

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
02. Januar 2025 (02.01.2025)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2025/002947 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G03F 7/20 (2006.01) *G02B 5/08* (2006.01)
G01M 11/02 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2024/067117

(22) Internationales Anmeldedatum:
19. Juni 2024 (19.06.2024)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2023 206 062.0
27. Juni 2023 (27.06.2023) DE

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

(72) Erfinder: **HARMES, Robert**; Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE). **WAELDCHEN, Felix**; Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE). **LANGENHORST, Malte**; Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE). **WEISS, Werner**; Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(74) Anwalt: **KOHLER SCHMID MÖBUS PATENTANWÄLTE PARTNERSCHAFTSGESELLSCHAFT MBB**; Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR,

(54) Title: METHOD FOR REDUCING ABERRATIONS OF AN OPTICAL ELEMENT, OPTICAL ELEMENT AND SEMICONDUCTOR SYSTEM

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM VERRINGERN VON ABERRATIONEN EINES OPTISCHEN ELEMENTS, OPTISCHES ELEMENT UND ANLAGE DER HALBLEITERTECHNOLOGIE

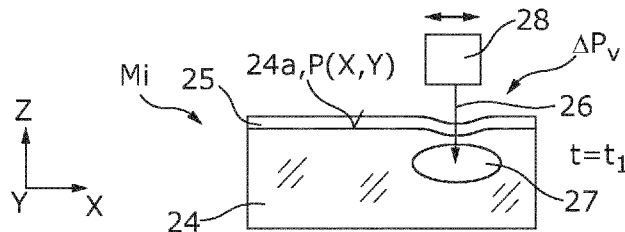


Fig. 2a

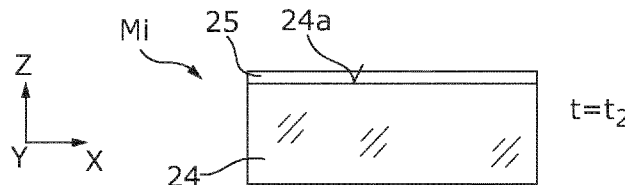


Fig. 2b

(57) **Abstract:** The invention relates to a method for reducing aberrations of an optical element (Mi), in particular an optical element (Mi) in a lithography system, comprising: determining a change over time of an optical property of the optical element (Mi) which is expected over the course of the service life of the optical element (Mi), in particular a change over time of a flatness ($P(x,y)$) of a surface (24a) of a substrate (24) of the optical element (Mi), wherein the change over time of the optical property causes aberrations which vary over the course of the service life (T) of the optical element (Mi), and reducing the aberrations which vary over the course of the service life of the optical element (Mi) by incorporating an allowance, in particular a flatness allowance (ΔP_V), which compensates at least for a portion of the total change over time of the optical property ($P(x,y)$) expected over the course of the service life. The invention also relates to an optical element (Mi) and to a semiconductor lithography system.

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verringern von Aberrationen eines optischen Elements (Mi), insbesondere eines optischen Elements (Mi) in einem Lithographiesystem, umfassend: Bestimmen einer über die Betriebsdauer des opti-



WO 2025/002947 A1

LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY,
MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST,
SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,
VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

schen Elements (Mi) zu erwartenden zeitlichen Veränderung einer optischen Eigenschaft des optischen Elements (Mi), insbesondere einer zeitlichen Veränderung einer Passe ($P(x,y)$) einer Oberfläche (24a) eines Substrats (24) des optischen Elements (Mi), wobei die zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer (T) des optischen Elements (Mi) variierende Aberrationen verursacht, sowie Verringern der über die Betriebsdauer des optischen Elements (Mi) variierenden Aberrationen durch Erzeugen eines Vorhalts, insbesondere eines Passe-Vorhalts (ΔPV), der zumindest einen Anteil der gesamten über die Betriebsdauer zu erwartenden zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft ($P(x,y)$) kompensiert. Die Erfindung betrifft auch ein optisches Element (Mi) sowie eine Anlage der Halbleiterlithographie.

Verfahren zum Verringern von Aberrationen eines optischen Elements,
optisches Element und Anlage der Halbleitertechnologie

Bezugnahme auf verwandte Anmeldung

Diese Anmeldung beansprucht die Priorität der deutschen Patentanmeldung DE102023206062.0 vom 27. Juni 2023, deren gesamter Offenbarungsgehalt durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird.

Hintergrund der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verringern von Aberrationen eines optischen Elements, insbesondere eines optischen Elements in einem Lithographiesystem, ein optisches Element, bevorzugt einen Spiegel, insbesondere einen EUV-Spiegel, sowie eine Anlage der Halbleitertechnologie mit mindestens einem solchen optischen Element.

Optische Elemente in Form von Linsen oder Spiegeln stellen die Kernelemente von Projektionsobjektiven dar, wie sie beispielsweise in der Mikrolithographie eingesetzt werden. Bei derartigen optischen Elementen steigen die Anforderungen an die Abbildungsqualität stetig und sorgen dafür, dass neue Prozesse und Materialien für die Herstellung dieser optischen Elemente entwickelt werden müssen. Durch verschiedene Effekte kann sich je nach verwendetem Material und angewandtem Prozess jedoch die Abbildungsqualität über die Lebensdauer bzw. der Betriebsdauer eines jeweiligen optischen Elements verschlechtern, d.h. die Aberrationen des optischen Elements nehmen über die Betriebsdauer des optischen Elements typischerweise irreversibel zu.

Es ist bekannt, Passfehler einer Oberfläche eines optischen Elements, d.h. Abweichungen einer Oberflächenform von einer Soll-Oberflächenform der Oberfläche, durch eine Oberflächenbearbeitung zu korrigieren.

Beispielsweise beschreibt die DE102018211596A1 ein Verfahren zur Herstellung eines reflektierenden optischen Elementes für eine Projektionsbelichtungsanlage, wobei das optische Element ein Substrat aufweist. Das Verfahren umfasst das Vermessen der Substratoberfläche, das Bestrahlen des Substrats mit Hilfe von Elektronen oder mit Photonen, sowie das Tempern des Substrats. Die Bestrahlung führt zu einer lokalen Kompaktierung des Substrats, die zur Korrektur von Oberflächenfehlern verwendet werden kann. Da das Tempern die bei der Bestrahlung erzeugte Kompaktierung teilweise wieder rückgängig macht, kann die Dekompaktierung durch das Tempern bereits bei der Kompaktierung im Schritt des Bestrahleins vorgehalten werden. Unter Verwendung eines solchen Vorhalts kann durch das Bestrahlen und das nachfolgende Tempern die Soll-Oberflächenform erreicht werden.

Das in der DE102018211596A1 beschriebene Verfahren kann auch dazu verwendet werden, einen Schutz des Substrats vor einer fortschreitenden Kompaktierung über die Lebensdauer des Substrats zu erzeugen, die durch Bestrahlung mit EUV-Strahlung im Betrieb des reflektierenden optischen Elements verursacht wird. Um diesen Schutz zu erreichen, wird die Bestrahlung bei der Herstellung des optischen Elements so lange durchgeführt, bis eine Sättigung der Kompaktierung erreicht ist, d.h. bis ein Zustand erreicht ist, in dem die Kompaktierung des Substrats bei einer weiteren Bestrahlung des Substrats nicht mehr oder nur noch vernachlässigbar zunimmt. Auf diese Weise können langfristig unzulässige Oberflächenverformungen und damit einhergehende Aberrationen aufgrund der Kompaktierung des Materials durch EUV-Strahlung verhindert werden.

Grundsätzlich können zeitlich veränderliche Aberrationen bzw. Bildfehler, die auf langen Zeitskalen auftreten, in zwei Klassen eingeteilt werden: Eine erste Klasse von Bildfehlern, welche sich dadurch auszeichnen, dass ihre zukünftige Größe nach einer konstanten Zeitdauer um einen nicht zu vernachlässigenden Wert anwächst, sowie eine zweite Klasse von Bildfehlern, welche nach Erreichen eines Schwellwerts nach jeder weiteren Zeitdauer nur noch um einen zu vernachlässigenden Wert anwächst. In der DE102012212758A1 wird vorgeschlagen, die beiden Klassen von Bildfehlern zeitlich parallel mit Hilfe von Manipulatoren des Projektionsobjektivs zu justieren. Die Ermittlung der ersten bzw. zweiten Bildfehler kann durch Messung oder durch Vorhersage aus einem Vorhersagemodell gewonnen werden.

Mit Hilfe von Manipulatoren lassen sich jedoch typischerweise nicht alle Aberrationen eines Projektionsobjektivs bzw. eines Lithographiesystems korrigieren, die über die Betriebsdauer der optischen Elemente entstehen.

Aufgabe der Erfindung

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Verringern von über die Betriebsdauer des optischen Elements variierenden Aberrationen, ein optisches Element und eine Anlage der Halbleitertechnologie mit mindestens einem solchen optischen Element bereitzustellen.

Gegenstand der Erfindung

Diese Aufgabe wird gemäß einem ersten Aspekt gelöst durch ein Verfahren zum Verringern von Aberrationen eines optischen Elements, umfassend: Bestimmen einer über die Betriebsdauer des optischen Elements zu erwartenden zeitlichen Veränderung einer optischen Eigenschaft des optischen Elements, insbesondere einer zeitlichen Veränderung einer Phase einer

Oberfläche eines Substrats des optischen Elements, wobei die zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer des optischen Elements variierende Aberrationen verursacht, sowie Verringern der über die Betriebsdauer des optischen Elements variierenden Aberrationen durch Erzeugen eines Vorhalts, insbesondere eines Passe-Vorhalts, der zumindest einen Anteil der gesamten über die Betriebsdauer zu erwartenden zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft kompensiert.

Bei dem hier beschriebenen Verfahren wird zunächst die über die Betriebsdauer des optischen Elements zu erwartende zeitliche Veränderung einer optischen Eigenschaft des optischen Elements bestimmt. Bei der optischen Eigenschaft kann es sich beispielsweise um die weiter oben beschriebene Passe bzw. Oberflächenform des optischen Elements handeln, es kann sich bei der zeitlichen Veränderung – insbesondere bei optischen Elementen in Form von Linsen – aber auch um eine zeitliche Veränderung der Brechzahl oder um eine zeitliche Veränderung der Spannungsdoppelbrechung handeln.

Ist die zu erwartende zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer bekannt, können die über die Betriebsdauer des optischen Elements variierenden Aberrationen verringert werden. Hierbei wird ausgenutzt, dass die zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer des optischen Elements typischerweise entweder zunimmt oder abnimmt, wobei die zeitliche Veränderung nicht zwingend irreversibel ist. Es ist möglich, die zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer des optischen Elements zumindest teilweise durch das Erzeugen eines Vorhalts zu kompensieren, welcher der zeitlichen Veränderung entgegenwirkt. Beispielsweise kann bei einer zeitlichen Veränderung der Passe, die auf eine lokale Vergrößerung der Dicke des Substrats des optischen Elements zurückzuführen ist, der Vorhalt in einer lokalen Verringerung der

Dicke des Substrats bestehen, der die lokale Vergrößerung der Dicke des Substrats zumindest teilweise kompensiert.

Abhängig von der Art und Weise, wie der Vorhalt erzeugt wird, sowie abhängig von dem Effekt, durch welchen die zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft hervorgerufen wird, ist ggf. eine vollständige Kompensation der zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer des optischen Elements möglich. In diesem Fall können durch den Vorhalt die Aberrationen über die Betriebsdauer des optischen Elements ggf. vollständig kompensiert werden, weil über die Betriebsdauer keine zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft mehr auftritt. Eine Kompensation der gesamten zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer des optischen Elements ist aber nicht in jedem Fall möglich.

Bei einer Variante des Verfahrens kompensiert der Vorhalt einen vorgegebenen Anteil, insbesondere einen Anteil von 50%, der gesamten über die Betriebsdauer des optischen Elements zu erwartenden zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft. Bei dieser Variante wird bei der Herstellung des optischen Elements oder ggf. zu einem späteren Zeitpunkt (s.u.) in der Regel durch einen Passe-Vorhalt ein Zustand des optischen Elements erzeugt, der so gewählt ist, dass zu einem Zeitpunkt, an dem 50% der gesamten über die Betriebsdauer des optischen Elements zu erwartenden zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft eingetreten ist, die Oberfläche des Substrats gerade die Soll-Oberflächenform aufweist. Entsprechend sind bei diesem Zeitpunkt die Aberrationen des optischen Elements minimal. Vor diesem Zeitpunkt nehmen die Aberrationen ab und nach diesem Zeitpunkt nehmen die Aberrationen zu, allerdings halbiert sich durch den Passe-Vorhalt der Betrag der Aberrationen über die Betriebsdauer des optischen Elements, d.h. der maximale negative Effekt der Aberrationen reduziert sich gegenüber dem Fall, dass bei der Herstellung eine Soll-Oberflächenform des optischen Elements ohne den Passe-Vorhalt erzeugt wird, um die Hälfte.

Es versteht sich, dass der Zeitpunkt, bei dem 50% der zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft erreicht ist, in der Regel nicht der halben Betriebsdauer des optischen Elements entspricht, da die zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft in der Regel nicht proportional zur Betriebsdauer ist und insbesondere nicht linear mit der Betriebsdauer zunimmt oder abnimmt.

Es versteht sich, dass nicht zwingend ein Anteil von 50% der gesamten zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft kompensiert werden muss, sondern dass auch ein anderer Anteil der zeitlichen Veränderung durch den Vorhalt kompensiert werden kann. Beispielsweise können geringere Aberrationen bzw. eine bessere Abbildungsqualität zu Beginn der Betriebsdauer erreicht werden, indem für den Vorhalt ein früherer Zeitpunkt ausgewählt wird, bei dem beispielsweise lediglich 20% oder 30% gesamten zeitlichen Veränderung über die Betriebsdauer kompensiert werden. Um die Anpassung der Pässe durch den Pässe-Vorhalt möglichst gering zu halten, sollten die Anteile der Aberrationen, die durch andere Korrekturmechanismen des optischen Systems, in welche das optische Element im Betrieb integriert ist, z.B. in ein Projektionsobjektiv eines Lithographiesystems, weggelassen werden, d.h. nicht bei dem Pässe-Vorhalt berücksichtigt werden.

Bei einer Variante wird der Pässe-Vorhalt durch eine Oberflächenbearbeitung des Substrats erzeugt, die ein materialabtragendes Bearbeiten der Oberfläche des Substrats und/oder ein Bestrahlen des Substrats, insbesondere mit nachfolgendem Tempern des Substrats, umfasst. Die Erzeugung des Pässe-Vorhalts bzw. die Pässekorrektur kann z.B. durch direkten Materialabtrag erfolgen. Alternativ oder zusätzlich kann der Pässe-Vorhalt durch eine Kompaktierung des Materials des Substrats im Volumen, ggf. mit nachfolgendem Tempern, erzeugt werden, wie dies beispielsweise in der eingangs zitierten DE102018211596A1 beschrieben ist, die durch Bezugnahme in ihrer Gesamtheit zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird. Auch andere

aus der Literatur bekannte Maßnahmen zur Passekorrektur sind möglich, beispielsweise gezielt eingebrachte (Schicht-)Spannungen, Ionenstrahlbearbeiten, Kompensation auf geeignet in dem optischen System, in dem das optische Element angeordnet ist, angeordneten anderen optischen Elementen (s.u.) oder ggf. – zumindest teilweise – die Verwendung von zu diesem Zweck vorhandenen Aktuatoren bzw. Manipulatoren, vgl. beispielsweise die eingangs zitierte DE102012212758A1, die durch Bezugnahme in ihrer Gesamtheit zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird.

Bei einer weiteren Variante wird der Passe-Vorhalt durch eine Oberflächenbearbeitung einer Oberfläche eines Substrats eines anderen optischen Elements des Lithographiesystems erzeugt. Wie weiter oben beschrieben wurde, kann der Passe-Vorhalt auch an einem oder mehreren anderen optischen Elementen eines optischen Systems, im vorliegenden Fall eines Lithographiesystems, vorgenommen werden. Bevorzugt weist das andere optische Element ein zu dem optischen Element vergleichbares Subaperturverhältnis auf. Die Oberflächenbearbeitung an dem oder den anderen optischen Elementen kann auf die weiter oben beschriebene Weise durchgeführt werden.

Um die zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer – teilweise – zu kompensieren, ist eine genaue Information über den zeitlichen Verlauf sowie die räumliche Ausprägung (s.u.) der optischen Eigenschaft, beispielsweise über die zeitliche Veränderung der Passe erforderlich, die einer zeitlicher veränderlichen lokalen Deformation der Oberfläche des optischen Elements entspricht. Die Methoden, mit denen diese Information gewonnen werden kann, lassen sich in zwei Gruppen aufteilen: Messung und Simulation, wobei auch eine Kombination beider Methoden möglich ist.

Bei einer Variante wird die über die Betriebsdauer des optischen Elements zu erwartende zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft auf Grundlage

mindestens einer Messung bestimmt. Die zeitliche Veränderung der mindestens einen optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer des optischen Elements, die nachfolgend auch als Langzeitveränderung bezeichnet wird, kann durch eine vorherige Messung der ggf. zeitlich veränderlichen Rate der zeitlichen Veränderung, sowie deren räumliche Ausprägung (s.u.), etwa in einem Sättigungsverhalten, vorhergesagt werden. Dies ist beispielsweise möglich, wenn die zeitliche Veränderung bzw. die Rate über die Fertigungsdauer und die Betriebsdauer des optischen Elements zeitlich konstant ist. In diesem Fall ist es erforderlich, dass die Messung eine Abschätzung der Langzeitveränderung der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer des optischen Elements ermöglicht.

Eine solche Messung kann realisiert werden, indem in einem Versuchsaufbau unter kontrollierten Bedingungen zu mehreren Zeitpunkten jeweils eine Messung durchgeführt wird und diese Zeitreihe eine eindeutige Extrapolation in die Zukunft zulässt. Wesentlich ist hierbei die Lagerung des optischen Elements zwischen den einzelnen Messungen. Die Lagerung des optischen Elements sollte bei konstant gehaltener Normalatmosphäre erfolgen. Des Weiteren ist es typischerweise erforderlich, dass durch die Lagerung sichergestellt ist, dass die Effekte der Langzeitveränderung der optischen Eigenschaft nicht verfälscht werden. Dies betrifft vor allem, aber nicht ausschließlich die Langzeitveränderung der Passe, die auf eine Krafteinwirkung zurückzuführen ist.

Für den Fall, dass die Langzeitveränderung der optischen Eigenschaft über die Fertigungs- und Betriebsdauer nicht konstant ist, kann grundsätzlich ebenfalls der weiter oben beschriebene Ansatz verwendet werden, es ist aber ggf. auch möglich, den Zustand der optischen Eigenschaft während der Betriebsdauer des optischen Elements direkt zu messen. Dies ist beispielsweise möglich, wenn die Langzeitveränderung der Passe durch eine gravitative Krafteinwirkung oder durch einen anderen Effekt erzeugt wird, der beim Verbringen des

optischen Elements in seine finale Betriebsposition, in der das optische Element über seine Betriebsdauer verbleibt, zurückgesetzt wird und ab diesem Zeitpunkt erneut auf das optische Element einwirkt.

In Bezug auf die gravitative Krafteinwirkung ist es aus der DE102017216458A1 bekannt, dass ein Unterschied zwischen der Gravitationskonstante am Herstellort und an der Einsatzposition eines Spiegels durch einen Passe-Vorhalt bei der Herstellung des Spiegels berücksichtigt werden kann. Bei dem Passe-Vorhalt wird jedoch die auf der gravitativen Krafteinwirkung beruhende Langzeitveränderung der Passe des Spiegels nicht berücksichtigt.

Bei einer Weiterbildung der oben beschriebenen Variante erfolgt das Erzeugen des Vorhalts nach dem Ablauf einer Wartezeit von mindestens 10 Tagen, bevorzugt von mindestens 40 Tagen, insbesondere von mindestens 100 Tagen seit einer letzten Bearbeitung des optischen Elements, wobei nach dem Ablauf der Wartezeit eine Messung der zeitlich veränderlichen optischen Eigenschaft durchgeführt wird und anhand der Messung die Größe des Vorhalts ermittelt wird. Bei dieser Variante wird wie weiter oben beschrieben wurde die Messung erst durchgeführt, wenn eine vorgegebene Wartezeit nach der letzten Bearbeitung des optischen Elements in der Fertigung verstrichen ist. Die Wartezeit wird hierbei so gewählt, dass nach dem Ablauf der Wartezeit ein nicht vernachlässigbarer Anteil der gesamten über die Betriebsdauer des optischen Elements zu erwartenden zeitabhängigen Veränderung der optischen Eigenschaft eingetreten ist.

Bei einer weiteren Weiterbildung der oben beschriebenen Variante erfolgt das Erzeugen des Vorhalts nach dem Ablauf einer Wartezeit von mindestens 10 Tagen, bevorzugt von mindestens 40 Tagen, insbesondere von mindestens 100 Tagen seit der letzten Bearbeitung des optischen Elements, wobei zu einem Zeitpunkt vor und zu einem Zeitpunkt nach dem Ablauf der Wartezeit jeweils eine Messung der zeitlich veränderlichen optischen Eigenschaft erfolgt und

anhand einer Differenz der beiden Messungen und anhand einer modellbasierten zu erwartenden zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft die Größe des Vorhalts ermittelt wird.

Bei den oben beschriebenen Varianten kann bei einer Betriebsdauer des optischen Elements von ca. 10 Jahren und einer zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft mit einem zeitlich logarithmischen Verlauf, wie sie beispielsweise durch eine gravitative Krafteinwirkung hervorgerufen wird, bereits nach ca. 100 Tagen 50% der zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft, beispielsweise in Form der zeitlichen Veränderung der Pässe, erreicht werden. Dieser Zustand kann durch eine gezielte Lagerung des optischen Elements noch in der Fertigung direkt gemessen werden. In diesem Fall kann ein Pässe-Vorhalt erzeugt werden, der so gewählt ist, dass zum Zeitpunkt der Messung bzw. kurz nach dem Zeitpunkt der Messung die Soll-Oberflächenform erreicht wird, bei der die Aberrationen des optischen Elements minimal sind. Durch das Bringen in seine finale Betriebsposition ergibt sich die Soll-Oberflächenform des optischen Elements nach derselben Wartezeit innerhalb der Betriebsdauer erneut.

Durch das Fehlen der Extrapolation sollte die hier beschriebene Methode genauer sein als die weiter oben beschriebene Methode, wobei die Genauigkeit insbesondere von der Qualität der Lagerung abhängig ist. Unabhängig von der gewählten Messstrategie ist es typischerweise erforderlich, dass die aus der Langzeitveränderung der optischen Eigenschaft resultierenden Aberrationen bzw. Wellenfrontstörungen im RMS-Wert, z.B. im RMS5, d.h. im quadratischen Mittel der Wellenfront-Zernike 5 bis 36 sowie 49, genauer als 100 pm, bevorzugt genauer als 30 pm, insbesondere genauer als 10 pm, vorhergesagt werden.

Bei einer weiteren Variante wird die über die Betriebsdauer des optischen Elements zu erwartende zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft auf

Grundlage einer modellbasierten Simulation bestimmt, die bevorzugt Finite-Elemente-Berechnungen umfasst. Die Langzeitveränderung bzw. die Rate der Veränderung über die Betriebsdauer des optischen Elements kann durch geeignete Modelle und Simulationstechniken, z.B. durch die Finite-Elemente-Methode, vorhergesagt werden. Dabei ist es typischerweise ebenfalls erforderlich, die aus der Langzeitveränderung über die Betriebsdauer resultierenden Aberrationen bzw. Wellenfrontstörungen im RMS5 genauer als 100 pm, bevorzugt genauer als 30 pm, insbesondere genauer als 10 pm, vorherzusagen. Die Genauigkeit der Simulation kann durch dedizierte Kalibriermessungen erhöht werden, die dazu verwendet werden, die Modellparameter der Finite-Elemente-Rechnungen zu ermitteln.

Bei einer weiteren Variante bildet das optische Element eines der drei optischen Elemente des Lithographiesystems, deren Substrate das größte Volumen aufweisen. Die Korrektur von Langzeitveränderungen der optischen Eigenschaften von optischen Elementen, die ein Substrat mit einem im Vergleich zu anderen optischen Elementen großen Volumen aufweisen, hat sich als vorteilhaft erwiesen.

Bei einer weiteren Variante kompensiert der Vorhalt einen Anteil von mindestens 20%, bevorzugt von mindestens 30%, insbesondere von mindestens 50% der über die Betriebsdauer des optischen Elements variierenden Aberrationen, die durch die zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer des optischen Elements verursacht werden. Wie weiter oben beschrieben wurde, können für den Fall, dass der Vorhalt so gewählt wird, dass ein Anteil von ca. 50% der zu erwartenden zeitlichen Veränderung der optischen Eigenschaft kompensiert wird, in der Regel die über die Betriebsdauer des optischen Elements variierenden Aberrationen ungefähr halbiert werden.

Bei einer weiteren Variante wird die zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft durch mindestens einen der folgenden Effekte hervorgerufen: Thermische Hysterese, mechanische Hysterese, Volumenschrumpf, entspannende Material-Kompaktierung, beispielsweise nach der weiter oben beschriebenen Bestrahlung mit anschließendem Tempern, sowie strahlungsinduzierte Kompaktierung („compaction“ oder ggf. „rarefaction“) des Materials des Substrats. Die mechanische Hysterese des Materials des Substrats, die auch als verzögerte Elastizität bezeichnet wird, kann beispielsweise bei einer Langzeitveränderung der Pässe durch eine Kraffteinwirkung der Gravitation eine Rolle spielen. Es versteht sich, dass die obige Aufzählung nicht abschließend ist. Weitere Effekte, welche über die Betriebsdauer des optischen Elements variierende Aberrationen hervorrufen, sind beispielsweise zeitliche Veränderungen der Oberflächenschichtspannungen, etc.

Bei einer Variante variiert die optische Eigenschaft ortsabhängig, die zu erwartende zeitliche Veränderung der optischen Eigenschaft wird ortsabhängig bestimmt und durch den Vorhalt wird die Veränderung der optischen Eigenschaft ortsabhängig korrigiert. Zusätzlich zur zeitlichen Veränderung variiert die optische Eigenschaft in der Regel auch ortsabhängig. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn es sich bei der optischen Eigenschaft um die Pässe, d.h. um die Oberflächenform, der optischen Oberfläche des Substrats handelt. In diesem Fall wird ein ortsabhängig über die Oberfläche des Substrats variierender Pässe-Vorhalt erzeugt, um die ortsabhängig variierende Deformation der Oberfläche des Substrats teilweise zu kompensieren.

Bei einer Variante bildet das optische Element einen EUV-Spiegel und das Substrat des EUV-Spiegels besteht bevorzugt ganz oder teilweise aus einem Nullausdehnungs-Material. Bei dem Nullausdehnungs-Material kann es sich beispielsweise um titandotiertes Quarzglas oder um eine Glaskeramik handeln. Diese Materialien weisen bei einer bestimmten Temperatur, die als

Nulldurchgangs-Temperatur bezeichnet wird, einen Nulldurchgang des Wärmeausdehnungskoeffizienten auf.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein optisches Element, bevorzugt einen Spiegel, insbesondere einen EUV-Spiegel, wobei das optische Element Aberrationen aufweist, die über eine Betriebsdauer des optischen Elements zeitlich variieren, wobei die Aberrationen ausgehend vom Beginn der Betriebsdauer des optischen Elements bis zu einem vorgegebenen Zeitpunkt abnehmen, an dem die Aberrationen minimal sind und nach dem vorgegebenen Zeitpunkt wieder zunehmen, wobei der vorgegebene Zeitpunkt bevorzugt zwischen 100 Tagen und 8 Jahren, besonders bevorzugt zwischen 200 Tagen und 6 Jahren, insbesondere zwischen 2 Jahren und 4 Jahren liegt. Unter dem Beginn der Betriebsdauer wird derjenige Zeitpunkt verstanden, bei dem der Spiegel in einer Anordnung der Mikrolithographie, beispielsweise in eine Lithographieanlage, in Betrieb genommen wird.

Das weiter oben beschriebene optische Element kann hergestellt werden, indem der weiter oben beschriebene Passe-Vorhalt an der Oberfläche eines Substrats des optischen Elements erzeugt wird. Für den Fall, dass es sich bei dem optischen Element um einen Spiegel handelt, ist auf die Oberfläche des Substrats, an welcher der Passe-Vorhalt erzeugt wird, eine reflektierende Beschichtung aufgebracht (s.o.).

Bei einer Ausführungsform weisen die Aberrationen zu dem vorgegebenen Zeitpunkt einen Wert von 100 pm oder weniger, bevorzugt von 30 pm oder weniger, besonders bevorzugt von 10 pm oder weniger auf. Die Aberrationen werden als Wellenfrontstörungen in Form eines jeweiligen RMS-Werts an allen Punkten der Oberfläche gemessen. Die oben angegebenen Werte beziehen sich auf denjenigen Punkt der Oberfläche, an dem die Aberrationen maximal sind. Die oben angegebenen Werte beziehen sich auf den RMS5-Wert, d.h. auf das quadratische Mittel der Wellenfront-Zernike 5 bis 36 sowie 49. Es versteht

sich, dass das weiter oben beschriebene zeitliche Verhalten der Aberrationen erhalten bleibt, wenn zur Bestimmung der Aberrationen ein anderes geeignetes Maß verwendet wird, beispielsweise in Form einer quadratischen Mittelung über andere Zernike-Polynome bzw. Zernike-Koeffizienten.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine Anlage der Halbleitertechnologie, insbesondere eine EUV-Lithographieanlage, die mindestens ein solches optisches Element aufweist. Bei der Anlage der Halbleitertechnologie kann es sich um eine EUV-Lithographieanlage zur Belichtung eines Wafers oder um eine andere Anlage der Halbleitertechnologie handeln, beispielsweise um ein Inspektionssystem, z.B. zur Inspektion von in der Lithographie verwendeten Masken, Wafern oder dergleichen.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen der Erfindung, anhand der Figuren der Zeichnung, die erfindungswesentliche Einzelheiten zeigen, und aus den Ansprüchen. Die einzelnen Merkmale können je einzeln für sich oder zu mehreren in beliebiger Kombination bei einer Variante der Erfindung verwirklicht sein.

Zeichnung

Ausführungsbeispiele sind in der schematischen Zeichnung dargestellt und werden in der nachfolgenden Beschreibung erläutert. Es zeigt

- Fig. 1 schematisch im Meridionalschnitt eine Projektionsbelichtungsanlage für die EUV-Projektionslithografie,
- Fig. 2a eine schematische Darstellung eines EUV-Spiegels der Projektionsbelichtungsanlage von Fig. 1 zu einem ersten

Zeitpunkt, zu dem der EUV-Spiegel zur Erzeugung eines Pässe-Vorhalts bestrahlt wird,

Fig. 2b eine schematische Darstellung des EUV-Spiegels zu einem zweiten Zeitpunkt, bei dem durch eine zeitliche Veränderung der Pässe aufgrund der Einwirkung der Gravitationskraft eine Soll-Oberflächenform der Oberfläche des Spiegels erreicht wird,

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Langzeitveränderung der Pässe des Spiegels von Fig. 2a,b aufgrund der Einwirkung der Gravitationskraft, sowie

Fig. 4 eine schematische Darstellung von aufgrund der Langzeitveränderung der Pässe zeitlich variierenden Aberrationen des EUV-Spiegels.

In der folgenden Beschreibung der Zeichnungen werden für gleiche bzw. funktionsgleiche Bauteile identische Bezugszeichen verwendet.

Im Folgenden werden unter Bezugnahme auf Fig. 1 exemplarisch die wesentlichen Bestandteile einer Anlage für die Halbleitertechnologie in Form einer Projektionsbelichtungsanlage 1 für die Mikrolithographie, genauer gesagt für die EUV-Lithographie, beschrieben. Die Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus der Projektionsbelichtungsanlage 1 sowie von deren Bestandteilen ist hierbei nicht einschränkend zu verstehen.

Eine Ausführung eines Beleuchtungssystem 2 der Projektionsbelichtungsanlage 1 hat neben einer Licht- bzw. Strahlungsquelle 3 eine Beleuchtungsoptik 4 zur Beleuchtung eines Objektfeldes 5 in einer Objektebene 6. Bei einer alternativen Ausführung kann die Lichtquelle 3 auch als ein zum sonstigen

Beleuchtungssystem separates Modul bereitgestellt sein. In diesem Fall umfasst das Beleuchtungssystem die Lichtquelle 3 nicht.

Beleuchtet wird ein im Objektfeld 5 angeordnetes Retikel 7. Das Retikel 7 ist von einem Retikelhalter 8 gehalten. Der Retikelhalter 8 ist über einen Retikelverlagerungsantrieb 9 insbesondere in einer Scanrichtung verlagerbar.

In Fig. 1 ist zur Erläuterung ein kartesisches xyz-Koordinatensystem eingezeichnet. Die x-Richtung verläuft senkrecht zur Zeichenebene hinein. Die y-Richtung verläuft horizontal und die z-Richtung verläuft vertikal. Die Scanrichtung verläuft in der Fig. 1 längs der y-Richtung. Die z-Richtung verläuft senkrecht zur Objektebene 6.

Die Projektionsbelichtungsanlage 1 umfasst ein Projektionssystem 10. Das Projektionssystem 10 dient zur Abbildung des Objektfeldes 5 in ein Bildfeld 11 in einer Bildebene 12. Abgebildet wird eine Struktur auf dem Retikel 7 auf eine lichtempfindliche Schicht eines im Bereich des Bildfeldes 11 in der Bildebene 12 angeordneten Wafers 13. Der Wafer 13 wird von einem Waferhalter 14 gehalten. Der Waferhalter 14 ist über einen Waferverlagerungsantrieb 15 insbesondere längs der y-Richtung verlagerbar. Die Verlagerung einerseits des Retikels 7 über den Retikelverlagerungsantrieb 9 und andererseits des Wafers 13 über den Waferverlagerungsantrieb 15 kann synchronisiert zueinander erfolgen.

Bei der Strahlungsquelle 3 handelt es sich um eine EUV-Strahlungsquelle. Die Strahlungsquelle 3 emittiert insbesondere EUV-Strahlung 16, welche im Folgenden auch als Nutzstrahlung, Beleuchtungsstrahlung oder Beleuchtungslicht bezeichnet wird. Die Nutzstrahlung hat insbesondere eine Wellenlänge im Bereich zwischen 5 nm und 30 nm. Bei der Strahlungsquelle 3 kann es sich um eine Plasmaquelle handeln, zum Beispiel um eine LPP-Quelle (Laser Produced Plasma, mithilfe eines Lasers erzeugtes Plasma) oder um eine

DPP-Quelle (Gas Discharged Produced Plasma, mittels Gasentladung erzeugtes Plasma). Es kann sich auch um eine synchrotronbasierte Strahlungsquelle handeln. Bei der Strahlungsquelle 3 kann es sich um einen Freie-Elektronen-Laser (Free-Electron-Laser, FEL) handeln.

Die Beleuchtungsstrahlung 16, die von der Strahlungsquelle 3 ausgeht, wird von einem Kollektorspiegel 17 gebündelt. Bei dem Kollektorspiegel 17 kann es sich um einen Kollektorspiegel mit einer oder mit mehreren ellipsoidalen und/oder hyperboloiden Reflexionsflächen handeln. Die mindestens eine Reflexionsfläche des Kollektorspiegels 17 kann im streifenden Einfall (Grazing Incidence, GI), also mit Einfallswinkeln größer als 45° , oder im normalen Einfall (Normal Incidence, NI), also mit Einfallswinkeln kleiner als 45° , mit der Beleuchtungsstrahlung 16 beaufschlagt werden. Der Kollektorspiegel 17 kann einerseits zur Optimierung seiner Reflektivität für die Nutzstrahlung und andererseits zur Unterdrückung von Falschlicht strukturiert und/oder beschichtet sein.

Nach dem Kollektorspiegel 17 propagiert die Beleuchtungsstrahlung 16 durch einen Zwischenfokus in einer Zwischenfokusebene 18. Die Zwischenfokusebene 18 kann eine Trennung zwischen einem Strahlungsquellenmodul, aufweisend die Strahlungsquelle 3 und den Kollektorspiegel 17, und der Beleuchtungsoptik 4 darstellen.

Die Beleuchtungsoptik 4 umfasst einen Umlenkspiegel 19 und diesem im Strahlengang nachgeordnet einen ersten Facettenspiegel 20. Bei dem Umlenkspiegel 19 kann es sich um einen planen Umlenkspiegel oder alternativ um einen Spiegel mit einer über die reine Umlenkungswirkung hinaus bündelbeeinflussenden Wirkung handeln. Alternativ oder zusätzlich kann der Umlenkspiegel 19 als Spektralfilter ausgeführt sein, der eine Nutzlichtwellenlänge der Beleuchtungsstrahlung 16 von Falschlicht einer hiervon abweichenden Wellenlänge trennt. Der erste Facettenspiegel 20

umfasst eine Vielzahl von einzelnen ersten Facetten 21, welche im Folgenden auch als Feldfacetten bezeichnet werden. Von diesen Facetten 21 sind in der Fig. 1 nur beispielhaft einige dargestellt. Im Strahlengang der Beleuchtungsoptik 4 ist dem ersten Facettenspiegel 20 nachgeordnet ein zweiter Facettenspiegel 22. Der zweite Facettenspiegel 22 umfasst eine Mehrzahl von zweiten Facetten 23.

Die Beleuchtungsoptik 4 bildet somit ein doppelt facettiertes System. Dieses grundlegende Prinzip wird auch als Wabenkondensator (Fly's Eye Integrator) bezeichnet. Mit Hilfe des zweiten Facettenspiegels 22 werden die einzelnen ersten Facetten 21 in das Objektfeld 5 abgebildet. Der zweite Facettenspiegel 22 ist der letzte bündelformende oder auch tatsächlich der letzte Spiegel für die Beleuchtungsstrahlung 16 im Strahlengang vor dem Objektfeld 5.

Das Projektionssystem 10 umfasst eine Mehrzahl von Spiegeln M_i , welche gemäß ihrer Anordnung im Strahlengang der Projektionsbelichtungsanlage 1 durchnummeriert sind.

Bei dem in der Fig. 1 dargestellten Beispiel umfasst das Projektionssystem 10 sechs Spiegel M_1 bis M_6 . Alternativen mit vier, acht, zehn, zwölf oder einer anderen Anzahl an Spiegeln M_i sind ebenso möglich. Der vorletzte Spiegel M_5 und der letzte Spiegel M_6 haben jeweils eine Durchtrittsöffnung für die Beleuchtungsstrahlung 16. Bei dem Projektionssystem 10 handelt es sich um eine doppelt obskurierte Optik. Die Projektionsoptik 10 hat eine bildseitige numerische Apertur, die größer ist als 0,4 oder 0,5 und die auch größer sein kann als 0,6 und die beispielsweise 0,7 oder 0,75 betragen kann.

Die Spiegel M_i können, genauso wie die Spiegel der Beleuchtungsoptik 4, eine hoch reflektierende Beschichtung für die Beleuchtungsstrahlung 16 aufweisen.

Fig. 2a,b zeigen einen Spiegel Mi der Projektionsoptik 10 von Fig. 1. Der Spiegel Mi weist ein Substrat 24 aus einem Nullausdehnungs-Material auf, bei dem es sich im gezeigten Beispiel um titandotiertes Quarzglas handelt. Auf eine Oberfläche 24a des Substrats 24 ist eine reflektierende Beschichtung 25 aufgebracht, die aus alternierenden Schichten aus einem hochbrechenden und einem niedrigbrechenden Material gebildet ist. Bei den Materialien handelt es sich im gezeigten Beispiel, bei dem die Nutzwellenlänge bei 13,5 nm liegt, um Silizium und Molybdän.

Wie in Fig. 2a zu erkennen ist, weist die Oberfläche 24a des Substrats 24 eine von der Position x, y an der Oberfläche 24a abhängige Soll-Oberflächenform auf, die auch als Passe $P(x, y)$ bezeichnet wird. Zur Vereinfachung wird nachfolgend davon ausgegangen, dass die Soll-Passe $P(x, y)$, d.h. die Soll-Oberflächenform, über die Oberfläche 24a konstant ist, d.h. bei der Soll-Oberflächenform der Oberfläche 24a des Substrats 24 handelt es sich um eine plane Oberfläche 24a. Die Passe $P(x,y)$ der Oberfläche 24a des Spiegels Mi kann sich über die Betriebsdauer T (vgl. Fig. 3) des Spiegels Mi in der Projektionsbelichtungsanlage 1 aufgrund von unterschiedlichen Effekten zeitlich verändern.

In Fig. 3 ist beispielhaft eine zeitliche Veränderung ΔP der über die Oberfläche 24a gemittelten Passe P (in beliebigen Einheiten) in Abhängigkeit von der Zeit t (in Tagen) dargestellt, die auf eine gravitationsbedingte Deformation des Substrats 24 zurückzuführen ist. Wie in Fig. 3 ebenfalls zu erkennen ist, nimmt die zeitliche Veränderung ΔP der Passe P , die der Deformation der Oberfläche 24a des Substrats 24 entspricht, über die Betriebsdauer T des Spiegels Mi auf einer logarithmischen Zeitskala linear zu.

Die Betriebsdauer T ist in Fig. 3 durch eine gepunktete Linie angedeutet und bezeichnet die Zeitdauer, über die die optische Abbildungsqualität des Spiegels Mi optimal sein sollte und somit die Aberrationen minimal sein sollten. Im

gezeigten Beispiel liegt die Betriebsdauer T in einem Zeitraum zwischen drei Tagen ab dem Einbau des Spiegels M_i in die Projektionsoptik 10 (zum Zeitpunkt t_1 , der z.B. einen Tag oder einen deutlich längeren Zeitraum nach Herstellung des Spiegels M_i liegen kann) und zehn Jahren. Um die in Fig. 4 dargestellten, auf die zeitliche Veränderung ΔP der Passe P zurückzuführenden variierenden Aberrationen A bzw. Wellenfrontfehler teilweise zu kompensieren, ist es möglich, einen vorgegebenen Anteil der über die Betriebsdauer T des optischen Elements M_i zu erwartenden gesamten zeitlichen Veränderung ΔP_{tot} der Passe P zu kompensieren. Dieser vorgegebene Anteil liegt bei dem in Fig. 3 gezeigten Beispiel bei 50% der gesamten über die Betriebsdauer T zu erwartenden zeitlichen Veränderung ΔP_{tot} der Passe P . Wie in Fig. 3 zu erkennen ist, liegt der Zeitpunkt t_2 , bei dem der Anteil der gesamten zeitlichen Veränderung ΔP_{tot} der Passe P über die Betriebsdauer T des Spiegels M_i einen Wert von 50% erreicht, bei 100 Tagen.

Die Kompensation, die in Form eines Passe-Vorhalts ΔP_V erzeugt wird, kann zu oder vor dem Zeitpunkt t_1 vorgenommen werden, der dem Zeitpunkt des Einbaus des Spiegels M_i in die Projektionsbelichtungsanlage 1 entspricht, und vor dem Beginn der Betriebsdauer T des Spiegels M_i liegt. Der in Fig. 2a für eine vorgegebene Position x,y an der Oberfläche 24a des Substrats 24 dargestellte Passe-Vorhalt ΔP_V führt dazu, dass der Spiegel M_i zum Zeitpunkt t_2 seine optimale Oberflächenform bzw. Passe $P(x,y)$ annimmt, wie dies in Fig. 2b zu erkennen ist.

Wie in Fig. 4 gezeigt ist, nehmen aufgrund des Passe-Vorhalts ΔP_V die Aberrationen A des Spiegels M_i zunächst ab, weil der in Fig. 2a gezeigte Passe-Vorhalt ΔP_V sich durch die einwirkende Gravitationskraft verringert, bis der zweite Zeitpunkt t_2 erreicht ist, bei dem die Aberrationen A minimal sind und die Oberfläche 24a die in Fig. 2b gezeigte plane Soll-Oberflächenform annimmt. Nach dem zweiten Zeitpunkt t_2 bis zum Ende der Betriebsdauer T des Spiegels M_i nehmen die Aberrationen A des Spiegels M_i wieder zu, da die Oberfläche

24a sich aufgrund der Einwirkung der Gravitationskraft weiter verformt, da sich das Substrat 24 weiter ausdehnt.

Durch die Kompensation mit Hilfe des Passe-Vorhalts ΔP_V kann die Größe der Veränderung ΔA der Aberrationen A über die Betriebsdauer T des Spiegels Mi jedoch gegenüber dem Fall, dass keine solche Kompensation erfolgt, praktisch halbiert werden, d.h. es werden durch den Passe-Vorhalt ΔP_V ca. 50% der über die Betriebsdauer T des optischen Elements Mi variierenden Aberrationen A kompensiert.

Es versteht sich, dass auch ein anderer Anteil als 50% der gesamten zu erwartenden zeitlichen Veränderung ΔP_{tot} der Passe P über die Betriebsdauer T des Spiegels Mi auf die weiter oben beschriebene Weise kompensiert werden kann, beispielsweise ein Anteil von 30% oder von 40%.

Der Passe-Vorhalt ΔP_V wird durch eine Oberflächenbearbeitung des Substrats 24 erzeugt, die im gezeigten Beispiel durch eine lokale Bestrahlung mit einem Elektronenstrahl 26 vorgenommen wird, der eine Kompaktierung im Volumen des Substrats 24 hervorruft, wie in Fig. 2a durch einen umrandeten Bereich 27 angedeutet ist. Die Kompaktierung führt zu einer Veränderung der Passe $P(x,y)$ bzw. zu dem lokalen Passe-Vorhalt ΔP_V . Um einen lokalen Passe-Vorhalt ΔP_V an allen Positionen x, y der Oberfläche 24a zu erzeugen, wird eine Elektronenkanone 28, die zur Erzeugung des Elektronenstrahls 26 dient, über die Oberfläche 24a bewegt, wie durch einen Doppelpfeil angedeutet ist. An die Bestrahlung mit dem Elektronenstrahl 27 kann sich ein Temperschritt anschließen, der eine Dekompaktierung des Substrats 24 bewirkt, wie dies in der eingangs zitierten DE102018211596A1 beschrieben ist. Wie weiter oben beschrieben wurde, wird die Größe des lokalen Passe-Vorhalts ΔP_V zum Zeitpunkt t_1 so gewählt, dass zu einem vorgegebenen Zeitpunkt t_2 die in Fig. 2b gezeigte plane Soll-Oberflächenform der Oberfläche 24a entsteht.

Anstelle des Elektronenstrahls 26 kann auch ein Ionenstrahl für die Oberflächenbearbeitung verwendet werden. Alternativ kann die Oberflächenbearbeitung durch ein materialabtragendes Verfahren erfolgen, beispielsweise durch Laserablation. Es ist auch möglich, den Passe-Vorhalt ΔP_V zur Verringerung der Aberrationen A an dem Spiegel M_i durch eine Oberflächenbearbeitung an einem anderen Spiegel M_j ($j \neq i$) der Projektionsoptik 10 zu erzeugen. Hierfür eignen sich insbesondere Spiegel M_j , die ein ähnliches Subaperturverhältnis wie der Spiegel M_i aufweisen.

Für die weiter oben beschriebene Verringerung der Aberrationen A ist es erforderlich, die über die Betriebsdauer T des optischen Elements M_i zu erwartende zeitliche Veränderung ΔP der Passe P mit möglichst großer Genauigkeit zu bestimmen. Die zu erwartende zeitliche Veränderung ΔP kann grundsätzlich durch eine Messung, eine Simulation oder durch eine Kombination aus einer Messung und einer Simulation bestimmt werden. Die zu erwartende zeitliche Veränderung ΔP kann an dem Spiegel M_i selbst oder an einem gleichartigen Spiegel M_i gemessen werden, der an derselben Einsatzposition in der Projektionsoptik 10 angeordnet wird.

Für den Fall, dass die zeitliche Veränderung ΔP über die Fertigungs- und Betriebsdauer T des Spiegels M_i konstant ist, kann durch eine Messung bzw. eine Mehrzahl von Messungen eine Abschätzung der zeitlichen Veränderung ΔP der Passe P über die Betriebsdauer T des Spiegels M_i vorgenommen werden. Zu diesem Zweck kann in einem Versuchsaufbau unter kontrollierten Bedingungen zu mehreren Zeitpunkten eine Messung durchgeführt werden, die eine eindeutige Extrapolation in die Zukunft zulässt.

Für den Fall, dass die zeitliche Veränderung ΔP der Passe P durch die weiter oben beschriebene gravitative Krafteinwirkung oder durch einen anderen Effekt erzeugt wird, der beim Verbringen des Spiegels M_i in seine finale Einsatzposition in der Projektionsoptik 10 zurückgesetzt wird und ab diesem

Zeitpunkt t_1 erneut auf den Spiegel M_i einwirkt, der dauerhaft in der Einsatzposition verbleibt, existiert die Möglichkeit, den Zustand des Spiegels M_i bzw. die Passe P zu einem Zeitpunkt zu messen, der noch vor dem Zeitpunkt t_1 liegt. Der Zeitpunkt, zu dem die zeitliche Veränderung ΔP der Passe P gemessen wird, kann beispielsweise nach dem Ablauf einer Wartezeit von mindestens 10 Tagen, von mindestens 40 Tagen oder von mindestens 100 Tagen seit einer letzten Bearbeitung des optischen Elements M_i liegen und die Messung kann noch in der Fertigung durchgeführt werden. Da die zeitliche Veränderung ΔP der Passe P bei Einbau in die Projektionsoptik 10 zurückgesetzt wird, entspricht die Messung der zeitlichen Veränderung ΔP der Passe P bei einer Wartezeit von z.B. 100 Tagen nach der letzten Bearbeitung dem in Fig. 3 und Fig. 4 gezeigten Zeitpunkt t_2 von 100 Tagen nach dem Zeitpunkt t_1 des Einbaus des Spiegels M_i in die Projektionsoptik 10. Anhand dieser Messung kann daher die Größe des Passe-Vorhalts ΔP_V ermittelt werden, der nachfolgend an der Oberfläche 24a des Spiegels M_i erzeugt wird. Der Passe-Vorhalt ΔP_V kompensiert in diesem Fall die zeitliche Veränderung ΔP der Passe P bis zum Zeitpunkt t_2 , d.h. es wird ebenfalls die in Fig. 2b gezeigte plane Soll-Oberflächenform erzeugt.

Es ist auch möglich, dass das Erzeugen des Vorhalts ΔP_V nach dem Ablauf einer Wartezeit von mindestens 10 Tagen, von mindestens 40 Tagen oder von mindestens 100 Tagen seit der letzten Bearbeitung des optischen Elements M_i erfolgt, wobei zu einem Zeitpunkt vor und zu einem Zeitpunkt nach dem Ablauf der Wartezeit jeweils eine Messung der zeitlichen Veränderung ΔP der Passe $P(x,y)$ erfolgt und anhand einer Differenz der beiden Messungen und anhand einer modellbasierten zu erwartenden zeitlichen Veränderung ΔP der Passe $P(x,y)$ die Größe des Passe-Vorhalts ΔP_V ermittelt wird.

Alternativ oder zusätzlich zu einer Messung kann die über die Betriebsdauer T des optischen Elements M_i zu erwartende zeitliche Veränderung ΔP der Passe $P(x,y)$ auf Grundlage einer modellbasierten Simulation bestimmt werden, die

z.B. auf Finite-Elemente-Berechnungen beruht, deren Modellparameter durch Kalibrationsmessungen ermittelt werden können.

Bei dem Spiegel M_i , an dem der weiter oben beschriebene Passe-Vorhalt ΔP erzeugt, wird handelt es sich um einen der drei Spiegel M_i der Projektionsbelichtungsanlage 1, genauer gesagt der Projektionsoptik 10, deren Substrate 24 das größte Volumen aufweisen.

Bei dem weiter oben beschriebenen Beispiel wurde die zeitliche Veränderung ΔP der Passe $P(x,y)$ durch eine gravitative Krafteinwirkung bzw. eine mechanische Hysterese bzw. verzögerte Elastizität des Materials des Substrats 24 hervorgerufen. Die zeitliche Veränderung ΔP der Passe $P(x,y)$ kann aber auch durch einen oder mehrere andere Effekte hervorgerufen werden, beispielsweise durch eine thermische Hysterese, einen Volumenschwund, eine entspannende Material-Kompaktierung oder eine strahlungsinduzierte Kompaktierung. Auch die zeitliche Veränderung von anderen optischen Eigenschaften als der Passe $P(x,y)$ über die Betriebsdauer T des Spiegels M_i können auf die weiter oben beschriebene Weise zumindest teilweise kompensiert werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Verringern von Aberrationen (A) eines optischen Elements (Mi), insbesondere eines optischen Elements (Mi) in einem Lithographiesystem (1), umfassend:
Bestimmen einer über die Betriebsdauer (T) des optischen Elements (Mi) zu erwartenden zeitlichen Veränderung (ΔP) einer optischen Eigenschaft des optischen Elements (Mi), insbesondere einer zeitlichen Veränderung (ΔP) einer Passe ($P(x,y)$) einer Oberfläche (24a) eines Substrats (24) des optischen Elements (Mi), wobei die zeitliche Veränderung (ΔP) der optischen Eigenschaft über die Betriebsdauer (T) des optischen Elements (Mi) variierende Aberrationen (A) verursacht, sowie
Verringern der über die Betriebsdauer (T) des optischen Elements (Mi) variierenden Aberrationen (A) durch Erzeugen eines Vorhalts, insbesondere eines Passe-Vorhalts (ΔP_V), der zumindest einen Anteil der gesamten über die Betriebsdauer (T) zu erwartenden zeitlichen Veränderung (ΔP_{tot}) der optischen Eigenschaft ($P(x,y)$) kompensiert.
2. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Vorhalt (ΔP_V) einen vorgegebenen Anteil, insbesondere einen Anteil von 50%, der gesamten über die Betriebsdauer (T) des optischen Elements (Mi) zu erwartenden zeitlichen Veränderung (ΔP_{tot}) der optischen Eigenschaft ($P(x,y)$) kompensiert.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem der Passe-Vorhalt (ΔP_V) durch eine Oberflächenbearbeitung des Substrats (24) erzeugt wird, die ein materialabtragendes Bearbeiten der Oberfläche (24a) des Substrats (24) und/oder ein Bestrahlen des Substrats (24), insbesondere mit nachfolgendem Tempern des Substrats (24), umfasst.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Passe-Vorhalt (ΔP_V) durch eine Oberflächenbearbeitung einer Oberfläche eines Substrats eines anderen optischen Elements (M_j) des Lithographiesystems (1) erzeugt wird.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die über die Betriebsdauer (T) des optischen Elements (M_i) zu erwartende zeitliche Veränderung (ΔP) der optischen Eigenschaft ($P(x,y)$) auf Grundlage mindestens einer Messung bestimmt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem das Erzeugen des Vorhalts (ΔP_V) nach dem Ablauf einer Wartezeit von mindestens 10 Tagen, bevorzugt von mindestens 40 Tagen, insbesondere von mindestens 100 Tagen seit einer letzten Bearbeitung des optischen Elements (M_i) erfolgt, wobei nach dem Ablauf der Wartezeit eine Messung der zeitlichen Veränderung (ΔP) der optischen Eigenschaft ($P(x,y)$) durchgeführt wird und anhand der Messung die Größe des Vorhalts (ΔP_V) ermittelt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem das Erzeugen des Vorhalts (ΔP_V) nach dem Ablauf einer Wartezeit von mindestens 10 Tagen, bevorzugt von mindestens 40 Tagen, insbesondere von mindestens 100 Tagen seit der letzten Bearbeitung des optischen Elements (M_i) erfolgt, wobei zu einem Zeitpunkt vor und zu einem Zeitpunkt nach dem Ablauf der Wartezeit jeweils eine Messung der zeitlichen Veränderung (ΔP) der optischen Eigenschaft ($P(x,y)$) erfolgt und anhand einer Differenz der beiden Messungen und anhand einer modellbasierten zu erwartenden zeitlichen Veränderung (ΔP) der optischen Eigenschaft ($P(x,y)$) die Größe des Vorhalts (ΔP_V) ermittelt wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die über die Betriebsdauer (T) des optischen Elements (M_i) zu erwartende zeitliche

Veränderung (ΔP) der optischen Eigenschaft ($P(x,y)$) auf Grundlage einer modellbasierten Simulation bestimmt wird, die bevorzugt Finite-Elemente-Berechnungen umfasst.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das optische Element eines der drei optischen Elemente (M_i) des Lithographiesystems (1) bildet, deren Substrate (24) das größte Volumen aufweisen.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Vorhalt (ΔP_V) einen Anteil von mindestens 20%, bevorzugt von mindestens 30%, insbesondere von mindestens 50% der über die Betriebsdauer (T) des optischen Elements (M_i) variierenden Aberrationen (A) kompensiert.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die zeitliche Veränderung (ΔP) der optischen Eigenschaft ($P(x,y)$) durch mindestens einen der folgenden Effekte hervorgerufen wird: Thermische Hysterese, mechanische Hysterese, Volumenschrumpfung, entspannende Material-Kompaktierung und strahlungsinduzierte Kompaktierung.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die optische Eigenschaft ($P(x,y)$) ortsabhängig variiert, bei dem die zu erwartende zeitliche Veränderung (ΔP) der optischen Eigenschaft ($P(x,y)$) ortsabhängig bestimmt wird und bei dem durch den Vorhalt (ΔP_V) die Veränderung der optischen Eigenschaft ortsabhängig korrigiert wird.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das optische Element (M_i) einen EUV-Spiegel bildet, wobei bevorzugt das Substrat (24) des EUV-Spiegels (M_i) ganz oder teilweise aus einem Nulldurchgangs-Material besteht.

14. Optisches Element (Mi), bevorzugt Spiegel, insbesondere EUV-Spiegel, dadurch gekennzeichnet, dass das optische Element (Mi) Aberrationen (A) aufweist, die über eine Betriebsdauer (T) des optischen Elements (Mi) zeitlich variieren, wobei die Aberrationen (A) vom Beginn der Betriebsdauer (T) bis zu einem vorgegebenen Zeitpunkt (t_2) abnehmen, an dem die Aberrationen (A) minimal sind und nach dem vorgegebenen Zeitpunkt (t_2) wieder zunehmen, wobei der vorgegebene Zeitpunkt (t_2) bevorzugt zwischen 100 Tagen und 8 Jahren, besonders bevorzugt zwischen 200 Tagen und 6 Jahren, insbesondere zwischen 2 Jahren und 4 Jahren liegt.
15. Optisches Element nach Anspruch 14, bei dem die Aberrationen (A) zu dem vorgegebenen Zeitpunkt (t_2) einen Wert von 100 pm oder weniger, bevorzugt von 30 pm oder weniger, insbesondere von 10 pm oder weniger aufweisen.
16. Anlage der Halbleiterlithographie, insbesondere EUV-Lithographieanlage (1), umfassend:
mindestens ein optisches Element (Mi) nach einem der Ansprüche 14 oder 15.

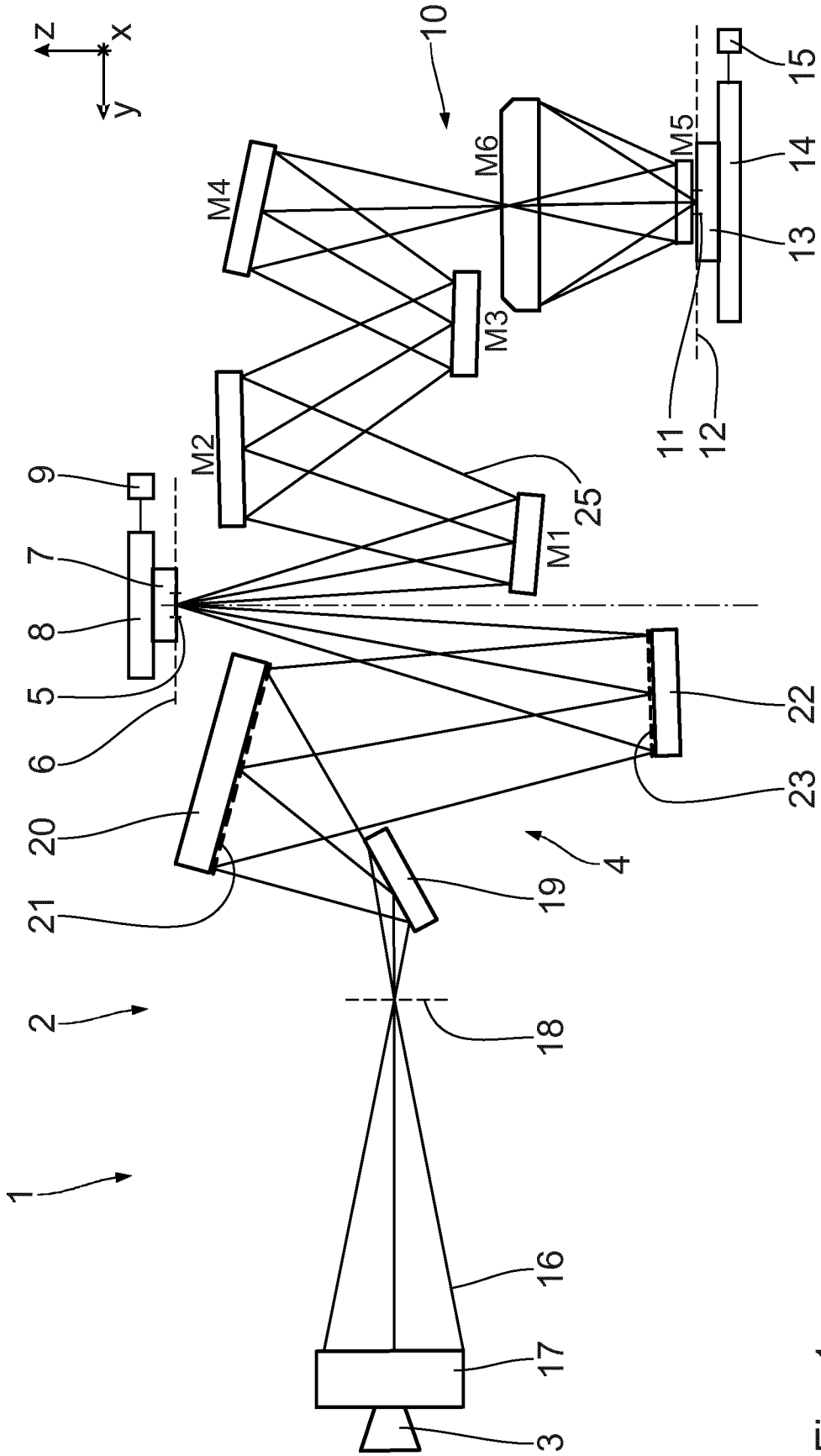


Fig. 1

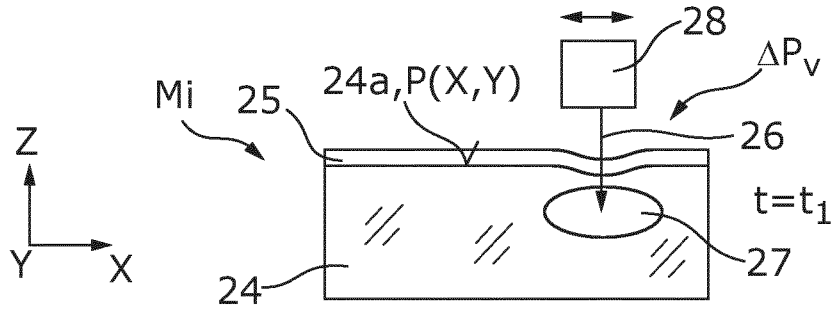


Fig. 2a

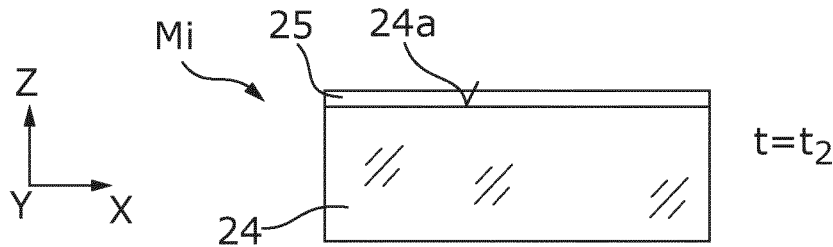


Fig. 2b

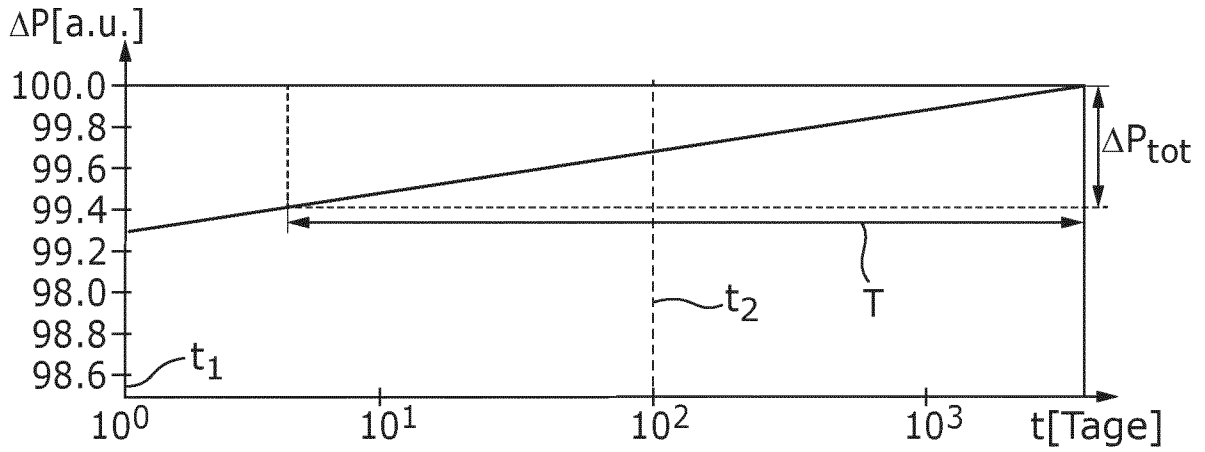


Fig. 3

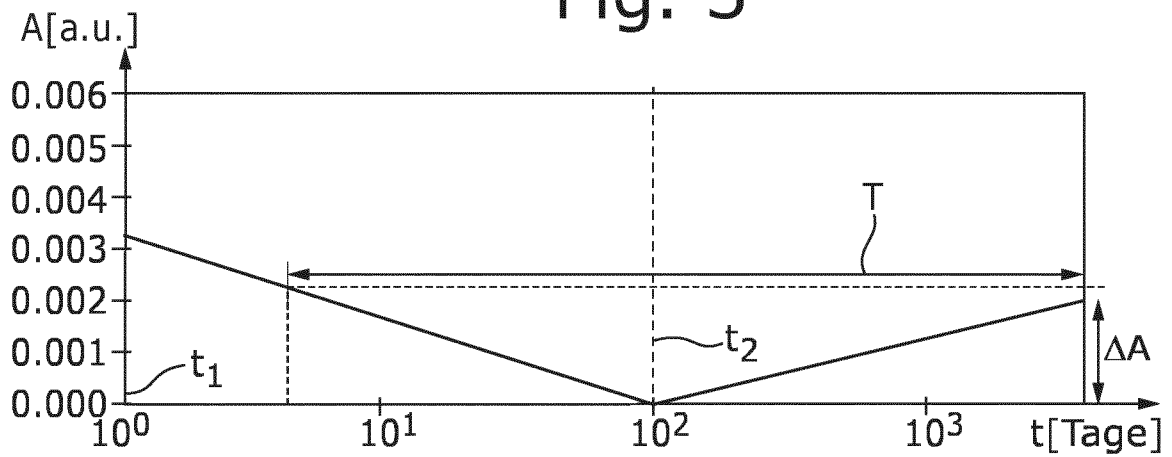


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/067117

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>G03F 7/20</i> (2006.01)i; <i>G01M 11/02</i> (2006.01)i; <i>G02B 5/08</i> (2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G03F; G01M; G02B Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE 102017216458 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 21 March 2019 (2019-03-21) cited in the application paragraphs [0005], [0041] - [0054]	1-16
A	DE 102008000790 A1 (ZEISS CARL SMT AG [DE]) 25 September 2008 (2008-09-25) paragraphs [0018] - [0021]; figure 3	1-16
A	DE 102016210794 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 27 April 2017 (2017-04-27) paragraphs [0011] - [0013]	1-16
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 25 September 2024		Date of mailing of the international search report 17 October 2024
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands (Kingdom of the) Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Eisner, Klaus Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/EP2024/067117

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
DE	102017216458	A1	21 March 2019	DE	102017216458	A1	21 March 2019
				JP	7242642	B2	20 March 2023
				JP	2020534576	A	26 November 2020
				KR	20200054976	A	20 May 2020
				TW	201921033	A	01 June 2019
				US	2020206855	A1	02 July 2020
				WO	2019052790	A1	21 March 2019

DE	102008000790	A1	25 September 2008	DE	102008000790	A1	25 September 2008
				US	2010014065	A1	21 January 2010
				WO	2008113605	A2	25 September 2008

DE	102016210794	A1	27 April 2017	NONE			

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2024/067117

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. G03F7/20 G01M11/02 G02B5/08
 ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G03F G01M G02B

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

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

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DE 10 2017 216458 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 21. März 2019 (2019-03-21) in der Anmeldung erwähnt Absätze [0005], [0041] - [0054] -----	1 - 16
A	DE 10 2008 000790 A1 (ZEISS CARL SMT AG [DE]) 25. September 2008 (2008-09-25) Absätze [0018] - [0021]; Abbildung 3 -----	1 - 16
A	DE 10 2016 210794 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 27. April 2017 (2017-04-27) Absätze [0011] - [0013] -----	1 - 16

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

- | | |
|--|---|
| <p>* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :</p> <p>"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist</p> <p>"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist</p> <p>"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)</p> <p>"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht</p> <p>"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist</p> | <p>"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist</p> <p>"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden</p> <p>"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist</p> <p>"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist</p> |
|--|---|

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
25. September 2024	17/10/2024

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Eisner, Klaus
--	---

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2024/067117

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102017216458 A1	21-03-2019	DE 102017216458 A1	21-03-2019
		JP 7242642 B2	20-03-2023
		JP 2020534576 A	26-11-2020
		KR 20200054976 A	20-05-2020
		TW 201921033 A	01-06-2019
		US 2020206855 A1	02-07-2020
		WO 2019052790 A1	21-03-2019

DE 102008000790 A1	25-09-2008	DE 102008000790 A1	25-09-2008
		US 2010014065 A1	21-01-2010
		WO 2008113605 A2	25-09-2008

DE 102016210794 A1	27-04-2017	KEINE	
