に、この変分形式は、線形問題をもたらすことになる。

【０２３１】

以下では、第２の手法を使用する。以下の手法を基本直方体を用いて例証する。しかし、この手法は直方体に限定されず、例えば、四面体又は平行六面体を使用することができる。

【０２３２】

線形弾性を有する光学要素又はウェーハに対する一般化されたフックの法則を３Ｄ形式で次式のように示すことができる。

$$\sigma_{ij}(x, y, z) = \sum_{k=1, l=1}^{3,3} H_{ijkl}(x, y, z) \varepsilon_{kl}(x, y, z) \quad (1)$$

式中の３Ｄ微小歪みテンソル (x, y, z) は、成分 $\varepsilon_{ij}(x, y, z)$ を有し、応力テンソル (x, y, z) は、成分 $\sigma_{ij}(x, y, z)$ を有する。弾性テンソル $H(x, y, z)$ は４次のテンソル場である。

【０２３３】

以下の式を簡素化するために、歪みテンソル (x, y, z) の成分に対して次式を定めることによって工学表記を使用する。

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{xx}, \varepsilon_1 = \varepsilon_{yy}, \varepsilon_2 = \varepsilon_{zz}, \varepsilon_3 = 2 \cdot \varepsilon_{xy}, \varepsilon_4 = 2 \cdot \varepsilon_{xz}, \varepsilon_5 = 2 \cdot \varepsilon_{yz}$$

【０２３４】

応力テンソル (x, y, z) に対しても、次式のように同じことを行う。

$$\sigma_0 = \sigma_{xx}, \sigma_1 = \sigma_{yy}, \sigma_2 = \sigma_{zz}, \sigma_3 = 2 \cdot \sigma_{xy}, \sigma_4 = 2 \cdot \sigma_{xz}, \sigma_5 = 2 \cdot \sigma_{yz}$$

【 0 2 3 5 】

変換の観点からは、 σ_i 及び ϵ_i はベクトルではない。定めた表記を使用すると、式 1 に対するフックの法則を次式の形式に書き直すことができる。

$$\sigma_i(x, y, z) = \sum_{k=0}^5 H_{ik}(x, y, z) \epsilon_k(x, y, z)$$

又は

(2)

10

$$\sigma = H \epsilon$$

【 0 2 3 6 】

従って、4 次の弾性テンソル $H(x, y, z)$ が 2 次のテンソル H_{ij} に換算される。

【 0 2 3 7 】

例えば、石英レンズ又はフォトマスクの基板のような等方性材料では、弾性テンソルは、2 つの独立成分 $E(x, y, z)$ 及び $\mu(x, y, z)$ のみを有し、次式の形式のものである。

$$H = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\mu \end{bmatrix} \quad (3)$$

20

この場合に、 $E(x, y, z)$ はヤング率を表し、 $\mu(x, y, z)$ はポアソン比である。

30

【 0 2 3 8 】

光学要素又はウェーハ内へのピクセルの書込によって誘起される光学要素又はウェーハ内の変位ベクトル場は、ベクトル場であり、次式のように表すことができる。

$$\vec{u}(\vec{x}) = \vec{u}(x, y, z) = \begin{bmatrix} \Delta x(x, y, z) \\ \Delta y(x, y, z) \\ \Delta z(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

【 0 2 3 9 】

40

式 4 では、 $x(x, y, z)$ は、光学要素又はウェーハ内の点の x 座標のレーザパルスの印加の前のその位置の変化を表している。

【 0 2 4 0 】

微小歪みテンソル場 ϵ_{ij} は、変位ベクトル場式

$$\vec{u}(x, y, z)$$

からコーシー公式を用いて導出することができる。この場合に、微小歪みは、次式のように書くことができる。

$$\vec{\varepsilon}(x, y, z) = \mathbf{A} \vec{u}(x, y, z) \quad (5)$$

式中の行列演算子 A は、次式の偏微分要素から構成される。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \end{bmatrix} \quad (6)$$

10

【 0 2 4 1 】

微小歪みは 2 次テンソルであり、用いている工学表記に起因してベクトルのようにしか見えない。

【 0 2 4 2 】

上述したように、光学要素又はウェーハのポテンシャルエネルギーからの書込モード及び書込モード密度の決定には、ラグランジュ変分原理を使用する。光学要素又はウェーハ内へのピクセルの導入からもたらされる変形の全ポテンシャルエネルギー P は、ポテンシャルエネルギー密度 P (x , y , z) の体積積分の形式で次式のように表すことができる。

20

$$P = \int_V P(x, y, z) dV \quad (7)$$

【 0 2 4 3 】

歪みテンソル場 $\varepsilon_i(x, y, z)$ によって引き起こされる応力テンソル場 $\sigma_i(x, y, z)$ からもたらされるポテンシャルエネルギー密度は、両方の量のベクトル成分のスカラー積の積分に比例する。従って、歪みベクトル場 $\varepsilon_i(x, y, z)$ からもたらされる応力テンソル場 $\sigma_i(x, y, z)$ によって引き起こされるポテンシャルエネルギー密度 P (x , y , z) は、次式によって与えられる。

30

$$P(x, y, z) = 1/2(\sigma_0 \varepsilon_0 + \sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3 + \sigma_4 \varepsilon_4 + \sigma_5 \varepsilon_5) = 1/2(\vec{\sigma}, \vec{\varepsilon}) \quad (8)$$

【 0 2 4 4 】

式 2 の形式にあるフックの法則を用いて歪みテンソル場 $\varepsilon_i(x, y, z)$ で置換し、歪みテンソル場 $\varepsilon_i(x, y, z)$ を式 5 の変位場で置換することにより、ポテンシャルエネルギー分布又はポテンシャルエネルギー密度は次式の形式を有する。

$$P(x, y, z) = \frac{1}{2}(\mathbf{H} \vec{\varepsilon}, \vec{\varepsilon}) = \frac{1}{2}(\mathbf{H}(x, y, z) \mathbf{A} \vec{u}(x, y, z), \mathbf{A} \vec{u}(x, y, z)) \quad (9)$$

40

【 0 2 4 5 】

ポテンシャルエネルギーの最小値の基準を満たす変位ベクトル場

$$\vec{u}(x, y, z)$$

を定める理想的な(しかし、唯一ではない)方式は、有限要素様の手法である。一般性を失うことなく、全光学要素を $K_x \cdot L_y \cdot M_z$ 個の基本体積のセットとして表すことができる。以下の計算が容易になるので、基本体積が平行六面体、直方体又は立方体、又は基本四面体であることが好ましい。 K_x は x 方向の基本体積(例えば、直方体等)の個数であり、 L_y 及び M_z は、それぞれ y 方向及び z 方向の基本体積(あるいは、例えば、直方体)の個数である。

50

【 0 2 4 6 】

以下のポテンシャルエネルギー P の例示的な計算では、光学要素を $K_x \cdot L_y \cdot M_z$ 個の同一サイズの基本直方体に分割する。合計ポテンシャルエネルギー P は、個々の直方体のポテンシャルエネルギー P^α の和である。

$$P = \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} P^\alpha \quad (10)$$

【 0 2 4 7 】

基本体積又は基本直方体のポテンシャルエネルギー P は、次式のように基本直方体の体積 V にわたってポテンシャルエネルギー密度を積分することによって得られる。

$$P^\alpha = \int_{V^\alpha} P^\alpha(x, y, z) dV \quad (11)$$

【 0 2 4 8 】

式 9 から、次式のようにポテンシャルエネルギー密度 $P(x, y, z)$ が得られる。

$$P^\alpha(x, y, z) = \frac{1}{2} (\mathbf{H}^\alpha \mathbf{A} \vec{u}^\alpha(x, y, z), \mathbf{A} \vec{u}^\alpha(x, y, z)) \quad (12)$$

【 0 2 4 9 】

添字 α は、光学要素を分割する全ての基本直方体の計数値である。各直方体又は各基本体積は非常に小さく、従って、個々の基本体積又は基本直方体内で、弾性テンソルの 2 次テンソル場 $\mathbf{H}(x, y, z)$ を定数テンソル \mathbf{H} で置換することができると仮定する。

【 0 2 5 0 】

図 4 7 の模式図は、基本直方体を示している。直方体は、0 から 7 までの番号を振った 8 つの頂点を有する。図 4 7 の直方体の辺長をそれぞれ $2 \cdot m_x$ 、 $2 \cdot m_y$ 、及び $2 \cdot m_z$ として定める。

【 0 2 5 1 】

基本直方体が光学要素又はウェーハの寸法と比較して小さいという仮定を再度利用することにより、ベクトル場

$$\vec{u}(x, y, z)$$

をその線形近似で置換することができる。全ての基本体積に関して、ベクトル場

$$\vec{u}(x, y, z)$$

は、基本体積の頂点の変位の線形内挿で表される。

$$\vec{u}(x, y, z) = \sum_{i=0}^7 N_i^\alpha(x, y, z) \cdot \vec{u}_i^\alpha = \sum_{i=0}^7 N_i^\alpha(x, y, z) \cdot \vec{u}_i^\alpha(x, y, z) \quad (13)$$

【 0 2 5 2 】

この目的のために、 $i = 0, \dots, 7$ である頂点 N_i の線形形状関数を導入し、この場合に、添字 α は、光学要素を分割する基本体積を表している。以下では、添字 g は、次式のように、非摂動立方体頂点座標 N_i 又は非摂動 3 D 格子ノード、すなわち、光学要素内への光パルス又はレーザパルスの印加の前の場所を表している。

10

20

30

40

$$\begin{array}{cc}
N_6^\alpha & N_7^\alpha & x_6^{g\alpha}, y_6^{g\alpha}, z_6^{g\alpha} & x_7^{g\alpha}, y_7^{g\alpha}, z_7^{g\alpha} \\
N_4^\alpha & N_5^\alpha & x_4^{g\alpha}, y_4^{g\alpha}, z_4^{g\alpha} & x_5^{g\alpha}, y_5^{g\alpha}, z_5^{g\alpha} \\
N_2^\alpha & N_3^\alpha & x_2^{g\alpha}, y_2^{g\alpha}, z_2^{g\alpha} & x_3^{g\alpha}, y_3^{g\alpha}, z_3^{g\alpha} \\
N_0^\alpha & N_1^\alpha & x_0^{g\alpha}, y_0^{g\alpha}, z_0^{g\alpha} & x_1^{g\alpha}, y_1^{g\alpha}, z_1^{g\alpha}
\end{array} \quad (14)$$

10

この場合に、次式が成り立つ。

$$u_i^\alpha = u(x_i^{g\alpha}, y_i^{g\alpha}, z_i^{g\alpha}) \quad \text{及び} \quad i = (0, \dots, 7) \quad (15)$$

【 0 2 5 3 】

光学要素内へのピクセル書込によって引き起こされる頂点座標の変位は、次式によって定められる。

$$N_0^\alpha(x, y, z) = \frac{(x_1^{g\alpha} - x)}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y_1^{g\alpha} - y)}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z_1^{g\alpha} - z)}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})} \quad 20$$

$$N_1^\alpha(x, y, z) = \frac{(x - x_0^{g\alpha})}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y_1^{g\alpha} - y)}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z_1^{g\alpha} - z)}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

$$N_2^\alpha(x, y, z) = \frac{(x_1^{g\alpha} - x)}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y - y_0^{g\alpha})}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z_1^{g\alpha} - z)}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

$$N_3^\alpha(x, y, z) = \frac{(x - x_0^{g\alpha})}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y - y_0^{g\alpha})}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z_1^{g\alpha} - z)}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})} \quad 30$$

$$N_4^\alpha(x, y, z) = \frac{(x_1^{g\alpha} - x)}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y_1^{g\alpha} - y)}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z - z_0^{g\alpha})}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})} \quad (16)$$

$$N_5^\alpha(x, y, z) = \frac{(x - x_0^{g\alpha})}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y_1^{g\alpha} - y)}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z - z_0^{g\alpha})}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

40

$$N_6^\alpha(x, y, z) = \frac{(x_1^{g\alpha} - x)}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y - y_0^{g\alpha})}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z - z_0^{g\alpha})}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

$$N_7^\alpha(x, y, z) = \frac{(x - x_0^{g\alpha})}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y - y_0^{g\alpha})}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z - z_0^{g\alpha})}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

【 0 2 5 4 】

この手法は、実際の変位ベクトル場

$$\vec{u}(x, y, z)$$

の良好な連続近似をもたらす。

【 0 2 5 5 】

基本体積 のポテンシャルエネルギー P を直方体 の頂点変位の関数として表している。
式 1 2 の直方体 内の変位ベクトル場

$$\vec{u}^{\alpha}(x, y, z)$$

を式 1 4 の近似式で置換することにより、直方体 内の式 1 2 を次式に書き直すことができる。

10

$$P^{\alpha}(x, y, z) = \frac{1}{2} (H^{\alpha} \sum_{i=0}^7 AN_i^{\alpha}(x, y, z) u_i^{\alpha}, \sum_{k=0}^7 AN_k^{\alpha}(x, y, z) u_k^{\alpha}) \quad (17)$$

【 0 2 5 6 】

直交座標 x , y , z に関する形状関数 N_i の 1 次微分が、次式によって与えられる。

$$\frac{\partial N_o^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (y_1^{g\alpha} - y)(z_1^{g\alpha} - z)$$

$$\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (y - y_0^{g\alpha})(z_1^{g\alpha} - z)$$

$$\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (y_1^{g\alpha} - y)(z - z_0^{g\alpha})$$

$$\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (y - y_0^{g\alpha})(z - z_0^{g\alpha})$$

10

$$\frac{\partial N_o^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (x_1^{g\alpha} - x)(z_1^{g\alpha} - z)$$

$$\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (x - x_0^{g\alpha})(z_1^{g\alpha} - z)$$

20

$$\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (x_1^{g\alpha} - x)(z - z_0^{g\alpha})$$

(18)

$$\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (x - x_0^{g\alpha})(z - z_0^{g\alpha})$$

$$\frac{\partial N_o^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (x_1^{g\alpha} - x)(y_1^{g\alpha} - y)$$

30

$$\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (x - x_0^{g\alpha})(y_1^{g\alpha} - y)$$

$$\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (x_1^{g\alpha} - x)(y - y_0^{g\alpha})$$

$$\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (x - x_0^{g\alpha})(y - y_0^{g\alpha})$$

40

この場合に、 $N = 1 / (8 \cdot m_x \cdot m_y \cdot m_z)$ であり、 m_x は、基本体積の辺長 x 、 y 、又は z のうちの 1 つ (すなわち、 $l = (x, y, z)$) である。

【0257】

ここで全ての基本体積に対して、基本体積の中心に原点を有する直交座標を導入する。

$$x^\alpha = x - (x_0^{g\alpha} + x_1^{g\alpha})/2$$

$$y^\alpha = y - (y_0^{g\alpha} + y_1^{g\alpha})/2 \quad (19)$$

$$z^\alpha = z - (z_0^{g\alpha} + z_1^{g\alpha})/2$$

【 0 2 5 8 】

式 18 の偏微分を次式に変換する。

10

$$\frac{\partial N_o^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (m_y^\alpha - y^\alpha)(m_z^\alpha - z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (m_y^\alpha + y^\alpha)(m_z^\alpha - z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (m_y^\alpha - y^\alpha)(m_z^\alpha + z^\alpha)$$

20

$$\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (m_y^\alpha + y^\alpha)(m_z^\alpha + z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_o^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (m_x^\alpha - x^\alpha)(m_z^\alpha - z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (m_x^\alpha + x^\alpha)(m_z^\alpha - z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (m_x^\alpha - x^\alpha)(m_z^\alpha + z^\alpha)$$

30

(20)

$$\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (m_x^\alpha + x^\alpha)(m_z^\alpha + z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_o^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (m_x^\alpha - x^\alpha)(m_y^\alpha - y^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (m_x^\alpha + x^\alpha)(m_y^\alpha - y^\alpha)$$

40

$$\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (m_x^\alpha - x^\alpha)(m_y^\alpha + y^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (m_x^\alpha + x^\alpha)(m_y^\alpha + y^\alpha)$$

50

【 0 2 5 9 】

変位ベクトル場

 $\vec{u}(x, y, z)$

への行列演算子 A の適用によって次式がもたらされる。

$$A \vec{u}^{\alpha}(x, y, z) = \sum_{k=0}^7 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial x} u_{kx}^{\alpha} \\ \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial y} u_{ky}^{\alpha} \\ \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial z} u_{kz}^{\alpha} \\ \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial y} u_{kx}^{\alpha} + \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial x} u_{ky}^{\alpha} \\ \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial z} u_{kx}^{\alpha} + \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial x} u_{kz}^{\alpha} \\ \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial z} u_{ky}^{\alpha} + \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial y} u_{kz}^{\alpha} \end{bmatrix} \quad (21)$$

【 0 2 6 0 】

式 2 1 と式 3 の弾性テンソル H との乗算によって以下の式 2 2 がもたらされる。

$$HA \vec{u}^{\alpha}(\bar{x}) = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \sum_{k=0}^7 \begin{bmatrix} (1-\mu) \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial x} u_{kx}^{\alpha} + \mu \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial y} u_{ky}^{\alpha} + \mu \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial z} u_{kz}^{\alpha} \\ \mu \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial x} u_{kx}^{\alpha} + (1-\mu) \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial y} u_{ky}^{\alpha} + \mu \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial z} u_{kz}^{\alpha} \\ \mu \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial x} u_{kx}^{\alpha} + \mu \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial y} u_{ky}^{\alpha} + (1-\mu) \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial z} u_{kz}^{\alpha} \\ (1/2-\mu) \left(\frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial y} u_{kx}^{\alpha} + \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial x} u_{ky}^{\alpha} \right) \\ (1/2-\mu) \left(\frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial z} u_{kx}^{\alpha} + \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial x} u_{kz}^{\alpha} \right) \\ (1/2-\mu) \left(\frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial z} u_{ky}^{\alpha} + \frac{\partial N_k^{\alpha}}{\partial y} u_{kz}^{\alpha} \right) \end{bmatrix}$$

【 0 2 6 1 】

ここで以下の略号を導入する。

$$\frac{\partial N_k^\alpha}{\partial s} = N_{ks}^\alpha$$

$$N_{ks}^\alpha = q_k^s N^\alpha \frac{(m_x^\alpha + q_k^x x^\alpha)(m_y^\alpha + q_k^y y^\alpha)(m_z^\alpha + q_k^z z^\alpha)}{(m_s^\alpha + q_k^s s^\alpha)} \quad (23)$$

$$q_k^x = q(k/1);$$

$$q_k^y = q(k/2); \quad q(x) = (-1)^{\lfloor x \rfloor + 1};$$

$$q_k^z = q(k/4);$$

【 0 2 6 2 】

それによって式 2 1 及び 2 2 は、それぞれ、次式になる。

$$A \vec{u}^\alpha(x, y, z) = \sum_{k=0}^7 \begin{bmatrix} N_{kx}^\alpha u_{kx}^\alpha \\ N_{ky}^\alpha u_{ky}^\alpha \\ N_{kz}^\alpha u_{kz}^\alpha \\ N_{ky}^\alpha u_{kx}^\alpha + N_{kx}^\alpha u_{ky}^\alpha \\ N_{kz}^\alpha u_{kx}^\alpha + N_{kx}^\alpha u_{kz}^\alpha \\ N_{kz}^\alpha u_{ky}^\alpha + N_{ky}^\alpha u_{kz}^\alpha \end{bmatrix} \quad (24)$$

及び

$$HA \vec{u}^\alpha(\bar{x}) = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \sum_{k=0}^7 \begin{bmatrix} (1-\mu)N_{kx}^\alpha u_{kx}^\alpha + \mu N_{ky}^\alpha u_{ky}^\alpha + \mu N_{kz}^\alpha u_{kz}^\alpha \\ \mu N_{kx}^\alpha u_{kx}^\alpha + (1-\mu)N_{ky}^\alpha u_{ky}^\alpha + \mu N_{kz}^\alpha u_{kz}^\alpha \\ \mu N_{kx}^\alpha u_{kx}^\alpha + \mu N_{ky}^\alpha u_{ky}^\alpha + (1-\mu)N_{kz}^\alpha u_{kz}^\alpha \\ (1/2-\mu)(N_{ky}^\alpha u_{kx}^\alpha + N_{kx}^\alpha u_{ky}^\alpha) \\ (1/2-\mu)(N_{kz}^\alpha u_{kx}^\alpha + N_{kx}^\alpha u_{kz}^\alpha) \\ (1/2-\mu)(N_{kz}^\alpha u_{ky}^\alpha + N_{ky}^\alpha u_{kz}^\alpha) \end{bmatrix} \quad (25)$$

【 0 2 6 3 】

式 2 4 及び 2 5 を使用すると、式 1 6 の基本体積 のポテンシャルエネルギー密度 P (x , y , z) は、次式の形式のものになる。

$$\begin{aligned}
P^\alpha(x, y, z) &= \frac{1}{2} (\mathbf{H}^\alpha \mathbf{A} \bar{\mathbf{u}}(x, y, z), \mathbf{A} \bar{\mathbf{u}}(x, y, z)) = \\
&= \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \sum_{k,l=0}^{7,7} \{ \\
&\quad ((1-\mu) \mathbf{N}_{kx}^\alpha u_{kx}^\alpha + \mu \mathbf{N}_{ky}^\alpha u_{ky}^\alpha + \mu \mathbf{N}_{kz}^\alpha u_{kz}^\alpha) \mathbf{N}_{lx}^\alpha u_{lx}^\alpha + \\
&\quad (\mu \mathbf{N}_{kx}^\alpha u_{kx}^\alpha + (1-\mu) \mathbf{N}_{ky}^\alpha u_{ky}^\alpha + \mu \mathbf{N}_{kz}^\alpha u_{kz}^\alpha) \mathbf{N}_{ly}^\alpha u_{ly}^\alpha + \\
&\quad (\mu \mathbf{N}_{kx}^\alpha u_{kx}^\alpha + \mu \mathbf{N}_{ky}^\alpha u_{ky}^\alpha + (1-\mu) \mathbf{N}_{kz}^\alpha u_{kz}^\alpha) \mathbf{N}_{lz}^\alpha u_{lz}^\alpha + \\
&\quad (1/2 - \mu) (\mathbf{N}_{ky}^\alpha u_{kx}^\alpha + \mathbf{N}_{kx}^\alpha u_{ky}^\alpha) (\mathbf{N}_{ly}^\alpha u_{lx}^\alpha + \mathbf{N}_{lx}^\alpha u_{ly}^\alpha) + \\
&\quad (1/2 - \mu) (\mathbf{N}_{kz}^\alpha u_{kx}^\alpha + \mathbf{N}_{kx}^\alpha u_{kz}^\alpha) (\mathbf{N}_{lz}^\alpha u_{lx}^\alpha + \mathbf{N}_{lx}^\alpha u_{lz}^\alpha) + \\
&\quad (1/2 - \mu) (\mathbf{N}_{kz}^\alpha u_{ky}^\alpha + \mathbf{N}_{ky}^\alpha u_{kz}^\alpha) (\mathbf{N}_{lz}^\alpha u_{ly}^\alpha + \mathbf{N}_{ly}^\alpha u_{lz}^\alpha) \}
\end{aligned} \tag{26}$$

10

【 0 2 6 4 】

ここで式 26 を簡略化するために、基本体積 の連続的なポテンシャルエネルギー密度 $P(x, y, z)$ を基本体積 の頂点変位 $P_{k,l}$ によって次式のように近似する。

$$P^\alpha(x, y, z) = \sum_{k=0, l=0}^{7,7} \sum_{s=0, t=0}^{2,2} u_{ks}^\alpha p_{ks,lt}^{g,\alpha} u_{lt}^\alpha \tag{27}$$

20

式中の添字 $s = (0, 1, 2)$ 及び $t = (0, 1, 2)$ は、直交座標 x 、 y 、及び z である。ポテンシャルエネルギー行列の成分 $P_{k,l}$ は、以下の行列形式 (式 28) を有する。

$$\begin{aligned}
p_{kl}^{g,\alpha} &= \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \cdot \\
&\left[\begin{array}{ccc}
\mu_1 \mathbf{N}_{kx}^\alpha \mathbf{N}_{lx}^\alpha + \mu_2 \mathbf{N}_{ky}^\alpha \mathbf{N}_{ly}^\alpha + \mu_2 \mathbf{N}_{kz}^\alpha \mathbf{N}_{lz}^\alpha & \mu \mathbf{N}_{ky}^\alpha \mathbf{N}_{lx}^\alpha + \mu_2 \mathbf{N}_{kx}^\alpha \mathbf{N}_{ly}^\alpha & \mu \mathbf{N}_{kz}^\alpha \mathbf{N}_{lx}^\alpha + \mu_2 \mathbf{N}_{kx}^\alpha \mathbf{N}_{lz}^\alpha \\
\mu \mathbf{N}_{kx}^\alpha \mathbf{N}_{ly}^\alpha + \mu_2 \mathbf{N}_{ky}^\alpha \mathbf{N}_{lx}^\alpha & \mu_2 \mathbf{N}_{kx}^\alpha \mathbf{N}_{ly}^\alpha + \mu_1 \mathbf{N}_{ky}^\alpha \mathbf{N}_{ly}^\alpha + \mu_2 \mathbf{N}_{kz}^\alpha \mathbf{N}_{lz}^\alpha & \mu \mathbf{N}_{kz}^\alpha \mathbf{N}_{ly}^\alpha + \mu_2 \mathbf{N}_{ky}^\alpha \mathbf{N}_{lz}^\alpha \\
\mu \mathbf{N}_{kx}^\alpha \mathbf{N}_{lz}^\alpha + \mu_2 \mathbf{N}_{kz}^\alpha \mathbf{N}_{lx}^\alpha & \mu \mathbf{N}_{ky}^\alpha \mathbf{N}_{lz}^\alpha + \mu_2 \mathbf{N}_{kz}^\alpha \mathbf{N}_{ly}^\alpha & \mu_2 \mathbf{N}_{kx}^\alpha \mathbf{N}_{ly}^\alpha + \mu_2 \mathbf{N}_{ky}^\alpha \mathbf{N}_{lz}^\alpha + \mu_1 \mathbf{N}_{kz}^\alpha \mathbf{N}_{lz}^\alpha
\end{array} \right]
\end{aligned} \tag{28}$$

30

この場合に、 $\mu_1 = (1 - \mu)$ 及び $\mu_2 = (1/2 - \mu)$ である。

【 0 2 6 5 】

式 28 の行列内の全ての加数は、 $\mathbf{N}_{ks}^\alpha \mathbf{N}_{lt}^\alpha$ という形式の積を含む。式 23 を用いて、直方体の 1 つの縁部に沿ったこれらの項の積分を次式のように表すことができる。

$$\int_{-m_s^\alpha}^{m_s^\alpha} (m_s^\alpha + q_k^s s^\alpha) ds^\alpha = 2m_s^{\alpha^2} \tag{29}$$

$$\int_{-m_s^\alpha}^{m_s^\alpha} (m_s^\alpha + q_k^s s^\alpha)(m_s^\alpha + q_l^s s^\alpha) ds^\alpha = 2m_s^{\alpha^3} (1 + q_k^s q_l^s / 3) = 2m_s^{\alpha^3} q_{kl}^s \tag{30}$$

40

この場合に、次式が成り立つ。

$$q_{kl} = q_{kl}^x q_{kl}^y q_{kl}^z \tag{31}$$

及び

$$q_{kl}^s = (1 + q_k^s q_l^s / 3) \tag{32}$$

【 0 2 6 6 】

50

式 2 9 から式 3 2 は、基本体積 の体積にわたる頂点座標の偏導関数微分の積分を $s = t$ の場合に次式 (式 3 3) としてもたらす。

$$\int_{V^a} N_{ks}^a N_{ls}^a dx^a dy^a dz^a = 8N^{a^2} q_k^s q_l^s \frac{(m_x^a m_y^a m_z^a)^3}{m_s^{a^2}} \frac{q_{kl}}{q_{kl}^s} = \frac{m_x^a m_y^a m_z^a}{8m_s^{a^2}} q_k^s q_l^s \frac{q_{kl}}{q_{kl}^s}$$

$s = t$ の場合に、この積分を次式 (式 3 4) としてもたらす。

$$\int_{V^a} N_{ks}^a N_{lt}^a dx^a dy^a dz^a = 8N^{a^2} q_k^s q_l^t \frac{(m_x^a m_y^a m_z^a)^3}{m_s^a m_t^a} \frac{q_{kl}}{q_{kl}^s q_{kl}^t} = \frac{m_x^a m_y^a m_z^a}{8m_s^a m_t^a} q_k^s q_l^t \frac{q_{kl}}{q_{kl}^s q_{kl}^t}$$

【 0 2 6 7 】

10

ここで基本体積 内に書き込まれたピクセルによって占有される体積は無視することができ、これらのピクセルは、光学要素又はウェーハの硬質性にそれ程影響を及ぼさないと仮定する。従って、ヤング率 $E(x, y, z)$ 及びポアソン比 $\mu(x, y, z)$ は、基本体積 内の場所に依存しない。光学要素又はウェーハ内へのピクセル導入の後のポテンシャルエネルギー分布は、基本体積 の頂点の変位値にわたって平方形式として示すことができる。式 2 9 から式 3 4 を使用する基本体積 にわたるポテンシャルエネルギー分布にわたる積分は、以下の式 3 4 をもたらす。

$$P_{ks,lt}^{g,a} = \frac{Em_x^a m_y^a m_z^a q_{kl}}{16(1+\mu)(1-2\mu)}.$$

20

$$\cdot \left(\mu_2 \left(\frac{q_k^x q_l^x}{m_x^a m_x^a q_{kl}^x} + \frac{q_k^y q_l^y}{m_y^a m_y^a q_{kl}^y} + \frac{q_k^z q_l^z}{m_z^a m_z^a q_{kl}^z} \right) \delta_{st} + \frac{q_k^s q_l^t}{m_s^a m_t^a} \left((\mu_1 - \mu_2) \delta_{st} + \frac{(\mu + \mu_2)}{q_{kl}^s} (1 - \delta_{st}) \right) \right)$$

【 0 2 6 8 】

上述の仮定により、ポテンシャル行列

$$P_{ks,lt}^{g,a}$$

は、基本体積 内へのピクセルの書込の量とタイプとに依存しない。

【 0 2 6 9 】

30

ここで、全ての基本体積 が、光学要素又はウェーハ内にピクセルが書き込まれた後に新しい平衡状態を有すると仮定する。この仮定は、本出願において提供する簡略化された手法の重要な陳述事項である。式 1 6 及び式 2 7 は、基本体積 の変形が非攪乱状態から始まるという仮定の上で導出したものである。光学要素又はウェーハ内へのピクセルの導入後の基本体積 の頂点の平衡座標を w_{ki} と呼ぶ。対称性の理由から、基本体積 の元の状態又は非変形状態から新しい平衡状態 w_{ki} への体積変形 u_{ki} によって表される変形からもたらされるポテンシャルエネルギー変化が、新しい平衡状態 w_{ki} から元の状態又は非変形状態に戻る変形に起因する修正と反対であることは明らかである。

【 0 2 7 0 】

40

全ての基本体積 が、光学要素内にピクセルを書き込んだ後に新しい平衡形状を有することに起因して、元の状態又は非変形状態からの基本体積 の体積変形をポテンシャルエネルギーに関する表現式内に含める必要がある。元の状態又は非変形状態から新しい平衡位置への変形、又はその逆の変形の定義により、ポテンシャルエネルギー密度の式 2 7 は次式に変換される。

$$P^a(x, y, z) = \sum_{k,l=0}^{7,7} \sum_{s,t=0}^{2,2} (u_{ks}^a - w_{ks}^a) P_{ks,lt}^{g,a} (u_{lt}^a - w_{lt}^a) \quad (35)$$

【 0 2 7 1 】

全光学要素のポテンシャルエネルギーは、全ての基本体積 にわたる次式の和である。

50

$$\begin{aligned}
 P &= \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} P^\alpha(x, y, z) = \\
 &= \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{k=0, l=0}^{7,7} \sum_{s=0, t=0}^{2,2} (u_{ks}^\alpha - w_{ks}^\alpha) P_{ks,lt}^{g,\alpha} (u_{lt}^\alpha - w_{lt}^\alpha)
 \end{aligned} \quad (36)$$

【 0 2 7 2 】

ラグランジュ変分原理は、物体の平衡位置で、そのポテンシャルエネルギーが最小であることを説明するものである。更に、全ての変位にわたるあらゆる部分変動はゼロに等しい。それによって式 3 6 に対してノードの全ての座標 i に関する次式の線形方程式系がもたらされる。

$$\delta P / \delta \xi_i = 0 \quad (37)$$

式 1 2 により、全ての隣接ノード対する成分内に各内部ノード座標 i が 8 回示される。以下では、ノードを左から右に (x 方向に) 列挙し、次いで、行単位で下から上に (y 方向に) 列挙し、最後に平面単位で下から上に (y 方向に) 列挙する。更に、基本体積 の頂点座標の計数を次式的方式で行う。

$$\xi_{3\alpha+0} = u_{0x}^\alpha, \xi_{3\alpha+1} = u_{0y}^\alpha, \xi_{3\alpha+2} = u_{0z}^\alpha \quad (38)$$

更に次式 3 9 は、ノード識別名又は貼り合わせ条件を示している。

$$\begin{aligned}
 u_{0x}^\alpha &= -u_{1x}^{\alpha-1} = u_{2x}^{\alpha-K_x} = -u_{3x}^{\alpha-K_x-1} = u_{4x}^{\alpha-K_x \cdot M_y} = -u_{5x}^{\alpha-K_x L_y-1} = u_{6x}^{\alpha-K_x L_y - L_x} = -u_{7x}^{\alpha-K_x L_y - K_x-1} \\
 u_{0y}^\alpha &= u_{1y}^{\alpha-1} = -u_{2y}^{\alpha-L_y} = -u_{3y}^{\alpha-L_y-1} = u_{4y}^{\alpha-L_y M_z} = u_{5y}^{\alpha-L_y M_z-1} = -u_{6y}^{\alpha-L_y M_z - L_y} = -u_{7y}^{\alpha-L_y M_z - L_y-1} \\
 u_{0z}^\alpha &= -u_{1z}^{\alpha-1} = u_{2z}^{\alpha-M_z} = -u_{3z}^{\alpha-M_z-1} = u_{4z}^{\alpha-M_z K_x} = -u_{5z}^{\alpha-M_z K_x-1} = u_{6z}^{\alpha-M_z K_x - M_z} = -u_{7z}^{\alpha-M_z K_x - M_z-1}
 \end{aligned}$$

K_x 、 L_y 、及び M_z は、光学要素内の基本体積 の x 方向 (列)、y 方向 (列)、及び z 方向 (平面) それぞれの最大個数である。

【 0 2 7 3 】

内部ノードの座標 i を基本体積 の頂点の変位と結び付ける列挙行列 $Q_{ks,i}$ を次式のように導入する。

$$u_{ks}^\alpha = \sum_{i=1}^{3 \cdot (K_x+1) \cdot (L_y+1) \cdot (M_z+1)} Q_{ks,i}^\alpha \xi_i \quad (40)$$

【 0 2 7 4 】

式 4 0 の列挙を用いて、式 3 6 の線形系の全ての成分を次式のように表すことができる。

$$\sum_m^{3 \cdot (K_x+1) \cdot (L_y+1) \cdot (M_z+1)} P_{nm}^g \xi_m - \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{l=0}^7 \sum_{t=0}^2 P_{nl\alpha}^w w_{lt}^\alpha = 0 \quad (41)$$

式中の P_{nm}^g は次式で与えられる。

$$P_{nm}^g = \sum_{k=0, l=0}^{7,7} \sum_{s=0, t=0}^{2,2} \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} Q_{ks,n}^{\alpha} P_{ks,lt}^{g,\alpha} Q_{lt,m}^{\alpha} \quad (42)$$

更に新しいセル平衡位置に関連付けられるポテンシャル行列の一部 P_{nlt}^w は、次式で与えられる。

$$P_{nlt}^w = \sum_{k=0}^7 \sum_{s=0}^2 Q_{ks,n}^{\alpha} P_{ks,lt}^{g,\alpha} \quad (43)$$

10

【0275】

式41は、前節で記述した本発明の原理の全ての異なる態様の説明に対する開始点である。回転移動及び並進移動に対する全体的な光学要素又はウェーハのポテンシャルエネルギーの不変性に起因して、行列 P_{ij}^g の行列式がゼロであることに注意することは重要である。この条件は、得られる光学要素又はウェーハの並進移動及び回転に関する条件を追加することによって常に自動的に満たされる。これは、正規化行列 P_{ij}^g の逆行列（2次テンソル） $(P_{ij}^g)^{-1}$ を計算することが常に可能であることを意味する。従って、式41は、基本体積の既知の平衡変形に対して光学要素又はウェーハの一部分内にレーザビームを局所的に向けることでもたらされる変形の計算を可能にする。この関係は次式によって表される。

20

$$\xi = (P^g)^{-1} P^w w \quad (44)$$

【0276】

得られる変形を原因のレーザビーム又はより厳密にはレーザビームパラメータに関連付け、更にレーザビームの書込モードに関連付けるために、得られる体積変形を書込モードシグニチャー（又はレーザビームパラメータ）及び書込モード密度に関する正確な術語で表している。均一な書込は、書込密度が基本体積内でx方向、y方向、及びz方向の各々に一定であることを意味する。上述したように、書込密度は、個々に修正することができる3つの線形密度を含む。

30

【0277】

基本体積内の書込密度を書込モード密度 a とも呼ぶ。単位書込密度に対する基本体積の頂点座標の変化を e_{lt} と表記する。ここで、光学要素の全ての基本体積に対して単一書込モードが使用され、書込密度 a のみを変化させると仮定する。これは、全ての基本体積に対して同じレーザビームパラメータが使用され、書込密度又はピクセル密度のみが修正されることを意味する。式44は、次式の形式で書き直すことができる。

$$\xi_n = \sum_{m=0, l=0, t=0, \alpha=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, 7, 2, K_x \cdot L_y \cdot M_z} (P_{nm}^g)^{-1} P_{m l t \alpha}^w a^{\alpha} e_{lt} \quad (45)$$

40

この場合に、 e_{lt} は、基本体積の8つの頂点の24個の変位を表している。

【0278】

l及びtにわたって全和を取り、

$$A_{n\alpha} = \sum_{l=0, t=0}^{7,2} P_{n l t \alpha}^w e_{lt}$$

で表すことにより、式45は、次式の形式のものになる。

$$\xi_n = \sum_{m=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} (P_{nm}^g)^{-1} A_{m\alpha} a^\alpha \quad (46)$$

【 0 2 7 9 】

この式は、内部ノード_iにおける変形が、固定の書込モードに関して全ての基本体積の書込密度 a の線形結合であることを説明している。

【 0 2 8 0 】

式46は、レーザビームの書込みが、固定の書込モード又は固定のレーザビームパラメータセットと、固定の書込モード密度 a とを用いて実施されると仮定している。書込モードの変形特性を単位書込、すなわち、単一書込密度 a に対する平衡体積変形 e_{it} で符号化する。実際には、基本体積 V の8つの頂点での体積変形の24個の成分は、18個の独立した成分の関数である。光学構成要素の基本体積 V の3つの仮想並進、並びに3つの独立した座標の周りの光学要素の基本体積 V の3つの回転が、ポテンシャルエネルギーに寄与しない。18個の独立した成分を使用することで、24個の平衡体積変形 e_{it} から18個の単位ベクトル n^i の直交セットを構成することができる。

$$n^i = \sum_{j=1}^{24} N_{ij}^{-1} e^j N_{ij}^{-1} e^j \quad (47)$$

この場合に、次式が成り立つ。

$$e^j = \{e_k^j\} \quad e_k^j = \delta_{kj} \quad (48)$$

式中の $N^{-1}_{ij} = (n^i, e^j)$ は、基底 e^j を基底 n^i に変換する行列である。単位ベクトル n^i の直交セットは、次式を満たす。

$$(n^i, n^j) = \delta_{ij} \quad (49)$$

$$(n^i, \sum_{k=0}^7 e^{3k}) = 0, \quad (n^i, \sum_{k=0}^7 e^{3k+1}) = 0, \quad (n^i, \sum_{k=0}^7 e^{3k+2}) = 0,$$

$$(n^i, \sum_{k=0}^7 (e^{3k+1} - e^{3k+2})) = 0, \quad (n^i, \sum_{k=0}^7 (e^{3k} - e^{3k+2})) = 0,$$

$$(n^i, \sum_{k=0}^7 (e^{3k+1} - e^{3k})) = 0 \quad (50)$$

【 0 2 8 1 】

書込モードシグニチャーで表し、かつMSと略記する書込モードの表現として、この単位ベクトルセットへの投影を使用する。書込モードシグニチャーは、選択される書込タイプに関して、かつ物理特性及び幾何学特性の予め定められたセットを有するレーザビームパラメータセットに関する書込ツール又はレーザ系の特性を表している。式37から式50、及び次式：

$$e_{ks} = \sum_{i=0}^{17} \eta_{3k+s,i} MS_i \quad (51)$$

の表記を用いて、式 4 5 を式 (5 2) のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} \xi_n &= \sum_{o=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{k=0}^7 \sum_{s=0}^2 \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{i=0}^{17} (P_{no}^g)^{-1} P_{oks\alpha}^w a^\alpha \eta_{3k+s,i} MS_i = \\ &= \sum_{o=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{i=0}^{17} (P_{no}^g)^{-1} E_{oi} MS_i \end{aligned} \quad (52)$$

10

式中の E_{oi} は、次式で与えられる。

$$E_{oi} = \sum_{k=0}^7 \sum_{s=0}^2 \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} P_{oks\alpha}^w a^\alpha \eta_{3k+s,i} \quad (53)$$

【 0 2 8 2 】

式 5 2 は、実験データからモードシグニチャー MS_i をどのように決定するかに関する以下の明確な指示を提供している。選択される書込モード又はレーザビームパラメータセットを有するピクセルを光学要素内に書き込む。次いで、得られる変位 ξ_n を決定する。最後に式 5 3 の逆行列に、決定された変位 ξ_n を乗じる。次式は、最後の段階を表している。

20

$$MS_i = \sum_{o=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{n=1}^{17} (E_{io})^{-1} P_{on}^g \xi_n \quad (54)$$

【 0 2 8 3 】

本節は、理論的な概念の説明を提供している。更に、本節は、実験データからの書込モードシグニチャー及び書込密度の決定の理論又は概念も記載している。

30

【 0 2 8 4 】

しかし、現時点では、変位 ξ_n は、限られた精度でしか決定することができない。それによって行列 E_{oi} のゼロ固有値に起因して逆行列 $(E_{oi})^{-1}$ の乗算が問題になる。従って、現時点では、書込モード及び書込モード密度の決定に向けて修正された手法を使用する。これは、上記に提供した理論の根本的な制限ではなく、一時的な実験的制約である。

【 0 2 8 5 】

概念の導出中に、異なる書込モードによって光学要素の基本体積内に導入される体積変形が加算的なものであると仮定した。従って、選択される異なる書込モードが光学要素又はウェーハ内に導入され、これらの組合せ変位 ξ_n が決定される。得られる変位又は変形 ξ_n は、使用書込モード m の全和として式 4 6 から次式のように導出される。

40

$$\xi_n = \sum_{o=1, \alpha=1, m=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, K_x \cdot L_y \cdot M_z, R} (P_{no}^g)^{-1} A_{o\alpha} a_m^\alpha \quad (55)$$

式中の R は、式 5 5 内に考慮される異なる書込モードの個数である。

【 0 2 8 6 】

従って、式 5 5 は、モードシグニチャー MS_i が全ての書込モードに関して既知である場合に、書込マップ又は書込密度 a_m のあらゆるセットに対してもたらされる変位 ξ_n の決定を可能にする。

【 0 2 8 7 】

50

ここで、光学要素の 3 D 輪郭 φ_j^{det} が、場所セット $X_j, Y_j, Z_j, j = 1, \dots, L$ において決定されると仮定する。例えば、この場所セットにおいて 3 D 輪郭を測定することができる。光学要素の予め決められた場所 φ_j^{predet} からの場所セットの偏差 $\Delta\varphi_j$ を次式に従って決定することができる。

$$\Delta\varphi_j = \varphi_j^{predet} - \varphi_j^{det} \quad (56)$$

【0288】

これらの偏差 $\Delta\varphi_j$ は、光学要素上にレーザビームを局所的に向けることによって補正しなければならない。上記で解説した近似では、光学要素内の基本体積 V 内に導入される体積変形は、全ての偏差 $\Delta\varphi_j$ に対して加算的なものである。しかし、これらの変位は、光学要素の基本体積 V のノード i においてしか把握されない。基本体積 V の内側の変形が線形挙動を示すという仮定を使用することで、ノードにおける変位の大きさ ζ_i を光学要素の 3 D 輪郭の望ましい場所における大きさ $\Delta\varphi_j$ に変換する行列を発生することができる。この変換は、式 40 を使用することによって次式のように実行することができる。

$$\zeta_i = \sum_{j=1}^{3(K_x+1)(L_y+1)(M_z+1)} M_{ij} \Delta\varphi_j \quad (57)$$

この場合に、 ζ_i は、場所 X_i, Y_i, Z_i において計算された変位 $\Delta\varphi_j$ の線形内挿又は線形結合の結果である。行列 M_{ij} は、 $L \times 3 \cdot (K_x + 1) \cdot (L_y + 1) \cdot (M_z + 1)$ の寸法を有する。実際には、既に解説したように、全ての場所が、基本体積 V の 3 つの頂点のみを使用することによって内挿されるので、この行列は 24 個の対角要素のみを有する。

【0289】

従って、光学要素又はウェーハ内の選択される場所 i において超短レーザパルス印加の後に得られる 3 D 輪郭は次式になる。

$$\Delta\varphi_i + \zeta_i \quad (58)$$

【0290】

光学要素又はウェーハの決定された場所 φ_j^{det} を予め決められた場所 φ_j^{predet} に一致させるために、書込モードのパラメータを選択し、ターゲット汎関数 Φ を最小にする基本体積 V 内の 1 つ / 複数の書込モード密度を決定し、すなわち、次式を解かなければならない。

$$\min\{\Phi(\Delta\varphi + \zeta)\} \quad (59)$$

【0291】

ターゲット汎関数 Φ を最小にするためには、光学構成要素の決定された 3 D 輪郭 φ_j^{det} を予め決められた 3 D 輪郭 φ_j^{predet} に一致させるための変位 $\Delta\varphi_j$ を変化させる。

【0292】

計算の観点からは、ターゲット汎関数を式 59 を次式に変換する残存変位の二乗平均として選択することが好適である。

$$\min\left\{\sum_{i=1}^L (\Delta\varphi_i + \zeta_i)^2 + \sum_{m=1, j=1}^{R, K_x \cdot L_y \cdot M_z} \lambda_m^a a_j^{m2}\right\} \quad (60)$$

【0293】

結果が物理的に適切性のある解を定めることになることを確実にするために、ターゲット汎関数にチコノフ正則化を追加した (式 60 の最終項)。正則化係数 λ_m^a は、解に有意な

10

20

30

40

50

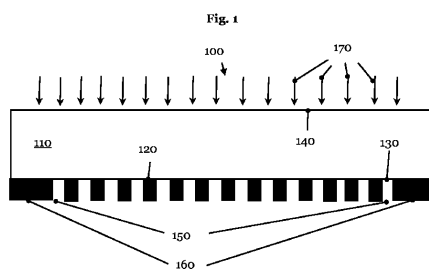
変化を導入することのないように十分に小さいものであるように選択しなければならない。

【符号の説明】

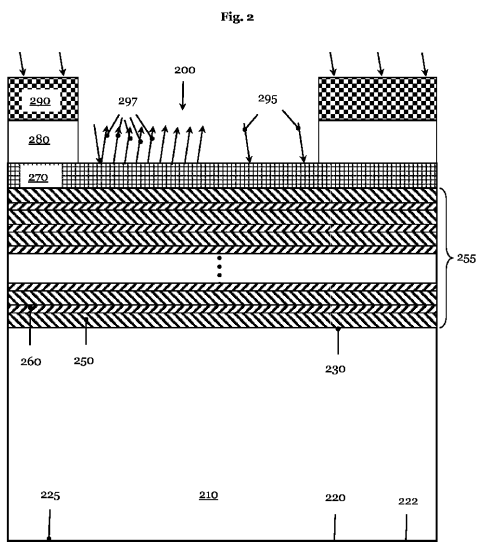
【 0 2 9 4 】

- 6 1 0 E U V マスク
- 6 4 0 対物系
- 6 5 0 レーザビーム
- 6 6 0 基板
- 6 6 5 光透過性導電コーティング

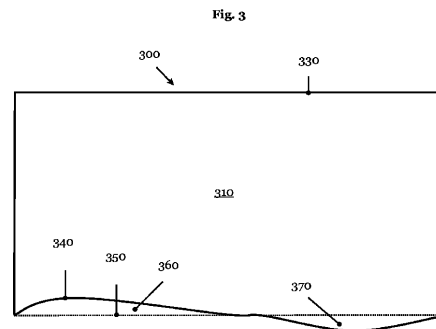
【 図 1 】



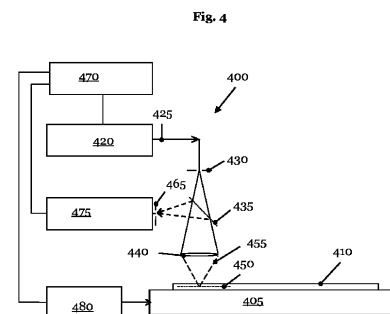
【 図 2 】



【 図 3 】

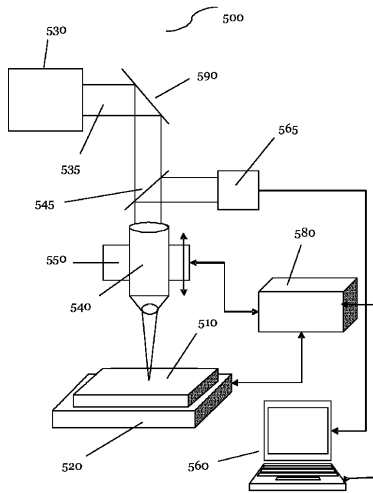


【 図 4 】



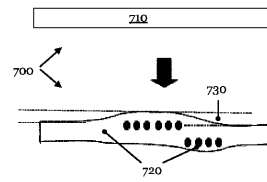
【図 5】

Fig. 5



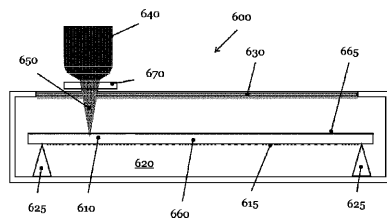
【図 7】

Fig. 7



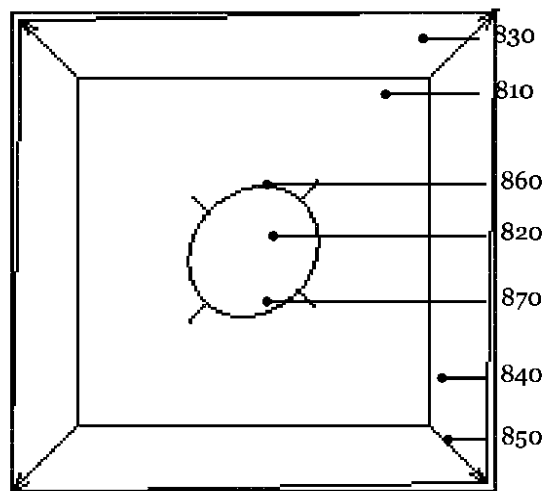
【図 6】

Fig. 6



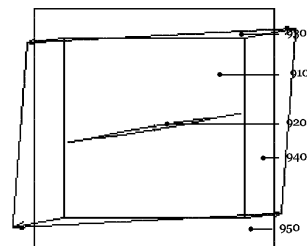
【図 8】

Fig. 8



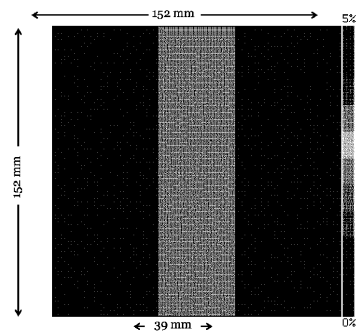
【図 9】

Fig. 9

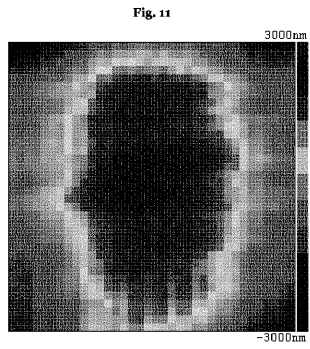


【図 10】

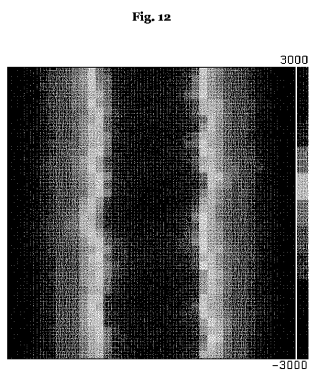
Fig. 10



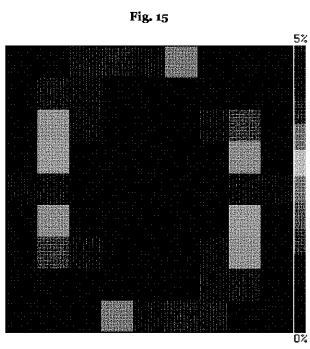
【図 1 1】



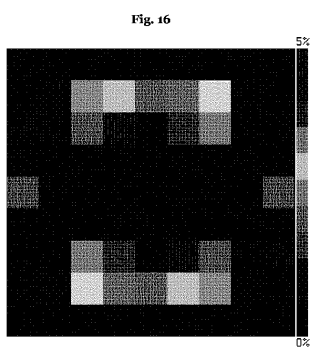
【図 1 2】



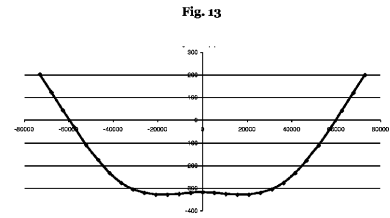
【図 1 5】



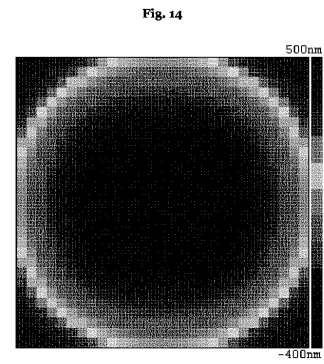
【図 1 6】



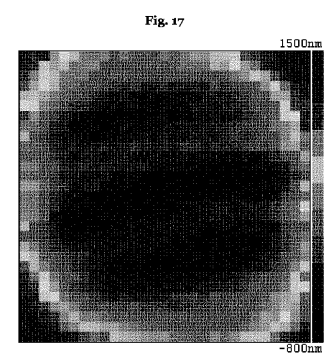
【図 1 3】



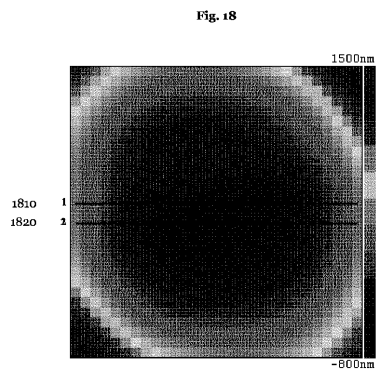
【図 1 4】



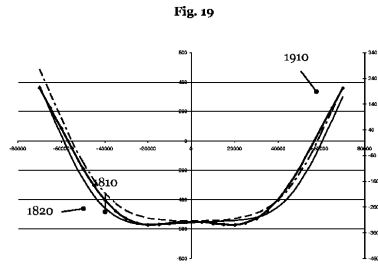
【図 1 7】



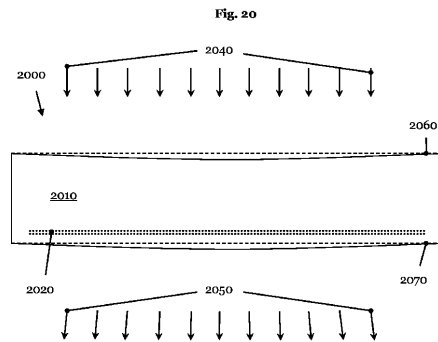
【図 1 8】



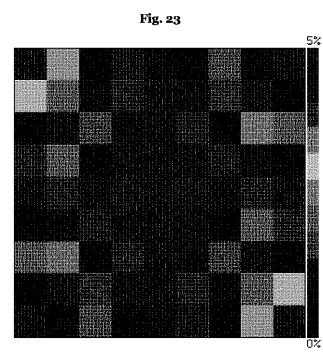
【図 19】



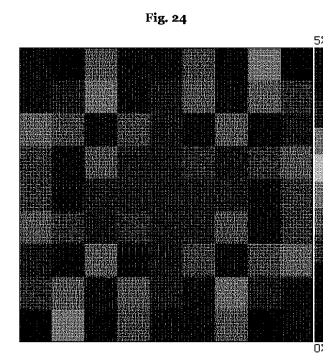
【図 20】



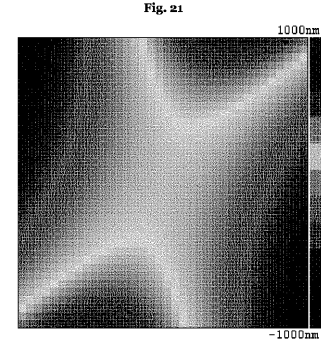
【図 23】



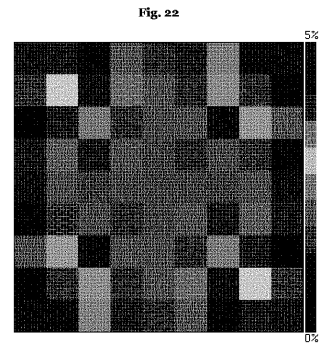
【図 24】



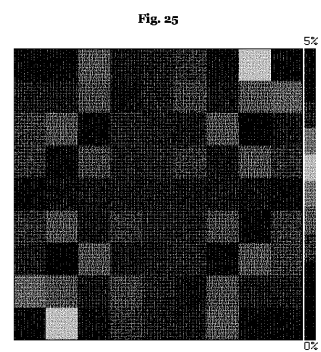
【図 21】



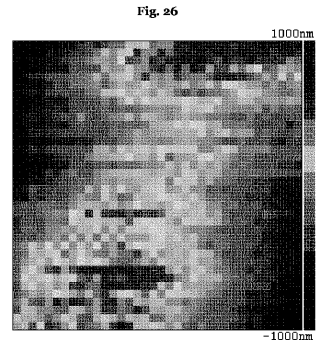
【図 22】



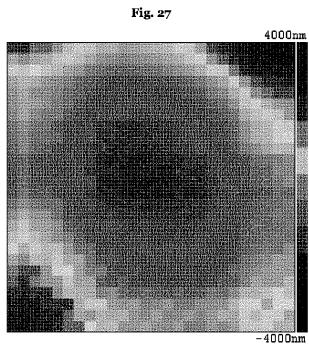
【図 25】



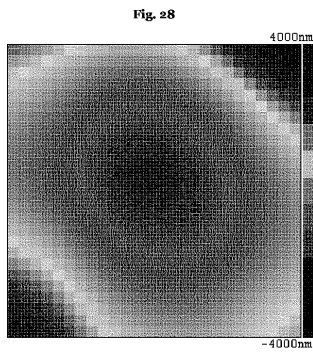
【図 26】



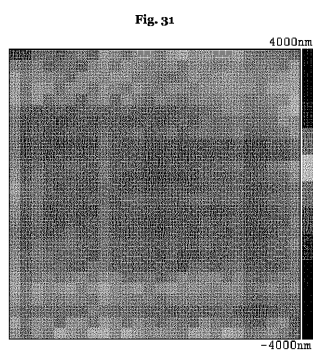
【図 27】



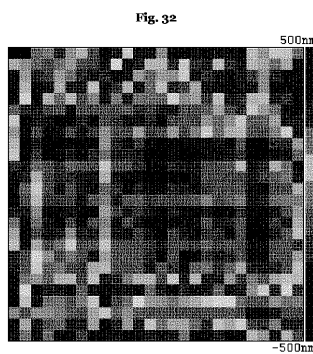
【図 28】



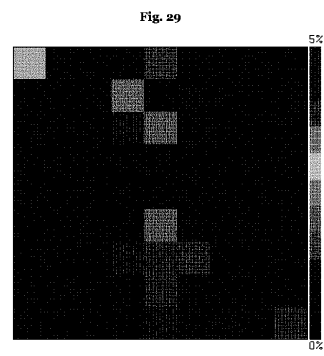
【図 31】



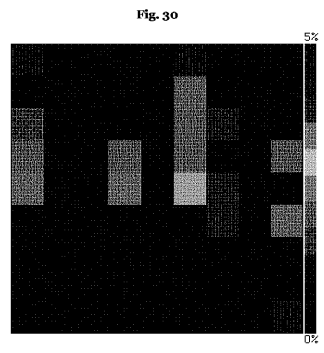
【図 32】



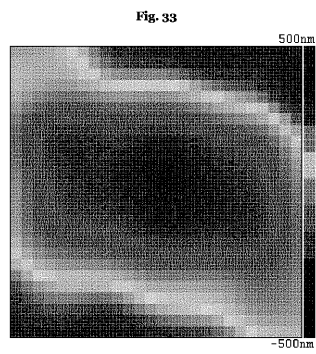
【図 29】



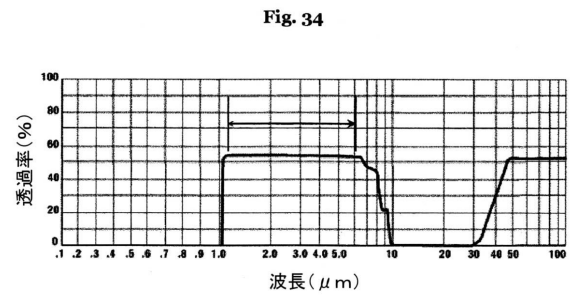
【図 30】



【図 33】

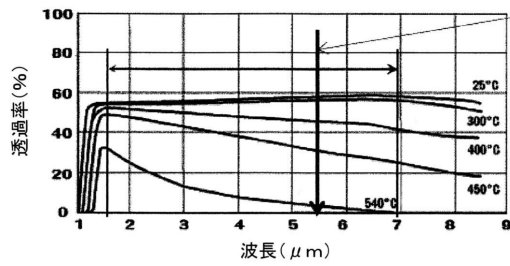


【図 34】



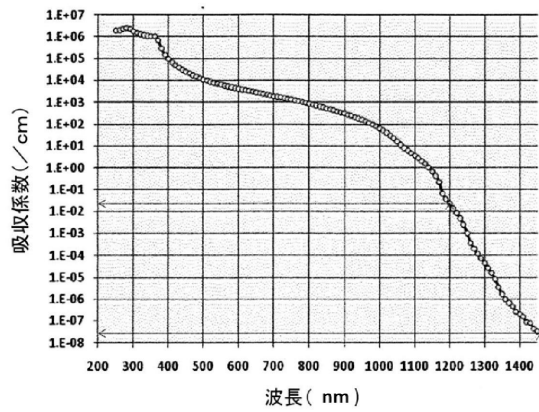
【図 35】

Fig. 35



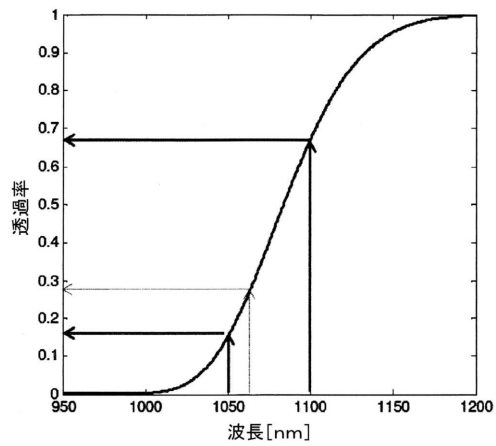
【図 36】

Fig. 36



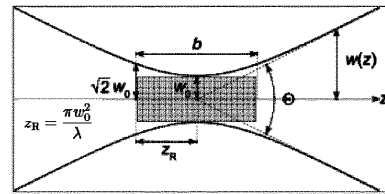
【図 40】

Fig. 40



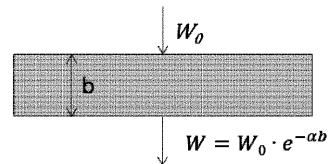
【図 37】

Fig. 37



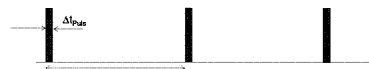
【図 38】

Fig. 38



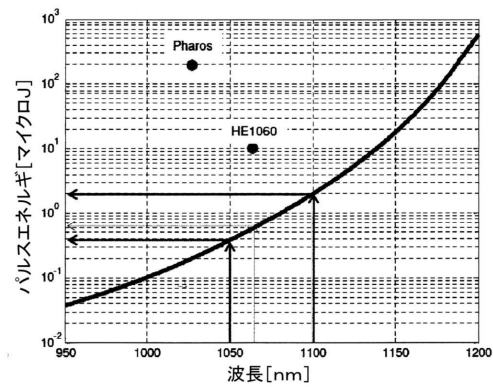
【図 39】

Fig. 39



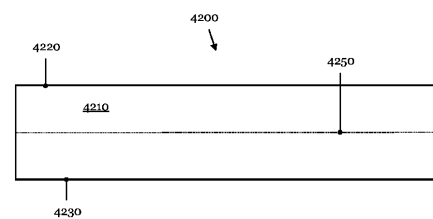
【図 41】

Fig. 41



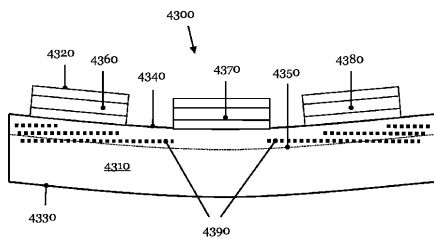
【図 42】

Fig. 42



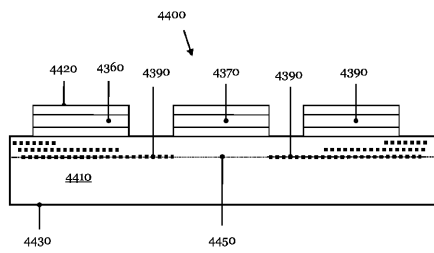
【図43】

Fig. 43



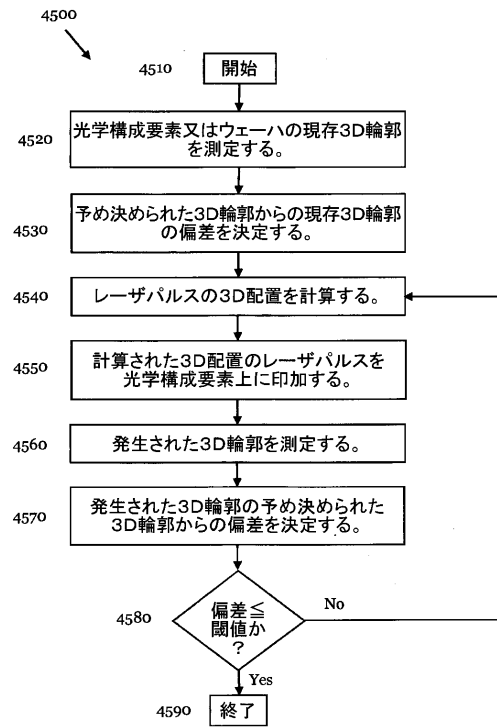
【図44】

Fig. 44



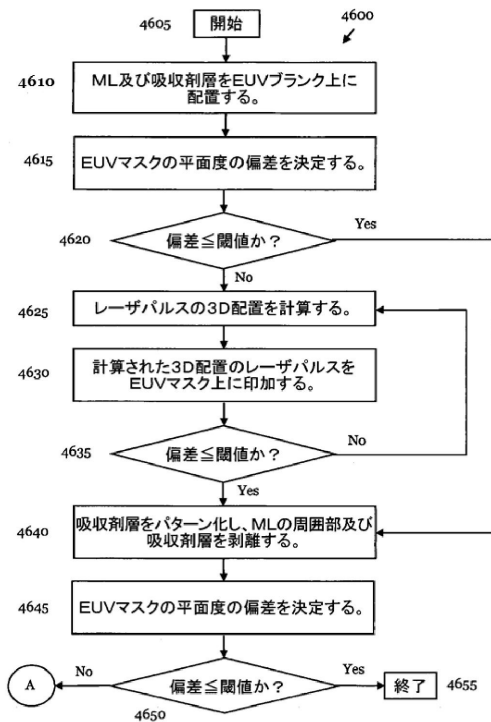
【図45】

Fig. 45



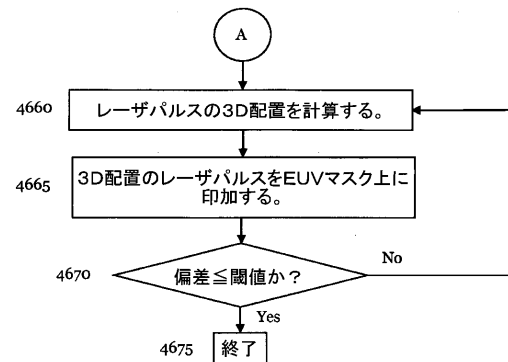
【図46a】

Fig. 46a



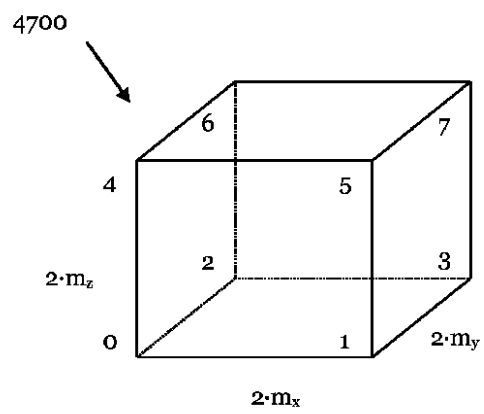
【図46b】

Fig. 46b



【 図 47 】

Fig. 47



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
G 0 3 F 1/60

(74)代理人 100094569
弁理士 田中 伸一郎

(74)代理人 100067013
弁理士 大塚 文昭

(74)代理人 100109070
弁理士 須田 洋之

(74)代理人 100120525
弁理士 近藤 直樹

(74)代理人 100158469
弁理士 大浦 博司

(72)発明者 ドミトリエフ ウラディミル
イスラエル 2 1 7 2 1 カルミエル バズ 1 0 5

(72)発明者 ゲー ベルント
アメリカ合衆国 アリゾナ州 8 5 2 5 4 スコッツデール イースト ジェナン ドライヴ 6
8 4 5

審査官 長谷 潮

(56)参考文献 米国特許出願公開第2007/0224522(US,A1)
特開2012-088712(JP,A)
国際公開第2012/103933(WO,A1)
特開2012-022323(JP,A)
米国特許出願公開第2011/0255065(US,A1)
国際公開第2013/030820(WO,A1)
特開2008-096741(JP,A)
特開2010-044287(JP,A)
特開2009-170458(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl.,DB名)

G 0 3 F 1 / 0 0 - 1 / 8 6
G 0 3 F 7 / 2 0 - 7 / 2 4
H 0 1 L 2 1 / 0 2 7
G 0 1 B 1 1 / 2 4