

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
8. September 2017 (08.09.2017)



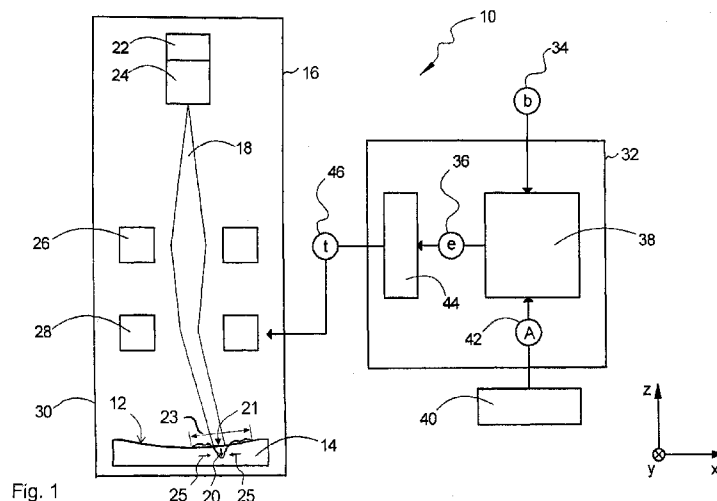
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2017/148577 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation:
G02B 1/12 (2006.01) **G03F 7/20** (2006.01)
G02B 5/08 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/000255
- (22) Internationales Anmeldedatum:
23. Februar 2017 (23.02.2017)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2016 203 591.6 4. März 2016 (04.03.2016) DE
- (71) Anmelder: **CARL ZEISS SMT GMBH** [DE/DE];
Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).
- (72) Erfinder: **PAULS, Walter**; Mühlweg 4, 73460 Hüttlingen (DE). **AHLES, Florian**; Baiersteinstrasse 39, 73432 Aalen (DE). **WEISER, Martin**; Klostersgasse 25, 74889 Sinsheim (DE).
- (74) Anwälte: **SUMMERER, Christian** et al.; Zeuner Summerer Stütz, Nußbaumstraße 8, 80336 München (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: DEVICE FOR CHANGING A SURFACE SHAPE OF AN OPTICAL ELEMENT BY MEANS OF ELECTRON IRRADIATION

(54) Bezeichnung : VORRICHTUNG ZUM VERÄNDERN EINER OBERFLÄCHENFORM EINES OPTISCHEN ELEMENTS MITTELS ELEKTRONENBESTRAHLUNG



(57) Abstract: The invention relates to a device (10) for changing the shape of a surface (12) of an optical element (14) by means of electron irradiation. The device (10) comprises an electron irradiation device (16) for irradiating electrons onto the surface (12) with a spatially resolved energy dose distribution (36) in order to produce local material compressions in the optical element (14). The device (10) further comprises a controller (32) for ascertaining a spatially resolved energy dose distribution (36) from a specified target change (34) in the surface shape of the optical element (14) by means of an optimization process with a minimization of a quality function (50) such that a difference between the target change and an actual change in the surface shape of the optical element produced on the basis of the ascertained specification is minimized. The quality function (50) contains a conversion term (42) for converting a local compaction, which describes a material compression in the region of the surface (12), into a resulting shape change of the surface (12). The conversion term (42) takes into consideration both a surface depression (20) produced by the local compaction as well as a deformation of the surface (12) produced on the basis of forces acting parallel to the surface (12). The invention further relates to a corresponding method and a projection objective for microlithography.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2017/148577 A1



CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE,
IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,
RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD,
TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz
3)

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung (10) zum Verändern einer Form einer Oberfläche (12) eines optischen Elements (14) mittels Elektronenbestrahlung. Die Vorrichtung (10) umfasst eine Elektronenbestrahlungseinrichtung (16) zum Einstrahlen von Elektronen auf die Oberfläche (12) mit einer orts aufgelösten Energiedosisverteilung (36) zur Erzeugung von lokalen Materialverdichtungen in dem optischen Element (14). Weiterhin umfasst die Vorrichtung (10) eine Steuerungseinrichtung (32) zum derartigen Ermitteln einer orts aufgelösten Energiedosisverteilung (36) aus einer vorgegebenen Solländerung (34) einer Oberflächenform des optischen Elements (14) durch Optimierung mittels einer Minimierung einer Gütefunktion (50), dass eine Differenz zwischen der Solländerung und einer aufgrund der ermittelten Vorgabe bewirkten tatsächlichen Änderung der Oberflächenform des optischen Elements minimiert wird. Die Gütefunktion (50) enthält einen Umrechnungsterm (42) zur Umrechnung einer Materialverdichtung im Bereich der Oberfläche (12) beschreibenden lokalen Kompaktierung in eine resultierende Formänderung der Oberfläche (12). Dabei berücksichtigt der Umrechnungsterm (42) sowohl eine durch die lokale Kompaktierung bedingte Oberflächenabsenkung (20) als auch eine aufgrund von parallel zur Oberfläche (12) wirkenden Kräften bedingte Deformation der Oberfläche (12). Weiterhin betrifft die Erfindung ein entsprechende Verfahren und ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie.

Vorrichtung zum Verändern einer Oberflächenform eines optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung

Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität der deutschen Patentanmeldung 10 2016 203 591.6 vom 4. März 2016. Die gesamte Offenbarung dieser Patentanmeldung wird durch Bezugnahme in die vorliegende Anmeldung aufgenommen.

Hintergrund der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Verändern einer Form einer Oberfläche eines optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie sowie eine Inspektionseinrichtung zur Inspektion eines Substrats für die Mikrolithographie, wie etwa eine Retikelinspektionseinrichtung oder eine Waferinspektionseinrichtung, jeweils mit einem mittels des vorgenannten Verfahrens gefertigten optischen Element.

Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass bei amorphen Materialien durch Bestrahlung mit Elektronen eine Materialverdichtung auftreten kann. So existiert ein Verfahren, bei dem durch den Energieeintrag des Elektronenstrahls Elektronenbindungen in der Nähe der Oberfläche umverteilt werden, wodurch eine Kompaktierung des Materials auftritt. Dieser Effekt kann zur Bearbeitung von optischen Elementen verwendet werden.

Beispielsweise wird in der WO 2011/020 655 A1 eine homogene Kompaktierung der gesamten Oberfläche eines Substrats für einen Spiegel oder eines bereits mit einer reflektierenden Beschichtung versehenen Substrats durch Bestrahlung mit Elektronen beschrieben. Die homogene Verdichtung in der Nähe der Oberfläche bewirkt eine gleichmäßige Vertiefung der Oberfläche ohne eine wesentliche Änderung der optischen Oberflächenform. Mit dieser Maßnahme kann eine

weitere Kompaktierung in Teilbereichen des Spiegels durch energiereiche Strahlung während einer Verwendung, beispielsweise in einem Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie mit EUV-Strahlung (Strahlung im extrem ultravioletten Wellenlängenbereich), verhindert werden.

5

Aus DE 10 2012 212 199 A1 ist ferner eine Oberflächenstrukturierung von mikro- oder nanostrukturierten Bauteilen aus Glas oder Keramik mittels Elektronenbestrahlung bekannt. Dazu kann ein Elektronenstrahl mit einem Durchmesser im Bereich der kleinsten zu erzeugenden Strukturen auf ausgewählte Teilbereiche
10 der Oberfläche gerichtet werden, um eine lokale Verdichtung und somit eine lokale Absenkung der Oberfläche entsprechend der gewünschten Oberflächenstrukturierung zu erzielen. Weiterhin wird eine Bearbeitung eines optischen Elements einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem Elektronenstrahl beschrieben. Durch Alterungseffekte bedingte Abbildungsfehler
15 der Projektionsbelichtungsanlage können durch eine geeignet ausgeführte Verdichtung und eine damit einhergehende Änderung der Form der optischen Oberfläche des optischen Elements kompensiert werden.

Zur Steuerung der Elektronenbestrahlung wird herkömmlicherweise zunächst eine
20 durch die Bestrahlung in das optische Element einzubringende Energiedosisverteilung bestimmt, die dazu geeignet ist, aufgrund von dadurch hervorgerufenen Materialverdichtungen eine gewünschte Korrektur der Oberflächenform des optischen Elements zu bewirken. Die Bestimmung der Energiedosisverteilung erfolgt gemäß dem Stand der Technik durch eine
25 Simulation der Wirkung der eingestrahlten Energiedosisverteilung auf eine Veränderung der Oberflächenform. Dieser Simulation liegt eine angenommene lineare Beziehung zwischen einer durch die Elektronenbestrahlung hervorgerufenen lokalen Kompaktierung und einer dadurch hervorgerufenen Oberflächenabsenkung des optischen Elements zu Grunde.

30

Ein Problem bei der Bearbeitung von Oberflächen optischer Elemente durch Elektronenbestrahlung liegt darin, dass die tatsächlich erzielte Formkorrektur der

Oberfläche von der gewünschten Formkorrektur abweicht – hervorgerufen beispielsweise durch Deformation des optischen Elements aufgrund eingetragener Materialspannungen. Diese Abweichung bereitet insbesondere aufgrund enger Toleranzvorgaben bei der Korrektur von Spiegelementen von Projektionsbelichtungsanlagen für die EUV-Lithographie Probleme.

Zugrunde liegende Aufgabe

Es ist eine Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung sowie ein Verfahren bereitzustellen, womit die vorgenannten Probleme gelöst werden, und insbesondere eine vorgegebene Solländerung einer Oberflächenform eines optischen Elements mit hoher Genauigkeit durch Elektronenbestrahlung realisiert werden kann.

Erfindungsgemäße Lösung

Die vorgenannte Aufgabe kann erfindungsgemäß beispielsweise gelöst werden mit einer Vorrichtung zum Verändern einer Form einer Oberfläche eines optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung, wobei die Vorrichtung umfasst: eine Elektronenbestrahlungseinrichtung, welche dazu konfiguriert ist, Elektronen auf die Oberfläche mit einer orts aufgelösten Energiedosisverteilung zur Erzeugung von lokalen Materialverdichtungen in dem optischen Element einzustrahlen, und eine Steuerungseinrichtung, welche dazu konfiguriert ist, aus einer vorgegebenen Solländerung einer Oberflächenform des optischen Elements eine Vorgabe für die orts aufgelöste Energiedosisverteilung zur Steuerung der Elektronenbestrahlungseinrichtung durch Optimierung mittels einer Minimierung einer Gütefunktion zu ermitteln, bei der eine Variable bzw. ein Argument gesucht wird, mit dem die Gütefunktion einen minimalen Wert aufweist. Die Vorgabe für die orts aufgelöste Energiedosisverteilung wird dabei derart ermittelt, dass eine Differenz zwischen der Solländerung und einer aufgrund der ermittelten Vorgabe bewirkten

tatsächlichen Änderung der Oberflächenform des optischen Elements minimiert wird. Die Gütefunktion enthält einen Umrechnungsterm zur Umrechnung einer Materialverdichtung im Bereich eines Flächenelements der Oberfläche beschreibenden lokalen Kompaktierung in eine resultierende Formänderung der Oberfläche des optischen Elements. Hierbei ist der Umrechnungsterm dazu konfiguriert, sowohl eine durch die lokale Kompaktierung bedingte Oberflächenabsenkung im Bereich des Flächenelements als auch eine durch die lokale Kompaktierung aufgrund von parallel zur Oberfläche wirkenden Kräften bedingte Deformation zumindest eines Abschnitts der Oberfläche, dessen Fläche ein Vielfaches der Fläche des Flächenelements beträgt, zu berücksichtigen.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass bei einer lokalen Kompaktierung im Material des optischen Elements neben der lokalen Oberflächenabsenkung auch Spannungen in den Körper des optischen Elements induziert werden, welche weit über den lokalen Bereich der Kompaktierung hinaus zu Deformationen der Oberfläche führen können. Die erfindungsgemäße Ermittlung der Vorgabe für die orts aufgelöste Energiedosisverteilung mittels einer Optimierungsrechnung unter Berücksichtigung einer Deformation des optischen Elements, welche aufgrund von parallel zur Oberfläche wirkenden Kräften bedingt ist, ermöglicht es, die vorgegebene Solländerung der Oberflächenform des optischen Elements mit einer erheblich verbesserten Genauigkeit zu realisieren.

Mit anderen Worten erfolgt die Ermittlung der orts aufgelösten Energiedosisverteilung durch Lösen eines Optimierungsproblems. Dabei wird die von einer orts aufgelösten Energiedosis abhängige Oberflächenänderung berechnet und an eine vorgegebene Solländerung angepasst. Die Optimierung verwendet als Eingabe die Solländerung und gibt als Ergebnis eine optimale orts aufgelöste Energiedosisverteilung zum Erzielen der Solländerung aus. Dabei wird der Wert einer Gütefunktion, auch Zielfunktion oder Meritfunktion bezeichnet, durch Variierung einer Variablen bzw. eines Arguments der Gütefunktion maximiert.

Unter der Energiedosis ist die Energie pro Fläche, welche mittels der Elektronenbestrahlung in das optische Element eingebracht wird, zu verstehen. Eine geeignete Einheit für die Energiedosis ist z.B. J/mm². Unter der genannten orts aufgelösten Energiedosisverteilung ist eine Verteilung $e(x,y)$ der eingebrachten Energie pro Fläche als Funktion der Oberflächenkoordinaten x, y der Oberfläche des optischen Elements zu verstehen.

Das Flächenelement kann beispielsweise ein Flächenabschnitt der Oberfläche des optischen Elements sein, welcher bei der Bestrahlung mit der Elektronenbestrahlungseinrichtung mit einer einheitlichen Energiedosis beaufschlagt wird. So kann das Flächenelement beispielsweise die Ausdehnung des Querschnitts des von der Elektronenbestrahlungseinrichtung auf die Oberfläche eingestrahlten Elektronenstrahls aufweisen.

Wie erwähnt, berücksichtigt der Umrechnungsterm nicht nur die durch die lokale Kompaktierung bedingte, unmittelbar im Bereich der Kompaktierung erfolgende Absenkung der Oberfläche des optischen Elements, sondern auch eine Deformation zumindest eines gegenüber dem von der unmittelbaren Absenkung betroffenen Bereich um ein Vielfaches größeren Abschnitts der Oberfläche, insbesondere eine Deformation der gesamten Oberfläche des optischen Elements. Diese Deformation ist der Tatsache geschuldet, dass eine durch die Elektronenbestrahlung ausgelöste Kompaktierung eine Materialverdichtung in allen Raumrichtungen beschreibt. Die Materialverdichtung in parallel zur Oberfläche verlaufenden Richtungen erzeugt Spannungen im optischen Element, welche dann zu der genannten Deformation führen.

Der Umrechnungsterm kann insbesondere ein linearer Operator A sein, welcher nachfolgend auch als Kompaktierungssensitivitätsoperator bezeichnet wird. Zwischen der resultierenden Formänderung $h(x,y)$ der gesamten Oberfläche und einer orts aufgelösten Kompaktierung $g(x,y)$ wird in diesem Fall der folgende lineare Zusammenhang angenommen:

$$Ag = h$$

Mit diesem Zusammenhang und der Solländerung b der Oberflächenform kann als Gütefunktion beispielsweise der folgende Ausdruck verwendet werden:

$$\|Ag - b\|^2$$

Das Optimierungsproblem ergibt sich dann exemplarisch zu:

5 $\|Ag - b\|^2 \rightarrow \min$

Auf der Grundlage der von der Steuerungseinrichtung bestimmten Vorgabe $e(x, y)$ der Energiedosisverteilung kann beispielsweise die jeweilige Verweilzeit des mittels der Elektronenbestrahlungseinrichtung auf die Oberfläche des optischen Elements eingestrahlten Elektronenstrahls an den einzelnen Orten der Oberfläche
10 bestimmt werden. Alternativ ist auch eine Bestimmung der Intensität eines intensitätsgesteuerten Elektronenstrahls für einzelne Orte der Oberfläche möglich. Die Intensität beschreibt die pro Zeiteinheit auf ein Flächenelement auftreffende Anzahl von Elektronen.

15 Gemäß einer Ausführungsform nach der Erfindung ist die lokale Kompaktierung in der Gütefunktion als Funktion der Energiedosisverteilung beschrieben und die Steuerungseinrichtung dazu konfiguriert, zur Optimierung der Gütefunktion die Energiedosisverteilung zu variieren. Somit ist in diesem Fall die Energiedosisverteilung die der Optimierung zugrunde liegende Variable der Gütefunktion.
20 Dabei wird nach einem Ausführungsbeispiel die Kompaktierung $g(x, y)$ in der Gütefunktion wie folgt als Funktion der Energiedosisverteilung $e(x, y)$ beschrieben:

$$g(x, y) = c_{cp} e^{\alpha}(x, y)$$

Hierbei sind die Parameter c_{cp} und α Konstanten, die von der Elektronenenergie, der Schichtzusammensetzung und den Schichtdicken des optischen Elements
25 abhängen. Diese Beziehung zwischen der Kompaktierung $g(x, y)$ und der Energiedosisverteilung $e(x, y)$ lässt sich rechnerisch einfach umsetzen.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform nach der Erfindung ist die lokale Kompaktierung in der Gütefunktion mittels einer Potenzreihenentwicklung beschrieben, bei der die Energiedosisverteilung in mindestens zwei unterschiedlichen Potenzen als Basissystem fungiert. Die lokale Kompaktierung $g(x,y)$ kann in Abhängigkeit von der Energiedosisverteilung $e(x,y)$ und mit den Entwicklungskoeffizienten a_i auch folgendermaßen dargestellt werden:

$$g(e) = a_1 e + a_2 e^2 + a_3 e^3 + \dots + a_M e^M$$

Insbesondere wird bei einer bevorzugten Ausführungsform die lokale Kompaktierung $g(x,y)$ wie folgt beschrieben:

$$g = a_1 e + a_2 e^2$$

wobei e die Energiedosisverteilung und a_1 sowie a_2 Entwicklungskoeffizienten der Potenzreihenentwicklung sind. Durch die Verwendung einer Potenzreihenentwicklung oder eines Polynoms lässt sich je nach Anzahl der verwendeten Potenzen eine erforderliche Genauigkeit der Beschreibung der lokalen Kompaktierung $g(x,y)$ durch die Energiedosisverteilung $e(x,y)$ erzielen.

Bei einer erfindungsgemäßen Ausführungsform ist die Steuerungseinrichtung dazu konfiguriert, zur Optimierung des Wertes der Gütefunktion die lokale Kompaktierung zu variieren. Die lokale Kompaktierung ist damit die der Optimierung zugrunde liegende Variable der Gütefunktion. Dabei kann die lokale Kompaktierung beispielsweise in Gestalt der vorstehend erwähnten ortsaufgelösten Kompaktierung $g(x,y)$ beschrieben sein.

Gemäß einer Ausführungsform nach der Erfindung ist der Umrechnungsterm ein Integraloperator. Zwischen der resultierenden Formänderung $h(x,y)$ und einer ortsaufgelösten Kompaktierung $g(x,y)$ kann der bereits weiter oben beschriebene lineare Zusammenhang $Ag = h$ angenommen werden. Bei diesem Ausführungsbeispiel gilt somit:

$$h(x, y) = \int_{\tilde{\Omega} \subset \mathbb{R}^2} A(x, y, x', y') g(x', y') dx' dy'$$

wobei $A(x, y, x', y')$ der dem linearen Operator A zugehörige Integralkern und $\tilde{\Omega} \subset \mathbb{R}^2$ die bestrahlte Fläche ist.

5

Gemäß einer Ausführungsform umfasst die Steuerungseinrichtung eine Ermittlungseinrichtung, welche dazu konfiguriert ist, den Umrechnungsterm mittels der Methode der finiten Elemente zu ermitteln. Die Methode der finiten Elemente, auch als Finite-Elemente-Methode (FEM) bezeichnet, ist ein dem
10 Fachmann bekanntes numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen. Die FEM kann bei Festkörpern zur Berechnung von Verformungen durch Energieeintrag verwendet werden. Auch die Auswirkungen einer Mehrzahl von lokalen Kompaktierungen an verschiedenen Orten der Oberfläche auf die Form der gesamten Oberfläche und somit der entsprechende
15 Umrechnungsterm lassen sich mittels FEM ermitteln.

Bei einer weiteren Ausführungsform ist die Ermittlungseinrichtung dazu konfiguriert, den Umrechnungsterm unter Berücksichtigung der Geometrie des optischen Elements und/oder eines Einsatzortes des optischen Elements in einer
20 optischen Anordnung zu ermitteln. Die Geometrie, der Einsatzort oder beide Größen sind somit Eingangsgrößen für die Ermittlungseinrichtung. Insbesondere kann die Form der optisch wirksamen Fläche, die Form des Rands um die optisch wirksame Fläche oder auch die gesamte dreidimensionale Gestalt des optischen Elements berücksichtigt werden. Weiterhin können jeweils von einem Einsatzort
25 abhängige Starrkörperfreiheitsgrade des optischen Elements in die Ermittlung des Umrechnungsterms eingehen. Bei der optischen Anordnung, bezüglich der ein Einsatzort berücksichtigt wird, kann es sich z.B. um ein optisches System einer Projektionsbelichtungsanlage für die Lithographie, insbesondere um ein Projektionsobjektiv einer solchen Belichtungsanlage handeln.

30

Ferner ist bei einer erfindungsgemäßen Ausführungsform die Ermittlungseinrichtung dazu konfiguriert, die Ermittlung des Umrechnungsterms auf Grundlage einer die Kompaktierung orts aufgelöst über die Oberfläche des optischen Elements beschreibenden Kompaktierungsverteilung durchzuführen.

5 Dabei wird die Kompaktierungsverteilung mittels einer Polynombasis dargestellt. Insbesondere können Tschebyschow-Polynome als Basissystem zur Darstellung der Kompaktierungsverteilung dienen. Ein Basisfunktionssystem aus Tschebyschow-Polynome eignet sich besonders für ungefähr rechteckige Oberflächen. Alternativ ist auch eine Verwendung von B-Splines (Basis-Splines) als
10 Basisfunktionen zur Darstellung der Kompaktierungsverteilung möglich.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform umfasst die Vorrichtung eine Ermittlungseinrichtung, welche dazu konfiguriert ist, den Umrechnungsterm durch Bestimmung der resultierenden Formänderung der Oberfläche des optischen
15 Elements auf Grundlage einer die Kompaktierung orts aufgelöst über die Oberfläche des optischen Elements beschreibenden Kompaktierungsverteilung, welche mittels einer Polynombasis dargestellt ist, sowie Bestimmung eines linearen Operators als den Umrechnungsterm aus der resultierenden Formänderung zu ermitteln. Bei der resultierenden Formänderung kann es sich
20 um die nachstehend in diesem Text als resultierende Gesamtänderung $h(x,y)$ bezeichnete Größe, bei der Kompaktierungsverteilung um die Größe $g(x,y)$, bei der Polynombasis um die Tschebyschow-Polynome $T_{nm}(x,y)$ bzw. um die Kombinationen ΨT_{nm} aus Tschebyschow-Polynomen $T_{nm}(x,y)$ und einer Abschneidefunktion Ψ , sowie beim linearen Operator um die Größe A handeln.

25 Die vorgenannte Aufgabe kann weiterhin beispielsweise gelöst werden mit einem Verfahren zum Verändern einer Form einer Oberfläche eines optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung. Das Verfahren umfasst ein Ermitteln einer Vorgabe für eine orts aufgelöste Energiedosisverteilung für die Elektronenbestrahlung aus
30 einer vorgegebenen Solländerung einer Oberflächenform des optischen Elements durch Optimierung mittels einer Minimierung einer Gütefunktion, derart dass eine Differenz zwischen der Solländerung und einer aufgrund der ermittelten Vorgabe

bewirkten tatsächlichen Änderung der Oberflächenform des optischen Elements minimiert wird. Die Gütefunktion enthält einen Umrechnungsterm zur Umrechnung einer lokalen Kompaktierung in eine resultierende Formänderung der Oberfläche des optischen Elements, wobei die lokale Kompaktierung eine durch Elektroneneinstrahlung erzeugte Materialverdichtung im Bereich eines Flächenelements der Oberfläche beschreibt. Dabei ist der Umrechnungsterm dazu konfiguriert, sowohl eine durch die lokale Kompaktierung bedingte Oberflächenabsenkung im Bereich des Flächenelements als auch eine durch die lokale Kompaktierung aufgrund von parallel zur Oberfläche wirkenden Kräften bedingte Deformation zumindest eines Abschnitts der Oberfläche, dessen Fläche ein Vielfaches der Fläche des Flächenelements beträgt, zu berücksichtigen. Weiterhin umfasst das Verfahren ein Einstrahlen von Elektronen auf die Oberfläche des optischen Elements mit einer der ermittelten Vorgabe entsprechenden orts aufgelösten Energiedosisverteilung zur Erzeugung der lokalen Kompaktierung im optischen Element.

Analog zur erfindungsgemäßen Vorrichtung berücksichtigt der Umrechnungsterm in der Gütefunktion nicht nur die durch die lokale Kompaktierung verursachte lokale Oberflächenabsenkung, sondern auch eine durch Spannungen bewirkte Deformation eines Teilabschnitts der Oberfläche oder der gesamten Oberfläche. Durch diese Maßnahme wird mit einer Optimierung mittels der Gütefunktion eine orts aufgelöste Energiedosisverteilung ermittelt, mit welcher eine hochgenaue Änderung der Oberfläche durch Elektronenbestrahlung ermöglicht wird.

Gemäß einer Ausführungsform nach der Erfindung wird die lokale Kompaktierung in der Gütefunktion als Funktion der Energiedosisverteilung beschrieben und die Energiedosisverteilung bei der Optimierung mittels der Gütefunktion variiert.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform wird die lokale Kompaktierung bei der Optimierung mittels der Gütefunktion variiert. Bei einer weiteren Ausführungsform gemäß der Erfindung wird der Umrechnungsterm mittels der Methode der finiten Elemente ermittelt.

Gemäß einer Ausführungsform wird eine die Kompaktierung orts aufgelöst über die Oberfläche des optischen Elements darstellende Kompaktierungsverteilung mittels einer Polynombasis dargestellt und der Umrechnungsterm auf Grundlage der mittels der Polynombasis dargestellten Kompaktierungsverteilung ermittelt. Als Polynombasis zur Darstellung der Kompaktierungsverteilung bzw. der orts aufgelösten lokalen Kompaktierung kann beispielsweise ein Basisfunktions-system aus Tschebyschow-Polynomen oder B-Splines (Basis-Splines) verwendet werden.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform wird der Umrechnungsterm wie folgt ermittelt: Darstellen einer die Kompaktierung orts aufgelöst über die Oberfläche des optischen Elements beschreibenden Kompaktierungsverteilung mittels einer Polynombasis, Bestimmen der resultierenden Formänderung der Oberfläche des optischen Elements auf Grundlage der mittels der Polynombasis dargestellten Kompaktierungsverteilung, sowie Bestimmen eines linearen Operators als den Umrechnungsterm aus der resultierenden Formänderung.

Bei einer Ausführungsform nach der Erfindung ist das optische Element Teil eines Projektionsobjektivs für die Mikrolithographie. Insbesondere kann das optische Element als Linse oder als Spiegel ausgelegt sein. In einer weiteren Ausführungsform ist das optische Element Teil eines Beleuchtungssystems einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie. Ferner kann das optische Element auch diffraktive Strukturen aufweisen.

Gemäß einer Ausführungsform ist das optische Element ein Spiegel zur Reflexion extrem ultravioletter Strahlung. Der Spiegel ist somit zur Reflexion elektromagnetischer Strahlung mit einer Wellenlänge kleiner als 100 nm, insbesondere einer Wellenlänge von ungefähr 13,5 nm oder ungefähr 6,7 nm ausgelegt. Dazu ist der Spiegel mit einer entsprechend ausgebildeten reflektiven Beschichtung versehen. Eine Änderung der Oberflächenform kann gemäß dieser Ausführungsform sowohl an dem fertiggestellten Spiegel oder an einem temporär

mit einer leitfähigen Beschichtung versehenen Substrat vorgenommen werden und ermöglicht eine Änderung der Oberflächenform in einer für den EUV-Bereich ausreichenden Genauigkeit.

- 5 Ferner wird erfindungsgemäß ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie bereitgestellt. Das Projektionsobjektiv umfasst mindestens ein optisches Element, welches mittels einem der vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verfahrens oder der erfindungsgemäßen Vorrichtung angefertigt wurde. Insbesondere kann das mindestens eine optische Element ein
- 10 Spiegel zur Reflexion extrem ultravioletter Strahlung sein. Das Projektionsobjektiv kann so für den Einsatz in der EUV-Mikrolithographie ausgebildet sein. Ebenso kann auch ein Beleuchtungssystem für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie bereitgestellt werden. Dabei enthält das Beleuchtungssystem mindestens ein optisches Element, welches mittels einem der vorstehend
- 15 beschriebenen Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verfahrens oder der erfindungsgemäßen Vorrichtung angefertigt wurde.

- Ferner wird erfindungsgemäß eine Inspektionseinrichtung zur Inspektion eines Substrats für die Mikrolithographie bereitgestellt. Bei dem Substrat kann es sich
- 20 um ein Retikel oder um einen Wafer handeln. Entsprechend kann damit die Inspektionseinrichtung als Retikelinspektionseinrichtung oder als Waferinspektionseinrichtung konfiguriert sein. Die Inspektionseinrichtung umfasst mindestens ein optisches Element, welches mittels einem der vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verfahrens oder
- 25 der erfindungsgemäßen Vorrichtung angefertigt wurde. Das derart angefertigte optische Element kann insbesondere Teil eines Abbildungsobjektivs der Inspektionseinrichtung sein.

- Die bezüglich der vorstehend aufgeführten Ausführungsformen, Ausführungsbeispiele bzw. Ausführungsvarianten, etc. der erfindungsgemäßen Vorrichtung angegebenen Merkmale können entsprechend auf das erfindungsgemäße Verfahren übertragen werden und umgekehrt. Diese und andere Merkmale der
- 30

erfindungsgemäßen Ausführungsformen werden in der Figurenbeschreibung und den Ansprüchen erläutert. Die einzelnen Merkmale können entweder separat oder in Kombination als Ausführungsformen der Erfindung verwirklicht werden. Weiterhin können sie vorteilhafte Ausführungsformen beschreiben, die selbstständig schutzfähig sind und deren Schutz ggf. erst während oder nach Anhängigkeit der Anmeldung beansprucht wird.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

Die vorstehenden, sowie weitere vorteilhafte Merkmale der Erfindung werden in der nachfolgenden detaillierten Beschreibung beispielhafter erfindungsgemäßer Ausführungsformen unter Bezugnahme auf die beigefügten schematischen Zeichnungen veranschaulicht. Es zeigt:

Fig. 1 ein Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Vorrichtung zum Verändern einer Form einer Oberfläche eines optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung in einer schematischen Veranschaulichung,

Fig. 2 eine Veranschaulichung des Aufbaus und der Funktionsweise einer Steuereinrichtung der Vorrichtung gemäß Fig. 1,

Fig. 3 eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem Projektionsobjektiv, welches ein mittels der Vorrichtung gemäß Fig. 1 gefertigtes optisches Element umfasst, sowie

Fig. 4 eine Inspektionseinrichtung zur Inspektion eines Substrats für die Mikrolithographie, welches ein mittels der Vorrichtung gemäß Fig. 1 gefertigtes optisches Element umfasst.

Detaillierte Beschreibung erfindungsgemäßer Ausführungsbeispiele

In den nachstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen bzw. Ausführungsformen oder Ausführungsvarianten sind funktionell oder strukturell einander
5 ähnliche Elemente soweit wie möglich mit den gleichen oder ähnlichen Bezugszeichen versehen. Daher sollte zum Verständnis der Merkmale der einzelnen Elemente eines bestimmten Ausführungsbeispiels auf die Beschreibung anderer Ausführungsbeispiele oder die allgemeine Beschreibung der Erfindung Bezug genommen werden.

10 Zur Erleichterung der Beschreibung ist in der Zeichnung ein kartesisches xyz-Koordinatensystem angegeben, aus dem sich die jeweilige Lagebeziehung der in den Figuren dargestellten Komponenten ergibt. In Fig. 1 verläuft die y-Richtung senkrecht zur Zeichenebene in diese hinein, die x-Richtung nach rechts und die z-
15 Richtung nach oben.

Im Folgenden werden Komponenten und Funktionsweisen von Ausführungsbeispielen der erfindungsgemäßen Vorrichtung zusammen mit entsprechenden Ausführungsbeispielen des erfindungsgemäßen Verfahrens beschrieben.

20 In Fig. 1 wird ein Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung 10 zum Verändern einer Form einer Oberfläche 12 eines optischen Elements 14 mittels Elektronenbestrahlung schematisch dargestellt. Als optisches Element 14 ist exemplarisch ein Spiegel für den EUV-Wellenlängenbereich, d.h. für elektromagnetische
25 Strahlung mit einer Wellenlänge kleiner als 100 nm, insbesondere einer Wellenlänge von etwa 13,5 nm oder etwa 6,7 nm vorgesehen. Dabei kann es sich um einen Spiegel für ein Projektionsobjektiv oder für ein Maskenbeleuchtungssystem einer Projektionsbelichtungsanlage für EUV-Mikrolithographie handeln, wie nachstehend unter Bezugnahme auf Fig. 3 veranschaulicht. Die Vorrichtung
30 10 eignet sich aber auch zur hochgenauen Oberflächenformherstellung oder Oberflächenformänderung bei anderen optischen Elementen, wie beispielsweise

Spiegel für andere Wellenlängenbereiche, Linsen oder optische Elemente mit diffraktiven Strukturen.

Die Vorrichtung 10 enthält eine Elektronenbestrahlungseinrichtung 16 zur Erzeugung eines auf auswählbare Orte der Oberfläche 12 gerichteten und gebündelten Elektronenstrahls 18. Der Elektronenstrahl 18 ist insbesondere energetisch derart ausgebildet, dass je nach Energiedosis eine mehr oder weniger stark ausgeprägte lokale Kompaktierung des Materials des optischen Elements 14 in der Nähe der Oberfläche 12 bewirkt wird. Als Energiedosis ist die Energie pro Fläche zu verstehen, welche durch den Elektronenstrahl 18 in das optische Element 14 eingebracht wird. Die Energiedosis ist somit insbesondere von der Verweildauer des Elektronenstrahls am ausgewählten Ort und von dessen Intensität abhängig.

Die lokale Kompaktierung bewirkt eine lokale Oberflächenabsenkung 20 im Bereich eines Flächenelements 21. Die Oberflächenabsenkung 20 ist in Fig. 1 zur Veranschaulichung stark überzeichnet dargestellt. Eine Kompaktierung tritt insbesondere in amorphen Materialien durch eine Umverteilung von Elektronenbindungen auf. Dabei erfolgt die lokale Kompaktierung in allen Raumrichtungen, d.h. es findet nicht nur eine lokale Oberflächenabsenkung 20 im Bereich des Flächenelements 21 in negativer z-Richtung sondern auch eine Kompaktierung parallel zur Oberfläche 12, also in etwa entlang der x/y-Ebene statt. Dabei entstehen parallel zur Oberfläche 12 wirkende Kräfte 25, wodurch Spannungen in das optische Element 14 induziert werden. Diese Spannungen können eine Verformung eines gegenüber dem von der lokalen Kompaktierung betroffenen Flächenelement 21 wesentlich größeren Oberflächenabschnitts 23 bewirken. Der Oberflächenabschnitt 23 kann einen Teil der Oberfläche 12 oder auch die gesamten Oberfläche 12 umfassen.

Zur Erzeugung des Elektronenstrahls 18 enthält die Elektronenbestrahlungseinrichtung 16 eine Elektronenquelle 22 und eine Beschleunigungseinheit 24. Als Elektronenquelle 22 kann beispielsweise eine Glühkathode, eine Kristallkathode

oder eine Feldemissions-Kathode verwendet werden. Die Beschleunigungseinheit 24 beschleunigt und bündelt die von der Elektronenquelle 22 emittierten Elektronen. Dazu kann die Beschleunigungseinheit 24 eine Anode mit einem gegenüber der Elektronenquelle 22 hohen positiven elektrostatischen Potential und einer kleinen Austrittsöffnung für die beschleunigten Elektronen aufweisen. 5 Zum Bündeln und zum Einstellen der Intensität des Elektronenstrahls 18 enthält die Beschleunigungseinheit 24 ferner eine Steuerelektrode, beispielsweise einen Wehneltzylinder. Die Intensität bzw. der Strahlstrom gibt die Anzahl der Elektronen an, welche pro Zeiteinheit durch eine senkrecht zum Elektronenstrahl gedachte Fläche treten. 10

Zum Fokussieren des von der Beschleunigungseinheit 24 kommenden Elektronenstrahls 18 umfasst die Elektronenbestrahlungseinrichtung 16 weiterhin eine Fokussierungseinheit 26 mit geeignet ausgebildeten elektrischen oder 15 magnetischen Komponenten.

Mit einer Ablenkungseinheit 28 der Elektronenbestrahlungseinrichtung 16 lässt sich der Elektronenstrahl 18 sowohl in x- als auch in y-Richtung ablenken. Hierfür enthält die Ablenkungseinheit 28 ebenfalls geeignet ausgebildete elektrische oder 20 magnetische Komponenten. Je nach Einstellung der Ablenkungseinheit 28 trifft der Elektronenstrahl 18 an einem bestimmten Ort (x,y) auf die Oberfläche 12 des optischen Elements 14. Auf diese Weise lässt sich nacheinander eine Vielzahl von verschiedenen Orten der Oberfläche 12 bestrahlen und somit eine orts aufgelöste Energiedosisverteilung über die Oberfläche 12 erzielen. Unter der 25 orts aufgelösten Energiedosisverteilung ist hier eine Verteilung der eingebrachten Energie $e(x,y)$ pro Fläche als Funktion der Oberflächenkoordinaten x, y der Oberfläche 12 des optischen Elements 14 zu verstehen. Dabei kann die Bestrahlung beispielsweise rasterartig oder auch kontinuierlich über die gesamte Oberfläche erfolgen. Auch ist eine unregelmäßige oder regelmäßige Anordnung 30 verschiedener zu bestrahlender Orte, etwa in Zeilen, Kreisen, Ellipsen oder dergleichen möglich.

Zur Vermeidung einer Absorption der Elektronen des Elektronenstrahls 18 durch Luft weist die Elektronenbestrahlungseinrichtung 16 ferner eine Vakuumkammer 30 auf, in welcher die Elektronenquelle 22, die Beschleunigungseinheit 24, die Fokussierungseinheit 26, die Ablenkeinheit 28 und das optische Element 14 oder
5 zumindest die Oberfläche 12 des optischen Elements 14 angeordnet sind.

Die Vorrichtung 10 enthält weiterhin eine Steuerungseinrichtung 32 zum Steuern der Elektronenbestrahlungseinrichtung 16. Die Steuerungseinrichtung 32 ist insbesondere dazu ausgebildet, aus einer vorgegebenen Solländerung 34 für die
10 Oberfläche 12 des optischen Elements 14 eine orts aufgelöste Energiedosisverteilung 36 für die Bestrahlung der Oberfläche 12 mit dem Elektronenstrahl 18 zu ermitteln, mit welcher die Solländerung 34 sehr genau erzielt wird.

Hierfür enthält die Steuerungseinrichtung 32 ein Optimierungsmodul 38 zum
15 Optimieren des Wertes einer Gütefunktion. Weiterhin enthält die Vorrichtung 10 eine Ermittlungseinrichtung 40 zum Ermitteln eines Umrechnungsterms 42. Der Umrechnungsterm 42 wird in der Gütefunktion zum Umrechnen einer lokalen Kompaktierung in eine resultierende Formänderung der Oberfläche 12 unter Berücksichtigung der lokalen Oberflächenabsenkung 20 und auch der durch die
20 parallel zur Oberfläche 12 wirkenden Kräfte 25 verursachten Deformation der Oberfläche 12 verwendet. Der Aufbau und die Funktionsweise des Optimierungsmoduls 38 und der Ermittlungseinrichtung 40 werden weiter unten näher erläutert.

Weiterhin umfasst die Steuerungseinrichtung 32 ein Umwandlungsmodul 44. In
25 diesem Ausführungsbeispiel wandelt das Umwandlungsmodul 44 die ermittelte orts aufgelöste Energiedosisverteilung 36 in eine orts aufgelöste Verweildauer 46 des Elektronenstrahls 18 bei bestimmten Oberflächenkoordinaten x , y um. Die orts abhängige Verweildauer 46 wird anschließend zur entsprechenden Ein-
30 stellung der Ablenkeinheit 28 verwendet. Auf diese Weise wird die ermittelte Energiedosisverteilung 36 auf der Oberfläche 12 und damit eine entsprechende,

hochgenaue Formänderung der Oberfläche 12 des optischen Elements 14 erreicht.

In alternativen Ausführungsbeispielen erzeugt das Umwandlungsmodul 44 an-
stelle oder zusätzlich zur Verweildauer aus der ermittelten ortsabhängigen
Energiedosisverteilung 36 eine orts aufgelöste Intensität des Elektronenstrahls 18.
Auch kann zusätzlich oder alternativ eine ortsabhängige Einstellung der
Fokussierung mittels der Fokussierungseinheit 26 oder der Beschleunigung bzw.
der kinetischen Energie der Elektronen mittels der Beschleunigungseinheit 24
erfolgen.

In Fig. 2 wird der Aufbau und die Funktionsweise der Steuerungseinrichtung 32
mit dem Optimierungsmodul 38 detaillierter veranschaulicht. Zur Bestimmung
einer mit $e(x,y)$ beschriebenen geeigneten orts aufgelösten Energiedosisverteilung
36 für eine mit $b(x,y)$ beschriebene vorgegebene Solländerung 34 der Oberfläche
12 führt das Optimierungsmodul 38 mit einem Optimierungsalgorithmus 48 eine
Optimierung mittels einer Gütefunktion 50, auch Meritfunktion oder Zielfunktion
genannt, aus. In diesem Ausführungsbeispiel wird eine ortsabhängige
Kompaktierung $g(x,y)$ und somit indirekt eine ortsabhängige Energiedosis-
verteilung $e(x,y)$ gesucht, so dass die Gütefunktion 50 einen minimalen Wert
ergibt. Dabei erfolgt mit Hilfe des Umrechnungsterms 42 insbesondere auch eine
Berücksichtigung von nicht lokalen Spannungsverformungen der Oberfläche 12
durch lokale Kompaktierungen.

Im Folgenden werden mehrere Ausführungsformen einer Gütefunktion 50
beschrieben. Da lokale Kompaktierungen auf wesentlich kleineren Längenskalen
als die Längenskalen der Oberfläche 12 stattfinden, kann zwischen der
Kompaktierung $g(x,y)$ und der resultierenden Gesamtänderung $h(x,y)$ der
Oberfläche 12 ein linearer Zusammenhang angenommen werden:

$$Ag = h \quad (1)$$

Hierbei wird der Umrechnungsterm 42 als linearer Operator A bezeichnet. Der lineare Operator A ist in diesem Ausführungsbeispiel ein Integraloperator:

$$h(x, y) = \int_{\tilde{\Omega} \subset \mathbb{R}^2} A(x, y, x', y') g(x', y') dx' dy' \quad , \quad (2)$$

5

wobei $A(x, y, x', y')$ der dem linearen Operator A zugehörige Integralkern und $\tilde{\Omega} \subset \mathbb{R}^2$ die bestrahlte Fläche ist. Die bestrahlte Fläche $\tilde{\Omega}$ ist wegen des Randauslaufs etwas größer als der Footprint bzw. Basisfläche Ω der Oberfläche 12. In alternativen Ausführungsbeispielen kann auch ein nicht linearer Operator A

10

verwendet werden.

Unter Verwendung von Gleichung (1) und Solländerung $b(x, y)$ der Form der Oberfläche 12 lautet eine Ausführungsform der Gütefunktion 50:

15

$$\|Ag - b\|_{L^2}^2 \quad , \quad (3)$$

wobei als Norm die L^2 -Norm für quadratintegrierbare Funktionen auf der Basisfläche Ω der Oberfläche 12 verwendet wird:

20

$$\|f\|_{L^2}^2 = \int_{\Omega} f^2(x, y) dx dy \quad (4)$$

Als vorgegebene Solländerung $b(x, y)$ kann entweder die Solloberflächenänderung oder auch eine mit der Oberflächenänderung korrespondierende Wellenfrontänderung verwendet werden. Als Optimierungsproblem wird somit für eine

25 vorgegebene Solländerung $b(x, y)$ eine stets positive Kompaktierung $g(x, y) \geq 0$ gesucht, so dass

$$\|Ag - b\|_{L^2}^2 \rightarrow \min \quad . \quad (5)$$

Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Gütefunktion 50 wird der Umstand berücksichtigt, dass Kompaktierungen immer positiv sind und stets ein positiver Defokus induziert wird. Zum Ausgleich dieser Vorzugsrichtung der Oberflächen- deformation werden einstellbare Starrkörperfreiheitsgrade des optischen Elements 14 bei der Optimierung berücksichtigt. Die Starrkörperfreiheitsgrade sind üblicherweise der Geometrie des optischen Elements 14 sowie dem Einsatzort desselben innerhalb eines optischen Systems, wie etwa eines Projektionsobjektivs, abhängig.

- 10 Zur Berücksichtigung der Starrkörperfreiheitsgrade wird von dem Hilbertraum der Wellenfrontänderungen $\mathcal{H}$ mit dem Skalarprodukt

$$\langle f_1, f_2 \rangle = \int_{\Omega} f_1(x, y) f_2(x, y) dx dy \quad (6)$$

- 15 ausgegangen. Die durch Nutzung der Starrkörperfreiheitsgrade behebbaren Fehler bzw. einstellbaren Wellenfrontänderungen bilden einen Unterraum $\mathcal{H}_B$ von $\mathcal{H}$. Mit einem Projektor P_B auf den Unterraum $\mathcal{H}_B$ lassen sich die Starrkörperfreiheitsgrade in der Gütefunktion 50 berücksichtigen. Als Optimierungsproblem wird nun für eine vorgegebene Solloberflächenänderung $b(x, y)$ in Gestalt einer Wellenfrontänderung eine Kompaktierung $g(x, y) \geq 0$ gesucht, so dass

$$\|(1 - P_B)Ag - b\|_{L^2}^2 \rightarrow \min \quad , \quad (7)$$

- 25 wobei $(1 - P_B)$ der zu P_B komplementäre Projektor auf den Unterraum der nicht durch Starrkörperfreiheitsgrade behebbaren Fehler bzw. Wellenfrontänderungen ist. Eine Berechnung von $\mathbb{P}_B$ unter Verwendung einer geeigneten Basis und mit Berücksichtigung der Geometrie und des Einsatzortes des optischen Elements 14 erfolgt beispielsweise durch die Ermittlungseinrichtung 40. Dieses wird weiter unten näher erläutert.

Bei einer Ausbildungsform des Optimierungsproblems werden durch eine Nebenbedingung 52 zusätzlich Verfahrwegeinschränkungen bezüglich der Starrkörperfrieheitsgrade berücksichtigt. Verfahrwege v sind Elemente eines Vektorraums V . Eine Wirkung der Verfahrwege v im Raum der Wellenfront-änderungen wird durch eine Sensitivitätsmatrix M beschrieben. Somit gilt als Nebenbedingung, dass für mindestens eine Lösung des Systems

$$P_B Ag = Mv \quad (8)$$

10 $v_{\min} < v < v_{\max}$ gilt, wobei $v_{\min}$ und $v_{\max}$ Verfahrweggrenzen darstellen.

In einer weiteren Ausbildungsform des Optimierungsproblems werden durch eine Nebenbedingung 54 die maximale Kompaktierung und deren Gradienten beschränkt:

15

$$\|g\|_{\infty} < C_0, \quad \|\partial_x g\|_{\infty}, \|\partial_y g\|_{\infty} < C_1 \quad (9)$$

Gemäß einem Ausführungsbeispiel wird somit als Optimierungsproblem für eine Solloberflächenänderung $b(x,y)$ in Gestalt einer Wellenfrontänderung eine Kompaktierung $g(x,y) \geq 0$ gesucht, so dass

20

$$\|(1 - P_B)Ag - b\|_{L^2}^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

der Manipulatorverfahrweg $v_{\min} < v < v_{\max}$ für mindestens eine Lösung des Systems

25

$$P_B Ag = Mv \quad (11)$$

darstellt und die Maximumsnorm von $g(x,y)$ und dessen Ableitungen wir folgt eingeschränkt sind:

30

$$\|g\|_{\infty} < C_0, \quad \|\partial_x g\|_{\infty}, \|\partial_y g\|_{\infty} < C_1 \quad . \quad (12)$$

In den bisher beschriebenen Ausführungsbeispielen wird zur Optimierung des Wertes der Gütefunktion 50 die orts aufgelöste Kompaktierung $g(x,y)$ variiert. Als Ergebnis liegt somit eine optimale orts aufgelöste Kompaktierung $g(x,y)$ vor. Aus der ermittelten Kompaktierung $g(x,y)$ lässt sich beispielsweise mit der Gleichung

$$g(x, y) = c_{cp} e^{\alpha}(x, y) \quad (13)$$

10 die zugehörige orts aufgelöste Energiedosisverteilung $e(x,y)$ ermitteln. Dabei sind die Parameter c_{cp} und α Konstanten, die von der Elektronenenergie, der Schichtzusammensetzung und den Schichtdicken des optischen Elements abhängen. Dieser Zusammenhang zwischen der Kompaktierung $g(x,y)$ und der 15 Energiedosisverteilung $e(x,y)$ lässt sich rechnerisch unkompliziert umsetzen.

Alternativ kann zum Ermitteln der Energiedosisverteilung $e(x,y)$ aus der lokalen Kompaktierung $g(x,y)$ auch eine Potenzreihenentwicklung oder ein Polynom auf Basis der Energiedosisverteilung verwendet werden:

$$g(e) = a_1 e + a_2 e^2 + a_3 e^3 + \dots + a_M e^M \quad (14)$$

wobei a_i Entwicklungskoeffizienten sind. Vorzugweise werden dabei mindestens zwei unterschiedlichen Potenzen der Energiedosisverteilung verwendet. 25 Insbesondere wird bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel zur Vereinfachung der Optimierung die lokale Kompaktierung $g(x,y)$ in Abhängigkeit von der Energiedosisverteilung $e(x,y)$ wie folgt beschrieben:

$$g = a_1 e + a_2 e^2 \quad (15)$$

In anderen Ausführungsbeispielen wird die lokale Kompaktierung $g(x,y)$ in der Gütefunktion 50 durch die Energiedosisverteilung $e(x,y)$ ersetzt. Hierfür kann beispielsweise eine der Gleichungen (13), (14) oder (15) verwendet werden. Bei einer Optimierung wird anstelle der Kompaktierung $g(x,y)$ die Energiedosisverteilung $e(x,y)$ variiert. Dazu wird eine entsprechende Anpassung der Nebenbedingungen 52 und 54 vorgenommen.

Statt den oben beschriebenen deterministischen funktionalen Zusammenhängen zwischen der Kompaktierung $g(x,y)$ und der Energiedosisverteilung $e(x,y)$ kann auch ein stochastischer Ansatz verwendet werden. Der funktionale Zusammenhang weist dafür zusätzlich zufällige Schwankungen auf. Eine Optimierung kann dann beispielsweise für den Erwartungswert und die Varianz der Gütefunktion durchgeführt werden.

Zum Ermitteln des Umrechnungsterms 42 bzw. des linearen Operators A werden gemäß einer Ausführungsform zunächst geeignete Basisfunktionssysteme für die lokale Kompaktierung $g(x,y)$ und die vorgegebene Wellenfrontänderung bzw. Solländerung $b(x,y)$ ermittelt. Eine Auswahl eines geeigneten Funktionsraumes mit einem Basisfunktionssystem für die orts aufgelöste Kompaktierung $g(x,y)$, im Folgenden auch Kompaktierungsverteilung genannt, kann beispielsweise durch die Ermittlungseinrichtung 40 unter Berücksichtigung der Geometrie des optischen Elements 14 erfolgen. So kann z.B. für eine ungefähr rechteckige Oberfläche 12 ein aus Tschebyschow-Polynomen bestehender Funktionensatz als Basis ausgewählt werden:

$$T_{nm}(x, y) = T_n(x)T_m(y) \quad (16)$$

Der Definitionsbereich für die Funktionen T_{nm} wird dabei so gestreckt, dass die bestrahlte Fläche $\tilde{\Omega}$ umfasst wird. Zusätzlich erfolgt eine Multiplikation jeder Basisfunktion T_{nm} mit einer Abschneidefunktion Ψ , welche auf der Oberfläche 12 den Wert 1 hat und beim Rand der bestrahlten Fläche $\tilde{\Omega}$ gegen Null geht. Auf diese Weise wird erreicht, dass auch die mit dem Basissystem darstellbare

Kompaktierung am Rand verschwindet. Die Kompaktierungsverteilung $g(x,y)$ lässt sich nun als Linearkombination der Funktionen $\Psi_{T_{nm}}$ darstellen. Eine weiterer alternativer Funktionensatz können beispielsweise B-Splines sein.

- 5 Als Basis für die vorgegebene Solloberflächenänderung $b(x,y)$ in Gestalt einer Wellenfrontänderung im Hilbertraum $\mathcal{H}$ wird z.B. ein aus Linearkombinationen von Zernikschen Polynomen konstruiertes Orthonormalsystem ausgewählt.

10 Mit Hilfe der Basissysteme für die Kompaktierungsverteilung $g(x,y)$ und die vorgegebene Wellenfrontänderung $b(x,y)$ lässt sich der Umrechnungsterm 42 bzw. der lineare Operator A durch eine Matrix beschreiben. Dazu bestimmt die Ermittlungseinrichtung 40 zunächst durch eine Finite-Elemente-Rechnung für die Basisfunktionen $\Psi_{T_{nm}}$ der Kompaktierungsverteilung $g(x,h)$ jeweils eine resultierende Gesamtänderung $h(x,y)$ der Oberfläche 12. Mit dem Ergebnis der
15 Finite-Elemente-Rechnung ermittelt die Ermittlungseinrichtung 40 unter Berücksichtigung der Starkkörperfreiheitsgrade, der Geometrie und des Einsatzortes des optischen Elements 14 den Umrechnungsterm 42. Dabei kann zunächst eine Bestimmung des Projektors P_B erfolgen. Der ermittelte Umrechnungsterm 42 wird anschließend an das Optimierungsmodul 38 der
20 Steuerungseinrichtung 32 übergeben und bei einer Optimierung in der Gütefunktion 50 verwendet.

Zur Änderung der Form der Oberfläche 12 wird zunächst die Wellenfrontänderung in Gestalt der Solloberflächenänderung $b(x,y)$ 34 an die Steuerungseinrichtung 32
25 übergeben. Dabei kann die Solloberflächenänderung, wie oben beschrieben, als Linearkombinationen von Zernikschen Polynomen dargestellt werden. Die Solloberflächenänderung 34 kann zuvor durch eine Vermessung der Oberfläche 12 bestimmt worden sein. Hierfür kann beispielsweise ein Phasenschiebeverfahren oder ein anderes, dem Fachmann bekanntes Verfahren angewendet werden.

30

Mit der Solloberflächenänderung 34 als Eingabe führt das Optimierungsmodul 38 den Optimierungsalgorithmus 48 aus. Dabei wird die Gütefunktion 50 mit dem

bereits vorher bestimmten Umrechnungsterm 42 unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen 52 und 54 minimiert. Als Ergebnis bzw. Ausgabe der Optimierung wird eine geeignete orts aufgelöste Energiedosisverteilung 36 für die Solländerung ermittelt. Die ermittelte Energiedosisverteilung 36 wird anschließend
5 von dem Umwandlungsmodul 44 in eine ortsabhängige Verweildauer 46 des Elektronenstrahls 18 für verschiedene Orte der Oberfläche 12 umgewandelt. Die ortsabhängige Verweildauer 46 wird schließlich von der Steuerungseinrichtung 32 zum Steuern der Elektronenbestrahlungseinrichtung 16 benutzt. Alternativ kann auch eine ortsabhängige Intensität des Elektronenstrahls 18 vorgegeben werden.

10 Die auf diese Weise durchgeführte Elektronenbestrahlung der Oberfläche 12 bewirkt eine Kompaktierungsverteilung, welche durch lokale Oberflächenabsenkungen 20 und Deformationen der Oberfläche durch Spannungskräfte parallel zur Oberfläche 12 die gewünschte Solländerung 34 hochgenau erreicht.

15 Da bei der eigentlichen Optimierung durch das Optimierungsmodul 38 keine FEM zur Bestimmung einer resultierenden Gesamtänderung aus lokalen Kompaktierungen durchgeführt wird, ist eine Formänderung auch für mehrere optische Elemente schnell durchführbar. Die Vorrichtung 10 eignet sich insbesondere zur hochgenauen Bearbeitung von Spiegeln für Projektionsobjektive
20 oder andere optische Systeme in der EUV-Mikrolithographie.

Fig. 3 zeigt eine schematische Schnittansicht einer Projektionsbelichtungsanlage 100 für die Mikrolithographie mit einem Projektionsobjektiv 110, welches mindestens ein unter Verwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung 10 zur
25 Oberflächenformveränderung in einer der vorausgehenden Ausführungsformen hergestelltes optisches Element 14 in Gestalt eines Spiegels 14-1, 14-2 oder 14-3 umfasst.

Die Projektionsbelichtungsanlage 10 umfasst ein Beleuchtungssystem 102 zur
30 Erzeugung einer Belichtungsstrahlung 104 in Gestalt von EUV-Strahlung (extrem ultraviolette Strahlung) mit einer Wellenlänge von < 100 nm, insbesondere einer Wellenlänge von etwa 13,5 nm oder etwa 6,8 nm. In anderen, nicht zeichnerisch

dargestellten Varianten kann es sich bei der Belichtungsstrahlung 104 um sogenannte DUV-Strahlung, d.h. Strahlung im tiefen UV-Wellenlängenbereich mit einer Wellenlänge von z.B. 248 nm oder 193 nm, handeln.

- 5 Die Belichtungsstrahlung 104 trifft auf eine Lithographiemaske 106 mit darauf angeordneten abzubildenden Maskenstrukturen. Dabei kann die Belichtungsstrahlung 104, wie in Fig. 10 gezeigt, an der Lithographie-Maske 106 reflektiert werden, wie dies oft bei Verwendung von EUV-Strahlung der Fall ist. Alternativ kann die Lithographie-Maske 106 auch als Transmissions-Maske ausgeführt sein.
- 10 In diesem Fall tritt die Belichtungsstrahlung 104 durch die Maske 106 hindurch.

- Die Abbildung der Maskenstrukturen auf einen in einer Bildebene 116 angeordneten Wafer 114 erfolgt mittels des Projektionsobjektivs 110, welches eine Vielzahl von Spiegeln umfasst, von denen in Fig. 3 exemplarisch drei
- 15 Spiegel, nämlich die Spiegel 14-1, 14-2 und 14-3 dargestellt sind.

- Fig. 4 zeigt eine schematische Schnittansicht einer Inspektionseinrichtung 200 zur Inspektion eines Substrats für die Mikrolithographie. Das zu inspizierende Substrat kann ein Lithographie-Retikel oder ein Wafer sein. Im ersten Fall handelt
- 20 es sich bei der Inspektionseinrichtung 200 um eine Retikelinspektionseinrichtung im zweiten Fall um eine Waferinspektionseinrichtung.

- Die Inspektionseinrichtung 200 umfasst ein Abbildungsobjektiv 210, welches mindestens ein unter Verwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung 10 zur
- 25 Oberflächenformveränderung in einer der vorausgehenden Ausführungsformen hergestelltes optisches Element 14 in Gestalt eines Spiegels 214-1, 214-2 oder 214-3 umfasst.

- Die Inspektionseinrichtung 200 umfasst ein Beleuchtungssystem 202 zur
- 30 Erzeugung einer Inspektionsstrahlung 204 in Gestalt von EUV-Strahlung (extrem ultraviolette Strahlung) mit einer Wellenlänge von < 100 nm, insbesondere einer Wellenlänge von etwa 13,5 nm oder etwa 6,8 nm. In anderen, nicht zeichnerisch

dargestellten Varianten kann es sich bei der Inspektionsstrahlung 204 um sogenannte DUV-Strahlung, d.h. Strahlung im tiefen UV-Wellenlängenbereich mit einer Wellenlänge von z.B. 248 nm oder 193 nm, oder Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich handeln. Im Fall der Ausführung der Inspektionseinrichtung 200 als Retikelinspektionseinrichtung entspricht die Wellenlänge der Inspektionsstrahlung 204 derjenigen Wellenlänge, für welche das zu inspizierende Retikel zum Einsatz in einer Projektionsbelichtungsanlage konfiguriert ist.

Die Inspektionsstrahlung 204 trifft auf das zu inspizierende Testsubstrat 206, bei welcher es sich, wie oben erwähnt, je nach Ausführungsform der Inspektionseinrichtung 200 um ein Lithographieretikel mit darauf angeordneten abzubildenden Maskenstrukturen oder um einen Wafer handeln kann. Dabei kann die Inspektionsstrahlung 204, wie in Fig. 4 gezeigt, an dem Testsubstrat 206 reflektiert werden, wie dies oft bei Verwendung von EUV-Strahlung der Fall ist. Alternativ kann im Fall einer Retikelinspektionseinrichtung das Testsubstrat 206 in Gestalt eines Retikels auch durchstrahlt werden.

Während der Inspektion wird zu einem jeweiligen Zeitpunkt ein von der Inspektionsstrahlung 204 bestrahlter Abschnitt des Testsubstrats 206 mittels des Abbildungsobjektivs 210 auf einen in der Bildebene 216 des Abbildungsobjektivs 210 angeordneten Detektor 220 abgebildet. Zur Inspektion der gesamten Oberfläche des Testsubstrats 206 wird dieses schrittweise quer zu optischen Achse des Abbildungsobjektivs 210 verschoben. Das Abbildungsobjektiv 210 umfasst eine Vielzahl von Spiegeln, von denen in Fig. 4 exemplarisch drei Spiegel, nämlich die Spiegel 214-1, 214-2 und 214-3 dargestellt sind.

Die vorstehende Beschreibung beispielhafter Ausführungsformen ist exemplarisch zu verstehen. Die damit erfolgte Offenbarung ermöglicht es dem Fachmann einerseits, die vorliegende Erfindung und die damit verbundenen Vorteile zu verstehen, und umfasst andererseits im Verständnis des Fachmanns auch offensichtliche Abänderungen und Modifikationen der beschriebenen Strukturen und Verfahren. Daher sollen alle derartigen Abänderungen und Modifikationen,

insoweit sie in den Rahmen der Erfindung gemäß der Definition in den beigefügten Ansprüchen fallen, sowie Äquivalente vom Schutz der Ansprüche abgedeckt sein.

- 5 Die Erfindung umfasst die in den folgenden Klauseln beschriebenen Aspekte. Diese Klauseln bilden Teil der Beschreibung und sind keine Ansprüche:

Klausel 1: Vorrichtung (10) zum Verändern einer Form einer Oberfläche (12) eines optischen Elements (14) mittels Elektronenbestrahlung, umfassend:

- 10 - eine Elektronenbestrahlungseinrichtung (16), welche dazu konfiguriert ist, Elektronen auf die Oberfläche (12) mit einer orts aufgelösten Energiedosisverteilung (36) zur Erzeugung von lokalen Materialverdichtungen in dem optischen Element (14) einzustrahlen, sowie
- 15 - eine Steuerungseinrichtung (32), welche dazu konfiguriert ist, aus einer vorgegebenen Solländerung (34) einer Oberflächenform des optischen Elements (14) eine Vorgabe für die orts aufgelöste Energiedosisverteilung (36) zur Steuerung der Elektronenbestrahlungseinrichtung (16) durch Optimierung mittels einer Minimierung einer Gütefunktion (50) derart zu ermitteln, dass eine Differenz zwischen der Solländerung und einer aufgrund der ermittelten Vorgabe bewirkten
- 20 tatsächlichen Änderung der Oberflächenform des optischen Elements minimiert wird,

- wobei die Gütefunktion (50) einen Umrechnungsterm (42) zur Umrechnung einer eine Materialverdichtung im Bereich eines Flächenelements (21) der Oberfläche (12) beschreibenden lokalen Kompaktierung in eine resultierende
- 25 Formänderung der Oberfläche (12) des optischen Elements (14) enthält, und

- wobei der Umrechnungsterm (42) dazu konfiguriert ist, sowohl eine durch die lokale Kompaktierung bedingte Oberflächenabsenkung (20) im Bereich des Flächenelements als auch eine durch die lokale Kompaktierung aufgrund von parallel zur Oberfläche (12) wirkenden Kräften bedingte Deformation zumindest
- 30 eines Abschnitts (23) der Oberfläche (12), dessen Fläche ein Vielfaches der Fläche des Flächenelements (21) beträgt, zu berücksichtigen.

Klausel 2: Vorrichtung nach Klausel 1,
wobei die lokale Kompaktierung in der Gütefunktion (50) als Funktion der Energiedosisverteilung (36) beschrieben ist und die Steuerungseinrichtung (32) dazu konfiguriert ist, zur Optimierung mittels der Gütefunktion (50) die Energiedosisverteilung (36) zu variieren.

Klausel 3: Vorrichtung nach einer der vorausgehenden Klauseln,
wobei die lokale Kompaktierung in der Gütefunktion (50) mittels einer Potenzreihenentwicklung beschrieben ist, bei der die Energiedosisverteilung (36) in mindestens zwei unterschiedlichen Potenzen als Basissystem fungiert.

Klausel 4: Vorrichtung nach Klausel 1,
bei der die Steuerungseinrichtung (32) dazu konfiguriert ist, zur Optimierung mittels der Gütefunktion (50) die lokale Kompaktierung zu variieren.

Klausel 5: Vorrichtung nach einer der vorausgehenden Klauseln,
bei welcher der Umrechnungsterm (42) ein Integraloperator ist.

Klausel 6: Vorrichtung nach einer der vorausgehenden Klauseln,
welche weiterhin eine Ermittlungseinrichtung (40) umfasst, welche dazu konfiguriert ist, den Umrechnungsterm (42) mittels der Methode der finiten Elemente zu ermitteln.

Klausel 7: Vorrichtung nach Klausel 6,
bei der die Ermittlungseinrichtung (40) dazu konfiguriert ist, den Umrechnungsterm (42) unter Berücksichtigung der Geometrie des optischen Elements (14) und/oder eines Einsatzortes des optischen Elements (14) in einer optischen Anordnung zu ermitteln.

Klausel 8: Vorrichtung nach Klausel 6 oder 7,
bei der die Ermittlungseinrichtung (40) dazu konfiguriert ist, die Ermittlung des Umrechnungsterms (42) auf Grundlage einer die Kompaktierung orts aufgelöst

über die Oberfläche (12) des optischen Elements (14) beschreibenden Kompaktierungsverteilung durchzuführen, wobei die Kompaktierungsverteilung mittels einer Polynombasis dargestellt wird.

5 Klausel 9: Vorrichtung nach einer der vorausgehenden Klauseln, welche weiterhin eine Ermittlungseinrichtung (40) umfasst, die dazu konfiguriert ist, den Umrechnungsterm (42) zu ermitteln durch:

- Bestimmung der resultierenden Formänderung der Oberfläche des optischen Elements auf Grundlage einer die Kompaktierung orts aufgelöst über die Oberfläche des optischen Elements beschreibenden Kompaktierungsverteilung, welche mittels einer Polynombasis dargestellt ist, sowie- Bestimmung eines linearen Operators als den Umrechnungsterm aus der resultierenden Formänderung.

15 Klausel 10: Verfahren zum Verändern einer Form einer Oberfläche (12) eines optischen Elements (14) mittels Elektronenbestrahlung mit den Schritten:

- Ermitteln einer Vorgabe für eine orts aufgelöste Energiedosisverteilung (36) für die Elektronenbestrahlung aus einer vorgegebenen Solländerung (34) einer Oberflächenform des optischen Elements (14) durch Optimierung mittels einer Minimierung einer Gütefunktion (50), derart dass eine Differenz zwischen der Solländerung und einer aufgrund der ermittelten Vorgabe bewirkten tatsächlichen Änderung der Oberflächenform des optischen Elements minimiert wird,

wobei die Gütefunktion (50) einen Umrechnungsterm (42) zur Umrechnung einer lokalen Kompaktierung in eine resultierende Formänderung der Oberfläche (12) des optischen Elements (14) enthält, wobei die lokale Kompaktierung eine durch Elektroneneinstrahlung erzeugte Materialverdichtung im Bereich eines Flächenelements (21) der Oberfläche (12) beschreibt, und

wobei der Umrechnungsterm (42) dazu konfiguriert ist, sowohl eine durch die lokale Kompaktierung bedingte Oberflächenabsenkung (20) im Bereich des Flächenelements als auch eine durch die lokale Kompaktierung aufgrund von parallel zur Oberfläche (12) wirkenden Kräften bedingte Deformation zumindest

eines Abschnitts (23) der Oberfläche (12), dessen Fläche ein Vielfaches der Fläche des Flächenelements (21) beträgt, zu berücksichtigen, sowie

- Einstrahlen von Elektronen auf die Oberfläche (12) des optischen Elements (14) mit einer der ermittelten Vorgabe entsprechenden orts aufgelösten Energiedosisverteilung (36) zur Erzeugung der lokalen Kompaktierung im optischen Element (14).

Klausel 11: Verfahren nach Klausel 10,

bei dem die lokale Kompaktierung in der Gütefunktion (50) als Funktion der Energiedosisverteilung (36) beschrieben ist und bei der Optimierung mittels der Gütefunktion (50) die Energiedosisverteilung (36) variiert wird.

Klausel 12: Verfahren nach Klausel 10,

bei dem bei der Optimierung mittels der Gütefunktion (50) die lokale Kompaktierung variiert wird.

Klausel 13: Verfahren nach einer der Klauseln 10 bis 12,

bei dem der Umrechnungsterm (42) mittels der Methode der finiten Elemente ermittelt wird.

Klausel 14: Verfahren nach Klausel 13,

bei dem eine die Kompaktierung orts aufgelöst über die Oberfläche (12) des optischen Elements darstellende Kompaktierungsverteilung mittels einer Polynombasis dargestellt wird und der Umrechnungsterm (42) auf Grundlage der mittels der Polynombasis dargestellten Kompaktierungsverteilung ermittelt wird.

Klausel 15: Verfahren nach einer der Klauseln 10 bis 13, bei dem der Umrechnungsterm ermittelt wird durch:

- Darstellen einer die Kompaktierung orts aufgelöst über die Oberfläche des optischen Elements beschreibenden Kompaktierungsverteilung mittels einer Polynombasis,

- Bestimmen der resultierenden Formänderung der Oberfläche des optischen Elements auf Grundlage der mittels der Polynombasis dargestellten Kompaktierungsverteilung, sowie
- Bestimmen eines linearen Operators als den Umrechnungsterm aus der resultierenden Formänderung.

Klausel 16: Verfahren nach einer der Klauseln 10 bis 15, wobei das optische Element (14) Teil eines Projektionsobjektivs für die Mikrolithographie ist.

Klausel 17: Verfahren nach Klausel 16, bei dem das optische Element (14) ein Spiegel zur Reflexion extrem ultravioletter Strahlung ist.

Klausel 18: Projektionsobjektiv (110) für die Mikrolithographie mit einem mittels des Verfahrens nach einer der Klauseln 10 bis 17 gefertigten optischen Element (14-1, 14-2, 14-3):

Klausel 19: Inspektionseinrichtung (200) zur Inspektion eines Substrats für die Mikrolithographie mit einem mittels des Verfahrens nach einer der Klauseln 10 bis 17 gefertigten optischen Element (214-1, 214-2, 214-3).

Bezugszeichenliste

10	Vorrichtung zum Verändern einer Form einer Oberfläche
12	Oberfläche
5 14	optisches Element
14-1, 14-2, 14-3	Spiegel
16	Elektronenbestrahlungseinrichtung
18	Elektronenstrahl
20	lokale Oberflächenabsenkung
10 21	Flächenelement
22	Elektronenquelle
23	Oberflächenabschnitt
24	Beschleunigungseinheit
25	parallel zur Oberfläche wirkende Kräfte
15 26	Fokussierungseinheit
28	Ablenkungseinheit
30	Vakuumkammer
32	Steuerungseinrichtung
34	Solländerung der Oberfläche
20 36	ortsaufgelöste Energiedosisverteilung
38	Optimierungsmodul
40	Ermittlungseinrichtung
42	Umrechnungsterm
44	Umwandlungsmodul
25 46	ortsaufgelöste Verweilzeit
48	Optimierungsalgorithmus
50	Gütefunktion
52	erste Nebenbedingung
54	zweite Nebenbedingung
30 100	Projektionsbelichtungsanlage
102	Beleuchtungssystem
104	Belichtungsstrahlung

- 106 Lithographiemaske
- 110 Projektionsobjektiv
- 114 Wafer
- 116 Bildebene
- 5 200 Inspektionseinrichtung
- 202 Belichtungssystem
- 204 Inspektionsstrahlung
- 206 Testsubstrat
- 210 Abbildungsobjektiv
- 10 214-1, 214-2, 214-3 Spiegel
- 216 Bildebene
- 220 Detektor

Ansprüche

1. Vorrichtung zum Verändern einer Form einer Oberfläche eines optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung, umfassend:

5 - eine Elektronenbestrahlungseinrichtung, welche dazu konfiguriert ist, Elektronen auf die Oberfläche mit einer orts aufgelösten Energiedosisverteilung zur Erzeugung von lokalen Materialverdichtungen in dem optischen Element einzustrahlen, sowie
- eine Steuerungseinrichtung, welche dazu konfiguriert ist, aus einer vorgegebenen Solländerung einer Oberflächenform des optischen Elements eine
10 Vorgabe für die orts aufgelöste Energiedosisverteilung zur Steuerung der Elektronenbestrahlungseinrichtung durch Optimierung mittels einer Minimierung einer Gütefunktion derart zu ermitteln, dass eine Differenz zwischen der Solländerung und einer aufgrund der ermittelten Vorgabe bewirkten tatsächlichen Änderung der Oberflächenform des optischen Elements minimiert wird,

15 wobei die Gütefunktion einen Umrechnungsterm zur Umrechnung einer Materialverdichtung im Bereich eines Flächenelements der Oberfläche beschreibenden lokalen Kompaktierung in eine resultierende Formänderung der Oberfläche des optischen Elements enthält, und

wobei der Umrechnungsterm dazu konfiguriert ist, sowohl eine durch die
20 lokale Kompaktierung bedingte Oberflächenabsenkung im Bereich des Flächenelements als auch eine durch die lokale Kompaktierung aufgrund von parallel zur Oberfläche wirkenden Kräften bedingte Deformation zumindest eines Abschnitts der Oberfläche, dessen Fläche ein Vielfaches der Fläche des Flächenelements beträgt, zu berücksichtigen.

25 2. Vorrichtung nach Anspruch 1,

wobei die lokale Kompaktierung in der Gütefunktion als Funktion der Energiedosisverteilung beschrieben ist und die Steuerungseinrichtung dazu konfiguriert ist, zur Optimierung mittels der Gütefunktion die Energiedosisverteilung zu
30 variieren.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2,

wobei die lokale Kompaktierung in der Gütefunktion mittels einer Potenzreihenentwicklung beschrieben ist, bei der die Energiedosisverteilung in mindestens zwei unterschiedlichen Potenzen als Basissystem fungiert.

5 4. Vorrichtung nach Anspruch 1,
bei der die Steuerungseinrichtung dazu konfiguriert ist, zur Optimierung mittels der Gütefunktion die lokale Kompaktierung zu variieren.

5. Vorrichtung nach Anspruch 3 oder 4,
10 bei welcher der Umrechnungsterm ein Integraloperator ist.

6. Vorrichtung nach Anspruch 5,
welche weiterhin eine Ermittlungseinrichtung umfasst, welche dazu konfiguriert ist, den Umrechnungsterm mittels der Methode der finiten Elemente zu ermitteln.

15 7. Vorrichtung nach Anspruch 6,
bei der die Ermittlungseinrichtung dazu konfiguriert ist, den Umrechnungsterm unter Berücksichtigung der Geometrie des optischen Elements und/oder eines Einsatzortes des optischen Elements in einer optischen Anordnung zu ermitteln.

20 8. Vorrichtung nach Anspruch 7,
bei der die Ermittlungseinrichtung dazu konfiguriert ist, die Ermittlung des Umrechnungsterms auf Grundlage einer die Kompaktierung orts aufgelöst über die Oberfläche des optischen Elements beschreibenden Kompaktierungsverteilung durchzuführen, wobei die Kompaktierungsverteilung mittels einer Polynombasis
25 dargestellt wird.

9. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 8, welche weiterhin eine Ermittlungseinrichtung umfasst, die dazu konfiguriert ist, den Umrechnungsterm zu ermitteln
30 durch:

- Bestimmung der resultierenden Formänderung der Oberfläche des optischen Elements auf Grundlage einer die Kompaktierung orts aufgelöst über die Ober-

fläche des optischen Elements beschreibenden Kompaktierungsverteilung, welche mittels einer Polynombasis dargestellt ist, sowie- Bestimmung eines linearen Operators als den Umrechnungsterm aus der resultierenden Formänderung.

5

10. Verfahren zum Verändern einer Form einer Oberfläche eines optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung mit den Schritten:

- Ermitteln einer Vorgabe für eine orts aufgelöste Energiedosisverteilung für die Elektronenbestrahlung aus einer vorgegebenen Solländerung einer Oberflächenform des optischen Elements durch Optimierung mittels einer Minimierung einer Gütefunktion, derart dass eine Differenz zwischen der Solländerung und einer aufgrund der ermittelten Vorgabe bewirkten tatsächlichen Änderung der Oberflächenform des optischen Elements minimiert wird,

15 wobei die Gütefunktion einen Umrechnungsterm zur Umrechnung einer lokalen Kompaktierung in eine resultierende Formänderung der Oberfläche des optischen Elements enthält, wobei die lokale Kompaktierung eine durch Elektroneneinstrahlung erzeugte Materialverdichtung im Bereich eines Flächenelements der Oberfläche beschreibt, und

20 wobei der Umrechnungsterm dazu konfiguriert ist, sowohl eine durch die lokale Kompaktierung bedingte Oberflächenabsenkung im Bereich des Flächenelements als auch eine durch die lokale Kompaktierung aufgrund von parallel zur Oberfläche wirkenden Kräften bedingte Deformation zumindest eines Abschnitts der Oberfläche, dessen Fläche ein Vielfaches der Fläche des Flächenelements beträgt, zu berücksichtigen, sowie

25 - Einstrahlen von Elektronen auf die Oberfläche des optischen Elements mit einer der ermittelten Vorgabe entsprechenden orts aufgelösten Energiedosisverteilung zur Erzeugung der lokalen Kompaktierung im optischen Element.

11. Verfahren nach Anspruch 10,

30 bei dem die lokale Kompaktierung in der Gütefunktion als Funktion der Energiedosisverteilung beschrieben ist und bei der Optimierung mittels der Gütefunktion die Energiedosisverteilung variiert wird.

12. Verfahren nach Anspruch 10,
bei dem bei der Optimierung mittels der Gütefunktion die lokale Kompaktierung variiert wird.

5

13. Verfahren nach Anspruch 12,
bei dem der Umrechnungsterm mittels der Methode der finiten Elemente ermittelt wird.

10

14. Verfahren nach Anspruch 13,
bei dem eine die Kompaktierung orts aufgelöst über die Oberfläche des optischen Elements darstellende Kompaktierungsverteilung mittels einer Polynombasis dargestellt wird und der Umrechnungsterm auf Grundlage der mittels der Polynombasis dargestellten Kompaktierungsverteilung ermittelt wird.

15

15. Verfahren nach Anspruch 10 oder 14, bei dem der Umrechnungsterm ermittelt wird durch:

- Darstellen einer die Kompaktierung orts aufgelöst über die Oberfläche des optischen Elements beschreibenden Kompaktierungsverteilung mittels einer

20

Polynombasis,

- Bestimmen der resultierenden Formänderung der Oberfläche des optischen Elements auf Grundlage der mittels der Polynombasis dargestellten Kompaktierungsverteilung, sowie

25

- Bestimmen eines linearen Operators als den Umrechnungsterm aus der resultierenden Formänderung.

16. Verfahren nach Anspruch 15,
wobei das optische Element Teil eines Projektionsobjektivs für die Mikrolithographie ist.

30

17. Verfahren nach Anspruch 16,

bei dem das optische Element ein Spiegel zur Reflexion extrem ultravioletter Strahlung ist.

18. Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie mit einem mittels des Verfahrens
5 nach einem der Ansprüche 10 bis 17 gefertigten optischen Element.

19. Inspektionseinrichtung zur Inspektion eines Substrats für die Mikrolithographie mit einem mittels des Verfahrens nach einem der Ansprüche 10 bis 17 gefertigten optischen Element.

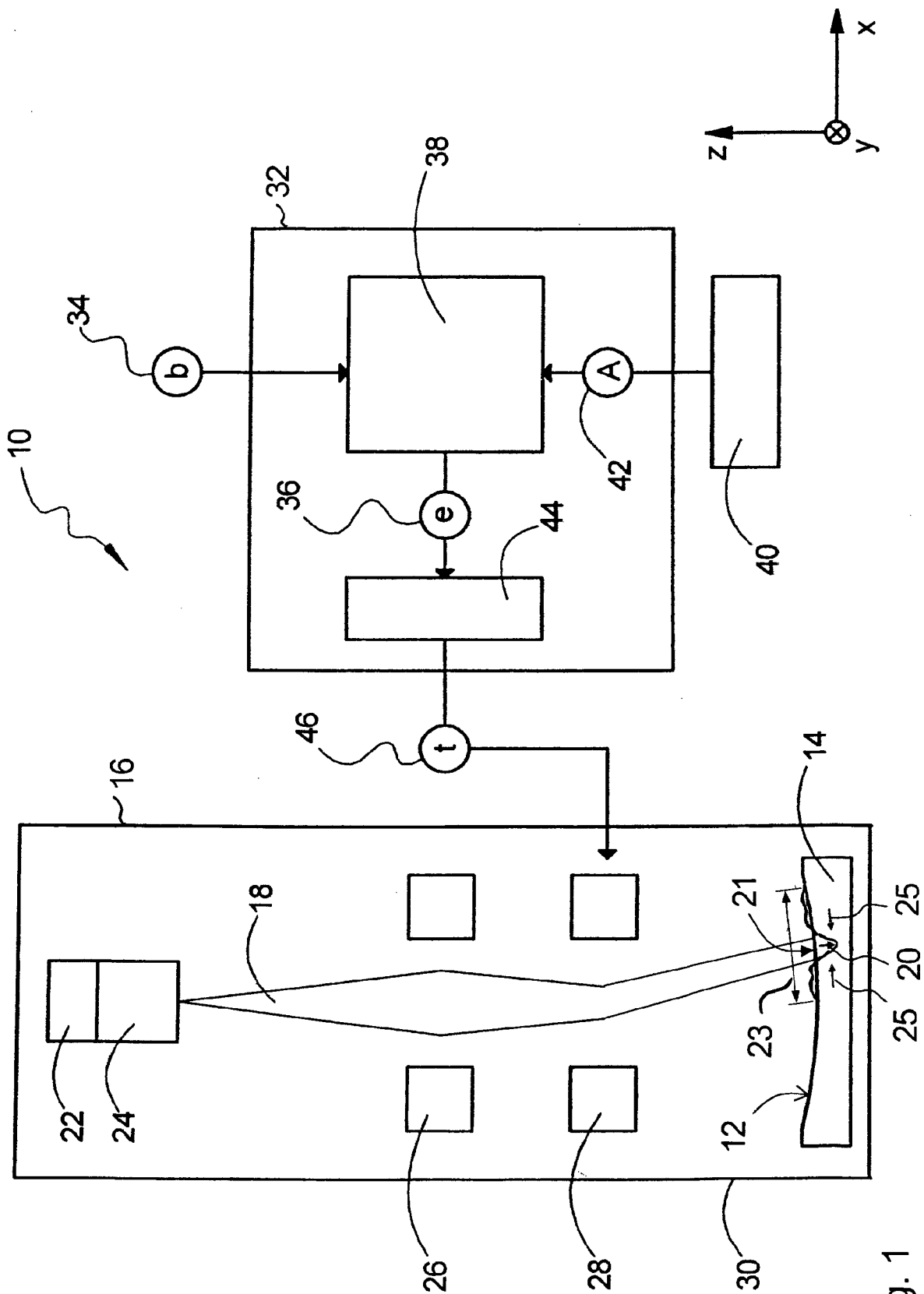


Fig. 1

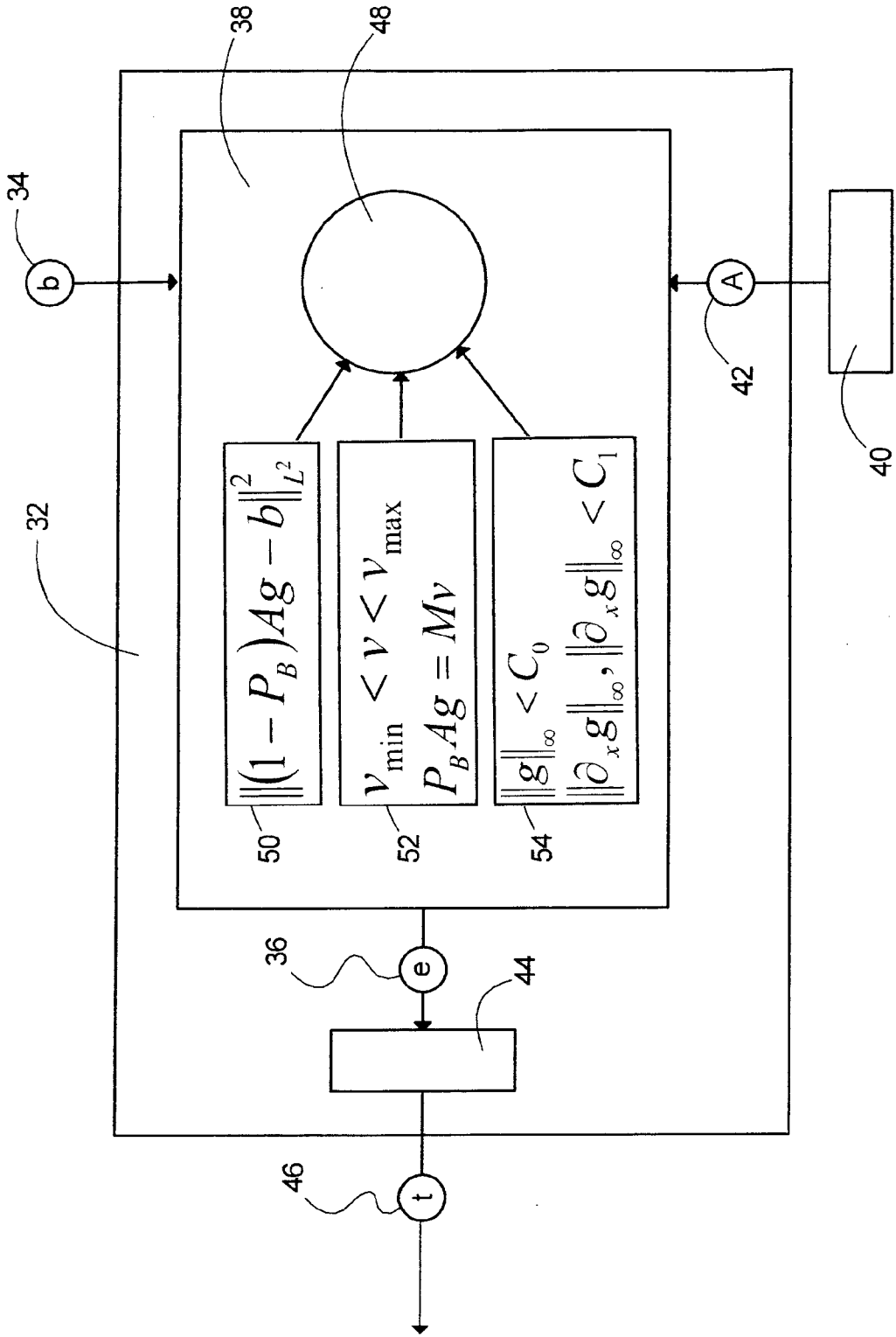


Fig. 2

Fig. 3

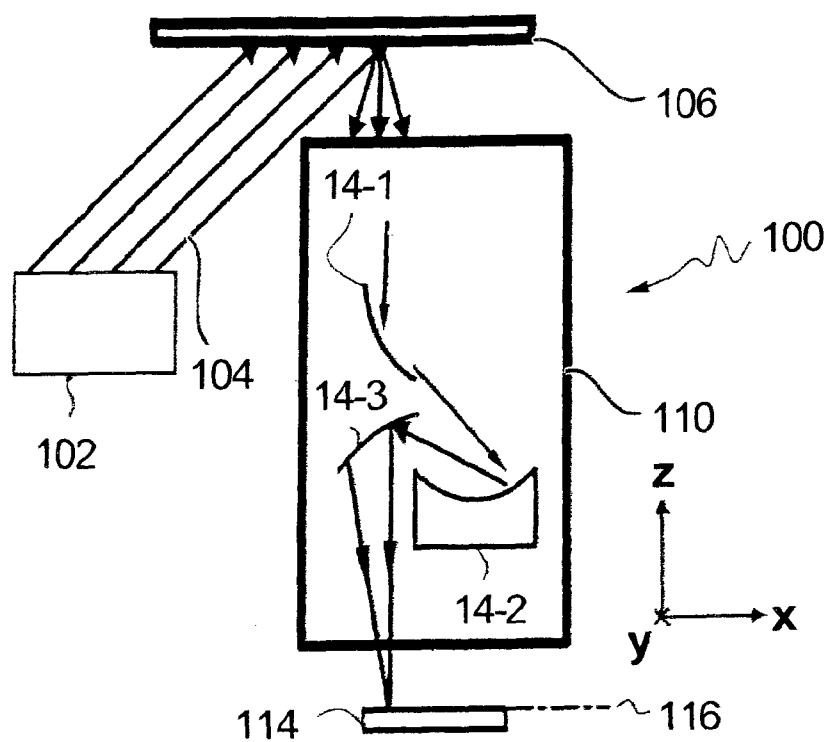
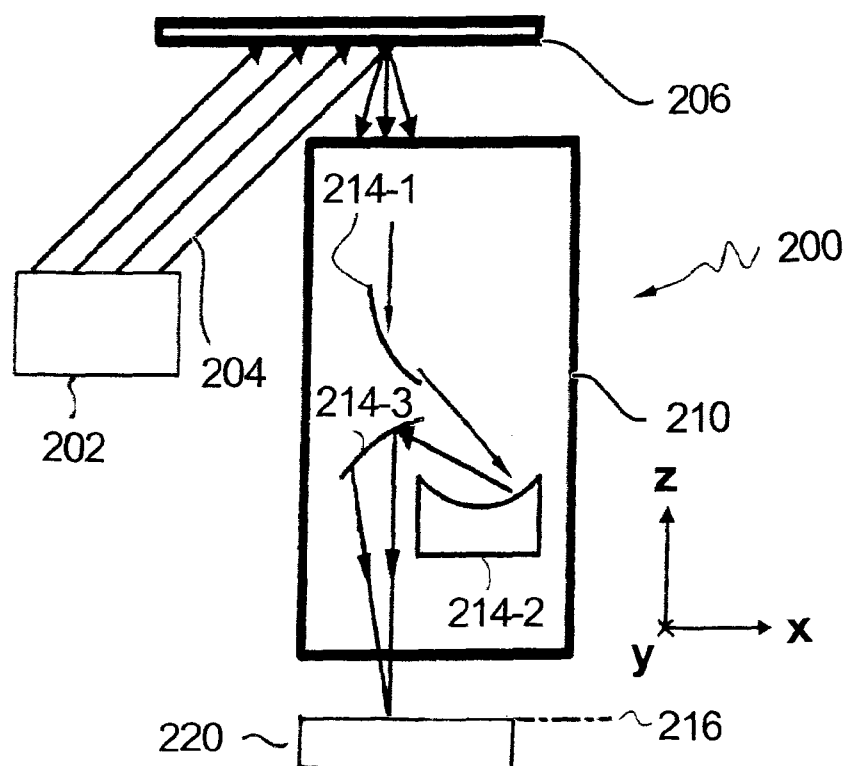


Fig. 4



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/000255

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G02B1/12 G02B5/08 G03F7/20
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B G03F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2011/020655 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]; CLAUSS WILFRIED [DE]; WEISER MARTIN [DE]) 24 February 2011 (2011-02-24)	19
A	the whole document	1-18
X	DE 10 2012 212199 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 13 June 2013 (2013-06-13)	19
A	the whole document	1-18
X	DE 10 2015 223795 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 28 January 2016 (2016-01-28)	19
A	the whole document	1-18



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

31 May 2017

Date of mailing of the international search report

08/06/2017

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Daffner, Michael

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/000255

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2011020655 A1	24-02-2011	CN 102472980 A	23-05-2012
		EP 2467756 A1	27-06-2012
		JP 5432378 B2	05-03-2014
		JP 2013502707 A	24-01-2013
		TW 201140129 A	16-11-2011
		US 2012212721 A1	23-08-2012
		WO 2011020655 A1	24-02-2011

DE 102012212199 A1	13-06-2013	NONE	

DE 102015223795 A1	28-01-2016	NONE	

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. G02B1/12 G02B5/08 G03F7/20
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 G02B G03F

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2011/020655 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]; CLAUSS WILFRIED [DE]; WEISER MARTIN [DE]) 24. Februar 2011 (2011-02-24)	19
A	das ganze Dokument	1-18
X	DE 10 2012 212199 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 13. Juni 2013 (2013-06-13)	19
A	das ganze Dokument	1-18
X	DE 10 2015 223795 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 28. Januar 2016 (2016-01-28)	19
A	das ganze Dokument	1-18



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

31. Mai 2017

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

08/06/2017

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Daffner, Michael

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/000255

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2011020655 A1	24-02-2011	CN 102472980 A	23-05-2012
		EP 2467756 A1	27-06-2012
		JP 5432378 B2	05-03-2014
		JP 2013502707 A	24-01-2013
		TW 201140129 A	16-11-2011
		US 2012212721 A1	23-08-2012
		WO 2011020655 A1	24-02-2011

DE 102012212199 A1	13-06-2013	KEINE	

DE 102015223795 A1	28-01-2016	KEINE	
