(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2013 219 986 A1** 2015.04.02

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2013 219 986.4**
(22) Anmeldetag: **02.10.2013**
(43) Offenlegungstag: **02.04.2015**

(51) Int Cl.: ***G03F 7/20*** (2006.01)

(71) Anmelder:
Carl Zeiss SMT GmbH, 73447 Oberkochen, DE

(74) Vertreter:
Patentanwälte Ruff, Wilhelm, Beier, Dauster & Partner, 70174 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
Bittner, Boris, 91154 Roth, DE; Wabra, Norbert, 97440 Werneck, DE; Hodenberg, Martin von, 73447 Oberkochen, DE; Schneider, Sonja, 73447 Oberkochen, DE

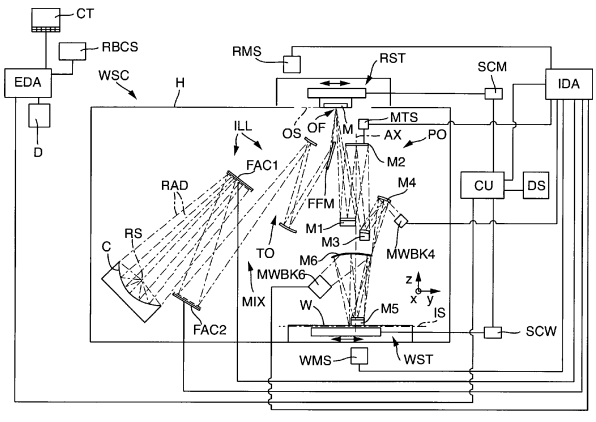
(56) Ermittelter Stand der Technik:
DE 10 2012 205 096 B3

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Projektionsbelichtungsverfahren und Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie**

(57) Zusammenfassung: Ein Projektionsbelichtungsverfahren zur Belichtung eines strahlungsempfindlichen Substrats (W) mit mindestens einem Bild eines Musters umfasst folgende Schritte:
Bereitstellen des Musters zwischen einem Beleuchtungssystem (ILL) und einem Projektionsobjektiv (PO) einer Projektionsbelichtungsanlage (WSC) derart, dass das Muster im Bereich einer Objektebene (OS) des Projektionsobjektivs angeordnet und mittels des Projektionsobjektivs in eine zur Objektebene optisch konjugierte Bildebene (IS) des Projektionsobjektivs abbildbar ist, wobei abbildungsrelevante Eigenschaften des Musters durch Musterdaten charakterisierbar sind;
Beleuchten eines Beleuchtungsbereichs des Musters mit einer von dem Beleuchtungssystem (ILL) bereitgestellten Beleuchtungsstrahlung gemäß einer für einen Nutzungsfall spezifischen Beleuchtungseinstellung, die durch Beleuchtungseinstellungsdaten charakterisierbar ist; und ist gekennzeichnet durch:
Ermitteln von für den Nutzungsfall spezifischen Nutzungsfall-Daten, die Musterdaten und/oder Beleuchtungseinstellungsdaten umfassen;
Ermitteln von Abbildungsspezifikationsdaten unter Verwendung der Nutzungsfall-Daten;
Steuern von steuerbaren optischen Komponenten des Projektionsobjektivs (PO) durch eine Steuereinrichtung (CU) des Projektionsobjektivs in Abhängigkeit von den Abbildungsspezifikationsdaten zur Anpassung des Abbildungsverhaltens des Projektionsobjektivs an den Nutzungsfall;
Abbilden des Musters auf das Substrat mit Hilfe des an den Nutzungsfall angepassten Projektionsobjektivs.



Beschreibung

HINTERGRUND

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung betrifft ein Projektionsbelichtungsverfahren zur Belichtung eines strahlungsempfindlichen Substrates mit mindestens einem Bild eines Musters gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1 sowie eine zur Durchführung des Verfahrens geeignete Projektionsbelichtungsanlage gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 27.

Stand der Technik

[0002] Zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen, z.B. Masken (Retikel) für die Mikrolithographie, werden heutzutage überwiegend mikrolithographische Projektionsbelichtungsverfahren eingesetzt. Dabei werden häufig Masken (Fotomasken, Retikel) verwendet, die ein bestimmtes Muster einer abzubildenden Struktur tragen, z.B. ein Linienmuster einer Schicht (Layer) eines Halbleiterbauelementes. Das Muster kann auch mithilfe einer anderen Mustereinrichtung bereitgestellt werden, z.B. mithilfe einer ansteuerbaren Mustereinrichtung, die abhängig von der Ansteuerung unterschiedliche Muster erzeugen kann.

[0003] Die Mustereinrichtung wird in einer Projektionsbelichtungsanlage im Strahlengang zwischen einem Beleuchtungssystem und einem Projektionsobjektiv so positioniert, dass das Muster im Bereich der Objektebene des Projektionsobjektivs liegt. Ein zu belichtendes Substrat, beispielsweise ein mit einer strahlungsempfindlichen Schicht (Resist, Fotolack) beschichteter Halbleiterwafer, wird derart gehalten, dass eine strahlungsempfindliche Oberfläche des Substrats im Bereich einer zur Objektebene optisch konjugierten Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnet ist. Bei einem Belichtungsvorgang wird das Muster mithilfe des Beleuchtungssystems beleuchtet, welches aus der Strahlung einer primären Strahlungsquelle eine auf das Muster gerichtete Beleuchtungsstrahlung formt, die innerhalb eines Beleuchtungsfeldes definierter Form und Größe auf das Muster auftrifft. Während eines Belichtungsvorgangs läuft die durch das Muster veränderte Strahlung als Projektionsstrahlung durch das Projektionsobjektiv, welches das Muster auf das zu belichtende, mit einer strahlungsempfindlichen Schicht beschichtete Substrat abbildet.

[0004] Die Beleuchtungsstrahlung kann für jeden Nutzungsfall durch bestimmte Beleuchtungsparameter charakterisiert werden. Typischerweise spricht man hier von einer für einen Nutzungsfall spezifischen Beleuchtungseinstellung, die durch Beleuchtungseinstellungsdaten charakterisierbar ist. Die Beleuchtungseinstellung wird auch als Beleuchtungssetting bezeichnet.

[0005] Manche Beleuchtungssysteme für Projektionsbelichtungsanlagen können beispielsweise zwischen konventioneller On-Axis-Beleuchtung mit unterschiedlichem Kohärenzgrad σ und außeraxialer Beleuchtung (off-axis illumination) umgeschaltet werden. Zu den außeraxialen Beleuchtungseinstellungen gehören beispielsweise die annulare Beleuchtung oder eine polare Beleuchtung, wie beispielsweise eine Dipolbeleuchtung, eine Quadrupolbeleuchtung oder eine andere multipolare Beleuchtung. Die Auswahl der für einen Nutzungsfall optimalen Beleuchtungseinstellung wird normalerweise vom Endnutzer der Projektionsbelichtungsanlage in Abhängigkeit vom abzubildenden Muster und anderen Randbedingungen getroffen. Die Beleuchtungseinstellungsdaten können spezifische Parameter derartiger Beleuchtungseinstellungen enthalten.

[0006] Die Beleuchtungseinstellung wird normalerweise vom Nutzer für einen bestimmten Prozess in Abhängigkeit von der Struktur des abzubildenden Musters und ggf. anderer Einflussfaktoren festgelegt und am Beleuchtungssystem eingestellt. Die abbildungsrelevanten Eigenschaften des Musters können durch Musterdaten charakterisiert werden.

[0007] Zu den Musterdaten gehören z.B. Informationen darüber, welche Art von Strukturen das Muster enthält und wie gegebenenfalls unterschiedliche Strukturen eines Musters (d. h. unterschiedliche Teilmuster) im Muster örtlich verteilt sind. Ein Muster kann beispielsweise ein oder mehrere Bereiche mit sehr eng beieinander liegenden Linien enthalten, die nur bei entsprechend hohem Auflösungsvermögen des Projektionsobjektives befriedigend auf das Substrat abgebildet werden können. Diejenigen Bereiche mit dem kleinsten Linienabstand und/oder der kleinsten Periodizitätslänge (pitch) einer Gruppe zueinander paralleler Linien wird in dieser Anmeldung als Kernbereich bezeichnet. Die Linien des Kernbereichs bilden die „Kernbereichsstruktur“. Um solche feinen Strukturen befriedigend abbilden zu können, wird häufig unter Bedingungen der Zweistrahlinterferenz gearbeitet, indem als Beleuchtungseinstellung eine Dipolbeleuchtung gewählt wird, bei der die Verbindungslinie zwischen den Polen der Dipolbeleuchtung senkrecht zur Längsrichtung der abzubildenden Linien der feinen Strukturen ausgerichtet ist. Somit spielt auch die Orientierung der feinen Strukturen bei der Auswahl einer geeigneten Beleuchtungseinstellung eine wichtige Rolle.

[0008] Ein Muster enthält typischerweise auch Bereiche mit gröberen Strukturen, die weniger hohe Anforderungen an die Abbildungsqualität des Projektionsobjektives stellen. Beispielsweise können in größerem Abstand zueinander liegende Linien vorgese-

hen sein, welche im fertigen Substrat die Zuleitungen zu den feineren Strukturen bilden. Derartige Strukturen, die geringere Anforderungen an die Abbildungsqualität, insbesondere an das Auflösungsvermögen des Projektionsobjektives stellen, werden in dieser Anmeldung auch als „Peripheriestrukturen“ bezeichnet.

[0009] Für den Hersteller von Projektionsobjektiven stellt sich unter anderem das Problem, dass nicht bekannt ist, welche Arten von Mustern ein Endnutzer im Verlauf der Gesamtnutzungszeit des Projektionsobjektives zur Produktion von strukturierten Bauelementen nutzen wird. Dies resultiert üblicherweise in sehr harten Spezifikationen für die Abbildungsqualität des Projektionsobjektives, um im Bedarfsfall auch sehr feine Strukturen bzw. Strukturen jeglicher Art befriedigend abbilden zu können. Der Aufwand und die Kosten zur Bereitstellung geeigneter universell einsetzbarer Projektionsobjektive steigen dementsprechend mit zunehmenden Anforderungen an die Abbildungsqualität, z.B. auf Grund von Double Patterning oder Quadrupel Patterning, extrem stark. Die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Projektionsobjektive werden erreicht.

AUFGABE UND LÖSUNG

[0010] Es ist eine Aufgabe der Erfindung, ein Projektionsbelichtungsverfahren bereitzustellen, welches unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen eine hohe Qualität der am Substrat erzeugten Strukturen gewährleistet. Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, eine zur Durchführung des Projektionsbelichtungsverfahrens geeignete Projektionsbelichtungsanlage bereitzustellen.

[0011] Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Projektionsbelichtungsverfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1 sowie durch eine Projektionsbelichtungsanlage mit den Merkmalen von Anspruch 27. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

[0012] Bei dem Projektionsbelichtungsverfahren werden für den aktuellen Nutzungsfall spezifische Systemeinstellungen vorgenommen, die das Projektionsobjektiv bzw. dessen Abbildungsverhalten an spezifische Eigenheiten des Musters und Besonderheiten der Beleuchtungssituation anpassen. Hierzu werden zunächst Nutzungsfall-Daten ermittelt, die für den vom Nutzer vorgesehenen Nutzungsfall („user case“) spezifisch sind. Diese Nutzungsfall-Daten umfassen Musterdaten und/oder Beleuchtungseinstellungsdaten. Vorzugsweise werden sowohl Musterdaten als auch Beleuchtungseinstellungsdaten ermittelt. Durch diesen Verfahrensschritt werden somit relevante Informationen über den aktuell vom Nutzer vorgesehenen Nutzungsfall akquiriert, welche bei der ursprünglichen Fertigung des Projektionsobjektives jedenfalls in der spezifischen Kombination nicht bekannt sein konnten.

[0013] Die durch die Nutzungsfall-bezogene Datenakquisition ermittelten Nutzungsfall-Daten werden dazu verwendet, Abbildungsspezifikationsdaten zu ermitteln. Der Begriff „Abbildungsspezifikationsdaten“ bezeichnet hierbei Daten, welche geeignet sind, ein für den Nutzungsfall spezifisches Abbildungsverhalten des Projektionsobjektives zu parametrisieren, d.h. mit Hilfe geeigneter Parameter zu beschreiben. Die Abbildungsspezifikationsdaten können beispielsweise Spezifikations-Grenzwerte für Zernike-Koeffizienten enthalten, die bestimmte, für die Abbildung relevante Aberrationen beschreiben. Soll beispielsweise der Astigmatismus eine bestimmte Grenze nicht überschreiten, so kann dies durch eine Spezifikation für den/die entsprechenden Zernike-Koeffizienten Z5/Z6 ausgedrückt werden.

[0014] Da die Ermittlung der Abbildungsspezifikationsdaten unter Verwendung der Nutzungsfall-Daten erfolgt, können die Abbildungsspezifikationsdaten speziell auf den betrachteten Nutzungsfall optimiert werden. Die ermittelten Abbildungsspezifikationsdaten können dann dazu benutzt werden, steuerbare optische Komponenten des Projektionsobjektives mit Hilfe einer Steuereinrichtung des Projektionsobjektives so zu steuern, dass das Abbildungsverhalten des Projektionsobjektives an den Nutzungsfall angepasst wird. Es findet somit eine Adaption des Abbildungsverhaltens des Projektionsobjektives an den spezifischen Nutzungsfall statt. Das Muster kann dann mit Hilfe des an den Nutzungsfall angepassten Projektionsobjektives in guter Abbildungsqualität auf das Substrat abgebildet werden.

[0015] Diesem Vorgehen liegen unter anderem die folgenden Überlegungen zugrunde. Es wurde erkannt, dass mit zunehmenden Anforderungen an die Projektionsobjektive eine Imaging-basierte Bewertung immer mehr an Bedeutung gewinnt. Bei der Imaging-basierten Bewertung wird bewertet, ob Kernbereichsstrukturen und/oder Peripheriebereichsstrukturen in ausreichender Qualität abgebildet werden können, d.h ob ein stabiles Prozessfenster zur Herstellung einer einzelnen Lage des Mikrochips vorhanden ist. Qualitätskriterien sind hier beispielsweise die Variation der Linienbreite und/oder Position der Linie und/oder der Kontrast.

[0016] Es wird davon ausgegangen, dass das bisherige pragmatische Vorgehen, das Projektionsobjektiv in Bezug auf alle wichtigen Aberrationen zu optimieren im Vertrauen darauf, dass in der Folge dann auch die Abbildungsleistung zufriedenstellend wird, weder zeitgemäß noch in manchen Fällen ausreichend sein wird. Dies ist unter anderem bedingt dadurch, dass

je nach Nutzungsfall die einzelnen Aberrationen des Projektionsobjektives unterschiedlich zur Gesamtabbildungsleistung beitragen können. Es wird davon ausgegangen, dass ein herkömmlicher Ansatz, alle Aberrationen in einem Maße zu optimieren, das für alle Nutzungsfälle ein zufriedenstellendes Abbildungsverhalten gegeben ist, bedingt durch immer härtere Spezifikationen einerseits und besonders aggressive Beleuchtungseinstellungen andererseits sowie durch die geforderten hohen Durchsatzraten zukünftig nicht mehr in allen Fällen ausreichend sein werden. Beispielsweise ist zu befürchten, dass bei zukünftig zu erwartenden außerordentlich harten Spezifikationen für das sogenannte „Overlay“ im Rahmen von Doppelbelichtungsverfahren ein nicht an einen speziellen Nutzungsfall angepasstes Projektionsobjektiv die harten Spezifikationen eventuell nicht mehr wird erfüllen können. Zur Definition des „Overlay“ sei auf US 8,203,696 B2 Spalte 21 Zeile 36 bis Spalte 22, Zeile 25 verwiesen.

[0017] Bei dem Vorgehen gemäß der beanspruchten Erfindung wird in Kauf genommen, dass die Optimierung des Abbildungsverhaltens des Projektionsobjektives auf einen speziellen Nutzungsfall gegebenenfalls auch zu einem Systemzustand führen kann, der nicht notwendigerweise für eine Vielzahl von anderen Nutzungsfällen ausreichend gute Abbildungsleistung liefert. Jedoch wird mit der beanspruchten Erfindung erreicht, dass die Abbildungsleistung des Projektionsobjektives so gut wie möglich auf den aktuell vorliegenden oder zu erwartenden Nutzungsfall angepasst wird. Um eine Optimierung des Zustandes des Projektionsobjektives während des Betriebes auf die nutzerspezifischen Anforderungen zu ermöglichen, sind Maßnahmen vorgesehen, die es ermöglichen, die notwendigen Informationen über die Beleuchtungseinstellung und/oder das abzubildende Muster für die Steuereinrichtung des Projektionsobjektives zugänglich zu machen.

[0018] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass mindestens ein Teil der Musterdaten und/oder der Beleuchtungseinstellungsdaten durch eine oder mehrere der Datenakquisition dienenden Messungen am Projektionsobjektiv ermittelt werden. Somit ist man bei dem Verfahren nicht darauf angewiesen, dass ein Nutzer die für die Optimierung des Projektionsobjektives erforderlichen Daten von sich aus zur Verfügung stellt. Dies kann zur Automatisierung der Anpassung genutzt werden.

[0019] Bei manchen Ausführungsformen werden alle für die Ermittlung der Abbildungsspezifikationsdaten erforderlichen Nutzungsfall-Daten durch eine oder mehrere Messung am Projektionsobjektiv ermittelt. In diesem Fall ist eine Kooperation des Nutzers bei der Optimierung des Projektionsobjektives für den spezifischen Nutzungsfall nicht erforderlich, so dass die Anpassung des Abbildungsverhaltens des Projektionsobjektives automatisch, ggf. auch unmerklich für den Nutzer, aber zu seinem Nutzen bzw. zu seinem Vorteil, erfolgen kann.

[0020] Es wird als vorteilhaft angesehen, wenn die Musterdaten zumindest Kernbereichsstrukturdaten umfassen. Kernbereichsstrukturdaten enthalten quantitative Information über die Struktur von Kernbereichen, wobei Kernbereiche Bereiche mit dem kleinsten Linienabstand und/oder der kleinsten Periodizitätslänge (pitch) einer Gruppe zueinander paralleler Linien in dem Muster sind. Die Linien des Kernbereichs bilden die „Kernbereichsstruktur“.

[0021] Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kernbereichsstrukturen die am schwierigsten abzubildenden Strukturen des Musters sind. Zur Abbildung dieser Strukturen sollte die Wellenfront der Projektionsstrahlung in denjenigen Bereichen, die zur Abbildung der Kernbereichsstrukturen benötigt werden, besonders glatt (im Sinne eines besonders geringen Gradienten) bzw. gut korrigiert sein.

[0022] Vorzugsweise sollten die Musterdaten zumindest Kernbereichsstruktur-Orientierungsdaten umfassen, die eine Orientierung von Linien der Kernbereichsstruktur des Musters repräsentieren. Bei Kenntnis der Kernbereichsstruktur-Orientierungsdaten kann die Abbildungsleistung des Projektionsobjektives so optimiert werden, dass das Auflösungsvermögen in der Richtung senkrecht zu den Linien aufgrund der in dieser Richtung besonders glatten Wellenfront ausreichend gut eingestellt wird. Die Spezifikation für das Auflösungsvermögen bzw. für die Qualität der Wellenfront in einer senkrecht zur Orientierung der Linien liegenden Richtung können dagegen entspannt werden, was die Einstellung des Projektionsobjektives auf den Nutzungsfall insgesamt erleichtert.

[0023] Kernbereichsstruktur-Orientierungsdaten können beispielsweise aus Beleuchtungseinstellungsdaten abgeleitet werden, welche Informationen über die Orientierung der Pole einer am Beleuchtungssystem vom Nutzer eingestellten Dipolbeleuchtung enthalten, da diese zur Erzielung von Zweistrahlinterferenz häufig so eingestellt werden, dass die Verbindungslinie zwischen den Polen senkrecht zur Orientierung der Linien der Kernbereichsstruktur verläuft.

[0024] Vorzugsweise sollten die Musterdaten zusätzlich zu den Kernbereichsstruktur-Orientierungsdaten weitere Daten umfassen. Insbesondere können Kernbereichsstruktur-Positionsdaten nützlich sein, die eine Position von Linien einer Kernbereichsstruktur innerhalb des Musters repräsentieren. Auf Basis der Kernbereichsstruktur-Positionsdaten können Informationen über die erforderliche Feldabhängigkeit der Qualität der Wellenfront der Projektions-

strahlung abgeleitet werden. Liegt beispielsweise eine Kernbereichsstruktur an einem rechten Rand eines Musters, während am linken Rand nur gröbere Peripheriestrukturen vorliegen, so kann es ausreichen, die Wellenfront nur für diejenigen Feldpunkte ausreichend zu korrigieren, die für die Abbildung der Kernbereichsstruktur am rechten Rand maßgeblich sind, während die Abbildungsspezifikationen für andere Feldpunkte entspannt sein können.

[0025] Durch die Ermittlung von Peripheriebereichsstruktur-Orientierungsdaten, die eine Orientierung von Linien an der Peripheriestruktur des Musters repräsentieren, und/oder von Peripheriebereichsstruktur-Positionsdaten, die eine Position von Linien einer Peripheriestruktur innerhalb des Musters repräsentieren, können weitere musterspezifische Optimierungen des Abbildungsverhaltens des Projektionsobjektives vorgenommen werden.

[0026] Bevorzugte Varianten des Ermittelns von Abbildungsspezifikationsdaten unter Verwendung der Nutzungsfall-Daten beruhen unter anderem auf den folgenden Überlegungen.

[0027] In der Regel werden Abbildungsspezifikationen in Form von maximalen Beiträgen einzelner Zernikes und/oder maximalen Beiträgen von (gewichteten) linearen oder quadratischen Zernike-Summen angegeben. Beispiele für eine gewichtete quadratische Zernike-Summe sind der RMS oder auch grouped RMS (ein-, zwei-, drei- oder vierwellig). Ein Beispiel für eine gewichtete lineare Zernike-Summe ist der Overlay-Beitrag für Kernbereichsstrukturen basierend auf einem spezielle Beleuchtungssetting.

[0028] In der Regel hat man für jeden Feldpunkt FP_1, ..., FP_M eine Mehrzahl an Abbildungsspezifikationen, beispielsweise $S_1(FP_1)$, ..., $S_N(FP_M)$.

[0029] Wählt man einheitliche Spezifikationen unabhängig vom konkreten Feldpunkt, so gilt $S_1(FP_1) = ... = S_1(FP_M)$, ..., $S_N(FP_1) = ... = S_N(FP_M)$. Dieser Ansatz, d.h. einheitliche Spezifikationen für alle Feldpunkte, ist im Stand der Technik üblich.

[0030] Abweichend davon werden vorzugsweise die Abbildungsspezifikationsdaten im Hinblick auf die Nutzungsfall-Daten in der Weise ermittelt, dass sich Abbildungsspezifikationsdaten von mindestens zwei Feldpunkten hinsichtlich mindestens einer Abbildungsspezifikation unterscheiden. Die Abbildungsspezifikationen werden also in Abhängigkeit vom konkreten Feldpunkt spezifisch für den Nutzungsfall sozusagen „individuell“ ermittelt. Die Abbildungsspezifikationsdaten können somit für unterschiedlich gelegene Feldpunkte unterschiedlich sein.

[0031] Ein Beispiel kann den Nutzen dieses Ansatzes verdeutlichen. Für nichtrotationssymmetrische Zernikes, beispielsweise Z_{17} und Z_{18}, fragt der Z_{17} andere Wellenfrontbereiche ab als der Z_{18}. Entsprechend wird bei einem x-Dipol der Z_{17} eine engere Spezifikation haben als der Z_{18}, während bei einem rotierten x-Dipol der Z_{18} (oder allgemein eine Linearkombination von Z_{17} und Z_{18}) eine engere Spezifikation hat.

[0032] Die Rückführung der Abbildungsspezifikationsdaten auf die ausgewählten Strukturdaten hat zur Folge, dass man die Frage beantwortet: Was sind bei einem gegebenen Nutzungsfall die größtmöglichen Spezifikationen, bei denen eine zuverlässige Abbildung noch gewährleistet werden kann?

[0033] Die Abbildungsspezifikationsdaten können ein oder mehrere Strukturdaten ausgewählt aus der folgenden Gruppe:
Kernbereichsstruktur-Orientierungsdaten, Kernbereichsstruktur-Positionsdaten, Peripheriestruktur-Orientierungsdaten, Peripheriestruktur-Positionsdaten, dergestalt umfassen, dass es
zwei Feldpunkte gibt, deren Abbildungsspezifikationsdaten, insbesondere Wellenfrontspezifikationsdaten, sich in mindestens einem Aspekt unterscheiden und/oder
dass es einen Feldpunkt gibt, in dem sich die Wellenfrontspezifikation für eine Wellenfront für eine n-wellige Wellenfrontentwicklungsfunktion in mindestens einem Aspekt von der um einen Winkel von 90°/n gedrehten Wellenfront unterscheidet,
wobei dieser Unterschied auf die ausgewählten Strukturdaten rückführbar ist.

[0034] Die n-wellige Wellenfrontentwicklungsfunktion kann z.B. ein n-welliger Zernike sein.

[0035] Am Beispiel von Zernike-Koeffizienten Z_m kann dies beispielweise wie folgt verstanden werden. Es wird davon ausgegangen, dass es unterschiedliche Feldpunkte FP_i und FP_j sowie eine Abbildungsspezifikation S_k gibt, so dass die Bedingung: $S_k(FP_i) \neq S_k(FP_j)$ gilt. Der erste Feldpunkte FP_i kann z.B. ein Feldpunkt in einem Kernbereich sein, während der zweite Feldpunkt FPj_i im Bereich der Peripheriesstrukturen liegen soll. Die Abbildungsspezifikation S_k sei ein ungeradwelliger Zernike, also z.B. ein einwelliger oder dreiwelliger oder fünfwelliger oder siebenwelliger Zernike, wie beispielsweise Z_2 oder Z_3 oder Z_7 oder Z_8 (einwellig) oder Z_{10} oder Z_{11} (dreiwellig) oder Z_{26} oder Z_{27} (fünfwellig) oder z_{50} oder z_{51} (siebenwellig). Sind die abzubildenden Linien kleinsten Linienabstandes gedreht, so kann auch eine geeignete Linearkombination aus beispielsweise Z_2 und Z_3, oder aus Z_2 und Z_8, oder aus Z_{10} und Z_{11} oder Z_{26} oder Z_{27} oder Z_{50} oder Z_{51} spezifiziert werden. Die ungeradwelligen Zernikes werden hier u.a. deshalb als besonders relevant angesehen, weil sie das für Double Patterning oder Quadrupel-Patterning wichtige Overlay dominieren.

[0036] Die Abbildungsspezifikation kann z.B. so gewählt werden, dass ein Spezifikations-Verhältnis zwischen der Abbildungsspezifikation für einen ersten Feldpunkt im Kernbereich und der Abbildungsspezifikation für den zweiten Feldpunkt im Peripheriebereich deutlich, z.B. um mindestens 10% oder mindestens 30% oder mindestens 50% vom Wert 1 abweicht. Insbesondere kann z.B. die Bedingung:

$$\max(S_k(FP_i)/S_k(FP_j),\ S_k(FP_j)/S_k(FP_i)) \geq \alpha$$

gelten, wobei $\alpha \geq 1.5$ ist. Insbesondere kann auch $\alpha \geq 2$ oder sogar $\alpha \geq 5$ gelten.

[0037] Eine besonders präzise Anpassung des Abbildungsverhaltens des Projektionsobjektives an den Nutzungsfall ist bei bevorzugten Ausführungsformen dadurch möglich, dass wenigstens eine Teilmenge von Nutzungsfall-Daten und/oder Abbildungsspezifikationsdaten für einen Nutzungsfall über eine extrinsische Datenakquisition ermittelt und an die Steuereinrichtung des Projektionsobjektives übermittelt wird. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten zur extrinsischen Datenakquisition, die einzeln oder in Kombination von mehreren Maßnahmen genutzt werden können. Eine Möglichkeit besteht darin, die gewünschten Daten vom Nutzer über eine Nutzerschnittstelle abzufragen. Hierzu kann an einer Bedieneinheit des Projektionsobjektives bzw. der Projektionsbelichtungsanlage eine entsprechende Nutzerschnittstelle mit Bildschirm und Tastatur oder dergleichen vorgesehen sein. Alternativ oder zusätzlich ist es auch möglich, mindestens einen Teil der relevanten Daten aus einem Speicher abzurufen, der für eine Steuereinrichtung des Projektionsobjektivs zugänglich ist.

[0038] Die gespeicherten Daten können z.B. Informationen über das Beleuchtungssystem, über das Projektionsobjektiv und/oder über das Retikel enthalten. Beispielsweise kann über eine Datenleitung Information zur Einstellungen an dem Beleuchtungssystem der Projektionsbelichtungsanlage abgerufen und bei der Ermittlung der Abbildungsspezifikationsdaten genutzt werden. Infomationen zum Retikel können z.B. mittels eines Scanners (und Bar-Code) in Form einer Retikel-ID eingelesen werden. Zu der Retikel-ID gehörige Detailinformationen können dann aus einer Datenbank abgerufen werden, die der Steuereinrichtung des Projektionsobjektivs zugänglich ist. Alternativ kann z.B. ein RFID-Chip an dem Retikel vorgesehen sein, der alle relevanten Informationen enthält und auslesbar ist.

[0039] Alternativ oder zusätzlich zu einer extrinsischen Datenakquisition kann eine intrinsische Datenakquisition durch Messungen am oder im Projektionsobjektiv erfolgen. Dabei kann z.B. das Ermitteln von Nutzungsfall-Daten ein automatisiertes Ermitteln von Projektionsstrahlungsdaten umfassen, die mindestens eine Eigenschaft der von der Objektebene in Richtung der Bildebene des Projektionsobjektives verlaufenden Projektionsstrahlung repräsentieren. Hierbei wird die Möglichkeit genutzt, mindestens einen Teil der Musterdaten und/oder der Beleuchtungseinstellungsdaten unter Verwendung der Projektionsstrahlungsdaten zu beschaffen. Gegebenenfalls können alle für die Anpassung des Projektionsobjektiv an dem Nutzungsfall erforderlichen Daten durch eine derartige automatisierte Datenakquisition anhand von am Projektionsobjektiv messbaren Effekten durchgeführt werden, so dass vom Nutzer keine zusätzliche Information bereitgestellt werden muss.

[0040] Bei manchen Ausführungsformen umfasst die Ermittlung von Projektionsstrahlungsdaten eine Messung einer Wellenfront der Projektionsstrahlung an einem oder mehreren Feldpunkten. Eine Wellenfrontmessung hat unter anderem den Vorteil, dass dadurch unmittelbar Eigenschaften der Wellenfront ermittelt werden können, die letztendlich für die Abbildungsqualität des Projektionsobjektives maßgeblich ist. Geeignete Systeme zur Wellenfrontmessung sind in vielen Projektionsbelichtungsanlagen für andere Zwecke bereits vorhanden, so dass sie im Rahmen von Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung zur intensischen Datenakquisition genutzt werden können.

[0041] In den Patentschriften US 7,333,216 A1 und US 6,650,399 A1 sind Beispiele für Wellenfront-Messsysteme gezeigt, die grundsätzlich bei Durchführung des Verfahrens genutzt werden können. Der Offenbahrungsgehalt dieser Dokumente wird hinsichtlich von Aufbau und Funktion der Wellenfront-Messsysteme zum Inhalt der vorliegenden Beschreibung gemacht.

[0042] Alternativ oder zusätzlich zu einer Wellenfront-Messung kann die Ermittlung von Projektionsstrahlungsdaten auch eine Ermittlung von Intensitätverteilungsdaten umfassen, die eine zweidimensionale Verteilung von Strahlungsintensität der Projektionsstrahlung an mindestens einer zwischen der Objektebene und der Bildebene im Projektionsstrahlengang liegenden Referenzfläche repräsentieren.

[0043] Es ist möglich, dass mindestens eine im Strahlengang des Projektionsobjektivs angeordnete optische Fläche eines optischen Elements als Referenzfläche genutzt wird. Die Referenzfläche kann somit beispielsweise eine im Strahlengang des Projektionsobjektives angeordnete optische Fläche eines optischen Elements sein, beispielsweise einer Linse (refraktives optisches Element) oder eines Spiegels (reflektives optisches Element). Wenn das optische Element ein Spiegel und die optische Fläche eine Spiegelfläche ist, ist ein Rückschluss von den Intensitätsverteilungsdaten auf die dadurch verursachten Veränderung der Wellenfront besonders einfach

möglich, da eine induzierte Spiegelerwärmung deterministisch eine reversible Änderung der Spiegeloberfläche und hierdurch Veränderungen der Wellenfront induziert. Es ist auch möglich, dass die Referenzfläche durch die Fläche einer Blende gebildet wird oder durch eine Fläche an einer Maske (Retikel) oder einem zu belichtenden Substrat (z. B. Wafer). Gegebenenfalls kann die Referenzfläche auch an oder in einer Immersionsflüssigkeit liegen.

[0044] Eine direkte Messung im Bereich der Immersionsflüssigkeit kann u.a. deshalb vorteilhaft sein, weil durch die Messung die Situation unmittelbar in einer Feldebene ermittelt werden kann und damit sehr gute Rückschlüsse auf die Verteilung der Core- bzw. Peripheriestrukturen des Retikels möglich sind. Durch einen intervallweisen Austausch der Immersionsflüssigkeit kann ggf. darauf verzichtet werden, die Wärmeleitungsgleichung vollständig zu lösen und auf die Intensitätsverteilung zurückzuschließen.

[0045] Eine Messung der Strahlungsintensitätsverteilung innerhalb der Projektionsstrahlung ist möglich. Bei manchen Ausführungsformen wird eine indirekte Ermittlung der Intensitätsverteilungsdaten dadurch erreicht, dass zur Ermittlung von Intensitätsverteilungsdaten eine zweidimensionale Temperaturverteilung an der Referenzfläche ortsaufgelöst gemessen wird.

[0046] Dabei wird davon ausgegangen, dass die auf eine Referenzfläche einfallende Projektionsstrahlung dort eine zur Intensität proportionale Erwärmung verursacht, welche durch geeignete temperaturempfindliche Messsysteme erfasst werden kann. Die zweidimensionale Temperaturverteilung kann beispielsweise mittels einer oder mehrerer Wärmebildkameras (Infrarotkameras) oder mittels einem oder mehrerer anderer Temperatursensoren erfasst werden. Gegebenenfalls kann eine Extrapolation und/oder eine Interpolation der Messwerte und/oder ein Abgleich der Messwerte mit einem Vorhersagemodell erfolgen, um präzisere Messwerte zu erhalten. Alternativ oder zusätzlich können bei der Ermittlung von Intensitätsverteilungsdaten aus einer zweidimensionalen Temperaturverteilung an einer Referenzfläche auch Wärmeleitungseffekte durch Lösung einer Wärmeleitungsgleichung berücksichtigt werden, um die Präzision bei der Bestimmung der Intensitätsverteilung in der Projektionsstrahlung zu verbessern.

[0047] Bei einer Ausführungsform werden erste Intensitätsverteilungsdaten an einer ersten Referenzfläche ermittelt, die an oder in der Nähe einer Pupillenebene des Projektionsobjektives liegt, und es werden unter Verwendung der ersten Intensitätsverteilungsdaten Beleuchtungseinstellungsdaten ermittelt. Diese Verfahrensvariante nutzt aus, dass die Intensitätsverteilung nahe oder in einer Pupillenebene des Projektionsobjektives wesentlich durch die Intensitätsverteilung in einer dazu optisch konjugierten Pupillenebene des Beleuchtungssystems bestimmt wird, so dass durch Bestimmung der Intensitätsverteilung in der Pupillenebene des Projektionsobjektives mit ausreichender Präzision Rückschlüsse auf das Beleuchtungssetting (z. B. Dipolbeleuchtung, Quadrupolbeleuchtung, konventionelle Beleuchtung oder dergleichen) möglich sind. Der Einfluss des beleuchteten Musters auf die Intensitätsverteilung im Bereich der Pupillen in das Projektionsobjektives kann dabei in erster Näherung vernachlässigt werden. Gegebenenfalls kann dieser Einfluss aber auch bei der Ermittlung berücksichtigt werden. Auch Musterdaten können ggf. abgeleitet werden.

[0048] Vorzugsweise werden zweite Intensitätsverteilungsdaten an einer zweiten Referenzfläche ermittelt, die an oder in der Nähe einer Feldebene des Projektionsobjektives liegt, wobei Musterdaten unter Verwendung der zweiten Intensitätsverteilungsdaten ermittelt werden. Dieser Maßnahme liegt unter anderem die Überlegung zugrunde, dass sich in einer Feldebene des Projektionsobjektives ein Bild des Musters und der in diesem verteilten Strukturen bildet und dass in der Nähe einer Feldebene ein solches Bild wenigstens näherungsweise in defokussierter Form noch vorhanden sein kann. Somit ist es möglich, auf Basis der zweiten Intensitätsverteilungsdaten beispielsweise Informationen über die laterale Verteilung von Kernbereichsstrukturen und Peripheriestrukturen zu erhalten.

[0049] Zur Quantifizierung der Position eines optischen Elements bzw. einer optischen Fläche im Strahlengang kann z.B. das Subaperturverhältnis SAR genutzt werden.

[0050] Gemäß einer anschaulichen Definition ist das Subaperturverhältnis SAR einer optischen Fläche eines optischen Elements im Projektionsstrahlengang definiert als der Quotient zwischen dem Subaperturdurchmesser DSA und dem optisch freien Durchmesser DCA gemäß SAR := DSA /DCA. Der Subaperturdurchmesser DSA ist gegeben durch den maximalen Durchmesser einer Teilfläche des optischen Elements, die mit Strahlen eines von einem gegebenen Feldpunkt ausgehenden Strahlbündels beleuchtet wird. Der optisch freie Durchmesser DCA ist der Durchmesser des kleinsten Kreises um eine Referenzachse des optischen Elements, wobei der Kreis denjenigen Bereich der Fläche des optischen Elements einschließt, der durch alle von Objektfeld kommenden Strahlen ausgeleuchtet wird.

[0051] In einer Feldebene (z.B. Objektebene oder Bildebene) gilt danach SAR = 0. In einer Pupillenebene gilt SAR = 1. „Feldnahe“ Flächen weisen somit ein Subaperturverhältnis auf, das nahe bei 0 liegt, während „pupillennahe“ Flächen ein Subaperturverhältnis aufweisen, das nahe bei 1 liegt.

[0052] Vorzugsweise liegt bei einer pupillennah angeordneten Referenzfläche das Subaperturverhältnis zwischen 0.5 und 1, insbesondere im Bereich zwischen 0.7 und 1. Bei einer feldnah angeordneten Referenzfläche liegt das Subaperturverhältnis vorzugsweise zwischen 0 und 0.5, insbesondere im Bereich zwischen 0 und 0.3.

[0053] Besonders präzise Informationen zu den abbildungsrelevanten Nutzungsfall-Daten sind in der Regel dann erhältlich, wenn sowohl erste Intensitätsverteilungsdaten an einer ersten Referenzfläche und zweite Intensitätsverteilungsdaten an einer zweiten Referenzfläche ermittelt und die Nutzungsfall-Daten dann unter Verwendung dieser beiden Typen von Intensitätsverteilungsdaten ermittelt werden.

[0054] Bei bevorzugten Varianten ergibt sich eine schnelle und ausreichend präzise Auswertung von Intensitätsverteilungsdaten dadurch, dass in einem durch die Steuereinrichtung der Projektionsbelichtungsanlage zugänglichen Speicher Nutzungsfall-Klassifizierungsdaten gespeichert sind, die für eine Vielzahl von Kombinationen aus einer Beleuchtungseinstellung und einer Maskenstruktur im Beleuchtungsbereich korrespondierende Intensitätsverteilungsdaten für mindestens eine zwischen der Objektebene und der Bildebene liegenden Referenzfläche enthalten, und dass die Projektionsstrahlungsdaten unter Verwendung der Nutzungsfall-Klassifizierungsdaten ermittelt werden.

[0055] Beim Ermitteln von Musterdaten und/oder Beleuchtungseinstellungsdaten aus den Projektionsstrahlungsdaten können beispielsweise Mustererkennungsverfahren und/oder Merkmalsextraktionsverfahren verwendet werden. Diese können auch beim Vergleich gemessener Intensitätsverteilungsdaten mit den Nutzungsfall-Klassifizierungsdaten mit Vorteil angewendet werden, um Basisinformationen über den spezifischen Nutzungsfall schnell und zuverlässig zu ermitteln.

[0056] Bei der Ermittlung von Intensitätsverteilungsdaten aus einer zweidimensionalen Temperaturverteilung an einer optischen Fläche können ggf. Wärmeleitungseffekte durch Lösung einer zeitlich invarianten Wärmeleitungsgleichung berücksichtigt werden.

[0057] Durch die Anpassung des Projektionsobjektives an die Anforderungen eines bestimmten Nutzungsfalls kann es zu der Situation kommen, dass das Projektionsobjektiv zwar für diesen Nutzungsfall optimal eingestellt ist, bei einem anderen Muster und/oder einer anderen Beleuchtungseinstellung jedoch keine ausreichende Abbildungsleistung mehr haben würde. Es ist unter anderem aus diesem Grund bei manchen Ausführungsformen vorgesehen, dass erste Nutzungsfall-Daten einer ersten Projektionsbelichtung mit zweiten Nutzungsfall-Daten einer unmittelbar oder mittelbar folgenden zweiten Projektionsbelichtung verglichen werden und der Vergleich zur Generierung von Nutzungsfall-Vergleichsdaten führt. Auf Basis der Nutzungsfall-Vergleichsdaten kann überwacht werden, ob das Projektionsobjektiv für den jeweiligen Nutzungsfall richtig eingestellt ist.

[0058] Insbesondere ist es möglich, in Abhängigkeit von den Nutzungsfall-Vergleichsdaten ein Nutzungsfall-Wechselsignal zu generieren, welches einen Wechsel des Nutzungsfalls anzeigt. Dieser kann beispielsweise dann vorliegen, wenn für die gleiche Maskenstruktur mit einer anderen Beleuchtungseinstellung gearbeitet wird, wenn mit der gleichen Beleuchtungseinstellung ein anderes Muster beleuchtet wird und/oder wenn sowohl die Beleuchtungseinstellung als auch das Muster von einer Projektionsbelichtung zur nächsten verändert werden. Wird ein Nutzungsfall-Wechsel angezeigt, so können rechtzeitig Umstellungen am Projektionsobjektiv vorgenommen werden, um auch für den neuen Nutzungsfall eine optimale Anpassung des Projektionsobjektives zu gewährleisten.

[0059] Die Erfindung betrifft auch eine Projektionsbelichtungsanlage, die zur Durchführung des Projektionsbelichtungsverfahrens konfiguriert ist. Die Projektionsbelichtungsanlage weist ein System zur Anpassung des Abbildungsverhaltens des Projektionsobjektives an einen spezifischen Nutzungsfall auf, wobei das System Einrichtungen zum Ermitteln von für den Nutzungsfall spezifischen Nutzungsfall-Daten, Einrichtungen zum Ermitteln von Abbildungsspezifikationsdaten unter Verwendung der Nutzungsfall-Daten sowie eine dem Projektionsobjektiv zugeordnete Steuereinrichtung aufweist, die so konfiguriert ist, dass steuerbare optische Komponenten des Projektionsobjektives durch die Steuereinrichtung in Abhängigkeit von den Abbildungsspezifikationsdaten gesteuert werden können, um das Abbildungsverhalten des Projektionsobjektives an den Nutzungsfall anzupassen.

[0060] Vorteilhafte Ausgestaltungen werden anhand konkreter Ausführungsbeispiele weiter unten beschrieben

[0061] Die vorstehenden und weitere Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und aus den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungsformen darstellen können. Ausführungsbeispiele der Erfindung werden in den Zeichnungen dargestellt und im Folgenden näher erläutert.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0062] **Fig.** 1 zeigt in **Fig.** 1A Komponenten einer EUV-Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gemäß einer Ausführungsform der Erfindung und in **Fig.** 1B Details eines Projektionsobjektivs gemäß einer anderen Ausführungsform;

[0063] **Fig.** 2 und **Fig.** 3 zeigen Flussdiagramme, die eine mögliche Abfolge von Schritten beim Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage repräsentieren; und

[0064] **Fig.** 4 bis **Fig.** 6 zeigen Ausführungsbeispiele zur Ermittlung von Information über Lage und Orientierung von Kernbereichsstrukturen und Peripheriestrukturen aus Temperaturverteilungsmessungen an einem feldnahen optischen Element und einem pupillennahen optischen Element sowie Informationen über das Beleuchtungssetting.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0065] **Fig.** 1 zeigt in **Fig.** 1A Komponenten einer EUV-Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage WSC zur Belichtung eines im Bereich einer Bildebene IS eines Projektionsobjektivs PO angeordneten strahlungsempfindlichen Substrats W mit mindestens einem Bild eines im Bereich einer Objektebene OS des Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer reflektiven Maske M. **Fig.** 1B zeigt Details eines Projektionsobjektivs bei einer im Detail anders ausgestatteten Variante.

[0066] Die Projektionsbelichtungsanlage wird mit der Strahlung einer primären Strahlungsquelle RS betrieben. Ein Beleuchtungssystem ILL dient zum Empfang der Strahlung der primären Strahlungsquelle und zur Formung von auf das Muster gerichteter Beleuchtungsstrahlung. Das Projektionsobjektiv PO dient zur Abbildung der Struktur des Musters auf das lichtempfindliche Substrat W.

[0067] Die primäre Strahlungsquelle RS kann unter anderem eine Laser-Plasma-Quelle oder eine Gasentladungsquelle oder eine Synchrotron-basierte Strahlungsquelle sein. Solche Strahlungsquellen erzeugen eine Strahlung RAD im extremen Ultraviolettbereich (EUV-Bereich), insbesondere mit Wellenlängen zwischen 5 nm und 15 nm. Damit das Beleuchtungssystem und das Projektionsobjektiv in diesen Wellenlängenbereich arbeiten können, sind sie mit für EUV-Strahlung reflektiven Komponenten aufgebaut.

[0068] Die von der Strahlungsquelle RS ausgehende Strahlung RAD wird mittels eines Kollektors C gesammelt und in das Beleuchtungssystem ILL geleitet. Das Beleuchtungssystem umfasst eine Mischeinheit MIX, eine Teleskopoptik TO und einen feldformenden Spiegel FFM. Das Beleuchtungssystem formt die Strahlung und leuchtet damit ein Beleuchtungsfeld aus, das in der Objektebene OS des Projektionsobjektivs PO oder in dessen Nähe liegt. Form und Größe des Beleuchtungsfeldes bestimmen dabei Form und Größe des effektiv genutzten Objektfeldes OF in der Objektebene OS. Das Beleuchtungsfeld ist in der Regel schlitzförmig mit großem Aspektverhältnis zwischen Breite und Höhe.

[0069] In der Objektebene OS ist bei Betrieb der Anlage eine reflektive Maske M angeordnet. Das Projektionsobjektiv PO weist hier sechs Spiegel M1 bis M6 auf und bildet das Muster der Maske in verkleinerndem Maßstab in die Bildebene ab, in der das zu belichtendes Substrat, z.B. ein Halbleiterwafer, angeordnet ist.

[0070] Die Mischeinheit MIX besteht im Wesentlichen aus zwei Facettenspiegeln FAC1, FAC2. Der erste Facettenspiegel FAC1 ist in einer Ebene des Beleuchtungssystems angeordnet, die zur Objektebene OS optisch konjugiert ist. Er wird daher auch als Feldfacettenspiegel bezeichnet. Der zweite Facettenspiegel FAC2 ist in einer Pupillenebene des Beleuchtungssystems angeordnet, die zu einer Pupillenebene des Projektionsobjektivs optisch konjugiert ist. Er wird daher auch als Pupillenfacettenspiegel bezeichnet.

[0071] Mit Hilfe des Pupillenfacettenspiegels FAC2 und der im Strahlengang nachgeschalteten abbildenden optischen Baugruppe, die die Teleskopoptik TO und den mit streifenden Einfall (grazing incidence) betriebenen feldformenden Spiegel FFM umfasst, werden die einzelnen spiegelnden Facetten (Einzelspiegel) des ersten Facettenspiegels FAC1 in das Objektfeld abgebildet.

[0072] Die räumliche (örtliche) Beleuchtungsintensitätsverteilung am Feldfacettenspiegel FAC1 bestimmt die örtliche Beleuchtungsintensitätsverteilung im Objektfeld. Die räumliche (örtliche) Beleuchtungsintensitätsverteilung am Pupillenfacettenspiegel FAC2 bestimmt die Beleuchtungswinkelintensitätsverteilung im Objektfeld OF.

[0073] Eine Einrichtung RST zum Halten und Manipulieren der Maske M (Retikel) ist so angeordnet, dass das an der Maske angeordnete Muster PAT in der Objektebene OS des Projektionsobjektives PO liegt, welche hier auch als Retikelebene bezeichnet wird. Die Maske ist in dieser Ebene zum Scannerbetrieb in einer Scan-Richtung (y-Richtung) senkrecht zur Referenzachse AX des Projektionsobjektivs (z-Richtung) mit Hilfe eines Scanantriebs SCM bewegbar.

[0074] Das zu belichtende Substrat W wird durch eine Einrichtung WST gehalten, die einen Scannerantrieb SCW umfasst, um das Substrat synchron mit der Maske M senkrecht zur Referenzachse AX in einer Scanrichtung (y-Richtung) zu bewegen. Je nach Auslegung des Projektionsobjektivs PO können diese Bewegungen von Maske und Substrat zueinander parallel oder gegenparallel erfolgen.

[0075] Die Einrichtung WST, die auch als „Waferstage“ bezeichnet wird, sowie die Einrichtung RST, die auch als „Retikelstage“ bezeichnet wird, sind Bestandteil einer Scannereinrichtung, die über eine Scan-Steuereinrichtung gesteuert wird, welche bei der Ausführungsform in die zentrale Steuereinrichtung CU der Projektionsbelichtungsanlage integriert ist.

[0076] Alle optischen Komponenten der Projektionsbelichtungsanlage WSC sind in einem evakuierbaren Gehäuse H untergebracht. Der Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage erfolgt unter Vakuum.

[0077] EUV-Projektionsbelichtungsanlagen mit ähnlichem Grundaufbau sind z.B. aus der WO 2009/100856 A1 oder WO 2010/049020 A1 bekannt, deren Offenbarung durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht wird.

[0078] Die Maske M hat ein Maskensubstrat MS mit einer strukturierten, makroskopisch im Wesentlichen ebenen Vorderseite. An der Vorderseite befindet sich eine für EUV-Strahlung reflektierende Mehrlagen-Schichtanordnung, die z.B. abwechselnde Lagen aus Molybdän und Silizium oder Ruthenium und Silizium enthält. Das Muster PAT der Maske wird durch eine oder mehrere strukturierte Absorberschichten gebildet, die z.B. aus einem Tantal-basierten Absorbermaterial bestehe können. Im dargestellten eingebauten Im Betriebszustand ist die Vorderseite dem Beleuchtungssystem ILL und dem Projektionsobjektiv PO derart zugewandt, dass die vom Beleuchtungssystem bereitgestellte Beleuchtungsstrahlung ILR schräg, d.h. in einem von Null verschiedenen Winkel zur Flächennormale der Vorderseite, auf das Muster trifft, durch das Muster verändert wird und dann als Projektionsstrahlung PR schräg in das Projektionsobjektiv PO eingestrahlt wird.

[0079] Die Projektionsbelichtungsanlage ist mit einem System zur Anpassung des Abbildungsverhaltens des Projektionsobjektivs PO an einen spezifischen Nutzungsfall bzw. Nutzerfall („user case“) ausgestattet, welches es dem Projektionsobjektiv ermöglicht, seine Abbildungseigenschaften innerhalb gewisser, durch die Konstruktion vorgegebener Grenzen automatisch bzw. selbsttätig so an einen spezifischen Nutzungfall anzupassen, dass für den spezifischen Nutzungsfall optimierte Abbildungseigenschaften erreicht werden. Hierfür sind Einrichtungen zum Ermitteln von für den Nutzungsfall spezifischen Nutzungsfall-Daten vorgesehen, die der internen und externen Datenakquise für einen spezifischen Nutzungsfall dienen. Mit Hilfe der Nutzungsfall-Daten werden durch entsprechende Einrichtungen dann Abbildungsspezifikationsdaten ermittelt, die das für den Nutzungsfall günstige Abbildungsverhalten des Projektionsobjektivs spezifizieren. Das Projektionsobjektiv ist mit steuerbaren optischen Komponenten ausgestattet, die auf Basis der Abbildungsspezifikationsdaten mit Hilfe der dem Projektionsobjektiv zugeordneten Steuereinrichtung CU angesteuert werden können, um die Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs zu verändern und an den Nutzungsfall anzupassen (vgl. **Fig.** 1B).

[0080] Informationen über einen spezifischen Nutzungsfall können grundsätzlich durch intrinsische Datenakquisition und/oder durch extrinsische Datenakquisition ermittelt werden. Die intrinsische Datenakquisition nutzt im Wesentlichen Daten, die an Komponenten der Projektionsbelichtungsanlage direkt oder indirekt mit Hilfe geeigneter Messsysteme ermittelt werden können. Durch extrinsische Datenakquisition können beispielsweise Daten von einem Nutzer über eine Nutzerschnittstelle abgefragt werden. Es ist auch möglich, einen Teil relevanter Daten aus entsprechenden Speichern abzurufen, welche Informationen über das Beleuchtungssystem, das Projektionsobjektiv und/oder das für den Nutzungsfall vorgesehene Retikel enthalten.

[0081] Am Beispiel der Projektionsbelichtungsanlage in **Fig.** 1 sind einige dieser Systeme erläutert. Dabei ist wichtig festzuhalten, dass zur Durchführung der Anpassungen an den Nutzungsfall eventuell nur eines oder zwei bis drei der genannten Systeme an einer Projektionsbelichtungsanlage vorhanden sein sollten. Obwohl die verschiedenen Systeme an einem einzigen Ausführungsbeispiel beschrieben werden, ist für den Fachmann offensichtlich, dass einzelne Einrichtungen oder Gruppen von Einrichtungen optional als Alternative zu anderen Einrichtungen oder zusätzlich dazu vorgesehen sein können.

[0082] Ein System zur intrinsischen Datenakquise hat typischerweise eine Einheit IDA zur intrinsischen Datenakquise, an die ein oder mehrere Messund Erfassungseinrichtungen angeschlossen sein können. Ein Wellenfrontmesssystem WMS ist dafür eingerichtet, eine Messung der Wellenfront der Projektionsstrahlung vorzunehmen, die im Projektionsobjektiv von der Maske zum zu belichtenden Substrat verläuft. Vorzugsweise ist eine ortsauflösende Messung für mehrere Feldpunkte vorgesehen. Es können beispielsweise Wellenfrontmesssysteme der Art vorgesehen sein, die in US 7,333,216 A1 oder US 6,650,399 A1 beschrieben sind, deren Offenbarungsgehalt insoweit durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht wird.

[0083] Alternativ oder zusätzlich kann ein Retikelmesssystem RMS vorgesehen sein, das dafür eingerichtet ist, die Strukturen des Musters der Maske z.B. optisch zu messen und z.B. Informationen über die Kernbereichsstrukturen zu erfassen, insbesondere deren örtliche Lage innerhalb des Musters und Informationen zur Orientierung der Linien der Kernbereichsstruktur.

[0084] Ein Temperaturmesssystem MTS ist dafür eingerichtet, am zweiten Spiegel M2 ortsaufgelöst die lokalen Spiegeltemperaturen im beleuchteten Bereich zu erfassen und daraus eine zweidimensionale Temperaturverteilung an dieser als Referenzfläche dienenden Spiegelfläche zu ermitteln. Das Temperaturmesssystem kann z.B. eine Vielzahl von Temperatursensoren enthalten, die in einer zweidimensionalen Verteilung im Spiegelsubstrat in der Nähe der Mehrlagen-Reflexionsschicht angeordnet sind.

[0085] Alternativ oder zusätzlich kann mindestens eine Wärmebildkamera zur ortsauflösenden Aufnahme der Wärmeverteilung an einer Spiegeloberfläche vorgesehen sein. Beim dargestellten Beispielsfall wird mittels der Wärmebildkamera MWBK6 die Wärmeverteilung an der konkaven Spiegelfläche des sechsten Spiegels M6 und mittels der Wärmebildkamera MWBK4 die Wärmeverteilung an der konkaven Spiegelfläche des vierten Spiegels M4 ortsauflösend erfasst.

[0086] Wenn es sich bei dem zur Messung benutzten Spiegel um einen in der Nähe oder in einer Pupillenebene des Projektionsobjektivs (aslo „pupillennah“) angebrachten Spiegel handelt, so können daraus relevante Informationen über das gewählte Beleuchtungssetting abgeleitet werden. Im Falle eines feldnah angeordneten Spiegels können gegebenenfalls Informationen über die Lage von Kernbereichsstrukturen innerhalb des Musters abgeleitet werden.

[0087] Im Beispielsfall der **Fig.** 1A (und **Fig.** 1B) sind der erste Spiegel M1 und der vierte Spiegel M4 jeweils in optischen Nähe einer Feldebene, also „feldnah“ angeordnet, wobei das Subaperturverhältnis SAR bei M1 ca. 0.3 und bei M4 ca. 0.15 beträgt. Der zweite Spiegel M2 und der sechste Spiegel M6 sind dagegen jeweils in optischen Nähe einer Pupilleneben, also „pupillennah“ angeordnet, wobei das Subaperturverhältnis SAR bei M2 ca. 0.8 und bei M6 ca. 0.9 beträgt.

[0088] Im Beispiel in **Fig.** 1B werden zwei pupillennahe Spiegel (M2 und M6) bezüglich der Thermalverteilung überwacht. Durch Vergleich und Verrechnung der jeweiligen Messergebnisse können Messfehler reduziert werden. In der Regel reicht es, wenn für jeden Typ (feldnah und pupillennah) jeweils nur eine optische Fläche messtechnisch erfasst wird.

[0089] Um Aufschluss über das jeweils eingestellte Beleuchtungssetting zu erhalten, werden durch das System zur intrinsischen Datenakquisition auch die Spiegelstellungen des ersten Facettenspiegels FAC1 (Feldfacettenspiegel) und des zweiten Facettenspiegels FAC2 (Pupillenfacettenspiegel) erfasst, um insbesondere die örtliche Beleuchtungsintensitätsverteilung im Objektfeld (am Retikel) zu ermitteln.

[0090] Ein System zur externen Datenakquisition hat eine an Einheit EDA zur externen Datenakquisition, an die wiederum eine oder mehrere Komponenten angeschlossen sein können. Ein Computerterminal CT dient zur Eingabe von Daten durch einen Benutzer. Eine Retikeldaten-Erfassungseinrichtung RB-CS kann beispielsweise einen Retikelbarcodescanner und/oder einen RFID-Empfänger enthalten, um mit Hilfe der erfassten Identifikationsdaten des Retikels aus einer Retikeldatenbank relevante Informationen über das Retikel, insbesondere über das am Retikel angebrachte Muster, zu erhalten. Eine angeschlossene Datenbank D erlaubt Zugriff auf abgespeicherte Nutzungsfalldaten.

[0091] Die Einheit IDA zur intrinsischen Datenakquisition und die Einheit EDA zur extrinsischen Datenakquisition sind mit der Steuereinrichtung CU der Projektionsbelichtungsanlage sowie dem daran angeschlossenen zentralen Datenspeicher DS verbunden und können mit diesen Daten austauschen.

[0092] Das Projektionsobjektiv umfasst ein Manipulationssystem mit einer Vielzahl von Manipulatoren, die es ermöglichen, die Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs auf Basis von Steuersignalen der Steuereinheit CU in definierter Weise zu verändern. Der Begriff „Manipulator“ bezeichnet hierbei unter anderem optomechanische Einrichtungen, die dafür eingerichtet sind, aufgrund entsprechender Steuersignale auf einzelne optische Elemente oder Gruppen von optischen Elementen aktiv einzuwirken, um deren optische Wirkung zu verändern. In der Regel werden Manipulatoren so eingestellt, dass messtechnisch erfasste Abbildungsfehler in gezielter Weise reduziert werden können. Häufig sind auch Manipulatoren vorgesehen, um die Maske oder das Substrat beispielsweise zu verlagern, zu verkippen und/oder zu deformieren. Ein Manipulator kann z.B. ausgelegt sein für eine Dezentrierung eines optischen Elements entlang einer Referenzachse oder senkrecht dazu oder für eine Verkippung eines optischen Elementes. In diesem Fall bewirken die Manipulatoren Starrkörperbewegungen optischer Elemente. Es ist auch möglich, ein optisches Element mit Hilfe eines thermischen Manipulators lokal oder global aufzuheizen oder abzukühlen und/oder eine Deformation eines optischen Elements einzuführen. Ein Manipulator enthält dazu ein oder mehrere Stellglieder bzw. Aktoren, deren aktueller Stellwert aufgrund von Steuer-

signalen des Steuersystems geändert bzw. verstellt werden kann.

[0093] In **Fig.** 1B ist beispielhaft ein System von Manipulatoren MAN1 bis MAN6 gezeigt, die den Spiegeln M1 bis M6 des Projektionsobjektivs PO zugeordnet und jeweils an die Steuereinheit CU angeschlossen sind. Jeder der Manipulatoren MAN1 bis MAN6 erlaubt Starrkörperbewegungen des zugehörigen Spiegels, insbesondere also eine Verkippung, eine Verlagerung parallel zur Referenzachse AX und/oder eine Verlagerung senkrecht zur Referenzachse AX. Der zum zweiten Spiegel M2 (optisch in der Nähe einer Pupille, SAR ca. 0.8) gehörende zweite Manipulator MAN2 ist ein Deformationsmanipulator mit einer Vielzahl von unabhängig ansteuerbaren Aktoren, die es erlauben, die Spiegelfläche des zweiten Spiegels eindimensional oder zweidimensional zu deformieren. Es kann sich beispielsweise um einen Thermalmanipulator (Spiegeldeformation über ungleichmäßige Aufheizung) oder um einen mechanischen Manipulator (Spiegeldeformation über mechanische Aktuierung) handeln.

[0094] Bei dem Ausführungsbeispiel von **Fig.** 1B ist ein System zur internen Datenakquisition vorgesehen, das es erlaubt, Informationen über den aktuellen Nutzungsfall aus den zweidimensionalen Intensitätsverteilungen der Projektionsstrahlung am ersten Spiegel M1 und am zweiten Spiegel M2 zu ermitteln. Die Spiegelfläche des ersten Spiegels M1 ist optisch relativ nah bei der Objektebene OS angeordnet und wird hier als „feldnaher Spiegel“ bezeichnet. Die Spiegelfläche des zweiten Spiegels M2 ist dagegen in oder sehr nahe der nächstliegenden Pupillenfläche angeordnet, die eine Fouriertransformierte Fläche zur Objektebene OS ist. Der zweite Spiegel M2 wird daher auch als „Pupillenspiegel“ bezeichnet.

[0095] Bei dem pupillennah angeordneten zweiten Spiegel M2 liegt das Subaperturverhältnis SAR im Bereich zwischen 0.7 und 1, nämlich bei ca. 0.8. Bei dem feldnah angeordneten ersten Spiegel M1 liegt das Subaperturverhältnis im Bereich zwischen 0 und 0.4, nämlich bei ca. 0.3.

[0096] Eine erste Wärmebildkamera MWBK1 ist in Bezug auf den ersten Spiegel M1 so angeordnet, dass ihr zweidimensionales Bildfeld den gesamten beleuchteten Bereich des ersten Spiegels erfasst, so dass damit eine zweidimensionale Temperaturverteilung am ersten Spiegel aufgenommen werden kann. Eine zweite Wärmebildkamera MWBK2 ist relativ zur Spiegelfläche des zweiten Spiegels M2 entsprechend angeordnet, um den gesamten beleuchteten Bereiche des Pupillenspiegels zu erfassen.

[0097] Im Folgenden wird erläutert, wie es auf Basis der mit diesen Einrichtungen erfassten zweidimensionalen Intensitätsverteilungen an einem feldnahen Spiegel und einem pupillennahen Spiegel möglich ist, Informationen über die laterale Verteilung von Kernbereichsstrukturen und Peripheriestrukturen im Muster PAT der Maske M zu erhalten.

[0098] Ein möglicher Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage wird allgemein im Zusammenhang mit den Flussdiagrammen in **Fig.** 2 und **Fig.** 3 erläutert. **Fig.** 2 zeigt dabei teilweise optionale Schritte vom Start ST vor oder nach Einbau eines neuen Retikels bis zum Abschluss der Vorbereitung für den Objektivstart (PREP). **Fig.** 3 zeigt teilweise optionale weitere Schritte zur Optimierung des Projektionsobjektivs während des Betriebs.

[0099] Im optionalen Schritt S1 werden Nutzungsfalldaten von einem Bediener über das Computerterminal CT eingegeben. Nutzungsfalldaten können auch aus der Datenbank D mit Zugriff auf abgespeicherte Nutzungsfalldaten ausgelesen werden. Sofern Nutzungsfalldaten über das Computerterminal CT eingegeben werden, können diese im zentralen Datenspeicher DS gespeichert werden.

[0100] Im optionalen Schritt S2 wird eine Retikelidentifikation über ein einzubauendes oder eingebautes Retikel z.B. mit Hilfe eines Barcode-Scanners oder eines RIFD-Empfängers vom Retikel eingelesen und entsprechende Retikelinformationen aus der Datenbank D ausgelesen. Hier können beispielsweise Informationen über Lage und Orientierung von Kernbereichsstrukturen hinterlegt sein. Falls über diesen Weg Information erfasst wird, wird diese im zentralen Datenspeicher DS abgelegt.

[0101] Sofern ein Retikelmesssystem RMS vorhanden ist und genutzt wird, kann im optionalen Schritt S3 mit Hilfe des Retikelmesssystems durch Vermessen des Musters Informationen beispielsweise über Lage und Orientierung von Kernbereichsstrukturen und Peripheriestrukturen ermittelt werden.

[0102] In den optionalen Schritten S4 und S5 kann durch entsprechende Sensoren am ersten Facettenspiegel FAC1 bzw. am zweiten Facettenspiegel FAC2 Informationen über das aktuell am Beleuchtungssystem eingestellte Beleuchtungssetting erfasst werden. Entsprechende Beleuchtungseinstellungsdaten können im Datenspeicher DS abgelegt werden.

[0103] Alle Schritte S1 bis S5 der externen Datenakquisition sind optional. Es ist möglich, dass ein oder mehrere der hierfür vorgesehenen Vorrichtungen an einer Projektionsbelichtungsanlage vorgesehen sind und genutzt werden. Andere Ausführungsformen haben andere oder keine Systeme zur externen Datenakquisition.

[0104] Diese vorgeschaltete Datenakquise ist zum Zeitpunkt DAK1 COMP abgeschlossen. Auf Basis der bis dahin vorhandenen Informationen berechnet die Steuereinheit CU im Schritt S6 Nutzungsfalldaten UCD und speichert diese im zentralen Datenspeicher DS. Auf Basis dieser Daten berechnet die Steuereinheit CU in Schritt S7 vorläufige Abbildungsspezifikationsdaten ASD und speichert diese im zentralen Datenspeicher DS. Die Projektionsbelichtungsanlage ist damit zum Zeitpunkt PREP auf einen Objektivstart vorbereitet.

[0105] Wenn das Retikel in der vorgegebenen Position eingebaut ist und das Beleuchtungssystem in Betrieb genommen ist, wird das Muster der Maske beleuchtet und die durch das Muster modifizierte Strahlung tritt als Projektionsstrahlung durch das Projektionsobjektiv hindurch zum Substrat W. In dieser Phase können mit Hilfe von Einrichtungen der internen Datenakquisition Informationen über den aktuellen Nutzungsfall erfasst werden (vgl. **Fig.** 3). Im Schritt S8 wird mit Hilfe des Temperaturmesssystems MTS die örtliche Verteilung der Temperatur am zweiten Spiegel M2 ermittelt. Alternativ oder zusätzlich kann in Schritt S9 mit Hilfe der Wärmebildkamera MWBK die örtliche Wärmeverteilung an der konkaven Spiegelfläche des sechsten Spiegels M6 ermittelt und entsprechende Daten erzeugt werden. Alternativ oder zusätzlich kann im Schritt S10 mit Hilfe des Wellenfrontmesssystems WMS die Wellenfront der durch das Projektionsobjektiv gelangenden Projektionsstrahlung z.B. in der Austrittspupille des Projektionsobjektivs für mehrere Feldpunkte vermessen werden. Jeder der Schritte S8 bis S10 ist optional, das Kürzel „A/O“ steht für „AND/OR“. Die auf diese Weise ermittelten Informationen über den Nutzungsfall werden im Schritt S11 von der Steuereinheit CU zur Berechnung eines Updates der Nutzungsfalldaten USD (UPD) verarbeitet. Diese werden im Schritt S12 im zentralen Datenspeicher S12 zur Verwendung für die weitere Steuerung gespeichert.

[0106] Die Steuereinheit CU berechnet in Schritt S13 Steuerdaten und Spezifikationen (Abbildungsspezifikationsdaten) für den Nutzungsfall, dessen Besonderheit in den vorhergehenden Schritten durch externe und interne Datenakquisition charakterisiert wurde. Nach einer Speicherung der entsprechenden Daten im zentralen Datenspeicher DS (Schritt S14) ermittelt die Steuereinheit auf Basis dieser Nutzungsfalldaten ein auf diese angepasstes Lens Model LM (Schritt S15). Die Steuerparameter dieses Lens Models werden in Schritt S16 im zentralen Datenspeicher DS gespeichert. In Schritt S17 wird nachfolgend das Lens Model durch die Steuereinheit CU aktiv geschaltet (CU ACT), so dass in Schritt S18 die Projektionsbelichtungsanlage nach einem Trigger (TRIGG) in Schritt S19 auf Basis des Lens Models betrieben werden kann, welches unter Verwendung von Nutzungsfalldaten an das spezifische Retikel und spezifischen Eigenschaften der Beleuchtung angepasst wurde.

[0107] Der Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage wird mit den auf diese Weise ermittelten Abbildungsspezifikationsdaten fortgesetzt. Der Begriff „Lens Model“ bezeichnet hierbei im Wesentlichen einen Projektionsbelichtungsanlagen-Steuerungsalgorithmus. Das Lens Model berechnet, wie auf Grund einer Messung (oder einer Vorhersage) die Manipulatoren nachgestellt werden müssen, und übermittelt entsprechende Steuerungsbefehle an die Manipulatorsteuereinheit. Die Abbildungsspezifikationsdaten bestimmen, wie das „Lens Model“ die Projektionsbelichtungsanlage steuern muss, um die nötigen Abbildungsspezifikationen zu erreichen.

[0108] Anhand der **Fig.** 4 bis **Fig.** 6 wird nun beispielhaft erläutert, auf welche Weise es bei einer Ausführungsform möglich ist, aus Temperaturverteilungsmessungen an einem feldnahen optischen Element und einem pupillennahen optischen Element sowie Informationen über das Beleuchtungssetting Rückschlüsse auf die Lage und Orientierung von Kernbereichsstrukturen sowie Lage und Orientierung von Peripheriestrukturen zu erhalten, die es ermöglichen, das Projektionsobjektiv exakt auf den aktuellen Nutzungsfall zu adaptieren.

[0109] Die hierfür zu erfassenden Nutzungsfalldaten bestehen im Wesentlichen aus Musterdaten und Beleuchtungseinstellungsdaten. Musterdaten beschreiben das abzubildende Retikel bzw. dessen Muster hinsichtlich der Frage, an welchen Feldpunkten welche Abbildungsqualität benötigt wird. Dort, wo dichte Linien abgebildet werden müssen, muss eine höhere Abbildungsqualität vorliegen als dort, wo weniger dichte Linien in größerem Abstand abgebildet werden müssen. Es wird demnach als zweckmäßig angesehen, dass die Musterdaten Informationen über diejenigen Bereiche enthalten, wo hohe Abbildungsqualität benötigt wird (Kernbereichsstrukturdaten) und über diejenigen Bereiche, wo eine weniger hohe Abbildungsqualität ausreichend ist (Peripheriestrukturdaten). Zu den Kernbereichsstrukturdaten gehören Kernbereichsstruktur-Orientierungsdaten, die eine Orientierung von Linien einer Kernbereichsstruktur des Musters repräsentieren, sowie Kernbereichsstrukturen-Positionsdaten, die eine Position von Linien einer Kernbereichsstruktur innerhalb eines Musters repräsentieren. Entsprechend umfassen Peripheriestrukturdaten sogenannte Peripheriestruktur-Orientierungsdaten, die die Orientierungen von Linien des Musters repräsentieren, welche nicht zu den Kernbereichsstrukturen innerhalb des Musters gehören, sowie Peripheriestruktur-Positionsdaten, die Positionen derartige Linien innerhalb des Musters repräsentieren.

[0110] Wenn keine detaillierten unmittelbaren Informationen über das abzubildende Retikel vorliegen oder ermittelt werden können, ist es in der Regel möglich, mit Hilfe von Beleuchtungseinstellungsdaten auf grundlegende Eigenschaften des abzubildenden Musters zu schließen. Beleuchtungseinstellungsdaten umfassen insbesondere Informationen über das eingestellte Beleuchtungssetting, also über die Beleuchtungsintensitätsverteilung in der Pupillenebene des Beleuchtungssystems, die auch als Beleuchtungspupille bezeichnet wird. Hierzu gehören beispielsweise x-Dipol, y-Dipol, Quadrupol oder eine Freiformpupille, d.h. eine Beleuchtungsintensitätsverteilung, die keine niedrige Symmetrie aufweist und beispielsweise unsymmetrisch sein kann.

[0111] Die **Fig.** 4 bis **Fig.** 6 zeigen einige Beispiele, die geeignet sind, das Grundprinzip zu erläutern.

[0112] Im Fall von **Fig.** 4 wurde am Beleuchtungssystem ein x-Dipol eingestellt, der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Verbindungslinie zwischen den diametral zum Zentral der Beleuchtungspupille gegenüberliegenden Pole P1, P2 in x-Richtung verläuft. Nutzer stellen eine derartige Beleuchtungsintensitätsverteilung üblicherweise ein, wenn Kernbereichsstrukturen CO abgebildet werden sollen, deren Linien parallel zur y-Richtung, also senkrecht zur Verbindungslinie der Pole verläuft (**Fig.** 4B). Zum Vergleich sind in **Fig.** 4C Peripheriestrukturen PE gezeigt, deren Linien parallel zur x-Richtung verlaufen. Die korrespondierenden Beleuchtungsintensitätsverteilungen sind darunter in den **Fig.** 4D (Kernbereichsstrukturen) und **Fig.** 4E gezeigt. Die Intensitätsverteilung in der Pupille PUP des Projektionsobjektivs wird von der Intensitätsverteilung in der Pupille des Beleuchtungssystems (**Fig.** 4A) bestimmt und enthält Informationen über die Beugung an den Strukturen des Musters. Für die Kernbereichsstrukturen CO ergeben sich in x-Richtung diametral gegenüberliegende Pole (durchgezogene Linie). In den beleuchteten Bereichen stellt sich eine lokale Erwärmung der Spiegeloberfläche ein, die mit Hilfe der zugeordneten Wärmebildkamera erfasst werden kann. Die gestrichelten Linien deuten den Effekt der zeitabhängigen Wärmeverteilung an, die zu einer lateralen Verschmierung der aufgewärmten Bereiche führt. Die senkrecht zu den Linien der Kernbereichsstruktur ausgerichteten Linien der Peripheriestruktur erzeugen Beugung in y-Richtung, die entsprechende Beugung führt zur Aufspaltung der Pole in y-Richtung, so dass sich in der Pupille des Projektionsobjektivs vier Bereiche bevorzugter Erwärmung ergeben. Die schraffierten Bereiche stellen dabei die Lage der Beugungsordnungen für die Peripheriestrukturen dar, die Pole ohne Schraffierung repräsentieren deren Änderung für geringere Linienbreiten. Es ist ersichtlich, dass schon die Information über die Beleuchtungsintensitätsverteilung in der Pupille des Projektionsobjektivs (z.B. am zweiten Spiegel M2) Rückschlüsse auf Kernbereichsstrukturdaten und Peripheriestrukturdaten ermöglichen.

[0113] In **Fig.** 5 sind verschiedene Kernbereichs- und Peripheriestrukturen und Kombinationen davon in Verbindung mit den zugehörigen Wärmeverteilungen an einem feldnah positionierten optischen Element bei einem x-Dipol-Beleuchtungssetting (**Fig.** 5A) gezeigt. Die Kernbereichsstrukturen CO verlaufen jeweils senkrecht zur Verbindungslinie zwischen den Polen P1, P2, die Peripheriestrukturen senkrecht dazu. In den Bildern der Thermalverteilung (**Fig.** 5D, **Fig.** 5E, **Fig.** 5H, **Fig.** 5I) haben die hell umrandeten Bereiche T2 eine höhere Temperatur als die daneben liegenden grauen Bereiche T1. Es ist erkennbar, dass bei denjenigen Mustern (**Fig.** 5F, **Fig.** 5G), bei denen Kernbereichsstrukturen CO und Peripheriestrukturen PE in x-Richtung nebeneinander liegen, anhand der Wärmeverteilung an einem feldnahen optischen Element (**Fig.** 5H, **Fig.** 5I) erkennbar ist, auf welcher Seite die dichteren Kernbereichsstrukturen liegen. Somit sind mit Hilfe von feldnah erfassten Temperaturverteilungen Kernbereichsstruktur-Positionsdaten und Peripheriestruktur-Positionsdaten zusätzlich zu den entsprechenden Orientierungsdaten erhältlich.

[0114] **Fig.** 6 zeigt eine der **Fig.** 5 entsprechende Darstellung für den Fall, dass die Linien der Kernbereichsstrukturen in x-Richtung und diejenigen der Peripheriestrukturen in y-Richtung verlaufen. Derartige Strukturen werden zweckmäßig mit y-Dipolbeleuchtung (**Fig.** 6A) beleuchtet, um die Zweistrahlinterferenz für die dichteren Kernbereichsstrukturen zu nutzen. Auch hier ist durch **Fig.** 6F bis **Fig.** 6I ersichtlich, dass durch Erfassung der Wärmeverteilung an einem feldnahen optischen Element nicht nur Informationen über die Orientierung von Kernbereichsstrukturen und Peripheriestrukturen erhältlich sind, sondern auch über deren relative Positionen im Muster der Maske.

[0115] Die mit Hilfe der Wärmebildkameras MWBK1, MWBK2 erfassten Intensitätsverteilungen werden mit Mitteln der Bildverarbeitung in entsprechende Kernbereichsstrukturdaten und Peripheriestrukturdaten umgerechnet. Hierzu können Verfahren der Mustererkennung und/oder der Merkmalsextraktion in den Auswertealgorithmen genutzt werden. Die erfassten Intensitätsverteilungen können auch mit Standard-Intensitätsverteilungen verglichen werden, die in Form von Nutzungsfall-Klassifizierungsdaten in einem Speicher der Auswerteeinheit hinterlegt sind.

[0116] Aus den so ermittelten Nutzungsfalldaten werden dann in einem nächsten Schritt Abbildungsspezifikationsdaten ermittelt. Dabei wird berücksichtigt, dass an denjenigen Feldpunkten, an denen keine Kernbereichsstrukturen abgebildet werden müssen, lockere Spezifikationen (z.B. in Form von größeren

zulässigen Zernikes) gelten können als an denjenigen Feldpunkten, an denen Kernbereichsstrukturen abgebildet werden müssen.

[0117] Auch an denjenigen Feldpunkten, an denen Kernbereichsstrukturen abgebildet werden, müssen nicht alle Zernikes klein sein. Es kann beispielsweise ausreichen, wenn diejenigen Zernikes (bzw. Kombinationen von Zernikes, wie $\cos 30° \times Z_7 + \sin 30° \times Z_8$) klein sind, die in Richtung der abzubildenden dichtesten Linien der Kernbereichsstruktur orientiert sind. Andere Zernikes und andere Orientierungen dieser Zernikes (wie z.B. $\cos 60° \times Z_7 + \sin 60° \times Z_8$) können durchaus groß sein.

[0118] Bevorzugte Ausführungsformen wurden anhand von EUV-Projektionsbelichtungsanlagen und -verfahren erläutert. Die Nutzungsmöglichkeiten sind jedoch hierauf nicht beschränkt. Die Erfindung kann auch bei Projektionsbelichtungsanlagen und -verfahren genutzt werden, die Strahlung aus dem tiefen Ultraviolettbereich (DUV) oder Vakuumultraviolettbereich (VUV) nutzen, z.B. bei Wellenlängen von weniger als 260 nm, insbesondere bei ca. 193 nm. Das Beleuchtungssystem und das Projektionsobjektiv können dann refraktive optische Elemente, insbesondere Linsen, enthalten, ggf. in Kombination mit einem oder mehreren Spiegeln. Die Dokument WO 2004/019128 A2 und WO 2005/111689 A2 zeigen beispielhaft Projektionsbelichtungsanlagen mit katadioptrischen Projektionsobjektiven, die drei abbildende Objektivteile und entsprechend zwei Zwischenbilder aufweisen, wobei im zweiten Objektivteil ein Konkavspiegel im Bereich einer Pupillenebene angeordnet ist.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 8203696 B2 [0016]
- US 7333216 A1 [0041, 0082]
- US 6650399 A1 [0041, 0082]
- WO 2009/100856 A1 [0077]
- WO 2010/049020 A1 [0077]
- WO 2004/019128 A2 [0118]
- WO 2005/111689 [0118]

Patentansprüche

1. Projektionsbelichtungsverfahren zur Belichtung eines strahlungsempfindlichen Substrats mit mindestens einem Bild eines Musters mit folgenden Schritten:
Bereitstellen des Musters zwischen einem Beleuchtungssystem und einem Projektionsobjektiv einer Projektionsbelichtungsanlage derart, dass das Muster im Bereich einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordnet und mittels des Projektionsobjektivs in eine zur Objektebene optisch konjugierte Bildebene des Projektionsobjektivs abbildbar ist, wobei abbildungsrelevante Eigenschaften des Musters durch Musterdaten charakterisierbar sind;
Beleuchten eines Beleuchtungsbereichs des Musters mit einer von dem Beleuchtungssystem bereitgestellten Beleuchtungsstrahlung gemäß einer für einen Nutzungsfall spezifischen Beleuchtungseinstellung, die durch Beleuchtungseinstellungsdaten charakterisierbar ist;
gekennzeichnet durch:
Ermitteln von für den Nutzungsfall spezifischen Nutzungsfall-Daten, die Musterdaten und/oder Beleuchtungseinstellungsdaten umfassen;
Ermitteln von Abbildungsspezifikationsdaten unter Verwendung der Nutzungsfall-Daten;
Steuern von steuerbaren optischen Komponenten des Projektionsobjektivs durch eine Steuereinrichtung des Projektionsobjektivs in Abhängigkeit von den Abbildungsspezifikationsdaten zur Anpassung des Abbildungsverhaltens des Projektionsobjektivs an den Nutzungsfall;
Abbilden des Musters auf das Substrat mit Hilfe des an den Nutzungsfall angepassten Projektionsobjektivs.

2. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet,** dass mindestens ein Teil der Musterdaten und/oder der Beleuchtungseinstellungsdaten durch eine oder mehrere der Datenakquisition dienenden Messungen am Projektionsobjektiv ermittelt werden, wobei vorzugsweise alle für die Ermittlung der Abbildungsspezifikationsdaten erforderlichen Nutzungsfall-Daten durch eine Messung oder mehrere Messungen am Projektionsobjektiv ermittelt werden.

3. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Musterdaten zumindest Kernbereichsstrukturdaten umfassen, die quantitative Information über die Struktur von Kernbereichen enthalten, wobei Kernbereiche Bereiche mit dem kleinsten Linienabstand und/oder der kleinsten Periodizitätslänge einer Gruppe zueinander paralleler Linien in dem Muster sind und die Linien des Kernbereichs die Kernbereichsstruktur bilden.

4. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Musterdaten Kernbereichsstruktur-Orientierungsdaten umfassen, die eine Orientierung von Linien einer Kernbereichsstruktur des Musters repräsentieren.

5. 5 Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Kernbereichsstruktur-Orientierungsdaten aus Beleuchtungseinstellungsdaten abgeleitet werden, welche Informationen über die Orientierung der Pole einer am Beleuchtungssystem vom Nutzer eingestellten Dipolbeleuchtung enthalten.

6. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Musterdaten zusätzlich zu den Kernbereichs-Orientierungsdaten ein oder mehrere Daten ausgewählt aus der folgenden Gruppe umfassen:
Kernbereichsstruktur-Positionsdaten, die eine Position von Linien einer Kernbereichsstruktur innerhalb des Musters repräsentieren;
Peripheriebereichsstruktur-Orientierungsdaten, die eine Orientierung von Linien einer Peripheriestruktur des Musters repräsentieren;
Peripheriebereichsstruktur-Positionsdaten, die eine Position von Linien einer Peripheriestruktur innerhalb des Musters repräsentieren.

7. Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** dass Abbildungsspezifikationsdaten im Hinblick auf die Nutzungsfall-Daten in der Weise ermittelt werden, dass sich Abbildungsspezifikationsdaten von mindestens zwei Feldpunkten hinsichtlich mindestens einer Abbildungsspezifikation unterscheiden.

8. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet,** dass für eine Abbildungsspezifikation S_k ein Spezifikations-Verhältnis zwischen der Abbildungsspezifikation $S_k(FP_i)$ für einen ersten Feldpunkt im Kernbereich und der entsprechenden Abbildungsspezifikation $S_k(FP_j)$ für einen zweiten Feldpunkt im Peripheriebereich vom Wert 1 abweicht, so dass Bedingung

$$\max(S_k(FP_i)/S_k(FP_j), S_k(FP_j)/S_k(FP_i)) \geq \alpha$$

gilt, wobei $\alpha \geq 1.5$ ist.

9. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Abbildungsspezifikation S_k durch einen ungeradwelligen Zernike-Koeffizienten oder eine Linearkombination ungeradwelliger Zernike-Koeffizienten beschreibbar ist.

10. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 7, 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Abbildungsspezifikationsdaten ein oder mehrere Strukturdaten ausgewählt aus der folgenden Gruppe:

Kernbereichsstruktur-Orientierungsdaten, Kernbereichsstruktur-Positionsdaten, Peripheriestruktur-Orientierungsdaten, Peripheriestruktur-Positionsdaten dergestalt umfassen, dass es
zwei Feldpunkte gibt, deren Abbildungsspezifikationsdaten, insbesondere Wellenfrontspezifikationsdaten, sich in mindestens einem Aspekt unterscheiden und/oder
einen Feldpunkt gibt, in dem sich die Wellenfrontspezifikation für eine Wellenfront für eine n-wellige Wellenfrontentwicklungsfunktion in mindestens einem Aspekt von der um einen Winkel von 90°/n gedrehten Wellenfront unterscheidet, wobei die n-wellige Wellenfrontentwicklungsfunktion vorzugsweise ein n-welliger Zernike ist,
und dieser Unterschied auf die ausgewählten Strukturdaten rückführbar ist.

11. Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** dass mindestens eine Teilmenge von Nutzungsfall-Daten und/oder Abbildungsspezifikationsdaten für einen Nutzungsfall über eine extrinsische Datenakquisition ermittelt und an die Steuereinrichtung des Projektionsobjektivs übermittelt wird, wobei die extrinsische Datenakquisition mindestens eine Maßnahme aus der folgenden Gruppe umfasst:
Abfragen vom Nutzer über eine Nutzerschnittstelle;
Abrufen aus einem für eine Steuereinrichtung der Projektionsbelichtungsanlage zugänglichen Speicher;
Ermitteln aus Information zu Einstellungen an dem Beleuchtungssystem der Projektionsbelichtungsanlage;
Ermitteln aus Information über die zu belichtende Maske.

12. Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** dass mindestens eine Teilmenge von Nutzungsfall-Daten für einen Nutzungsfall über eine intrinsische Datenakquisition durch mindestens eine Messung am oder im Projektionsobjektiv ermittelt und an die Steuereinrichtung des Projektionsobjektivs übermittelt wird.

13. Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** dass das Ermitteln von Nutzungsfall-Daten ein automatisiertes Ermitteln von Projektionsstrahlungsdaten umfasst, die mindestens eine Eigenschaft der von der Objektebene in Richtung der Bildebene des Projektionsobjektivs verlaufenden Projektionsstrahlung repräsentieren.

14. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Ermittlung von Projektionsstrahlungsdaten eine Messung einer Wellenfront der Projektionsstrahlung an einem oder mehreren Feldpunkten umfasst.

15. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Ermittlung von Projektionsstrahlungsdaten eine Ermittlung von Intensitätsverteilungsdaten umfasst, die eine zweidimensionale Verteilung von Strahlungsintensität der Projektionsstrahlung an mindestens einer zwischen der Objektebene und der Bildebene im Projektionsstrahlengang liegenden Referenzfläche repräsentieren.

16. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet,** dass mindestens eine im Strahlengang des Projektionsobjektivs angeordnete optische Fläche eines optischen Elements als Referenzfläche genutzt wird.

17. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet,** dass das optische Element ein Spiegel und die optische Fläche eine Spiegelfläche ist.

18. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 15, 16 oder 17, **dadurch gekennzeichnet,** dass zur Ermittlung von Intensitätsverteilungsdaten eine zweidimensionale Temperaturverteilung an der Referenzfläche ortsaufgelöst gemessen wird.

19. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 18, **dadurch gekennzeichnet,** dass die zweidimensionale Temperaturverteilung mittels einer oder mehrerer Wärmebildkameras oder mittels einem oder mehrerer anderer Temperatursensoren erfasst wird.

20. Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 19, **dadurch gekennzeichnet,** dass erste Intensitätsverteilungsdaten an einer erste Referenzfläche ermittelt werden, die an oder in der Nähe einer Pupillenebene des Projektionsobjektivs liegt, und Beleuchtungseinstellungsdaten unter Verwendung der ersten Intensitätsverteilungsdaten ermittelt werden.

21. Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 20, **dadurch gekennzeichnet,** dass zweite Intensitätsverteilungsdaten an einer zweiten Referenzfläche ermittelt werden, die an oder in der Nähe einer Feldebene des Projektionsobjektivs liegt, und Musterdaten unter Verwendung der zweiten Intensitätsverteilungsdaten ermittelt werden.

22. Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 21, **dadurch gekennzeichnet,** dass eine erste Referenzfläche an oder in der Nähe einer Pupillenebene des Projektionsobjektivs und eine zweite Referenzfläche an oder in der Nähe einer Feldebene des Projektionsobjektivs angeordnet ist,
an der ersten Referenzfläche erste Intensitätsverteilungsdaten und an der zweiten Referenzfläche zweite Intensitätsverteilungsdaten ermittelt werden und

die Musterdaten und/oder Beleuchtungseinstellungsdaten unter Verwendung der ersten und der zweiten Intensitätsverteilungsdaten ermittelt werden.

23. Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** dass in einem durch eine Steuereinrichtung der Projektionsbelichtungsanlage zugänglichen Speicher Nutzungsfall-Klassifizierungsdaten gespeichert sind, die für eine Vielzahl von Kombinationen aus einer Beleuchtungseinstellung und einer Maskenstruktur im Beleuchtungsbereich korrespondierende Intensitätsverteilungsdaten für mindestens eine zwischen der Objektebene und der Bildebene liegenden Referenzfläche enthalten, wobei Projektionsstrahlungsdaten unter Verwendung der Nutzungsfall-Klassifizierungsdaten ermittelt werden.

24. Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** dass beim Ermitteln von Musterdaten und/oder Beleuchtungseinstellungsdaten aus den Projektionsstrahlungsdaten ein Mustererkennungsverfahren und/oder ein Merkmalsextraktionsverfahren verwendet wird.

25. Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch:
Vergleichen von ersten Nutzungsfall-Daten einer ersten Projektionsbelichtung mit zweiten Nutzungsfall-Daten einer unmittelbar folgenden zweiten Projektionsbelichtung zur Generierung von Nutzungsfall-Vergleichsdaten.

26. Projektionsbelichtungsverfahren nach Anspruch 25, **dadurch gekennzeichnet,** gekennzeichnet durch:
Generieren eines den Wechsel des Nutzungsfalls anzeigenden Nutzungsfall-Wechselsignals in Abhängigkeit von den Nutzungsfall-Vergleichsdaten.

27. Projektionsbelichtungsanlage (WSC) zur Belichtung eines strahlungsempfindlichen Substrates (W) mit mindestens einem Bild eines Musters einer Maske (M) mit:
einem Beleuchtungssystem (ILL) zum Empfang von Primärstrahlung einer primären Strahlungsquelle und zur Erzeugung einer auf die Maske (M) gerichteten Beleuchtungsstrahlung (ILR);
einem Projektionsobjektiv (PO) zur Erzeugung eines Bildes des Musters (PAT) im Bereich einer Bildebene (IS) des Projektionsobjektivs;
einer Maskenhalteeinrichtung (RST) zum Halten der Maske zwischen dem Beleuchtungssystem und dem Projektionsobjektiv derart, dass das Muster im Bereich einer Objektebene (OS) des Projektionsobjektivs angeordnet ist;
einer Substrathalteeinrichtung (WST) zum Halten des Substrats derart, dass eine strahlungsempfindliche Oberfläche des Substrats im Bereich der zur Objektebene optisch konjugierten Bildebene (IS) des Projektionsobjektivs angeordnet ist;
gekennzeichnet durch
ein System zur Anpassung des Abbildungsverhaltens des Projektionsobjektives an einen spezifischen Nutzungsfall, das System umfassend:
Einrichtungen zum Ermitteln von für den Nutzungsfall spezifischen Nutzungsfall-Daten (UCD),
Einrichtungen zum Ermitteln von Abbildungsspezifikationsdaten (ASD) unter Verwendung der Nutzungsfall-Daten sowie
eine dem Projektionsobjektiv zugeordnete Steuereinrichtung (CU), die so konfiguriert ist, dass steuerbare optische Komponenten des Projektionsobjektives durch die Steuereinrichtung in Abhängigkeit von den Abbildungsspezifikationsdaten steuerbar sind, um das Abbildungsverhalten des Projektionsobjektives (PO) an den Nutzungsfall anzupassen.

28. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 27, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Einrichtungen zum Ermitteln von Nutzungsfall-Daten ein System zur intrinsischen Datenakquisition aufweisen, das eine Einheit (IDA) zur intrinsischen Datenakquisition umfasst, die an eine oder mehrere Mess- und Erfassungseinrichtungen angeschlossen ist, die ausgewählt sind aus der Gruppe:
ein Wellenfrontmesssystem (WMS) zur Messung der Wellenfront von Projektionsstrahlung, die im Projektionsobjektiv von der Maske zum zu belichtenden Substrat verläuft;
ein Retikelmesssystem (RMS), das dafür eingerichtet ist, Strukturen des Musters der Maske zu messen;
eine Einrichtung zur Ermittlung von Intensitätverteilungsdaten, die eine zweidimensionale Verteilung von Strahlungsintensität der Projektionsstrahlung an mindestens einer zwischen der Objektebene und der Bildebene im Projektionsstrahlengang liegenden Referenzfläche repräsentieren.

29. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 28, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Einrichtung zur Ermittlung von Intensitätverteilungsdaten mindestens ein Element der folgenden Gruppe aufweist:
ein Temperaturmesssystem (MTS), das dafür eingerichtet ist, an einer als Referenzfläche dienenden optischen Oberfläche eines optischen Elements ortsaufgelöst lokale Temperaturen in einem beleuchteten Bereich zu erfassen und daraus eine zweidimensionale Temperaturverteilung an dieser optischen Oberfläche zu ermitteln;
eine Wärmebildkamera (MWBK) zur ortsauflösenden Aufnahme einer zweidimensionalen Wärmeverteilung an der als Referenzfläche dienenden optischen Oberfläche eines optischen Elements des Projektionsobjektivs.

30. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 28 oder 29, **dadurch gekennzeichnet,** dass das op-

tische Element mit der als Referenzfläche dienende optischen Oberfläche ein Spiegel ist.

31. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 28 bis 30, **dadurch gekennzeichnet,** dass das System zur intrinsischen Datenakquisition aufweist:
eine erste Einrichtung zur Ermittlung von ersten Intensitätsverteilungsdaten an einer ersten Referenzfläche, die an oder in der Nähe einer Pupillenebene des Projektionsobjektives liegt, und
eine zweite Einrichtung zur Ermittlung von zweiten Intensitätsverteilungsdaten an einer zweiten Referenzfläche, die an oder in der Nähe einer Feldebene des Projektionsobjektives liegt.

32. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 31, **dadurch gekennzeichnet,** dass ein Subaperturverhältnis SAR an der erste Referenzfläche im Bereich von 0.7 bis 1 und an der zweiten Referenzfläche im Bereich von 0 bis 0.3 liegt.

33. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 27 bis 32, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Einrichtungen zum Ermitteln von Nutzungsfall-Daten ein System zur extrinsischen Datenakquisition aufweisen, das eine Einheit (EDA) zur extrinsischen Datenakquisition umfasst, die an eine oder mehrere Einrichtungen angeschlossen ist, die ausgewählt sind aus der Gruppe:
eine Nutzerschnittstelle mit einem Computerterminal (CT) zur Eingabe von Daten durch einen Benutzer;
ein für die Steuereinrichtung zugänglichen Speicher (D), in dem mindestens ein Teil der Nutzungsfall-Daten in Form von Informationen über das Beleuchtungssystem, über das Projektionsobjektiv und/oder über das Retikel gespeichert ist;
eine Datenleitung, über die Information zu Einstellungen an dem Beleuchtungssystem (ILL) der Projektionsbelichtungsanlage abrufbar ist;
eine Retikeldaten-Erfassungseinrichtung (RBCS) zum Einlesen von Information zum Retikel.

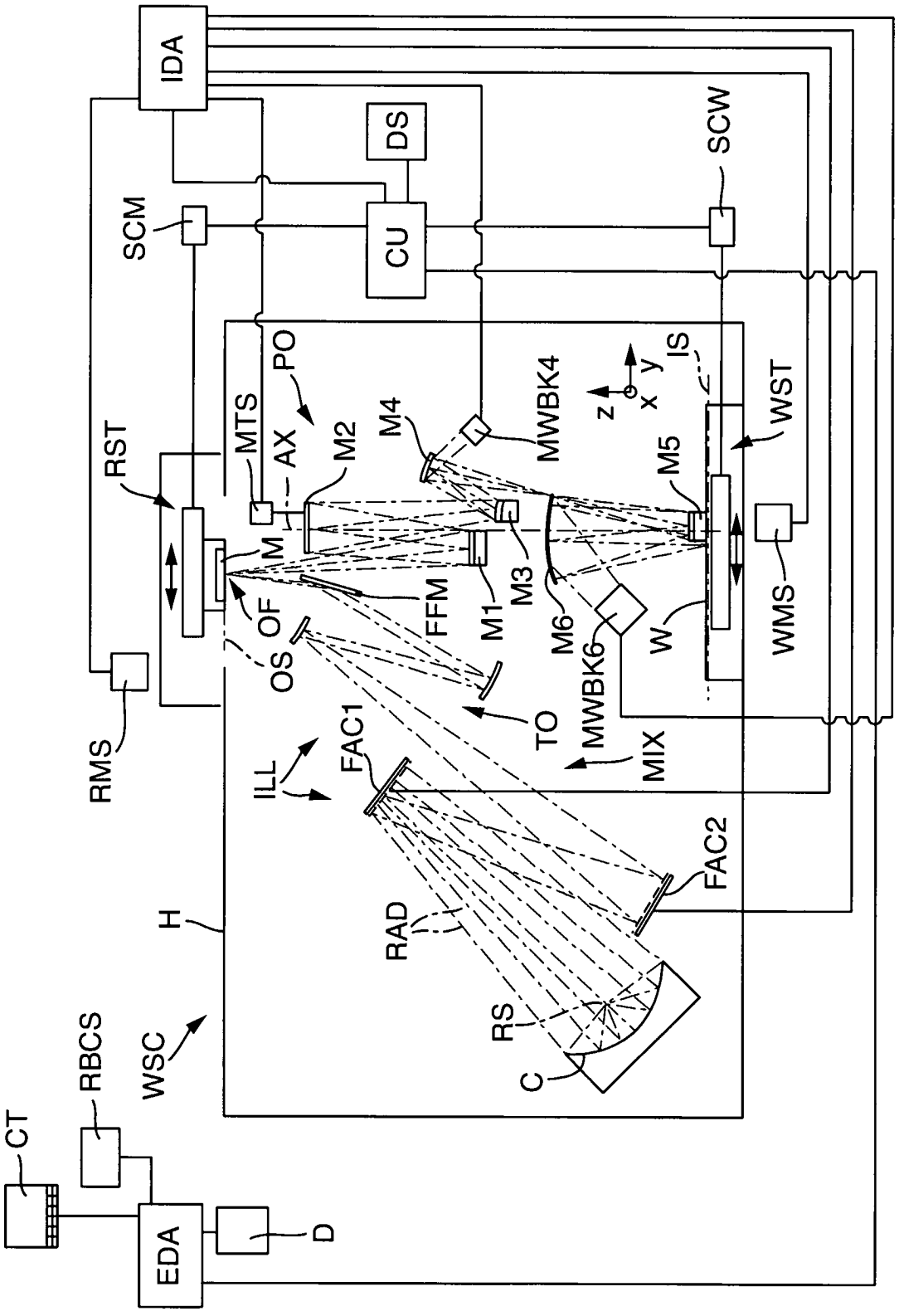
34. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 27 bis 32, **dadurch gekennzeichnet,** dass eine steuerbare optische Komponente des Projektionsobjektives ein an oder in der Nähe einer Pupillenfläche angeordneter Spiegel (M2) ist, dem ein Deformationsmanipulator (MAN2) mit einer Vielzahl von unabhängig ansteuerbaren Aktoren zugeordnet ist, die es erlauben, die Spiegelfläche des Spiegels eindimensional oder zweidimensional zu deformieren.

35. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 27 bis 34, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Projektionsbelichtungsanlage zur Durchführung des Projektionsbelichtungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 26 konfiguriert ist.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1A



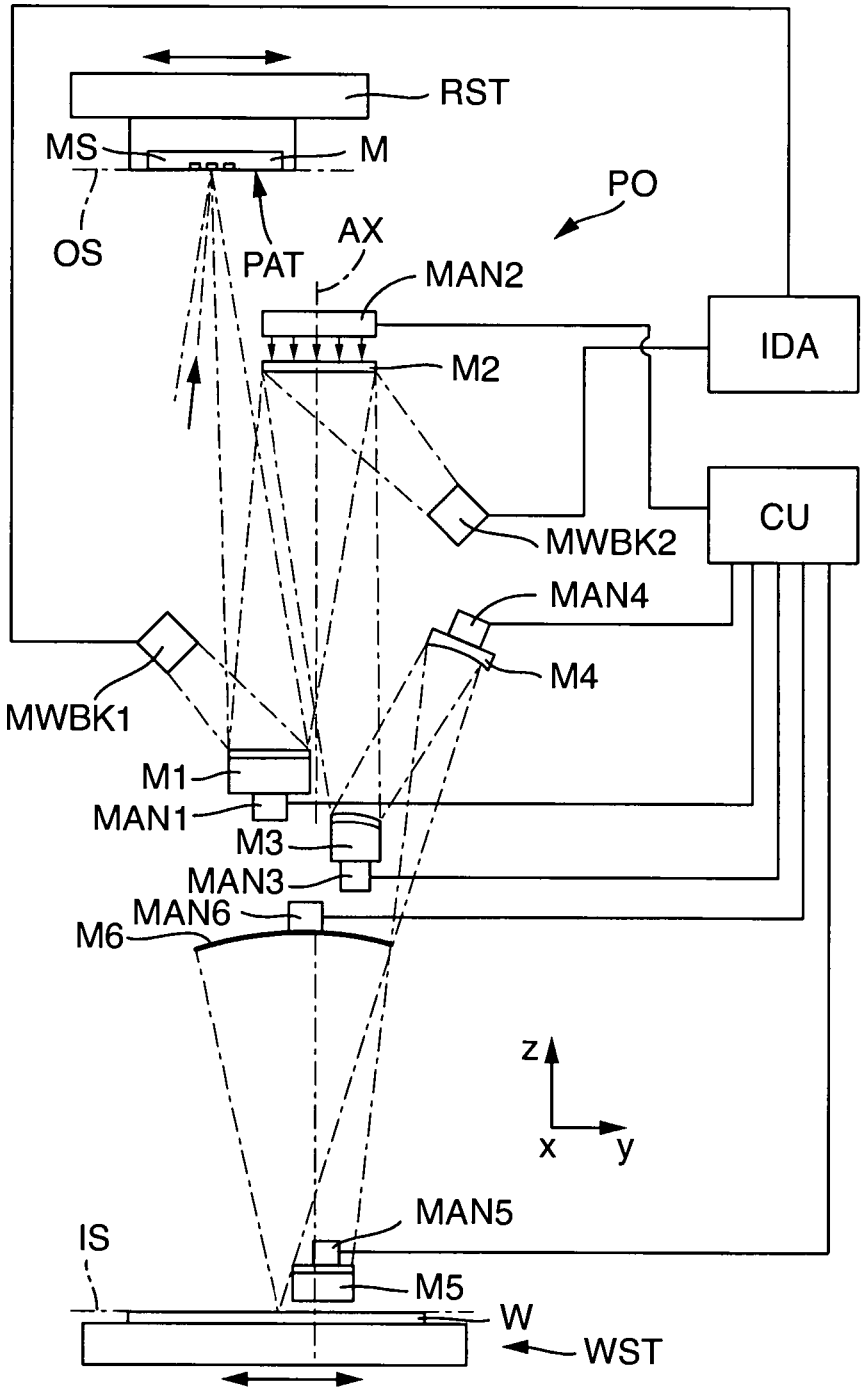

RST
MS
M
PO
OS
PAT
AX
MAN2
IDA
M2
CU
MWBK2
MAN4
M4
MWBK1
M1
MAN1
M3
MAN3
MAN6
M6
z
x
y
MAN5
IS
M5
W
WST

Fig. 1B

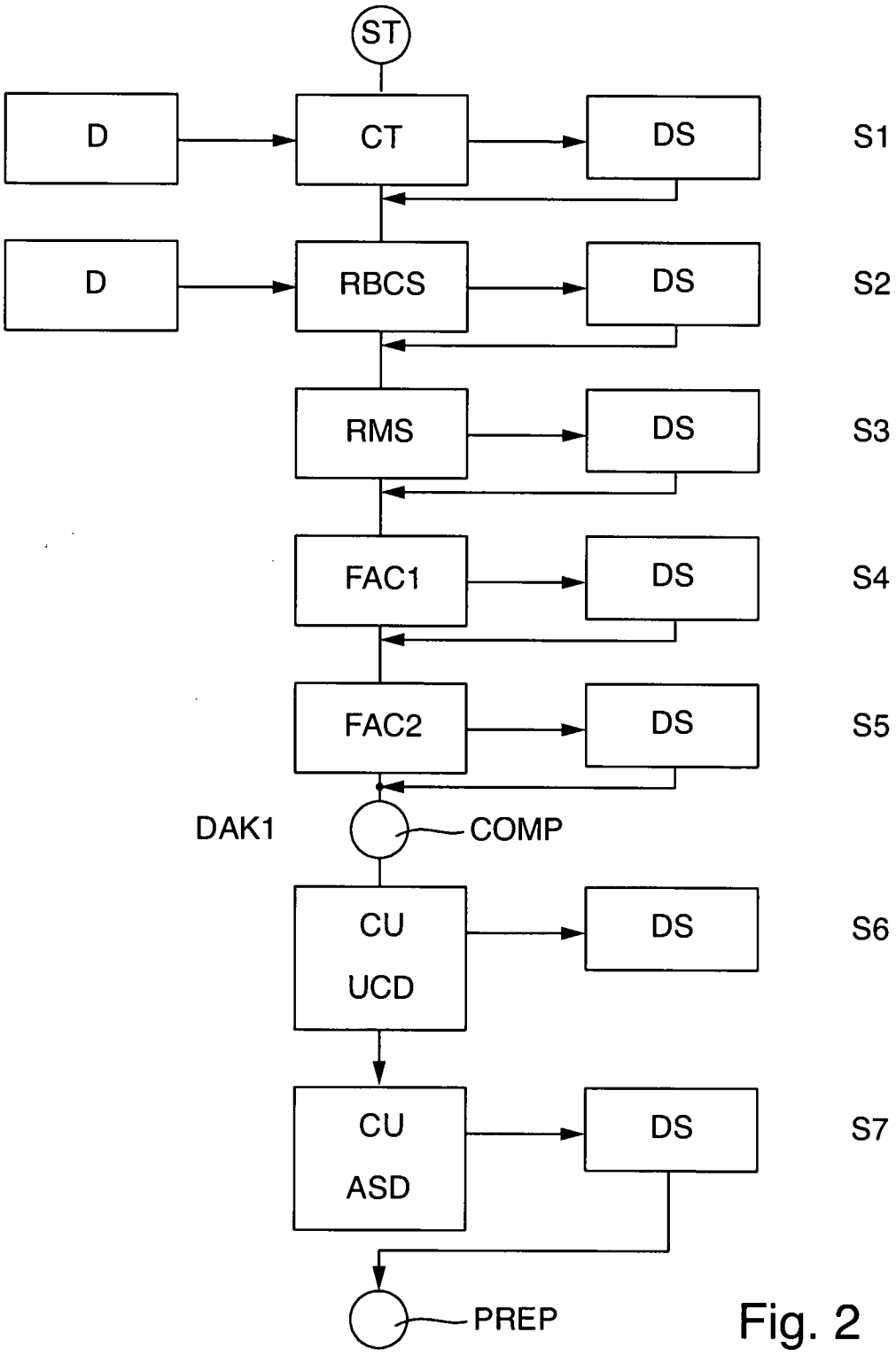

ST
D
CT
DS
S1
D
RBCS
DS
S2
RMS
DS
S3
FAC1
DS
S4
FAC2
DS
S5
DAK1
COMP
CU
UCD
DS
S6
CU
ASD
DS
S7
PREP

Fig. 2

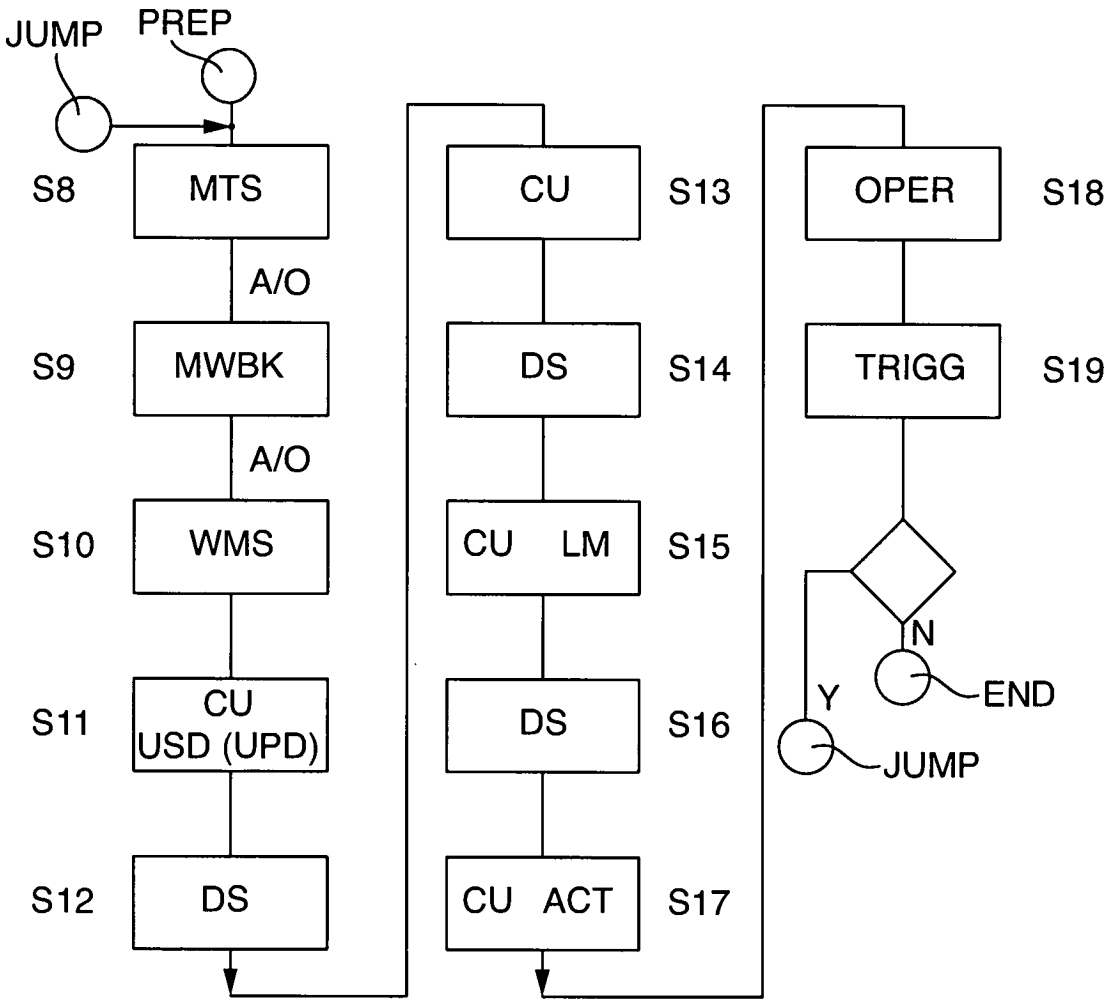

JUMP
PREP
S8
MTS
A/O
S9
MWBK
A/O
S10
WMS
S11
CU
USD (UPD)
S12
DS
CU
S13
DS
S14
CU LM
S15
DS
S16
CU ACT
S17
OPER
S18
TRIGG
S19
N
END
Y
JUMP

Fig. 3

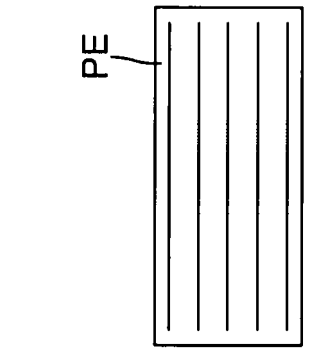


Fig. 4C

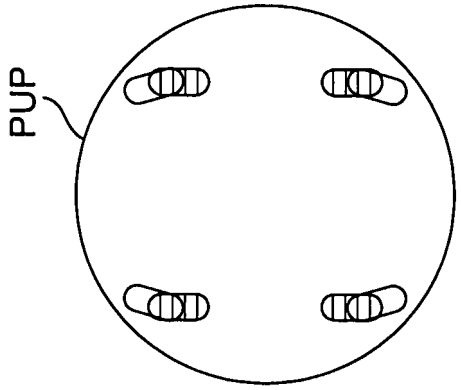


Fig. 4E

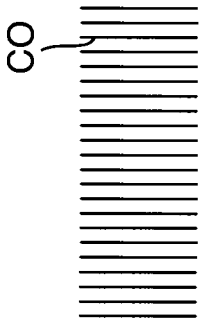


Fig. 4B

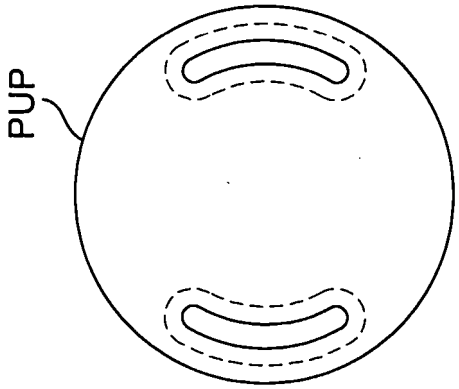


Fig. 4D

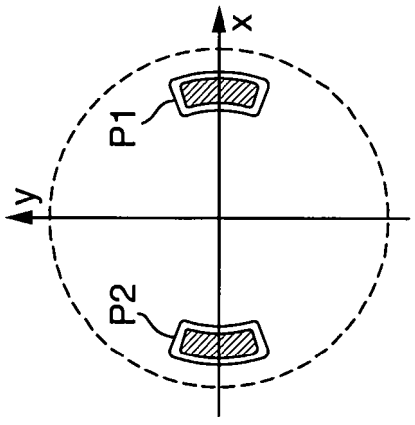


Fig. 4A

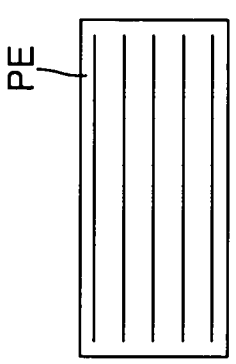


Fig. 5C

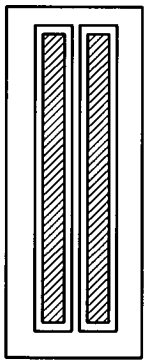


Fig. 5E

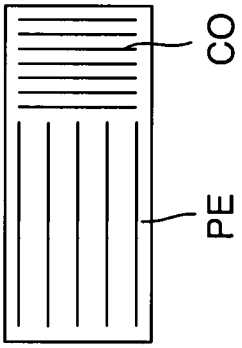


Fig. 5G

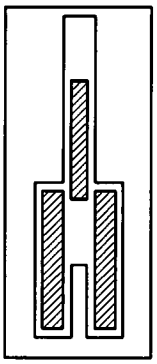


Fig. 5I

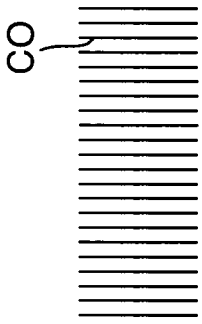


Fig. 5B

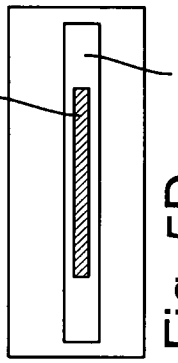


Fig. 5D

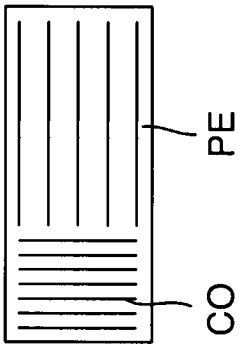


Fig. 5F

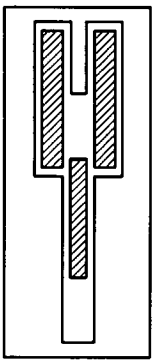


Fig. 5H

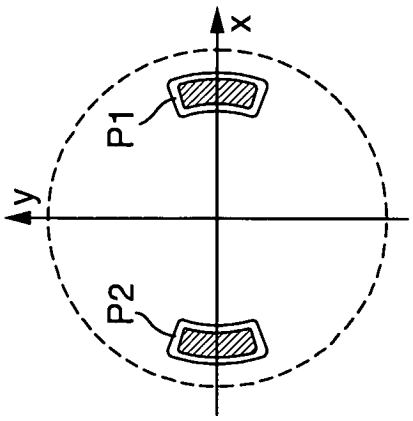


Fig. 5A

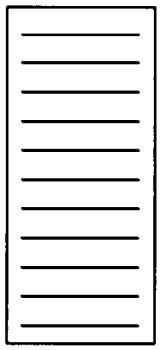


Fig. 6C

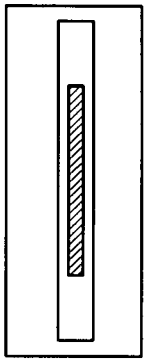


Fig. 6E

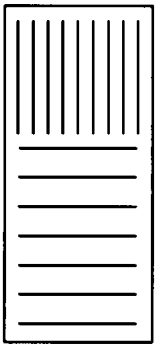


Fig. 6G

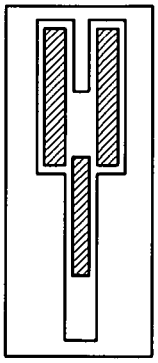


Fig. 6I

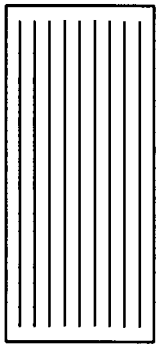


Fig. 6B

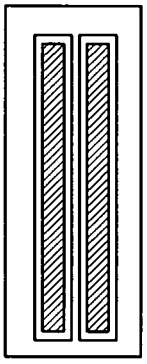


Fig. 6D

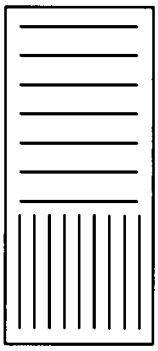


Fig. 6F

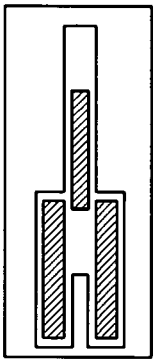


Fig. 6H

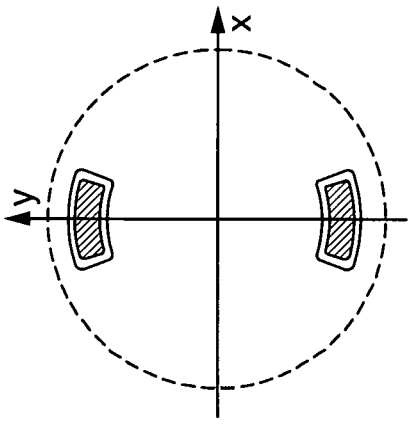


Fig. 6A