

(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
28. Januar 2016 (28.01.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/012426 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G02B 17/08 (2006.01) G03F 1/00 (2012.01)
G02B 5/00 (2006.01) G21K 7/00 (2006.01)

(74) Anwalt: RAU, SCHNECK & HÜBNER
PATENTANWÄLTE RECHTSANWÄLTE
PARTGMBB; Königstrasse 2, 90402 Nürnberg (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2015/066605

(22) Internationales Anmeldedatum:
21. Juli 2015 (21.07.2015)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2014 214 257.1 22. Juli 2014 (22.07.2014) DE
10 2014 217 229.2
28. August 2014 (28.08.2014) DE

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

(72) Erfinder: MATEJKA, Ulrich; Westendstrasse 27, 07743
Jena (DE). HUSEMANN, Christoph; Golmsdorfer Strasse
17, 07749 Jena (DE). RUOFF, Johannes; Droste-
Hülshoff-Weg 35, 73431 Aalen (DE). PERLITZ, Sascha;
Gartenstrasse 3, 07743 Jena (DE). MANN, Hans-Jürgen;
Katzenbachstrasse 49, 73447 Oberkochen (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, DK,
DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,
ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,
SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG,
KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH,
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).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR THREE-DIMENSIONALLY MEASURING A 3D AERIAL IMAGE OF A LITHOGRAPHY MASK

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUM DREIDIMENSIONALEN VERMESSEN EINES 3D-LUFTBILDES EINER
LITHOGRAFIEMASKE

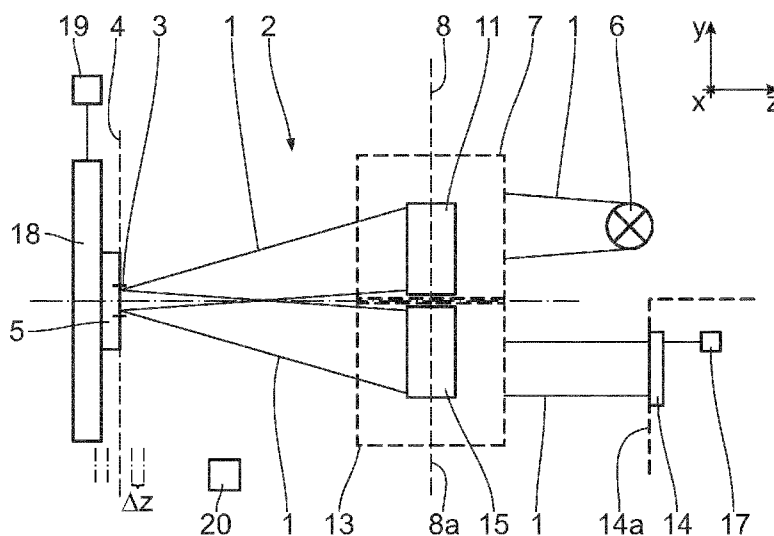


Fig. 1

(57) Abstract: In a method for three-dimensionally measuring a 3D aerial image in the region around an image plane during the imaging of a lithography mask (5) arranged in an object plane (4), a selectable imaging scale ratio in mutually perpendicular directions (x, y) is taken into account. For this purpose, an electromagnetic wavefront of imaging light (1) is reconstructed after the interaction thereof with the lithography mask (5). An influencing variable corresponding to the imaging scale ratio is included. Finally, the 3D aerial image measured with the inclusion of the influencing variable is output. This results in a measuring method which can also be used to measure lithography masks which are optimized for use with an anamorphic projection optical unit during projection exposure.

(57) Zusammenfassung: Bei einem Verfahren zum dreidimensionalen Vermessen eines 3D- Luftbildes im Bereich um eine Bildebene

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

**Erklärungen gemäß Regel 4.17:**

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

— *vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)*

Veröffentlicht:

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

bei der Abbildung einer Lithografiemaske (5), die in einer Objektebene (4) angeordnet ist, wird ein wählbares Abbildungsmaßstab-Verhältnis in zueinander senkrechten Richtungen (x, y) berücksichtigt. Hierzu wird eine elektromagnetische Wellenfront von Abbildungslicht (1) nach dessen Wechselwirkung mit der Lithografiemaske (5) rekonstruiert. Eine Beeinflussungsgröße, die dem Abbildungsmaßstab-Verhältnis entspricht, wird einbezogen. Schließlich wird das unter Einbeziehung der Beeinflussungsgröße gemessene 3D-Luftbild ausgegeben. Es resultiert ein Vermessungsverfahren, mit dem auch Lithografiemasken vermessen werden können, die zur Verwendung mit einer anomorphotischen Projektionsoptik bei der Projektionsbelichtung optimiert sind.

- 1 -

Verfahren zum dreidimensionalen Vermessen eines 3D-Luftbildes einer Lithografiemaske

Die vorliegende Patentanmeldung nimmt die Prioritäten der deutschen Patentanmeldungen DE 10 2014 214 257.1 und DE 10 2014 217 229.2 in Anspruch, deren Inhalte durch Bezugnahme hierin aufgenommen werden.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum dreidimensionalen Vermessen eines 3D-Luftbildes im Bereich um eine Bildebene bei der Abbildung einer Lithografiemaske. Ferner betrifft die Erfindung ein Metrologiesystem zur Durchführung dieses Verfahrens.

Metrologiesysteme der eingangs genannten Art sind bekannt aus der US 2013/0063716 A1, der DE 102 20 815 A1, der DE 102 20 816 A1 und aus der US 2013/0083321 A1. Aus der EP 2 506 061 A1 ist eine Projektionsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage zur Herstellung von Halbleiterbauelementen bekannt, die eine Aperturblende einsetzt, bei der der Blendendurchmesser in zwei zueinander senkrechten Richtungen sich um mehr als 10 % unterscheidet. Die DE 10 2010 040 811 A1 beschreibt eine anamorphotische Projektionsoptik. Die US 2008/0036986 A1 beschreibt eine Projektionsbelichtungsanlage.

Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zum Vermessen eines 3D-Luftbildes einer Lithografiemaske so weiterzubilden, dass auch Lithografiemasken vermessen werden können, die zur Verwendung mit einer anamorphotischen Projektionsoptik bei der Projektionsbelichtung optimiert sind.

- 2 -

Diese Aufgabe ist erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren mit den im Anspruch 1 angegebenen Schritten.

Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass es zum Vermessen von Lithogra-
5 fiemasken, die für die Verwendung mit anamorphotischen Lithografie-
Projektionsoptiken optimiert sind, nicht zwingend erforderlich ist, ein
Metrologiesystem mit einer ebenfalls anamorphotischen Projektionsoptik
einzusetzen. Das erfindungsgemäße Verfahren kann auch mit einer Projek-
tionsoptik verwendet werden, die nicht anamorphotisch ist und insbesonde-
10 re kein wählbares Abbildungsmaßstab-Verhältnis in zueinander senkrech-
ten Richtungen hat. Der anamorphotische Einfluss der Lithografie-
Projektionsoptik wird beim Vermessen durch die Einbeziehung der Beein-
flussungsgröße emuliert, die ein Maß für das Abbildungsmaßstab-
Verhältnis der zu emulierenden Lithografie-Projektionsoptik ist. Dieses
15 Einbeziehen erfolgt durch Manipulation der rekonstruierten elektromagne-
tischen Wellenfront, was auf digitalem Wege geschehen kann. Existierende
Metrologiesysteme mit nicht anamorphotischen Projektionsoptiken, deren
Bildverarbeitungs-Software entsprechend umgerüstet wird, können auf die-
se Weise grundsätzlich auch für die Vermessung von Lithografiemasken
20 zum Einsatz kommen, die für den Einsatz mit anamorphotischen Lithogra-
fie-Projektionsoptiken optimiert sind.

Eine Schrittfolge nach Anspruch 2 hat sich zur Durchführung der Rekon-
struktion der elektromagnetischen Wellenfront als besonders geeignet her-
25 ausgestellt. Eine Schrittweite der Verlagerung kann, angepasst an die je-
weilige Messaufgabe, variiert werden. Messergebnisse zwischen zwei tat-
sächlich vermessenen Verlagerungspositionen können auch durch Interpo-
lation erhalten werden. Eine Interpolation kann im Fourierraum, aber auch
im Ortsraum stattfinden.

Die Vorteile einer Vermessung mit einer Messoptik nach Anspruch 3 wurden oben bereits diskutiert.

- 5 Eine Phasenrekonstruktion nach Anspruch 4 erlaubt eine besonders genaue Rekonstruktion der elektromagnetischen Wellenfront. Zur Durchführung einer derartigen Phasenrekonstruktion existieren mehrere verschiedene digitale Verfahren, die aus der Literatur bekannt sind. Die Phasenrekonstruktion kann unter Einsatz einer Fouriertransformation sowie einer Fourier-
10 Rücktransformation erfolgen.

- Eine Defokus-Variation nach Anspruch 5 kann mit bereits bekannten Metrologiesystemen über eine Verlagerung der Lithografiemaske senkrecht zur Objektebene, jeweils um einen vorgegebenen Verlagerungsweg, her-
15 beigeführt werden.

- Eine Beleuchtungsoptik-Manipulation nach Anspruch 6 ist eine alternativ oder zusätzlich mögliche Variante, die bei der Rekonstruktion der elektromagnetischen Wellenfront herangezogen werden kann. Zu dieser Rekonstruktion kann die Lithografiemaske aus einer Mehrzahl verschiedener, exakt vorgegebener Beleuchtungsrichtungen beleuchtet und es können dabei entstehende 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen für jede der Beleuchtungsrichtungen vermessen werden. Eine Phasenrekonstruktion kann auch mithilfe der Fourier-Ptychografie durchgeführt werden. Hierbei
20 kann beispielsweise eine enge Lochblende durch eine Beleuchtungspupille des Metrologiesystems gefahren werden, um eine für die Fourier-Ptychografie erforderliche Beleuchtungsrichtungsdiversifizierung herbeizuführen.

Zur Rekonstruktion der elektromagnetischen Wellenfront nach Anspruch 7 kann auch eine Variation einer Beleuchtungspupille der Beleuchtungsoptik des Metrologiesystems genutzt werden, die prinzipiell bei der Spatial Light Interference Microscopy (räumliche Lichtinterferenzmikroskopie, SLIM) bereits bekannt ist. Eine Phasenrekonstruktion der elektromagnetischen Wellenfront kann auch interferometrisch, holografisch oder unter Einsatz einer kohärenten Beleuchtung der Lithografiemaske erfolgen. Alternativ zu einer kohärenten Beleuchtung kann auch ein feines Sampeln über das jeweils vorgegebene Beleuchtungssetting innerhalb der Beleuchtungspupille erfolgen, wozu wiederum eine Lochblende herangezogen werden kann.

Eine digitale Simulation der Abbildung nach Anspruch 8 ermöglicht eine Einbeziehung der Beeinflussungsgröße, die dem Abbildungsmaßstab-Verhältnis entspricht, ohne das hierzu ein Hardware-Eingriff erforderlich ist. Die digitale Simulation kann durch Simulation der Wirkung einer ovalen objektseitigen numerischen Apertur und Realisierung einer runden bildseitigen numerischen Apertur bei der Abbildung der Lithografiemaske realisiert werden. Die digitale Simulation kann in Form einer digitalen Zylinderlinse oder in Form der Addition einer astigmatischen Wellenfront erfolgen.

Neben einer Phasenrekonstruktion kann nach Anspruch 9 auch eine Intensitätsrekonstruktion erfolgen. Soweit eine Intensitätsrekonstruktion erfolgt, kann eine Abbildungs-Aperturblende mit einem deutlich von 1 abweichenden x/y-Aspektverhältnis zum Einsatz kommen. Die Rekonstruktionsberechnung im Intensitätsraum kann ebenfalls mithilfe einer Fouriertransformation sowie einer Rücktransformation erfolgen. Eine Beeinflussungsgröße, die dem Abbildungsmaßstab-Verhältnis entspricht, kann in diesem Fall fourierkomponenten-richtungsabhängig einbezogen werden, indem Mes-

serergebnisse mit entsprechender Auswahl einer Verlagerungs-Schrittweite herangezogen werden. Für jede Richtung, der ein bestimmtes Abbildungsmaßstab-Verhältnis zugeordnet wird, kann dann ein Messergebnis bei einer eigenen, dieser Richtung zugeordneten Verlagerungs-Schrittweite zum

5 Einsatz kommen.

Die Erzeugung von 2D-Intensitäts-Fouriertransformierten nach Anspruch 10 hat sich zur Intensitätsrekonstruktion als besonders geeignet herausgestellt.

10

Durch ein Verzerren der gemessenen 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen nach Anspruch 11 lässt sich das Abbildungsverhalten einer entsprechenden Abbildungsoptik emulieren. Nach dem Verzerren kann eine Intensitäts-Fouriertransformation der erhaltenen 2D-

15 Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen zur Erzeugung einer entsprechenden Anzahl von 2D-Intensitäts-Fouriertransformierten erfolgen.

Informationen, die in ausgewählten 2D-Intensitäts-Fouriertransformierten, die bei verschiedenen Verlagerungswegen der Lithografiemaske bzw. einer

20 Teststruktur gemessen werden können zur Intensitätsrekonstruktion zusammengesetzt werden. Hierzu wird nach Anspruch 12 ein Satz von 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen herangezogen, die bei vorgegebenen Verlagerungswegen der Lithografiemaske gemessen wurden, und von diesem Satz wird mit Hilfe einer Zuordnungsfunktion jeweils eine Rich-

25 tungskomponente der Intensitäts-Fouriertransformierten ausgewählt. Diese verschiedenen Richtungskomponenten werden dann zusammengesetzt. Die Zuordnungsfunktion wird so ausgewählt, dass ein möglichst stetiger Übergang zwischen denjenigen Richtungskomponenten, die Extremwerten der Abbildungsmaßstäbe entsprechen, gewährleistet ist. Die Zuordnungsfunk-

tion ist insbesondere monoton und kann stetig differenzierbar, insbesondere mehrfach stetig differenzierbar sein.

Ein zusätzlicher Verzerrungsschritt nach Anspruch 13 ermöglicht wieder-
5 um das Emulieren einer Abbildungsoptik mit einem entsprechenden Abbildungsmaßstab-Verhältnis. Alternativ zu einem Verzerren des synthetischen Roh-Bildes kann ein Verzerren auch vor dem Durchführen einer Intensitäts-Fouriertransformation von gemessenen 2D-Abbildungslicht-
Intensitätsverteilungen erfolgen. In diesem Fall werden die gemessenen
10 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen zunächst verzerrt, bevor die Schritte Intensitäts-Fouriertransformation, Erzeugen einer synthetischen 2D-Intensitäts-Gesamt-Fouriertransformierten und Intensitäts-Fourier-Rücktransformation erfolgen.

15 Das Verzerren kann digital, also durch Umrechnen der Messwerte, erfolgen.

Eine Auswahl nach Anspruch 14 lässt sich numerisch mit vergleichsweise einfachen Mitteln realisieren. Die Auswahlfunktion kann so gewählt werden,
20 den, dass einer Normierungsbedingung, die dafür sorgt, dass jede Richtung gleichberechtigt ausgewählt wird, Rechnung getragen wird.

Eine digitale Auswahlfunktion nach Anspruch 15 lässt sich numerisch in besonders einfacher Weise umsetzen. Alternativ zu einer digitalen Auswahl-
25 wahlfunktion, die ausschließlich die Werte 0 und 1 einnehmen kann, kann auch eine Auswahlfunktion mit stetigem Übergang zwischen den Werten 0 und 1 herangezogen werden.

- 7 -

Die Vorteile eines Metrologiesystems nach Anspruch 16 entsprechen denen, die vorstehend unter Bezugnahme auf das erfindungsgemäße Verfahren bereits erläutert wurden.

- 5 Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnung näher erläutert. In dieser zeigen:

- Fig. 1 stark schematisch in einer Aufsicht mit Blickrichtung senkrecht zu einer Einfallsebene ein Metrologiesystem für
10 die Untersuchung eines Objekts in Form einer Lithografiemaske mit EUV-Beleuchtungs- und Abbildungslicht mit einer Beleuchtungsoptik und einer abbildenden Optik, die jeweils sehr stark schematisch dargestellt sind;
- 15 Fig. 2 ein Beleuchtungssetting, also eine Intensitätsverteilung von Beleuchtungslicht in einer Pupillenebene der Beleuchtungsoptik, für eine Beleuchtung des Objekts;
- Fig. 3 eine Aufsicht auf das abzubildende Objekt;
- 20 Fig. 4 eine Aufsicht auf eine Abbildungs-Aperturblende zur randseitigen Begrenzung eines Abbildungs-Lichtbündels in der abbildenden Optik;
- 25 Fig. 5 weniger schematisch als in Fig. 1 eine Seitenansicht einer Anordnung einer Lithografie-Projektionsoptik zwischen dem abzubildenden Objekt und einem Wafer, wobei das Objekt dasjenige ist, welches im Vorfeld mit dem Metrologiesystem nach Fig. 1 untersucht wurde;

- Fig. 6 schematisch in einem Schnitt in einer Einfallsebene eine Reflexion des Beleuchtungs- und Abbildungslichts am Objekt bei der Projektionsbelichtung;
- 5
- Fig. 7 einen Schnitt durch das einfallende Beleuchtungs-Lichtbündel und das ausfallende Abbildungs-Lichtbündel gemäß Linie VII-VII in Fig. 6;
- 10 Fig. 8 ein Ablaufschema eines Verfahrens zum dreidimensionalen Vermessen eines 3D-Luftbildes im Bereich um eine Bildebene bei der Abbildung der Lithografiemaske;
- 15 Fig. 9 ein Ablaufschema, welches stärker im Detail Verfahrensschritte bei einer Einbeziehung einer Beeinflussungsgröße verdeutlicht, die dem Verhältnis von Abbildungsmaßstäben der Projektionsoptik in zueinander senkrechten Richtungen entspricht;
- 20 Fig. 10 in einem Diagramm eine Abhängigkeit eines Verlagerungsweges Δz_i einer Feldebene von einer optimalen Fokusebene der abbildenden Optik, wobei dieser Verlagerungsweg Δz_i für eine Intensitätsrekonstruktion bei der Vermessung eines 3D-Luftbildes herangezogen wird, von einem Winkel φ einer Richtungskomponente einer zur Berechnung des 3D-Luftbildes herangezogenen Fouriertransformierten, wobei die Abhängigkeit für ein gegebenes Abbildungsmaßstab-Verhältnis der Abbildungsoptik und für verschiedene Rekonstruktions-Verlagerungswege der Ob-
- 25

jektebene zur optimalen Fokusebene der Abbildungsoptik sowie für zwei verschiedene, die Winkelabhängigkeit beschreibende stetig differenzierbare Funktionen dargestellt ist;

5

Fig. 11 bis 14 jeweils eine 2D-Intensitätsverteilung einer Abbildung einer rechteckigen Teststruktur bei verschiedenen Defokus-Verlagerungswegen Δz der Teststruktur, aufgenommen jeweils in der xy-Ebene;

10

Fig. 15 bis 18 den Betrag der den Intensitätsverteilungen der Fig. 11 bis 14 zugeordneten 2D-Intensitäts-Fouriertransformierte;

15

Fig. 19 bis 22 den Fouriertransformierten nach den Fig. 15 bis 18 zugeordnete digitale Auswahlfunktionen zur Auswahl bestimmter Richtungskomponenten der Fouriertransformierten;

20

Fig. 23 den Betrag einer mit Hilfe der Intensitäts-Fouriertransformierten nach den Fig. 15 bis 18 und den Auswahlfunktionen nach den Fig. 19 bis 22 erzeugten synthetische 2D-Gesamt-Fouriertransformierte;

25

Fig. 24 ein synthetisches Bild als Ergebnis einer Fourier-Rücktransformation der Gesamt-Fouriertransformierten nach Fig. 23;

Fig. 25 ein synthetisches Ergebnis-Bild nach Verzerrung des synthetischen Bildes nach Fig. 24 mit einem vorgegebenen

- 10 -

Abbildungsmaßstab-Verhältnis einer zu emulierenden
bzw. zu rekonstruierenden Abbildungsoptik.

- Zur Erleichterung der Darstellung von Lagebeziehungen wird nachfolgend
- 5 ein kartesisches xyz-Koordinatensystem verwendet. Die x-Achse verläuft in der Figur 1 senkrecht zur Zeichenebene in diese hinein. Die y-Achse verläuft in der Figur 1 nach oben. Die z-Achse verläuft in der Figur 1 nach rechts.
- 10 Figur 1 zeigt in einer einem Meridionalschnitt entsprechenden Ansicht einen Strahlengang von EUV-Beleuchtungslicht bzw. Abbildungslicht 1 in einem Metrologiesystem 2 für die Untersuchung eines in einem Objektfeld 3 in einer Objektebene 4 angeordneten Objekts 5 in Form eines Retikels bzw. einer Lithografiemaske mit dem EUV-Beleuchtungslicht 1. Das
- 15 Metrologiesystem 2 wird zur Analyse eines dreidimensionalen (3D-) Luftbildes (Aerial Image Metrology System) eingesetzt und dient zur Simulation und Analyse der Auswirkungen von Eigenschaften von Lithographiemasken, sogenannten Retikels, die wiederum bei der Projektionsbelichtung zur Herstellung von Halbleiterbauelementen zum Einsatz kommen, auf die
- 20 optische Abbildung durch Projektionsoptiken innerhalb einer Projektionsbelichtungsanlage. Derartige Systeme sind aus der US 2013/0063716 A1 (vgl. dort Figur 3), aus der DE 102 20 815 A1 (vgl. dort Figur 9) und aus der DE 102 20 816 A1 (vgl. dort Figur 2) und aus der US 2013/0083321 A1 bekannt.
- 25 Das Beleuchtungslicht 1 wird am Objekt 5 reflektiert. Eine Einfallsebene des Beleuchtungslichts 1 liegt parallel zur y-z-Ebene.

Das EUV-Beleuchtungslicht 1 wird von einer EUV-Lichtquelle 6 erzeugt. Bei der Lichtquelle 6 kann es sich um eine Laser-Plasma-Quelle (LPP; laser produced plasma) oder um eine Entladungsquelle (DPP; discharge produced plasma) handeln. Grundsätzlich kann auch eine Synchrotron-
5 basierende Lichtquelle zum Einsatz kommen, z. B. ein Freie-Elektronen-Laser (FEL). Eine Nutzwellenlänge der EUV-Lichtquelle kann im Bereich zwischen 5 nm und 30 nm liegen. Grundsätzlich kann bei einer Variante des Metrologiesystems 2 auch eine Lichtquelle für eine andere Nutzlichtwellenlänge anstelle der Lichtquelle 6 zum Einsatz kommen, beispielsweise eine Lichtquelle für eine Nutzwellenlänge von 193 nm.
10

Je nach Ausführung des Metrologiesystems 2 kann dieses für ein reflektierendes oder auch für ein transmittierendes Objekt 5 zum Einsatz kommen. Ein Beispiel für ein transmittierendes Objekt ist eine Phasenmaske.
15

Zwischen der Lichtquelle 6 und dem Objekt 5 ist eine Beleuchtungsoptik 7 des Metrologiesystems 2 angeordnet. Die Beleuchtungsoptik 7 dient zur Beleuchtung des zu untersuchenden Objekts 5 mit einer definierten Beleuchtungsintensitätsverteilung über das Objektfeld 3 und gleichzeitig mit
20 einer definierten Beleuchtungswinkelverteilung, mit der die Feldpunkte des Objektfeldes 3 beleuchtet werden.

Figur 2 zeigt ein entsprechendes Beleuchtungssetting, welches für die Beleuchtungsoptik 7 einstellbar ist. Dargestellt ist in der Figur 2 eine Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts 1 in einer Pupillenebene 8 (vgl. Figur 1) bzw. in einer hierzu konjugierten Ebene der Beleuchtungsoptik 7. Das
25 Beleuchtungssetting ist beispielhaft als Hexapol-Setting mit sechs Beleuchtungspolen 9 ausgestaltet.

Die sechs Beleuchtungspole 9 liegen innerhalb einer elliptischen äußeren Randkontur 10, die in der Figur 2 gestrichelt angedeutet ist. Diese Randkontur 10 folgt einer Ellipse mit einem Verhältnis zwischen großer Halbachse parallel zur x-Achse und kleiner Halbachse parallel zur y-Achse von 2:1. Auch andere Achsenverhältnisse der elliptischen Randkontur 10 im Bereich von 10:1 und 1,1:1 sind möglich, beispielsweise von 1,5:1, 1,6:1, 2,5:1, 3:1, 4:1, 5:1 oder 8:1.

Die elliptische Randkontur 10 wird von einer Beleuchtungs-Aperturblende 11 der Beleuchtungsoptik 7 erzeugt, die ein auf die Beleuchtungs-Aperturblende 11 einfallendes Bündel des Beleuchtungslichts 1 randseitig begrenzt. Entsprechend weist die Beleuchtungs-Aperturblende 11 in einer sich parallel zur xy-Ebene erstreckenden Blendenebene in den zwei zueinander senkrechten Richtungen x und y zwei sich voneinander um mindestens 10 %, im vorliegenden Fall um 100 % unterscheidende Blendendurchmesser auf, deren Entsprechungen in der Figur 2 mit Bx und By bezeichnet sind. Den größeren Blendendurchmesser Bx hat die Beleuchtungs-Aperturblende 11 senkrecht zur Einfallsebene yz des Beleuchtungslichts 1 auf dem Objekt 5.

20

Das Metrologiesystem 2 ist zur Untersuchung an anamorphotischen Masken mit unterschiedlichen Struktur-Skalierungsfaktoren in x und y ausgelegt. Derartige Masken sind zur Herstellung von Halbleiterelementen mittels anamorphotischer Projektionsanlagen geeignet.

25

Eine numerische Apertur des Beleuchtungs- und Abbildungslichts 1 in der xz-Ebene kann retikelseitig bei 0,125 und in der yz-Ebene retikelseitig bei 0,0625 liegen.

Figur 3 zeigt eine Aufsicht auf das Objekt 5. Strukturen auf dem Retikel 5 sind in der y-Richtung um einen Faktor 2 gestreckt. Dies bedeutet, dass eine Teilstruktur, beispielsweise die Rechteck-Struktur 12 in der rechten unteren Ecke des Objekts 5 nach Figur 3, die in eine 1:1-Struktur abgebildet werden soll, ein x/y-Aspektverhältnis von 1:2 aufweist.

Nach Reflexion am Objekt 5 tritt das Beleuchtungs- bzw. Abbildungslicht 1 in eine abbildende Optik bzw. Projektionsoptik 13 des Metrologiesystems 2 ein, die in der Figur 1 ebenfalls schematisch durch eine gestrichelte Berandung angedeutet ist. Die abbildende Optik 13 dient zur Abbildung des Objekts 5 hin zu einer ortsauflösenden Detektionseinrichtung 14 des Metrologiesystems 2. Die Detektionseinrichtung 14 ist z.B. als CCD-Detektor ausgebildet.

Die abbildende Optik 13 umfasst eine im Strahlengang nach dem Objekt 5 angeordnete Abbildungs-Aperturblende 15 (vgl. auch Figur 4) zur randseitigen Begrenzung eines Abbildungslicht-Bündels. Die Abbildungs-Aperturblende 15 ist in einer Pupillenebene 8a der abbildenden Optik 13 angeordnet. Die Pupillenebenen 8 und 8a können zusammenfallen; dies ist allerdings nicht zwingend.

Auf die Abbildungs-Aperturblende 15 kann im Metrologiesystem 2 auch verzichtet werden.

Die Abbildungs-Aperturblende 15 hat eine elliptische Randkontur 16 mit einem x/y-Halbachsenverhältnis von 2:1. Die Abbildungs-Aperturblende 15 hat also in einer sich parallel zur xy-Ebene erstreckenden Blendenebene in zwei zueinander senkrechten Richtungen x, y zwei sich voneinander um mindestens 10 % unterscheidende Blendendurchmesser, die in der Figur 4

wiederum mit B_x , B_y bezeichnet sind. Für das Durchmesser Verhältnis $B_x:B_y$ im Bereich zwischen 10:1 und 1,1:1 gilt, was vorstehend zum entsprechenden Durchmesser Verhältnis der Beleuchtungs-Aperturblende 11 ausgeführt wurde.

5

Auch die Abbildungs-Aperturblende 15 hat den größeren Blendendurchmesser B_x senkrecht zur Einfallsebene yz des Beleuchtungs- bzw. Abbildungslichts 1 auf dem Objekt 5. Auch bei der Abbildungs-Aperturblende 15 ist der Durchmesser B_x doppelt so groß wie der Durchmesser B_y .

10

Die Detektionseinrichtung 14 steht in Signalverbindung mit einer digitalen Bildverarbeitungseinrichtung 17.

Das Objekt 5 wird von einem Objekthalter 18 getragen. Dieser kann über einen Verlagerungsantrieb 19 einerseits parallel zur xy -Ebene und andererseits senkrecht zu dieser Ebene, also in z -Richtung, verlagert werden. Der Verlagerungsantrieb 19 wird, wie auch der gesamte Betrieb des Metrologiesystems 2 von einer zentralen Steuereinrichtung 20 gesteuert, die mit den zu steuernden Komponenten in nicht näher dargestellter Weise in Signalverbindung steht.

20

Der optische Aufbau des Metrologiesystems 2 dient zur möglichst exakten Emulation einer Beleuchtung sowie einer Abbildung im Rahmen einer Projektionsbelichtung des Objekts 5 bei der projektionslithografischen Herstellung von Halbleiterbauelementen.

25

Fig. 5 zeigt die Abbildungsverhältnisse einer lithografischen Projektionsoptik 21, die bei einer derartigen lithografischen Projektionsbelichtung zum Einsatz kommt. Im Unterschied zur Fig. 1 zeigt die Fig. 5 eine transmittie-

rende Beleuchtung des Objekts 5 anstelle der tatsächlich vorliegenden reflektierenden Beleuchtung. Angedeutet ist in einem Beleuchtungs-Lichtbündel 22 des Beleuchtungs- und Abbildungslichts 1 eine Strukturierung dieses Beleuchtungs-Lichtbündels 22 aufgrund eines definierten Beleuchtungssettings mit diskreten Beleuchtungspolen.

Die Projektionsoptik 21, die Teil einer ansonsten nicht dargestellten Projektionsbelichtungsanlage ist, ist anamorphotisch ausgeführt, hat also in der xz-Ebene einen anderen Abbildungsmaßstab als in der yz-Ebene. Eine objektseitige numerische Apertur der Projektionsoptik 21 beträgt in der xz-Ebene 0,125 und in der yz-Ebene 0,0625. Eine bildseitige numerische Apertur der Projektionsoptik 21 beträgt sowohl für die xz-Ebene als auch für die yz-Ebene jeweils 0,5. Es ergibt sich in der xz-Ebene ein Abbildungsmaßstab von 4x und in der yz-Ebene ein Abbildungsmaßstab von 8x, also ein Verkleinerungsfaktor einerseits von 4 und andererseits von 8.

Bei der Projektionsbelichtung bildet die Projektionsoptik 21 das Objektfeld 3 in ein Bildfeld 23 in einer Bildebene 24 ab, in der ein Wafer 25 angeordnet ist.

20

Im Unterschied zur Projektionsoptik 21 der Projektionsbelichtungsanlage ist die Projektionsoptik 13 des Metrologiesystems 1 nicht anamorphotisch, sondern hat sowohl in der xz-Ebene als auch in der yz-Ebene den gleichen vergrößernden Abbildungsmaßstab β_{MS} von mehr als 100, beispielsweise von 500 oder von 850. Die Metrologiesystem-Projektionsoptik 13 ist also isomorph.

25

Die Fig. 6 und 7 verdeutlichen die Reflexionsverhältnisse bei der Nutzung einer Beleuchtung mit elliptischer Randkontur, die dann in Reflexion von

einer hieran entsprechend angepassten anamorphotischen Projektionsoptik wie der Projektionsoptik 21 bzw. einer Optik mit elliptischer Abbildungs-Aperturblende wie bei der Projektionsoptik 13 genutzt werden kann. Aufgrund des elliptischen Querschnitts einerseits des Beleuchtungs-
5 Lichtbündels 22 und andererseits eines vom Objekt 5 reflektierten Abbildungs-Lichtbündels 26 kann ein kleiner Hauptstrahl-Einfallswinkel CRA von 6° oder weniger realisiert sein, da die Lichtbündel 22, 26 in der yz-Ebene jeweils die kleinere numerische Apertur von 0,0625 haben. In der hierzu senkrechten xz-Ebene haben die Lichtbündel 22 und 26 die größere
10 numerische Apertur von 0,125, was dort nicht stört.

Eine zentrale Achse, von der aus der Hauptstrahlwinkel CRA gemessen wird und die senkrecht auf der Objektebene 4 steht, ist in den Fig. 6 und 7 mit A bezeichnet.

15 Bei der 3D-Luftbildmessung werden Daten erzeugt, mit deren Hilfe auf ein Abbildungs-Verhalten der im Objektfeld 3 beleuchteten Struktur des Objekts 5 durch die Projektionsoptik 21 im Bereich der Bildebene 24 rückgeschlossen werden kann. Hierzu wird das Metrologiesystem 2 eingesetzt,
20 wobei das Abbildungsmaßstab-Verhältnis von 2:1 der Projektionsoptik 21 in den zwei zueinander senkrechten Richtungen y und x, also in den beiden zueinander senkrechten Ebenen yz und xz, unter Verwendung einer Metrologiesystem-Projektionsoptik 13, die nicht anamorphotisch ist, berücksichtigt wird.

25 Das Verfahren zur 3D-Luftbildmessung wird nachfolgend anhand der Fig. 8 und 9 erläutert.

Zunächst wird das zu vermessende Objekt 5, also die zu vermessende Lithografiemaske in einem Schritt 27 bereitgestellt. Anschließend wird eine Intensitätsverteilung des Abbildungslichts 1 im Bereich einer Bildebene 14a vermessen, in der die Detektionseinrichtung 14 des Metrologiesystems 1 angeordnet ist. Dies geschieht in einem Messschritt 28. Die Detektionseinrichtung 14 erfasst im Messschritt 28 innerhalb eines Detektionsfeldes, in welches durch die Metrologiesystem-Projektionsoptik 13 das Objektfeld 3 abgebildet ist, eine 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung. Die vermessende Intensitätsverteilung wird dann jeweils abgespeichert und an die digitale Bildverarbeitungseinrichtung 17 weitergeleitet.

Es wird nun die Lithografiemaske 5 mithilfe des Verlagerungsantriebs 19 senkrecht zur Objektebene 4 um einen vorgegebenen Verlagerungsweg Δz verlagert. Dies geschieht in einem Verlagerungsschritt 29.

Der Messschritt 28 und der Verlagerungsschritt 29 werden dann mittels Durchführung eines Wiederholungsschrittes 30 so oft wiederholt, bis eine zur Wiedergabe eines 3D-Luftbildes ausreichende Anzahl von 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen mittels der Detektionseinrichtung 14 vermessen ist. Durch Wiederholen des Messschritts 28 und des Verlagerungsschritts 29 bei verschiedenen z-Positionen des Objekts 5 wird die 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung also beispielsweise an fünf, sieben, neun oder elf jeweils um Δz auseinander liegenden z-Positionen vermessen, wobei das Objekt 5 bei einem mittleren Verlagerungsschritt 29 exakt in der Objektebene 4 liegt. In der Fig. 1 sind strichpunktiert entsprechende Verlagerungs-z-Positionen des Objekts 5 angedeutet. Dargestellt ist der Fall, bei dem fünf jeweils um Δz auseinander liegende z-Positionen vermessen werden, wobei die in der Fig. 1 dargestellte z-Position, bei der

das Objekt 5 in der Objektebene 4 liegt, die mittlere der fünf zu vermessenden z-Positionen darstellt.

Die dritte Dimension des 3D-Luftbildes, nämlich die z-Dimension wird bei diesem Messverfahren der Messung durch z-Verlagerung des Objekts 5 zugänglich gemacht. Da das 3D-Luftbild eine anamorphotische Abbildung, nämlich die Abbildung durch die Lithografie-Projektionsoptik 21, emulieren soll, führt jeder Verlagerungsschritt 29 im Bereich der Bildebene 14a zu einer Defokussierung in z-Richtung. Defokussierungswerte einerseits in der xz-Ebene und andererseits in der yz-Ebene unterscheiden sich voneinander aufgrund des zu emulierenden xz-/yz-Abbildungsmaßstab-Verhältnisses der Lithografie-Projektionsoptik 21. Der Unterschied zwischen den Abbildungsmaßstab-Verhältnissen einerseits der isomorphen Metrologiesystem-Projektionsoptik 13 und andererseits der zu emulierenden anamorphotischen Projektionsbelichtungsanlagen-Projektionsoptik 21 wird beim Vermessungsverfahren durch Einbeziehen einer Beeinflussungsgröße berücksichtigt, die dem Verhältnis der Abbildungsmaßstäbe der Lithografie-Projektionsoptik 21 entspricht. Dies geschieht in einem Einbeziehungs-Schritt 31, der im Ablaufschema der Fig. 9 stärker im Detail dargestellt ist.

Die Vermessung wird mit einer Messoptik des Metrologiesystems 1 durchgeführt, deren Abbildungsmaßstab in zueinander senkrechten Richtungen (xz/yz) gleich ist. Der Einziehungsschritt 31 erfolgt ausschließlich durch Umrechnen der Daten der gemessenen 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung. Diese Umrechnung wird von der digitalen Bildverarbeitungseinrichtung 17 durchgeführt.

Bei der Durchführung des Einbeziehungsschritts 31 werden zunächst die Datensätze der Messschritte 28 herangezogen, also die verschiedenen gemessenen 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen an den unterschiedlichen z-Positionen des Objekts 5, die im Rahmen der vorausgegangenen

5 Sequenz der wiederholten Schritte „Messschritt 28/Verlagerungsschritt 29“ vermessen und in einem Speicher der digitalen Bildverarbeitungseinrichtung 17 abgelegt wurden. Dies geschieht in einem Heranziehungsschritt 32.

Aus den so herangezogenen Daten wird zur Vorbereitung der Einbeziehung

10 in einem Rekonstruktionsschritt 33 eine elektromagnetische Wellenfront des Abbildungslichts 1 nach Wechselwirkung des Abbildungslichts 1 mit dem Objekt 5 rekonstruiert. Diese Rekonstruktion findet insbesondere im Bereich der Bildebene 14a des Metrologiesystems 1 statt. Beim Rekonstruktionsschritt 33 kann eine Phasenrekonstruktion der elektromagnetischen Wellenfront des Abbildungslichts 1 erfolgen. Insbesondere werden

15 Phase und Amplitude eines 3D-Objektspektrums und deren partiell kohärente Überlagerung rekonstruiert. Eine polarisationsabhängige Rekonstruktion findet nicht statt.

20 Bei der Durchführung des Rekonstruktionsschritts 33 können verschiedene bereits aus der Literatur bekannte Phasenrekonstruktionsverfahren zum Einsatz kommen. Hierzu gehören Methoden, die verschiedene 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungs-Sequenzen, die durch entsprechende mehrfache Durchführung der Abfolge der Schritte 28 bis 30 erzeugt werden, wobei bei jeder dieser Sequenzen ein Teil des optischen Systems des

25 Metrologiesystems 1 verändert wird, was auch als Diversifizierung bekannt ist. Die Schritte 28 bis 30 können also einen Teil der Phasenrekonstruktion darstellen und bei der Rekonstruktion der Wellenfront im Schritt 33 zum Einsatz kommen.

Bei einer Variante der Phasenrekonstruktion findet eine Defokus-Diversifizierung statt. Dies wurde vorstehend durch Erläuterung der Schritte 28 bis 30 bereits diskutiert.

5

Algorithmen, die hierbei zum Einsatz kommen, können beispielsweise sein: Transport of Intensity Equation, Iterative Fourier Transform Algorithms (IFTA, z.B. Gerchberg-Saxton) oder Optimierungsmethoden, z.B. mittels Backpropagation. Der Algorithmus Transport of Intensity Equation (TIE) ist beschrieben im Fachartikel "Critical assessment of the transport of intensity equation as a phase recovery technique in optical lithography", Aamod Shanker ; Martin Sczyrba ; Brid Connolly ; Franklin Kalk ; Andy Neureuther ; Laura Waller, Proc. SPIE 9052, Optical Microlithography XXVII, 90521D (March 31, 2014); doi:10.1117/12.2048278. Der Algorithmus "Gerchberg-Saxton" ist beschrieben in Fienup, J.R. (1 August 1982). "Phase retrieval algorithms: a comparison.". Applied Optics 21 (15): 2758–2769. Bibcode:1982ApOpt..21.2758F. DOI:10.1364/AO.21.002758. Die Optimierungsmethode „Backpropagation“ ist beschrieben in General framework for quantitative three-dimensional reconstruction from arbitrary detection geometries in TEM, Phys. Rev. B 87, 184108 – Published 13 May 2013, Wouter Van den Broek and Christoph T. Koch.

Eine weitere Variante für einen Algorithmus, der bei der Phasenrekonstruktion zum Einsatz kommen kann, ist die Stokes Polarimetrie. Dieser Algorithmus ist beispielsweise beschreiben in Opt Express. 2014 Jun 2;22(11):14031-40. DOI: 10.1364/OE.22.014031. All-digital wavefront sensing for structured light beams. Dudley A, Milione G, Alfano RR, Forbes A.

25

Bei Einsatz einer Phasenrekonstruktion kann auf die elliptische Abbildungs-Aperturblende 15 auch verzichtet werden. Die optische Wirkung der Aperturblende kann auch digital herbeigeführt werden.

- 5 Alternativ zu einer Defokus-Diversifizierung kann auch eine Beleuchtungsrichtungs-Diversifizierung zur Durchführung des Rekonstruktionsschritts 33 durchgeführt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Fourier-Ptychographie. Dieser Algorithmus ist beschrieben im Fachartikel „Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy, Guoan Zheng et al., Nature Photonics, Advance online publication 28.07.2013, DOI: 10.1038/NPHOTON.2013.187.

- Hierbei wird zu jeder Beleuchtungsrichtung eine 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung gemessen und mittels eines Algorithmus auf Phase und Amplitude der elektromagnetischen Wellenfront zurückgerechnet. Hierbei können wiederum die Algorithmen IFTA oder Backpropagation zum Einsatz kommen.

- Eine weitere Möglichkeit zur Durchführung des Rekonstruktionsschritts 33 ist eine allgemeine Pupillenmanipulation, wie dies beispielsweise bei der Spatial Light Interference Microscopy (räumliche Lichtinterferenzmikroskopie, SLIM, vgl. Fachartikel Wang et al. Optics Express, 2011, Volume 19, Nr. 2, Seite 1017) zum Einsatz kommen. Hier werden beispielsweise vier Bilder mit jeweils einer unterschiedlichen phasenschiebenden Maske aufgenommen, die in einer Detektionspupille, also beispielsweise in der Pupillenebene 8a der Projektionsoptik 13 des Metrologiesystems 1, angeordnet ist.

Grundsätzlich kann die Phasenrekonstruktion der elektromagnetischen Wellenfront auch ohne eine derartige Diversifizierung erfolgen. Beispiele hierfür stellen Verfahren der Interferometrie und der digitalen Holographie dar. Bei der Interferometrie wird ein Referenzstrahlengang benötigt. Bei
5 der digitalen Holographie wird zum Beispiel ein Gitter in die Detektionspupille eingebracht. Die einzelnen Beugungsordnungen werden dann auf dem Detektor zur Interferenz gebracht. Beispielfhaft sind diese Verfahren der Interferometrie und der digitalen Holographie beschreiben in U. Schnars, W. Jüptner (2005). Digital Holography. Springer, sowie Wen,
10 Han; Andrew G. Gomella, Ajay Patel, Susanna K. Lynch, Nicole Y. Morgan, Stasia A. Anderson, Eric E. Bennett, Xianghui Xiao, Chian Liu, Douglas E. Wolfe (2013). "Subnanoradian X-ray phase-contrast imaging using a far-field interferometer of nanometric phase gratings". Nat. Commun. 4. Bibcode:2013NatCo...4E2659W. doi:10.1038/ncomms3659.

15 Für ein gegebenes Beleuchtungssetting, für welches die abbildende Funktion der Lithografie-Projektionsoptik 21 durch das Metrologiesystem 1 emuliert werden soll, kann eine Phasenrekonstruktion durch feines Sampling der bei diesen Beleuchtungssetting verwendeten Beleuchtungspupille beispielsweise der Intensitätsverteilung nach Fig. 2 realisiert werden. Das
20 verwendete Beleuchtungssetting wird dabei durch viele kleine nahezu kohärente Beleuchtungs-Monopole angenähert, die sequentiell vermessen werden. Derartige Monopole sind in der Fig. 2 beispielhaft bei 34 angedeutet. Für jeden dieser Monopole 34 wird dann eine Phasenrekonstruktion
25 durchgeführt, so dass die zu ermittelnde partiell kohärente Welle nach Wechselwirkung mit dem Objekt 5 als Überlagerung von angenähert kohärenten Wellen, also den Ergebnissen der jeweiligen Phasenrekonstruktion zur Monopol-Beleuchtung, beschrieben werden kann. Ein derartiges Abrastern der Beleuchtungspupille wird bei der Fourier-Ptychografie als Diversi-

fizierung verwendet. Ein partiell kohärentes Feld kann also als Überlagerung vieler nahezu kohärenter Felder beschrieben werden, die durch das Monopol-Sampling erzeugt werden.

- 5 Nach dem Rekonstruktionsschritt 33 erfolgt eine digitale Simulation der Abbildung mit dem Abbildungsmaßstab-Verhältnis der Lithografie-Projektionsoptik 25. Dies erfolgt in einem digitalen Simulationsschritt 35.

- Die beim Rekonstruktionsschritt 33 berechnete elektromagnetische Wellenfront wird hierbei so manipuliert, wie sie bei der Propagation durch ein
10 entsprechendes anamorphotisches System manipuliert würde. Dies kann durch Einsatz einer digitalen elliptischen Abbildungs-Aperturblende entsprechend der vorstehend erläuterten Abbildungs-Aperturblende 15 geschehen. Gleichzeitig muss durch die digitale Manipulation sichergestellt werden, dass bildseitig, wie auch bei der Lithografie-Projektionsoptik 25,
15 die numerische Apertur in der xz-Ebene gleich ist zur numerischen Apertur in der yz-Ebene. Eine derartige digitale Manipulation kann durch eine digitale Zylinderlinse oder durch Addieren einer astigmatischen Wellenfront erfolgen. Die Addition einer astigmatischen Wellenfront kann durch Addition
20 eines Beitrages eines Zernike-Polynoms Z5 erfolgen. Zernike-Polinome Z_i ($i=1, 2, \dots$) sind beispielsweise in der Fringe-Notierung bekannt aus der mathematischen und der optischen Literatur. Ein Beispiel für diese Notierung gibt das CodeV-Manual, Version 10.4, S. C-6 ff.
- 25 Die resultierende astigmatische Wellenfront kann dann in jeder Propagationsebene berechnet werden.

Entsprechend kann nun in einem Ausgabeschritt 36 die Ausgabe des unter Einbeziehung der Beeinflussungsgröße resultierenden 3D-Luftbildes ausgegeben werden.

- 5 Die Phasenrekonstruktion kann einen Fourier-Transformationsschritt beinhalten, mit dem aus einer berechneten Phase eine komplexe, also die Phase beinhaltende Amplitudenverteilung berechnet wird. Nach digitaler Astigmatismus-Manipulation kann dann mithilfe einer inversen Fourier-Transformation zurück in das Bildfeld gerechnet werden.

10

Im Rahmen der Phasenrekonstruktion kann auch eine dreidimensionale (3D-)Fouriertransformation stattfinden.

- Alternativ kann zur Durchführung des Rekonstruktionsschritts 33 eine Intensitäts-Fouriertransformation der bei der Sequenz der Schritte 28 bis 30 ermittelten 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen durchgeführt werden, wozu diese Intensitätsverteilungen vorab mittels bekannter mathematischer Techniken mit periodischen Randbedingungen versehen werden. In diesem Zusammenhang wird verwiesen auf die WO 2008/025433 A2 und
15
20 die DE 10 2007 009 661 A1.

- Der Einbeziehungsschritt 31 erfolgt dann durch Auswahl der xy-Richtungskomponenten der erzeugten Intensitäts-Fouriertransformationen unter Berücksichtigung des xy-Abbildungsmaßstabs-Verhältnisses der Lithografie-Projektionsoptik 21. Es wird also ein Fourierbild zusammengesetzt, dessen x-Komponente bei einer Verlagerung mit einer ersten
25 Schrittweite Δz_1 mit einer Sequenz der Verfahrensschritte 28 bis 30 aufgenommen wurde und als y-Komponente werden Fourierkomponenten der Intensitätsverteilungen einer Sequenz verwendet, die mit einem schrittwei-

ten Verhältnis Δz_2 aufgenommen wurden. Für Richtungskomponenten, die mit der x-Achse einen Winkel φ zwischen 0° und 90° einnehmen, werden fouriertransformierte 2D-Intensitätsdaten herangezogen, die bei einer zwischenliegenden Schrittweite Δz_i aufgenommen wurden. Die jeweilige

5 Schrittweite Δz_i skaliert mit dem Winkel φ der jeweils betrachteten Richtung der Fourierkomponente und der x-Achse.

Die Funktion $\Delta z_i(\varphi)$ kann zwischen den Schrittweiten Δz_1 für die x-Achse und den Schrittweiten Δz_2 für die y-Achse linear oder mittels einer angepasst ausgewählten Anpassungsfunktion, z.B. mittels einer quadratischen

10 Funktion, einer Sinusfunktion und einer $\sin^2$ -Funktions variiert werden.

Die Δz_i -Schrittweiten-Messungen der 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen müssen nicht alle real durchgeführt werden, sondern es kann, falls eine Messung bei einem z-Wert zwischen zwei real

15 durchgeführten Messungen benötigt wird, auch eine Interpolation zwischen diesen beiden 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen durchgeführt werden. Diese Interpolation kann z.B. mithilfe einer nearest-neighbourhood, einer linearen, einer bikubischen oder einer Spline-

20 Interpolationsfunktion erfolgen. Die Interpolation kann im Fourierraum, aber auch im Ortsraum stattfinden.

Eine Abbildung mit dem Metrologiesystem 2 kann mit einer elliptischen Abbildungs-Aperturblende 15, alternativ aber auch mit einer ovalen oder

25 mit einer rechteckigen Blende durchgeführt werden. Soweit keine Phasenrekonstruktion durchgeführt wird, ist der Einsatz einer Abbildungs-Aperturblende mit einem x/y-Aspektverhältnis erforderlich, welches dem Verhältnis der Abbildungsmasstabs in x- und y- Richtung einer zu emulierenden bzw. zu rekonstruierenden Abbildungsoptik entspricht, , also bei-

spielsweise ein Aspekt- bzw. Durchmesser-Verhältnis im Bereich zwischen 10:1 und 1,1:1 hat.

Das so manipulierte und aus den verschiedenen Richtungskomponenten
5 zusammengesetzte Fourierbild wird dann über eine inverse Fouriertrans-
formation rücktransformiert, so dass sich das gewünschte 3D-Luftbild er-
gibt.

Die sich ergebende Bild-Intensitätsverteilung kann dann noch softwaremä-
10 ßig verzerrt werden, insbesondere in x-Richtung anders skaliert werden als
in y-Richtung, um einen von der Lithografie-Projektionsoptik 21 erzeugten
Anamorphismus wiederzugeben.

Die Schritte 28 bis 30 sind also nicht zwingend. Nach dem Bereitstellungs-
15 schritt 27 kann eine Rekonstruktion der Wellenfront im Rekonstruktions-
schritt 33 auch durch eine der vorstehend beschriebenen Varianten erfol-
gen.

Ein Verfahren zum dreidimensionalen Vermessen eines 3D-Luftbildes im
20 Bereich um die Bildebene 24 bei der Abbildung der Lithografiemaske 5,
die in der Objektebene 4 angeordnet ist, unter Berücksichtigung eines
wählbaren Abbildungsmaßstab-Verhältnisses einer zu emulierenden bzw.
zu rekonstruierenden Abbildungsoptik unter Einsatz einer Intensitätsrekon-
struktion einer elektromagnetischen Wellenfront des Abbildungslichts 1
25 wird nachfolgend anhand der Fig. 10 ff. noch näher im Detail erläutert.

Hierbei wird zunächst durch Wiederholung der Schritte 28 bis 30 ein Sta-
pel von jeweils sich um einen Δz -Verlagerungsweg der Teststruktur unter-
scheidenden 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung im Bereich der Ebe-

ne 14a mit der Detektionseinrichtung 14 gemessen. Dies geschieht mit eingesetzter Abbildungs-Aperturblende 15 nach Fig. 4.

Die Fig. 11 bis 14 zeigen beispielhaft für ein Rechteck 5 als Beispiel für
5 eine Teststruktur, die anstelle der Lithografiemaske 5 zum Einsatz kommt, verschiedene Messergebnisse für die sich hierbei ergebende 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung. Das Rechteck hat ein x/y-Aspektverhältnis von 1:2.

10 Fig. 11 zeigt die gemessene 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung für einen sich bildseitig ergebenden Defokus Δz von 1600 nm.

Fig. 12 zeigt die gemessene 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung für einen Defokus Δz von 2500 nm.

15

Fig. 13 zeigt die gemessene 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung für einen Defokus Δz von 4900 nm.

Fig. 14 zeigt die gemessene 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung für
20 einen Defokus Δz von 6400 nm.

Die in den Fig. 11 bis 14 sichtbare fortschreitende Defokussierung erscheint in der y-Richtung bei gegebenem Verlagerungsweg Δz schwächer als in x-Richtung, was sich aufgrund des Bx/By-Aspektverhältnisses der
25 Abbildungs-Aperturblende 15 erklärt, die zu einer größeren Tiefenschärfe in der y-Richtung im Vergleich zur x-Richtung führt.

Zur Intensitätsrekonstruktion des 3D-Luftbildes führt die zu emulierende Abbildungsoptik mit vorgegebenem und von 1 verschiedenen Abbil-

dungsmaßstab-Verhältnis findet nun eine Umrechnung des gemessenen Fokusstapels mit einer Vielzahl von 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen nach Art der Fig. 11 bis 14 für verschiedene Verlagerungswege Δz in ein synthetisches Ergebnisbild des 3D-Luftbildes dieser
5 Abbildungsoptik statt.

Beispielhaft wird von einem Vergrößerungsmaßstab der zu emulierenden abbildenden Optik 21 in der x-Richtung, β_x , von 1 / 4 und in der y-Richtung, β_y , von 1 / 8 ausgegangen. Die abbildende Optik 13 des Metro-
10 logiesystems 2 hat einen isomorphen Vergrößerungsfaktor β_{MS} von 850.

Die Verlagerung Δz der Teststruktur bzw. der Lithografiemaske 5 wird nachfolgend auch als Δz_{LM} bezeichnet.

15 Mit Hilfe ausgewählter 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen zu bestimmten Verlagerungswegen Δz , wie beispielhaft in den Fig. 11 und 14 gezeigt, wird nun ein synthetisches Bild der Lithografie-Projektionsoptik 21 erzeugt. Hierzu wird von jeder der 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen eine Intensitäts-Fouriertransformation erzeugt. Er-
20 gebnis ist jeweils eine 2D-Intensitäts-Fouriertransformierte. Beispielhaft ist der Absolutbetrag der 2D-Intensitäts-Fouriertransformierten der 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen nach den Fig. 11 bis 14 in den Fig. 15 bis 18 gezeigt.

25 Aus diesen Intensitäts-Fouriertransformierten wird nun ein neues synthetisches Ergebnis-Bild erzeugt. Hierzu werden Richtungskomponenten der zunächst erzeugten 2D-Intensitäts-Fouriertransformierten unter Berücksichtigung des Abbildungsmaßstab-Verhältnisses der Lithografie-Projektionsoptik 21 ausgewählt. Ein Verlagerungsweg Δz_i einer hierzu je-

weils ausgewählten 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung skaliert hierbei mit der Ausrichtung der Richtungskomponenten. Hierzu geht man folgendermaßen vor:

- 5 Auf der x-Achse verwendet man die Intensitäten und Phasen (also Real- und Imaginäranteil) des Fourierbildes, das in Ebene $\Delta z_i = \Delta z_{LM} / \beta_x^2$ aufgenommen wurde.

- 10 Auf der y-Achse verwendet man die Intensitäten und Phasen des Fourierbildes, das in Ebene $\Delta z_i = \Delta z_{LM} / \beta_y^2$ aufgenommen wurde.

- 15 Für alle Pixel dazwischen verwendet man die Intensitäten und Phasen eines Fourierbildes, das in einer Defokus-Ebene Δz_i zwischen $\Delta z_{LM} / \beta_x^2$ und $\Delta z_{LM} / \beta_y^2$ aufgenommen wurde. Die Funktion für die interpolierende Berechnung des Defokus soll stetig und vorteilhafterweise stetig differenzierbar sein und vorteilhafterweise von 0° bis 90° monoton sein.

- 20 Nachfolgend werden zwei Beispiele für eine Zuordnung jeweiliger Δz -Verlagerungspositionen zu den Richtungskomponenten, also den verschiedenen Winkeln φ angegeben:

$$\Delta z_i = \Delta z_{LM} * 1 / (\beta_x + (\beta_y - \beta_x) * \sin^2 \varphi)^2$$

(= Beispiel-Zuordnungsfunktion 1)

- 25
$$\Delta z_i = \Delta z_{LM} * (1/\beta_x + (1/\beta_y - 1/\beta_x) * \sin^2 \varphi)^2$$

(= Beispiel-Zuordnungsfunktion 2)

Fig. 10 verdeutlicht den Verlauf dieser Beispiel-Zuordnungsfunktionen, also die Abhängigkeit $\Delta z_i(\varphi)$ für Werte von Δz_{LM} von -100 nm, -50 nm, 0 nm, 50 nm und 100 nm. Die der Beispiel-Zuordnungsfunktion 1 zugeordneten Kurven sind mit BF1 und die der Beispiel-Zuordnungsfunktion 2 zugeordneten Kurven sind mit BF2 bezeichnet.

Ein weiteres Beispiel einer Zuordnungsfunktion nach Art der vorstehend beschriebenen Beispiel-Zuordnungsfunktionen 1 und 2 ist der Mittelwert aus diesen beiden Beispiel-Zuordnungsfunktionen.

10

Für diese Rechnung benötigt man einen Fokusstapel mit sehr vielen Bildern und sehr kleiner Schrittweite. In der Praxis wird man aber meist (z.B. um Messzeit zu sparen) weniger Bilder messen und die Schrittweite größer wählen. In diesem Fall kann man die Bilder zwischen den verschiedenen gemessenen Bildern interpolieren. Die Interpolation kann im Bildraum (also vor der Fouriertransformation) oder im Fourierraum (nach der Fouriertransformation) erfolgen. Als Interpolationsmethode kommt je nachdem, welche Genauigkeit gewünscht ist, nearest neighbour, linear, bikubisch, spline oder ein anderes Verfahren in Betracht.

20

Vorteilhafterweise wählt man den gesamten Fokusbereich so groß, dass man zwischen den Fokusebenen nur interpolieren und nicht extrapolieren muss.

25 Eine numerische Realisierung einer Richtungskomponenten-Auswahl entsprechend einer dieser Beispiel-Zuordnungsfunktionen wird verdeutlicht durch digitale Auswahlfunktionen nach den Fig. 19 bis 22. Die digitalen

Auswahlfunktionen haben dort den Wert 1, wo weiße Flächen vorliegen, und überall sonst den Wert 0.

Dargestellt ist anhand der vier gemäß den Fig. 11 bis 14 gemessenen 2D-
5 Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen eine übertrieben grobe Ermittlung des Ergebnis-Bildes mit entsprechend lediglich vier verschiedenen Defokuswerten und zugeordneten Auswahlfunktionen. Letztere sind so gewählt, dass jeder Punkt auf der über die digitalen Auswahlfunktionen aufgespannten x/y-Fläche genau ein Mal ausgewählt wird. Die Zuordnung dieser Rich-
10 tungskomponenten φ zum Defokuswert Δz_i erfolgt dabei über die Zuordnungs-Beispielfunktion BF1, also die oberste Kurve in der Fig. 10.

Berechnet wird ein Ergebnis-Bild für $\Delta z_{LM} = 100$ nm. Für die x-Achse dieses Ergebnis-Bildes wird die Intensitäts-Fouriertransformierte nach Fig. 15
15 ausgewählt. Hierzu wird diese Intensitäts-Fouriertransformierte nach Fig. 15 mit der digitalen Auswahlfunktion nach Fig. 19 multipliziert, die für Werte, die im Bereich der x-Achse ($\varphi \approx 0$) liegen, 1 und für alle anderen Werte 0 ist.

20 Die Auswahlfunktion nach Fig. 20 ist der Intensitäts-Fouriertransformierten nach Fig. 16 zugeordnet und deckt den Wert φ ungefähr gleich 30° ab.

Fig. 21 zeigt die digitale Auswahlfunktion für die Intensitäts-
25 Fouriertransformierte nach der Fig. 17 (Richtungskomponente φ ungefähr gleich 60°).

Fig. 22 zeigt die digitale Auswahlfunktion für die Intensitäts-Fouriertransformierte nach Fig. 18 (φ ungefähr gleich 90°).

Über die Auswahlfunktionen 19 bis 22 findet also eine Auswahl vorgegebener Winkel-Sektoren der 2D-Intensitäts-Fouriertransformierten nach den Fig. 15 bis 18 statt.

Numerisch wird also die Intensitäts-Fouriertransformierte nach Fig. 15 mit der digitalen Auswahlfunktion nach Fig. 19 multipliziert, die Intensitäts-Fouriertransformierte nach Fig. 16 mit der digitalen Auswahlfunktion nach Fig. 20, die Intensitäts-Fouriertransformierte nach Fig. 17 mit der digitalen Auswahlfunktion nach Fig. 21 und die Intensitäts-Fouriertransformierte nach Fig. 18 mit der digitalen Auswahlfunktion nach Fig. 22. Die Resultate dieser Multiplikationen werden addiert und ergeben eine synthetische 2D-Intensitäts-Gesamt-Fouriertransformierte. Deren Absolutbetrag ist in Fig. 23 dargestellt. Es werden also in einem Zwischenschritt erzeugte synthetische 2D-Intensitäts-Teil-Fouriertransformierte, die jeweils das Ergebnis der einzelnen Multiplikationen darstellen, miteinander addiert. Eine Fourier-Rücktransformation dieser synthetischen 2D-Intensitäts-Gesamt-Fouriertransformierten ergibt ein synthetisches Roh-Bild nach Fig. 24.

Dieses synthetische Roh-Bild nach Fig. 24 wird anschließend mit dem Abbildungsmaßstab-Verhältnis der Lithografie-Projektionsoptik 21 verzerrt, so dass sich als Ergebnis-Bild für den zu emulierenden Defokus Δz_{LM} von 100 nm das Ergebnis-Bild nach Fig. 25 ergibt. Erwartungsgemäß sind bei diesem Defokus die Kanten der abgebildeten Teststruktur in x- und y-Richtung gleichermaßen verwaschen, da sich der Tiefenschärfen-Unterschied in x- und y-Richtung aufgrund der Abbildungs-Aperturblende

15 einerseits und das Abbildungsmaßstab-Verhältnis β_x / β_y andererseits ausgleichen.

Die vorstehend im Zusammenhang mit den Fig. 11 bis 25 erläuterte Be-
5 rechnung wird nachfolgend noch für die weiteren zu emulierenden Δz -
Defokus-Verlagerungen der Lithografiemaske 5, Δz_{LM} , durchgeführt. Hier-
zu werden für die Verlagerungen Δz_{LM} von 50 nm, 0 nm, -50 nm und -
100 nm die Richtungskomponenten entsprechend den in der Fig. 10 darge-
stellten Kurven ausgewählt. Für zwischenliegende Δz_{LM} -Verlagerungen
10 werden entsprechende 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen ausge-
wählt, die entweder bei entsprechenden Δz_i -Werten gemessen oder interpo-
liert werden.

Das vorstehend im Zusammenhang mit den Fig. 11 bis 25 beschriebene
15 Verfahren wurde mit einer übertrieben groben Ermittlung des Ergebnis-
Bildes mit lediglich vier verschiedenen Defokuswerten und zugeordneten
Auswahlfunktionen beschrieben. Durch Verwendung einer größeren An-
zahl von Defokuswerten, beispielsweise durch Verwendung von mehr als
fünf Defokuswerten, mehr als zehn Defokuswerten, durch Verwendung
20 von dreizehn oder siebzehn Defokuswerten, durch Verwendung von mehr
als zwanzig Defokuswerten, zum Beispiel durch Verwendung von fünf-
undzwanzig Defokuswerten, und gleichzeitiger Verwendung einer entspre-
chenden Anzahl von Auswahlfunktionen mit feinerer Winkelsektor-
Auswahl, lässt sich entsprechend eine Genauigkeit der Ermittlung des Er-
25 gebnis-Bildes noch verbessern.

Alternativ zu einer digitalen Auswahlfunktion, die ausschließlich die Wer-
te 0 und 1 annehmen kann, wie vorstehend im Zusammenhang mit den

Auswahlfunktionen nach den Fig. 19 bis 22 erläutert, kann auch eine Auswahlfunktion mit stetigem Übergang zwischen den Werten 0 und 1 zum Einsatz kommen. Auch diese alternativen Auswahlfunktionen mit stetigem Übergang werden so gewählt, dass sie einer Normierungsbedingung genügen, dass sie also in der Summe jeden Punkt der xy-Fläche mit einer Gewichtung von 1 auswählen.

Vorstehend wurde das Rekonstruktionsverfahren mit einer Ausführung beschrieben, bei der ein Verzerrungsschritt mit dem Abbildungsmaßstabs-Verhältnis der Lithografie-Projektionsoptik 21 den letzten Verfahrensschritt darstellt. Alternativ ist es möglich, die zunächst im Messschritt 28 gemessenen 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen mit dem Abbildungsmaßstabs-Verhältnis der Lithografie-Projektionsoptik 21 zu verzerren und im Anschluss hieran die anderen Rekonstruktionsschritte zum Vermessen des 3D-Luftbildes, insbesondere die Fouriertransformation, die Auswahl der Richtungskomponenten, die Addition der Richtungskomponenten und die Fourier-Rücktransformation, durchzuführen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum dreidimensionalen Vermessen eines 3D-Luftbildes im Bereich um eine Bildebene (24) bei der Abbildung einer Lithografie-
5 maske (5), die in einer Objektebene (4) angeordnet ist, unter Berücksichtigung eines wählbaren Abbildungsmaßstab-Verhältnisses in zueinander senkrechten Richtungen (x, y) mit folgenden Schritten:
 - Rekonstruktion einer elektromagnetischen Wellenfront von Ab-
10 bildungslicht (1) nach dessen Wechselwirkung mit der Lithografiemaske (5),
 - Einbeziehen (31) einer Beeinflussungsgröße, die dem Abbildungsmaßstab-Verhältnis entspricht,
 - Ausgabe (36) des unter Einbeziehung der Beeinflussungsgröße gemessenen 3D-Luftbildes.
- 15 2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Rekonstruktion folgende Schritte durchgeführt werden:
 - Vermessen (28) einer 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung im Bereich einer der Bildebene (24) entsprechenden Ebene (14a),
 - 20 - Verlagern der Lithografiemaske (5) senkrecht (z) zur Objektebene (4) um einen vorgegebenen Verlagerungsweg (Δz ; Δz_1 , Δz_2 ; Δz_1 , Δz_2 , Δz_i),
 - Wiederholen (30) der Schritte „Vermessen“ und „Verlagern“, bis eine zur Wiedergabe des 3D-Luftbildes ausreichende Anzahl von
25 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen vermessen ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Vermessung mit einer Messoptik (7, 13) durchgeführt wird, deren Abbildungsmaßstab in zueinander senkrechten Richtungen (x, y)

- 36 -

gleich ist, wobei die Einbeziehung (31) der Beeinflussungsgröße durch Umrechnung der Daten der gemessenen 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilung erfolgt.

- 5 4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der
Rekonstruktion (33) der elektromagnetischen Wellenfront eine Pha-
senrekonstruktion erfolgt.
- 10 5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Pha-
senrekonstruktion ein Defokus der Abbildung der Lithografiemaske
(5) variiert wird.
- 15 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeich-**
net, dass bei der Rekonstruktion (33) eine Manipulation an einer Be-
leuchtungsoptik (7), mit der die Lithografiemaske (5) beleuchtet wird,
vorgenommen wird.
- 20 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeich-**
net, dass zur Rekonstruktion (33) eine Beleuchtungspupille der Be-
leuchtungsoptik (7) variiert wird.
- 25 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeich-**
net, dass die Einbeziehung (31) der Beeinflussungsgröße beim Um-
rechnen der Daten der Wellenfront über eine digitale Simulation der
Abbildung mit dem Abbildungsmaßstab-Verhältnis erfolgt.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3 oder 6 bis 8, **dadurch**
gekennzeichnet, dass bei der Rekonstruktion (33) der elektromagne-
tischen Wellenfront eine Intensitätsrekonstruktion erfolgt.

10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Intensitätsrekonstruktion mit folgenden Schritten durchgeführt wird:
- Durchführen der Schritte nach Anspruch 2;
- 5 - Durchführen einer Intensitäts-Fouriertransformation der erhaltenen 2D-Abbildungslicht-Intensitätsverteilungen (Fig. 11 bis 14) zur Erzeugung einer entsprechenden Anzahl von 2D-Intensitäts-Fouriertransformierten (Fig. 15 bis 18).
- 10 11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Intensitätsrekonstruktion mit folgenden Schritten durchgeführt wird:
- Durchführen der Schritte nach Anspruch 2;
 - Verzerren der gemessenen 2D-Abbildungslicht-
- 15 Intensitätsverteilungen mit dem Abbildungsmaßstab-Verhältnis.
12. Verfahren nach Anspruch 10, **gekennzeichnet**, durch folgende Schritte
- Auswählen von Richtungskomponenten der erzeugten 2D-
- 20 Intensitäts-Fouriertransformierten unter Berücksichtigung des Abbildungsmaßstab-Verhältnisses, wobei ein Verlagerungsweg (Δz_i) beim Verlagern der Lithografiemaske (5) senkrecht zur Objektebene (4) mit der Ausrichtung (φ) der Richtungskomponenten skaliert, zur Erzeugung jeweils einer synthetischen 2D-Intensitäts-Teil-
- 25 Fouriertransformierten;
- Addieren der erzeugten synthetischen 2D-Intensitäts-Teil-Fouriertransformierten zu einer synthetischen 2D-Intensitäts-Gesamt-Fouriertransformierten;

- 38 -

- Durchführen einer Intensitäts-Fourier-Rücktransformation der synthetischen 2D-Intensitäts-Gesamt-Fouriertransformierten zur Erzeugung eines synthetischen Roh-Bildes.
- 5 13. Verfahren nach Anspruch 12, **gekennzeichnet**, durch das
- Erzeugen eines Ergebnis-Bildes (Fig. 25) durch Verzerren des synthetischen Roh-Bildes (Fig. 24) mit dem Abbildungsmaßstab-Verhältnis.
- 10 14. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Auswahl der Richtungskomponenten der erzeugten 2D-Intensitäts-Fouriertransformierten (Fig. 15 bis 18) erfolgt durch Multiplizieren jeder der erzeugten 2D-Intensitäts-Fouriertransformierten (Fig. 15 bis 18) mit einer zugeordneten Auswahlfunktion (Fig. 19 bis
- 15 22) zur Auswahl vorgegebener Winkel-Sektoren der 2D-Intensitäts-Fouriertransformierten (Fig. 15 bis 18), wobei die Auswahlfunktion vom Verlagerungsweg (Δz_i) senkrecht zur Objektebene (4) und vom Abbildungsmaßstab-Verhältnis abhängt, zur Erzeugung der jeweiligen synthetischen 2D-Intensitäts-Teil-Fouriertransformierten.
- 20
15. Verfahren nach Anspruch 14, **gekennzeichnet durch** eine digitale Auswahlfunktion (Fig. 19 bis 22).
- 25 16. Metrologiesystem (2) zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 15 mit einer Beleuchtungsoptik (7) zur Beleuchtung der zu untersuchenden Lithografiemaske (5) und mit einer abbildenden Optik (13) zur Abbildung des Objekts (5) hin zu einer ortsauflösenden Detektionseinrichtung (14).

1/10

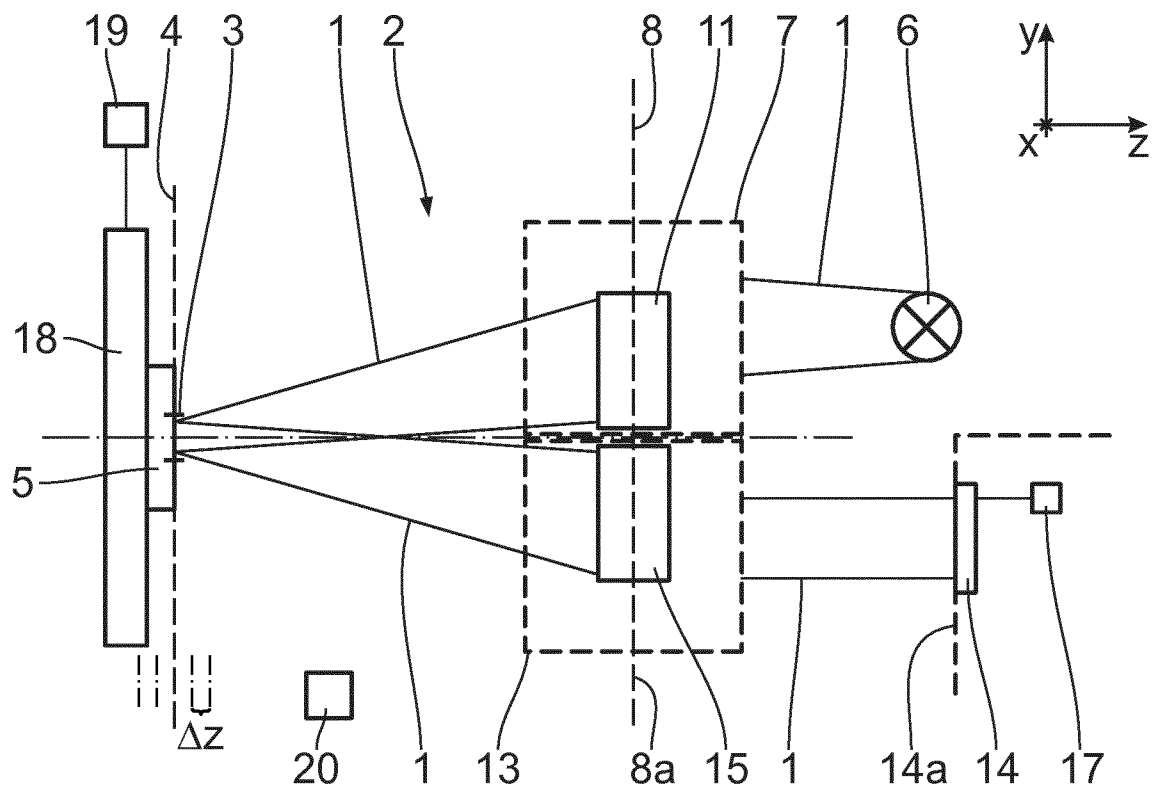


Fig. 1

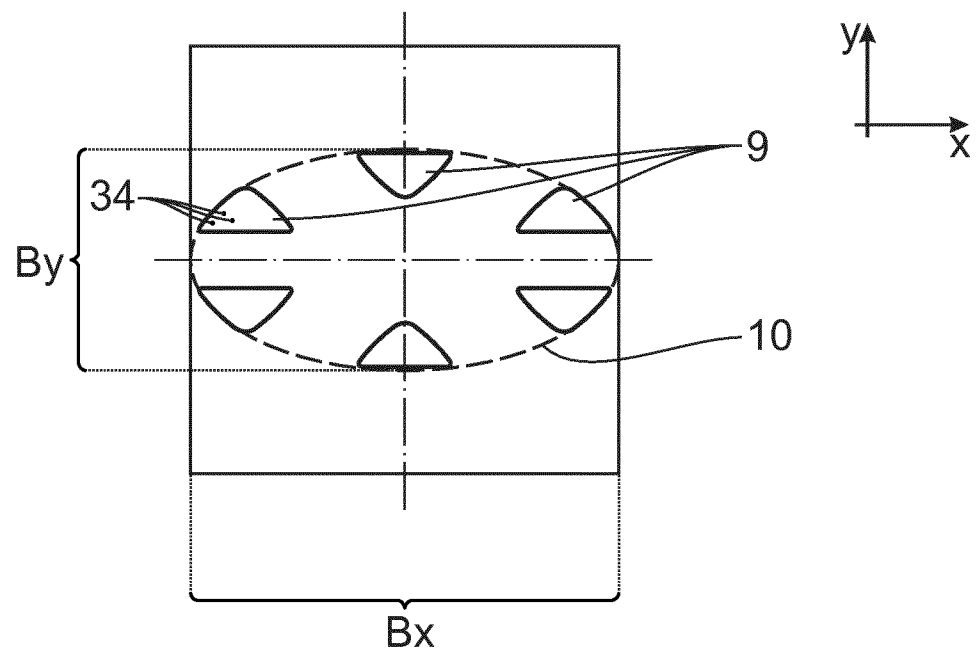


Fig. 2

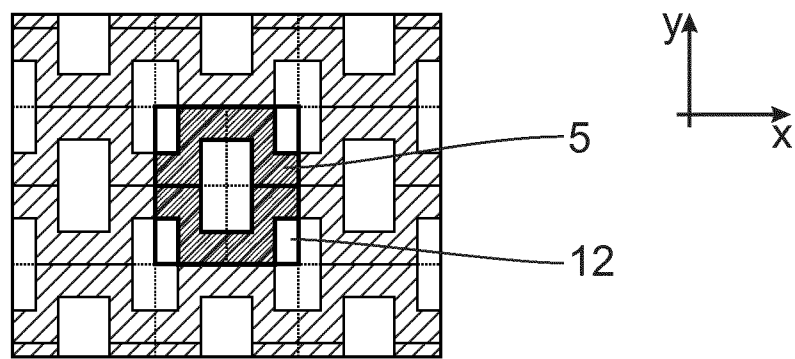


Fig. 3

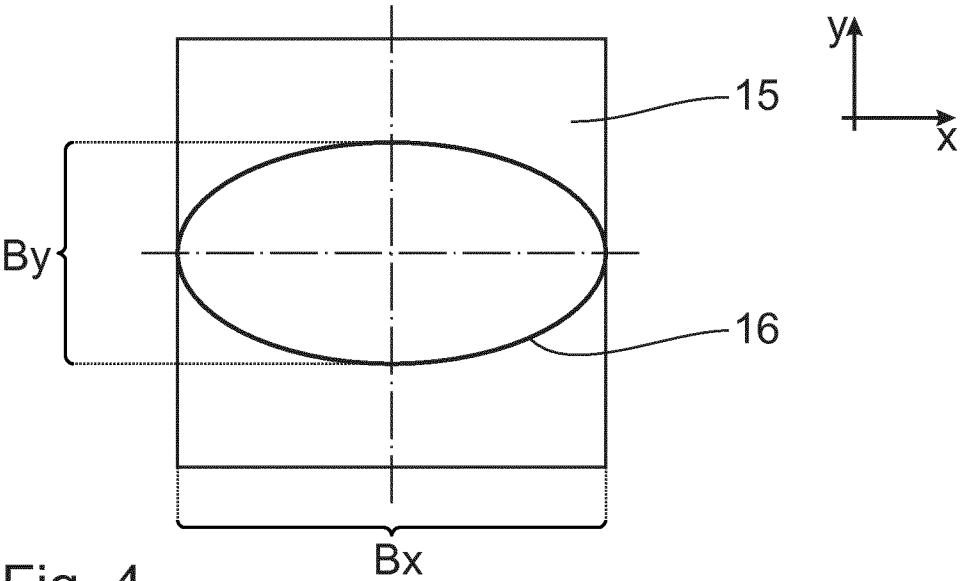


Fig. 4

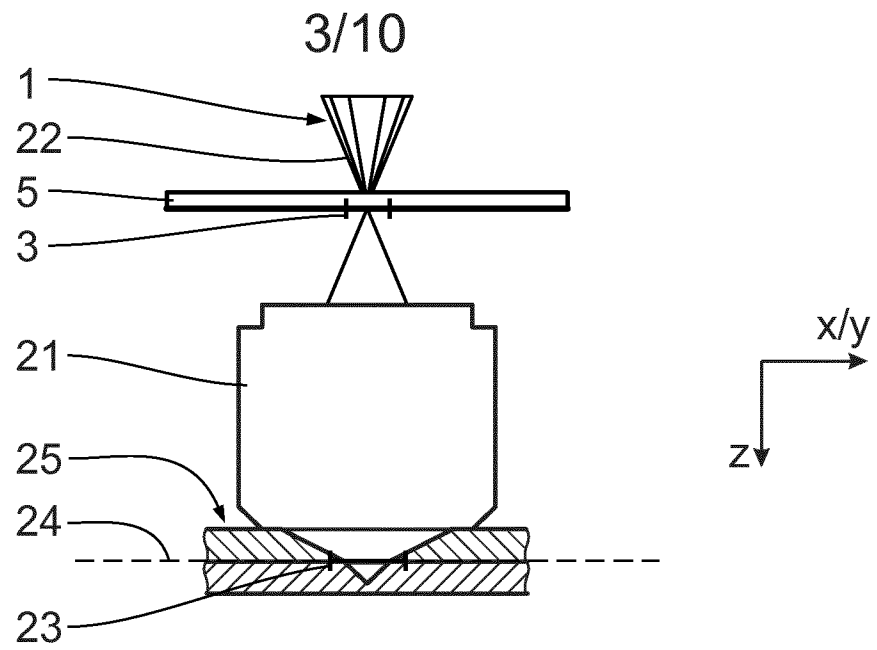


Fig. 5

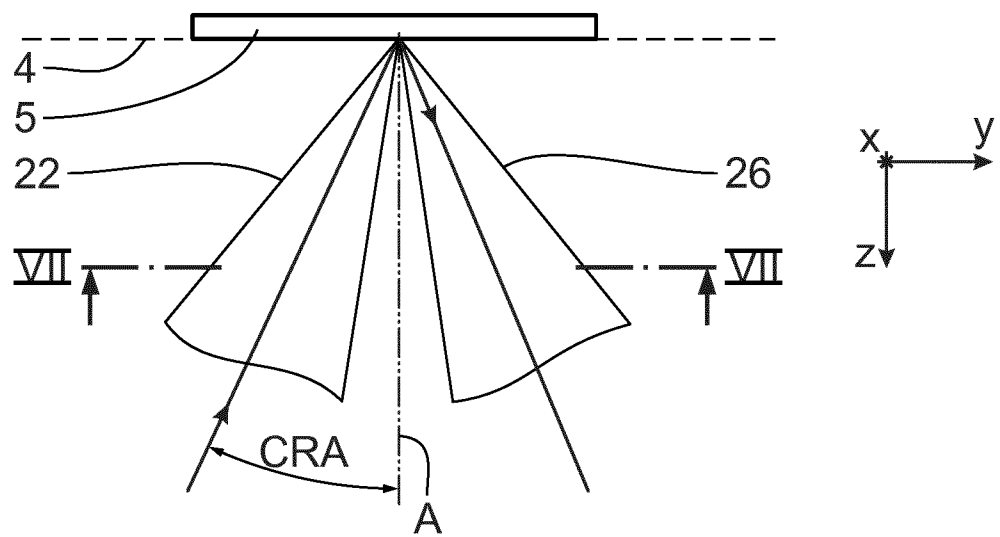


Fig. 6

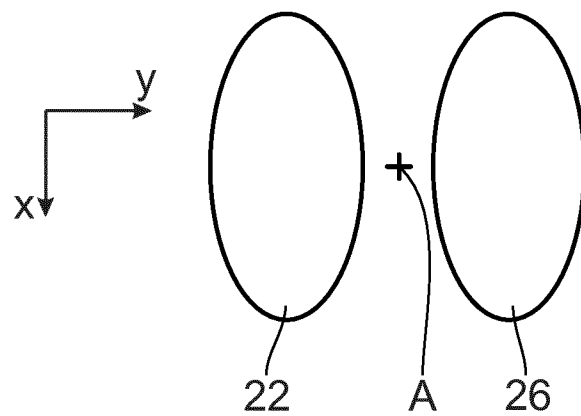


Fig. 7

4/10

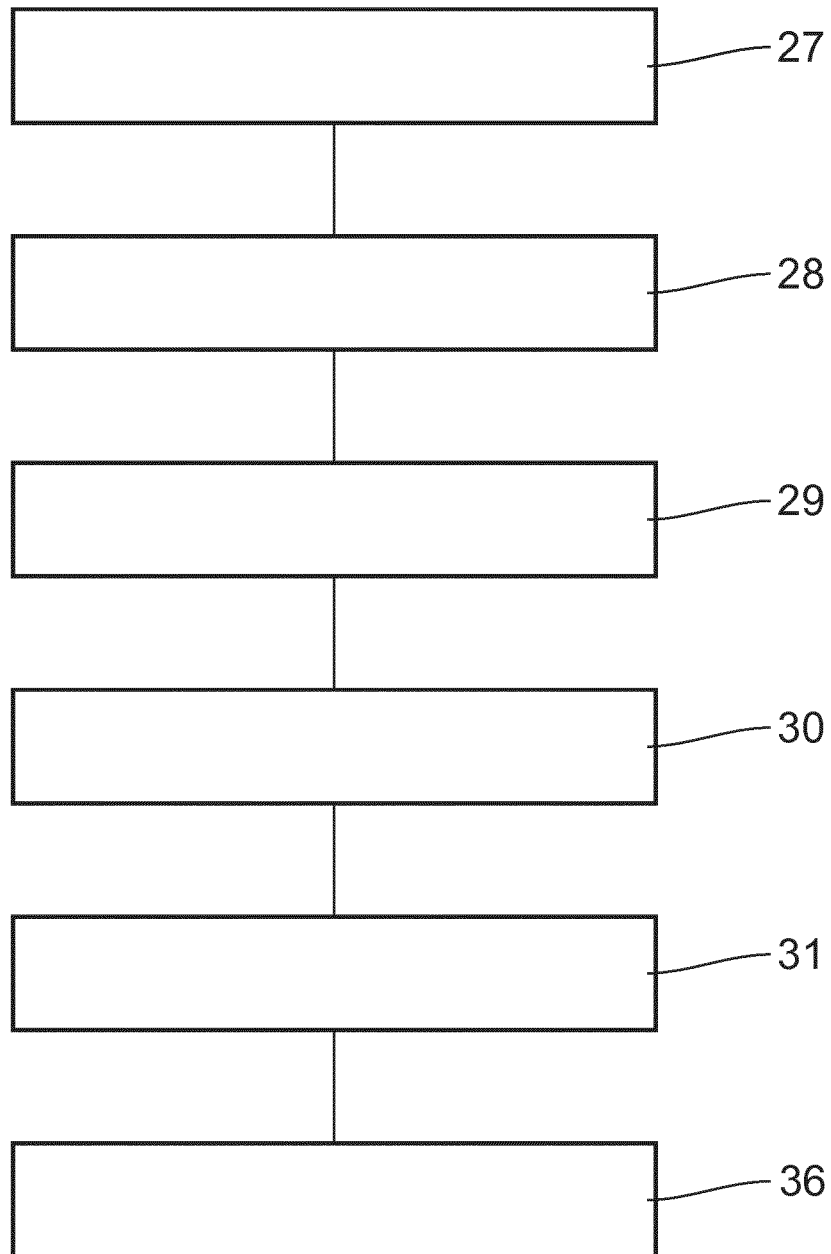


Fig. 8

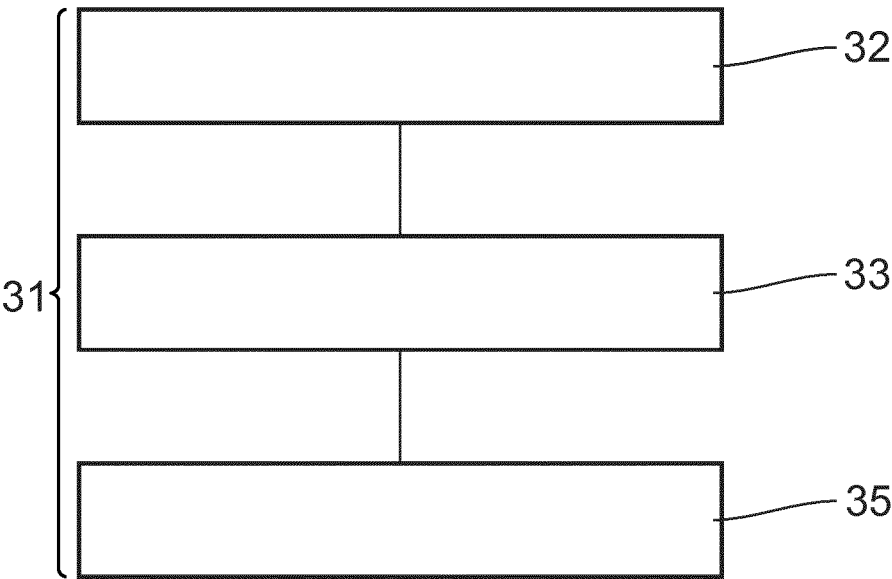


Fig. 9

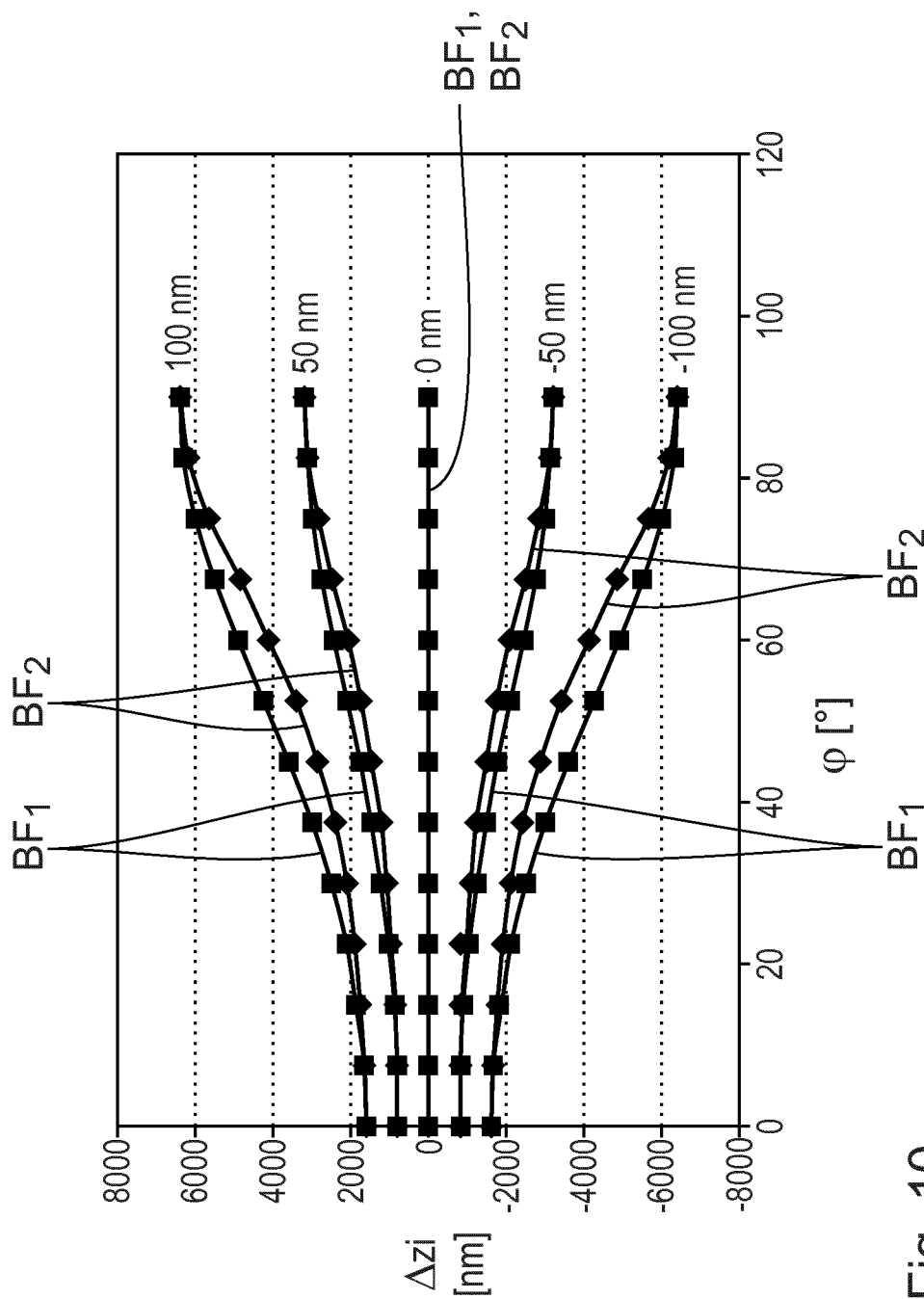


Fig. 10

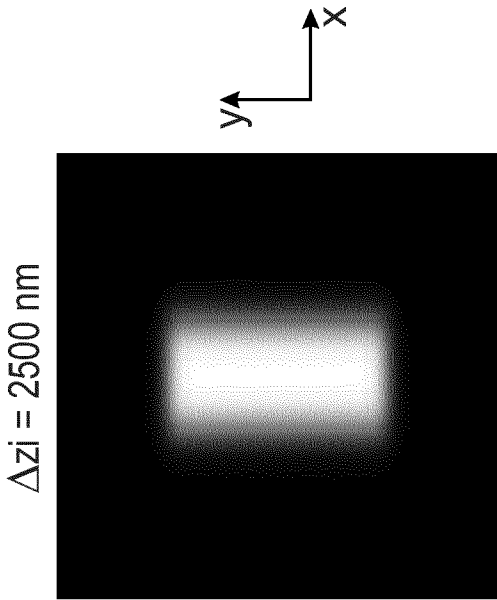


Fig. 12

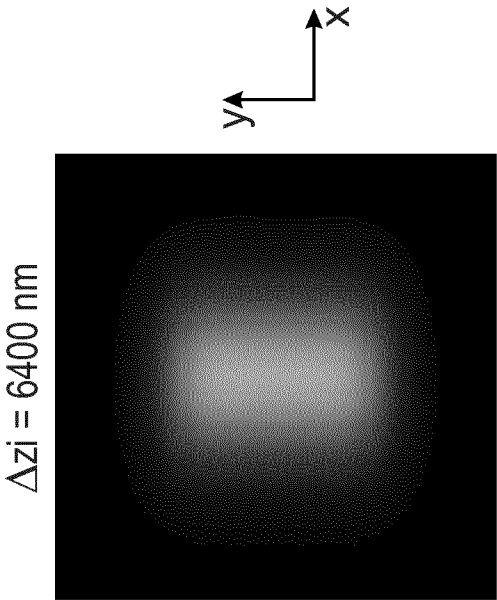


Fig. 14

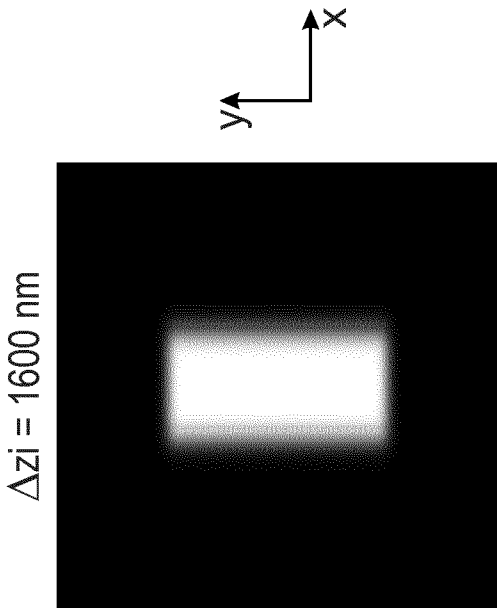


Fig. 11

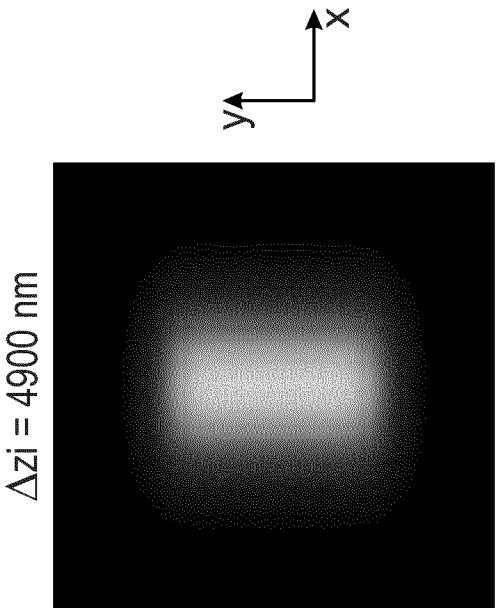


Fig. 13

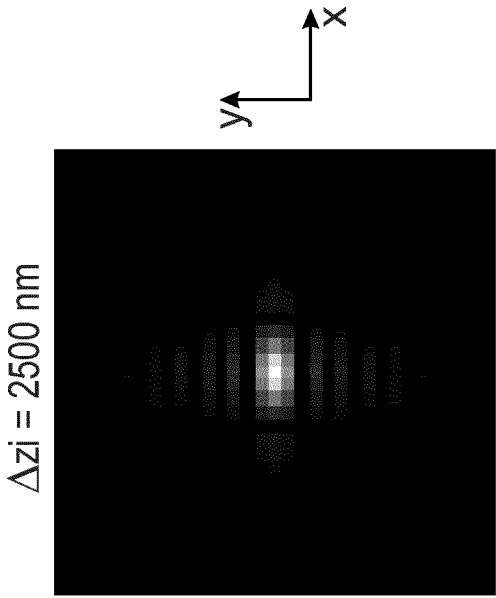


Fig. 16

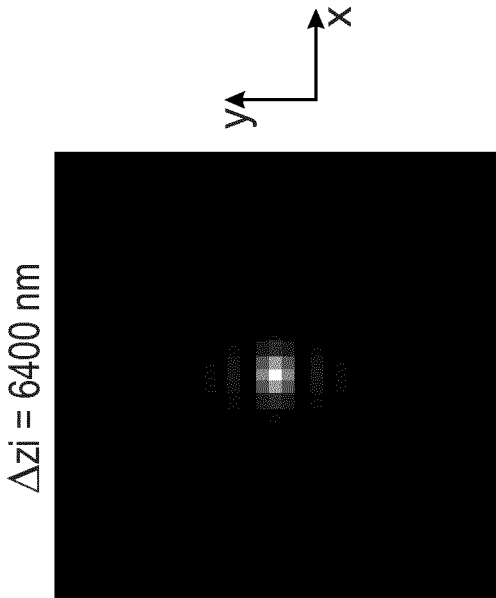


Fig. 18

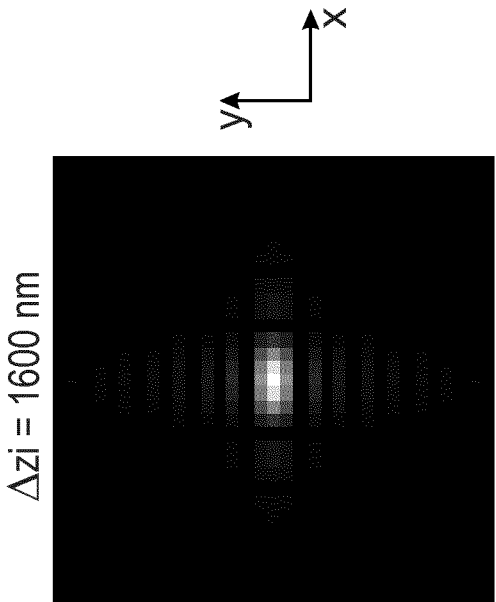


Fig. 15

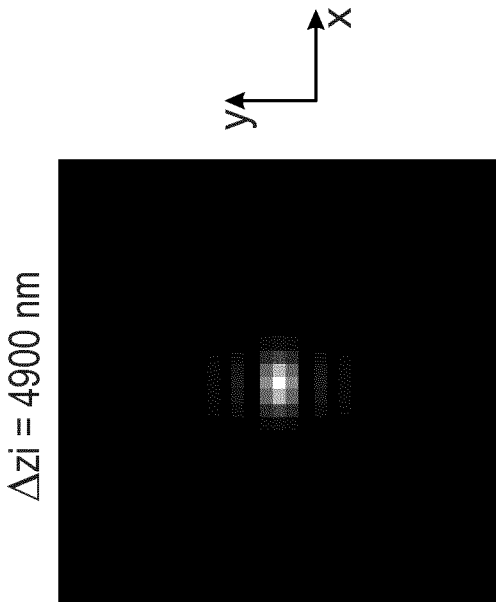
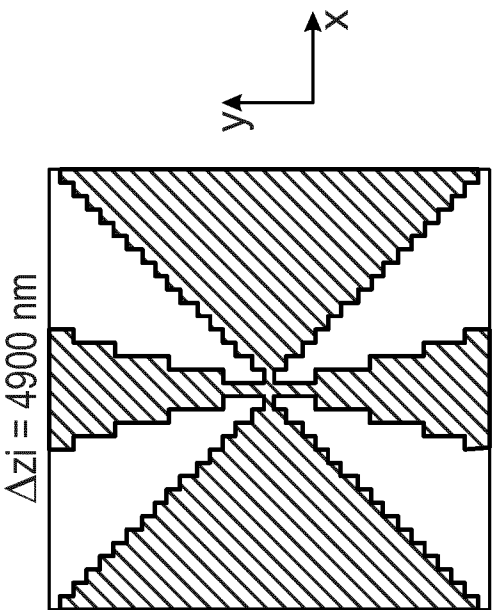
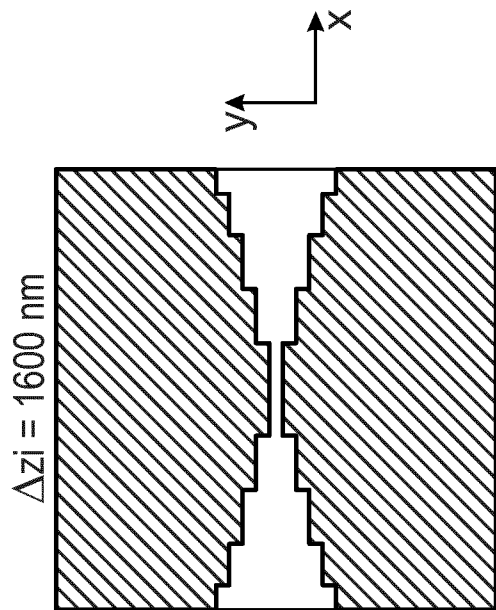
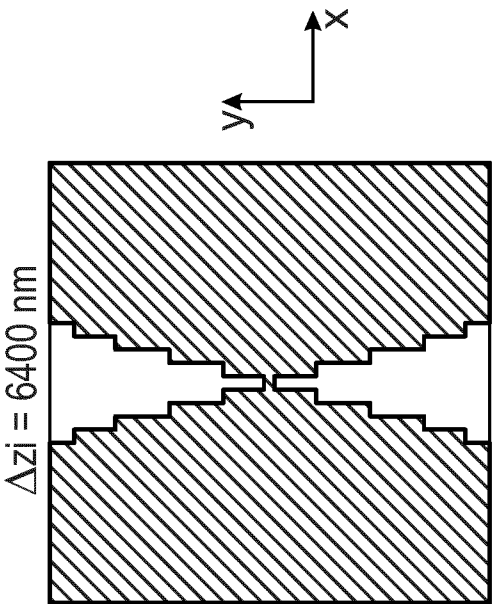
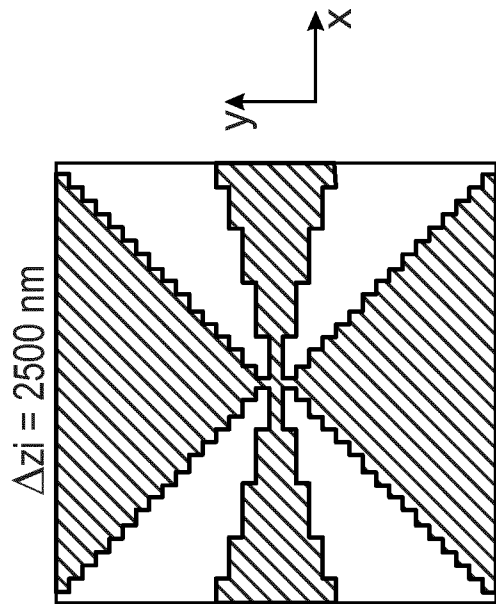


Fig. 17



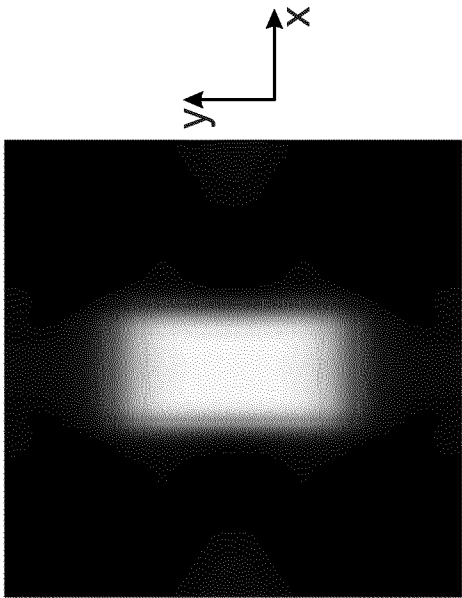


Fig. 24

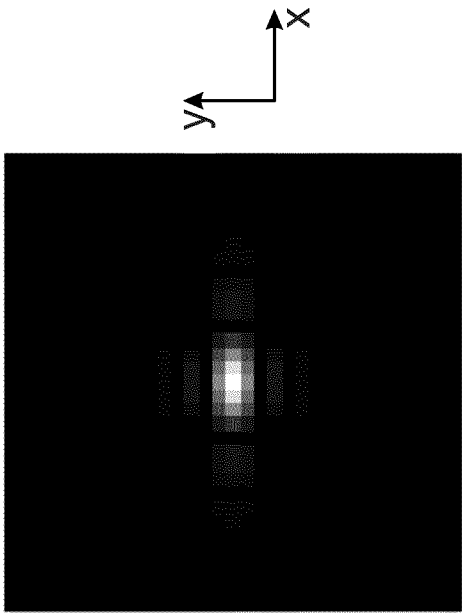


Fig. 23

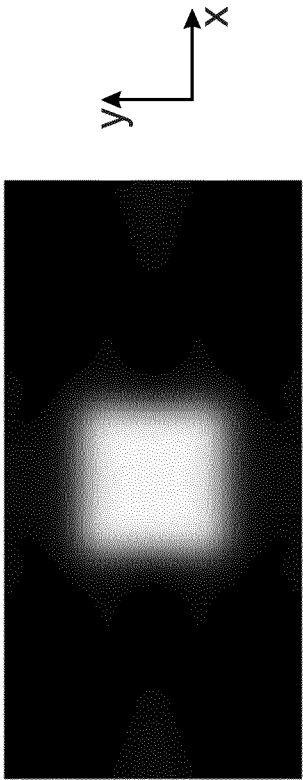


Fig. 25

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/066605

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. G02B17/08 G02B5/00 G03F1/00 G21K7/00 ADD.		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G02B G03F G21K		
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, INSPEC, COMPENDEX		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	PERLITZ S ET AL: "Concept and feasibility of aerial imaging measurements on EUV masks", PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING - 27TH EUROPEAN MASK AND LITHOGRAPHY CONFERENCE 2011 SPIE USA, vol. 7985, 1 April 2011 (2011-04-01), pages 79850U-1-79850U-, XP060006985, DOI: 10.1117/12.895208 figure 1	16
A	----- DE 10 2008 019341 A1 (ZEISS CARL SMS GMBH [DE]) 22 October 2009 (2009-10-22) paragraphs [0003], [0029] - [0031]; claim 4 -----	1-15
☐ 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 5 November 2015	Date of mailing of the international search report 13/11/2015	
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Eisner, Klaus	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/066605

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 102008019341 A1	22-10-2009	CN 102007454 A	06-04-2011
		DE 102008019341 A1	22-10-2009
		JP 5519634 B2	11-06-2014
		JP 2011517127 A	26-05-2011
		KR 20110013362 A	09-02-2011
		US 2011188732 A1	04-08-2011
		WO 2009127368 A1	22-10-2009

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. G02B17/08 G02B5/00 G03F1/00 G21K7/00 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) G02B G03F G21K		
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, INSPEC, COMPENDEX		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	PERLITZ S ET AL: "Concept and feasibility of aerial imaging measurements on EUV masks", PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING - 27TH EUROPEAN MASK AND LITHOGRAPHY CONFERENCE 2011 SPIE USA, Bd. 7985, 1. April 2011 (2011-04-01), Seiten 79850U-1-79850U-, XP060006985, DOI: 10.1117/12.895208 Abbildung 1	16
A	DE 10 2008 019341 A1 (ZEISS CARL SMS GMBH [DE]) 22. Oktober 2009 (2009-10-22) Absätze [0003], [0029] - [0031]; Anspruch 4	1-15
☐ 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
5. November 2015		13/11/2015
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 Eisner, Klaus

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/066605

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102008019341 A1	22-10-2009	CN 102007454 A	06-04-2011
		DE 102008019341 A1	22-10-2009
		JP 5519634 B2	11-06-2014
		JP 2011517127 A	26-05-2011
		KR 20110013362 A	09-02-2011
		US 2011188732 A1	04-08-2011
		WO 2009127368 A1	22-10-2009
