

(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
29. September 2022 (29.09.2022)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2022/200210 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01B 9/02015 (2022.01) G01B 11/24 (2006.01)
G01B 9/02 (2022.01) G01B 21/04 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2022/057158

(22) Internationales Anmeldedatum:
18. März 2022 (18.03.2022)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2021 202 911.6
25. März 2021 (25.03.2021) DE

(71) Anmelder: CARL ZEISS SMT GMBH [DE/DE]; Ru-
dolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder: ENDRES, Martin; Wollenbergstrasse 7, 89551
Koenigsbronn (DE).

(74) Anwalt: SUMMERER, Christian et al.; ZEUNER SUM-
MERER 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, IT, JM, JO, 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, ST, SV, SY, TH,
TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS,
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,

(54) Title: MEASURING DEVICE FOR INTERFEROMETRICALLY MEASURING A SURFACE FORM

(54) Bezeichnung: MESSVORRICHTUNG ZUM INTERFEROMETRISCHEN VERMESSEN EINER OBERFLÄCHENFORM

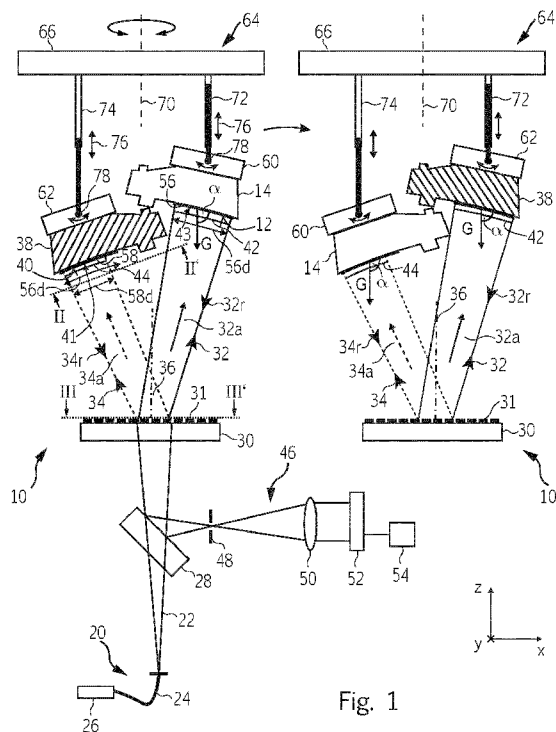


Fig. 1

(57) Abstract: A measuring device (10) for interferometrically measuring a form of a surface (12) of an inspection object (14) in relation to a reference form (41) comprises: - a diffractive optical element (30) for producing an inspection wave (32) from measurement radiation (22), a wavefront (42) of the inspection wave being adapted to a desired form (43) of the surface of the inspection object (14), the desired form being configured as a first non-spherical face; - a reference element (38) comprising a reference surface (40) which has the reference form (41), the reference form being configured as an additional non-spherical face; - a first retainer (60), which is configured such that, in a measurement configuration, the first retainer places the inspection object (14) in the beam path of the inspection wave (32); and - an additional retainer (62), which is configured such that, in the measurement configuration, the additional retainer places the reference element (38) in the beam path of a reference wave (34).

(57) Zusammenfassung: Eine Messvorrichtung (10) zum interferometrischen Vermessen einer Form einer Oberfläche (12) eines Prüflings (14) in Bezug auf eine Referenzform (41) umfasst ein diffraktives optisches Element (30) zum Erzeugen einer Prüfwellenfront (32) aus einer Messstrahlung (22), wobei eine Wellenfront (42) der Prüfwellenfront an eine als erste nicht-sphärische Fläche konfigurierte Sollform (43) der Oberfläche (12) des Prüflings (14) angepasst ist, ein Referenzelement (38) mit einer die Referenzform (41) aufweisenden Referenzoberfläche (40), wobei die Referenzform als eine weitere nicht-sphärische Fläche konfiguriert ist, eine erste Halterung (60), welche dazu konfiguriert ist, in einer Messkonfiguration den Prüfling (14) im Strahlengang der Prüfwellenfront (32) anzuordnen, sowie eine weitere Halterung (62), welche dazu konfiguriert ist, in der Messkonfiguration das Referenzelement (38) im Strahlengang einer Referenzwellenfront (34) anzuordnen.

RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, 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).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

Messvorrichtung zum interferometrischen Vermessen einer Oberflächenform

Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität der deutschen Patent-
anmeldung 10 2021 202 911.6 vom 25. März 2021. Die gesamte Offenbarung
dieser Patentanmeldung wird durch Bezugnahme in die vorliegende Anmeldung
aufgenommen.

Hintergrund der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine Messvorrichtung sowie ein Verfahren zum interferometrischen Vermessen einer Form einer Oberfläche eines Prüflings in Bezug auf eine Referenzform.

Zur hochgenauen Bestimmung einer als nicht-sphärische Fläche, wie etwa einer Freiformfläche, ausgebildeten Oberflächenform eines Prüflings, wie beispielsweise eines optischen Elements für die Mikrolithographie, sind interferometrische Messanordnungen mit einem diffraktiven optischen Element bekannt. Das diffraktive optische Element ist zum Beispiel als computergeneriertes Hologramm (CGH) ausgebildet und derart konfiguriert, dass es eine Prüfwelle mit einer an die Sollform der Oberfläche angepassten Wellenfront erzeugt. Hierfür notwendige diffraktive Strukturen können durch eine rechnergestützte Simulation der Messanordnung zusammen mit der Solloberfläche ermittelt und anschließend auf einem Substrat als CGH hergestellt werden. Durch eine Überlagerung der von der Oberfläche reflektierten Prüfwelle mit einer Referenzwelle lassen sich Abweichungen von der Sollform sehr genau bestimmen.

In DE 10 2015 209 490 A1 wird eine derartige Messanordnung beschrieben, welche als sogenanntes Referenzspiegel-Interferometer ausgebildet ist. Bei diesem erzeugt ein komplex kodierte CGH sowohl eine Prüfwelle mit einer an die Sollform angepassten Wellenfront als auch eine Referenzwelle. Während die Prüfwelle von der zu vermessenden Oberfläche zum CGH zurück reflektiert wird, weist

die Referenzwelle eine andere Ausbreitungsrichtung auf und trifft auf einen ebenen oder sphärischen Referenzspiegel. Von diesem wird die Referenzwelle ebenfalls zum CGH zurück reflektiert. Nach erneutem Durchlaufen des CGHs überlagern sich die reflektierte Prüfwelle und die Referenzwelle und erzeugen so am

5 Detektor ein Interferenzmuster.

Um eine hohe Messgenauigkeit bei der Oberflächenvermessung des Prüflings zu erzielen, werden herkömmlicherweise oft bei einer Bestimmung der Oberflächenform bekannte Fehler des CGHs, wie beispielsweise Störungen der CGH-

10 Oberfläche oder ein CGH-Justagezustand, berücksichtigt und heraus gerechnet. Entscheidend für die Genauigkeit der Oberflächenvermessung ist somit eine möglichst genaue Kalibrierung der Messanordnung. Dazu werden bei bekannten Messanordnungen mittels einem oder mehreren ebenen oder sphärischen Kalibrierspiegeln erzeugte Interferogramme ausgewertet, um Störungen durch Justage- oder Passefehler in der Messanordnung von dem eigentlichen Messsignal zu

15 trennen.

Die Verwendung von Kalibrierspiegeln zum Herausrechnen von durch das CGH verursachten Fehlern verursacht jedoch durch die dazu notwendige hohe Komplexität der interferometrischen Messanordnung sowie den hohen Zeitbedarf bei

20 der Kalibrierung einen hohen Aufwand.

Zugrunde liegende Aufgabe

Es ist eine Aufgabe der Erfindung, eine Messvorrichtung sowie ein Verfahren bereitzustellen, womit die vorgenannten Probleme gelöst werden, und insbesondere eine Oberflächenvermessung des Prüflings mit hoher Genauigkeit und vergleichbar geringem Aufwand ermöglicht wird.

Erfindungsgemäße Lösung

Die vorgenannte Aufgabe kann erfindungsgemäß beispielsweise gelöst werden mit einer Messvorrichtung zum interferometrischen Vermessen einer Form einer Oberfläche eines Prüflings in Bezug auf eine Referenzform. Die Messvorrichtung umfasst ein diffraktives optisches Element zum Erzeugen einer Prüfwellenfront aus einer Messstrahlung, wobei eine Wellenfront der Prüfwellenfront an eine als erste nicht-sphärische Fläche konfigurierte Sollform der Oberfläche des Prüflings angepasst ist, ein Referenzelement mit einer die Referenzform aufweisenden Referenzoberfläche, wobei die Referenzform als eine weitere nicht-sphärische Fläche konfiguriert ist, eine erste Halterung, welche dazu konfiguriert ist, in einer Messkonfiguration den Prüfling im Strahlengang der Prüfwellenfront anzuordnen, sowie eine weitere Halterung, welche dazu konfiguriert ist, in der Messkonfiguration das Referenzelement im Strahlengang einer Referenzwellenfront anzuordnen. Insbesondere weist die Referenzwellenfront eine an die Referenzform angepasste Wellenfront auf. Die Messvorrichtung ist insbesondere zum interferometrischen Vermessen einer Abweichung einer Form der optischen Oberfläche des Prüflings von der Referenzform konfiguriert. Gemäß einer Ausführungsform ist die Messvorrichtung zum interferometrischen Vermessen einer Form einer optischen Oberfläche eines optischen Elements einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, wie etwa eines Projektionsobjektivs einer derartigen Projektionsbelichtungsanlage, konfiguriert.

Unter einer nicht-sphärischen Fläche ist eine asphärische Fläche oder eine Freiformfläche zu verstehen. Unter einer asphärischen Fläche ist eine rotationssymmetrische Fläche zu verstehen, die von jeder beliebigen Sphäre um mindestens 0,05 mm, insbesondere um mindestens 0,1 mm, mindestens 1 mm oder mindestens 5 mm abweicht. Eine derartige asphärische Fläche wird in diesem Text auch als rotationssymmetrische Asphäre oder einfach nur als Asphäre bezeichnet. Unter einer Freiformfläche ist eine Form mit einer Abweichung von jeder beliebigen rotationssymmetrischen Asphäre von mindestens 5 μm , insbesondere mindestens +10 μm , zu verstehen. Weiterhin weicht die Freiformfläche von jeder beliebigen

Sphäre um mindestens 0,05 mm, insbesondere mindestens 0,1 mm, mindestens 1 mm oder mindestens 5 mm, ab. Insbesondere ist auch die Sollform der Prüflingsoberfläche als nicht-sphärische Fläche konfiguriert.

- 5 Die Wellenfront der Prüfwelle am Ort der Oberfläche des in der Messkonfiguration angeordneten Prüflings ist damit ebenfalls als nicht-sphärische Fläche konfiguriert, welche von der als erste nicht-sphärische Fläche bezeichneten Sollform nur unwesentlich, insbesondere um maximal 100 pm, abweicht.
- 10 Durch Auswertung eines durch Überlagerung der Prüfwelle mit der Referenzwelle erzeugten Interferenzmusters kann eine Abweichung der Oberflächenform des Prüflings von der Referenzform bestimmt werden. Dabei umfasst die so bestimmte Abweichung eine Verteilung von Abweichungswerten in Abhängigkeit von der zweidimensionalen Oberflächenkoordinate des Prüflings. Anhand der bestimmten
- 15 Abweichung kann dann die Prüflingsoberfläche so nachbearbeitet werden, dass die Form der Prüflingsoberfläche mit einer hohen Genauigkeit an die Referenzform angepasst wird. Mit anderen Worten kann die Referenzform bzw. das Referenzelement „kopiert“ werden. D.h. im Fall, dass ein optisches Element einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, welches ein gutes optisches
- 20 Verhalten zeigt, vorhanden ist, kann dieses optische Element als sogenannter „Masterprüfling“ Verwendung finden und mittels der erfindungsgemäßen Messvorrichtung „kopiert“ werden, d.h. ein weiteres optisches Element mit der gleichen Oberflächenform kann hergestellt werden.
- 25 Weiterhin ist es mittels der erfindungsgemäßen Messvorrichtung möglich, zufällige Fehler einer Bearbeitungsvorrichtung zur mechanischen Bearbeitung von Objektoberflächen zu identifizieren, indem zwei mittels der Bearbeitungsvorrichtung mit dem gleichen Bearbeitungsrezept gefertigte Objekte als Referenzelement und Prüfling vermessen werden. Während systematische Fehler der Bearbeitungsvorrichtung nicht zu einer Oberflächenabweichung führen, kann die mittels der Mess-
- 30 vorrichtung bestimmte relative Abweichung zwischen den Oberflächen auf zufällige Bearbeitungsfehler zurückgeführt werden. Diese Information kann ggf. dazu

genutzt werden, die zufälligen Fehler abzustellen und damit die Präzision der Bearbeitungsvorrichtung zu verbessern.

In dem Fall, in dem die Referenzform mit einer hohen absoluten Genauigkeit bekannt ist, d.h. das Referenzelement eine absolute Referenz darstellt, kann durch die Bestimmung der Oberflächenabweichung mittels der erfindungsgemäßen Messvorrichtung die Oberflächenform mit einer hohen Genauigkeit an die Sollform angepasst werden.

Durch die Konfiguration der Referenzform des Referenzelements als weitere nicht-sphärische Fläche ist es möglich, auch ohne den Einsatz von zusätzlichen Kalibrierspiegeln eine hohe Messgenauigkeit bei der Oberflächenvermessung des Prüflings zu erzielen. So ist es insbesondere möglich, nach einer Nutzmessung des Prüflings, bei welcher der Prüfling im Strahlengang der Prüfwelle und das Referenzelement im Strahlengang einer an die Referenzform angepassten Referenzwelle angeordnet sind, Prüfling und Referenzelement zu vertauschen und eine Vergleichsmessung durchzuführen, bei welcher das Referenzelement im Strahlengang der Prüfwelle und der Prüfling im Strahlengang der Referenzwelle angeordnet sind. Die Vergleichsmessung ermöglicht es, durch das diffraktive optische Element bedingte Fehler, wie etwa Schreibfehler in den diffraktiven Strukturen, Oberflächenfehler des diffraktiven optischen Elements und/oder Justagefehler des diffraktiven optischen Elements, aus dem Ergebnis der Nutzmessung herauszurechnen. Der Verzicht auf Kalibriermessungen mit Kalibrierspiegeln verringert den Zeitaufwand bei der Oberflächenvermessung erheblich.

Die auf dem Vertauschen des Prüflings und des Referenzelements beruhende Vergleichsmessung wird durch die erfindungsgemäße Konfiguration der Referenzform als weitere nicht-sphärische Fläche möglich. Diese ermöglicht es, die Referenzform derart ähnlich zur Oberflächenform des Prüflings, deren Sollform ja ebenfalls als nicht-sphärische Fläche konfiguriert ist, zu gestalten, dass bei Vertauschung von Prüfling und Referenzelement, die Prüfwelle und die Referenzwel-

le ausreichend genau an die Oberflächen der vertauschten Objekte angepasst sind, um bei der Vergleichsmessung aussagekräftige Messdaten zu erhalten.

5 Weiterhin ermöglicht der Verzicht auf eine Kalibrierung mit zusätzlichen Kalibrier-
spiegeln die Ausführung des diffraktiven optischen Elements als komplex kodier-
tes optisches Element mit einer geringeren Anzahl von Kodierungen, insbesonde-
re mit lediglich zwei Kodierungen, nämlich jeweils eine für die Prüfwelle und eine
für die Referenzwelle. Auf weitere Kodierungen zur Erzeugung von Kalibrierwellen
kann damit verzichtet werden. Damit entstehen im Vergleich zu einem diffraktiven
10 optischen Element mit mehr Kodierungen weniger Störreflexe, wodurch die
Messgenauigkeit weiter erhöht werden kann.

Weiterhin ermöglicht der Verzicht auf eine Kalibrierung mit zusätzlichen Kalibrier-
spiegeln Prüfgeometrien mit geringeren Liniendichten in der Beugungsstruktur
15 des diffraktiven optischen Elements, d.h. die Verwendung größerer Gitterperio-
den. Dies und die Ausführung des diffraktiven optischen Elements mit weniger
Kodierungen verringert die Fertigungsanforderungen an das diffraktive optische
Element.

20 Da der Prüfling erfindungsgemäß dem Prüfling in seiner Form zumindest dahin-
gehend ähnelt, dass beide Objekte an nicht-sphärische Flächen angepasst sind,
können die Gewichte der Prüfwelle und der Referenzwelle ähnlich groß gewählt
werden. Damit ergibt sich, unabhängig davon, ob die beiden Objekte beschichtet
oder unbeschichtet sind, immer der bestmögliche Kontrast. Im Stand der Technik
25 wird dagegen in der Regel bei der Konfiguration des Referenzspiegels ein Kom-
promiss zwischen dem Kontrast bei Vermessung eines unbeschichteten Spiegels
und der Vermessung eines beschichteten Spiegels gemacht.

Gemäß einer Ausführungsform ist sowohl die erste nicht-sphärische Fläche als
30 auch die weitere nicht-sphärische Fläche jeweils als Freiformfläche konfiguriert.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist das diffraktive optische Element weiterhin dazu konfiguriert, die Referenzwelle mit einer an die Referenzform angepassten Wellenfront zu erzeugen. Gemäß einer Ausführungsvariante ist das diffraktive optische Element mindestens zweifach kodiert, wobei eine erste Kodierung zur Erzeugung der Prüfwelle und eine zweite Kodierung zur Erzeugung der Referenzwelle konfiguriert sind. Ein derartiges mehrfach kodiertes diffraktives optisches Element umfasst ein komplex kodiertes Beugungsmuster, welches mehrere, im vorliegenden Fall mindestens zwei, sich überlagernde Strukturmuster, vorstehend Kodierungen bezeichnet, umfasst. Dabei erzeugt ein erstes der Strukturmuster die Prüfwelle und das zweite Strukturmuster die Referenzwelle.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform weicht die Referenzform höchstens 500 μm von der Sollform der Oberfläche des Prüflings ab. Insbesondere beträgt die Abweichung höchstens 100 μm . Das heißt, bei einer fiktiven Überlagerung der Referenzform mit der Sollform gibt es keinen Punkt auf der Referenzform, welcher von dem entsprechenden Punkt auf der Sollform der Prüflingsoberfläche mehr als 500 μm bzw. mehr als 100 μm abweicht. Bei dieser fiktiven Überlagerung der Referenzform mit der Sollform des Prüflings werden die Referenzform und die Sollform derart zueinander justiert, dass deren maximale Abweichung so klein wie möglich ist.

Damit weicht die als zweite nicht-sphärische Fläche bezeichnete Konfiguration der Referenzform höchstens 500 μm von der als erste nicht-sphärische Fläche bezeichneten Konfiguration der Sollform der Prüflingsoberfläche ab. Insbesondere weicht die Referenzform höchstens 500 μm von der Form der Wellenfront der Prüfwelle am Ort der Prüflingsoberfläche ab.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform weicht die Wellenfront der Prüfwelle am Ort der Oberfläche des in der Messkonfiguration angeordneten Prüflings höchstens 500 μm , insbesondere höchstens 100 μm , von der Wellenfront der Referenzwelle am Ort der Referenzoberfläche ab. Das heißt, für den Fall, dass die Form der Wellenfront der Prüfwelle am Ort der Oberfläche des Prüflings und die

Form der Wellenfront der Referenzwelle am Ort der Oberfläche des Referenzelements aufeinander gelegt werden, gibt es keinen Punkt auf der Wellenfront der Prüfwelle, welche von dem entsprechenden Punkt auf der Wellenfront der Referenzwelle um mehr als 500 μm bzw. um mehr als 100 μm abweicht.

5

Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist die Oberfläche des Prüflings einen in der Messkonfiguration von der Prüfwelle bestrahlten Messbereich auf und das Referenzelement umfasst einen in der Messkonfiguration von der Referenzwelle bestrahlten weiteren Messbereich, wobei die beiden Flächen der Messbereiche um mindestens 1%, insbesondere um mindestens 3% oder um mindestens 5%,
10 voneinander abweichen. So kann etwa der Messbereich des Prüflings mit einem Nutzbereich des Prüflings in seiner vorgesehenen Nutzenanwendung, wie etwa der Nutzung als Spiegel in einem Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie, übereinstimmen und der Messbereich des Referenzelements um den genannten Anteil größer sein. Umgekehrt kann auch der Messbereich des Prüflings gegenüber
15 dem Nutzbereich des Prüflings vergrößert sein und der Messbereich des Referenzelements der Fläche des Nutzbereichs des Prüflings entsprechen.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform wird ein erster Bereich des diffraktiven optischen Elements, an dem die Prüfwelle erzeugt wird, und ein weiterer Bereich
20 des diffraktiven optischen Elements, an dem die Referenzwelle erzeugt wird, einen Überlapp aufweisen, in dem mindestens 80%, insbesondere mindestens 90% oder mindestens 95%, der Fläche des größeren der beiden Bereiche angeordnet ist.

25

Die genannten Bereiche des diffraktiven optischen Elements werden in diesem Text auch als Footprints der Prüfwelle und der Referenzwelle bezeichnet. Mit anderen Worten, liegt für den Fall, dass der erste Bereich kleiner ist als der zweite Bereich, der erste Bereich entweder vollständig innerhalb des zweiten Bereichs
30 oder weist einen Überlapp mit dem zweiten Bereich auf, wobei der Überlapp mindestens 80% des zweiten Bereichs beträgt. In dieser Ausführungsform können bei der Nutzmessung auftretende Störreflexe am diffraktiven optischen Element mit-

tels der Vergleichsmessung mit vertauschten Messobjekten verodert werden. Störreflexe, welche etwa in der Prüfwelle enthalten sind, haben einen anderen Einfluss auf das Ergebnis der Nutzmessung als auf das Ergebnis der Vergleichsmessung. Damit kann deren Einfluss aus der Gesamtmessung herausgerechnet werden. Im Vergleich zu einem häufig im Stand der Technik verwendeten Veroderungsverfahren, bei dem die Nutzmessung mit einem zweiten diffraktiven optischen Element wiederholt wird, ist die vorstehend beschriebene Veroderung mit geringerem Aufwand verbunden. Die Gesamtmesszeit verkürzt sich damit weiter.

- 10 Die Vertauschbarkeit der Positionen von Prüfling und Referenzelement ermöglicht die vorstehend beschriebene Ausführung einer Vergleichsmessung zusätzlich zur Nutzmessung mit den beschriebenen Vorteilen.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform sind die beiden Halterungen an einem Aktuationsmodul gelagert, welches dazu konfiguriert ist, zur Anordnung des Prüflings und des Referenzelements in einer weiteren Messkonfiguration die beiden Halterungen derart zu bewegen, dass die jeweilige Position des Prüflings und des Referenzelements vertauscht werden. Mit anderen Worten sind die beiden Halterungen derart in dem Aktuationsmodul gelagert, dass die Halterungen in zumindest einem Starrkörperfreiheitsgrad zueinander bewegbar sind, d.h. die Halterungen sind z.B. zueinander verkippter, drehbar und/oder verschiebbar gelagert.

Gemäß einer Ausführungsvariante ist das Aktuationsmodul dazu konfiguriert, zur Anordnung des Prüflings und des Referenzelements in der weiteren Messkonfiguration die beiden Halterungen derart zu bewegen, dass neben der jeweiligen Position auch die jeweilige Orientierung und die jeweilige Kippstellung des Prüflings und des Referenzelements vertauscht werden.

Mit anderen Worten ist das Aktuationsmodul dazu konfiguriert, die Halterungen derart zu bewegen, dass sich nach der Bewegung der Prüfling in der Position und Kippstellung des Referenzelements vor der Bewegung und das Referenzelement in der Position und der Kippstellung des Prüflings vor der Bewegung befindet.

Durch den Austausch von Position und Kippstellung des Prüflings und des Referenzelements können insbesondere der Prüfling von einer ersten Messstellung, in der dessen Oberfläche von der Prüfwelle im passenden Winkel angestrahlt wird, in eine zweite Messstellung, in der dessen Oberfläche von der Referenzwelle im
5 passenden Winkel angestrahlt wird, und weiterhin das Referenzelement von einer ersten Messstellung, in der dessen Oberfläche von der Referenzwelle im passenden Winkel angestrahlt wird, in eine zweite Messstellung, in der dessen Oberfläche von der Prüfwelle im passenden Winkel angestrahlt wird, bewegt werden und umgekehrt.

10 Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist das Aktuationsmodul dazu konfiguriert, die beiden Halterungen um eine gemeinsame Rotationsachse zu drehen. Die Rotationsachse ist dabei insbesondere im Wesentlichen parallel zur Winkelhalbierenden der Ausbreitungsrichtungen der Prüfwelle und der Referenzwelle
15 angeordnet.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist das Aktuationsmodul dazu konfiguriert, mindestens eine der Halterungen in einer Translationsrichtung zu verschieben und/oder mindestens eine der Halterungen zu verkippen.

20 Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist das diffraktive optische Element dazu konfiguriert, die Prüfwelle und die Referenzwelle mit Ausbreitungsrichtungen zu erzeugen, welche gegenüber einer symmetrischen Anordnung der Ausbreitungsrichtungen jeweils eine Abweichung von höchstens 5° , insbesondere eine Abwei-
25 chung von höchstens 1° oder von höchstens $0,1^\circ$, aufweisen, wobei in der symmetrischen Anordnung die Ausbreitungsrichtungen bezüglich einer auf einem Beugungsmuster des diffraktiven optischen Elements senkrecht stehenden Achse symmetrisch angeordnet sind.

30 Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Referenzform an die Sollform der Prüflingsoberfläche angepasst und die beiden Halterungen sind derart angeordnet, dass eine Kippstellung des von der ersten Halterung gehaltenen Prüflings

gegenüber einer Richtung der Gravitationskraft einer Kippstellung des von der zweiten Halterung gehaltenen Referenzelements gegenüber der Richtung der Gravitationskraft entspricht. Zur Bestimmung der Orientierung des Referenzelements und des Prüflings in Bezug auf die Richtung der Gravitationskraft kann die Form des Referenzelements rechnerisch mittels eines mathematischen Fitting-Algorithmus an die Form des Prüflings angepasst werden und daraufhin die Orientierung der angepassten Form des Referenzelements identisch zur Orientierung der Form des Prüflings bestimmt werden.

- 10 Gemäß einer weiteren Ausführungsform sind der Prüfling und das Referenzelement in der Messkonfiguration hintereinander in einer sich teilweise überlappenden Stellung in den Strahlengängen der Prüfwelle und der Referenzwelle angeordnet. Mit anderen Worten ist das diffraktive optische Element dazu konfiguriert, die Prüfwelle und die Referenzwelle derart zu erzeugen, dass die Wellenfront der Prüfwelle die an die Sollform der Prüflingsoberfläche angepasste Form an einer Position aufweist, welche gegenüber einer weiteren Position, an der die Wellenfront der Referenzwelle an die Referenzform angepasst ist, derart weit versetzt ist, dass der Prüfling und das Referenzelement hintereinander in der sich teilweise überlappenden Stellung in den Strahlengängen der Prüfwelle und der Referenzwelle angeordnet werden können.

- Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist das diffraktive optische Element dazu konfiguriert, die Prüfwelle auf einen gegenüber einem Nutzbereich der Oberfläche erweiterten Messbereich der Oberfläche einzustrahlen. Beispielsweise ist der erweiterte Messbereich um mindestens 1%, insbesondere um mindestens 5% oder um mindestens 10%, gegenüber dem Nutzbereich vergrößert. Unter einem Nutzbereich der Oberfläche ist der Bereich der Oberfläche zu verstehen, welcher bei der bestimmungsgemäßen Verwendung des Prüflings genutzt wird. In dem Fall etwa, in dem der Prüfling ein optisches Element einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie ist, wird unter dem Nutzbereich seiner Oberfläche derjenige Bereich verstanden, welcher im in der Projektionsbelichtungsanlage eingebauten Zustand von der Belichtungsstrahlung angestrahlt wird.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist das Referenzelement ein Loch auf und das diffraktive optische Element ist dazu konfiguriert, die Prüfwelle mit einem konvergierenden Strahlengang derart zu erzeugen, dass eine Kaustik der Prüfwelle im Loch des im Strahlengang der Referenzwelle angeordneten Referenzelements erzeugt wird. Damit kann die Prüfwelle nach dem Durchlaufen des Loches des Referenzelements als expandierende Welle auf den Prüfling auftreffen. Mit anderen Worten kann damit die Prüfwelle in der Messanordnung des Referenzelements durch das Loch des Referenzelements hindurch treten und hinter dem Referenzelement auf den Prüfling treffen.

Die vorgenannte Aufgabe kann weiterhin beispielsweise gelöst werden mit einem Verfahren zum interferometrischen Vermessen einer Form einer Oberfläche eines Prüflings in Bezug auf eine Referenzform. Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst die Schritte: Einstrahlen zumindest eines Teils einer mittels eines diffraktiven optischen Elements erzeugten Prüfwelle auf die Oberfläche des Prüflings, welcher mittels einer ersten Halterung im Strahlengang der Prüfwelle angeordnet ist, wobei die Wellenfront der Prüfwelle an eine, als eine erste nicht-sphärische Fläche konfigurierte, Sollform der Oberfläche des Prüflings angepasst ist, Anordnen eines Referenzelements im Strahlengang einer Referenzwelle mittels einer weiteren Halterung, wobei das Referenzelement die Referenzform aufweisende Referenzoberfläche umfasst und wobei die Referenzform als eine weitere nicht-sphärische Fläche konfiguriert ist, sowie Überlagern der Prüfwelle nach Wechselwirkung mit der Oberfläche des Prüflings mit der Referenzwelle, deren Strahlung einer Wechselwirkung mit der Referenzoberfläche ausgesetzt war.

Gemäß einer Ausführungsform werden die Prüfwelle und die Referenzwelle durch Einstrahlen einer Messstrahlung auf das diffraktive optische Element erzeugt, wobei die Prüfwelle mit der Referenzwelle nach deren Wechselwirkung mit der Referenzoberfläche überlagert wird. Das heißt, die Prüfwelle wird nach Wechselwirkung mit der Oberfläche des Prüflings mit der Referenzwelle nach deren Wechsel-

selwirkung mit der Referenzoberfläche überlagert, d.h. nachdem die Referenzwelle mit der Oberfläche des Prüflings in Wechselwirkung getreten ist.

Die bezüglich der vorstehend aufgeführten Ausführungsformen, Ausführungsbeispiele bzw. Ausführungsvarianten, etc. der erfindungsgemäßen Messvorrichtung angegebenen Merkmale können entsprechend auf das erfindungsgemäße Messverfahren übertragen werden und umgekehrt. Diese und andere Merkmale der 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 einer Messvorrichtung mit einem diffraktiven optischen Element zum Erzeugen einer Prüfwelle zum interferometrischen Vermessen einer Abweichung einer Form einer optischen Oberfläche eines Prüflings von einer Referenzform eines Referenzelements,

Fig. 2 eine Ansicht des Referenzelements entlang der Linie II-II' in Fig. 1,

Fig. 3 eine Ansicht des diffraktiven optischen Elements entlang der Linie III-III' in Fig. 1,

Fig. 4 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Messvorrichtung mit einem diffraktiven optischen Element zum Erzeugen einer Prüfwelle zum interferometrischen Vermessen einer Abweichung einer Form einer optischen Oberfläche eines Prüflings von einer Referenzform eines Referenzelements,

5

Fig. 5 eine Ansicht des Referenzelements entlang der Linie V-V' in Fig. 4,

Fig. 6 eine Ansicht des diffraktiven optischen Elements entlang der Linie VI-VI' in Fig. 4,

10

Fig. 7 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Messvorrichtung mit einem diffraktiven optischen Element zum Erzeugen einer Prüfwelle zum interferometrischen Vermessen einer Abweichung einer Form einer optischen Oberfläche eines Prüflings von einer Referenzform eines Referenzelements,

15

Fig. 8 eine Ansicht des Referenzelements entlang der Linie VIII-VIII' in Fig. 7,

Fig. 9 eine Ansicht des diffraktiven optischen Elements entlang der Linie IX-IX' in Fig. 7,

20

Fig. 10 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Messvorrichtung mit einem diffraktiven optischen Element zum Erzeugen einer Prüfwelle zum interferometrischen Vermessen einer Abweichung einer Form einer optischen Oberfläche eines Prüflings von einer Referenzform eines Referenzelements,

25

Fig. 11 eine Veranschaulichung einer Asphäre und einer Freiformfläche,

Fig. 12 eine beispielhafte Veranschaulichung der Oberfläche des Prüflings sowie der Referenzform, sowie

30

Fig. 13 eine Ausführungsform einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem unter Verwendung der Messvorrichtung gemäß einer der Figuren 1, 4, 7 und 10 hergestellten optischen Element.

5

Detaillierte Beschreibung erfindungsgemäßer Ausführungsbeispiele

In den nachstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen bzw. Ausführungsformen oder Ausführungsvarianten sind funktionell oder strukturell einander 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.

15

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-Richtung nach oben.

20

In Fig. 1 wird ein Ausführungsbeispiel einer Messvorrichtung 10 zum interferometrischen Vermessen einer Form einer optischen Oberfläche 12 eines Prüflings 14 in Bezug auf eine Referenzform 41 durch interferometrisches Vermessen einer Abweichung der Form der optischen Oberfläche 12 des Prüflings 14 von der Referenzform 41 veranschaulicht. Als Prüfling 14 kann beispielsweise ein Spiegel eines Projektionsobjektivs für die EUV-Mikrolithographie mit einer als nicht-sphärische Fläche, insbesondere als asphärische Fläche oder als Freiformfläche FF, konfigurierten Oberfläche 12 zur Reflexion von EUV-Strahlung mit einer Wellenlänge von kleiner als 100 nm, insbesondere einer Wellenlänge von etwa 13,5 nm oder etwa 6,8 nm, vorgesehen sein.

30

Fig. 11 dient der Veranschaulichung einer asphärischen Fläche sowie einer Freiformfläche FF im Sinne dieses Textes. Unter einer asphärischen Fläche 16 ist eine rotationssymmetrische Fläche zu verstehen, die von jeder beliebigen Sphäre 16 um mindestens 0,05 mm, insbesondere um mindestens 0,1 mm, mindestens 1 mm oder mindestens 5 mm abweicht. Unter einer Freiformfläche FF wird jede Form verstanden, welche einerseits von jeder beliebigen rotationssymmetrischen Asphäre 16 eine Abweichung Δ_1 von mindestens 5 μm und andererseits von jeder beliebigen Sphäre 18 eine Abweichung Δ_2 von mindestens 1 mm aufweist. In Fig. 11 ist diejenige rotationssymmetrische Asphäre 16 aller beliebiger Asphären veranschaulicht, deren maximale Abweichung Δ_1 von der Freiformfläche FF am kleinsten ist, d.h. die in Fig. 11 eingezeichnete rotationssymmetrische Asphäre 16 ist die hinsichtlich ihrer maximalen Abweichung Δ_1 am besten an die Freiformfläche FF angepasste rotationssymmetrische Asphäre. Dies gilt analog auch für die in Fig. 11 veranschaulichte Sphäre 18. Die dargestellte Sphäre 18 ist diejenige Sphäre aller beliebigen Sphären, deren maximale Abweichung Δ_2 von der Freiformfläche FF am kleinsten ist, d.h. die in Fig. 11 eingezeichnete Sphäre 18 ist die hinsichtlich ihrer maximalen Abweichung Δ_2 am besten an die Freiformfläche FF angepasste Sphäre.

Fig. 12 veranschaulicht beispielhaft ein Profil der als nicht-sphärische Fläche, in diesem Fall als Freiformfläche FF, ausgebildeten Oberfläche 12 des Prüflings sowie das entsprechende Profil der ebenfalls als nicht-sphärische Fläche, in diesem Fall als Freiformfläche FF, ausgebildeten Referenzform 41.

Die in Fig. 1 veranschaulichte Messvorrichtung 10 enthält eine Strahlungsquelle 20 zum Bereitstellen einer ausreichend kohärenten Messstrahlung 22 als Eingangswelle. In diesem Ausführungsbeispiel umfasst die Strahlungsquelle 20 einen Wellenleiter 24 mit einer Austrittsfläche, an welcher die Eingangswelle ihren Ursprung hat. Der Wellenleiter 24 ist an ein Strahlungserzeugungsmodul 26, z.B. in Gestalt eines Lasers, angeschlossen. Dazu kann beispielsweise ein Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von ungefähr 633 nm vorgesehen sein. Die Messstrahlung 22 kann aber auch eine andere Wellenlänge im sichtbaren oder

nicht sichtbaren Wellenlängenbereich elektromagnetischer Strahlung aufweisen. Die Strahlungsquelle 20 mit dem Wellenleiter 24 stellt lediglich ein Beispiel einer für die Messvorrichtung verwendbaren Strahlungsquelle 26 dar. In alternativen Ausführungen kann anstelle des Wellenleiters 24 eine optische Anordnung mit
5 Linsenelementen, Spiegelementen oder dergleichen zur Bereitstellung einer geeigneten Eingangswelle aus der Messstrahlung 22 vorgesehen sein.

Die Messstrahlung 22 durchläuft zunächst einen Strahlteiler 28 und trifft daraufhin auf ein diffraktives optisches Element 30 mit einem an einer Oberfläche angeord-
10 neten Beugungsmuster 31. Das diffraktive optische Element 30 ist Teil einer Prüfoptik, welche dazu dient, eine Prüfwelle 32 zum Einstrahlen auf die Oberfläche 12 des Prüflings 14 zu erzeugen. Das diffraktive optische Element 30 erzeugt neben der Prüfwelle 32 eine Referenzwelle 34 aus der auftreffenden Messstrahlung 22.

15 Weiterhin umfasst die Messvorrichtung 10 ein Referenzelement 38 mit einer optisch wirksamen Fläche in Gestalt einer Referenzoberfläche 40 zur Reflexion der Referenzwelle 34 in eine zurücklaufende Referenzwelle 34r. Die Referenzoberfläche 40 weist dabei die Referenzform 41 auf, welche ebenfalls als eine nicht-
20 sphärische Fläche, d.h. als Asphäre oder als Freiformfläche FF (vgl. wie vorstehende Erläuterung unter Bezugnahme auf Fig. 11), konfiguriert ist. Das Referenzelement 38 entspricht dabei insbesondere, abgesehen von geringfügigen Abweichungen in der Referenzoberfläche 40 gegenüber der Oberfläche 12, in Form, Aussehen und Beschaffenheit dem Prüfling 14. Somit ist im dargestellten Fall die
25 Referenzoberfläche 40 als Spiegeloberfläche ausgebildet. Gemäß eines alternativen Ausführungsbeispiels kann das Referenzelement 38 sowie der Prüfling 12 auch jeweils als Linse konfiguriert sein, welche in Zusammenwirkung mit einem Spiegel die zurücklaufende Referenzwelle 34r bzw. eine zurücklaufende Prüfwelle 32r erzeugt. Im Fall einer Linse wird unter der optisch wirksamen Fläche eine mit
30 der Referenzwelle 34 bzw. der Prüfwelle 32 wechselwirkende Linsenoberfläche verstanden.

Das diffraktive optische Element 30 ist als komplex kodierte CGH ausgebildet, wobei dessen Beugungsmuster 31 gemäß des in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiels durch zwei in einer Ebene sich überlagernd angeordnete diffraktive Strukturmuster, auch Kodierungen genannt, gebildet wird. Das diffraktive optische Element 30 wird daher auch als zweifach kodiert bezeichnet. Alternativ kann das Beugungsmuster auch mehr als zwei in einer Ebene überlagernd angeordnete diffraktive Strukturmuster, z.B. fünf sich überlagernd angeordnete diffraktive Strukturmuster, zur zusätzlichen Erzeugung von Kalibrierwellen aufweisen. Die Prüfoptik zur Erzeugung der Prüfwelle 32 kann auch aus mehr als einem diffraktiven optischen Element, wie etwa aus zwei nacheinander angeordneten diffraktiven optischen Elementen, bestehen.

Die beiden diffraktiven Strukturmuster des diffraktiven optischen Elements 30 gemäß Fig. 1 können z.B. durch ein erstes Strukturmuster in Gestalt eines Grundgitters und ein zweites diffraktives Strukturmuster in Gestalt eines Übergitters gebildet werden. Eines der diffraktiven Strukturmuster ist zur Erzeugung der Prüfwelle 32 konfiguriert, welche auf den Prüfling 14 gerichtet ist und eine zumindest teilweise an eine Sollform 43 der optischen Oberfläche 12 angepasste Wellenfront 42 aufweist. Die Prüfwelle 32 bestrahlt dabei einen Messbereich 56 auf dem Prüfling 14, dessen Durchmesser 56d in der Zeichnungsebene in Fig. 1 mit einem Doppelpfeil dargestellt ist. Dabei entspricht in der hier dargestellten Konfiguration der Messbereich 56 exakt oder im Wesentlichen, d.h. mit einer maximalen Abweichung von etwa 1%, der zu prüfenden optischen Oberfläche 12 bzw. einem Nutzbereich der optischen Oberfläche 12. Die Prüfwelle 32 wird an der optischen Oberfläche 12 des Prüflings 14 reflektiert und läuft als zurücklaufende Prüfwelle 32r zum diffraktiven optischen Element 30 zurück. Aufgrund der an die Sollform 43 der optischen Oberfläche 12 angepassten Wellenfront 42 trifft die Prüfwelle 32 an jedem Ort der optischen Oberfläche 12 im Wesentlichen senkrecht auf die optische Oberfläche 12 auf und wird in sich zurückreflektiert.

Das andere diffraktive Strukturmuster erzeugt die Referenzwelle 34, welche auf das Referenzelement 38 gerichtet ist und eine an die Referenzform 41, d.h. die

Form der Referenzoberfläche 40, angepasste Wellenfront 44 aufweist. Dabei bestrahlt die Referenzwelle 34 einen weiteren Messbereich 58 auf dem Referenzelement 38. Der Durchmesser 58d des weiteren Messbereichs ist in Fig. 1 mit einem Doppelpfeil gekennzeichnet. Der bestrahlte weitere Messbereich 58 ist in
5 der hier dargestellten Konfiguration kleiner als die Referenzoberfläche 40, d.h. weist eine Abweichung von mindestens 1% auf, liegt aber innerhalb derselben, wie nachstehend unter Bezugnahme auf Fig. 2 näher erläutert wird.

Die von der Oberfläche 12 des Prüflings 14 zurücklaufende Prüfwelle 32r durchläuft das diffraktive optische Element 30 erneut und wird dabei abermals gebeugt.
10 Dabei erfolgt eine Rücktransformation der zurücklaufenden Prüfwelle 32r in eine annähernd sphärische Welle, wobei deren Wellenfront Abweichungen der Oberfläche 12 des Prüflings 14 von der Sollform 43 entsprechende Abweichungen von einer sphärischen Wellenfront aufweist.

Auch die von der Referenzoberfläche 40 des Referenzelements 38 reflektierte zurücklaufende Referenzwelle 34r durchläuft das diffraktive optische Element 30 erneut und wird dabei abermals gebeugt. Dabei erfolgt eine Rücktransformation der zurücklaufenden Referenzwelle 34r in eine annähernd sphärische Welle.
15

Das diffraktive optische Element 30 dient somit auch zur Überlagerung der zurücklaufenden Prüfwelle 32r mit der zurücklaufenden Referenzwelle 34r. Ferner enthält die Messvorrichtung 10 eine Erfassungseinrichtung mit dem bereits vorstehend erwähnten Strahlteiler 28 zum Herausführen der Kombination aus der
20 zurücklaufenden Prüfwelle 32r und der zurücklaufenden Referenzwelle 34r aus dem Strahlengang der eingestrahlten Messstrahlung 22 und einer Beobachtungseinheit 46 zum Erfassen eines durch Überlagerung der Prüfwelle 32r mit der Referenzwelle 34r erzeugten Interferogramms.

Die zurücklaufende Prüfwelle 32r und die zurücklaufende Referenzwelle 34r treffen als konvergente Strahlen auf den Strahlteiler 28 und werden von diesem in Richtung der Beobachtungseinheit 46 reflektiert. Beide konvergente Strahlen
30

durchlaufen eine Blende 48 sowie ein Okular 50 der Beobachtungseinheit 46 und treffen schließlich auf einen zweidimensional auflösenden Detektor 52 der Beobachtungseinheit 46. Der Detektor 52 kann beispielsweise als CCD-Sensor ausgebildet sein und erfasst ein durch die interferierenden Wellen erzeugtes Interferogramm.

Weiterhin umfasst die Messvorrichtung 10 eine Auswerteeinrichtung 54 zur Bestimmung der Abweichung der optischen Oberfläche 12 des Testobjekts 14 von der Referenzform 41, d.h. der Form der Referenzoberfläche 40, aus dem erfassten Interferogramm bzw. mehreren erfassten Interferogrammen. Dazu verfügt die Auswerteeinrichtung 54 über eine geeignete Datenverarbeitungseinheit und verwendet entsprechende, dem Fachmann bekannte Berechnungsverfahren. Alternativ oder zusätzlich kann die Messvorrichtung 10 einen Datenspeicher oder eine Schnittstelle zu einem Netzwerk enthalten, um eine Bestimmung der Abweichung der Oberflächenform mittels des gespeicherten bzw. über das Netzwerk übertragenen Interferogramms durch eine externe Auswertungseinheit zu ermöglichen.

Die Messvorrichtung 10 umfasst weiterhin eine erste Halterung 60 zum Halten des Prüflings 14 sowie eine zweite Halterung 62 zum Halten des Referenzelements 38. In der im linken Abschnitt von Fig. 1 gezeigten Messkonfiguration der Messvorrichtung 10 ist die Halterung 60 derart positioniert, dass der Prüfling 14, wie vorstehend erwähnt, im Strahlengang der Prüfwelle 32 angeordnet ist. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel kann es sich bei dem Prüfling 14 beispielsweise um den Spiegel M4 der nachstehend unter Bezugnahme auf Fig. 13 näher beschriebenen Projektionsbelichtungsanlage 101 für die Mikrolithographie handeln. In der Messvorrichtung 10 ist der Prüfling 14 in der gleichen Orientierung gegenüber der Gravitationskraft G angeordnet wie im in der Projektionsbelichtungsanlage 101 eingebauten Zustand, also in der gleichen Orientierung des Spiegels M4 gemäß Fig. 13 gegenüber der Gravitationskraft G . Wie in Fig. 1 veranschaulicht, ist die Orientierung des Prüflings 14 in der Messvorrichtung 10 derart eingestellt, dass die optische Oberfläche 12 in einem zentralen Bereich um einen Winkel α gegenüber der Gravitationskraft G verkippt ist. Analog dazu ist die Verkipfung

des zentralen Bereiches der optischen Oberfläche des Spiegels M4 gegenüber der Gravitationskraft G um den Winkel α in Fig. 13 eingezeichnet. Das Referenzelement 38 ist in der analogen Orientierung gegenüber der Gravitationskraft G angeordnet, d.h. das Referenzelement 38 ist derart orientiert, dass die Referenz-

5 oberfläche 40 in einem zentralen Bereich um den Winkel α gegenüber der Gravitationskraft G verkippt ist. Der Winkel α ist in der im linken Abschnitt von Fig. 1 dargestellten ersten Messkonfiguration aufgrund von Platzproblemen bezüglich des Referenzelements 38, anders als in der im rechten Abschnitt von Fig. 1 dargestellten zweiten Messkonfiguration, nicht eingezeichnet.

10 Durch die Anordnung des Prüflings 14 in der gleichen Orientierung gegenüber der Gravitationskraft G wie im in der Projektionsbelichtungsanlage 101 eingebauten Zustand wird sichergestellt, dass eine aufgrund einer Verformungswirkung der Gravitationskraft G an der optischen Oberfläche 12 des in der Projektionsbelich-

15 tungsanlage 101 montierten Spiegels M4 auftretende Formänderung analog an der optischen Oberfläche 12 des in der Messvorrichtung 10 angeordneten Prüflings 14 auftritt. Damit kann sichergestellt werden, dass das in der Messvorrichtung 10 ermittelte Messergebnis auf den Betrieb in der Projektionsbelichtungsanlage 101 übertragbar ist.

20 Fig. 2 veranschaulicht eine Ansicht des Referenzelements 38 entlang der Linie II-II' in Fig. 1, d.h. in Draufsicht auf die die Referenzoberfläche 40 umfassende Unterseite des Referenzelements 38. Dabei ist die in der Draufsicht eingenommene Blickrichtung parallel zur Ausbreitungsrichtung 34a der Referenzwelle 34. Da die

25 Referenzoberfläche 40 des Referenzelements 38 der optischen Oberfläche 12 des Prüflings 14 entspricht, entspricht die in Fig. 2 mit einer durchgezogenen Linie dargestellte Referenzoberfläche 40 dem Messbereich 56 auf dem Prüfling 14. Der von der Referenzwelle 34 bestrahlte weitere Messbereich 58 ist, wie bereits vorstehend erwähnt, in der hier dargestellten Konfiguration kleiner als der Messbe-

30 reich 56. Dabei ist die Fläche des weiteren Messbereichs 58 mindestens 1% kleiner, insbesondere mindestens 10% kleiner, als die Fläche des Messbereichs 56. Weiterhin ist insbesondere auch der Durchmesser 58d des Messbereichs 58 in

der Zeichenebene von Fig. 1 mindestens 1% kleiner, insbesondere mindestens 10% kleiner, als der Durchmesser 56d des Messbereichs 56 in der Zeichenebene von Fig. 1.

- 5 Dieser Zusammenhang ist dadurch bedingt, dass in der in Fig. 1 dargestellten Konfiguration aufgrund der vorstehend erläuterten Orientierung des Prüflings 14 gegenüber der Gravitationskraft G, eine symmetrische Anordnung von Prüfling 14 und Referenzelement 38 in der Messvorrichtung 10 räumlich nicht möglich ist. Wie in Fig. 1 ersichtlich, sind das Referenzelement 38 und der Prüfling 14 in der
- 10 ersten Messkonfiguration in einer überlappenden Stellung unterschiedlich nahe am diffraktiven optischen Element 30 angeordnet. Weiterhin sind auch die Ausbreitungsrichtungen 32a und 34a der Prüfwelle 32 bzw. der Referenzwelle 34 nicht genau symmetrisch in Bezug auf eine senkrecht auf dem Beugungsmuster 31 des diffraktiven optischen Elements 30 stehenden zentralen Achse 36. Gemäß
- 15 einem Ausführungsbeispiel weisen die Ausbreitungsrichtungen 32a und 34a der Prüfwelle 32 bzw. der Referenzwelle 34 gegenüber einer fiktiven, bezüglich der zentralen Achse 36 exakt symmetrischen, Anordnung der Ausbreitungsrichtungen jeweils eine Abweichung von mehr als 5°, insbesondere von mehr als 10°, auf.
- 20 Fig. 3 veranschaulicht die jeweilige Entstehungszone 32e und 34e bzw. den jeweiligen Footprint der Prüfwelle 32 bzw. der Referenzwelle 34 auf dem diffraktiven optischen Element 30 in einer Ansicht des diffraktiven optischen Elements 30 entlang der Linie III-III' in Fig. 1, d.h. in Draufsicht auf die das Beugungsmuster 31 aufweisende Seite des diffraktiven optischen Elements 30. Die Entstehungszonen
- 25 32e und 34e werden in diesem Text auch als erster bzw. zweiter Bereich des diffraktiven optischen Elements 30 bezeichnet. Die Entstehungszone 32e der den Messbereich 56 bestrahlenden Prüfwelle 32 ist kleiner als die Entstehungszone 34e der den Messbereich 58 bestrahlenden Referenzwelle 34 und liegt vollständig innerhalb der Entstehungszone 34e. Mit anderen Worten weisen die Entste-
- 30 hungszonen 32e und 34e einen Überlapp auf, der im vorliegenden Fall der Entstehungszone 32e entspricht. Das Größenverhältnis der Entstehungszonen 32e und 34e verhält sich invers zum Größenverhältnis der Messbereiche 56 und 58.

Die beiden Halterungen 60 und 62 sind an einem Aktuationsmodul 64 gelagert, welches dazu konfiguriert ist, den Prüfling 14 und das Referenzelement 38 zu vertauschen. Unter dem Vertauschen der beiden Objekte ist zu verstehen, die jeweilige Position, die jeweilige Orientierung sowie die jeweilige Kippstellung des Prüflings 14 und des Referenzelements 38 zu vertauschen, d.h. der Prüfling 14 wird beim Vertauschen an der bisherigen Position, in der bisherigen Orientierung und der bisherigen Kippstellung des Referenzelements 38 angeordnet. Analog dazu wird das Referenzelement in 38 beim Vertauschen an der bisherigen Position, in der bisherigen Orientierung und der bisherigen Kippstellung des Prüflings 14 angeordnet. Beim Vertauschen des Prüflings 14 und des Referenzelements 38 wird die im linken Abschnitt von Fig. 1 gezeigte erste Messkonfiguration der Messvorrichtung 10 in die im rechten Abschnitt von Fig. 1 gezeigte zweite Messkonfiguration der Messvorrichtung 10 umgewandelt. In der Darstellung der zweiten Messkonfiguration der Messvorrichtung 10 sind zur Zeichnungsvereinfachung die Strahlungsquelle 20, der Strahlteiler 28 und die Beobachtungseinheit 46 weglassen.

Mit anderen Worten werden, ausgehend von der ersten Messkonfiguration, zur Anordnung des Prüflings 14 und des Referenzelements 38 in der zweiten Messkonfiguration die beiden Halterungen 60 und 62 von dem Aktuationsmodul 64 derart bewegt, dass anstelle des Prüflings 14 das Referenzelement 38 in der gleichen Position, Stellung und Orientierung wie zuvor der Prüfling im Strahlengang der Prüfwelle 32 angeordnet wird. Weiterhin wird durch die Bewegung der beiden Halterungen 60 und 62 bewirkt, dass anstelle des Referenzelements 38 der Prüfling 14 in der gleichen Position, Stellung und Orientierung wie zuvor das Referenzelement 38 im Strahlengang der Referenzwelle 34 angeordnet wird.

In dem in Fig. 1 gezeigten Ausführungsbeispiel umfasst das Aktuationsmodul 64 eine Basisplatte 66, welche zur Drehung um eine Rotationsachse 70 gelagert ist. Die Rotationsachse 66 ist parallel oder im Wesentlichen parallel zur zentralen Achse 36 ausgerichtet, welche senkrecht auf dem diffraktiven optischen Element

30 steht. Insbesondere ist die Rotationsachse 70 im Wesentlichen parallel zu einer Winkelhalbierenden der Ausbreitungsrichtungen 32a und 34a der Prüfwelle 32 und der Referenzwelle 34. Unter „im Wesentlichen parallel“ wird hier verstanden, dass die Abweichung von der parallelen Anordnung nicht mehr als 10° , insbesondere nicht mehr als 5° beträgt. An der Basisplatte 66 sind zwei Verschiebemodule 72 und 74, beispielsweise in Gestalt von Teleskopstangen, angeordnet, an denen die Halterungen 60 und 62 verkipppbar befestigt sind. Die Verschiebemodule 72 und 74 ermöglichen eine Verschiebung der Halterungen 60 und 62 in einer parallel zur Rotationsachse 70 angeordneten Translationsachse 76. Die Verkipppbarkeit der Halterungen 60 und 62, die in Fig. 1 mit gebogenen Doppelpfeilen gekennzeichnet ist, bezieht sich auf quer zur Rotationsachse 70 ausgerichtete Kippachsen 78.

Zur Umgestaltung der Messvorrichtung 10 aus der im linken Abschnitt von Fig. 1 dargestellten ersten Messkonfiguration in die im rechten Abschnitt der Figur dargestellten zweiten Messkonfiguration wird die Basisplatte 66 um 180° bezüglich der Rotationsachse gedreht. Weiterhin wird die den Prüfling 14 haltende erste Halterung 60 entlang der Translationsachse 76 von der Basisplatte 66 weggeschoben und die das Referenzelement 38 haltende zweite Halterung 62 entlang der Translationsachse 76 zur Basisplatte 66 hingeschoben. Darüber hinaus werden die Halterungen 60 und 62 derart bezüglich der Kippachsen 78 verkippt, dass die Oberfläche 12 des Prüfling 14 und die Referenzoberfläche 40 des Referenzelements 38 senkrecht zu den Ausbreitungsrichtungen 34a und 32a der Referenzwelle 34 und der Prüfwelle 32 angeordnet sind.

Im Messbetrieb wird gemäß einem Ausführungsbeispiel zunächst eine Nutzmessung in der im linken Abschnitt von Fig. 1 dargestellten ersten Messkonfiguration, in der das Testobjekt 14 im Strahlengang der Prüfwelle 32 angeordnet ist, durchgeführt. Daraufhin wird eine Vergleichsmessung in der im rechten Abschnitt von Fig. 1 dargestellten zweiten Messkonfiguration, in der das Testobjekt 14 und das Referenzelement 38 vertauscht sind, durchgeführt. Aus den bei der Nutzmessung und der Vergleichsmessung vom Detektor 52 erfassten Interferogrammen wird in

der Auswerteeinrichtung 54 die Abweichung der Oberfläche 12 des Prüflings 14 von der Sollform 43 ermittelt.

5 Dabei wird anhand des mindestens einen bei der Vergleichsmessung gemessenen Interferogramms durch das diffraktive optische Element 30 bedingte Fehler, wie etwa Schreibfehler im Beugungsmuster 31, Oberflächenfehler des diffraktiven optischen Elements 30 und/oder Justagefehler des diffraktiven optischen Elements 30, aus dem Ergebnis der Nutzmessung herausgerechnet.

10 Wie vorstehend mit Bezug auf Fig. 3 erläutert, liegt die Entstehungszone 32e der Prüfwelle 32 auf dem diffraktiven optischen Element 30 vollständig innerhalb der Entstehungszone 34e der Referenzwelle 34, d.h. die beiden Entstehungszonen 32e und 34e weisen einen Überlapp auf, der im vorliegenden Fall der Entstehungszone 32e entspricht, d.h. im Überlapp ist 100% der Fläche der Entstehungszone 32e, d.h. der kleineren der beiden Entstehungszonen 32e und 34e, angeordnet. Weiterhin weist die größere Entstehungszone 34e einen nicht mit der Entstehungszone 32e überlappenden Bereich 33f auf, wobei die Fläche des nichtüberlappenden Bereichs 33f höchstens 20% der Fläche der Entstehungszone 34e beträgt.

20 Aufgrund dieses Umstands können Störreflexe am diffraktiven optischen Element 30, welche bei der Nutzmessung auftreten, mittels der Vergleichsmessung verodert werden. Störreflexe, welche etwa in der Prüfwelle 32 enthalten sind, haben einen anderen Einfluss auf das Ergebnis der Nutzmessung als auf das Ergebnis der Vergleichsmessung. Damit kann deren Einfluss aus der Gesamtmessung herausgerechnet werden. Bei der Vergleichsmessung in der vertauschten Anordnung von Prüfling 14 und Referenzelement 38 können hingegen die Störreflexe, im nichtüberlappenden Bereich 33f der Entstehungszonen 32e und 34e nicht verodert werden. Da der nichtüberlappende Bereich 33f erheblich kleiner ist als
30 der überlappende Bereich, überwiegt insgesamt der durch die Veroderung erzielte Effekt.

In Fig. 4 wird ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Messvorrichtung 10 zum interferometrischen Vermessen einer Abweichung einer Form einer optischen Oberfläche 12 eines Prüflings 14 von einer Referenzform 41 veranschaulicht. Der Prüfling 14 verkörpert dabei wie im Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1 den Spiegel M4 der in Fig. 13 dargestellten Projektionsbelichtungsanlage 101. Das Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 4 unterscheidet sich dahingehend von dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1, dass der Prüfling 14 und das Referenzelement 38 derart angeordnet sind, dass die beiden Objekte durch lediglich eine Rotation um die Rotationsachse 70 vertauscht werden können. Wie bereits vorstehend erwähnt, ist unter dem Vertauschen von Prüfling 14 und Referenzelement 38 zu verstehen, dass die jeweilige Position, die jeweilige Orientierung sowie die jeweilige Kippstellung des Prüflings 14 und des Referenzelements 38 vertauscht werden.

Im linken Abschnitt von Fig. 4 ist die Messvorrichtung 10 in der ersten Messkonfiguration gezeigt, in der die Nutzmessung ausgeführt wird, und im rechten Abschnitt von Fig. 4 ist die Messvorrichtung 10 in der zweiten Messkonfiguration gezeigt, in welcher der Prüfling 14 und das Referenzelement 38 vertauscht angeordnet sind und in welcher die Vergleichsmessung ausgeführt wird. Zur Zeichnungsvereinfachung sind in der Darstellung gemäß Fig. 4 jeweils die Strahlungsquelle 20, der Strahlteiler 28 und die Beobachtungseinheit 46 weggelassen.

Um das Vertauschen der beiden den Prüfling 14 und das Referenzelement 38 umfassenden Objekte durch lediglich eine Rotation um die Rotationsachse 70 zu bewerkstelligen, sind die beiden Objekte symmetrisch bezüglich der zentralen Achse 36 angeordnet, welche mit der Rotationsachse 70 übereinstimmt. Dabei sind die beiden Objekte so angeordnet, dass einerseits die Oberfläche 12 des Testobjekts 14 und andererseits die Referenzoberfläche 40 des Referenzelements 38 jeweils in einem zentralen Bereich um den gleichen Winkel β gegenüber der Gravitationskraft G verkippt sind. Der Winkel β unterscheidet sich jedoch vom Winkel α , um den der durch den Prüfling 12 verkörperte Spiegel M4 in der Projektionsbelichtungsanlage 101 gemäß Fig. 13 gegenüber der Gravitationskraft G

verkippt ist. Weiterhin sind der Prüfling und das Referenzelement 38 gleich weit vom diffraktiven optischen Element 30 entfernt angeordnet.

Aufgrund der vereinfachten Anforderung bei der Tauschbewegung, weist das Ak-
5 tuationsmodul 64 gemäß Fig. 4 lediglich eine Dreheinrichtung um die Rotations-
achse 70 auf. Die in dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 1 vorgesehenen Ver-
schiebemodule 72 und 74 sowie die Verkipppbarkeit um die Kippachsen 78 werden
nicht benötigt.

10 Fig. 5 veranschaulicht eine Ansicht des Referenzelements 38 entlang der Linie V-
V' in Fig. 4, d.h. eine Draufsicht auf die die Referenzoberfläche 40 umfassende
Unterseite des Referenzelements 38 (vgl. Fig. 2). Aufgrund der symmetrischen
Anordnung von Prüfling 14 und Referenzelement 38 ist der von der Referenzwelle
34 bestrahlte weitere Messbereich 58 auf der Referenzoberfläche 40 genauso
15 groß wie der von der Prüfwelle 32 bestrahlte Messbereich 56 auf der Oberfläche
12, welcher einem Nutzbereich der Oberfläche 12 in der Projektionsbelichtungs-
anlage 101 entspricht. Insbesondere ist auch der Durchmesser 58d des Messbe-
reichs 58 in der Zeichenebene von Fig. 4 genau so groß wie der Durchmesser
56d des Messbereichs 56 in der Zeichenebene.

20 Fig. 6 veranschaulicht die jeweilige Entstehungszone 32e bzw. 34e bzw. den je-
weiligen Footprint der Prüfwelle 32 bzw. der Referenzwelle 34 auf dem diffrakti-
ven optischen Element 30 in einer Ansicht des diffraktiven optischen Elements 30
entlang der Linie VI-VI' in Fig. 4, d.h. in Draufsicht auf die das Beugungsmuster
25 31 aufweisende Seite des diffraktiven optischen Elements 30 (vgl. Fig. 3). Die
Entstehungszone 32e der den Messbereich 56 bestrahlenden Prüfwelle 32 ist
genauso groß wie die Entstehungszone 34e der den Messbereich 58 bestrahlen-
den Referenzwelle 34 und ist bezüglich der Entstehungszone 34e zumindest na-
hezu deckungsgleich angeordnet. Mit anderen Worten weisen in dem vorliegen-
30 den Ausführungsbeispiel die Entstehungszonen 32e und 34e einen Überlapp auf,
der sowohl der Entstehungszone 32e als auch der Entstehungszone 34e ent-
spricht. Anders als in dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 3 ist hier kein nicht-

überlappender Bereich 33f vorhanden und es kann sowohl bei der Nutzmessung als auch bei der Vergleichsmessung eine vollflächige Veroderung erfolgen.

In Fig. 7 wird ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Messvorrichtung 10 zum interferometrischen Vermessen einer Abweichung einer Form einer optischen Oberfläche 12 eines Prüflings 14 von einer Referenzform 41 veranschaulicht. Der Prüfling 14 verkörpert dabei wie im Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 4 einen Spiegel der in Fig. 13 dargestellten Projektionsbelichtungsanlage 101, dieser Spiegel unterscheidet sich jedoch von dem im Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 4 verwendeten Spiegel M4, wie nachstehend näher erläutert. Das Ausführungsbeispiel der Messvorrichtung 10 gemäß Fig. 7 entspricht weitgehend der Messvorrichtung 10 gemäß Fig. 4, insbesondere darin, dass der Prüfling 14 und das Referenzelement 38 derart angeordnet sind, dass diese durch lediglich eine Rotation um die Rotationsachse 70 vertauscht werden können.

Im linken Abschnitt von Fig. 7 ist die Messvorrichtung 10 in der ersten Messkonfiguration gezeigt, in der die Nutzmessung ausgeführt wird, und im rechten Abschnitt von Fig. 4 ist die Messvorrichtung 10 in der zweiten Messkonfiguration gezeigt, in welcher der Prüfling 14 und das Referenzelement 38 vertauscht angeordnet sind und in welcher die Vergleichsmessung ausgeführt wird. Zur Zeichnungsvereinfachung sind in der Darstellung gemäß Fig. 7 jeweils die Strahlungsquelle 20, der Strahlteiler 28 und die Beobachtungseinheit weggelassen.

Das Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 7 unterscheidet sich lediglich darin, dass sich der dem Nutzbereich der Oberfläche 12 des Prüflings 14 in der Projektionsbelichtungsanlage 101 entsprechende Messbereich 56 auf der Oberfläche 12 nicht genau mit dem Messbereich 58 auf dem Referenzelement 38 deckt, wie nachstehend mit Bezugnahme auf Fig. 8 näher erklärt. In Fig. 7 sind zu Veranschaulichungszwecken eine fiktive Prüfwellenlänge 32f (in durchgezogenen Linien) sowie eine fiktive Referenzwellenlänge 34f (in unterbrochenen Linien mit kurzen Strichen) dargestellt. Die fiktive Prüfwellenlänge 32f beleuchtet in der, im linken Abschnitt von Fig. 7 dargestellten, ersten Messkonfiguration genau den Messbereich 56 auf der

Oberfläche 12 und die fiktive Referenzwelle 34f genau den Messbereich 58 auf der Referenzoberfläche 40, welcher dem Nutzbereich bzw. dem Messbereich 56 der Oberfläche 12 in der, im rechten Abschnitt von Fig. 7 dargestellten, zweiten Messkonfiguration entspricht.

5

Fig. 8 veranschaulicht eine Ansicht des Referenzelements 38 entlang der Linie VIII-VIII' in Fig. 7, d.h. in Draufsicht auf die die Referenzoberfläche 40 umfassende Unterseite des Referenzelements 38 (vgl. Fig. 2). Aufgrund der symmetrischen Anordnung von Prüfling 14 und Referenzelement 38 ist der von der Referenzwelle 34f bestrahlte weitere Messbereich 58 auf der Referenzoberfläche 40 zwar flächenmäßig im Wesentlichen genauso groß wie der von der Prüfwelle 32f bestrahlte Messbereich 56 auf der Oberfläche 12, jedoch sind die Messbereiche 56 und 58 wegen fehlender x-Achsen-Symmetrie der in Fig. 8 dargestellten Draufsichtsf lächen der Messbereiche 56 und 58 nicht deckungsgleich. In den sich nicht deckenden Bereichen gibt es nicht-interferierende Bereiche 80a der Prüfwelle 32f sowie nicht-interferierende Bereiche 80b der Referenzwelle 34f. Die nicht-interferierenden Bereiche 80a der Prüfwelle 32f verhindern die interferometrische Vermessung der entsprechenden Abschnitte des Oberfläche in der ersten Messkonfiguration und die nicht-interferierenden Bereiche 80b der Referenzwelle 34f verhindern deren interferometrische Vermessung in der zweiten Messkonfiguration.

10

15

20

Durch Verkipfung des diffraktiven optischen Elements 30 um die x- und/oder y-Achse kann der Messbereich 58 gegenüber der Entsprechung des Messbereichs 56 auf dem Referenzelement 38 verschoben werden. Damit dann bei Bedarf der Überlapp des Messbereichs 58 mit der Entsprechung des Messbereichs 56 auf dem Referenzelement 38 optimiert werden.

25

Um der Problematik einer trotz Kipp-Optimierung nicht vollständig deckungsgleichen Überlagerung der Messbereiche 56 und 58 abzuhelpen, wird in dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 7 das diffraktive optische Element 30 so konfiguriert, dass die Prüfwelle 32 und die Referenzwelle 34 gegenüber der fiktiven Prüfwelle

30

32f bzw. der fiktiven Referenzwelle 34f derart aufgeweitet wird, dass jeweils ein
erweiterter Messbereich 82 auf der Oberfläche 12 und der Referenzoberfläche 40
bestrahlt wird. Die aufgeweitete Prüfwelle 32 und die aufgeweitete Referenzwelle
34 sind in Fig. 7 jeweils durch unterbrochene Linien mit langen Strichen darge-
stellt. Wie aus Fig. 8 ersichtlich, ist der erweiterte Messbereich 82 derart konfigu-
riert, dass die Messbereiche 56 und 58 vollständig von diesem umschlossen sind.
Damit sind auch die für die fiktiven Wellen 32f und 34f beschriebenen nicht-
interferierenden Bereiche 80a und 80b vom erweiterten Messbereich 82 um-
schlossen, wodurch auch die diesen Bereichen entsprechenden Abschnitte der
optischen Oberfläche 12 interferometrisch vermessen werden können. In Fig. 7
sind jeweils die Durchmesser 56d, 58d und 82d des Messbereichs 56, des weite-
ren Messbereichs 58 bzw. des erweiterten Messbereichs 82 in der Zeichenebene
angedeutet.

Um den erweiterten Messbereich 82 nutzen zu können, ist die Oberfläche 12 des
Prüflings 14 gegenüber dem Messbereich 56, welche ja dem Nutzbereich des
Prüflings 14 in der Projektionsbelichtungsanlage 101 entspricht, entsprechend
vergrößert ausgeführt. Mit anderen Worten wird im Design des als Prüfling 14
dienenden Spiegels die Oberfläche 12 etwas größer konfiguriert als derjenige Be-
reich, welcher zur Reflexion der Belichtungsstrahlung 116 gemäß Fig. 13 benötigt
wird, d.h. der Strahlengang der Belichtungsstrahlung 116 deckt nicht die gesamte
Oberfläche 12 des Spiegels ab, sondern lediglich den etwas kleineren Nutzbe-
reich.

Fig. 9 veranschaulicht die jeweilige Entstehungszone 32e und 34e bzw. den je-
weiligen Footprint der fiktiven Prüfwelle 32f bzw. der fiktiven Referenzwelle 34f
sowie eine Projektion bzw. einen Footprint des erweiterten Messbereiches 82 auf
dem diffraktiven optischen Element 30 in einer Ansicht des diffraktiven optischen
Elements 30 entlang der Linie IX-IX' in Fig. 7, d.h. in Draufsicht auf die das Beu-
gungsmuster 31 aufweisende Seite des diffraktiven optischen Elements 30 (vgl.
Fig. 3).

In Fig. 10 wird ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Messvorrichtung 10 zum interferometrischen Vermessen einer Abweichung einer Form einer optischen Oberfläche 12 eines Prüflings 14 von einer Referenzform 41 eines Referenzelements 38 veranschaulicht. Der Prüfling 14 verkörpert dabei beispielsweise den Spiegel M6 der in Fig. 13 dargestellten Projektionsbelichtungsanlage 101. Der Spiegel M6 ist dadurch gekennzeichnet, dass er im Zentrum eine Öffnung bzw. ein Loch 84 aufweist, durch das die Belichtungsstrahlung 116 im Strahlengang der Projektionsbelichtungsanlage 101 zunächst hindurch tritt, bevor sie nach Reflexion am Spiegel M5 am Spiegel M6 reflektiert wird.

Im linken Abschnitt von Fig. 10 ist die Messvorrichtung 10 in der ersten Messkonfiguration gezeigt, in der die bereits unter Bezugnahme auf vorstehenden Ausführungsbeispiele der Messvorrichtung 10 erläuterte Nutzmessung ausgeführt wird. Im rechten Abschnitt von Fig. 10 ist die Messvorrichtung 10 in der zweiten Messkonfiguration gezeigt, in welcher der Prüfling 14 und das, abgesehen von geringfügigen Abweichungen in der Referenzoberfläche 40 entsprechend zum Prüfling konfigurierte, Referenzelement 38 vertauscht angeordnet sind und in welcher die bereits unter Bezugnahme auf vorstehende Ausführungsbeispiele der Messvorrichtung erläuterte Vergleichsmessung ausgeführt wird. Zur Zeichnungsvereinfachung sind in der Darstellung gemäß Fig. 10 jeweils die Strahlungsquelle 20, der Strahlteiler 28 und die Beobachtungseinheit 46 weggelassen.

Das Ausführungsbeispiel der Messvorrichtung 10 gemäß Fig. 10 unterscheidet sich von der Messvorrichtung 10 gemäß Fig. 1 dahingehend, dass das Referenzelement 38 und der Prüfling 14 hintereinander angeordnet sind, und zwar hintereinander in Richtung der Ausbreitungsrichtung 32a der Prüfwelle 32. Die vom diffraktiven optischen Element 30 erzeugte Prüfwelle 32 weist einen konvergierenden Strahlengang auf, welcher derart konfiguriert ist, dass in der ersten Messkonfiguration eine Kaustik 86 der Prüfwelle 32 im Loch 84 des Referenzelements 38 erzeugt wird und damit die Prüfwelle 32 ungestört durch das Loch 84 des Referenzelements 38 hindurch treten kann und im weiteren Verlauf als expandierende Welle auf die Oberfläche 12 des Prüflings 14 trifft. Die Referenzwelle 34 wird vom diffraktiven optischen Element 30 als expandierende Welle erzeugt und trifft auf die

Referenzoberfläche 40 des Referenzelements 38 auf. Die Auswertung des durch Überlagerung der zurücklaufenden Prüfwellen 32r und der zurücklaufenden Referenzwellen 34r erzeugten Interferogramms erfolgt wie mit Bezugnahme auf die Ausführungsform gemäß Fig. 1 beschrieben.

5

Zum Umwandeln der ersten Messkonfiguration in die im rechten Abschnitt von Fig. 10 gezeigte zweite Messkonfiguration der Messvorrichtung 10 ist die Basisplatte 64 zum Drehen um eine quer zur Ausbreitungsrichtung 32a der Prüfwellen angeordnete Rotationsachse 70 gelagert. Außerdem sind die Halterungen 60 und 62 zur Drehung um eine jeweilige Rotationsachse 88 bzw. 90 gelagert. Zum Übergang von der ersten Messkonfiguration in die zweite Messkonfiguration wird nun die Basisplatte um 180° in Bezug auf die Rotationsachse 70 und die Halterungen 60 und 62 ebenfalls jeweils um 180° in Bezug auf die Rotationsachsen 88 und 90 gedreht.

15

Im Folgenden werden unter Bezugnahme auf Fig. 13 exemplarisch die wesentlichen Bestandteile der bereits vorstehend erwähnten Projektionsbelichtungsanlage 101 für die Mikrolithographie beschrieben, in der ein unter Verwendung der vorstehend beschriebenen Messvorrichtung 10 hergestelltes optisches Element zum Einsatz kommen kann. Die Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus der Projektionsbelichtungsanlage 101 sowie deren Bestandteile sei hierbei nicht einschränkend verstanden. Bei der hier beschriebenen Projektionsbelichtungsanlage 101 handelt es sich um eine Ausführungsform für die EUV-Lithographie. Analog dazu kann ein unter Verwendung der Messvorrichtung 10 hergestelltes optisches Element auch in einer Projektionsbelichtungsanlage für die DUV-Lithographie zum Einsatz kommen. Weiterhin kann ein unter Verwendung der Messvorrichtung 10 hergestelltes optisches Element für beliebige optische Anwendungen mit Asphären oder Freiformflächen, z.B. Gleitsichtbrillengläser etc., zum Einsatz kommen.

25
30

Ein Beleuchtungssystem 102 der Projektionsbelichtungsanlage 101 umfasst neben einer Strahlungsquelle 103 die bereits vorstehend erwähnte Beleuchtungsop-

tik 104 zur Beleuchtung eines Objektfeldes 105 in einer Objektebene 106. Belichtet wird hierbei ein im Objektfeld 105 angeordnetes Retikel 107. Das Retikel 107 ist von einem Retikelhalter 108 gehalten. Der Retikelhalter 108 ist über einen Retikelverlagerungsantrieb 109 insbesondere in einer Scanrichtung verlagerbar.

5

In Fig. 13 ist zur Erläuterung ein kartesisches xyz-Koordinatensystem eingezeichnet. Die y-Richtung verläuft senkrecht in die Zeichenebene hinein. Die x-Richtung verläuft horizontal und die z-Richtung verläuft vertikal. Die Scanrichtung verläuft in der Fig. 13 längs der x-Richtung. Die z-Richtung verläuft senkrecht zur Objektebene 106.

10

Die Projektionsbelichtungsanlage 101 umfasst weiterhin das bereits vorstehend erwähnte Projektionsobjektiv 110. Das Projektionsobjektiv 110 dient zur Abbildung des Objektfeldes 105 in ein Bildfeld 111 in einer Bildebene 112. Die Bildebene 112 verläuft parallel zur Objektebene 106. Alternativ ist auch ein von 0° verschiedener Winkel zwischen der Objektebene 106 und der Bildebene 112 möglich.

15

Abgebildet wird eine Struktur auf dem Retikel 107 auf eine lichtempfindliche Schicht eines im Bereich des Bildfeldes 111 in der Bildebene 112 angeordneten Wafers 113. Der Wafer 113 wird von einem Waferhalter 114 gehalten. Der Waferhalter 114 ist über einen Waferverlagerungsantrieb 115 insbesondere längs der y-Richtung verlagerbar. Die Verlagerung einerseits des Retikels 107 über den Retikelverlagerungsantrieb 109 und andererseits des Wafers 113 über den Waferverlagerungsantrieb 115 kann synchronisiert zueinander erfolgen.

20

25

Bei der Strahlungsquelle 103 handelt es sich um eine EUV-Strahlungsquelle. Die Strahlungsquelle 103 emittiert Belichtungsstrahlung 116, insbesondere in Form von EUV-Strahlung, welche im Folgenden auch als Nutzstrahlung bezeichnet wird. Die Nutzstrahlung hat insbesondere eine Wellenlänge im Bereich zwischen 5 nm und 30 nm, insbesondere eine Wellenlänge von etwa 13,5 nm oder etwa 6,8 nm. Bei der Strahlungsquelle 103 kann es sich um eine Plasmaquelle handeln,

30

zum Beispiel um eine LPP (Laser Produced Plasma, mithilfe eines Lasers erzeugtes Plasma)-Quelle oder um eine DPP (Gas Discharged Produced Plasma, mittels Gasentladung erzeugtes Plasma)-Quelle. Es kann sich auch um eine synchrotronbasierte Strahlungsquelle handeln. Bei der Strahlungsquelle 103 kann es
5 sich auch um einen Freie-Elektronen-Laser (Free-Electron-Laser, FEL) handeln.

Die Belichtungsstrahlung 116, die von der Strahlungsquelle 103 ausgeht, wird von einem Kollektor 117 gebündelt. Bei dem Kollektor 117 kann es sich um einen Kollektor mit einer oder mit mehreren ellipsoidalen und/oder hyperboloiden Reflexionsflächen handeln. Die mindestens eine Reflexionsfläche des Kollektors 117
10 kann im streifenden Einfall (Grazing Incidence, GI), also mit Einfallswinkeln größer als 45° , oder im normalen Einfall (Normal Incidence, NI), also mit Einfallswinkeln kleiner als 45° , mit der Belichtungsstrahlung 116 beaufschlagt werden. Der Kollektor 117 kann einerseits zur Optimierung seiner Reflektivität für die Nutzstrahlung und andererseits zur Unterdrückung von Falschlicht strukturiert
15 und/oder beschichtet sein.

Nach dem Kollektor 117 propagiert die Belichtungsstrahlung 116 durch einen Zwischenfokus in einer Zwischenfokusebene 118. Die Zwischenfokusebene 118
20 kann eine Trennung zwischen einem Strahlungsquellenmodul, aufweisend die Strahlungsquelle 103 und den Kollektor 117, und der Beleuchtungsoptik 104 darstellen. Der Verlauf der Belichtungsstrahlung 116 durch die Beleuchtungsoptik 104 sowie das Projektionsobjektiv 110 wird nachfolgend als Nutzstrahlengang 124 bezeichnet.

25

Die Beleuchtungsoptik 104 umfasst einen Umlenkspiegel 119 und diesem im Strahlengang nachgeordnet einen ersten Facettenspiegel 120. Bei dem Umlenkspiegel 119 kann es sich um einen planen Umlenkspiegel oder alternativ um einen Spiegel mit einer über die reine Umlenkungswirkung hinaus bündelbeeinflussenden Wirkung handeln. Alternativ oder zusätzlich kann der Spiegel 119 als
30 Spektralfilter ausgeführt sein, der eine Nutzlichtwellenlänge der Belichtungsstrahlung 116 von Falschlicht einer hiervon abweichenden Wellenlänge trennt. Sofern

der erste Facettenspiegel 120 in einer Ebene der Beleuchtungsoptik 104 angeordnet ist, die zur Objektebene 106 als Feldebene optisch konjugiert ist, wird dieser auch als Feldfacettenspiegel bezeichnet. Der erste Facettenspiegel 120 umfasst eine Vielzahl von einzelnen ersten Facetten 121, welche im Folgenden auch
5 als Feldfacetten bezeichnet werden. Von diesen Facetten 121 sind in Fig. 13 nur beispielhaft einige dargestellt.

Die ersten Facetten 121 können als makroskopische Facetten ausgeführt sein, insbesondere als rechteckige Facetten oder als Facetten mit bogenförmiger oder
10 teilkreisförmiger Randkontur. Die ersten Facetten 121 können als plane Facetten oder alternativ als konvex oder konkav gekrümmte Facetten ausgeführt sein.

Wie beispielsweise aus DE 10 2008 009 600 A1 bekannt ist, können die ersten Facetten 121 selbst jeweils auch aus einer Vielzahl von Einzelspiegeln, insbesondere einer Vielzahl von Mikrospiegeln, zusammengesetzt sein. Der erste Facettenspiegel 120 kann insbesondere als mikroelektromechanisches System
15 (MEMS-System) ausgebildet sein. Für Details wird auf DE 10 2008 009 600 A1 verwiesen.

20 Zwischen dem Kollektor 117 und dem Umlenkspiegel 119 verläuft die Belichtungsstrahlung 116 horizontal, also längs der y-Richtung.

Im Nutzstrahlengang der Beleuchtungsoptik 104 ist dem ersten Facettenspiegel 120 der bereits vorstehend erwähnte zweite Facettenspiegel 122 nachgeordnet.
25 Sofern der zweite Facettenspiegel 122 in einer Pupillenebene der Beleuchtungsoptik 104 angeordnet ist, wird dieser auch als Pupillenfacettenspiegel bezeichnet. Der zweite Facettenspiegel 122 kann auch beabstandet zu einer Pupillenebene der Beleuchtungsoptik 104 angeordnet sein. In diesem Fall wird die Kombination aus dem ersten Facettenspiegel 120 und dem zweiten Facettenspiegel 122 auch
30 als spekulärer Reflektor bezeichnet. Spekulare Reflektoren sind aus US2006/0132747 A1, EP 1 614 008 B1 und US 6,573,978 bekannt.

Der zweite Facettenspiegel 122 umfasst eine Mehrzahl von zweiten Facetten 123. Die zweiten Facetten 123 werden im Falle eines Pupillenfacettenspiegels auch als Pupillenfacetten bezeichnet.

- 5 Bei den zweiten Facetten 123 kann es sich ebenfalls um makroskopische Facetten, die beispielsweise rund, rechteckig oder auch hexagonal berandet sein können, oder alternativ um aus Mikrosiegeln zusammengesetzte Facetten handeln. Diesbezüglich wird ebenfalls auf DE 10 2008 009 600 A1 verwiesen.
- 10 Die zweiten Facetten 123 können plane, oder alternativ konvex oder konkav gekrümmte, Reflexionsflächen aufweisen.

Die Beleuchtungsoptik 104 bildet somit ein doppelt facettiertes System. Dieses grundlegende Prinzip wird auch als Fliegenaugeintegrator (Fly's Eye Integrator)

15 bezeichnet.

Es kann vorteilhaft sein, den zweiten Facettenspiegel 122 nicht exakt in einer Ebene, welche zu einer Pupillenebene des Projektionsobjektivs 119 optisch konjugiert ist, anzuordnen.

20

Mit Hilfe des zweiten Facettenspiegels 122 werden die einzelnen ersten Facetten 121 in das Objektfeld 105 abgebildet. Der zweite Facettenspiegel 122 ist der letzte bündelformende oder auch tatsächlich der letzte Spiegel für die Belichtungsstrahlung 116 im Nutzstrahlengang 124 vor dem Objektfeld 105.

25

Bei einer weiteren, nicht dargestellten Ausführung der Beleuchtungsoptik 104 kann im Nutzstrahlengang zwischen dem zweiten Facettenspiegel 122 und dem Objektfeld 105 eine Übertragungsoptik angeordnet sein, die insbesondere zur Abbildung der ersten Facetten 121 in das Objektfeld 105 beiträgt. Die Übertragungsoptik kann genau einen Spiegel, alternativ aber auch zwei oder mehr Spiegel aufweisen, welche hintereinander im Nutzstrahlengang der Beleuchtungsoptik

30 104 angeordnet sind. Die Übertragungsoptik kann insbesondere einen oder zwei

Spiegel für senkrechten Einfall (NI-Spiegel, Normal Incidence Spiegel) und/oder einen oder zwei Spiegel für streifenden Einfall (GI-Spiegel, Gracing Incidence Spiegel) umfassen.

- 5 Die Beleuchtungsoptik 104 umfasst bei der Ausführung, die in Fig. 13 gezeigt ist, nach dem Kollektor 117 genau drei Spiegel, nämlich den Umlenkspiegel 119, den Feldfacettenspiegel 120 und den Pupillenfacettenspiegel 122.

- Bei einer weiteren Ausführung der Beleuchtungsoptik 104 kann der Umlenkspiegel 119 auch entfallen, so dass die Beleuchtungsoptik 104 nach dem Kollektor 117 dann genau zwei Spiegel aufweisen kann, nämlich den ersten Facettenspiegel 120 und den zweiten Facettenspiegel 122.

- Die Abbildung der ersten Facetten 121 mittels der zweiten Facetten 123 beziehungsweise mit den zweiten Facetten 123 und einer Übertragungsoptik in die Objektebene 106 ist regelmäßig nur eine näherungsweise Abbildung.

- Das Projektionsobjektiv 110 umfasst eine Mehrzahl von Spiegeln M_i , welche gemäß ihrer Anordnung im Nutzstrahlengang der Projektionsbelichtungsanlage 101 durchnummeriert sind.

- Bei dem in Fig. 13 dargestellten Beispiel umfasst das Projektionsobjektiv 110 sechs Spiegel M_1 bis M_6 . Alternativen mit vier, acht, zehn, zwölf oder einer anderen Anzahl an Spiegeln M_i sind ebenso möglich. Der vorletzte Spiegel M_5 und der letzte Spiegel M_6 haben jeweils eine Durchtrittsöffnung in Form des vorstehend erwähnten Lochs 84 für die Belichtungsstrahlung 116. Bei dem Projektionsobjektiv 110 handelt es sich um eine doppelt obskurierte Optik. Das Projektionsobjektiv 110 hat eine bildseitige numerische Apertur, die größer ist als 0,5 und die auch größer sein kann als 0,6 und die beispielsweise 0,7 oder 0,75 betragen kann.

30

Reflexionsflächen der Spiegel M_i können als Freiformflächen ohne Rotations-symmetrieachse ausgeführt sein. Alternativ können die Reflexionsflächen zumin-

dest mancher der Spiegel M_i als asphärische Flächen mit genau einer Rotations-symmetrieachse der Reflexionsflächenform gestaltet sein. Die Spiegel M_i können, genauso wie die Spiegel der Beleuchtungsoptik 4, hoch reflektierende Beschichtungen für die Belichtungsstrahlung 116 aufweisen. Diese Beschichtungen können als Multilayer-Beschichtungen, insbesondere mit alternierenden Lagen aus Molybdän und Silizium, gestaltet sein.

Das Projektionsobjektiv 110 hat einen großen Objekt-Bildversatz in der y-Richtung zwischen einer y-Koordinate eines Zentrums des Objektfeldes 105 und einer y-Koordinate des Zentrums des Bildfeldes 111. Dieser Objekt-Bild-Versatz in der y-Richtung kann in etwa so groß sein wie ein z-Abstand zwischen der Objektebene 106 und der Bildebene 112.

Das Projektionsobjektiv 110 kann insbesondere anamorphotisch ausgebildet sein. Es weist insbesondere unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe β_x , β_y in x- und y-Richtung auf. Die beiden Abbildungsmaßstäbe β_x , β_y des Projektionsobjektivs 110 liegen bevorzugt bei $(\beta_x, \beta_y) = (+/- 0,25, +/- 0,125)$. Ein positiver Abbildungsmaßstab β bedeutet eine Abbildung ohne Bildumkehr. Ein negatives Vorzeichen für den Abbildungsmaßstab β bedeutet eine Abbildung mit Bildumkehr.

Das Projektionsobjektiv 110 führt somit in x-Richtung, das heißt in Richtung senkrecht zur Scanrichtung, zu einer Verkleinerung im Verhältnis 4:1. Das Projektionsobjektiv 110 führt in y-Richtung, das heißt in Scanrichtung, zu einer Verkleinerung von 8:1. Andere Abbildungsmaßstäbe sind ebenso möglich. Auch vorzeichengleiche und absolut gleiche Abbildungsmaßstäbe in x- und y-Richtung, zum Beispiel mit Absolutwerten von 0,125 oder von 0,25, sind möglich.

Die Anzahl von Zwischenbildebene in der x- und in der y-Richtung im Nutzstrahlengang zwischen dem Objektfeld 105 und dem Bildfeld 111 kann gleich sein oder kann, je nach Ausführung des Projektionsobjektivs 110, unterschiedlich sein. Beispiele für Projektionsobjektive mit unterschiedlichen Anzahlen derartiger Zwischenbilder in x- und y-Richtung sind bekannt aus US 2018/0074303 A1 bekannt.

Jeweils eine der Pupillenfacetten 123 ist genau einer der Feldfacetten 121 zur Ausbildung jeweils eines Beleuchtungskanals zur Ausleuchtung des Objektfeldes 105 zugeordnet. Es kann sich hierdurch insbesondere eine Beleuchtung nach dem Köhlerschen Prinzip ergeben. Das Fernfeld wird mit Hilfe der Feldfacetten 121 in eine Vielzahl an Objektfeldern 105 zerlegt. Die Feldfacetten 121 erzeugen eine Mehrzahl von Bildern des Zwischenfokus auf den diesen jeweils zugeordneten Pupillenfacetten 123.

Die Feldfacetten 121 werden jeweils von einer zugeordneten Pupillenfacette 123 einander überlagernd zur Ausleuchtung des Objektfeldes 105 auf das Retikel 107 abgebildet. Die Ausleuchtung des Objektfeldes 105 ist insbesondere möglichst homogen. Sie weist vorzugsweise einen Uniformitätsfehler von weniger als 2 % auf. Die Felduniformität kann über die Überlagerung unterschiedlicher Beleuchtungskanäle erreicht werden.

Durch eine Anordnung der Pupillenfacetten kann geometrisch die Ausleuchtung der Eintrittspupille des Projektionsobjektivs 110 definiert werden. Durch Auswahl der Beleuchtungskanäle, insbesondere der Teilmenge der Pupillenfacetten, die Licht führen, kann die Intensitätsverteilung in der Eintrittspupille des Projektionsobjektivs 110 eingestellt werden. Diese Intensitätsverteilung wird auch als Beleuchtungssetting bezeichnet.

Eine ebenfalls bevorzugte Pupillenuniformität im Bereich definiert ausgeleuchteter Abschnitte einer Beleuchtungspupille der Beleuchtungsoptik 104 kann durch eine Umverteilung der Beleuchtungskanäle erreicht werden.

Im Folgenden werden weitere Aspekte und Details der Ausleuchtung des Objektfeldes 105 sowie insbesondere der Eintrittspupille des Projektionsobjektivs 110 beschrieben.

Das Projektionsobjektiv 110 kann insbesondere eine homozentrische Eintrittspupille aufweisen. Diese kann zugänglich sein. Sie kann auch unzugänglich sein.

Die Eintrittspupille des Projektionsobjektivs 110 lässt sich regelmäßig mit dem Pupillenfacettenspiegel 122 nicht exakt ausleuchten. Bei einer Abbildung des Projektionsobjektivs 110, welche das Zentrum des Pupillenfacettenspiegels 122 telezentrisch auf den Wafer 113 abbildet, schneiden sich die Aperturstrahlen oftmals nicht in einem einzigen Punkt. Es lässt sich jedoch eine Fläche finden, in welcher der paarweise bestimmte Abstand der Aperturstrahlen minimal wird. Diese Fläche stellt die Eintrittspupille oder eine zu ihr konjugierte Fläche im Ortsraum dar. Insbesondere zeigt diese Fläche eine endliche Krümmung.

Es kann sein, dass das Projektionsobjektiv 110 unterschiedliche Lagen der Eintrittspupille für den tangentialen und für den sagittalen Strahlengang aufweist. In diesem Fall sollte ein abbildendes Element, insbesondere ein optisches Bauelement der Übertragungsoptik, zwischen dem zweiten Facettenspiegel 122 und dem Retikel 107 bereitgestellt werden. Mit Hilfe dieses optischen Elements kann die unterschiedliche Lage der tangentialen Eintrittspupille und der sagittalen Eintrittspupille berücksichtigt werden.

Bei der in Fig. 13 dargestellten Anordnung der Komponenten der Beleuchtungsoptik 104 ist der Pupillenfacettenspiegel 122 in einer zur Eintrittspupille des Projektionsobjektivs 110 konjugierten Fläche angeordnet. Der Feldfacettenspiegel 120 ist verkippt zur Objektebene 105 angeordnet. Der erste Facettenspiegel 120 ist verkippt zu einer Anordnungsebene angeordnet, die vom Umlenkspiegel 119 definiert ist.

Der erste Facettenspiegel 120 ist verkippt zu einer Anordnungsebene angeordnet, die vom zweiten Facettenspiegel 122 definiert ist.

Die vorstehende Beschreibung beispielhafter Ausführungsbeispiele, Ausführungsformen bzw. Ausführungsvarianten ist exemplarisch zu verstehen. Die damit er-

folgte 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
5 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.

Bezugszeichenliste

10	Messvorrichtung
12	Oberfläche
5 14	Prüfling
16	rotationssymmetrische Asphäre
18	Sphäre
20	Strahlungsquelle
22	Messstrahlung
24	Wellenleiter
26	Strahlungserzeugungsmodul
28	Strahlteiler
30	diffraktives optisches Element
31	Beugungsmuster
32	Prüfwelle
32a	Ausbreitungsrichtung der Prüfwelle
32e	Entstehungszone der Prüfwelle
32r	zurücklaufende Prüfwelle
33f	nichtüberlappender Bereich
34	Referenzwelle
34a	Ausbreitungsrichtung der Referenzwelle
34e	Entstehungszone der Referenzwelle
34r	zurücklaufende Referenzwelle
36	zentrale Achse
38	Referenzelement
40	Referenzoberfläche
41	Referenzform
42	Wellenfront der Prüfwelle
43	Sollform der Oberfläche
44	Wellenfront der Referenzwelle
46	Beobachtungseinheit
48	Blende

	50	Okular
	52	Detektor
	54	Auswerteeinrichtung
	56	Messbereich
5	56d	Durchmesser des Messbereichs
	58	weiterer Messbereich
	58d	Durchmesser des weiteren Messbereichs
	60	erste Halterung
	62	zweite Halterung
10	64	Aktuationsmodul
	66	Basisplatte
	70	Rotationsachse
	72	Verschiebemodul
	74	Verschiebemodul
15	76	Translationsachse
	78	Kippachse
	80a	nicht-interferierender Bereich
	80b	nicht-interferierender Bereich
	82	erweiterter Messbereich
20	82d	Durchmesser des erweiterten Messbereichs
	84	Loch
	86	Kaustik
	88	Rotationsachse
	90	Rotationsachse
25	101	Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie
	102	Beleuchtungssystem
	103	Strahlungsquelle
	104	Beleuchtungsoptik
	105	Objektfeld
30	106	Objektebene
	107	Retikel
	108	Retikelhalter

- 109 Retikelverlagerungsantrieb
- 110 Projektionsobjektiv
- 111 Bildfeld
- 112 Bildebene
- 5 113 Wafer
- 114 Waferhalter
- 115 Waferverlagerungsantrieb
- 116 Belichtungsstrahlung
- 117 Kollektor
- 10 118 Zwischenfokusebene
- 119 Umlenkspiegel
- 120 erster Facettenspiegel
- 121 Facetten
- 122 zweiter Facettenspiegel
- 15 123 Facetten
- 124 Nutzstrahlengang
- M1-M6 Spiegel
- FF Freiformfläche
- Δ_1 Mindestabweichung von rotationssymmetrischer Asphäre
- 20 Δ_2 Mindestabweichung von Sphäre

Ansprüche

1. Messvorrichtung zum interferometrischen Vermessen einer Form einer Oberfläche eines Prüflings in Bezug auf eine Referenzform mit:

- einem diffraktiven optischen Element zum Erzeugen einer Prüfwelle aus einer Messstrahlung, wobei eine Wellenfront der Prüfwelle an eine als erste nicht-sphärische Fläche konfigurierte Sollform der Oberfläche des Prüflings angepasst ist,

- einem Referenzelement mit einer die Referenzform aufweisenden Referenzoberfläche, wobei die Referenzform als eine weitere nicht-sphärische Fläche konfiguriert ist,

- einer ersten Halterung, welche dazu konfiguriert ist, in einer Messkonfiguration den Prüfling im Strahlengang der Prüfwelle anzuordnen, sowie

- einer weiteren Halterung, welche dazu konfiguriert ist, in der Messkonfiguration das Referenzelement im Strahlengang einer Referenzwelle anzuordnen.

2. Messvorrichtung nach Anspruch 1,

bei der sowohl die erste nicht-sphärische Fläche als auch die weitere nicht-sphärische Fläche jeweils als Freiformfläche konfiguriert sind.

3. Messvorrichtung nach Anspruch 1 oder 2,

bei der das diffraktive optische Element weiterhin dazu konfiguriert ist, die Referenzwelle mit einer an die Referenzform angepassten Wellenfront zu erzeugen.

4. Messvorrichtung nach Anspruch 3,

bei der das diffraktive optische Element mindestens zweifach kodiert ist, wobei eine erste Kodierung zur Erzeugung der Prüfwelle und eine zweite Kodierung zur Erzeugung der Referenzwelle konfiguriert sind.

5. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,

bei der die Referenzform höchstens 500 µm von der Sollform der Oberfläche des Prüflings abweicht.

6. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,

5 bei der die Wellenfront der Prüfwelle am Ort der Oberfläche des in der Messkonfiguration angeordneten Prüflings höchstens 500 µm von der Wellenfront der Referenzwelle am Ort der Referenzoberfläche abweicht.

7. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,

10 bei der die Oberfläche des Prüflings einen in der Messkonfiguration von der Prüfwelle bestrahlten Messbereich aufweist und das Referenzelement einen in der Messkonfiguration von der Referenzwelle bestrahlten weiteren Messbereich umfasst, wobei die beiden Flächen der Messbereiche um mindestens 1% voneinander abweichen.

15

8. Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 7,

bei der ein erster Bereich des diffraktiven optischen Elements, an dem die Prüfwelle erzeugt wird, und ein weiterer Bereich des diffraktiven optischen Elements, an dem die Referenzwelle erzeugt wird, einen Überlapp aufweisen, in dem mindestens 20% der Fläche des größeren der beiden Bereiche angeordnet ist.

20

9. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,

bei der die beiden Halterungen an einem Aktuationsmodul gelagert sind, welches dazu konfiguriert ist, zur Anordnung des Prüflings und des Referenzelements in einer weiteren Messkonfiguration die beiden Halterungen derart zu bewegen, dass die jeweilige Position des Prüflings und des Referenzelements vertauscht werden.

25

10. Messvorrichtung nach Anspruch 9,

30 bei der das Aktuationsmodul dazu konfiguriert ist, zur Anordnung des Prüflings und des Referenzelements in der weiteren Messkonfiguration die beiden Halterungen derart zu bewegen, dass neben der jeweiligen Position auch die jeweilige

Orientierung und die jeweilige Kippstellung des Prüflings und des Referenzelements vertauscht werden.

11. Messvorrichtung nach Anspruch 9 oder 10,

5 bei das Aktuationsmodul dazu konfiguriert ist, die beiden Halterungen um eine gemeinsame Rotationsachse zu drehen.

12. Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11,

10 bei der das Aktuationsmodul dazu konfiguriert ist, mindestens eine der Halterungen in einer Translationsrichtung zu verschieben und/oder mindestens eine der Halterungen zu verkippen.

13. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,

15 bei der das diffraktive optische Element dazu konfiguriert ist, die Prüfwelle und die Referenzwelle mit Ausbreitungsrichtungen zu erzeugen, welche gegenüber einer symmetrischen Anordnung der Ausbreitungsrichtungen jeweils eine Abweichung von höchstens 5° aufweisen, wobei in der symmetrischen Anordnung die Ausbreitungsrichtungen bezüglich einer auf einem Beugungsmuster des diffraktiven optischen Elements senkrecht stehenden Achse symmetrisch angeordnet sind.

20

14. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,

25 bei der die Referenzform an die Sollform der Prüflingsoberfläche angepasst ist und die beiden Halterungen derart angeordnet sind, dass eine Kippstellung des von der ersten Halterung gehaltenen Prüflings gegenüber einer Richtung der Gravitationskraft einer Kippstellung des von der zweiten Halterung gehaltenen Referenzelements gegenüber der Richtung der Gravitationskraft entspricht.

15. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,

30 bei welcher der Prüfling und das Referenzelement in der Messkonfiguration hintereinander in einer sich teilweise überlappenden Stellung in den Strahlengängen der Prüfwelle und der Referenzwelle angeordnet sind.

16. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche, bei dem das diffraktive optische Element dazu konfiguriert ist, die Prüfwelle auf einen gegenüber einem Nutzbereich der Oberfläche erweiterten Messbereich der Oberfläche einzustrahlen.

5

17. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche, bei der das Referenzelement ein Loch aufweist und das diffraktive optische Element dazu konfiguriert ist, die Prüfwelle mit einem konvergierenden Strahlengang derart zu erzeugen, dass eine Kaustik der Prüfwelle im Loch des im Strahlengang der Referenzwelle angeordneten Referenzelements erzeugt wird.

10

18. Verfahren zum interferometrischen Vermessen einer Form einer Oberfläche eines Prüflings in Bezug auf eine Referenzform mit den Schritten:

- Einstrahlen zumindest eines Teils einer mittels eines diffraktiven optischen Elements erzeugten Prüfwelle auf die Oberfläche des Prüflings, welcher mittels einer ersten Halterung im Strahlengang der Prüfwelle angeordnet ist, wobei die Wellenfront der Prüfwelle an eine, als eine erste nicht-sphärische Fläche konfigurierte, Sollform der Oberfläche des Prüflings angepasst ist,

15

- Anordnen eines Referenzelements im Strahlengang einer Referenzwelle mittels einer weiteren Halterung, wobei das Referenzelement die Referenzform aufweisende Referenzoberfläche umfasst und wobei die Referenzform als eine weitere nicht-sphärische Fläche konfiguriert ist, sowie- Überlagern der Prüfwelle nach Wechselwirkung mit der Oberfläche des Prüflings mit der Referenzwelle, deren Strahlung einer Wechselwirkung mit der Referenzoberfläche ausgesetzt war.

20

25

19. Verfahren nach Anspruch 20,

bei dem die Prüfwelle und die Referenzwelle durch Einstahlen einer Messstrahlung auf das diffraktive optische Element erzeugt werden, wobei die Prüfwelle mit der Referenzwelle nach deren Wechselwirkung mit der Referenzoberfläche überlagert wird.

30

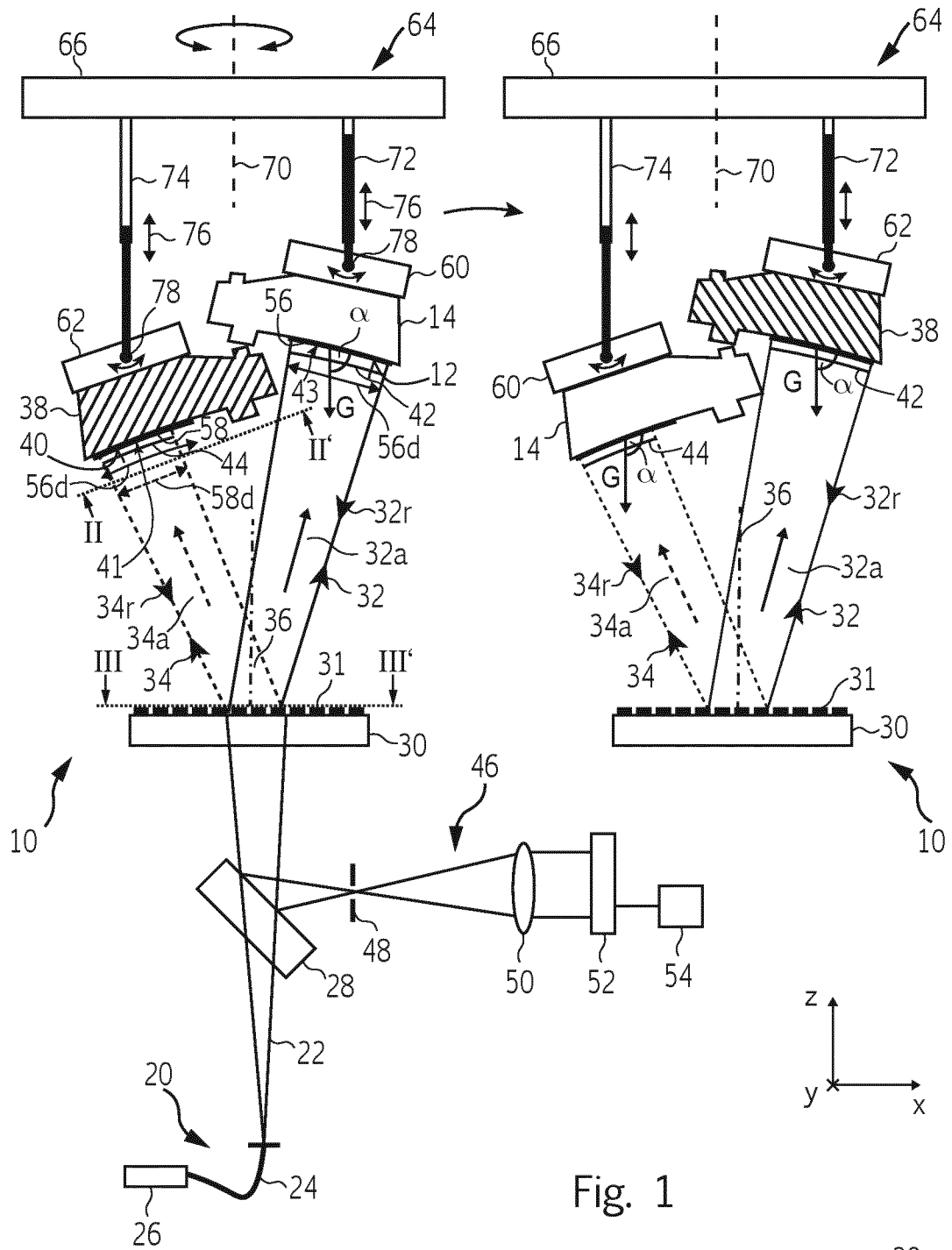


Fig. 1

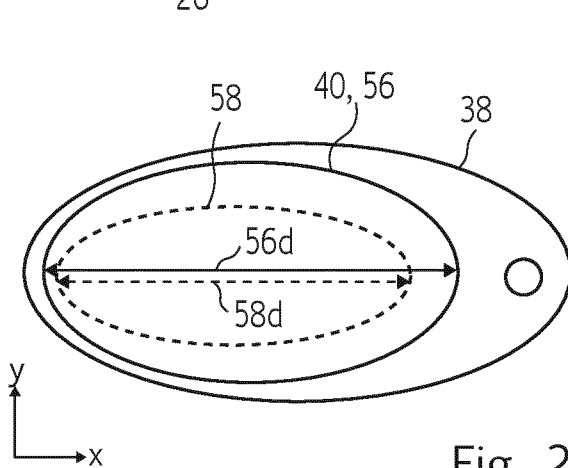


Fig. 2

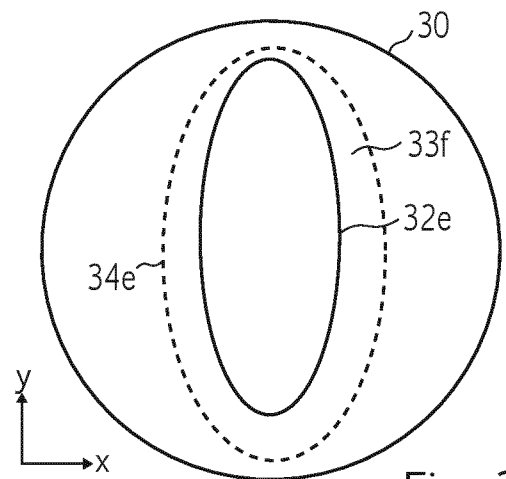


Fig. 3

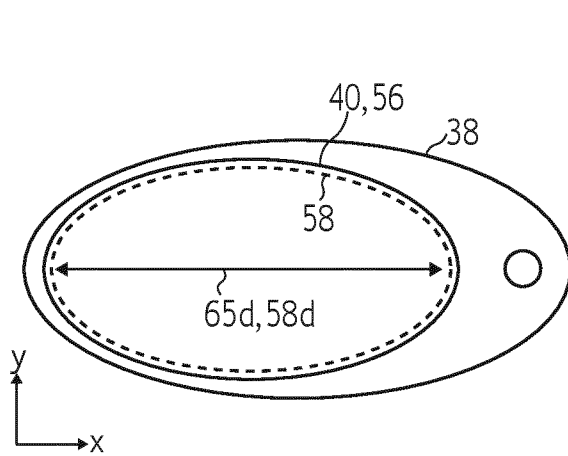
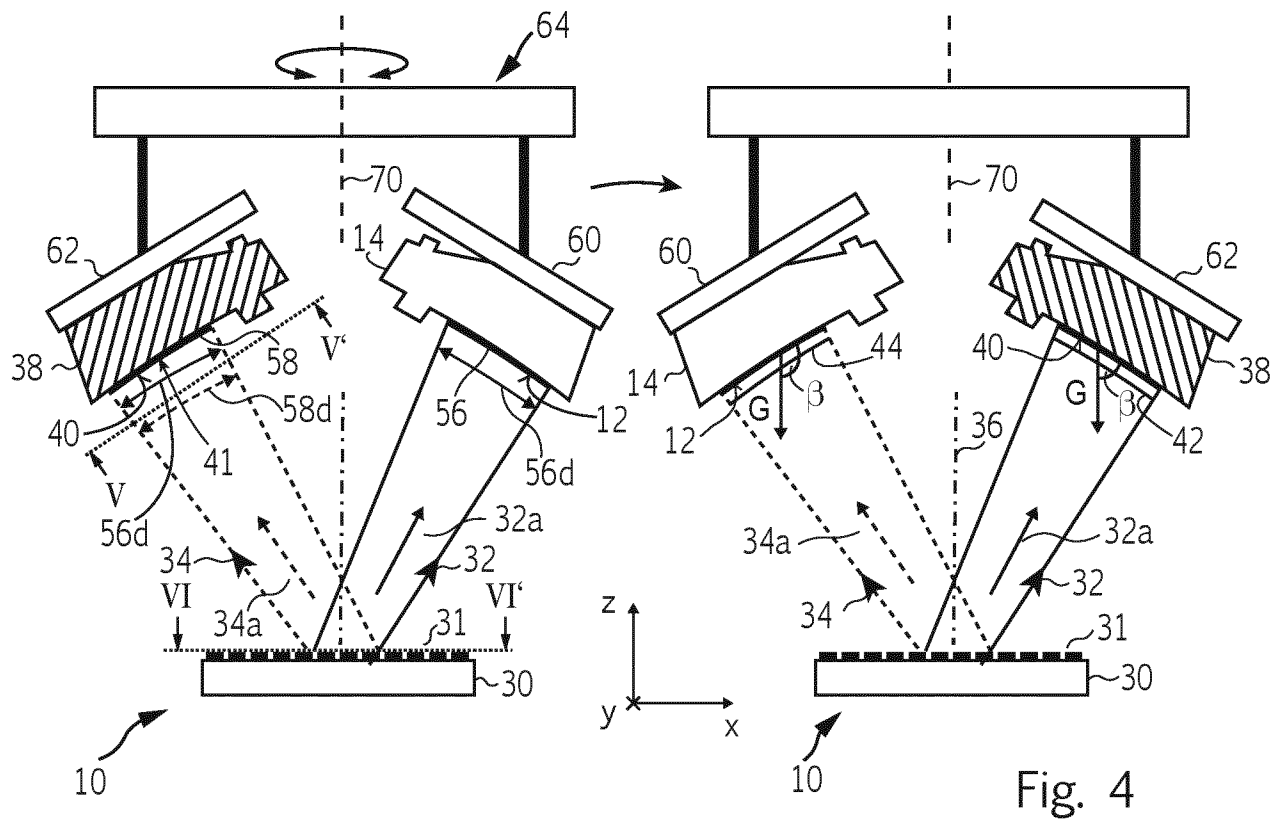


Fig. 5

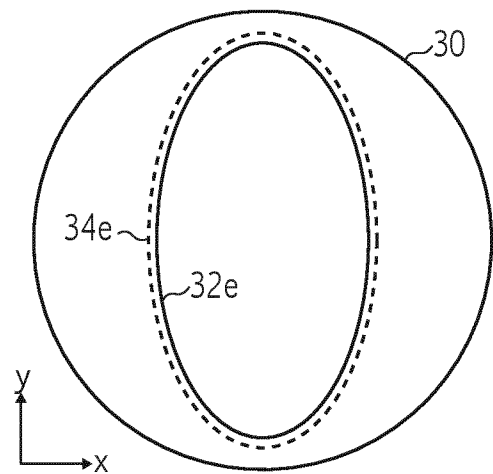


Fig. 6

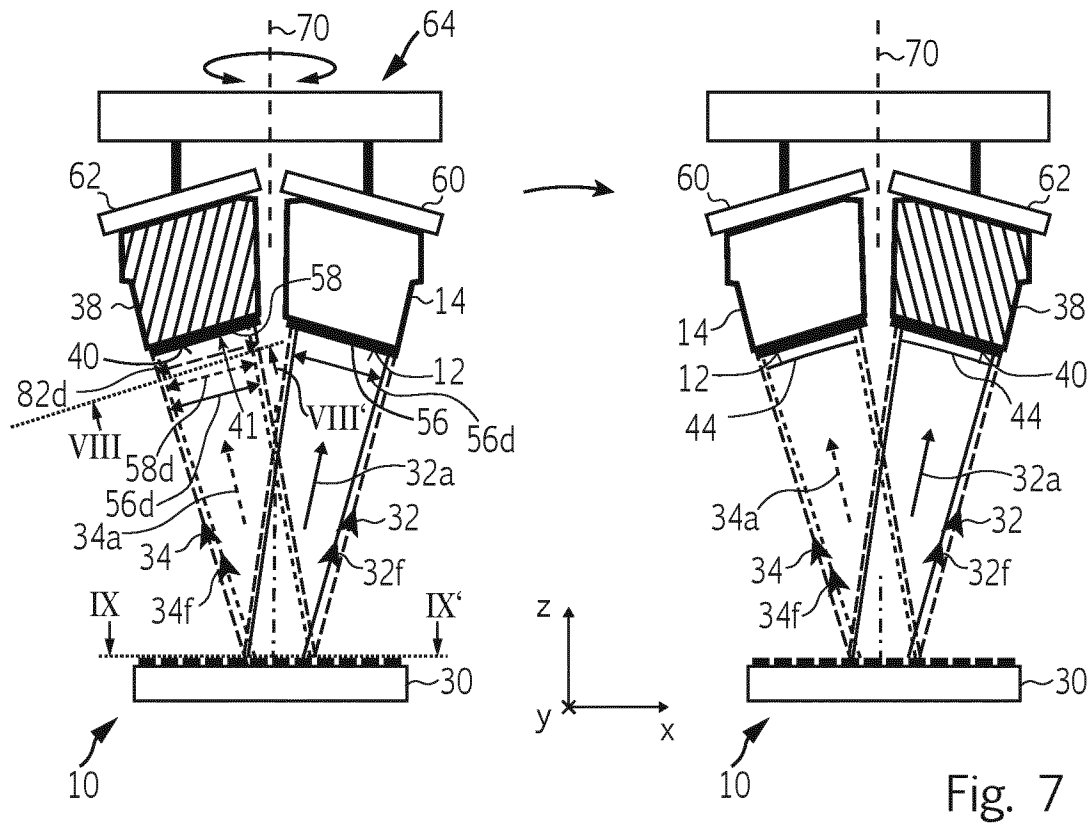


Fig. 7

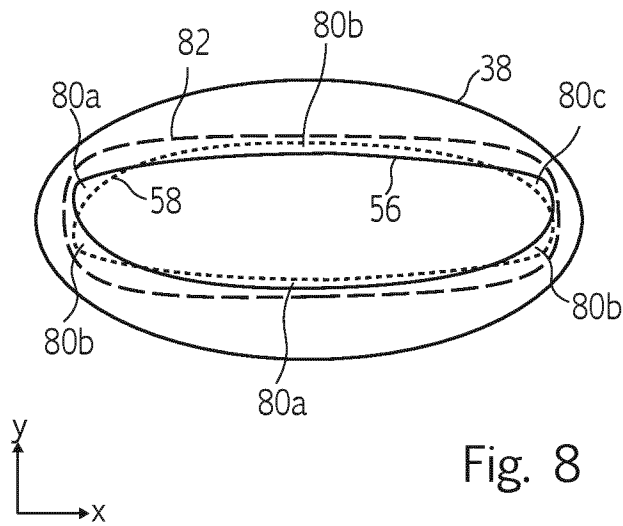


Fig. 8

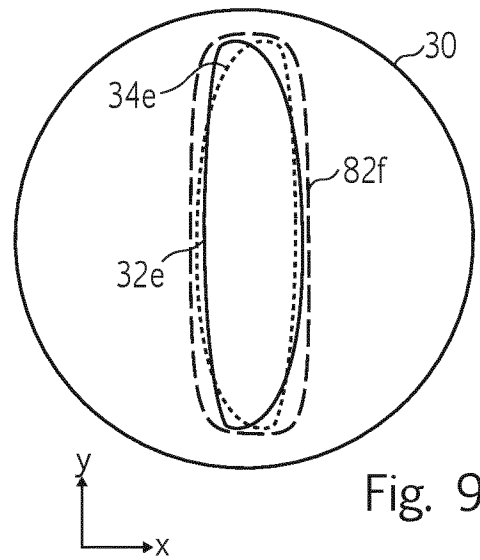


Fig. 9

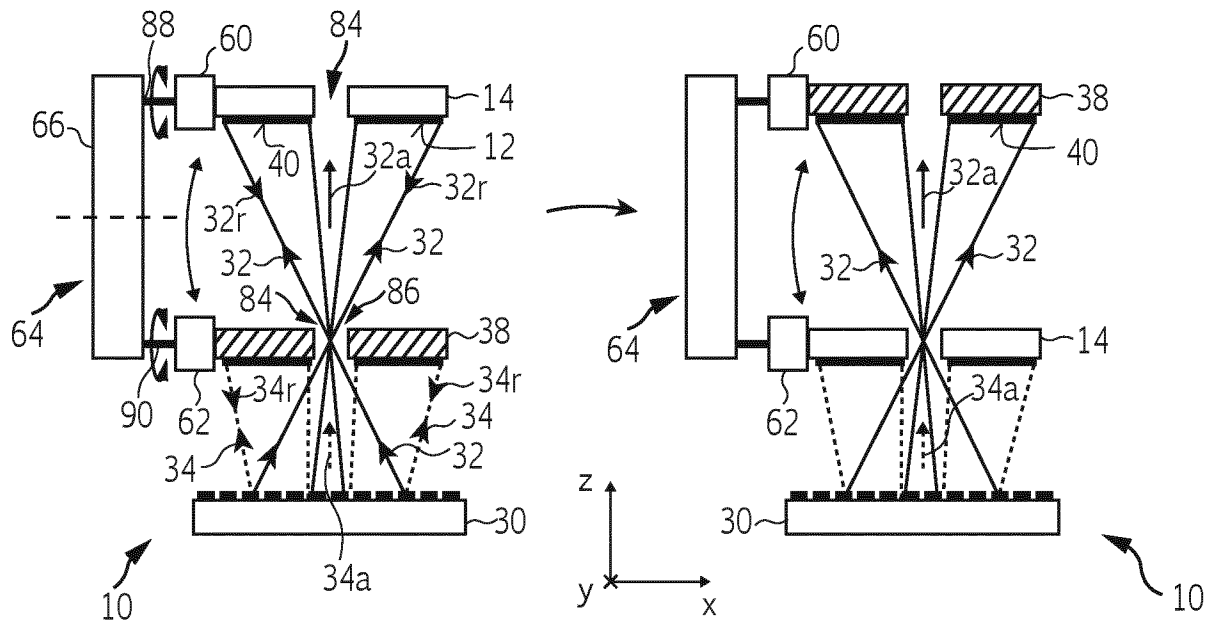


Fig. 10

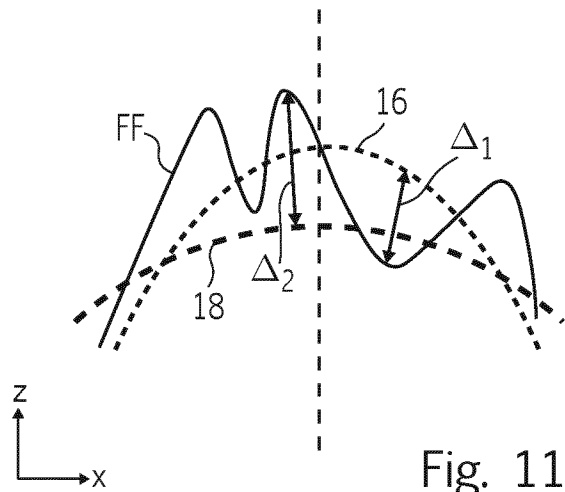


Fig. 11

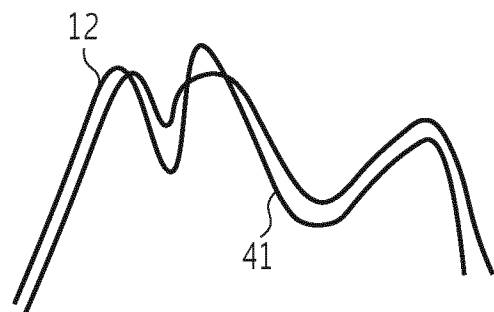


Fig. 12

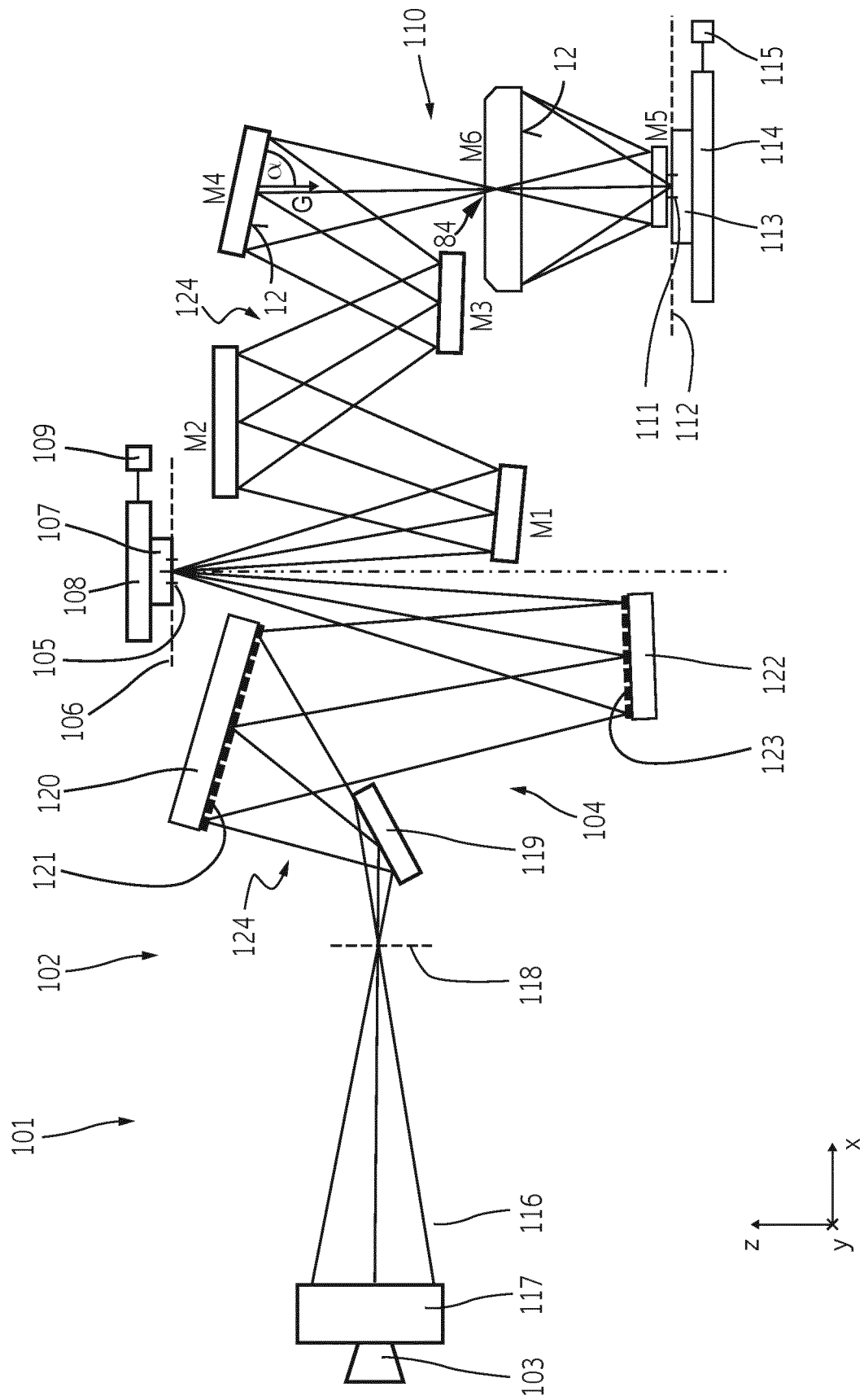


Fig. 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2022/057158**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER****G01B 9/02015**(2022.01)i; **G01B 9/02**(2022.01)i; **G01B 11/24**(2006.01)i; **G01B 21/04**(2006.01)i

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)

G01B

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	DE 102015209490 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 24 November 2016 (2016-11-24) cited in the application	1-8,13,16,18,19
A	paragraph [0055] - paragraph [0068]; figure 1 paragraphs [0018], [0019], [0075]	9-12,14,15,17
X	US 2001028462 A1 (ICHIHARA HIROSHI [JP] ET AL) 11 October 2001 (2001-10-11) paragraph [0076] - paragraph [0093]; figures 7, 8A, 8B	1,14,15,18
X	DE 102019204096 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 01 October 2020 (2020-10-01) the whole document	1,3,4,18,19
A	DE 102017216401 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 11 October 2018 (2018-10-11) the whole document	1-19

☐ 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

24 June 2022

Date of mailing of the international search report

04 July 2022

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Gomez, Adriana

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2022/057158

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
DE	102015209490	A1	24 November 2016	CN	107646087	A	30 January 2018
				DE	102015209490	A1	24 November 2016
				EP	3298343	A2	28 March 2018
				US	2018106591	A1	19 April 2018
				WO	2016188620	A2	01 December 2016
US	2001028462	A1	11 October 2001	US	6312373	B1	06 November 2001
				US	2001028462	A1	11 October 2001
				US	2002191195	A1	19 December 2002
				US	2003215053	A1	20 November 2003
DE	102019204096	A1	01 October 2020	DE	102019204096	A1	01 October 2020
				EP	3948156	A1	09 February 2022
				JP	2022526924	A	27 May 2022
				US	2022011095	A1	13 January 2022
				WO	2020193277	A1	01 October 2020
DE	102017216401	A1	11 October 2018	NONE			

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. G01B9/02015 G01B9/02 G01B11/24 G01B21/04 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) G01B		
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	DE 10 2015 209490 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 24. November 2016 (2016-11-24) in der Anmeldung erwähnt	1-8, 13, 16, 18, 19
A	Absatz [0055] - Absatz [0068]; Abbildung 1 Absätze [0018], [0019], [0075]	9-12, 14, 15, 17

X	US 2001/028462 A1 (ICHIHARA HIROSHI [JP] ET AL) 11. Oktober 2001 (2001-10-11) Absatz [0076] - Absatz [0093]; Abbildungen 7, 8A, 8B	1, 14, 15, 18

X	DE 10 2019 204096 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 1. Oktober 2020 (2020-10-01) das ganze Dokument	1, 3, 4, 18, 19

A	DE 10 2017 216401 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 11. Oktober 2018 (2018-10-11) das ganze Dokument	1-19

☐ 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		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
24. Juni 2022		04/07/2022
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 Gomez, Adriana

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2022/057158

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102015209490 A1	24-11-2016	CN 107646087 A	30-01-2018
		DE 102015209490 A1	24-11-2016
		EP 3298343 A2	28-03-2018
		US 2018106591 A1	19-04-2018
		WO 2016188620 A2	01-12-2016

US 2001028462 A1	11-10-2001	US 6312373 B1	06-11-2001
		US 2001028462 A1	11-10-2001
		US 2002191195 A1	19-12-2002
		US 2003215053 A1	20-11-2003

DE 102019204096 A1	01-10-2020	DE 102019204096 A1	01-10-2020
		EP 3948156 A1	09-02-2022
		JP 2022526924 A	27-05-2022
		US 2022011095 A1	13-01-2022
		WO 2020193277 A1	01-10-2020

DE 102017216401 A1	11-10-2018	KEINE	
