

(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
18. Januar 2018 (18.01.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/010887 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G03F 7/20 (2006.01)

G03F 9/00 (2006.01)

75, 73434 Aalen (DE). FENGLER, Stephanus [DE/DE];
Warthelandstr. 7, 73431 Aalen (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/063001

(22) Internationales Anmeldedatum:

30. Mai 2017 (30.05.2017)

(74) Anwalt: FRANK, Hartmut; Bonsmann · Bonsmann
· Frank Patentanwälte, Reichspräsidentenstraße 21-25,
45470 Mülheim a.d. Ruhr (DE).

(25) Einreichungssprache:

Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache:

Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2016 212 959.7

15. Juli 2016 (15.07.2016)

DE

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP,
KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): CARL ZEISS SMT GMBH [DE/DE]; Rudolf-Eber-
Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder; und

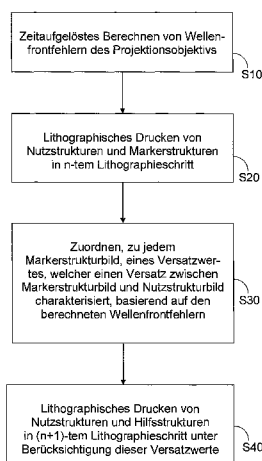
(71) Anmelder (nur für US): KORB, Thomas [DE/DE]; Jo-
sefstrasse 17, 73525 Schwäbisch Gmünd (DE). DEGÜN-
THER, Markus [DE/DE]; Langäckerweg 20, 73432 Aa-
len (DE). ZIMMERMANN, Jörg [DE/DE]; Weilerstrasse

(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,

(54) Title: METHOD FOR MICROLITHOGRAPHIC PRODUCTION OF MICROSTRUCTURED COMPONENTS AND
MICROLITHOGRAPHIC PROJECTION EXPOSURE APPARATUS

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR MIKROLITHOGRAPHISCHEN HERSTELLUNG MIKROSTRUKTURIERTER
BAUELEMENTE, SOWIE MIKROLITHOGRAPHISCHE PROJEKTIONSBELEUCHTUNGSANLAGE

Fig. 1a



S10 Time-resolved calculation of wavefront aberrations of the
projection lens
S20 Lithographic printing of used structures and marker
structure in the n-th lithography step
S30 Assignment of an offset value characterizing an offset
between a marker structure image and a used structure
image to each marker structure image on the basis of the
calculated wavefront aberrations
S40 Lithographic printing of used structures and auxiliary
structures in the (n+1)-th lithography step taking into
account these offset values.

(57) Abstract: The invention relates to a method for microlithographic production of mi-
crostructured components and a microlithographic projection exposure apparatus. In a method
for microlithographic production of microstructured components, used structures situated on a
mask and marker structures situated on the mask are illuminated with an illumination device
and imaged onto a wafer provided with a photoresist using a projection lens, with production of
corresponding marker structure images and used structure images. A method according to the
invention has the following steps: ascertaining a plurality of offset values respectively assigned
to different times, wherein each of these offset values characterizes an offset, produced by the
projection lens at the relevant time, between a marker structure image and a used structure im-
age, and positioning the used structure images in subsequent lithography steps relative to one
another on the basis of these offset values.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur mikrolithographischen Her-
stellung mikrostrukturierter Bauelemente sowie eine mikrolithographische Projektionsbeleuch-
tungsanlage. Bei einem Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter
Bauelemente werden auf einer Maske befindliche Nutzstrukturen und auf der Maske befind-
liche Markerstrukturen mit einer Beleuchtungseinrichtung beleuchtet und mit einem Projekti-
onsobjektiv auf einen mit einem Photoresist versehenen Wafer unter Erzeugung entsprechen-
der Markerstrukturbilder und Nutzstrukturbilder abgebildet. Ein erfindungsgemäßes Verfah-
ren weist folgende Schritte auf: Ermitteln einer Mehrzahl von jeweils unterschiedlichen Zeit-
punkten zugeordneten Versatzwerten, wobei jeder dieser Versatzwerte jeweils einen zu dem
betreffenden Zeitpunkt durch das Projektionsobjektiv erzeugten Versatz zwischen einem Mar-
kerstrukturbild und einem Nutzstrukturbild charakterisiert, und Positionieren der Nutzstruktur-
bilder in aufeinanderfolgenden Lithographieschritten relativ zueinander auf Basis dieser Ver-
satzwerte.



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)*

Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung
mikrostrukturierter Bauelemente,
sowie mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage

Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität der Deutschen Patentanmeldung DE 10 2016 212 959.7, angemeldet am 15. Juli 2016. Der Inhalt dieser DE-Anmeldung wird durch Bezugnahme („incorporation by reference“) mit in den vorliegenden Anmeldungstext aufgenommen.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

Gebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente sowie eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage.

Stand der Technik

Mikrolithographie wird zur Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente, wie beispielsweise integrierter Schaltkreise oder LCD's, angewendet. Der Mikrolithographieprozess wird in einer sogenannten Projektionsbelichtungsanlage durchgeführt, welche eine Beleuchtungseinrichtung und ein Projektionsobjektiv aufweist. Das Bild einer mittels der Beleuchtungseinrichtung beleuchteten Maske (= Retikel) wird hierbei mittels des Projektionsobjektivs auf ein mit einer lichtempfindlichen Schicht (Photoresist) beschichtetes und in der Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnetes Substrat (z.B. ein Siliziumwafer) projiziert.

ziert, um die Maskenstruktur auf die lichtempfindliche Beschichtung des Substrats zu übertragen.

Um während des Lithographieprozesses beim schichtweisen Aufbau der mikro-
5 strukturierten Bauelemente die jeweils aufeinanderfolgenden Schichten korrekt zueinander auszurichten, ist es bekannt, zusätzlich zu den eigentlichen Nutzstrukturen sogenannte Markerstrukturen auf dem Retikel vorzusehen, welche ebenso wie die Nutzstrukturen auf jeden der einzelnen „Dies“ des Wafers abgebildet werden. Um diese Hilfs- bzw. Markerstrukturen einer einfachen Mess-
10 technik zugänglich zu machen, werden diese typischerweise wesentlich grober bzw. mit größerem Linienabstand ausgestaltet als die Nutzstrukturen. Fig. 2 veranschaulicht dies in einer lediglich schematischen Darstellung, wobei eine vergleichsweise dichte Linien aufweisende Nutzstruktur mit „P“ und eine vergleichsweise gröbere (d.h. einen größeren Abstand, vom Fachmann als „pitch“ bezeichnet, angeordnete Linien aufweisende) Markerstruktur mit „O“ bezeichnet ist.

Der vorstehend beschriebene Unterschied in der Größenordnung des „pitches“ zwischen den Markerstrukturen und den eigentlichen Nutzstrukturen hat bei
20 Verwendung üblicher Beleuchtungssettings wie z.B. Dipol-Beleuchtungssettings zur Folge, dass die bei der jeweiligen Abbildung durch die jeweiligen Strukturen auf der Maske erzeugten Beugungsordnungen unterschiedliche Bereiche der Austrittspupille in der Projektionsoptik durchlaufen. Dieser Umstand ist in Fig. 3a-b veranschaulicht. Gezeigt ist jeweils links die
25 Beleuchtungspupille mit den beiden Polen A und B einer Dipolbeleuchtung. Werden Nutzstrukturen „P“ damit beleuchtet, so ergibt sich in der Austrittspupille die in Fig. 3a rechts gezeigte Lichtverteilung durch Faltung der Beleuchtungspupille mit den Beugungsordnungen der Nutzstruktur „P“. In Fig. 3b ist rechts die entstehende Lichtverteilung in der Austrittspupille gezeigt, wenn mit
30 derselben Beleuchtungspupille die Markerstrukturen „O“ beleuchtet werden. Mit A_0 , A_1 und A_2 sowie B_0 , B_{-1} und B_{-2} sind die jeweiligen Beugungsbilder in der Pupille der Projektionsoptik für die betreffende Beugungsordnung bezeichnet. Im Falle einer idealen (d.h. keinerlei Aberrationen aufweisenden)

Projektionsoptik werden sowohl Nutz- als auch Markerstrukturen korrekt auf den Wafer abgebildet.

Ein in der Praxis auftretendes Problem ist jedoch, dass in einer realen Projektions- bzw. Abbildungsoptik vorhandene Aberrationen (z.B. aufgrund von Fertigungs- oder Justagefehlern der einzelnen optischen Komponenten als statische Einflüsse oder aufgrund von Erwärmung der optischen Komponenten oder anderweitigen Umgebungseinflüssen als dynamische Effekte) sich infolge der vorstehend beschriebenen unterschiedlichen Lage der für die Nutz- bzw. Markerstrukturen entsprechend den einzelnen Beugungsordnungen erzielten Beugungsbilder unterschiedlich auswirken (da gewissermaßen die jeweilige Wellenfront von den betreffenden Beugungsordnungen, welche von den Nutz- bzw. Markerstrukturen erzeugt werden, an unterschiedlichen Stellen „abgefragt“ wird). Dies hat wiederum – wie in Fig. 4 schematisch dargestellt ist – eine Verschiebung der auf Waferebene für die Marker- bzw. Nutzstrukturen jeweils erhaltenen Teilbilder zueinander zur Folge. Eine in der Praxis sodann erfolgende Ausrichtung der einzelnen im Lithographieprozess aufgebauten Schichten an den Markerstrukturen führt infolgedessen zu einer Fehlausrichtung der Nutzstrukturen und damit zu einem letztlich fehlerhaften Bauelement.

Der Einfluss der o.g. Aberrationen ist in Fig. 5a-c veranschaulicht, wobei die gestrichelte Linie in Fig. 5a und Fig. 5b jeweils den Schnitt durch eine Wellenfrontaberration andeuten soll. Kohärenz besteht nur hinsichtlich der Lichtstrahlen von Pol A untereinander sowie der Lichtstrahlen von Pol B untereinander. Der Versatz einer abgebildeten Struktur ergibt sich im Wesentlichen durch den durch die zueinander kohärenten Beugungsordnungen abgetasteten Gradienten der Wellenfront. Gemäß Fig. 5a tasten die Beugungsordnungen B_0 und B_{-1} der Nutzstrukturen „P“ den in Fig. 5a gepunktet angedeuteten Gradienten ab, was zu dem in Fig. 5c eingezeichneten Versatz P^* führt. Demgegenüber tasten die nullte Beugungsordnung B_0 , die (-1)-te Beugungsordnung B_{-1} und die (-2)-te Beugungsordnung B_{-2} der Markerstrukturen „O“ gemäß Fig. 5b einen größeren Gradienten ab, was zu einem in Fig. 5c mit O^* gekennzeichneten Versatz führt, der sich von dem mit P^* bezeichneten Versatz unterscheidet.

Ansätze zur Überwindung des vorstehend beschriebenen Problems beinhalten z.B. die elektronenmikroskopische Untersuchung fertig produzierter Wafer, welche jedoch deren Zerstörung zur Folge hat und zudem eine Korrektur nur in vergleichsweise großen Zeitabständen (von z.B. einem oder mehreren Tagen) und nur für jeweils nachfolgend prozessierte Wafer ermöglicht.

Weitere Ansätze basieren auf einer Verringerung des vorstehend beschriebenen Versatzes der jeweiligen Teilbilder von Hilfs- und Nutzstrukturen durch Anpassungen des verwendeten Beleuchtungssettings und/oder des Retikels, was jedoch letztlich eine Abweichung von den für die jeweiligen Nutzstrukturen optimalen Prozessparameter und damit im Ergebnis einen erhöhten Ausschuss bei der mikrolithographischen Produktion zur Folge hat.

Zum Stand der Technik wird lediglich beispielhaft auf *James C. Wyant et al., „Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology“, Chapter 1, Optical Sciences Center, University of Arizona und WYKO Corporation, Tucson, Arizona, Applied Optics and Optical Engineering, Vol. XI, Seiten 1-53, 1992* sowie *Young Seog Kang et al., „Solution for high-order distortion on extreme illumination condition using computational prediction method“, Optical Microlithography XXVIII, Proc. of SPIE Vol. 9426, Seiten 942608-1 bis 942608-10* verwiesen.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Vor dem obigen Hintergrund ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente sowie eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage bereitzustellen, welche eine möglichst präzise Erzeugung eines schichtweisen Aufbaus der jeweiligen Bauelemente mit erhöhtem Durchsatz und unter Vermeidung oder Reduzierung der vorstehend beschriebenen Probleme ermöglichen.

Diese Aufgabe wird durch das Verfahren gemäß den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1 bzw. die Projektionsbelichtungsanlage gemäß den Merkmalen des nebengeordneten Patentanspruchs 8 gelöst.

- 5 Ein erfindungsgemäßes Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente, wobei auf einer Maske befindliche Nutzstrukturen und auf der Maske befindliche Markerstrukturen mit einer Beleuchtungseinrichtung beleuchtet und mit einem Projektionsobjektiv auf einen mit einem Photoresist versehenen Wafer unter Erzeugung entsprechender Markerstrukturbilder und Nutzstrukturbilder abgebildet werden, weist folgende Schritte auf:
- 10
- Ermitteln einer Mehrzahl von jeweils unterschiedlichen Zeitpunkten zugeordneten Versatzwerten, wobei jeder dieser Versatzwerte jeweils einen zu dem betreffenden Zeitpunkt durch das Projektionsobjektiv erzeugten Versatz zwischen einem Markerstrukturbild und einem Nutzstrukturbild charakterisiert; und
 - 15 - Positionieren der Nutzstrukturbilder in aufeinanderfolgenden Lithographieschritten relativ zueinander auf Basis dieser Versatzwerte

Der Erfindung liegt insbesondere das Konzept zugrunde, ausgehend von dem Prinzip des lithographischen Druckens sowohl von Nutz- als auch von Marker- bzw. Hilfsstrukturen und einer darauf basierten Optimierung der Anordnung bzw. Ausrichtung der in den einzelnen Lithographieschritten erzeugten Nutzstrukturbilder zwecks Minimierung eines unerwünschten Lateralversatzes jeweils eine zeitaufgelöste Berechnung von Wellenfrontfehlern der Abbildungsoptik vorzunehmen und die hieraus resultierende, zusätzliche Information dann bei der Ausrichtung der einzelnen Schichten im Lithographieprozess zwecks Minimierung von Overlay-Fehlern der Nutzstrukturen verschiedener Schichten zueinander zu verwenden.

20

25

30 Mit anderen Worten verfolgt die Erfindung nicht das Ziel einer möglichst optimalen bzw. „versatzlosen“ Abbildung der Markerstrukturen selbst – und benötigt somit auch keine diesbezügliche Anpassung des Beleuchtungs-

settings oder des Retikels – sondern akzeptiert vielmehr den jeweiligen Versatz der Markerstrukturen unabhängig von dessen Größe, solange noch überhaupt eine Abbildung der Markerstrukturen auf den Wafer stattfindet.

5 Dabei nimmt die Erfindung bewusst einen erhöhten Aufwand dahingehend in Kauf, dass die jeweilige relevante Information der Versatzwerte der einzelnen Markerstrukturbilder relativ zu den Nutzstrukturbildern in einer geeigneten Datenlogistik erfasst und bei dem schichtweisen Aufbau des im Lithographieprozess zu fertigenden Bauelements entsprechend verarbeitet werden
10 muss. Im Gegenzug wird jedoch erfindungsgemäß insbesondere der Vorteil erzielt, dass die einzelnen Parameter des Lithographieprozesses (insbesondere die Wahl des jeweiligen Beleuchtungssettings sowie der Retikelparameter) allein hinsichtlich der Nutzstrukturen optimiert werden können mit der Folge, dass ein stabilerer mikrolithographischer Herstellungsprozess mit „größerem
15 Prozessfenster“ sowie geringerem Ausschuss bei der Produktion realisiert werden kann.

Ein weiterer Vorteil der Erfindung besteht darin, dass etwa im Vergleich zur (z.B. elektronenmikroskopischen) Untersuchung fertig hergestellter Wafer der
20 Einfluss dynamischer Wellenfrontveränderungen bzw. Aberrationen z.B. infolge der Erwärmung optischer Komponenten (sogenanntes „Lens Heating“) deutlich schneller (d.h. auf wesentlich kürzerer Zeitskala) berücksichtigt werden kann und somit jederzeit während der einzelnen Lithographieschritte eine umgehende Berücksichtigung der durch besagte Aberrationen hervorgerufenen Versatzwerte hinsichtlich der Markerstrukturbilder unter Minimierung von Overlay-
25 Fehlern hinsichtlich der Nutzstrukturbilder erfolgen kann. Dieser Umstand kommt insbesondere bei einem Wechsel des Beleuchtungssettings vorteilhaft zum Tragen, da die mit einem solchen Wechsel einhergehende Änderung der Maschinendynamik der Projektionsbelichtungsanlage hinsichtlich ihres Einflusses auf den Versatz der Markerstrukturbilder umgehend berücksichtigt werden
30 kann (was mit einer in größeren zeitlichen Abständen erfolgenden elektronenmikroskopischen Waferuntersuchung nicht möglich wäre).

Nicht zuletzt arbeitet das erfindungsgemäße Verfahren zerstörungsfrei und erhöht auch insoweit den letztlich erzielten Durchsatz bei der Produktion der mikrostrukturierten Bauelemente.

5 Gemäß einer Ausführungsform erfolgt das Ermitteln der Mehrzahl von Versatzwerten zumindest teilweise auf Basis einer Messung der Wellenfrontaberration zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Dabei kann weiter eine Ermittlung von Werten der Wellenfrontaberration zwischen diesen Zeitpunkten durch Interpolation erfolgen.

10 Gemäß einer Ausführungsform erfolgt die Beleuchtung der auf der Maske befindlichen Nutzstrukturen und der auf der Maske befindlichen Markerstrukturen unter Einstellung eines Dipol-Beleuchtungssettings.

15 Gemäß einer Ausführungsform erfolgt die Beleuchtung der auf der Maske befindlichen Nutzstrukturen und der auf der Maske befindlichen Markerstrukturen unter Einstellung eines Beleuchtungssettings, welches eine Mehrzahl von Dipolen aufweist. Dabei werden unter Dipolen abgegrenzte Bereiche in einer Pupillenebene verstanden, welche symmetrisch zur Mitte der Pupillenebene angeordnet sind.

20 Gemäß einer Ausführungsform erfolgt die Beleuchtung der auf der Maske befindlichen Nutzstrukturen und der auf der Maske befindlichen Markerstrukturen unter Einstellung eines Beleuchtungssettings, bei welchem sich wenigstens
25 90% der Gesamtintensität außerhalb eines Kreises mit dem Radius $0.7 \cdot NA$, insbesondere außerhalb eines Kreises mit dem Radius $0.8 \cdot NA$, weiter insbesondere außerhalb eines Kreises mit dem Radius $0.9 \cdot NA$ befindet, wobei NA die numerische Apertur der Beleuchtungseinrichtung bezeichnet.

30 Bei den vorstehend genannten Beleuchtungssettings (d.h. Intensitätsverteilungen in der Pupillenebene) kommen durch die Erfindung erzielte Vorteile besonders vorteilhaft zum Tragen, da bei diesen Beleuchtungssettings die Nutzstrukturen jeweils nur einen vergleichsweise geringen Anteil der Wellenfront

abtasten. Zudem sind bei diesen Beleuchtungssettings Effekte der Erwärmung optischer Komponenten („Lens Heating“) besonders ausgeprägt.

Die Erfindung betrifft weiter eine mikrolithographische Projektionsbelichtungs-
anlage, mit

- einer Beleuchtungseinrichtung und einem Projektionsobjektiv, wobei die Beleuchtungseinrichtung im Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage auf einer Maske befindliche Nutzstrukturen und auf der Maske befindliche Markerstrukturen beleuchtet und das Projektionsobjektiv diese Nutzstrukturen und Markerstrukturen auf einen mit einem Photoresist versehenen Wafer unter Erzeugung entsprechender Markerstrukturbilder und Nutzstrukturbilder abbildet;
- einer Einrichtung zur zeitaufgelösten Ermittlung von Wellenfrontaberrationen des Projektionsobjektivs;
- einer Einrichtung zur Ermittlung von Versatzwerten zwischen Markerstrukturbildern und Nutzstrukturbildern aus den ermittelten Wellenfrontaberrationen; und
- einer Steuereinrichtung zur Steuerung der Positionierung der Nutzstrukturbilder in nachfolgenden Lithographieschritten auf Basis dieser Versatzwerte.

Dabei wird von dem Begriff der zeitaufgelösten Ermittlung auch eine Ermittlung zu unterschiedlichen diskreten Zeitpunkten (d.h. nicht notwendigerweise eine zeitlich kontinuierliche Ermittlung) umfasst.

Gemäß einer Ausführungsform weist die Einrichtung zur zeitaufgelösten Ermittlung von Wellenfrontaberrationen eine Messeinrichtung zur Messung von Wellenfrontaberrationen des Projektionsobjektivs auf.

Gemäß einer Ausführungsform weist die Einrichtung zur zeitaufgelösten Ermittlung von Wellenfrontaberrationen eine Vorhersageeinrichtung zur modell-

basierten Vorhersage von Wellenfrontaberrationen des Projektionsobjektivs auf.

Gemäß einer Ausführungsform ist die Einrichtung zur Ermittlung von Versatz-
werten dazu ausgelegt, für eine Mehrzahl von Markerstrukturbildern jedem die-
ser Markerstrukturbilder jeweils einen individuellen Versatzwert zuzuordnen.

Gemäß einer Ausführungsform befinden sich die Markerstrukturbilder, denen
jeweils ein individueller Versatzwert zugeordnet wird, auf ein- und demselben
Wafer.

Gemäß einer Ausführungsform ist die Steuereinrichtung dazu ausgelegt, die
individuellen Versatzwerte bei der Steuerung der Positionierung der Nutzstruk-
turbilder in nachfolgenden Lithographieschritten zu berücksichtigen.

Gemäß einer Ausführungsform ist die mikrolithographische Projektionsbelich-
tungsanlage dazu ausgelegt, ein Verfahren mit den oben beschriebenen
Merkmale durchzuführen.

Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind der Beschreibung sowie den Un-
teransprüchen zu entnehmen.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von in den beigefügten Abbildungen
dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Es zeigen:

Figur 1a ein Flussdiagramm zur Erläuterung des möglichen Ablaufs
eines erfindungsgemäßen Verfahrens in einer Ausführungs-
form;

Figur 1b-c schematische Darstellungen zur weiteren Erläuterung des erfindungsgemäßen Verfahrens; und

5 Figuren 2-5 schematische Darstellungen zur Erläuterung eines der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Problems.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

10

Im Weiteren wird eine mögliche Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens zunächst unter Bezugnahme auf das in Fig. 1a gezeigte Flussdiagramm beschrieben. Dabei werden auf einer Maske befindliche Nutzstrukturen und auf der Maske befindliche Markerstrukturen mit einer Beleuchtungseinrichtung einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage beleuchtet und mit einem Projektionsobjektiv der Projektionsbelichtungsanlage auf einen mit einem Photoresist versehenen Wafer unter Erzeugung entsprechender Markerstrukturbilder und Nutzstrukturbilder abgebildet.

15

20

Gemäß Fig. 1a erfolgt in einem Schritt S10 die zeitaufgelöste Berechnung von Wellenfrontfehlern des Projektionsobjektivs. Diese Berechnung erfolgt in für sich bekannter Weise sowie modellbasiert, wobei z.B. auf die Publikation Y. Ohmura et al.: „An aberration control of projection optics for multi-patterning Lithography“, Optical Microlithography XXIV, edited by Mircea V. Dusa, Proc. of SPIE Vol. 7973 (2011) sowie US 2013/0301024 A1 verwiesen wird.

25

Dabei kann durch das betreffende Modell insbesondere sowohl die Aufheizung des Projektionsobjektivs im Lithographiebetrieb als auch eine hierdurch bewirkte Modifikation der Wellenfront über die Zeit vorhergesagt werden. Diese zeitliche Information kann wiederum in eine ortsabhängige Korrektur auf dem Wafer übersetzt werden, indem die aus dem jeweiligen Wellenfrontfehler resultierende Verschiebung (Versatz) zwischen Marker- und Nutzstrukturbildern abhängig

30

davon berechnet wird, zu welchem Zeitpunkt der betreffende Waferbereich während des Lithographieprozesses in das Belichtungsfeld der Projektionsbelichtungsanlage gelangte.

5 Erfindungsgemäß erfolgt somit zur Berücksichtigung der durch aberrationsbedingte Wellenfrontänderungen bewirkten Versatzwerte bei der Abbildung der Markerstrukturen weder eine Änderung der Wellenfronten selbst (etwa durch eine Modifikation der auf der Maske befindlichen, abzubildenden Strukturen), noch eine Anpassung des Beleuchtungssettings. Vielmehr erfolgt stattdessen
10 eine Berechnung der betreffenden Werte des - als solcher in Kauf genommenen - Versatzes zwischen Marker- und Nutzstrukturbildern und eine dementsprechende Korrektur.

In Fig. 1b-c ist eine mögliche Konfiguration von Maske 10, Projektionsobjektiv
15 und Wafer 20 zu unterschiedlichen Zeitpunkten angedeutet, wobei Fig. 1b den Schnitt durch eine Wellenfrontaberration 16 in einer Pupillenebene 15 zu einem Zeitpunkt t_1 und Fig. 1c den Schnitt durch eine Wellenfrontaberration 17 zu einem späteren Zeitpunkt t_N andeutet. Die unterschiedlichen Wellenfrontaberrationen führen nun, wie eingangs bereits anhand von Fig. 5a-5c erläutert, zu
20 unterschiedlichen Versatzwerten zwischen Nutz- und Markerstrukturbild. Über die Zeit bewegt sich der Wafer 20 unter dem Projektionsobjektiv z.B. wie in Fig. 1b-c angedeutet mäanderförmig. Dadurch erfahren die Strukturen in einem Belichtungsfeld 21 gemäß Fig. 1b zum Zeitpunkt t_1 einen anderen Versatz als die Strukturen in einem Belichtungsfeld 22 gemäß Fig. 1c zum Zeitpunkt t_N . Die
25 zeitliche Aberration hat sich in einen räumlichen Verlauf des Versatzes zwischen Nutz- und Markerstrukturbild übersetzt.

Die Erfindung beinhaltet insbesondere eine Individualisierung hinsichtlich der einzelnen Markerstrukturen, da der für jede einzelne der Markerstrukturen jeweils individuell wirkende Wellenfrontfehler bzw. der hieraus resultierende Versatz bei der Ausrichtung der Nutzstrukturen entsprechend berücksichtigt wird.
30

Im Schritt S20 werden sowohl Nutz- als auch Hilfsstrukturen im jeweils aktuellen (n-ten) Lithographieschritt gedruckt. Im Schritt S30 erfolgt basierend auf den berechneten Wellenfrontfehlern die Zuordnung jeweils eines Versatzwertes zu jedem der Markerstrukturbilder, wobei der betreffende Versatzwert den
5 Versatz zwischen dem jeweiligen Markerstrukturbild und einem Nutzstrukturbild charakterisiert.

Gemäß Schritt S40 erfolgt das lithographische Drucken der Nutz- und Hilfsstrukturen im nachfolgenden, (n+1)-ten Lithographieschritt unter Berücksichtigung dieser Versatzwerte, wodurch die Nutzstrukturen im optimalen Fall ohne
10 (bzw. nur mit einem gewünschten) Versatz gegenüber den im vorangegangenen Lithographieschritt gedruckten Nutzstrukturen erzeugt werden.

Wenn die Erfindung auch anhand spezieller Ausführungsformen beschrieben wurde, erschließen sich für den Fachmann zahlreiche Variationen und alternative Ausführungsformen, z.B. durch Kombination und/oder Austausch von Merkmalen einzelner Ausführungsformen. Dementsprechend versteht es sich für den Fachmann, dass derartige Variationen und alternative Ausführungsformen von der vorliegenden Erfindung mit umfasst sind und die Reichweite der
15 Erfindung nur im Sinne der beigefügten Patentansprüche und deren Äquivalente beschränkt ist.
20

Patentansprüche

1. Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente, wobei auf einer Maske befindliche Nutzstrukturen und auf der Maske befindliche Markerstrukturen mit einer Beleuchtungseinrichtung beleuchtet und mit einem Projektionsobjektiv auf einen mit einem Photoresist versehenen Wafer unter Erzeugung entsprechender Markerstrukturbilder und Nutzstrukturbilder abgebildet werden,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, d a s s

das Verfahren folgende Schritte aufweist:

- a) Ermitteln einer Mehrzahl von jeweils unterschiedlichen Zeitpunkten zugeordneten Versatzwerten, wobei jeder dieser Versatzwerte jeweils einen zu dem betreffenden Zeitpunkt durch das Projektionsobjektiv erzeugten Versatz zwischen einem Markerstrukturbild und einem Nutzstrukturbild charakterisiert; und
- b) Positionieren der Nutzstrukturbilder in aufeinanderfolgenden Lithographieschritten relativ zueinander auf Basis dieser Versatzwerte.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Ermitteln der Mehrzahl von Versatzwerten zumindest teilweise auf Basis einer modellbasierten Vorhersage von durch das Projektionsobjektiv bewirkten Wellenfrontfehlern erfolgt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Ermitteln der Mehrzahl von Versatzwerten zumindest teilweise auf Basis einer Messung der Wellenfrontaberration zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgt.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass eine Ermittlung von Werten der Wellenfrontaberration zwischen diesen Zeitpunkten durch Interpolation erfolgt.

5. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Beleuchtung der auf der Maske befindlichen Nutzstrukturen und der auf der Maske befindlichen Markerstrukturen unter Einstellung eines Dipol-Beleuchtungssettings erfolgt.
6. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Beleuchtung der auf der Maske befindlichen Nutzstrukturen und der auf der Maske befindlichen Markerstrukturen unter Einstellung eines Beleuchtungssettings erfolgt, welches eine Mehrzahl von Dipolen aufweist.
7. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Beleuchtung der auf der Maske befindlichen Nutzstrukturen und der auf der Maske befindlichen Markerstrukturen unter Einstellung eines Beleuchtungssettings erfolgt, bei welchem sich wenigstens 90% der Gesamtintensität außerhalb eines Kreises mit dem Radius $0.7 \cdot NA$, insbesondere außerhalb eines Kreises mit dem Radius $0.8 \cdot NA$, weiter insbesondere außerhalb eines Kreises mit dem Radius $0.9 \cdot NA$ befindet, wobei NA die numerische Apertur der Beleuchtungseinrichtung bezeichnet.
8. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage, mit
- einer Beleuchtungseinrichtung und einem Projektionsobjektiv, wobei die Beleuchtungseinrichtung im Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage auf einer Maske befindliche Nutzstrukturen und auf der Maske befindliche Markerstrukturen beleuchtet und das Projektionsobjektiv diese Nutzstrukturen und Markerstrukturen auf einen mit einem Photoresist versehenen Wafer unter Erzeugung entsprechender Markerstrukturbilder und Nutzstrukturbilder abbildet;
 - einer Einrichtung zur zeitaufgelösten Ermittlung von Wellenfrontaberrationen des Projektionsobjektivs;
 - einer Einrichtung zur Ermittlung von Versatzwerten zwischen Markerstrukturbildern und Nutzstrukturbildern aus den ermittelten

Wellenfrontaberrationen; und

- einer Steuereinrichtung zur Steuerung der Positionierung der Nutzstrukturbilder in nachfolgenden Lithographieschritten auf Basis dieser Versatzwerte.

5

9. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung zur zeitaufgelösten Ermittlung von Wellenfrontaberrationen eine Messeinrichtung zur Messung von Wellenfrontaberrationen des Projektionsobjektivs aufweist.

10

10. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung zur zeitaufgelösten Ermittlung von Wellenfrontaberrationen eine Vorhersageeinrichtung zur modellbasierten Vorhersage von Wellenfrontaberrationen des Projektionsobjektivs aufweist.

15

11. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung zur Ermittlung von Versatzwerten dazu ausgelegt ist, für eine Mehrzahl von Markerstrukturbildern jedem dieser Markerstrukturbilder jeweils einen individuellen Versatzwert zuzuordnen.

20

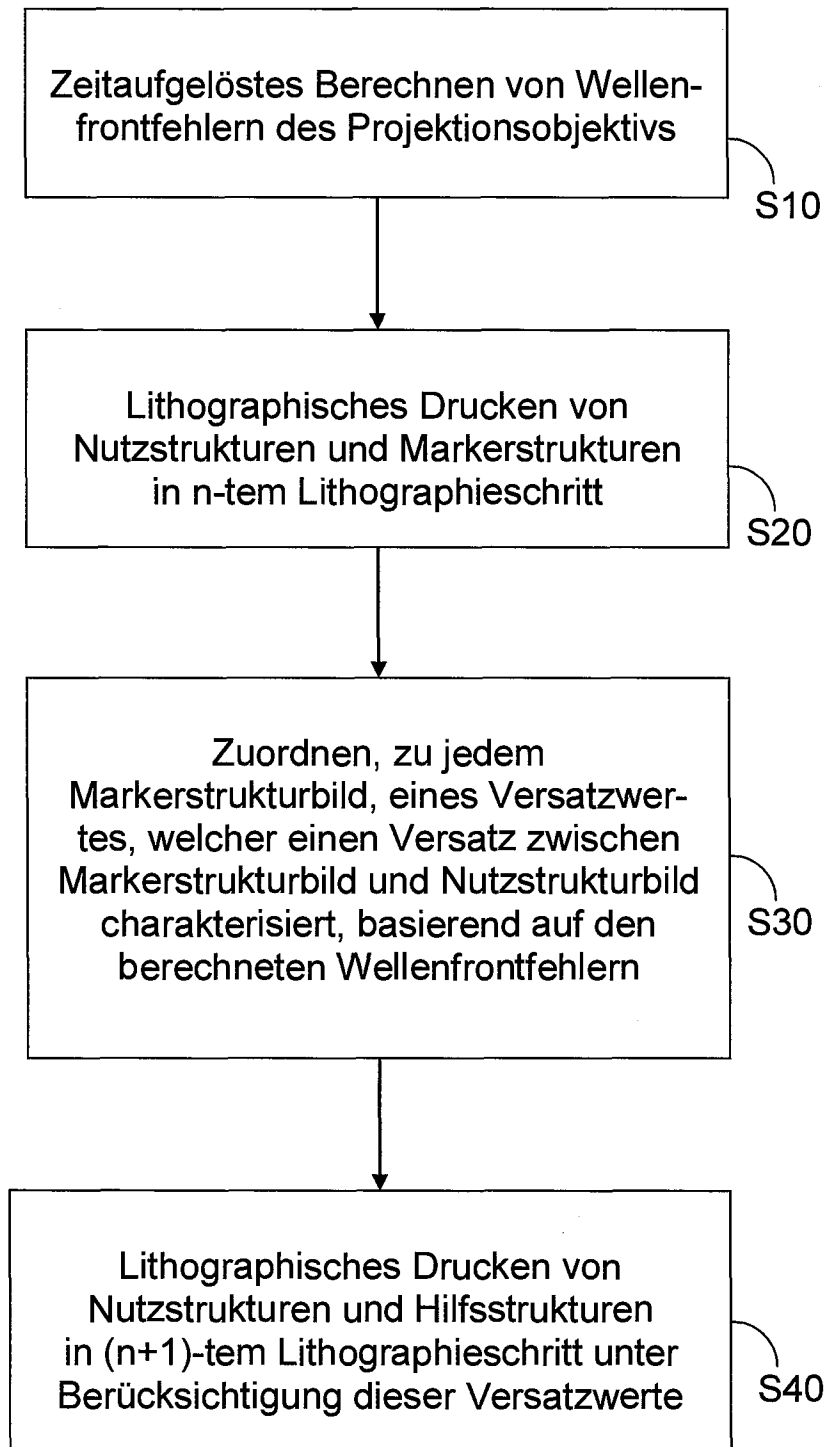
12. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Markerstrukturbilder, denen jeweils ein individueller Versatzwert zugeordnet wird, sich auf ein- und demselben Wafer befinden.

25

13. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuereinrichtung dazu ausgelegt ist, die individuellen Versatzwerte bei der Steuerung der Positionierung der Nutzstrukturbilder in nachfolgenden Lithographieschritten zu berücksichtigen.

30

14. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass diese dazu ausgelegt ist, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7 durchzuführen.

Fig. 1a

2 / 6

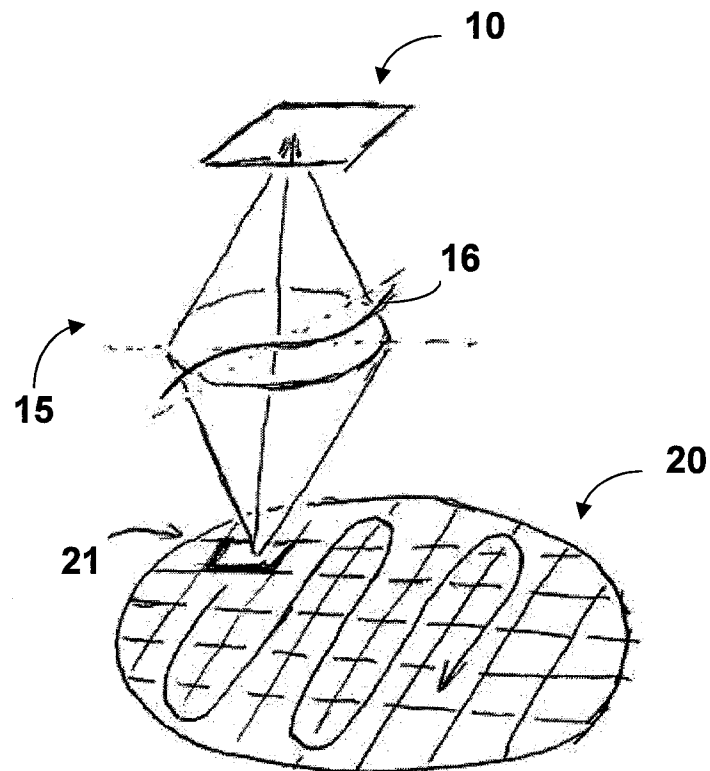
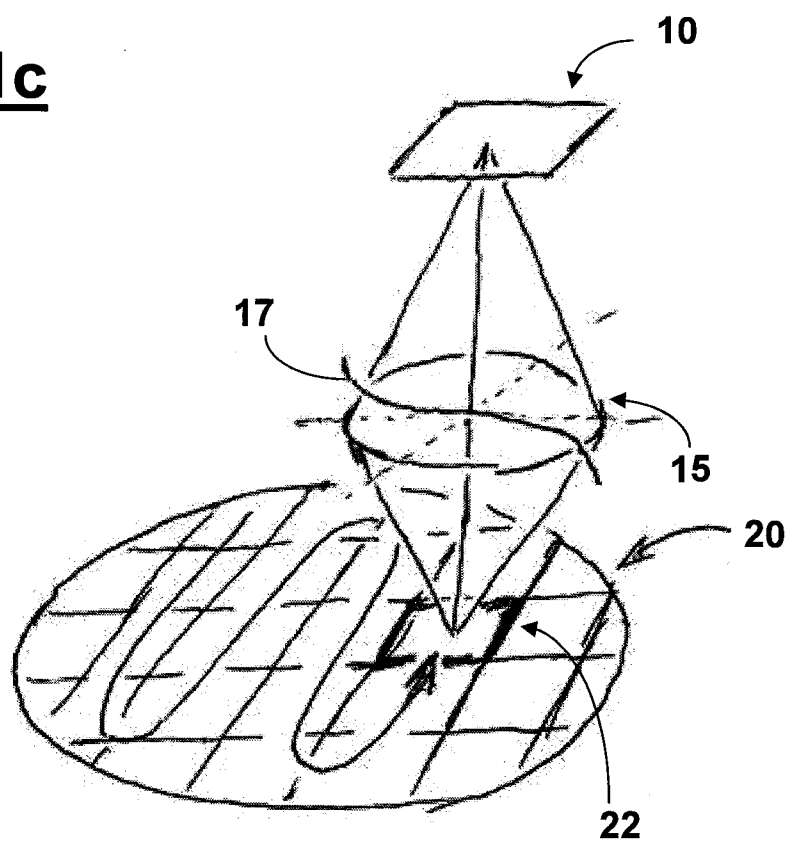
Fig. 1b**Fig. 1c**

Fig. 2

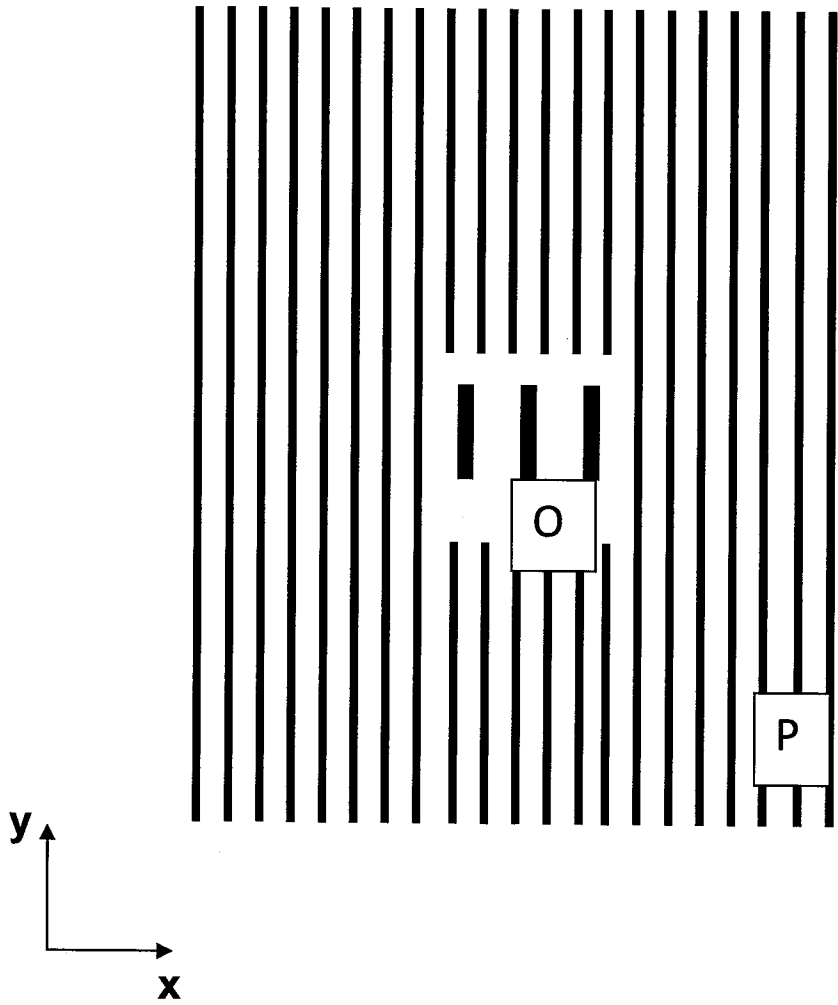


Fig. 3

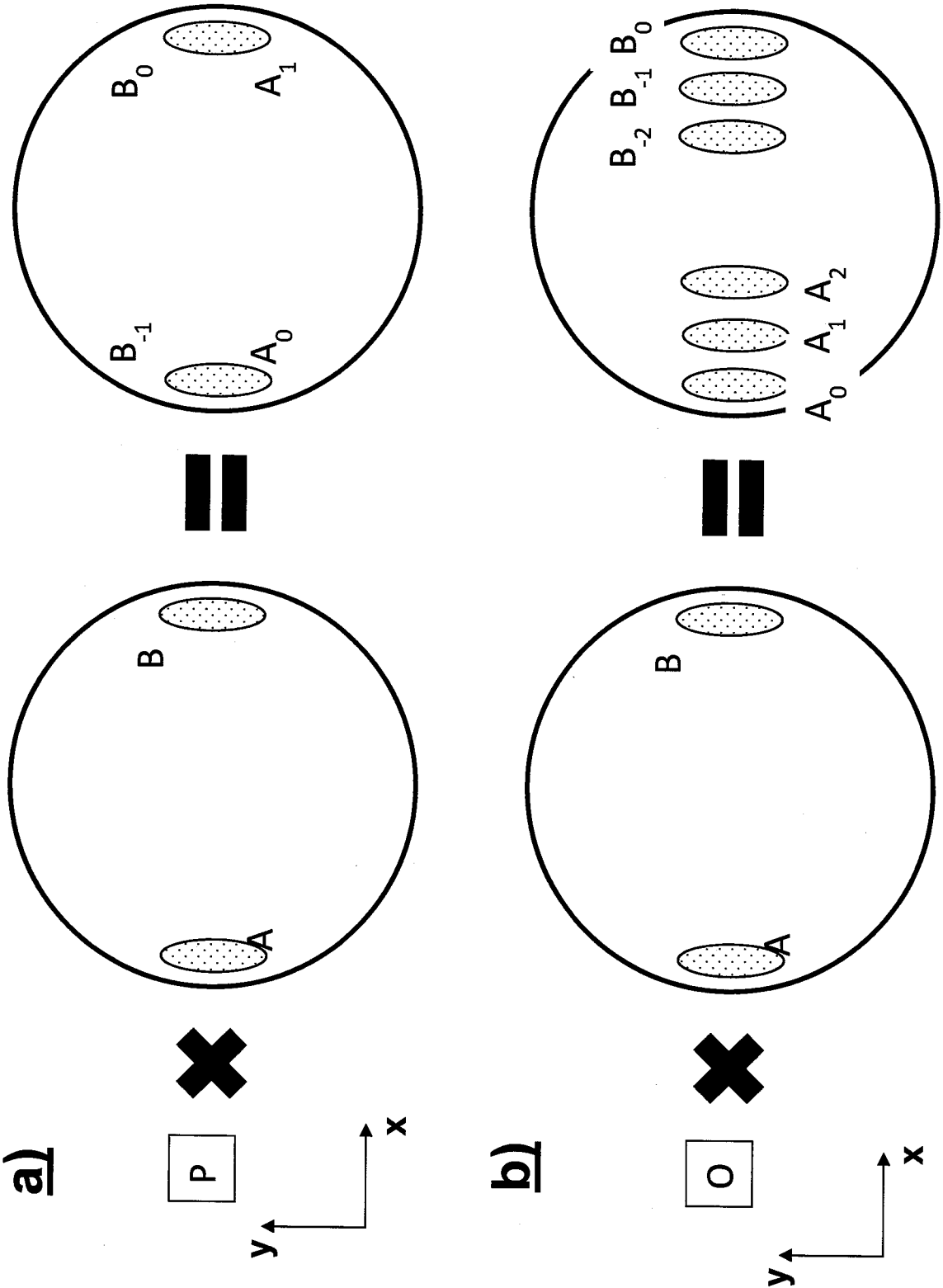


Fig. 4

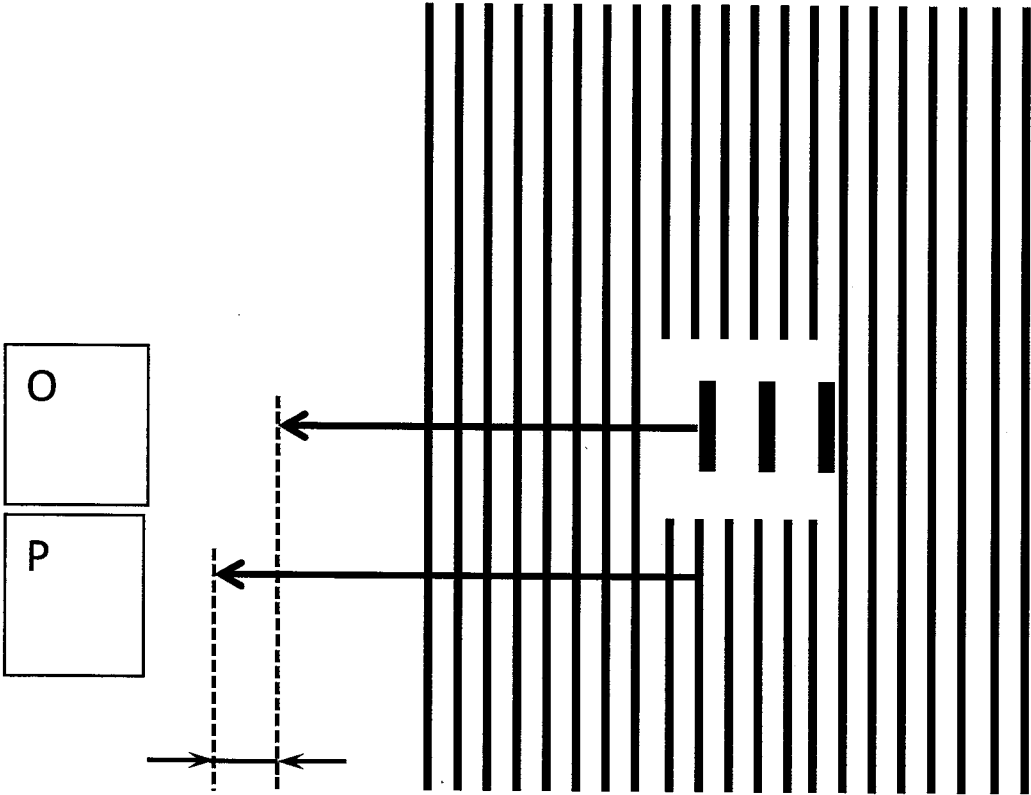
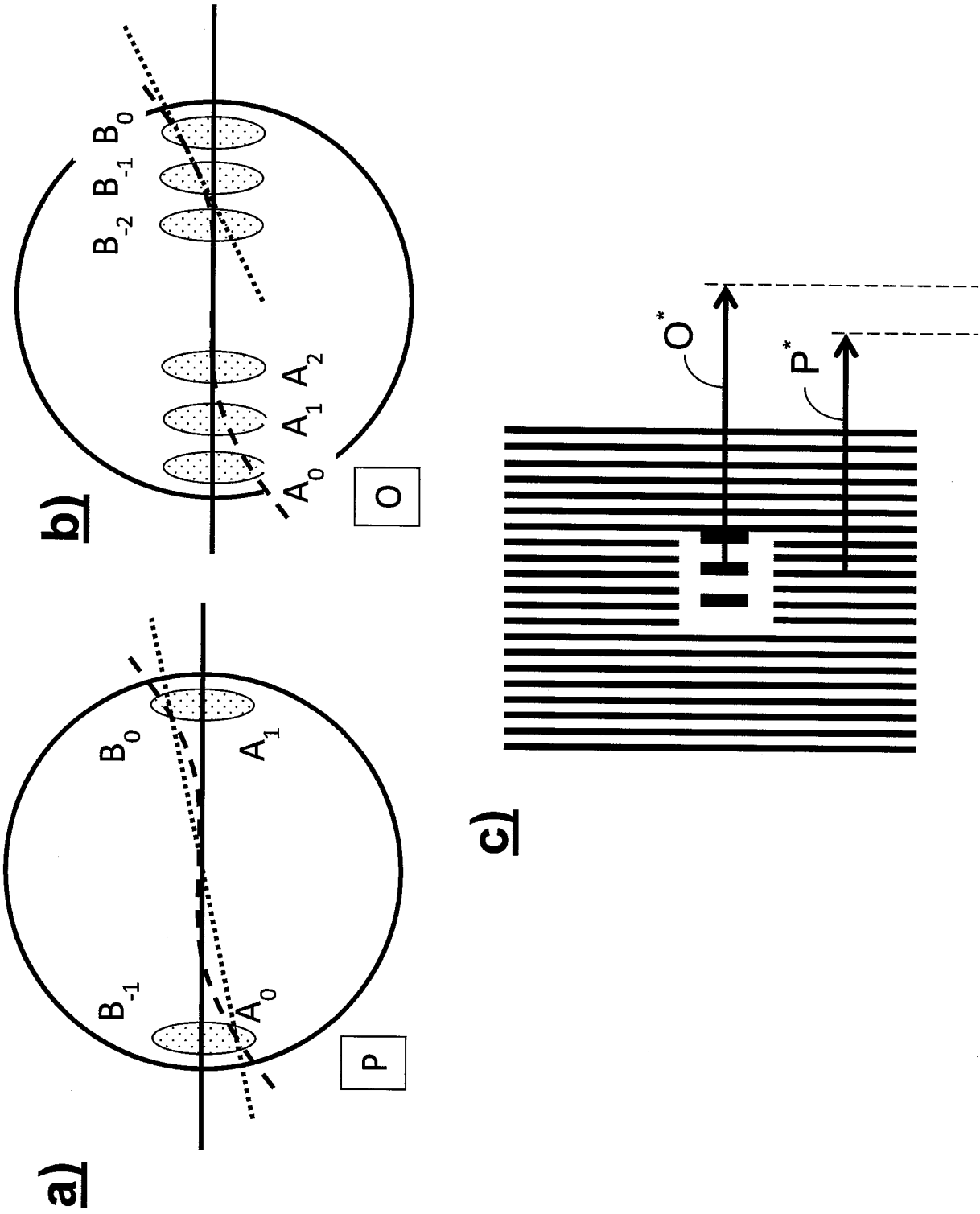


Fig. 5



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/063001

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G03F7/20 G03F9/00
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)
G03F

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

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

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2006/008716 A1 (JEUNINK ANDRE B [NL] ET AL) 12 January 2006 (2006-01-12) abstract paragraphs [0097], [0152] - [0160]; figure 2	1-14
X	US 2008/030701 A1 (LOF JOERI [NL]) 7 February 2008 (2008-02-07) paragraphs [0080] - [0084]; figures 4a,4b	1,2,5-7



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 August 2017

Date of mailing of the international search report

01/09/2017

Name and mailing address of the ISA/

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

Authorized officer

Weckesser, Jens

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/063001

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2006008716	A1	12-01-2006	CN 1722001 A 18-01-2006
			EP 1626310 A1 15-02-2006
			EP 1975723 A1 01-10-2008
			JP 4027382 B2 26-12-2007
			JP 2006024941 A 26-01-2006
			KR 20060049927 A 19-05-2006
			TW I266358 B 11-11-2006
			US 2006008716 A1 12-01-2006
			US 2008252870 A1 16-10-2008

US 2008030701	A1	07-02-2008	NONE

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. G03F7/20 G03F9/00
 ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 G03F

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

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

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2006/008716 A1 (JEUNINK ANDRE B [NL] ET AL) 12. Januar 2006 (2006-01-12) Zusammenfassung Absätze [0097], [0152] - [0160]; Abbildung 2	1-14
X	US 2008/030701 A1 (LOF JOERI [NL]) 7. Februar 2008 (2008-02-07) Absätze [0080] - [0084]; Abbildungen 4a, 4b	1,2,5-7



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

24. August 2017

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

01/09/2017

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

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

Bevollmächtigter Bediensteter

Weckesser, Jens

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/063001

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2006008716 A1	12-01-2006	CN 1722001 A	18-01-2006
		EP 1626310 A1	15-02-2006
		EP 1975723 A1	01-10-2008
		JP 4027382 B2	26-12-2007
		JP 2006024941 A	26-01-2006
		KR 20060049927 A	19-05-2006
		TW I266358 B	11-11-2006
		US 2006008716 A1	12-01-2006
		US 2008252870 A1	16-10-2008

US 2008030701 A1	07-02-2008	KEINE	
