(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
30. November 2023 (30.11.2023)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2023/227397 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G03F 7/00 (2006.01) *G02B 5/09* (2006.01)
G02B 27/09 (2006.01) *G02B 17/08* (2006.01)
G02B 27/10 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2023/062883

(22) Internationales Anmeldedatum:
15. Mai 2023 (15.05.2023)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2022 205 272.2
25. Mai 2022 (25.05.2022) DE

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

(72) Erfinder: **BEDER, Susanne**; Nachtigallweg 18, 73434 Aalen (DE). **BIELING, Stig**; Albatrosweg 46, 73434 Aalen (DE). **SCHWAB, Markus**; Gemsweg 2, 73434 Aalen (DE).

(74) Anwalt: **PATENTANWÄLTE RUFF, WILHELM, BEIER, DAUSTER & PARTNER MBB**; Kronenstraße 30, 70174 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, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY,

(54) **Title:** CATADIOPTRIC PROJECTION OBJECTIVE, PROJECTION ILLUMINATION SYSTEM AND PROJECTION ILLUMINATION METHOD

(54) **Bezeichnung:** KATADIOPTRISCHES PROJEKTIONSOBJEKTIV, PROJEKTIONSBELICHTUNGSANLAGE UND PROJEKTIONSBELICHTUNGSVERFAHREN

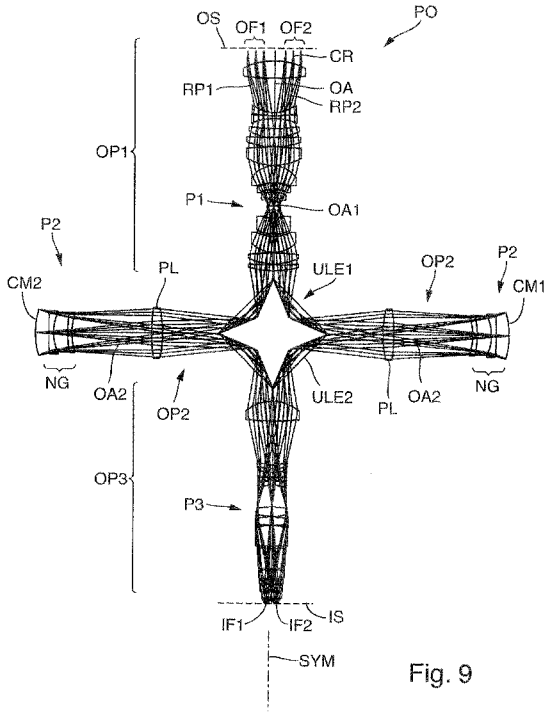


Fig. 9

(57) **Abstract:** A catadioptric projection objective for reproducing a pattern arranged in an object plane (OS) of the projection objective in an image plane of the projection objective parallel to the object plane comprises a plurality of optical elements, which comprise lenses and concave mirrors (CM) and are arranged between the object plane (OS) and the image plane (IS) along an optical axis (OA). The projection objective (PO) is designed as a double-field projection objective to reproduce a first effective object field (OF1) arranged outside the optical axis in the object plane along a first projection beam path in a first effective image field (IF1) lying outside the optical axis in the image plane and at the same time to reproduce a second effective object field (OF2), opposite the first object field in relation to the first optical axis, arranged outside the optical axis in the object plane along a second projection beam path (RP2) in a second effective image field (IF2) lying outside the optical axis in the image plane. Each of the projection beam paths has a first deflection unit (ULE1) for deflecting radiation coming from the object plane (OS) to a concave mirror and a second deflection unit (ULE2) for deflecting the radiation coming from the concave mirror in the direction of the image plane (IS). The optical elements form a first objective part (OP1) for reproducing each of the effective object fields (OF1, OF2) of the object plane in a first real intermediate image (IMI1), a second objective part (OP2) for generating a second real intermediate image (IMI2) with the radiation coming from the first objective part (OP1), and a third objective part (OP3) for reproducing the second real intermediate image (IMI2) in the image plane (IS). The concave mirror (CM) of a projection beam path is arranged in the region of a pupil surface (P2) lying between the first and the second intermediate image. The first deflection unit (FM1) is in the optical vicinity of the first intermediate image (IMI1)

WO 2023/227397 A1

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

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)*

and the second deflection unit (FM2) is in the optical vicinity of the second intermediate image (IMI2).

(57) Zusammenfassung: Ein katadioptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene (OS) des Projektionsobjektivs angeordneten Musters in eine zur Objektebene parallele Bildebene des Projektionsobjektivs umfasst eine Vielzahl optischer Elemente, die Linsen und Konkavspiegel (CM) umfassen und zwischen der Objektebene (OS) und der Bildebene (IS) entlang einer optischen Achse (OA) angeordnet sind. Das Projektionsobjektiv (PO) ist als Doppelfeld-Projektionsobjektiv dafür ausgebildet, ein außerhalb der optischen Achse in der Objektebene angeordnetes erstes effektives Objektfeld (OF1) entlang eines ersten Projektionsstrahlengangs (RP1) in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes erstes effektives Bildfeld (IF1) und zeitgleich ein dem ersten Objektfeld in Bezug auf die optische Achse gegenüberliegendes, außerhalb der optischen Achse in der Objektebene angeordnetes zweites effektives Objektfeld (OF2) entlang eines zweiten Projektionsstrahlengangs (RP2) in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes zweites effektives Bildfeld (IF2) abzubilden. Jeder der Projektionsstrahlengänge weist eine erste Umlenkeinheit (ULE1) zur Umlenkung der von der Objektebene (OS) kommenden Strahlung zu einem Konkavspiegel und eine zweite Umlenkeinheit (ULE2) zur Umlenkung der von dem Konkavspiegel kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene (IS) auf. Die optischen Elemente bilden einen ersten Objektivteil (OP1) zur Abbildung jedes der effektiven Objektfelder (OF1, OF2) der Objektebene in ein erstes reelles Zwischenbild (IMI1), einen zweiten Objektivteil (OP2) zur Erzeugung eines zweiten reellen Zwischenbildes (IMI2) mit der von dem ersten Objektivteil (OP1) kommenden Strahlung, sowie einen dritten Objektivteil (OP3) zur Abbildung des zweiten reellen Zwischenbildes (IMI2) in die Bildebene (IS). Im Bereich einer zwischen dem ersten und dem zweiten Zwischenbild liegenden Pupillenfläche (P2) ist der Konkavspiegel (CM) eines Projektionsstrahlengangs angeordnet. Die erste Umlenkeinheit (FM1) ist in optischer Nähe zum ersten Zwischenbild (IMI1) und der zweite Umlenkeinheit (FM2) ist in optischer Nähe zum zweiten Zwischenbild (IMI2) angeordnet.

Katadioptrisches Projektionsobjektiv, Projektionsbelichtungsanlage und Projektionsbelichtungsverfahren

ANWENDUNGSGEBIET UND STAND DER TECHNIK

Die folgende Offenbarung basiert auf der deutschen Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 10 2022 205 272.2, die am 25. Mai 2022 eingereicht wurde. Der Offenbarungsgehalt dieser Patentanmeldung wird durch Bezugnahme zum Inhalt der vorliegenden Anmeldung gemacht.

Die Erfindung bezieht sich auf ein katadioptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters in eine zur Objektebene parallele Bildebene des Projektionsobjektivs. Weiterhin bezieht sich die Erfindung auf eine Projektionsbelichtungsanlage mit einem solchen Projektionsobjektiv und auf ein mit Hilfe des Projektionsobjektivs durchführbares Projektionsbelichtungsverfahren.

Zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen werden heutzutage überwiegend mikrolithografische Projektionsbelichtungsverfahren eingesetzt. Dabei werden Masken (Retikel) verwendet, die das Muster einer abzubildenden Struktur tragen oder erzeugen, z.B. ein Linienmuster einer Schicht (layer) eines Halbleiterbauelementes. Das Muster wird in einer Projektionsbelichtungsanlage zwischen einem Beleuchtungssystem und einem Projektionsobjektiv im Bereich der Objektfläche des Projektionsobjektivs angeordnet und im Bereich des effektiven Objektfeldes mit einer vom Beleuchtungssystem bereitgestellten Beleuchtungsstrahlung beleuchtet. Die durch das Muster veränderte Strahlung läuft als Projektionsstrahlbündel durch das Projektionsobjektiv, welches das Muster im Bereich des zum effektiven Objektfeld optisch konjugierten effektiven Bildfeldes auf das zu belichtende Substrat abbildet. Das Substrat trägt normalerweise eine für die Projektionsstrahlung empfindliche Schicht (Fotoresist, Fotolack).

Bei der Auswahl geeigneter Projektionsbelichtungsanlagen und Verfahren für einen Lithographie-Prozess sind unterschiedliche technische und wirtschaftliche Kriterien zu berücksichtigen, die sich unter anderem an den typischen Strukturgrößen der innerhalb des belichteten Substrates zu erzeugenden Strukturen orientieren.

Für die Erzeugung relativ feiner, kritischer Strukturen werden Projektionsbelichtungsanlagen mit hochaperturigen Projektionsobjektiven genutzt, die typischerweise bei Arbeitswellenlängen im Bereich der tiefen Ultraviolettstrahlung (DUV) arbeiten, z.B. bei ca. 193 nm.

Für die Erzeugung mittelkritischer oder unkritischer Schichten mit typischen Strukturgrößen von deutlich mehr als 150 nm wird dagegen herkömmlich mit Projektionsbelichtungsanlagen gearbeitet, die für Arbeitswellenlängen von mehr als 200 nm ausgelegt sind. In diesem Wellenlängenbereich werden häufig rein refraktive (dioptrische) Reduktionsobjektive verwendet. Die optischen Elemente haben eine gemeinsame geradlinige optische Achse. Objektfeld und Bildfeld können zur optischen Achse zentriert sein (On-Axis Feld). Dadurch werden in bestimmten Fällen Belichtungen eines Vollfeldes im Stepper-Betrieb (step-and-repeat) möglich, wodurch hohe Durchsatzleistungen (komplette Belichtungen pro Zeiteinheit) begünstigt werden.

Seit langer Zeit sind hier Projektionsbelichtungsanlagen für eine Arbeitswellenlänge von 365,5 nm ± 2 nm (so genannte i-Linien-Systeme) im Einsatz. Sie nutzen die i-Linie von Quecksilberdampflampen, wobei deren natürliche Bandbreite mit Hilfe eines Filters oder auf andere Weise auf eine schmalere genutzte Bandbreite $\Delta\lambda$, z.B. von etwa 2 nm), eingeschränkt wird. Bei derartigen Lichtquellen wird bei der Projektion Ultraviolettlicht eines relativ breiten Wellenlängenbandes genutzt, so dass das Projektionsobjektiv eine relativ starke Korrektur von chromatischen Aberrationen leisten muss, um auch mit einem solch breitbandigen Projektionslicht bei der angestrebten Auflösung eine fehlerarme Abbildung zu gewährleisten.

Es wurde auch schon vorgeschlagen, für diesen Wellenlängenbereich katadioptrische Projektionsobjektive zu verwenden (vgl. DE 10 2006 022 958 A1), also Projektionsobjektive, die sowohl refraktive optische Elemente mit Brechkraft, also Linsen, als auch reflektive Elemente mit Brechkraft, also gekrümmte Spiegel enthalten. Typischerweise ist mindestens ein Konkavspiegel enthalten.

Soll ein katadioptrisches Projektionsobjektiv ohne polarisationsselektiven physikalischen Strahlteiler aufgebaut werden und keine Pupillenobskuration und keine Strahlvignettierung aufweisen, so muss bei rotationssymmetrischem Aufbau des Systems ein außeraxiales Feld (Off-Axis-Feld) verwendet werden, also eine Konfiguration, bei der das effektive Objektfeld und das effektive Bildfeld außerhalb der optischen Achse liegen.

Die Größe eines außeraxialen Feldes ist aufgrund von Geometrieforderungen und Performance beschränkt. Insbesondere ist ein Vollfeld (wie bei einem Stepper) nicht zu realisieren, so dass eine Belichtung im Scanbetrieb vorgenommen wird. Dabei ist höherer technologischer Aufwand erforderlich, um einen hohen Durchsatz zu erzielen.

Die meisten herkömmlichen Projektionsbelichtungsanlagen sind so ausgelegt, dass ein einziges effektives Objektfeld in ein einziges effektives Bildfeld abgebildet wird. Es gibt auch Ansätze, zeitglich zwei Strahlengänge zu nutzen, z.B. um den Durchsatz zu erhöhen.

Die Patentschrift US 8,634,060 B2 beschreibt eine Projektionsbelichtungsanlage, die zwei Masken und zwei Wafer gleichzeitig belichten kann. Das Licht einer einzigen Lichtquelle wird über einen schnellen optischen Schalter wechselweise durch zwei separate, zueinander identische Projektionssysteme geschickt, die jeweils ein Beleuchtungssystem und ein Projektionsobjektiv aufweisen.

Die US 2008/259440 A1 beschreibt eine Projektionsbelichtungsanlage, die mit zwei separaten Masken und zwei separaten Beleuchtungssystem arbeitet, wobei die Projektionsstrahlengänge im Projektionsobjektiv über ein Dreieckprisma zusammengeführt werden.

Die US 2010/0053738 (entsprechend US 8,705,170 B1) beschreibt Projektionsobjektive, die eine einzige Maske nutzen und im Projektionsobjektiv den Projektionsstrahlengang mit Hilfe von Umlenkspiegeln so verzweigen, dass zwei separate bildseitige Objektivteile entstehen, die zwei Bildfelder erzeugen, so dass zwei Wafer gleichzeitig belichtet werden können. Eine zeitgleich eingereichte Patentanmeldung (veröffentlicht als US 2010/0053583 A1) offenbart dazu passende Beleuchtungssysteme, die gleichzeitig an derselben Maske zwei separate, mit Abstand zueinander liegende Beleuchtungsfelder beleuchten können. Zur Aufspaltung des von der Lichtquelle kommenden Strahls sind diffraktive optische Elemente oder Prismen vorgesehen. Zur Homogenisierung der Beleuchtungsstrahlung sind Linsenarrays eines Wabenkondensors (fly eyes lens) vorgesehen.

Projektionsbelichtungsanlagen mit zwei Projektionsstrahlengängen sind z.B. in der Patentschrift US 8,384,875 B2 anhand schematischer Beispiele beschrieben. Zum Beleuchten der Maske sind zwei Beleuchtungssysteme vorgesehen, die voneinander separat aufgebaut oder in ein gemeinsames Beleuchtungssystem integriert sein können (Fig. 12). Es gibt auch schematische Beispiele für katadioptrische Projektionsobjektive. Spezifikationsdaten zum Nacharbeiten der Systeme sind nicht offenbart.

AUFGABE UND LÖSUNG

Vor diesem Hintergrund ist es eine Aufgabe der Erfindung, praktisch realisierbare Konzepte für katadioptrische Doppelfeld-Projektionsobjektive, eine damit ausgestattete

Projektionsbelichtungsanlage sowie damit durchführbare Projektionsbelichtungsverfahren bereitzustellen.

Diese Aufgabe wird, gemäß einer Formulierung der Erfindung, gelöst durch ein katadioptrisches Projektionsobjektiv mit den Merkmalen von Anspruch 1, eine Projektionsbelichtungsanlage mit den Merkmalen von Anspruch 13 und ein Projektionsbelichtungsverfahren mit den Merkmalen von Anspruch 15. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

Gemäß einer Formulierung der Erfindung wird ein katadioptrisches Projektionsobjektiv bereitgestellt, das eine Vielzahl optischer Elemente aufweist, die zwischen einer Objektebene und einer zur Objektebene parallelen Bildebene entlang einer optischen Achse angeordnet sind. Das Projektionsobjektiv ist als Doppelfeld-Projektionsobjektiv ausgelegt und dafür ausgebildet, ein außerhalb der optischen Achse in der Objektebene angeordnetes erstes effektives Objektfeld entlang eines ersten Projektionsstrahlengangs in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes erstes effektives Bildfeld und zeitgleich ein dem ersten Objektfeld in Bezug auf die optische Achse gegenüberliegendes, außerhalb der optischen Achse in der Objektebene angeordnetes zweites effektives Objektfeld entlang eines zweiten Projektionsstrahlengangs in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes zweites effektives Bildfeld abzubilden.

Jeder der Projektionsstrahlengänge umfasst eine erste Umlenkeinheit zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zu einem Konkavspiegel und eine zweite Umlenkeinheit zur Umlenkung der von dem Konkavspiegel kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene. Das Projektionsobjektiv weist somit mindestens zwei Konkavspiegel auf, vorzugsweise genau zwei Konkavspiegel, nämlich einen einzigen Konkavspiegel pro Projektionsstrahlengang.

Eine Besonderheit des Konzepts besteht darin, dass die optischen Elemente einen ersten Objektivteil zur Abbildung jedes der effektiven Objektfelder der Objektebene in ein erstes reelles Zwischenbild, einen zweiten Objektivteil zur Erzeugung eines zweiten reellen Zwischenbildes mit der von dem ersten Objektivteil kommenden Strahlung, sowie einen dritten Objektivteil zur Abbildung des zweiten reellen Zwischenbildes in die Bildebene bilden, dass im Bereich einer zwischen dem ersten und dem zweiten Zwischenbild liegenden Pupillenfläche der Konkavspiegel eines Projektionsstrahlengangs angeordnet ist, die erste Umlenkeinheit in

optischer Nähe zum ersten Zwischenbild und der zweite Umlenkeinheit in optischer Nähe zum zweiten Zwischenbild angeordnet ist.

Dieser Designansatz schafft die Möglichkeit, Projektionsobjektive aufzubauen, die bei insgesamt kompakten Baumassen mit zwei zeitgleich nutzbaren Feldern praktisch nutzbarer Größe arbeiten. Grundsätzlich ist die dimensionelle Auslegung der Umlenkeinheiten durch Randbedingungen erschwert. Wenn Umlenkflächen relativ groß ausgelegt werden können, ist eine vignettierungsfreie Umlenkung größerer Felder relativ einfach realisierbar, aber es ergibt sich meist eine erhebliche Baugröße. Wird die Baugröße klein gehalten, kann es sein, dass die reflektierenden Flächen zu klein für die Größe der zu projizierenden Felder werden, so dass die Gefahr von Vignettierung zunimmt. Die Bereitstellung von zwei Zwischenbildern schafft Bedingungen, um mit relativ kleinen Spiegelflächen praktisch nutzbare Feldgrößen von der Objektebene in die Bildebene zu projizieren bzw. abzubilden.

Die beiden Projektionsstrahlungsgänge können wahlweise bzw. alternativ zueinander genutzt werden. Insbesondere ist es möglich, die beiden außenaxialen effektiven Objektfelder gleichzeitig zu nutzen. Damit kann pro Zeiteinheit ein doppelt so großer Bereich des Substrats belichtet werden wie bei einem klassischen Projektionsobjektiv mit nur einem einzigen außenaxialen Objektfeld derselben Größe. Dadurch wird ein höherer Durchsatz als bei konventionellen off-axis-Projektionsobjektiven möglich.

Vorzugsweise umfassen die optischen Elemente eine Vielzahl von Linsen sowie zwei Konkavspiegel. Gemäß einer Weiterbildung sind mehrere Linsen entlang von ersten Abschnitten der optischen Achse angeordnet. Die ersten Abschnitte verlaufen koaxial zueinander und senkrecht zur Objektebene und Bildebene. Die Konkavspiegel sind auf gegenüberliegenden Seiten der ersten Abschnitte angeordnet und definieren quer zu den ersten Abschnitten orientierte zweite Abschnitte der optischen Achse. Die optische Achse ist somit gefaltet. Insgesamt besitzt das Projektionsobjektiv Rotationssymmetrie in Bezug auf die gefaltete optische Achse. Die ersten Abschnitte und die zweiten Abschnitte liegen in einer gemeinsamen Ebene, die hier als Achsenebene bezeichnet wird. Die optischen Elemente sind symmetrisch zu einer Symmetrieebene angeordnet und ausgebildet. Die Symmetrieebene verläuft senkrecht zur Achsenebene durch die ersten Abschnitte. Für jeden der Konkavspiegel ist eine erste Umlenkeinheit zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel und eine zweite Umlenkeinheit zur Umlenkung der von dem Konkavspiegel kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene vorgesehen. Die Umlenkeinheiten sind jeweils auf der dem zugeordneten Konkavspiegel zugewandten Seite der Symmetrieebene angeordnet.

Die Konkavspiegel können koaxial zueinander angeordnet sein, so dass die zweiten Abschnitte senkrecht zu den ersten Abschnitten orientiert sind. Das Projektionsobjektiv hat dann insgesamt eine kreuzförmige Anordnung optischer Elemente. Dabei liegen die beiden Konkavspiegel einander gegenüberliegend koaxial zueinander auf unterschiedlichen Seiten der Symmetrieebene.

Es ist auch möglich, dass die zweiten Abschnitte in einem von 90° abweichenden Winkel quer zu den ersten Abschnitten bzw. zu der Symmetrieebene orientiert sind, was z.B. aus Bauraumgründen zweckmäßig sein kann.

Eine Besonderheit besteht hierbei darin, dass die Umlenkeinheiten jeweils auf der dem zugeordneten Konkavspiegel zugewandten Seite der Symmetrieebene angeordnet sind. Dies ermöglicht es, dass im Projektionsobjektiv zwei Projektionsstrahlengänge genutzt werden können, die jeweils von einem außeraxialen effektiven Objektfeld zum dazu optisch konjugierten effektiven Bildfeld führen. Die beiden außeraxialen effektiven Objektfelder können symmetrisch zur Symmetrieebene mit Abstand zu dieser auf gegenüberliegenden Seiten angeordnet sein, entsprechendes gilt für die zugehörigen effektiven Bildfelder.

Es gibt im Stand der Technik zahlreiche Beispiele für katadioptrische Projektionsobjektive, bei denen die optische Achse einfach oder mehrfach um 90° gefaltet ist, um eine oder mehrere Konkavspiegel in einen Projektionsstrahlengang zwischen Objektebene und Bildebene so einzubinden, dass eine obskurationsfreie und vignettierungsfreie Abbildung möglich ist. Zur Faltung werden typischerweise Planspiegel (Faltspiegel) verwendet, die um 45° gegenüber einem eintrittsseitigen Abschnitt der optischen Achse geneigt sind, um mit einer einzigen Reflexion eine 90°-Faltung zu erreichen. Die konventionellen Planspiegel sind auf der dem Konkavspiegel abgewandten Seite der optischen Achse angeordnet.

Gemäß einer Weiterbildung wird dieser konventionelle Ansatz verlassen. Stattdessen ist vorgesehen, dass die erste Umlenkeinheit und die zweite Umlenkeinheit jeweils eine erste Reflexionsfläche und eine unmittelbar folgende zweite Reflexionsfläche aufweist, die gegenüber der Symmetrieebene um unterschiedliche Kippwinkel um orthogonal zu den ersten und zweiten Abschnitten verlaufende Kippachsen gekippt sind, wobei die erste Reflexionsfläche zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zur zweiten Reflexionsfläche und die zweite Reflexionsfläche zur Umlenkung der von der ersten Reflexionsfläche kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene angeordnet ist. Die Umlenkeinheiten sind also nicht als 45°-Planspiegel ausgelegt, sondern als zweistufig reflektierende Umlenkeinheiten, die die Veränderung der Strahlwinkel der auftreffenden Strahlung in zwei unmittelbar aufeinander

folgenden Stufen jeweils durch Reflexion vollziehen. „Unmittelbar" bedeutet in diesem Zusammenhang insbesondere, dass sich zwischen der ersten und der zweiten Reflexionsfläche kein anderes optisches Element befindet.

Die Umlenkeinheiten sind vorzugsweise jeweils auf der dem zugeordneten Konkavspiegel zugewandten Seite der Symmetrieebene angeordnet, also auf derselben Seite wie der zugehörige Konkavspiegel.

Die ersten und zweiten Reflexionsflächen einer Umlenkeinheit können insgesamt einen Faltwinkel von 90° realisieren, der für den kreuzförmigen Aufbau des Projektionsobjektives erforderlich ist. Die Faltwinkel können jedoch auch von 90° abweichen.

Die Kippwinkel der ersten Reflexionsflächen und der zweiten Reflexionsfläche sind vorzugsweise derart aneinander angepasst, dass ein parallel zur eintrittsseitigen optischen Achse auf die erste Reflexionsfläche auftretender Strahl an der ersten Reflexionsfläche und der zweiten Reflexionsfläche jeweils um denselben Winkel umgelenkt wird. Es kann z.B. eine Umlenkung um jeweils 45° vorgesehen sein, so dass insgesamt eine 90°-Umlenkung resultiert. Der Kippwinkel sei hier definiert als derjenige Winkel, den die Flächennormale einer Reflexionsfläche mit dem eintrittsseitigen Abschnitt der optischen Achse einschließt. Dementsprechend kann z.B. vorgesehen sein, dass der erste Kippwinkel 67,5° und der zweite Kippwinkel 22,5° beträgt. Es kann jedoch in manchen Fällen sinnvoll sein, die beiden Reflexionsflächen so zu kippen, dass sie einen umgelenkten Strahl unterschiedlich stark umlenken.

Die Reflexionsflächen können jeweils an einem gesonderten Einzelspiegel ausgebildet sein, die gegebenenfalls individuell relativ zueinander genau justiert werden können. Es ist auch möglich, zwei oder mehr Reflexionsflächen der Umlenkeinheiten an einen gemeinsamen Trägerelement auszubilden. Ein Trägerelement kann beispielsweise mit vier Dreiecksprismen aufgebaut sein. Die Dreiecksprismen können gemeinsam in der Mitte eines sternförmigen Querschnitts der Umlenkeinheit gefasst werden. Alternativ können alle für die Umlenkung notwendigen Reflexionsflächen kombiniert und als komplexes Prisma mit sternförmiger Seitenfläche ausgeführt werden. Das komplexe Prisma kann dabei zum Beispiel aus mehreren Einzelprismen bestehen, die aneinandergekittet oder angesprengt werden.

Die erste und die zweite Reflexionsflächen können jeweils eben sein, also als Planfläche ausgebildet sein. Im Rahmen der Fertigungstoleranzen können dabei Abweichungen von einer Ebene im Bereich von wenigen Prozent oder einigen Promille der Arbeitswellenlänge liegen. Es

können jedoch auch gezielt größere Abweichungen der Flächenform von einer ebenen Fläche vorgesehen sein, beispielsweise um gewisse Einflüsse auf die Form der Wellenfront zu erzielen.

Die Zwischenbilder liegen in oder nahe bei zur Objektebene und Bildebene optisch konjugierten Feldebenen des Projektionsobjektivs. Die erste Umlenkeinheit ist in optischer Nähe einer ersten Feldebene und die zweite Umlenkeinheit in optischer Nähe einer zur ersten Feldebene optisch konjungierten zweiten Feldebene angeordnet. Durch eine feldnahe Anordnung kann unter anderem erreicht werden, dass zur Umlenkung genutzte Reflexionsflächen jeweils relativ klein gehalten werden können, so dass auch eine kompakte Baugröße einer Umlenkeinheit möglich ist. Vorzugsweise sind die erste Umlenkeinheit und die zweite Umlenkeinheit in einen Bereich angeordnet, in dem ein Subaperturverhältnis SAR dem Betrage nach kleiner als 0.3 ist. Insbesondere kann das Zwischenbild zwischen den beiden Einzelspiegeln der Umlenkeinheit angeordnet sein.

Der erste Objektivteil sollte möglichst nicht oder nicht stark vergrößernd wirken, so dass die Größe des ersten Zwischenbildes diejenige des effektiven Objektfeldes nicht oder nicht wesentlich übersteigt. Gemäß einer Weiterbildung ist vorgesehen, dass der erste Objektivteil einen ersten Abbildungsmaßstab $ß_1$ aufweist, für den die Bedingung $0{,}5 \leq |ß_1| \leq 2{,}0$ gilt. Bei Einhaltung dieser Bedingungen kann erreicht werden, dass mit relativ klein dimensionierten Spiegelflächen einer Umlenkeinheit eine praktisch nutzbare, ausreichend große Feldgröße komplett und damit vignettierungsfrei übertragen bzw. transportiert werden kann. Wird die untere Grenze deutlich unterschritten, so dass der erste Objektivteil zu stark verkleinernd wirkt, so können im Bereich der Umlenkeinheit relativ hohe Aperturwinkel auftreten, so dass die Umlenkung mit hinreichend kleinen Spiegelflächen nicht oder nur bei sehr kleinen Feldgrößen realisiert werden kann. Wird andererseits die Obergrenze überschritten, so dass der erste Objektivteil zu stark vergrößernd wirkt, so sinken zwar die Aperturwinkel an der Umlenkeinheit, diese muss jedoch relativ großflächig dimensioniert werden, um das relativ große Zwischenbild komplett reflektieren zu können. Der erste Objektivteil kann als 1:1-System ausgelegt sein, in der Regel sollte die Vergrößerung den Faktor 1,2 nicht übersteigen. Der Betrag des Abbildungsmaßstabs ß1 des ersten Objektivteils kann somit insbesondere im Bereich von 1,2 oder weniger liegen. Dann kann eine zweistufige Umlenkung in einen besonders kompakten Bauraumbereich realisiert werden.

Gemäß einer anderen Formulierung ist vorzugsweise vorgesehen, dass das Projektionsobjektiv einen verkleinernden Abbildungsmaßstab aufweist und dass der erste Objektivteil maximal die Hälfte der Verkleinerung erzeugt.

Das Projektionsobjektiv ist als Scanner-System ausgelegt. Beim Scannen wird zu jedem Zeitpunkt nur ein Teil des Objektfeldes durch das Projektionsobjektiv abgebildet. Es ist daher zur Durchführung eines einzigen Belichtungsschritts eine Scanbewegung erforderlich, in der nebeneinanderliegende Abschnitte des Retikels sukzessive auf das Substrat übertragen werden.

Um das komplette Muster eines 6"-Retikels in einem einzigen Belichtungsschritt mit Scannen zu übertragen, sollte das effektive Objektfeld eine Breite von 104 mm haben. Gemäß einer Weiterbildung ist das Projektionsobjektiv mit einem Objektfeldradius OBH von mindestens 107 mm ausgelegt. Das Projektionsobjektiv kann so ausgelegt sein, dass jedes der effektiven Objektfelder die Größe 104mm x 56mm haben und mit einem Abstand von 38 mm zur optischen Achse liegen kann.

Manche Ausführungsformen sind dadurch gekennzeichnet, dass eine bildseitige numerische Apertur kleiner als 0,5 ist, wobei die numerische Apertur vorzugsweise im Bereich von 0,2 bis 0,4 liegt.

Die Erfindung betrifft auch ein Projektionsbelichtungsverfahren zur Belichtung eines im Bereich einer Bildebene eines Projektionsobjektivs angeordneten, strahlungsempfindlichen Substrats mit mindestens einem Bild eines im Bereich einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer Maske, bei dem ein Projektionsobjektiv gemäß der Erfindung verwendet wird.

Weiterhin betrifft die Erfindung eine Projektionsbelichtungsanlage zur Belichtung eines im Bereich einer Bildebene eines Projektionsobjektivs angeordneten, strahlungsempfindlichen Substrats mit mindestens einem Bild eines im Bereich einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer Maske umfassend: eine primäre Strahlungsquelle zur Abgabe von Primärstrahlung; ein Beleuchtungssystem zum Empfang der Primärstrahlung und zur Erzeugung von auf die Maske gerichteter Beleuchtungsstrahlung; und ein Projektionsobjektivs zur Erzeugung mindestens eines Bildes des Musters im Bereich der Bildebene des Projektionsobjektivs, wobei das Projektionsobjektiv gemäß der Erfindung ausgestaltet ist.

Mithilfe des Projektionsobjektivs ist ein gleichzeitiges Scannen zweier benachbarter Dies möglich. Es kann auch eine Doppelbelichtung ausgeführt werden.

Die Projektionsbelichtungsanlage umfasst vorzugsweise eine zentrale Steuereinheit zur Steuerung von Funktionen der Projektionsbelichtungsanlage, wobei die Steuereinrichtung in wenigstens einem Betriebsmodus dazu konfiguriert ist, das Beleuchtungssystem und das Projektionsobjektiv derart zu betreiben, dass mit dem Doppelfeld zwei benachbarte Dies gleichzeitig gescannt werden. In einem anderen Betriebsmodus kann eine Doppelbelichtung ausgeführt werden.

Zweistufig reflektierende Umlenkeinheiten der in dieser Anmeldung beschriebenen Art können auch unabhängig von der beanspruchten Erfindung mit Vorteil genutzt werden, z.B. auch im katadioptrischen Projektionsobjektiven mit Einfachfeld, also mit nur einem einzigen effektiven Objektfeld. Die Offenbarung betrifft somit auch ein katadioptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters in eine zur Objektebene parallele Bildebene des Projektionsobjektivs umfassend eine Vielzahl optischer Elemente, die mehrere Linsen und einen Konkavspiegel umfassen und zwischen der Objektebene und der Bildebene entlang einer optischen Achse angeordnet sind, um ein außerhalb der optischen Achse in der Objektebene angeordnetes effektives Objektfeld entlang eines Projektionsstrahlengangs in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes effektives Bildfeld abzubilden, wobei im Projektionsstrahlengang wenigstens eine zweistufig reflektierende Umlenkeinheit angeordnet ist, die eine erste Reflexionsfläche und eine unmittelbar folgende zweite Reflexionsfläche aufweist, wobei die erste Reflexionsfläche zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zur zweiten Reflexionsfläche und die zweite Reflexionsfläche zur Umlenkung der von der ersten Reflexionsfläche kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene angeordnet ist.

Insbesondere kann es so sein, dass im Projektionsstrahlengang eine erste Umlenkeinheit zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zu dem Konkavspiegel und eine zweite Umlenkeinheit zur Umlenkung der von dem Konkavspiegel kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene angeordnet ist, wobei die erste Umlenkeinheit und/oder die zweite Umlenkeinheit als zweistufig reflektierende Umlenkeinheit ausgebildet ist.

Es ist möglich, dass sowohl die erste Umlenkeinheit als auch die zweite Umlenkeinheit jeweils als zweistufig reflektierende Umlenkeinheit ausgebildet ist. Es ist auch möglich, dass nur eine der Umlenkeinheiten als zweistufig reflektierende Umlenkeinheit und die andere Umlenkeinheit als Planspiegel ausgebildet ist, wobei die erste Umlenkeinheit oder die zweite Umlenkeinheit als zweistufig reflektierende Umlenkeinheit ausgebildet sein kann.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Weitere Vorteile und Aspekte der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen und aus der Beschreibung von Ausführungsbeispielen der Erfindung, die nachfolgend anhand der Figuren erläutert sind.

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer Projektionsbelichtungsanlage gemäß einem Ausführungsbeispiel;

Fig. 2 zeigt eine schematische Draufsicht auf die Objektebene des Projektionsobjektivs mit zwei effektiven off-axis Objektfeldern;

Fig. 3 zeigt eine schematische Übersichtsdarstellung eines ersten Ausführungsbeispiels für ein Doppelfeld-Beleuchtungssystem mit einer Integratorstab-Anordnung;

Fig. 4 zeigt die Integratorstab-Anordnung aus Fig. 3 im Detail;

Fig. 5A bis 5D zeigen Varianten von Integratorstab-Anordnungen anderer Ausführungsbeispiele;

Fig. 6 zeigt eine Integratorstab-Anordnung mit zwei sich verjüngenden Ausgangs-Integratorstäben;

Fig. 7 zeigt eine schematische Übersichtsdarstellung eines Ausführungsbeispiels für ein Doppelfeld-Beleuchtungssystem mit Rasterelementen in einer Homogenisierungseinheit;

Fig. 8 zeigt die Homogenisierungseinheit auf Fig. 7 im Detail.

Fig. 9 zeigt einen schematischen meridionalen Linsenschnitt eines Projektionsobjektivs gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel;

Fig. 10 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Bereichs der Umlenkeinheiten in dem Projektionsobjektiv von Fig. 9;

Fig. 11A bis 11C zeigen drei Faltungssituationen im Vergleich;

Fig. 12A bis 12B zeigen eine Variante des Scannens mit Einzelfeld;

Fig. 13A bis 13B zeigen eine Variante des Scannens mit Doppelfeld;

Fig. 14 zeigt einen schematischen meridionalen Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs mit zwei Zwischenbildern, einem Konkavspiegel, einer zweistufig reflektierenden Umlenkeinheit und einer einstufigen Umlenkeinheit.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

In der folgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen bezeichnet der Begriff „optische Achse" eine gerade Linie oder eine Folge von geraden Linienabschnitten durch die Krümmungsmittelpunkte der optischen Elemente. Die optische Achse wird an Faltungsspiegeln (Umlenkspiegeln) oder anderen reflektierenden Flächen gefaltet. Das Objekt ist in den Beispielen eine Maske (Retikel) mit dem Muster einer integrierten Schaltung, es kann sich auch um ein anderes Muster, beispielsweise eines Gitters, handeln. Das Bild wird in den Beispielen auf einen mit einer Photoresistschicht versehenen Wafer projiziert, der als Substrat dient. Es sind auch andere Substrate, beispielsweise Elemente für Flüssigkeitskristallanzeigen oder Substrate für optische Gitter möglich.

In Fig. 1 ist ein Beispiel einer Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage PBA gezeigt, die bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen einsetzbar ist und zur Erzielung von Auflösungen bis zu Bruchteilen von Mikrometern mit Licht bzw. elektromagnetischer Strahlung aus dem Ultraviolettbereich (UV) arbeitet. Als primäre Strahlungsquelle bzw. Lichtquelle LS dient eine Quecksilberdampflampe. Diese emittiert ein breites Spektrum mit Emissionslinien relativ starker Intensität I in Wellenlängenbereichen mit Schwerpunktwellenlängen bei ca. 436 nm (sichtbares Licht, blau, g-Linie), ca. 405 nm (sichtbares Licht, violett, h-Linie) und ca. 365,5 nm (nahes Ultraviolett, UV-A, i-Linie).

Die Projektionsbelichtungsanlage ist ein i-Linien-System, das nur das Licht der i-Linie nutzt, also UV-Licht um eine zentrale Arbeitswellenlänge von ca. 365,5 nm. Die natürliche volle Bandbreite der i-Linie wird mit Hilfe eines Filters oder auf andere Weise auf eine schmalere genutzte Bandbreite $\Delta\lambda$, z.B. von etwa 2 nm, eingeschränkt.

Ein der Lichtquelle LS nachgeschaltetes Beleuchtungssystem ILL erzeugt in seiner Austrittsfläche ES aus dem Licht dieser einzigen primären Lichtquelle zwei große, jeweils scharf begrenzte und im Wesentlichen homogen ausgeleuchtete Beleuchtungsfelder ILF1, ILF2 mit Strahlwinkeln, die an die Telezentrie-Erfordernisse des im Lichtweg dahinter angeordneten Projektionsobjektivs PO angepasst ist.

Diejenigen optischen Komponenten, die das Licht der Lichtquelle LS empfangen und aus dem Licht Beleuchtungsstrahlung formen, die auf das Retikel M gerichtet ist, gehören zum Beleuchtungssystem ILL der Projektionsbelichtungsanlage. Das Beleuchtungssystem ist ein Doppelfeld-Beleuchtungssystem. Ausführungsbeispiele werden weiter unten im Zusammenhang der Fig. 3 bis 8 erläutert.

Das Beleuchtungssystem ILL hat Einrichtungen zur Einstellung unterschiedlicher Beleuchtungsmodi (Beleuchtungs-Settings) und kann beispielsweise zwischen konventioneller on-axis-Beleuchtung mit unterschiedlichem Kohärenzgrad σ und außeraxialer Beleuchtung (off-axis illumination) umgeschaltet werden.

Hinter dem Beleuchtungssystem ist eine Einrichtung RS zum Halten und Manipulieren der Maske M (Retikel) so angeordnet, dass das am Retikel angeordnete Muster in der Objektebene OS des Projektionsobjektives PO liegt, welche mit der Austrittsebene ES des Beleuchtungssystems zusammenfällt und hier auch als Retikelebene OS bezeichnet wird.

Das zu belichtende Substrat, bei dem es sich im Beispielsfall um einen Halbleiterwafer W handelt, wird durch eine Einrichtung WS gehalten, die einen Scannerantrieb umfasst, um den Wafer synchron mit dem Retikel M senkrecht zur optischen Achse OA in einer Scanrichtung (y-Richtung) zu bewegen. Die Einrichtung WS, die auch als „Waferstage" bezeichnet wird, sowie die Einrichtung RS, 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 PBA integriert ist.

Fig. 2 zeigt eine schematische Draufsicht auf die Objektebene OS des Projektionsobjektivs PO (entsprechend der Austrittsebene ES des Beleuchtungssystems). Wie dort beispielhaft dargestellt ist, beleuchtet das Beleuchtungssystem ILL mit dem Licht der Lichtquelle in der Austrittsebene (Retikelebene, Objektebene des Projektionsobjektivs) zwei außeraxiale Beleuchtungsfelder ILF1, ILF2. Diese sind jeweils rechteckig, können scharf oder weich begrenzt sein und sind im Wesentlichen homogen ausgeleuchtet. Jedes der Beleuchtungsfelder definiert ein bei der Projektionsbelichtung tatsächlich genutztes effektives Objektfeld, so dass in der Retikelebene ein erstes effektives Objektfeld OF1 und ein zweites effektive Objektfeld OF2 liegen. Die beiden nominell identisch dimensionierten, rechteckigen effektiven Objektfelder liegen in y-Richtung auf gegenüberliegenden Seiten der optischen Achse OA jeweils mit Abstand außerhalb der optischen Achse und haben eine parallel zur y-Richtung gemessene

Höhe A* und eine senkrecht dazu (in x-Richtung bzw. cross-scan-Richtung) gemessene Breite B* > A*. Das Aspektverhältnis AR = B*/A* kann z.B. bei 2, 2,5, 3, 5, 10 oder 15 liegen.

Die effektiven (d.h. für die Abbildung tatsächlich genutzten) Rechteckfelder haben im Beispielsfall jeweils eine Breite B* = 104 mm und eine Höhe A* = 56 mm. Ein Abstand ABF zwischen korrespondierenden Feldrändern in y-Richtung (Feldabstand) beträgt das Doppelte des Abstand d* eines Feldes zur optischen Achse, also 2x38mm, zuzüglich einer Feldhöhe (56 mm), also 132 mm. Der Kreis OBC ergibt sich aus dem Rechteck mit den Seiten B* (=104 mm) in x-Richtung und 2* (A* + d*) (= 188 mm) in y-Richtung (Scanrichtung).

Der zur optischen Achse OA zentrierte Kreis OBC, der die effektiven Objektfelder OF1, OF2 umschließt und deren Ecken tangiert, gibt in dem rotationssymmetrischen System die Größe des Objektfeldkreises an, innerhalb dessen die optische Korrektur an allen Feldpunkten der Spezifikation entsprechen muss. Das trifft dann auch für alle Feldpunkte in den effektiven Objektfeldern zu. Die Korrektur von Aberrationen wird aufwändiger, je größer dieses Objektfeld sein muss. Die Größe des Kreises wird hier durch den Objektfeldradius OBH bzw. den halben Objektfelddurchmesser OBH parametrisiert, der gleichzeitig der maximalen Feldhöhe eines Objektfeldpunkts entspricht. Die Objektfeldhöhe OBH beträgt ca. 107 mm.

Die zu den effektiven Objektfeldern OF1, OF2 optisch konjugierten effektiven Bildfelder IF1, IF2 in der Bildfläche IS haben die gleiche Form und das gleiche Aspektverhältnis zwischen Höhe A und Breite B wie die zugehörigen effektiven Objektfelder, die absolute Feldgröße ist jedoch bei verkleinernd wirkenden Projektionsobjektiven (mit ($|ß| < 1$) um den Abbildungsmaßstab ß des Projektionsobjektivs reduziert, d.h. $A = |ß|\ A^*$ und $B = |ß|\ B^*$.

Ein in Scanrichtung (y-Richtung) gemessener Abstand ABF (Feldabstand) zwischen den jeweils in y-Richtung an der gleichen Seite liegenden Kanten der effektiven Objektfelder ist so gewählt, dass der entsprechende Abstand zwischen zueinander korrespondierenden längeren Kanten der effektiven Bildfelder IF1, IF2 genau der Länge eines zu belichtenden „Dies“ beträgt. Diese Länge beträgt im aktuellen Standard 33 mm. Der Begriff „Die“ bezeichnet in der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik ein einzelnes ungehäustes Stück eines Halbleiter-Wafers, als einen einzelnen Halbleiterchip ohne Gehäuse bzw. Package.

Die Fig. 3 ist eine schematische Übersichtsdarstellung eines ersten Ausführungsbeispiels für ein Beleuchtungssystem ILL. Als primäre Lichtquelle LS dient eine Quecksilberdampflampe mit einem Kollektorspiegel, der das Licht gesammelt in eine Eintrittsöffnung des

Beleuchtungssystems reflektiert. Eine nicht dargestellte Alternative nutzt als Lichtquelle einen Laser, z.B. einen frequenzverdreifachten Festkörperlaser mit ca. 355 nm Wellenlänge.

Der primären Lichtquelle folgt eine Pupillenformungseinheit PFU, die ausschließlich mit refraktiven optischen Komponenten aufgebaut ist und dazu ausgelegt ist, in einer nachfolgenden Pupillenfläche PUP des Beleuchtungssystems ILL eine definierte, örtliche (zweidimensionale) Intensitätsverteilung zu erzeugen, die manchmal auch als sekundäre Lichtquelle oder als Beleuchtungspupille bezeichnet wird. Da durch diese örtliche Intensitätsverteilung wesentliche Eigenschaften der Beleuchtungsstrahlung beeinflusst werden bzw. geformt werden, wird diese Pupillenfläche auch als Pupillenformungsfläche PUP bezeichnet.

Die Pupillenformungseinheit PFU kann variabel einstellbar sein, so dass in Abhängigkeit von der Ansteuerung von optischen Komponenten der Pupillenformungseinheit unterschiedliche lokale Beleuchtungsintensitätsverteilungen in der kreisförmigen Beleuchtungspupille eingestellt werden können, beispielsweise ein konventionelles Beleuchtungssetting mit um die optische Achse AX zentriertem, kreisförmigem Beleuchtungsfleck, eine Dipolbeleuchtung oder eine Quadrupolbeleuchtung.

Der Pupillenformungseinheit PFU ist ein refraktives Feldformungssystem FFS optisch nachgeschaltet. Diese enthält die optischen Komponenten, die aus dem Licht der Pupillenformungsfläche die Beleuchtungsintensitätsverteilung in der Austrittsfläche ES des Beleuchtungssystems formen. Das Feldformungssystem FSF umfasst eine Homogenisierungseinheit HOM zur Homogenisierung des von der Pupillenformungseinheit empfangenen Lichts. Die Homogenisierungseinheit hat eine Doppelfunktion, da die optischen Komponenten außerdem so ausgelegt sind, dass das Beleuchtungslicht in ein erstes Beleuchtungsstrahlbündel BS1 und ein zweites Beleuchtungsstrahlbündel BS2 aufgeteilt wird, die mit gegenseitigem Abstand zueinander auf die Austrittsebene treffen. Das Feldformungssystem FFS umfasst eine Einkoppeloptik EK, die das von der Pupillenformungsfläche kommende Licht sammelt und in eine Eintrittsfläche EF1 einer Integratorstabanordnung ISA einkoppelt. Diese ist in Fig. 4 vergrößert dargestellt.

Die Integratorstabanordnung ISA umfasst einen Eingangs-Integratorstab IE, der eine ebene Eintrittsfläche EF1, parallel dazu eine ebene Austrittsfläche EF2 und vier ebene Seitenflächen hat, die einen Rechteck-Querschnitt bilden. Der Eingangs-Integratorstab besteht aus einem für das Beleuchtungslicht transparenten Material. Das Licht wird innerhalb des Eingangs-Integratorstabs durch mehrfache innere Reflexion an den unbeschichteten oder gegebenenfalls

beschichteten Mantelflächen (Seitenflächen) des Integratorstabs gemischt und dadurch homogenisiert und tritt an der Austrittsfläche AF1 wenigstens teilweise homogenisiert aus. Der Eingangs-Integratorstab hat einen durchgängig rechteckigen Querschnitt und definiert eine Längsmittelachse, die auf der optischen Ache AX des Beleuchtungssystems liegt.

Die Integratorstab-Anordnung umfasst weiterhin einen ersten Ausgangs-Integratorstab IA1 sowie einen zweiten Ausgangs-Integratorstab IA2, die jeweils eine Eintrittsfläche EF2-1 bzw. EF2-2 und eine Austrittsfläche AF2-1 bzw. AF2-2 haben. Die beiden Ausgangs-Integratorstäbe IA1 und IA2 haben jeweils rechteckige Querschnittsform und eine Querschnittsfläche, die im Wesentlichen halb so groß ist wie die Querschnittsfläche des Eingangs-Integratorstabs IE.

Die Ausgangs-Integratorstäbe IA1, IA2 sind mit Abstand zur optischen Achse AX des Beleuchtungssystems auf diametral gegenüberliegenden Seiten angeordnet. Der erste Ausgangs-Integratorstab IA1 ist optisch an eine erste Teilfläche TF1 der Austrittsfläche des Eingangs-Integratorstabs angekoppelt in der Weise, dass Licht, welches durch die erste Teilfläche TF1 austritt, ausschließlich in den ersten Ausgangs-Integratorstab IA1 eintritt. Entsprechendes gilt für die gegenüberliegende Seite, wo das Licht aus der Teilfläche TF2 in den zweiten Ausgangs-Integratorstab IA2 eintritt.

Zwischen dem Eingangs-Integratorstab IE und den beiden Ausgangs-Integratorstäben IA1, IA2 sind zwei Prismen P1 bzw. P2 einer Prismenanordnung PA angeordnet. Das erste Prisma P1 hat eine rechteckförmige, ebene Eintrittsfläche, die unter Zwischenschaltung eines Luftspalts LS direkt an die erste Teilfläche TF1 folgt und die aus dieser Teilfläche austretende Strahlung empfängt. Die ebene Austrittsfläche hat die gleiche Größe und steht unter Zwischenschaltung eines Luftspalts unmittelbar vor der Eintrittsfläche des ersten Ausgangs-Integratorstabs IA1. Das Prisma hat weiterhin zwei in 45°-Winkel schräg zu den Eintritts- und Austrittsflächen orientierte ebene Seitenflächen, die jeweils eine reflektive Beschichtung tragen. Sie können beispielsweise durch Aufbringen einer Aluminiumschicht oder einer dielektrischen Beschichtung verspiegelt sein.

Durch die zweifache Umlenkung an parallel zueinander versetzten Spiegelflächen eines Prismas wird das aus einer Teilfläche TF austretende Licht in eine weiter von der optischen Achse entfernte Position umgelenkt. Jedes der Prismen koppelt somit einen der Ausgangs-Integratorstäbe IA1, IA2 optisch an eine zugeordnete Teilfläche TF1, TF1 der Austrittsfläche AF1 des Eingangs-Integratorstabs an und führt das Licht von einer achsnahen Position in eine achsferne Lage.

Durch diese Anordnung wird das in den Eingangs-Integratorstab IE eintretende Licht im Wesentlichen zu gleichen Teilen auf die Austrittsfläche AF2-1 des ersten Ausgangs-Integratorstabs und die Austrittsfläche AF2-2 des zweiten Ausgangs-Integratorstabs gleichmäßig aufgeteilt und gleichzeitig sowohl im Eingangs-Integratorstab als auch in den Ausgangs-Integratorstäben durch mehrfache innere Reflexion gemischt.

Unmittelbar am Austritt des ersten Ausgangs-Integratorstabs IA1 liegt eine Zwischenfeldebene ZE des Beleuchtungssystems. Dort ist eine verstellbare Feldblende BL1 angeordnet, die es erlaubt, die tatsächlich nutzbare Feldgröße des ersten Beleuchtungsfeldes IF1 stufenlos einzustellen. Eine entsprechende zweite Feldblende BL2 ist am Austritt des zweiten Ausgangs-Integratorstabs angeordnet.

Ein nachfolgendes Objektiv REMA, das auch als REMA-Objektiv bezeichnet wird, bildet die Zwischenfeldebene des Retikel-Masken-Systems auf die Austrittsebene des Beleuchtungssystems bzw. die Objektebene des folgenden Projektionsobjektivs ab. Dort erzeugt das erste Beleuchtungsstrahlbündel das erste Beleuchtungsfeld ILF1 auf einer Seite der optischen Achse AX, während das zweite Beleuchtungsfeld ILF2 mit Abstand von der optischen Achse gegenüberliegend mithilfe des zweiten Beleuchtungsstrahlbündels SB2 beleuchtet wird.

Die Fig. 5A bis 5C zeigen einige Varianten dieses Grundkonzepts. Die Variante von Fig. 5A unterscheidet sich vom Beispiel der Fig. 4 dadurch, dass die dortigen Prismen P1 bzw. P2 durch jeweils ein Paar von Dreiecksprismen ersetzt werden. Die Hypotenusenflächen der Dreiecksprismen sind jeweils verspiegelt, die Eintritts- und Austrittsflächen sind eben und grenzen über einen Luftspalt hinweg an ein vorgeschaltetes bzw. nachgeschaltetes Element an.

Fig. 5B veranschaulicht, dass zwischen dem Eingangs-Integratorstab IE und den beiden Ausgangs-Integratorstäben IA1, IA2 jeweils auch ein weiterer Integratorstab ISW1, ISW2 integriert sein kann.

Fig. 5C und Fig. 5D veranschaulichen, dass die Prismenanordnung PA, die zur Aufteilung in zwei Beleuchtungsstrahlgänge führt, nicht zwingend unmittelbar an die Austrittsseite des Eintritts-Integratorstabs angekoppelt sein muss. Vielmehr können weitere Umlenkelemente und/oder Integratorstabelemente zwischengeschaltet sein.

Bei dem Ausführungsbeispiel von Fig. 6 gibt es keine zwischen dem Eingangs-Integratorstab IE und die beiden Ausgangs-Integratorstäbe IA1 bzw. IA2 zwischengeschaltete Prismen und/oder

andere optische Elemente. Bei diesem Ausführungsbeispiel sind beide Ausgangs-Integratorstäbe jeweils als sogenannter „tapered integrator" ausgebildet. Bei jedem der Ausgangs-Integratorstäbe IA1, IA2 entspricht die Größe der rechteckförmigen Eintrittsfläche EF1, EF2 im Wesentlichen der Hälfte der Fläche Austrittsfläche AF1 des Eingangs-Integratorstabs IE, so dass das jeweils aus der zugeordneten Teilfläche austretende Licht vollständig in den Ausgangs-Integratorstab eingekoppelt wird. Während jedoch in den vorherigen Beispielen die Integratorstäbe jeweils konstante Querschnittsform und Querschnittsgröße über ihre Länge haben, verändert sich die Querschnittsfläche der Ausgangs-Integratoren im Beispiel von Fig. 6 zwischen Eintrittsfläche und Austrittsfläche kontinuierlich, so dass die beiden Austrittsflächen AF2-1 und AF2-2 mit Abstand zur optischen Achse jeweils diametral zu dieser gegenüberliegend angeordnet sind. Durch die Erhöhung der Winkel beim Durchtritt durch die verjüngten Integratorstäbe wird gegebenenfalls am Eintritt des Eingangs-Integratorstabs eine andere Ausleuchtung benötigt und die Stabausleuchtung wird angepasst, so dass keine Verletzung der Lichtleitwert-Erhaltung eintritt.

Anhand der Fig. 7 ff. wird nun ein anderes Ausführungsbeispiel eines Beleuchtungssystems ILL beschrieben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit tragen funktionelle Gruppen, die ähnliche oder entsprechende Funktion haben wie beim ersten Ausführungsbeispiel, entsprechende Bezeichnungen. Ein wesentlicher Unterschied zu den vorherigen Ausführungsbeispielen besteht in Aufbau und Arbeitsweise der Homogenisierungseinheit HOM, die im Wesentlichen mithilfe eines modifizierten Wabenkondensors aufgebaut ist. Details über Aufbau und Funktion sind aus Fig. 8 ersichtlich.

Die Homogenisierungseinheit HOM umfasst eine erste Rasteranordnung RA1 mit einer Vielzahl erster refraktiver Rasterelemente RE1, die das Licht der zweidimensionalen Intensitätsverteilung der Pupillenformungsfläche PUP empfangen und daraus eine Rasteranordnung sekundärer Lichtquellen SL1, SL2 etc. erzeugen, die etwa im Abstand der Brennweite F1 der ersten Rasterelemente RE1 hinter diesen entstehen. Auf diese Weise wird das von der Pupillenformungsfläche kommende Beleuchtungsstrahlbündel in eine Vielzahl optischer Kanäle zerlegt, wobei jedes ausgeleuchtete erste Rasterelement und die zugehörige sekundäre Lichtquelle zu einem eigenen optischen Kanal gehören.

Es gibt eine zweite Rasteranordnung RA2 mit zweiten refraktiven Rasterelementen RA2, die optisch hinter der ersten Rasteranordnung etwa im Bereich der sekundären Lichtquellen SL1 etc. angeordnet ist und dazu dient, Licht der jeweiligen optischen Kanäle bzw. der sekundären Lichtquellen aufzunehmen und dazu beizutragen, das aus unterschiedlichen optischen Kanälen kommende Licht im Bereich der Austrittsebene bzw. Bildebene des Beleuchtungssystems ILL

wenigstens teilweise zu überlagern. Diese Überlagerung bewirkt eine Homogenisierung bzw. Vergleichmäßigung der Lichtintensität in der Austrittsebene.

Die Querschnittsfläche bzw. Apertur der ersten Rasterelemente RE1 bestimmt die Gestalt der ausgeleuchteten Beleuchtungsfelder und ist im Beispielsfall rechteckig. Die ersten Rasterelemente RE1 werden auch als Feldwaben bezeichnet.

Die zweiten Rasterelemente RE2 werden auch als Pupillenwaben bezeichnet und sind in der Nähe der jeweiligen sekundären Lichtquellen angeordnet. Sie bilden die ersten Rasterelemente RE1 über eine nachgeschaltete Feldlinse auf eine Zwischenfeldebene FE des Beleuchtungssystems ab. Diese wird dann, wie im obigen Beispiel, in die Austrittsebene des Beleuchtungssystems abgebildet.

Eine Besonderheit dieser Homogenisierungseinheit besteht darin, dass zwar jedes der ersten Rasterelemente RE1 (wie bei einem herkömmlichen Wabenkondensor) einen zu der sekundären Lichtquelle gehörenden optischen Kanal erzeugt.

Allerdings ist jedes der zweiten Rasterelemente RE2 nicht nur einem ersten Rasterelement zugeordnet, sondern zwei unmittelbar benachbarten ersten Rasterelementen, z.B. den Rasterelementen RE1-1 und RE1-2. Die zweiten Rasterelemente sind jeweils durch ein Linsenelement gebildet, welches in zwei unterschiedlich gestaltete Abschnitte aufgeteilt ist. Ein erster Abschnitt AB1 wirkt ausschließlich auf das Licht eines zugeordneten ersten Rasterelements in dessen optischen Kanal. Einstückig mit dem ersten Abschnitt ist ein zweiter Abschnitt AB2 ausgebildet, der ausschließlich im benachbarten zweiten optischen Kanal liegt und entsprechend dessen Lichtausbreitung beeinflusst.

Im Beispielsfall wird der von einem Rasterelement R1-1 erzeugte erste optische Kanal durch die untere Hälfte des nachfolgenden zweiten Rasterelements bzw. dessen ersten Abschnitt AB1 so beeinflusst, dass das Licht über die Feldlinse FL in ein erstes Beleuchtungsstrahlbündel BS1 eingeleitet wird, während das Licht, welches durch das benachbarte erste Rasterelement R1-2 in einen zweiten optischen Kanal eingekoppelt wird, durch den zweiten Abschnitt AB2 des zweiten Rasterelements so beeinflusst wird, dass es in ein zweites Beleuchtungsstrahlbündel BS2 eingekoppelt wird, welches in Bezug auf das erste Beleuchtungsstrahlbündel auf der zur optischen Achse AX gegenüberliegenden Seite propagiert.

Um an den zweiten Rasterelementen RE2 die stark unterschiedlichen optischen Wirkungen zu erreichen, ist vorzugsweise vorgesehen, dass sowohl die Eintrittsfläche als auch die

Austrittsfläche im ersten Abschnitt AB1 und im zweiten Abschnitt AB2 jeweils asphärisch gestaltet sind. Die Flächenformen des ersten Abschnitts und des zweiten Abschnitts gehen nicht glatt ineinander über, stattdessen bildet sich als Trennlinie zwischen den beiden Abschnitten eine Knicklinie an der Oberfläche des zweiten Rasterelements.

Ein Merkmal dieses Mischkonzepts besteht somit darin, dass im Bereich der Pupillenwaben (zweite Rasterelemente RE2) eine dichte, in einer Raumrichtung alternierende Anordnung von mehreren Brechkräften mit zwei unterschiedlichen Oberflächenformen geschaffen wird. Es besteht insbesondere eine dichte Anordnung von Brechkräften mit nicht stetig differenzierbaren Übergängen. Die zweiten Rasterelemente RE2 (Pupillenwaben) können gedanklich als aus außeraxialen Linsenabschnitten zusammengesetzte Linsen angesehen werden, von denen vorzugsweise wenigstens eine Seite asphärisch ist und deren Größe jeweils derjenigen einer zugehörigen Feldwabe entspricht.

Fig. 9 zeigt einen schematischen meridionalen Linsenschnitt einer Ausführungsform eines katadioptrischen Projektionsobjektivs PO mit ausgewählten Strahlbündeln zur Verdeutlichung des Abbildungsstrahlengangs der im Betrieb durch das Projektionsobjektiv verlaufenden Projektionsstrahlung. Das Projektionsobjektiv ist als verkleinernd wirkendes Abbildungssystem dafür vorgesehen, ein in seiner Objektebene OS angeordnetes Muster einer Maske in reduziertem Maßstab, beispielsweise im Maßstab 1:4, auf seine parallel zur Objektebene ausgerichtete Bildebene IS abzubilden.

Das Projektionsobjektiv ist gemäß einer Ausführungsform der beanspruchten Erfindung ausgelegt und hat eine bildseitige numerische Apertur NA im Bereich von $0.2 < NA < 0.4$, z.B. $NA = 0.3$.

Das Projektionsobjektiv als Doppelfeld-Projektionsobjektiv ausgebildet. Es ist in der Lage, das außerhalb der optischen Achse OA in der Objektebene OS angeordnete erste effektive Objektfeld OF1 entlang eines ersten Projektionsstrahlengangs RP1 in ein außerhalb der optischen Achse OA in der Bildebene IS liegendes erstes effektives Bildfeld IF1 und zeitgleich ein dem ersten Objektfeld in Bezug auf die optische Achse gegenüberliegendes, außerhalb der optischen Achse in der Objektebene angeordnetes zweites effektives Objektfeld OF2 entlang eines zweiten Projektionsstrahlengangs RP2 in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes zweites effektives Bildfeld IF2 abzubilden.

Das Projektionsobjektiv umfasst eine Vielzahl optischer Elemente, zu diesen gehören zahlreiche Linsen (z.B. zwischen 15 und 25 Linsen) sowie genau zwei Konkavspiegel CM1, CM1, wobei in jedem der Projektionsstrahlgänge genau ein Konkavspiegel steht.

Eine Mehrheit der Linsen (mehr als 50%, insbesondere 60% oder mehr, oder 70% oder mehr, oder 80% oder mehr ist entlang von ersten Abschnitten OA1 der optischen Achse OA angeordnet, wobei diese ersten Abschnitte koaxial zueinander senkrecht zu Objektebene OS und Bildebene IS verlaufen. Die Konkavspiegel CM1, CM2 sind auf gegenüberliegenden Seiten der ersten Abschnitte OA1 angeordnet sind und definieren zweite Abschnitte OA2 der optischen Achse, die gemeinsam mit den ersten Abschnitten eine Achsenebene definieren (die bei Fig. 9 in der Zeichenebene liegt). Die Konkavspiegel des Beispiels sind koaxial zueinander auf gegenüberliegenden Seiten der ersten Abschnitte angeordnet, die zweiten Abschnitte OA2 der optischen Achse stehen senkrecht auf den ersten Abschnitten OA1, so dass sich eine Kreuzform ergibt.

Die optischen Elemente sind spiegelsymmetrisch zu einer Symmetrieebene SYM angeordnet und ausgebildet, die senkrecht zu der Achsenebene (hier Zeichenebene) durch die ersten Abschnitte OA1 verläuft. Für jeden der Konkavspiegel gibt es im zugeordneten Projektionsstrahlengang eine erste Umlenkeinheit ULE1 zur Umlenkung der von der Objektebene OS kommenden Strahlung zum Konkavspiegel und eine zweite Umlenkeinheit ULE2 zur Umlenkung der von dem Konkavspiegel kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene IS. Die Umlenkeinheiten ULE1, ULE2 sind jeweils auf der dem zugeordneten Konkavspiegel CM1 bzw. CM2 zugewandten Seite der Symmetrieebene SYM angeordnet.

Zwischen der Objektebene und der Bildebene werden in jedem der Projektionsstrahlengänge RP1, RP2 genau zwei reelle Zwischenbilder (generell mit IMI bezeichnet) des zugeordneten effektiven Objektfelds erzeugt, nämlich IMI1-1, IMI2-1 im ersten Projektionsstrahlengang und IMI1-2 und IMI2-2 im zweiten Projektionsstrahlengang (vgl. Fig. 10).

Ein erster, ausschließlich mit transparenten optischen Elementen aufgebauter und daher refraktiver (dioptrischer) Objektivteil OP1 ist so ausgelegt, dass das Muster im jedem der beleuchteten effektiven Objektfelder leicht verkleinert (Abbildungsmaßstab z.B. im Bereich von ca. 1.85:1 bis ca. 1.75:1) in das erste Zwischenbild IMI1-1, IMI1-2 des jeweiligen Projektionsstrahlengangs abgebildet wird.

Ein zweiter, katadioptrischer Objektivteil OP2 bildet die ersten Zwischenbilder der Projektionsstrahlengänge auf das jeweils zugehörige zweite Zwischenbild IMI2 im Wesentlichen

ohne Größenänderung ab. Der zweite Objektivteil OP2 umfasst für jeden der Projektionsstrahlengänge einen eigenen Konkavspiegel CM1, CM2 und drei vorgeschaltete doppelt durchlaufene Linsen. Im zweiten Objektivteil separieren sich die Projektionsstrahlengänge und laufen entlang getrennter optischer Wege durch getrennte Teilobjektive, bevor sie im Bereich des zweiten Zwischenbilds IMI2 wieder zu gemeinsam genutzten Linsen zusammengeführt werden. Das zweite Zwischenbild IMI2 liegt zwischen den beiden Einzelspiegeln von ULE2, d.h. an den zweiten Spiegeln der ULE2 sind die Projektionsstrahlengänge noch getrennt, erst dann werden sie wieder zusammengeführt.

Ein dritter, refraktiver Objektivteil OP3 ist dafür ausgelegt, die zweiten Zwischenbilder IMI2-1, IMI2-2 in verkleinerndem Maßstab in die Bildebene IS abzubilden.

Alle Linsen des ersten Objektivteils OP1 und alle Linsen des dritten Objektivteils OP3 und damit alle Linsen auf den ersten Abschnitten OA1 der optischen Achse sind beiden Projektionsstrahlgängen gemeinsam. Die Footprints der Projektionsstrahlengänge auf den einzelnen Linsenflächen, also die jeweils mit Strahlung beaufschlagten Flächenanteile, liegen dabei jeweils symmetrisch zur Symmetrieebene SYM. Eventuelle lens heating Effekte insbesondere bei feldnahen Linsen sind somit im Wesentlichen symmetrisch zur Symmetrieebene, wodurch eine eventuelle Korrektur vereinfacht wird.

In jedem der Projektionsstrahlengänge liegen zwischen der Objektebene und dem ersten Zwischenbild, zwischen dem ersten und dem zweiten Zwischenbild sowie zwischen dem zweiten Zwischenbild und der Bildebene liegen jeweils Pupillenflächen bzw. Pupillenebenen P1, P2, P3 dort, wo der Hauptstrahl CR der optischen Abbildung die optische Achse OA schneidet. Im Bereich der Pupillenfläche P3 des dritten Objektivteils OP3 kann die Aperturblende (stop) des Systems angebracht sein. Die Pupillenfläche P2 innerhalb des katadioptrischen zweiten Objektivteils OP2 liegt in unmittelbarer Nähe des jeweiligen Konkavspiegels CM.

Zur Unterstützung der chromatischen Korrektur ist in jedem der beiden Projektionsstrahlengänge in unmittelbarer Nähe des zugehörigen Konkavspiegels CM1, CM2 in einem pupillennahen Bereich eine Negativgruppe NG mit mindestens einer zerstreuend wirkenden Negativlinse angeordnet. Als „pupillennaher Bereich" wird hier ein Bereich bezeichnet, in welchem die Randstrahlhöhe (marginal ray height MRH) der Abbildung größer ist als die Hauptstrahlhöhe (chief ray height CRH). Die Randstrahlhöhe im Bereich der Negativgruppe kann mindestens doppelt so groß wie die Hauptstrahlhöhe sein.

Zum Hintergrund: während die Beiträge von Linsen mit positiver Brechkraft und Linsen mit negativer Brechkraft in einem optischen System zur gesamten Brechkraft, zur Bildfeldkrümmung und zu den chromatischen Aberrationen jeweils gegenläufig sind, hat ein Konkavspiegel genau wie eine Positivlinse positive Brechkraft, aber einen gegenüber einer Positivlinse umgekehrten Effekt auf die Bildfeldkrümmung. Außerdem führen Konkavspiegel keine chromatischen Aberrationen ein. Katadioptrische Systemteile mit einem pupillennahen Konkavspiegel und einer benachbarten Negativlinse (Schupmann-Achromat) sind daher ein gut geeignetes Mittel zur Achromatisierung von Projektionsobjektiven. Zwischen der jeweiligen Umlenkeinheit und der Negativgruppe kann eine doppelt durchlaufene Positivlinse PL angeordnet sein, diese kann bei anderen Ausführungsbeispielen (vgl. Tabelle 3) auch entfallen.

Ein außergewöhnliches technisches Merkmal betrifft die Gestaltung der Umlenkeinheiten ULE1, ULE2. Diese sind nicht als einfach reflektierende Planspiegel bzw. Umlenkspiegel aufgebaut. Stattdessen weist die erste Umlenkeinheit ULE1 und die zweite Umlenkeinheit ULE2 jeweils eine im Wesentlichen ebene erste Reflexionsfläche RF1 und eine unmittelbar folgende, im Wesentlichen ebene zweite Reflexionsfläche RF2 auf. Die Reflexionsflächen sind jeweils gegenüber der Symmetrieebene SYM um unterschiedliche Kippwinkel um orthogonal zu den ersten und zweiten Abschnitten verlaufende Kippachsen gekippt. Die erste Reflexionsfläche RF1 dient zur Umlenkung der von der Objektebene OS kommende Strahlung zur zweiten Reflexionsfläche RF2 und die zweite Reflexionsfläche dient zur Umlenkung der von der ersten Reflexionsfläche RF1 kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene.

In jedem Projektionsstrahlengang ist die erste Reflexionsfläche RF1 diejenige, die die von der letzten Linse des ersten Objektivteils OP1 kommenden Strahlbündel empfängt und in Richtung der unmittelbar folgenden zweiten Reflexionsfläche RF2 reflektiert. Diese reflektiert die Strahlbündel dann innerhalb des zweiten Objektivteils OP2 zum zugehörigen Konkavspiegel CM. Nach Reflexion an diesem und zweifachem Durchlauf der drei vorgeschalteten Linsen treffen die Strahlbündel dann auf die zweite Umlenkeinheit ULE2, deren erste Reflexionsfläche

RF1 die Strahlbündel zur zweiten Reflexionsfläche RF2 umlenkt, die in Richtung der ersten Linse des dritten Objektivteils OP3 reflektiert.

Wird der Kippwinkel KW einer Reflexionsfläche als derjenige Winkel definiert, den die Flächennormale NOR der Reflexionsfläche mit der eingangsseitigen optischen Achse einschließt, so beträgt der Kippwinkel der ersten Reflexionsflächen aufseiten des ersten Objektivteils jeweils 67,5°. Für die unmittelbar folgenden zweiten Reflexionsflächen in jedem Strahlgang beträgt der Kippwinkel dann nur noch 22,5°, entspricht also dem Ergänzungswinkel des ersten Kippwinkels zu einem 90°-Winkel. Für die zweiten Umlenkeinheiten ULE2, also diejenigen, die die von den jeweiligen Konkavspiegeln CM kommenden Strahlbündel in Richtung des dritten Objektivteils OP3 umlenken, gilt Entsprechendes, wobei jetzt als eingangsseitige optische Achse die zweiten Abschnitte OA2 der optischen Achse zählen.

In Bezug auf die eintrittsseitige optische Achse wird also eine 90°-Umlenkung in zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Schritten erreicht, nämlich einmal um x Grad und das zweite Mal um 90-x°. Dabei befinden sich die beiden zusammengehörigen Reflexionsflächen einer Umlenkeinheit jeweils auf ein- und derselben Seite der Symmetrieebene SYM, nämlich auf derjenigen Seite, in der sich der zugehörige Konkavspiegel CM befindet.

Beide Reflexionsflächen RF1, RF2 einer Umlenkeinheit ULE liegen jeweils in optischer Nähe des ersten Zwischenbilds IMI1 des zugehörigen Projektionsstrahlengangs, so dass der Footprint des Strahlbündels auf der Reflexionsfläche mehr oder weniger rechteckig mit abgerundeten Ecken erscheint und sich in Abstand von der optischen Achse, aber nahe bei dieser befindet. Genauer gesagt liegt das erste Zwischenbild zwischen den beiden Reflexionsflächen RF1, RF2, auf diese Weise sind beide Reflexionsflächen nahe am Zwischenbild. Bei einem Abbildungsmaßstab des ersten Objektivteils OP1 mit allenfalls sehr geringer Vergrößerung oder leichter Verkleinerung ist die Größe des Zwischenbilds nicht oder nur geringfügig größer als die Größe des generierenden effektiven Objektfelds OF, so dass Spiegelflächen mit kompakten Ausmaßen ausreichen, um das gesamte Strahlbündel vignettierungsfrei zum nachgeschalteten optischen Element zu reflektieren. Dies gilt insbesondere für die Reflexion von der ersten Reflexionsfläche RF1 zur zweiten Reflexionsfläche RF2, die ebenfalls sehr kompakt dimensioniert sein kann, weil sie noch in optischer Nähe des ersten Zwischenbilds liegt, insbesondere in einem Bereich, in welchem das Subaperturverhältnis SAR dem Betrage nach kleiner als 0,3 ist. Vorzugsweise liegt SAR zwischen 0,2 und 0,3.

Zur Erläuterung: Die optische Nähe bzw. die optische Entfernung einer optischen Fläche zu einer Bezugsebene (z.B. einer Feldebene oder einer Pupillenebene) wird in dieser Anmeldung durch das sogenannte Subaperturverhältnis SAR beschrieben. Das Subaperturverhältnis SAR einer optischen Fläche wird für die Zwecke dieser Anmeldung wie folgt definiert:

$$SAR = \text{sign}(CRH) \cdot (MRH/(|CRH| + |MRH|))$$

wobei MRH die Randstrahlhöhe, CRH die Hauptstrahlhöhe und die Signumsfunktion sign (x) das Vorzeichen von x bezeichnet, wobei nach Konvention sign (0) = 1 gilt. Unter Hauptstrahlhöhe wird die Strahlhöhe des Hauptstrahles eines Feldpunktes des Objektfeldes mit betragsmäßig maximaler Feldhöhe verstanden. Die Strahlhöhe ist hier vorzeichenbehaftet zu verstehen. Unter Randstrahlhöhe wird die Strahlhöhe eines Strahles mit maximaler Apertur ausgehend vom Schnittpunkt der optischen Achse mit der Objektebene verstanden. Dieser Feldpunkt muss nicht zur Übertragung des in der Objektebene angeordneten Musters beitragen - insbesondere bei außeraxialen Bildfeldern.

Das Subaperturverhältnis ist eine vorzeichenbehaftete Größe, die ein Maß für die Feld- bzw. Pupillennähe einer Ebene im Strahlengang ist. Per Definition ist das Subaperturverhältnis auf Werte zwischen -1 und +1 normiert, wobei in jeder Feldebene das Subaperturverhältnis null ist und wobei in einer Pupillenebene das Subaperturverhältnis von -1 nach +1 springt oder umgekehrt. Ein betragsmäßiges Subaperturverhältnis von 1 bestimmt somit eine Pupillenebene.

Feldnahe Ebenen weisen somit Subaperturverhältnisse auf, die nahe bei 0 liegen, während pupillennahe Ebenen Subaperturverhältnisse aufweisen, die betragsmäßig nahe bei 1 liegen. Das Vorzeichen des Subaperturverhältnisses gibt die Stellung der Ebene vor oder hinter einer Bezugsebene an.

Die Reflexionsflächen können nominell als Planflächen ausgelegt sein, also bis auf Fertigungstoleranzen eine mathematische Ebene definieren. Es ist auch möglich, einzelne oder alle Reflexionsflächen mit definierten Abweichungen von einer Ebene zu gestalten, so dass die Reflexionsflächen als Korrekturflächen für Aberrationen wie Verzeichnung etc. dienen können.

Im schematischen Beispiel von Fig. 9 sind die Reflexionsflächen jeweils als Einzelspiegel gefertigt und in gesonderten Halterungen untergebracht. Das Beispiel von Fig. 10 zeigt, dass jeweils zwei der Umlenkspiegel bzw. Reflexionsflächen kombiniert als Dreieckprisma ausgeführt sein können. Diese Dreieckprismen können gemeinsam in der Mitte des sternförmigen Querschnitts der Umlenkeinheit gefasst werden. Alternativ können alle für die Umlenkung

notwendigen Spiegel kombiniert und als komplexes Prisma mit sternförmiger Seitenfläche ausgeführt werden. Das Prisma kann dabei zum Beispiel aus mehreren Einzelprismen bestehen, die gekittet oder aneinander angesprengt sind.

Zur Veranschaulichung der Vorteile, die derartige zweifach reflektierender Umlenkeinheiten im Vergleich zum Stand der Technik bieten, sind in Fig. 11A bis 11C drei Faltungssituationen im Vergleich dargestellt. Fig. 11A zeigt eine „klassische" Faltung in einem katadioptrischen Projektionsobjektiv mit einem einzigen Konkavspiegel CM. Der erste Umlenkspiegel FS1, der die von der Objektebene OS kommende Strahlung zum Konkavspiegel CM reflektiert, liegt auf der dem Konkavspiegel abgewandten Seite der senkrecht zur Objekt- und Bildebene liegenden Teile der optischen Achse. Gleiches gilt für den zweiten Umlenkspiegel, der die vom Konkavspiegel kommenden Strahlen in den dritten Objektivteil umlenkt.

Wollte man zwei Felder gleichzeitig nutzen, so würde der Faltspiegel eines jeden Feldes jeweils den Strahlengang des gegenüberliegenden Feldes blockieren. Es ist daher nur die Abbildung eines Einzelfeldes möglich.

Um die (gleichzeitige) Abbildung zweier Felder zu ermöglichen, sollte sich die Umlenkeinheit jeweils auf der dem zugehörigen Horizontalarm bzw. Konkavspiegel zugewandten Seite der optischen Achse befinden. Fig. 11B zeigt einen Versuch der Umsetzung mit konventionellen Planspiegeln. Bei der Faltungsvariante in Fig. 11B reflektieren die Faltspiegel FS jeweils in die andere Richtung, d.h. der Konkavspiegel befindet sich auf derjenigen Seite, die dem effektiven Objektfeld gegenüberliegt. In diesem Fall stehen die Faltspiegel im eigenen Strahlengang. Es ergibt sich kein funktionierendes System.

Ein Unterschied zwischen Figur 11B und 11C besteht darin, dass in Fig. 11C die Strahlen an der ersten Umlenkeinheit links (objektseitig) der optischen Achse des Horizontalarms (OA2) befinden und nach der Reflexion am Konkavspiegel an der zweiten Umlenkeinheit rechts (bildseitig) von OA2. Bei Figur 11B ist das gerade umgekehrt. Dadurch müsste die zweite Umlenkeinheit links vom ersten Umlenkspiegel (d.h. näher an der Objektebene) stehen und damit im Strahlengang Objekt – erster Umlenkspiegel.

Fig. 11C zeigt zum Vergleich die Faltung mit jeweils zwei Umlenkspiegeln pro 90°-Umlenkung, also mit einer zweistufig reflektierenden Umlenkeinheit gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung. Es ist erkennbar, dass sich dadurch eine Separierung der zu den einzelnen Konkavspiegeln führenden Strahlengänge erreichen lässt.

Nachfolgend werden einige praktische Vorteile in Projektionsobjektiven mit Doppelfeld erläutert. Eine Erhöhung des Durchsatzes (belichtete Komponenten pro Zeiteinheit) kann durch die Möglichkeit geschaffen werden, zwei außeraxiale Felder gleichzeitig zu belichten. Dies wird beim Projektionsobjektiv unter anderem dadurch geschaffen, dass in dem zweiten Objektivteil zwei katadioptrische Teilobjektive enthalten sind, also zwei Horizontalarme, die jeweils einen Konkavspiegel enthalten. Die die Konkavspiegel enthaltenden Objektivteile sind jeweils symmetrisch zur Symmetrieebene. Die Symmetrieachse ist dabei eine gedachte Linie, die durch die optische Achse OA verläuft und parallel zu den breiten Seiten des effektiven Bildfelds verläuft.

Der Feldabstand ABBF der beiden effektiven Bildfelder in Scanrichtung (y-Richtung) ist idealerweise so, dass die Summe der Schlitzbreite eines Felds (A*) und des Abstands zwischen den beiden Feldern genau der Breite eines Stepperfelds entspricht (vgl. Situation in Fig. 2, die das Objektfeld zeigt).

Die Doppelfelder können entweder scannend für eine Doppelbelichtung verwendet werden oder mithilfe einer Step-and-Scan-Methode.

Im ersten Fall müssten am Retikel bzw. an der Maske zwei identische Strukturen nebeneinander angeordnet sein. Beim Scannen wird dann das Substrat, also beispielsweise ein Wafer, kurz nacheinander durch das erste Feld mit der ersten Struktur und danach durch das zweite Feld mit der zweiten, identischen Struktur belichtet. Bei einem normalen Scanvorgang werden Bereiche ganz am Rand des Wafers nur einfach belichtet. Dies kann verhindert werden, wenn der Scan mit etwas Überlauf gestartet wird. Dabei ist es denkbar, dass im Überlaufbereich das zweite Bildfeld ausgeblendet wird.

Im zweiten Fall können am Retikel auch zwei unterschiedliche Strukturen nebeneinander angeordnet sein, die sich zu einer doppelt so großen Struktur kombinieren lassen. Der nötige Step-and-Scan-Vorgang würde dann die beiden Felder scannen und dann in einem Step-Schritt zum nächsten Doppelfeld springen.

Anhand der nachfolgenden Figuren werden nun einige Besonderheiten des Scannens erläutert. Fig. 12A zeigt eine schematische Draufsicht auf einen Wafer, auf welchen unmittelbar aneinandergrenzend zahlreiche rechteckförmige Belichtungseinheiten DIE (Dies) mit dem derzeitigen Standardmaß von 26 mm Breite und 32 mm Länge vorgesehen sind. Der vergrößerte Ausschnitt in Fig. 12A sowie die Fig. 12B illustrieren einen typischen konventionellen Scan-Vorgang. Dabei bewegt sich der Wafer mäanderförmig unter dem

Projektionsobjektiv bzw. dem zur Belichtung genutzten Bildfeld bzw. dem Scan-Schlitz. Es gibt dabei zwei unterschiedliche Zustände. In einer Scan-Phase, die in Fig. 12A, 12B als durchgezogene Linie dargestellt ist, bewegen sich das Substrat und die Maske bzw. der Wafer und das Retikel mit gleichmäßiger und angepasster Geschwindigkeit (abhängig vom Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs) und ein Die wird belichtet. Nach jedem Scanvorgang erfolgt ein Richtungswechsel, der in Fig. 12A, 12B durch gestrichelte Linien gekennzeichnet ist. Dabei wird die Bewegung des Retikels gestoppt, während sich der Wafer bewegt. Die Bewegung umfasst eine Abbremsphase, eine Bewegung senkrecht zur Scan-Richtung und dann eine Beschleunigung in entgegengesetzter Richtung. Während des Richtungswechsels findet keine Belichtung statt, diese Phase ist also nicht produktiv. Fig. 12A, 12B veranschaulichen schematisch den zeitlichen Ablauf der beiden Phasen.

Zum Vergleich zeigt Fig. 13B verschiedene Phasen eines Scan-Vorgangs mithilfe einer Projektionsbelichtungsanlage mit Doppelfeld und zwei starr gekoppelten Scan-Schlitzen mit einer Geometrie, die in Fig. 13A schematisch dargestellt ist. Es ist unmittelbar erkennbar, dass die Scan-Phasen sich nun über die Länge von zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Dies erstrecken, so dass während einer Scan-Phase zwei Dies zeitgleich belichtet werden können. Im Vergleich zu den Scan-Phasen findet der unproduktive Richtungswechsel nur halb so oft statt wie beim klassischen Scan-Vorgang in dem Sinne, dass beim klassischen Vorgang nach Scannen eines Dies ein Richtungswechsel erfolgt, während es im Falle eines Doppelfelds erst nach dem Scannen zweier Dies einen Richtungswechsel gibt.

Um diese Art des Scannens zu ermöglichen, sind bei dem Ausführungsbeispiel die beiden Scan-Schlitze bzw. die effektiven Bildfelder gemäß Fig. 13A angeordnet.

Der Scanvorgang bei der Doppelbelichtung entspricht von der Reticle- und Waferbewegung her dem Scanvorgang für ein einzelnes Feld. Dabei wird jeweils ein Die zum ersten Mal und ein benachbarter Die zum zweiten Mal belichtet. Der Unterschied zum Scanvorgang für ein Einzelfeld besteht darin, dass am oberen und unteren Rand des Wafers die Beleuchtung eines der beiden Felder abgeschaltet werden muss, damit nicht über den Rand des Wafers hinaus belichtet wird.

Die bisherigen Beispiele illustrieren, dass die zweistufige Faltung an den beiden Umlenkeinheiten jedes Projektionsstrahlengangs die Nutzung von Doppelfeldern ermöglicht. Es gibt weitere Nutzungsmöglichkeiten und Vorteile gegenüber einer einfachen Faltung. Ein Beispiel ist die Vermeidung des sogenannten „image flip“ bei einem katadioptrischen Projektionsobjektiv mit einem einzigen Konkavspiegel und zwei Zwischenbildern.

Derartige Projektionsobjektive bieten Vorteile zum Beispiel hinsichtlich der Korrektur chromatischer Aberrationen, haben jedoch den Nachteil, dass bei der Abbildung ein „image flip" erzeugt wird. Dies bedeutet, dass Merkmale, die am Retikel in einem rechtshändigen Koordinatensystem beschrieben werden, in der Bildebene mit einem linkshändigen Koordinatensystem beschrieben werden. Diese ungünstige Eigenschaft ergibt sich daraus, dass sich zwischen Objektebene und Bildebene an jedem Zwischenbild und an jeder Reflexion die Händigkeit ändert. Ist die Summe aus der Anzahl von Zwischenbildern und der Anzahl von Reflexionen eine ungerade Zahl, so ergibt sich ein image flip. Ist diese Summe eine gerade Zahl, wird ein image flip vermieden. Dies wird nachfolgend anhand eines Vergleichs zwischen einem klassischen Projektionsobjektiv gemäß Fig. 11A und einem Projektionsobjektiv PO-X gemäß Fig. 14 erläutert.

Die Fig. 14 zeigt einen Linsenschnitt durch ein katadioptrisches Projektionsobjektiv PO-X, welches ein außerhalb der optischen Achse liegendes effektives Objektfeld in der Objektebene in eine Bildebene liegendes, außeraxiales effektive Bildfeld abbildet. Dabei werden zwischen Objektebene und Bildebene zwei reelle Zwischenbilder IMI1-X und IMI2-X erzeugt. Das Projektionsobjektiv hat einen einzigen Konkavspiegel mit einer vorgeschalteten Negativgruppe zur Unterstützung der Korrektur chromatischer Apparitionen. Eine erste Umlenkeinheit ULE1-X lenkt die von der Objektebene kommende Strahlung in Richtung des Konkavspiegels. Eine zweite Umlenkeinheit ULE2-X lenkt die vom Konkavspiegel reflektierten Strahlung in Richtung Bildebene. Während die zweite Umlenkeinheit durch einen einfachen Planspiegel gebildet wird und eine einzige Reflektion verursacht, ist die erste Umlenkeinheit ULE-X als zweistufig reflektierende Umlenkeinheit ausgebildet. Diese weist eine erste Reflexionsfläche RF1-X auf, die die vom Objekt kommende Strahlung in Richtung einer unmittelbaren nachfolgenden zweiten Reflexionsfläche RF2-X umlenkt. Diese reflektiert die Strahlung dann Richtung Konkavspiegel. Die beiden Reflexionsfläche können dann an getrennten Einzelspiegel angeordnet sein, vorzugsweise sind sie an einem gemeinsamen Trägerelement ausgebildet, um die gegenseitige Orientierung zu fixieren. Zwischen Objektebene und Bildebene gibt es zwei Zwischenbildern und insgesamt vier Reflektionen, so dass die Summe aus Zwischenbildern und Reflektionen eine gerade Zahl ist. Somit wird der bei konventionellen Systemen dieses Typs (vgl. Fig. 11A) existierende image flip vermieden. Alternativ könnte auch die erste Umlenkeinheit einstufig und die zweite Umlenkeinheit zweistufig sein. Die Umlenkspiegel sind genau wie beim klassischen System jeweils in optischer Nähe der zugehörigen Zwischenbilder angeordnet, also in einem feldnahen Bereich.

Die Verwendung von zweistufig reflektierenden Umlenkeinheiten der in dieser Anmeldung beschriebenen Art ist nicht auf die Ausführungsbeispiele beschränkt. Es ist auch möglich,

solche Umlenkeinheiten in ein Projektionsobjektiv einzusetzen, welches zwischen Objektebene und Bildebene nur ein Zwischenbild erzeugt oder eine direkte Abbildung ohne Zwischenbild erzeugt. Es kann sein, dass eine zweistufig reflektierende Umlenkeinheit im Projektionsstrahlengang hinter einem vorgeschalteten Planspiegel angeordnet ist und/oder vor einem nachgeschaltetem Umlenkspiegel.

In den folgenden Tabellen sind die Spezifikationen der zwei Ausführungsbeispiele zusammengestellt. Tabellen 1 und 1A gelten für das Ausführungsbeispiel der Fig. 9 mit NA= 0,3, Tabellen 2 und 2A gelten für ein nicht in einem Bild dargestellten Ausführungsbeispiel mit NA=0,28 und ohne Positivlinse im doppelt durchlaufenen Strahlengang zwischen den Umlenkeinheiten und dem Konkavspiegel.

In den Tabellen ist die Spezifikation des jeweiligen Designs in tabellarischer Form zusammengefasst. Dabei gibt Spalte „SURF" die Nummer einer brechenden oder auf andere Weise ausgezeichneten Fläche, Spalte „RADIUS" den Radius r der Fläche (in mm), Spalte „THICKNESS" den als Dicke bezeichneten Abstand d der Fläche zur nachfolgenden Fläche (in mm) und Spalte „MATERIAL" das Material der optischen Komponenten an. Spalten „INDEX1", INDEX2" und „INDEX3" geben den Brechungsindex des Materials bei den Wellenlängen 365,5 nm (INDEX1), 364,5 nm (INDEX2) und 366,5 nm (INDEX3) an. In Spalte „SEMIDIAM" sind die nutzbaren, freien Radien bzw. die halben freien optischen Durchmesser der Linsen (in mm) bzw. der optischen Elemente angegeben. Der Radius r=0 (in der Spalte „RADIUS") entspricht einer Planfläche (planar). Einige optische Flächen sind asphärisch. Tabellen mit Zusatz „A" geben die entsprechenden Asphärendaten an, wobei sich die asphärischen Flächen nach der folgenden Vorschrift berechnen:

$$p(h) = \frac{\varrho h^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)(\varrho h)^2}} + C_1 h^4 + C_2 h^6 + C_3 h^8 + \cdots$$

Dabei gibt der Kehrwert $\frac{1}{r} = \varrho$ des Radius die Flächenkrümmung und h den Abstand eines Flächenpunktes von der optischen Achse (d.h. die Strahlhöhe) an. Somit gibt p(h) die Pfeilhöhe, d.h. den Abstand des Flächenpunktes vom Flächenscheitel in z-Richtung (Richtung der optischen Achse). Die Koeffizienten K, C1, C2, ... sind in den Tabellen mit Zusatz „A" wiedergegeben.

Tabelle 1

SURF	RADIUS	THICKNESS	MATERIAL	INDEX1	INDEX2	INDEX3	SEMID.	TILT	TILT
0 (OBJ)	planar	35,506913		1	1	1	0,0		
1	313,659095	60,694812	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	110,0		
2	-801,556319	120,055216		1	1	1	105,8		
3	-107,586369	10,262231	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	76,1		
4	-396,017812	1,463990		1	1	1	78,4		
5	-607,605491	10,121204	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	78,5		
6	280,688349	35,518156		1	1	1	80,3		
7	-462,835188	30,596703	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	84,0		
8	-194,369860	1,149336		1	1	1	88,9		
9	-1162,886136	31,741706	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	92,6		
10	-278,287998	1,434923		1	1	1	95,5		
11	1420,872642	64,194980	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	96,8		
12	-194,503027	0,984694		1	1	1	97,5		
13	94,060920	60,024719	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	78,3		
14	192,679744	1,559950		1	1	1	62,0		
15	131,356932	20,032900	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	58,4		
16	94,034713	11,814077		1	1	1	46,5		
17	125,870327	22,130617	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	42,1		
18	61,964170	27,496928		1	1	1	29,6		
19	-64,969877	15,098409	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	20,5		
20	-100,479377	26,837998		1	1	1	23,9		
21	-95,104123	57,961946	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	35,1		
22	-117,375749	6,745188		1	1	1	58,1		
23	-135,145839	57,688418	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	61,3		
24	-109,341889	1,171987		1	1	1	78,8		
25	751,633206	39,157305	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	87,8		
26	-207,194655	2,358230		1	1	1	89,4		
27	12076,748826	22,217332	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	88,2		
28	-314,824440	30,695817		1	1	1	88,1		
29	planar	275,202116	mirror	1	1	1	146,4	-67,5	67,5
30	planar	198,815360	mirror	1	1	1	143,6	-22,5	22,5
31	419,811910	39,209117	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	90,8		
32	-671,770102	283,160703		1	1	1	90,6		
33	-219,406879	15,517185	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	70,8		
34	-366,537484	51,362316		1	1	1	72,1		
35	-165,724966	16,376894	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	72,1		
36	-2614,277511	47,674101		1	1	1	77,0		
37	-296,119320	47,674101	mirror	1	1	1	84,7		
38	2614,277511	16,376894	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	74,0		
39	165,724966	51,362316		1	1	1	69,5		
40	366,537484	15,517185	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	69,5		
41	219,406879	283,160703		1	1	1	68,2		

42	671,770102	39,209117	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	88,8		
43	-419,811910	198,815360		1	1	1	89,0		
44	planar	275,202116	mirror	1	1	1	142,6	22,5	-22,5
45	planar	45,307528	mirror	1	1	1	145,2	67,5	-67,5
46	137,863448	69,500589	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	94,3		
47	-926,888792	156,815279		1	1	1	90,1		
48	-130,164386	11,807231	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	52,1		
49	-246,384840	14,058199		1	1	1	52,1		
50	-191,014898	16,136166	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	50,9		
51	-307,839194	1,951201		1	1	1	51,4		
52	684,693576	10,178590	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	51,0		
53	247,582201	1,806825		1	1	1	50,3		
54	146,261249	15,541772	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	50,4		
55	160,475891	73,186277		1	1	1	49,0		
56 (STOP)	planar	5,154755		1	1	1	49,4		
57	413,071260	32,292190	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	51,9		
58	-210,070759	3,275760		1	1	1	55,3		
59	343,765147	27,284950	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	56,9		
60	-863,571059	2,179246		1	1	1	57,2		
61	203,377100	73,290044	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	57,0		
62	2660,834310	7,191681		1	1	1	50,4		
63	-559,997454	70,864313	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	49,8		
64	1168,970436	5,276921		1	1	1	45,2		
65	318,682638	30,155097	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	44,9		
66	8466,525734	4,393047		1	1	1	42,9		
67	234,459718	13,609307	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	42,0		
68	347,975968	3,573041		1	1	1	40,5		
69	173,342050	26,558614	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	39,7		
70	514,184870	1,164063		1	1	1	35,9		
71	191,459647	22,140309	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	35,3		
72	889,725826	1,632009		1	1	1	31,4		
73	planar	5,570294	SIO2	1,474188175	1,47447703	1,4747711	31,1		
74	planar	12,080020		1	1	1	30,1		
75 (IMG)	planar	0,000000		1	1	1	0,0		

Tabelle 1A

ASPHERIC CONSTANTS								
SURF	1	3	6	27	31	36	38	43
K	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	7,258868E-08	2,011577E-07	2,636351E-07	-2,574222E-08	1,355011E-09	-4,728914E-09	4,728914E-09	-1,355011E-09
C2	-5,430882E-12	-2,059146E-11	-3,252204E-11	-1,424412E-12	5,941808E-13	-1,372861E-13	1,372861E-13	-5,941808E-13
C3	3,619145E-16	1,822025E-15	2,293197E-15	1,304966E-16	-3,597974E-17	1,769076E-17	-1,769076E-17	3,597974E-17
C4	-1,578232E-20	-7,313131E-21	-1,255006E-19	-2,145075E-20	1,900153E-21	3,267795E-21	-3,267795E-21	-1,900153E-21
C5	5,134497E-25	-1,162491E-23	5,661107E-24	2,041821E-24	-2,847826E-25	-6,532412E-25	6,532412E-25	2,847826E-25
C6	-7,407896E-30	1,040102E-27	-1,798991E-28	-8,339538E-29	2,050550E-29	2,863773E-29	-2,863773E-29	-2,050550E-29
C7	0	0	0	0	0	0	0	0
C8	0	0	0	0	0	0	0	0

SURF	46	48	57	60	64
K	0	0	0	0	0
C1	-3,140756E-08	-7,730092E-08	-2,290987E-09	2,294900E-09	5,997172E-08
C2	-1,203411E-12	-7,180831E-12	-5,404557E-12	-3,127903E-12	2,871090E-11
C3	3,765773E-17	3,021547E-15	-1,072780E-15	-9,887066E-16	-3,926675E-16
C4	-1,131056E-20	-1,703028E-18	8,128417E-19	2,805846E-19	3,477523E-19
C5	1,036560E-24	5,257098E-22	-1,975107E-22	-4,541180E-23	-5,147175E-22
C6	-5,506043E-29	-6,121958E-26	1,543922E-26	2,704394E-27	1,933726E-25
C7	0	0	0	0	0
C8	0	0	0	0	0

Tabelle 3

SURF	RADIUS	THICKNESS	MATERIAL	INDEX1	INDEX2	INDEX3	SEMID.	HOA1 TILT
0 (OBJ)	planar	43,890445		1	1	1	0,0	
1	317,336786	64,705247	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	112,0	
2	-561,198473	111,946272		1	1	1	107,7	
3	-84,127688	13,445506	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	70,1	
4	-325,043319	6,013108		1	1	1	70,0	
5	-204,768360	10,666035	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	69,9	
6	3962,792918	26,118127		1	1	1	71,2	
7	-175,926444	26,320606	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	71,9	
8	-147,473400	0,996140		1	1	1	78,1	
9	-3910,921139	24,413188	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	82,5	
10	-251,313470	1,033922		1	1	1	83,9	
11	507,858397	46,019262	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	84,7	
12	-251,876631	1,111421		1	1	1	84,0	
13	83,562130	73,686537	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	71,4	
14	196,054018	38,923443		1	1	1	49,0	
15	193,743320	12,900681	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	23,6	
16	52,041515	8,467974		1	1	1	16,9	
17	-55,929273	11,794515	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	17,2	
18	-66,852705	23,916929		1	1	1	22,7	
19	-62,710866	54,329347	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	34,1	
20	-83,137995	1,092863		1	1	1	58,3	
21	-112,335147	64,741097	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	61,4	
22	-99,058218	14,114156		1	1	1	82,0	
23	585,175867	47,785588	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	95,4	
24	-194,175480	1,116844		1	1	1	96,5	
25	517,329281	19,528447	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	91,5	
26	-919,103095	1,011638		1	1	1	90,4	
27	planar	276,741691	mirror	1	1	1	147,4	-67,5
28	planar	390,934377	mirror	1	1	1	142,0	-67,5
29	-512,591931	13,766398	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	74,6	
30	-328,702071	95,302534		1	1	1	75,4	
31	-250,445951	10,423331	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	75,9	
32	1672,621399	11,678478		1	1	1	78,4	
33	-310,916878	11,678478	mirror	1	1	1	78,4	
34	-1672,621399	10,423331	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	78,4	
35	250,445951	95,302534		1	1	1	75,9	
36	328,702071	13,766398	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	75,2	
37	512,591931	390,934377		1	1	1	74,4	
38	planar	276,741691	mirror	1	1	1	143,3	67,5
39	planar	-3,093996	mirror	1	1	1	148,5	67,5
40	207,660139	80,619429	SILUV	1,474188175	1,47447703	1,4747711	94,3	

Tabelle 3A

ASPHERIC CONSTANTS								
SURF	1	3	6	17	19	25	32	34
K	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	8,343405E-08	5,197994E-07	4,357373E-07	-1,240495E-06	2,351387E-07	-4,070498E-08	-6,699475E-09	6,699475E-09
C2	-1,857642E-12	-3,604842E-11	-4,317549E-11	-5,211367E-09	4,179078E-10	-2,318935E-13	-2,187419E-13	2,187419E-13
C3	-2,394648E-18	6,475431E-15	3,471888E-15	4,301288E-11	-4,172236E-13	-3,254201E-16	9,752181E-17	-9,752181E-17
C4	5,875239E-21	-4,030577E-20	-1,523606E-19	-1,954661E-13	4,340189E-16	7,980012E-20	-9,830275E-21	9,830275E-21
C5	-1,842466E-25	1,195428E-23	-9,260882E-25	4,495646E-16	-5,605434E-19	-1,220270E-23	3,362668E-25	-3,362668E-25
C6	-7,993131E-30	5,758602E-27	8,725334E-27	-9,598243E-19	4,681548E-22	8,645204E-28	-2,715949E-28	2,715949E-28
C7	-5,447442E-34	-1,831438E-30	-2,400936E-30	3,084553E-21	-1,527855E-25	-1,393533E-32	1,206633E-31	-2,677731E-33
C8	5,957414E-38	2,882257E-34	1,949680E-34	-4,755141E-24	3,779847E-30	-9,471846E-37	-1,146114E-35	-3,939833E-36

SURF	40	44	49	52	60	67
K	0	0	0	0	0	0
C1	-3,065834E-08	2,360624E-08	2,448140E-07	2,367421E-07	2,719354E-07	3,815887E-07
C2	2,654377E-13	-1,492506E-12	-3,839945E-11	-2,349121E-11	6,515650E-11	-2,605052E-10
C3	-6,061174E-18	2,165630E-14	3,607894E-14	2,226650E-14	1,905337E-14	5,005764E-13
C4	4,757296E-21	-2,558652E-17	-1,090641E-17	-3,064922E-18	-5,192838E-17	-9,098221E-16
C5	-4,681420E-24	1,723006E-20	-2,832473E-21	-6,695116E-21	5,486918E-20	8,249081E-19
C6	1,087152E-27	-6,544300E-24	2,340678E-24	4,670988E-24	-3,514661E-23	-2,134755E-22
C7	-1,057149E-31	1,302283E-27	-3,866787E-28	-1,258728E-27	1,339572E-26	-1,533643E-25
C8	3,773424E-36	-1,054878E-31	1,277414E-33	1,255664E-31	-2,194746E-30	7,918414E-29

- - - - - - - - - - - - - -

Patentansprüche

1. Katadioptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene (OS) des Projektionsobjektivs angeordneten Musters in eine zur Objektebene parallele Bildebene des Projektionsobjektivs umfassend:
eine Vielzahl optischer Elemente, die Linsen und Konkavspiegel (CM) umfassen und zwischen der Objektebene (OS) und der Bildebene (IS) entlang einer optischen Achse (OA) angeordnet sind, wobei
das Projektionsobjektiv (PO) als Doppelfeld-Projektionsobjektiv dafür ausgebildet ist, ein außerhalb der optischen Achse in der Objektebene angeordnetes erstes effektives Objektfeld (OF1) entlang eines ersten Projektionsstrahlengangs (RP1) in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes erstes effektives Bildfeld (IF1) und zeitgleich ein dem ersten Objektfeld in Bezug auf die optische Achse gegenüberliegendes, außerhalb der optischen Achse in der Objektebene angeordnetes zweites effektives Objektfeld (OF2) entlang eines zweiten Projektionsstrahlengangs (RP2) in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes zweites effektives Bildfeld (IF2) abzubilden, und
jeder der Projektionsstrahlengänge eine erste Umlenkeinheit (ULE1) zur Umlenkung der von der Objektebene (OS) kommenden Strahlung zu einem Konkavspiegel und eine zweite Umlenkeinheit (ULE2) zur Umlenkung der von dem Konkavspiegel kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene (IS) umfasst;
dadurch gekennzeichnet, dass
die optischen Elemente einen ersten Objektivteil (OP1) zur Abbildung jedes der effektiven Objektfelder (OF1, OF2) der Objektebene in ein erstes reelles Zwischenbild (IMI1), einen zweiten Objektivteil (OP2) zur Erzeugung eines zweiten reellen Zwischenbildes (IMI2) mit der von dem ersten Objektivteil (OP1) kommenden Strahlung, sowie einen dritten Objektivteil (OP3) zur Abbildung des zweiten reellen Zwischenbildes (IMI2) in die Bildebene (IS) bilden, und
im Bereich einer zwischen dem ersten und dem zweiten Zwischenbild liegenden Pupillenfläche (P2) der Konkavspiegel (CM) eines Projektionsstrahlengangs angeordnet ist, die erste Umlenkeinheit (FM1) in optischer Nähe zum ersten Zwischenbild (IMI1) und der zweite Umlenkeinheit (FM2) in optischer Nähe zum zweiten Zwischenbild (IMI2) angeordnet ist.

2. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Linsen entlang von ersten Abschnitten (OA1) der optischen Achse angeordnet sind, die koaxial zueinander senkrecht zu Objektebene (OS) und Bildebene (IS) verlaufen;
die Konkavspiegel (CM1, CM2) auf gegenüberliegenden Seiten der ersten Abschnitte angeordnet sind und zweite Abschnitte (OA2) der optischen Achse definieren, die gemeinsam mit den ersten Abschnitten eine Achsenebene definieren;

die optischen Elemente symmetrisch zu einer Symmetrieebene (SYM) angeordnet und ausgebildet sind, die senkrecht zu der Achsenebene durch die ersten Abschnitte (OA1) verläuft; und
die Umlenkeinheiten (ULE1, ULE1) jeweils auf der dem zugeordneten Konkavspiegel zugewandten Seite der Symmetrieebene (SYM) angeordnet sind.

3. Projektionsobjektiv nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Konkavspiegel koaxial zueinander auf gegenüberliegenden Seiten der ersten Abschnitte angeordnet sind und zweite Abschnitte definieren, die orthogonal zu den ersten Abschnitten orientiert sind.

4. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Umlenkeinheit (ULE1) und die zweite Umlenkeinheit (ULE2) jeweils eine erste Reflexionsfläche (RF1) und eine unmittelbar folgende zweite Reflexionsfläche (RF2) aufweist, wobei die Reflexionsflächen gegenüber der Symmetrieebene um unterschiedliche Kippwinkel um orthogonal zu den ersten und zweiten Abschnitten verlaufende Kippachsen gekippt sind, die erste Reflexionsfläche (RF1) zur Umlenkung der von der Objektebene (OS) kommende Strahlung zur zweiten Reflexionsfläche (RF2) und die zweite Reflexionsfläche zur Umlenkung der von der ersten Reflexionsfläche kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene (IS) angeordnet ist.

5. Projektionsobjektiv nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Kippwinkel der ersten Reflexionsflächen und der zweiten Reflexionsfläche vorzugsweise derart aneinander angepasst sind, dass ein parallel zur eintrittsseitigen optischen Achse auf die erste Reflexionsfläche auftretender Strahl an der ersten Reflexionsfläche und der zweiten Reflexionsfläche jeweils um denselben Winkel umgelenkt wird.

6. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Umlenkeinheit (ULE1) und die zweite Umlenkeinheit (ULE2) in einen Bereich angeordnet ist, in dem ein Subaperturverhältnis SAR dem Betrage nach kleiner als 0.3 ist.

7. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Objektivteil einen ersten Abbildungsmaßstab $ß_1$ aufweist, für den die Bedingung $0{,}5 \leq |ß_1| \leq 2{,}0$ gilt, wobei vorzugsweise die Bedingung $|ß_1| \leq 1{,}2$ gilt und/oder dadurch gekennzeichnet, dass das Projektionsobjektiv einen verkleinernden Abbildungsmaßstab aufweist und dass der erste Objektivteil maximal die Hälfte der Verkleinerung erzeugt.

8. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine bildseitige numerische Apertur kleiner als 0,5 ist, wobei die numerische Apertur vorzugsweise im Bereich von 0,2 bis 0,4 liegt.

9. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in dem Projektionsstrahlengang zwischen dem effektiven Objektfeld (OF) in der Objektebene (OS) und dem effektiven Bildfeld (IF) in der Bildebene eine Summe von Reflexionen und Zwischenbildern eine gerade Zahl ist.

10. Katadioptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene (OS) des Projektionsobjektivs angeordneten Musters in eine zur Objektebene parallele Bildebene des Projektionsobjektivs umfassend:
eine Vielzahl optischer Elemente, die mehrere Linsen und einen Konkavspiegel (CM) umfassen und zwischen der Objektebene (OS) und der Bildebene (IS) entlang einer optischen Achse (OA) angeordnet sind, um
ein außerhalb der optischen Achse in der Objektebene angeordnetes effektives Objektfeld (OF1) entlang eines Projektionsstrahlengangs (RP1) in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes effektives Bildfeld (IF1) abzubilden, wobei
im Projektionsstrahlengang wenigstens eine zweistufig reflektierende Umlenkeinheit angeordnet ist, die eine erste Reflexionsfläche (RF1) und eine unmittelbar folgende zweite Reflexionsfläche (RF2) aufweist, wobei die erste Reflexionsfläche (RF1) zur Umlenkung der von der Objektebene (OS) kommende Strahlung zur zweiten Reflexionsfläche (RF2) und die zweite Reflexionsfläche (RF2) zur Umlenkung der von der ersten Reflexionsfläche kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene (IS) angeordnet ist.

11. Projektionsobjektiv nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass im Projektionsstrahlengang eine erste Umlenkeinheit (ULE1) zur Umlenkung der von der Objektebene (OS) kommenden Strahlung zu dem Konkavspiegel und eine zweite Umlenkeinheit (ULE2) zur Umlenkung der von dem Konkavspiegel kommenden Strahlung in Richtung der Bildebene (IS) angeordnet ist und dass die erste Umlenkeinheit (ULE1) und/oder die zweite Umlenkeinheit (ULE2) als zweistufig reflektierende Umlenkeinheit ausgebildet ist.

12. Projektionsobjektiv nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass eine der Umlenkeinheiten als zweistufig reflektierende Umlenkeinheit und die andere Umlenkeinheit als Planspiegel ausgebildet ist.

13. Projektionsbelichtungsanlage zur Belichtung eines im Bereich einer Bildebene eines Projektionsobjektivs angeordneten strahlungsempfindlichen Substrats mit mindestens einem Bild eines im Bereich einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer Maske umfassend:
ein Beleuchtungssystem (ILL) zum Empfang des Lichtes einer einzigen Lichtquelle und zur Formung von Beleuchtungsstrahlung, die ein außerhalb einer optischen Achse des Projektionsobjektivs in der Objektebene angeordnetes erstes effektives Objektfeld und zeitgleich ein dem ersten Objektfeld gegenüberliegendes, außerhalb der optischen Achse in der Objektebene angeordnetes zweites effektives Objektfeld beleuchtet;
ein katadioptrisches Projektionsobjektiv, das dafür konfiguriert ist, das erste effektive Objektfeld entlang eines ersten Projektionsstrahlengangs in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes erstes effektives Bildfeld und zeitgleich das zweite effektive Objektfeld entlang eines zweiten Projektionsstrahlengangs in ein außerhalb der optischen Achse in der Bildebene liegendes zweites effektives Bildfeld abzubilden;
eine Einrichtung zum Halten der Maske zwischen dem Beleuchtungssystem und dem Projektionsobjektiv derart, dass das Muster im Bereich der Objektebene des Projektionsobjektivs angeordnet ist;
einer Einrichtung zum Halten des Substrats derart, dass eine strahlungsempfindliche Oberfläche des Substrats im Bereich der Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnet ist,
dadurch gekennzeichnet, dass das Projektionsobjektiv (PO) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12 ausgebildet ist.

14. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass das Beleuchtungssystem

eine refraktive Pupillenformungseinheit (PFU) zum Empfang von Licht der primären Lichtquelle (LS) und zur Erzeugung einer zweidimensionalen Intensitätsverteilung in einer Pupillenformungsfläche (PUP) des Beleuchtungssystems, und

ein der Pupillenformungseinheit optisch nachgeschaltetes refraktives Feldformungssystem (FFS) mit einer Homogenisierungseinheit (HOM) zur Homogenisierung des von der Pupillenformungseinheit empfangenen Lichts und zum Teilen des Beleuchtungslichts in das erste Beleuchtungsstrahlbündel (SB1) und das zweite Beleuchtungsstrahlbündel (SB2) umfasst,

wobei vorzugsweise die Homogenisierungseinheit (HOM) eine Integratorstabanordnung oder eine erste Rasteranordnung (RA1) und eine zweite Rasteranordnung (RA1) aufweist, wobei

die Integratorstabanordnung (ISA) einen Eingangs-Integratorstab (IE) mit einer Eintrittsfläche (EF1) und einer Austrittfläche (AF1) sowie einen mit einer ersten Teilfläche (TF1) der Austrittsfläche (AF1) optisch gekoppelten ersten Ausgangs-Integratorstab (IA1) und einen mit einer zweiten Teilfläche (TF2) der Austrittsfläche (AF1) optisch gekoppelten zweiten Ausgangs-Integratorstab (IA2) aufweist, wobei eine Austrittsfläche (AF2-1) des ersten Ausgangs-Integratorstabs dem ersten Beleuchtungsfeld ILF1) und eine Austrittsfläche (AF2-2) des zweiten Ausgangs-Integratorstabs dem zweiten Beleuchtungsfeld (ILF2) zugeordnet ist;
und
die erste Rasteranordnung (RA1) erste refraktive Rasterelemente (RE1) zum Empfang von Licht der zweidimensionalen Intensitätsverteilung und zur Erzeugung einer Rasteranordnung sekundärer Lichtquellen (SL1, SL2,..) und die nachgeschaltete zweite Rasteranordnung (RA2) zweite refraktive Rasterelemente (RE2) zum Empfang von Licht der sekundären Lichtquellen (SL1, SL2) und zur mindestens teilweisen Überlagerung von Licht der sekundären Lichtquellen in der Austrittsebene aufweist,
wobei jedes erste Rasterelement (RE1) einen optischen Kanal erzeugt und jedes der zweiten Rasterelemente (RE2) zwei benachbarten ersten Rasterelementen (RE1) zugeordnet ist und durch ein Linsenelement gebildet ist, das einen in einem ersten optischen Kanal liegenden ersten Abschnitt (AB1) sowie einen in einem zweiten optischen Kanal liegenden zweiten Abschnitt (AB2) aufweist und die Abschnitte unterschiedliche Oberflächenformen aufweisen.

15. Projektionsbelichtungsverfahren zur Belichtung eines strahlungsempfindlichen Substrates mit mindestens einem Bild eines Musters einer Maske mit folgenden Schritten:
Bereitstellen eines Musters zwischen einem Beleuchtungssystem und einem Projektionsobjektiv einer Projektionsbelichtungsanlage derart, dass das Muster im Bereich der Objektebene des Projektionsobjektivs angeordnet ist;
Halten des Substrats derart, dass eine strahlungsempfindliche Oberfläche des Substrats im Bereich einer zur Objektebene optisch konjugierten Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnet ist;
Beleuchten von zwei Beleuchtungsbereichen der Maske mit von dem Beleuchtungssystem bereitgestellten Beleuchtungsstrahlung einer einzigen primären Lichtquelle;
wobei zwei Beleuchtungsstrahlbündel (BS1, BS2) erzeugt werden, wobei ein erstes Beleuchtungsstrahlbündel (BS1) entlang eines ersten Beleuchtungsstrahlengangs zu einem außerhalb der optischen Achse des Projektionsobjektivs in der Austrittsebene (ES) des Beleuchtungssystems angeordneten ersten Beleuchtungsfeld (ILF1) und zeitgleich ein zweites Beleuchtungsstrahlbündel (BS2) entlang eines zweiten Beleuchtungsstrahlengangs zu einem dem ersten Beleuchtungsfeld (ILF1) in Bezug auf die optische Achse (AX) gegenüberliegenden

und außerhalb der optischen Achse in der Austrittsebene angeordneten zweiten Beleuchtungsfeld (ILF) geführt wird;

Projizieren der in den Beleuchtungsfeldern liegenden Teile des Musters auf zugeordnete Bildfelder am Substrat mit Hilfe des Projektionsobjektivs,

wobei ein Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 12 und/oder eine Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 13 oder 14 verwendet wird.

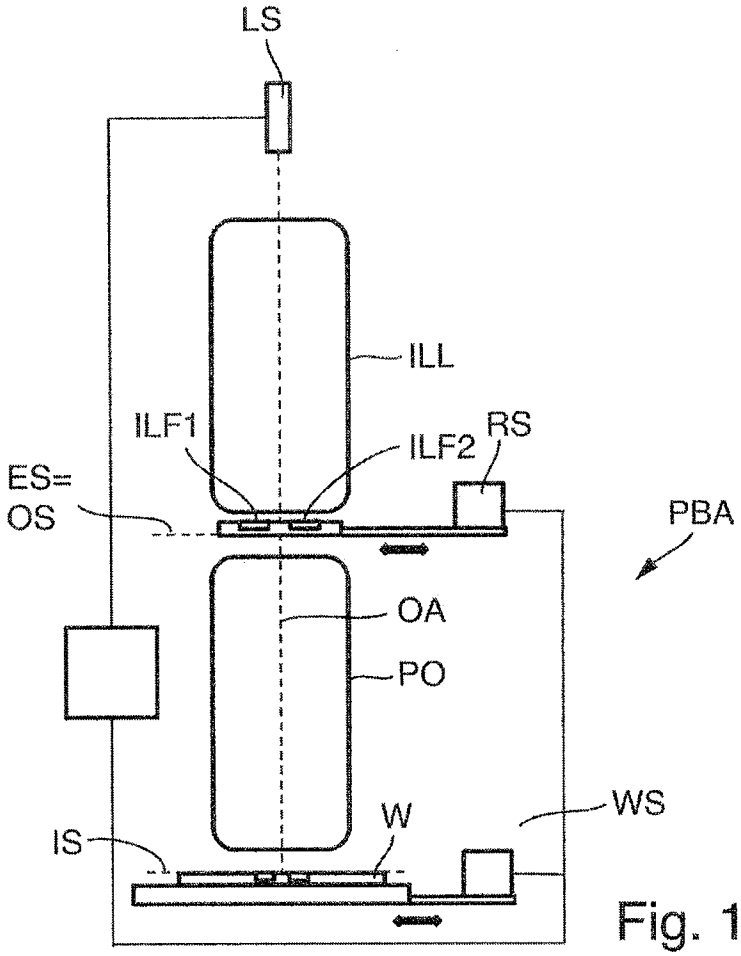

LS
ILL
ILF1
ILF2
RS
ES=
OS
PBA
OA
PO
W
WS
IS

Fig. 1

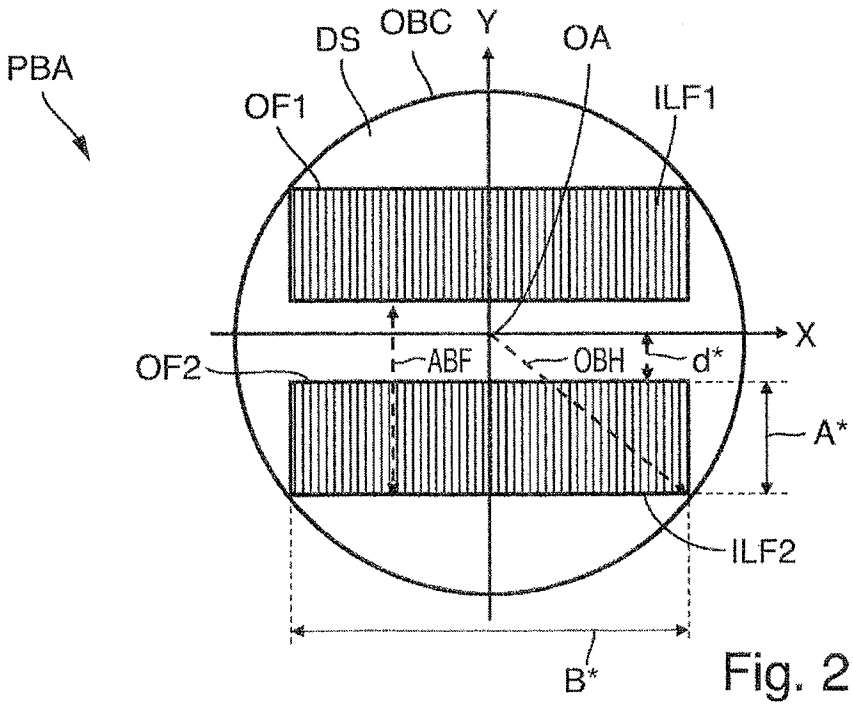

PBA
DS
OBC
Y
OA
OF1
ILF1
X
ABF
OBH
d*
OF2
A*
ILF2
B*

Fig. 2

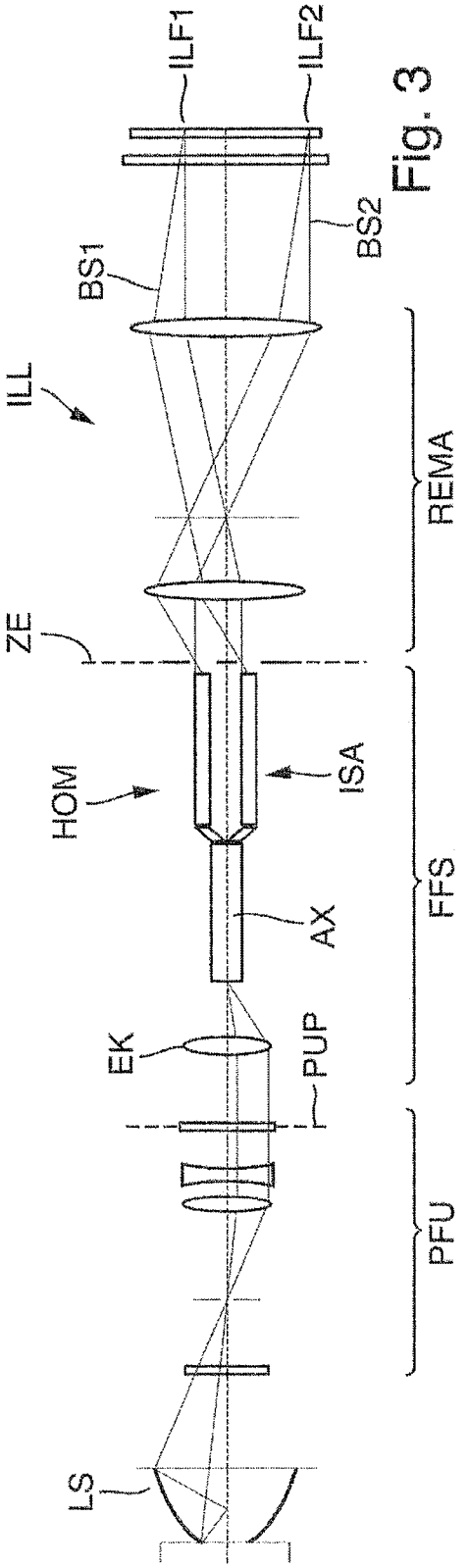

ILF1
ILF2
BS2
BS1
ILL
REMA
ZE
FFS
HOM
ISA
AX
EK
PUP
PFU
LS

Fig. 3

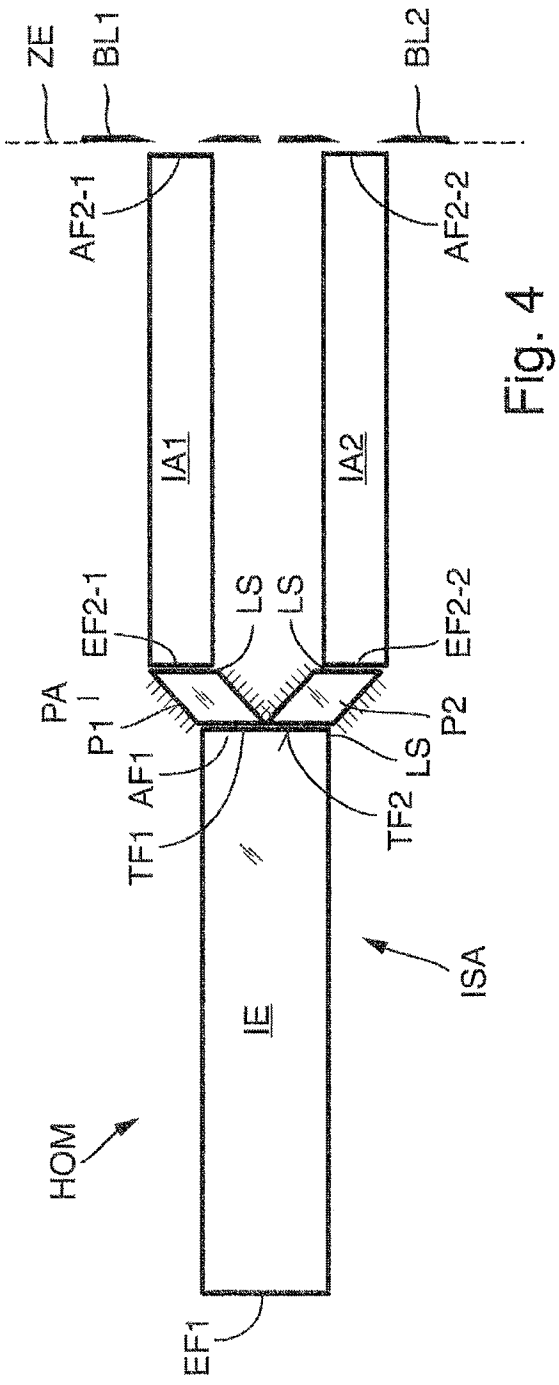

ZE
BL1
BL2
AF2-1
AF2-2
IA1
IA2
EF2-1
EF2-2
LS
LS
PA
P1
P2
AF1
LS
TF1
TF2
IE
ISA
HOM
EF1

Fig. 4

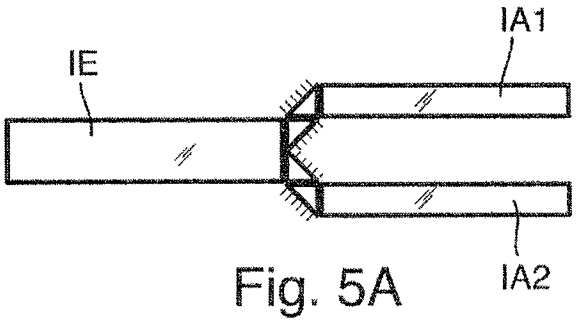


Fig. 5A

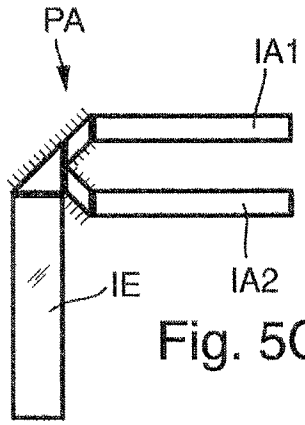


Fig. 5C

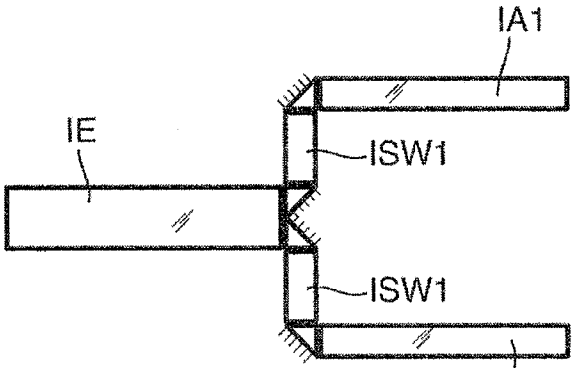


Fig. 5B

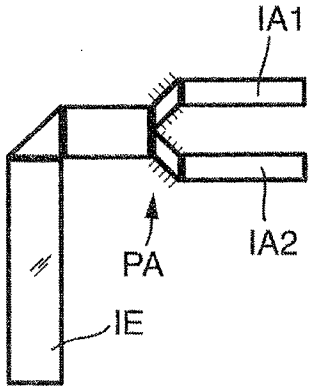


Fig. 5D

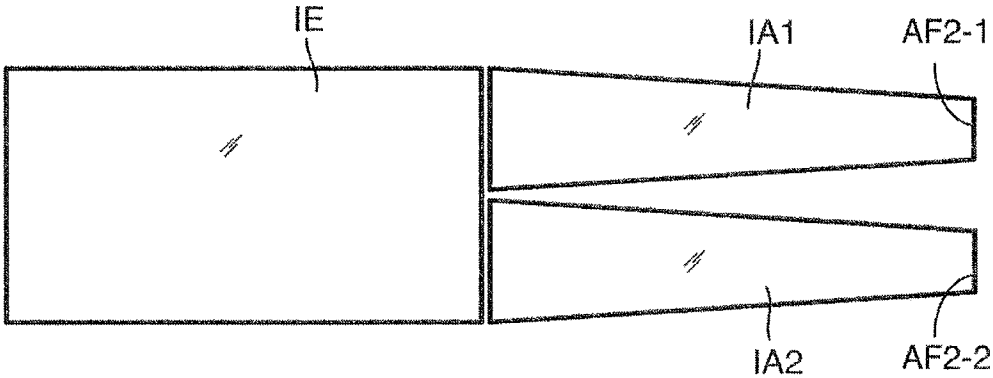


Fig. 6

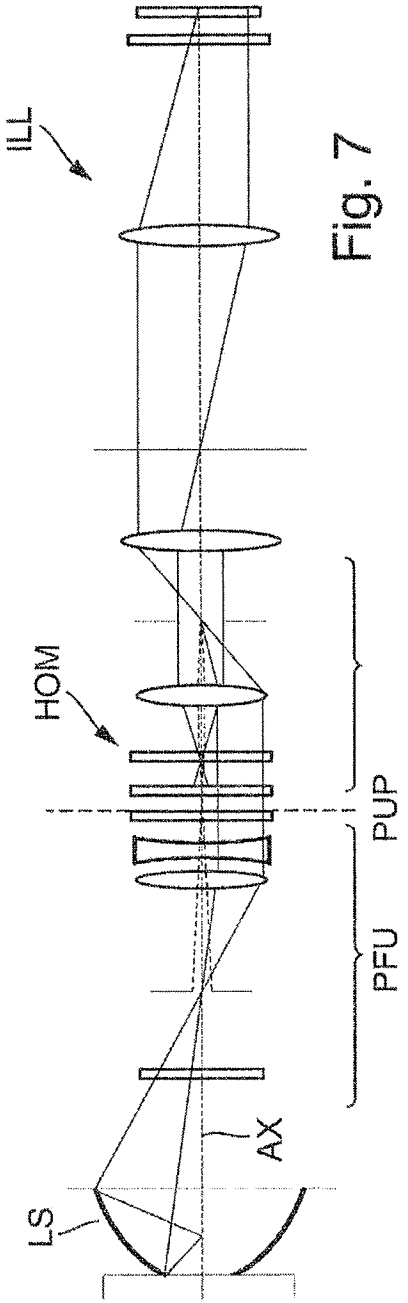

ILL
HOM
PUP
PFU
AX
LS

Fig. 7

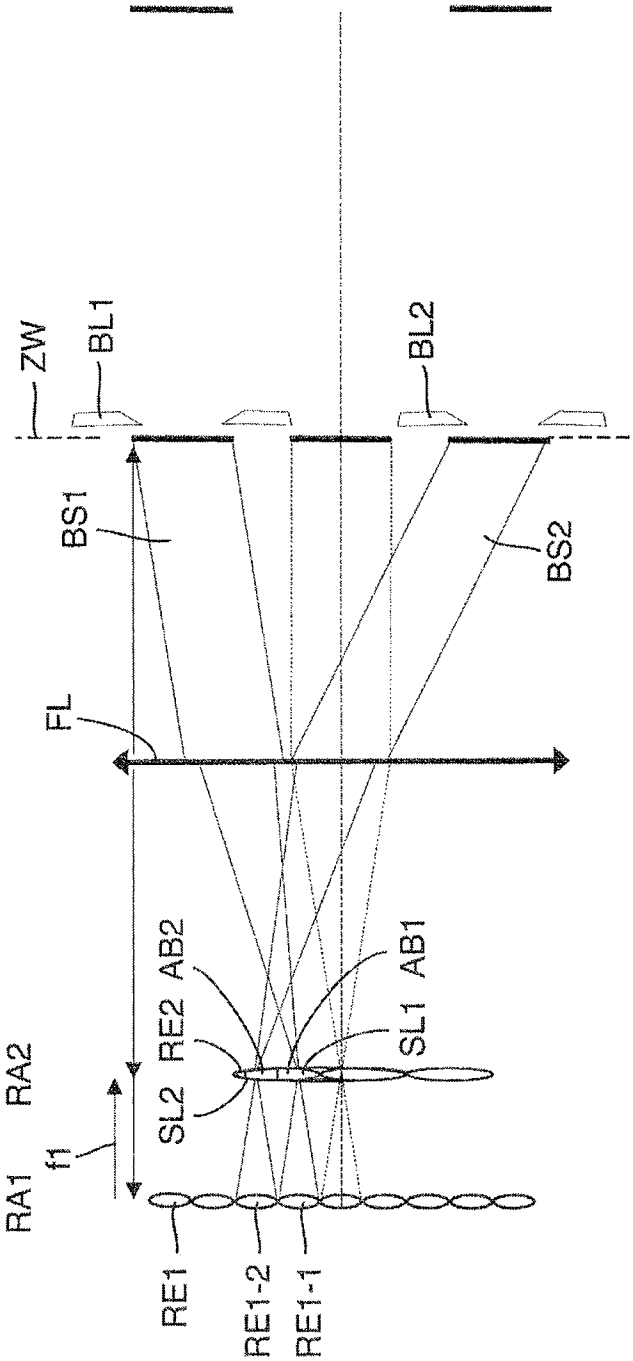

ZW
BL1
BL2
BS1
BS2
FL
AB2
RE2
SL2
AB1
SL1
RA2
RA1
f1
RE1
RE1-2
RE1-1

Fig. 8

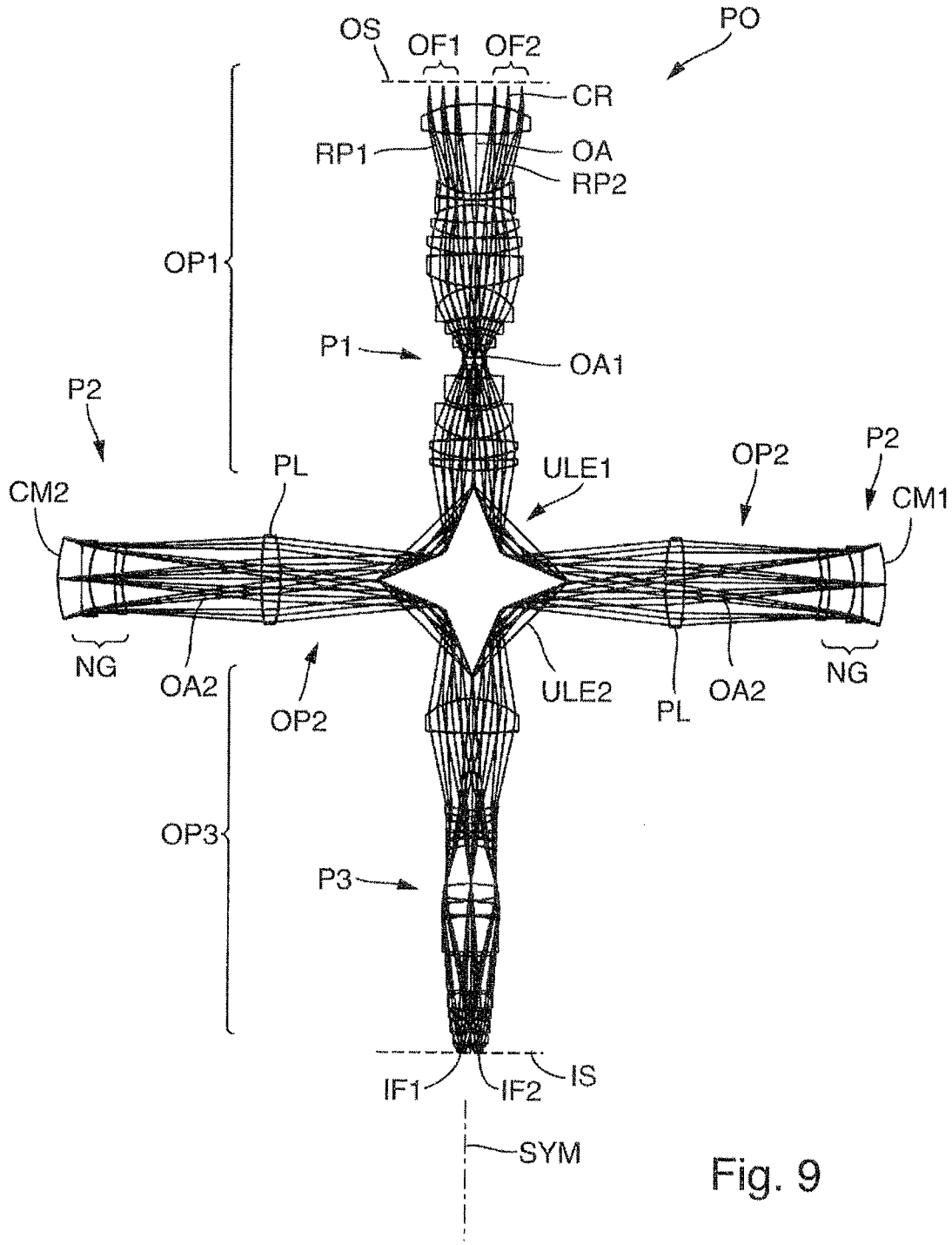

OS
OF1
OF2
PO
CR
RP1
OA
RP2
OP1
P1
OA1
P2
PL
ULE1
OP2
P2
CM2
CM1
NG
OA2
OP2
ULE2
PL
OA2
NG
OP3
P3
IF1
IF2
IS
SYM

Fig. 9

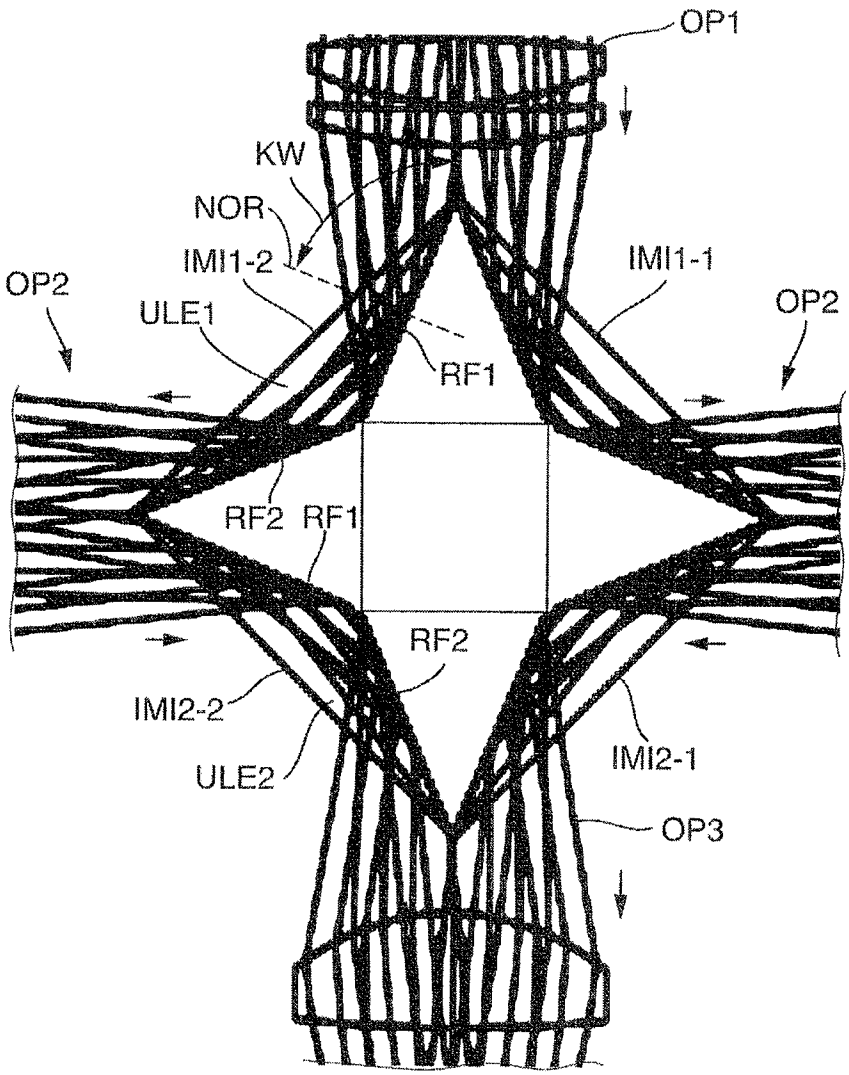

OP1
KW
NOR
IMI1-2
IMI1-1
OP2
ULE1
OP2
RF1
RF2
RF1
RF2
IMI2-2
IMI2-1
ULE2
OP3

Fig. 10

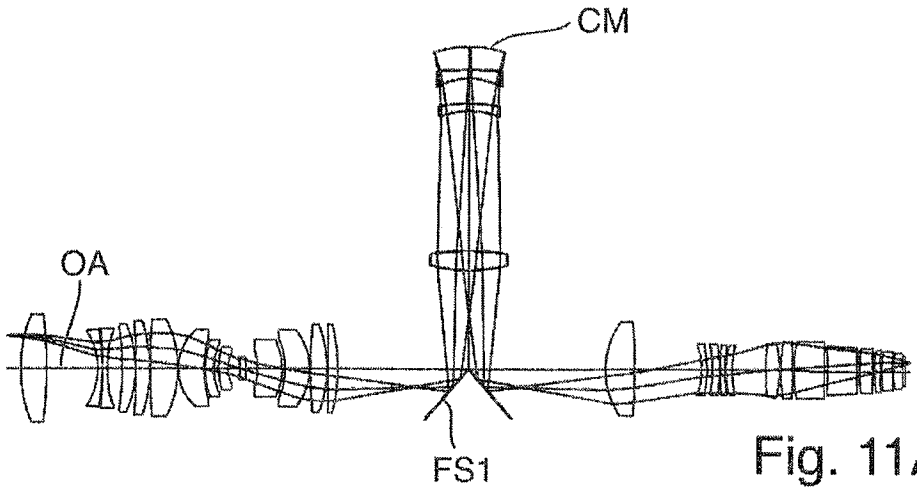


Fig. 11A

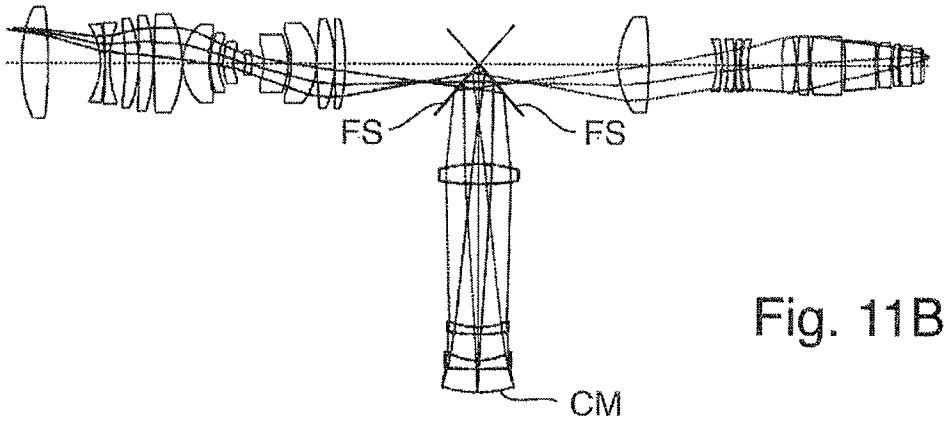


Fig. 11B

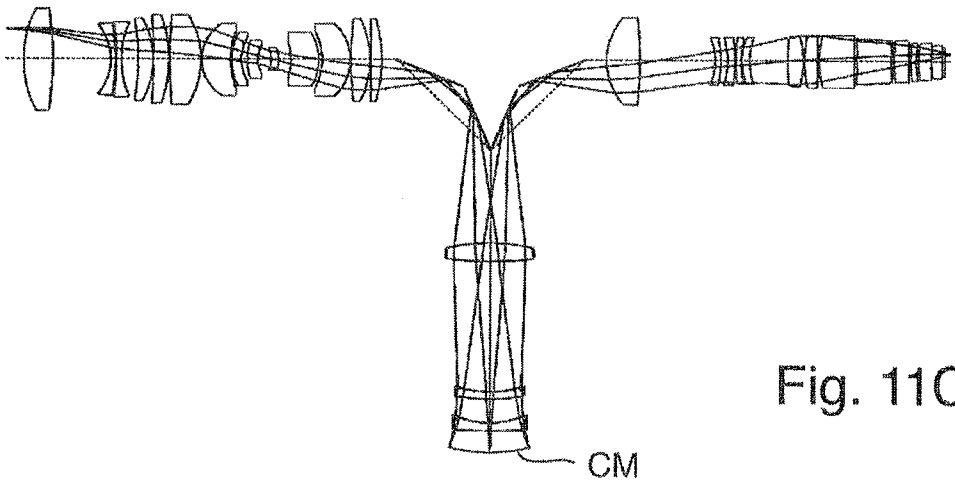


Fig. 11C

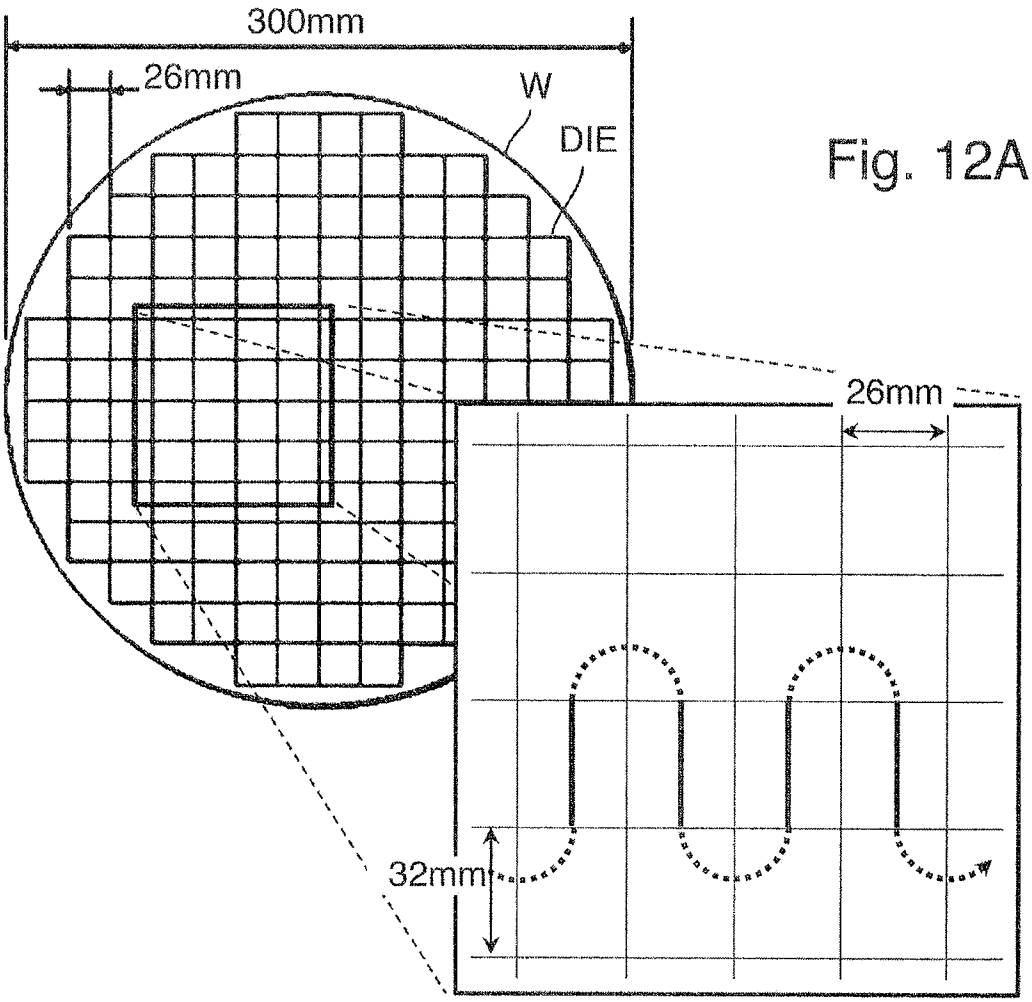


Fig. 12A

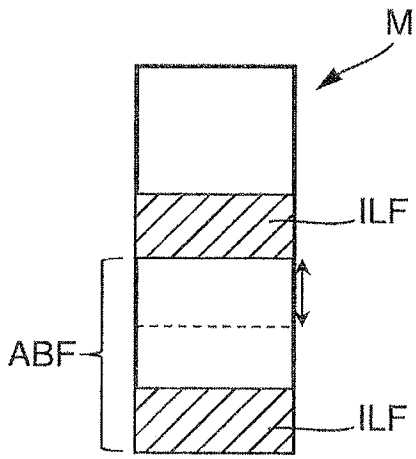
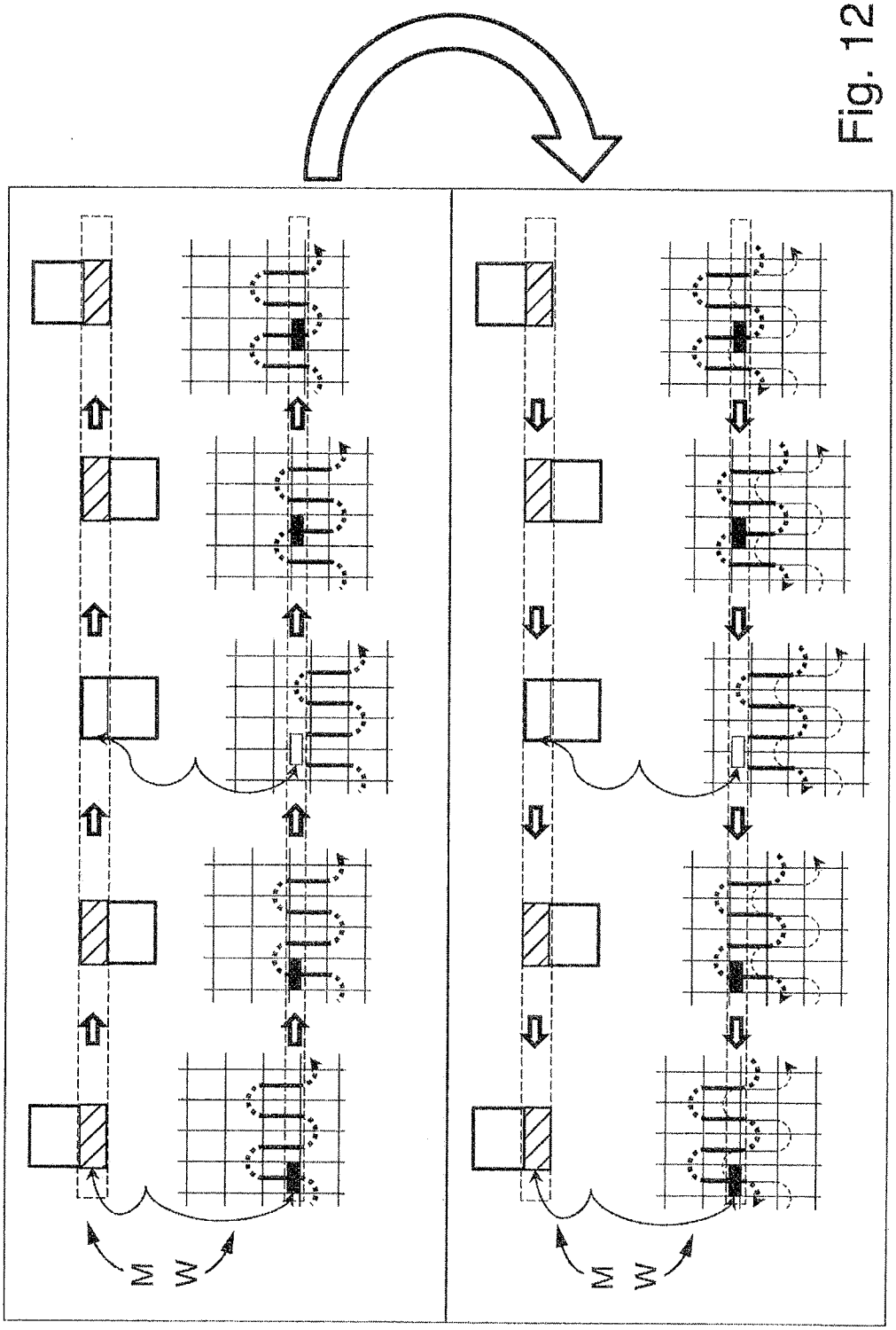


Fig. 13A

Fig. 12B



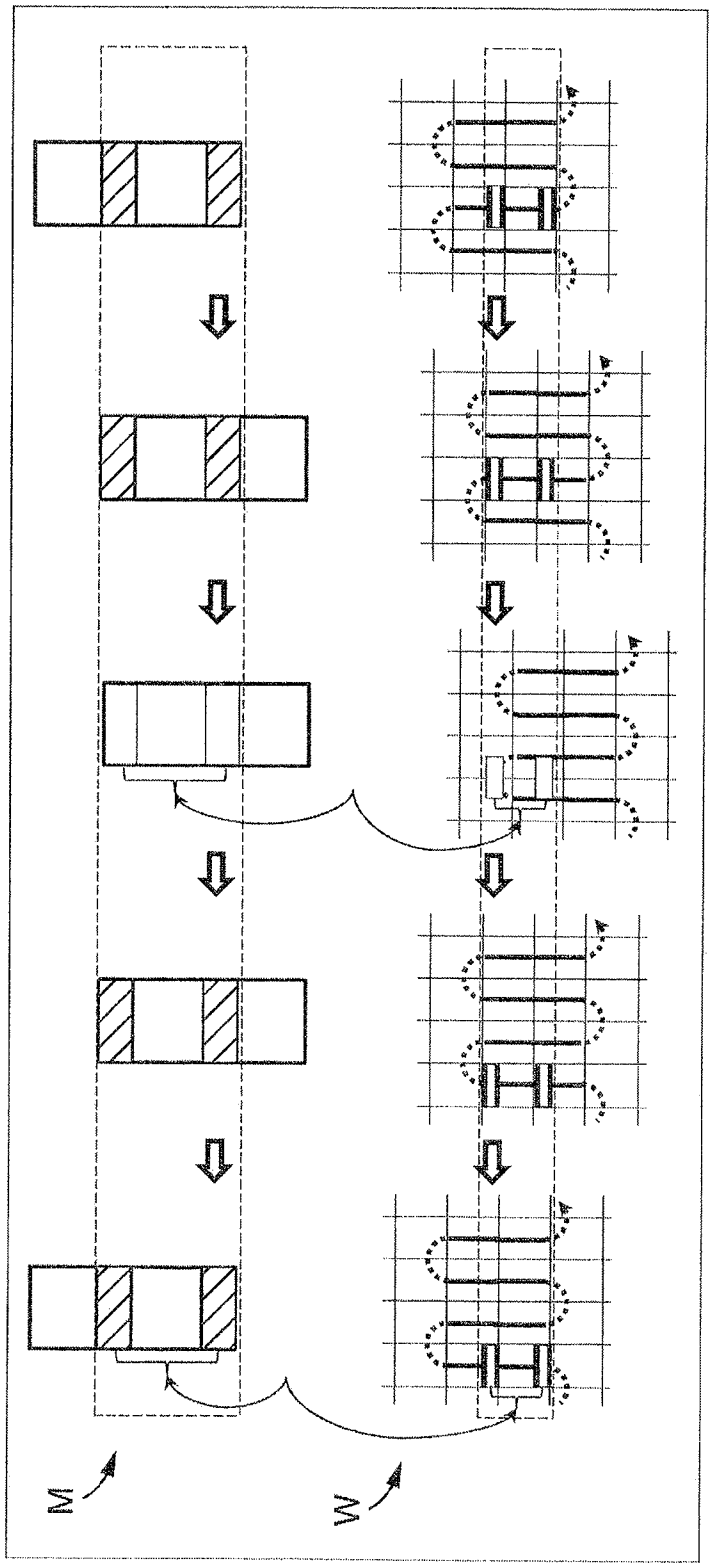


Fig. 13B

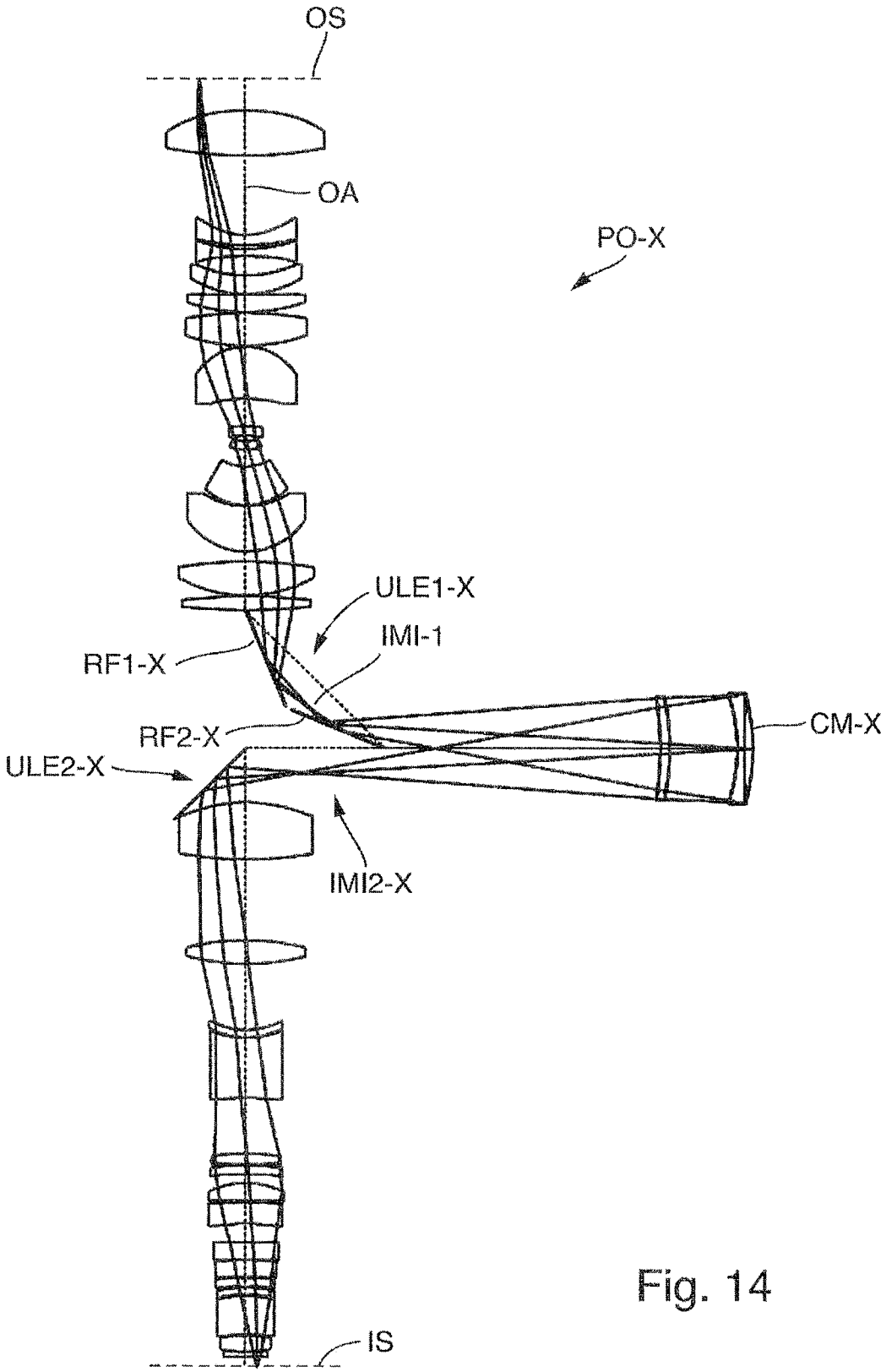


Fig. 14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2023/062883

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G03F 7/00(2006.01)i; ***G02B 27/09***(2006.01)i; ***G02B 27/10***(2006.01)i; ***G02B 5/09***(2006.01)i; ***G02B 17/08***(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; 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, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2006082904 A1 (KATO TAKASHI [JP] ET AL) 20 April 2006 (2006-04-20) paragraphs [0029], [0030], [0081] - [0092]; figure 5	10
X A	US 2013120728 A1 (EPPLE ALEXANDER [DE] ET AL) 16 May 2013 (2013-05-16) paragraphs [0142] - [0147]; figures 22, 23, 24	10,11,13,15 12, 14
A	EP 2003507 A1 (NIKON CORP [JP]) 17 December 2008 (2008-12-17) paragraphs [0027] - [0032]; figures 2,3	1-15

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
27 July 2023	**04 August 2023**

Name and mailing address of the ISA/EP	Authorized officer
European Patent Office **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands** Telephone No. **(+31-70)340-2040** Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	**Eisner, Klaus** Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2023/062883

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 2006082904 A1	20 April 2006	JP 2006119244 A	11 May 2006
		US 2006082904 A1	20 April 2006
US 2013120728 A1	16 May 2013	CN 1965259 A	16 May 2007
		EP 1733271 A1	20 December 2006
		EP 1733272 A1	20 December 2006
		JP 4801047 B2	26 October 2011
		JP 2007532937 A	15 November 2007
		JP 2007532938 A	15 November 2007
		KR 20070012460 A	25 January 2007
		US 2008002265 A1	03 January 2008
		US 2008213703 A1	04 September 2008
		US 2011261444 A1	27 October 2011
		US 2013120728 A1	16 May 2013
		WO 2005098504 A1	20 October 2005
		WO 2005098505 A1	20 October 2005
		WO 2005098506 A1	20 October 2005
EP 2003507 A1	17 December 2008	CN 101384968 A	11 March 2009
		CN 103019040 A	03 April 2013
		EP 2003507 A1	17 December 2008
		HK 1127967 A1	09 October 2009
		JP 4952182 B2	13 June 2012
		JP 2007286580 A	01 November 2007
		KR 20080113341 A	30 December 2008
		TW I408507 B	11 September 2013
		WO 2007108420 A1	27 September 2007

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2023/062883

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G03F7/00 G02B27/09 G02B27/10 G02B5/09 G02B17/08
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G03F 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, WPI Data, INSPEC

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2006/082904 A1 (KATO TAKASHI [JP] ET AL) 20. April 2006 (2006-04-20) Absätze [0029], [0030], [0081] - [0092]; Abbildung 5	10
X	US 2013/120728 A1 (EPPLE ALEXANDER [DE] ET AL) 16. Mai 2013 (2013-05-16)	10,11, 13,15
A	Absätze [0142] - [0147]; Abbildungen 22, 23, 24	12,14
A	EP 2 003 507 A1 (NIKON CORP [JP]) 17. Dezember 2008 (2008-12-17) Absätze [0027] - [0032]; Abbildungen 2,3	1-15

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

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

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
27. Juli 2023	04/08/2023

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

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2023/062883

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2006082904 A1	20-04-2006	JP 2006119244 A	11-05-2006
		US 2006082904 A1	20-04-2006
US 2013120728 A1	16-05-2013	CN 1965259 A	16-05-2007
		EP 1733271 A1	20-12-2006
		EP 1733272 A1	20-12-2006
		JP 4801047 B2	26-10-2011
		JP 2007532937 A	15-11-2007
		JP 2007532938 A	15-11-2007
		KR 20070012460 A	25-01-2007
		US 2008002265 A1	03-01-2008
		US 2008213703 A1	04-09-2008
		US 2011261444 A1	27-10-2011
		US 2013120728 A1	16-05-2013
		WO 2005098504 A1	20-10-2005
		WO 2005098505 A1	20-10-2005
		WO 2005098506 A1	20-10-2005
EP 2003507 A1	17-12-2008	CN 101384968 A	11-03-2009
		CN 103019040 A	03-04-2013
		EP 2003507 A1	17-12-2008
		HK 1127967 A1	09-10-2009
		JP 4952182 B2	13-06-2012
		JP 2007286580 A	01-11-2007
		KR 20080113341 A	30-12-2008
		TW I408507 B	11-09-2013
		WO 2007108420 A1	27-09-2007