

(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
9. Dezember 2004 (09.12.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/107048 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G03F 7/00**

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2004/005816

(22) Internationales Anmeldedatum:
28. Mai 2004 (28.05.2004)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
103 24 477.8 30. Mai 2003 (30.05.2003) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): **CARL ZEISS SMT AG** [DE/DE]; Carl-Zeiss-Strasse
22, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **DODOC, Aurelian**
[DE/DE]; Hainbuchenweg 7, 73447 Oberkochen (DE).
SCHUSTER, Karl, Heinz [DE/DE]; Rechbergstrasse 24,

89551 Königsbrunn (DE). **MALLMANN, Jörg** [DE/DE];
Hüttenweg 12, 56154 Boppard (DE). **ULRICH, Wil-
helm** [DE/DE]; Lederacherring 44, 73434 Aalen (DE).
ROSTALKSI, Hans-Jürgen [DE/DE]; Dietrich-Bonho-
effers-Strasse 9, 73434 Aalen (DE).

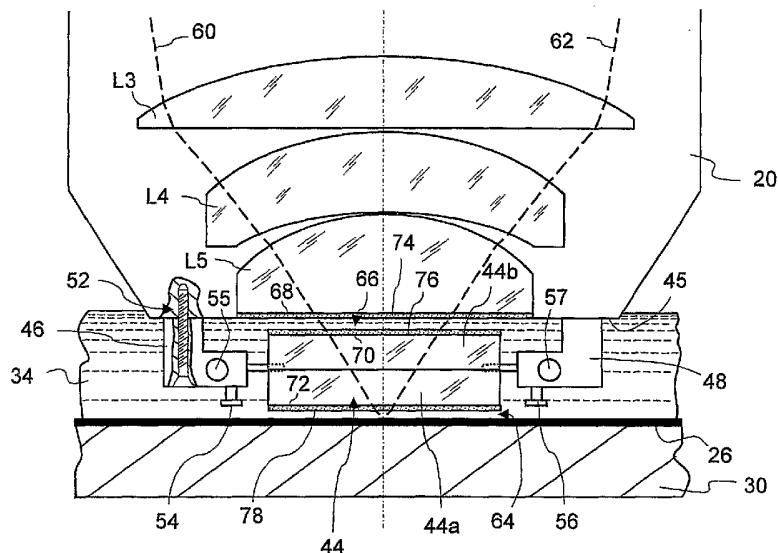
(74) Anwalt: **SCHWANHÄUSSER, Gernot**; Ostertag & Part-
ner, Eibenweg 10, 70597 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES,
FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,
KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD,
MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG,
PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM,
ZW.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: MICROLITHOGRAPHIC PROJECTION EXPOSURE SYSTEM

(54) Bezeichnung: MIKROLITHOGRAPHISCHE PROJEKTIONSBELICHTUNGSANLAGE



(57) Abstract: A microlithographic projection exposure system contains a lighting device (12) for producing a projection light (13) and a projection objective (20; 220; 320; 420; 520; 620; 720; 820; 920; 1020; 1120), with which a reticle (24), which can be placed in an object plane (22) of the projection objective, can be projected onto a photosensitive layer (26) that can be placed in an image plane (28) of the projection objective. The projection objective is designed for an immersion operation during which a lens (L5; L205; L605; L705; L805; L905; L1005; L1105) of the projection objective, this lens being the closest one to the image, is immersed in an immersion liquid (34; 334a; 434a; 534a). A terminating element (44; 244; 444; 544; 644; 744; 844; 944; 1044; 1144) that is transparent to the projection light (13) is fixed between the lens closest to the image and the photosensitive layer.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2004/107048 A2



(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) **Zusammenfassung:** Eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage enthält eine Beleuchtungseinrichtung (12) zur Erzeugung von Projektionslicht (13) und ein Projektionsobjektiv (20; 220; 320; 420; 520; 620; 720; 820; 920; 1020; 1120), mit dem ein in einer Objektebene (22) des Projektionsobjektivs anordenbares Retikel (24) auf eine in einer Bildebene (28) des Projektionsobjektivs anordenbare lichtempfindliche Schicht (26) abbildbar ist. Das Projektionsobjektiv ist für einen Immersionsbetrieb ausgelegt, bei dem eine bildseitig letzte Linse (L5; L205; L605; L705; L805; L905; L1005; L1105) des Projektionsobjektivs in eine Immersionsflüssigkeit (34; 334a; 434a; 534a) eintaucht. Ein für das Projektionslicht (13) durchlässiges Abschlusselement (44; 244; 444; 544; 644; 744; 844; 944; 1044; 1144) ist zwischen der bildseitig letzten Linse und der lichtempfindlichen Schicht derart befestigt.

MIKROLITHOGRAPHISCHE PROJEKTIONSBELICHTUNGSANLAGE

=====

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

1. Gebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlagen, wie sie zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile verwendet werden. Die Erfindung betrifft insbesondere Projektionsbelichtungsanlagen mit einem für einen Immersionsbetrieb ausgelegten Projektionsobjektiv.

2. Beschreibung des Standes der Technik

Integrierte elektrische Schaltkreise und andere mikrostrukturierte Bauelemente werden üblicherweise hergestellt, indem auf ein geeignetes Substrat, bei dem es sich beispielsweise um einen Silizium-Wafer handeln kann, mehrere strukturierte Schichten aufgebracht werden. Zur Strukturierung der Schichten werden diese zunächst mit einem Photolack bedeckt, der für Licht eines bestimmten Wellenlängenbereiches, z.B. Licht im tiefen ultravioletten Spektralbereich (DUV, *deep ultraviolet*), empfindlich ist. Anschließend wird der so beschichtete Wafer in einer Projektionsbelichtungsanlage belichtet. Dabei wird ein Muster aus beugenden Strukturen, das sich auf einer Maske befindet, auf den Photolack mit Hilfe eines Projektionsobjektivs abgebildet. Da der Abbildungsmaßstab dabei im allgemeinen kleiner als 1

ist, werden derartige Projektionsobjektive häufig auch als Reduktionsobjektive bezeichnet.

Nach dem Entwickeln des Photolacks wird der Wafer einem Ätzprozeß unterzogen, wodurch die Schicht entsprechend dem
5 Muster auf der Maske strukturiert wird. Der noch verbliebene Photolack wird dann von den verbleibenden Teilen der Schicht entfernt. Dieser Prozeß wird so oft wiederholt, bis alle Schichten auf dem Wafer aufgebracht sind.

Eines der wesentlichen Ziele bei der Entwicklung der bei
10 der Herstellung eingesetzten Projektionsbelichtungsanlagen besteht darin, Strukturen mit zunehmend kleineren Abmessungen auf dem Wafer lithographisch definieren zu können. Kleine Strukturen führen zu hohen Integrationsdichten, was sich im allgemeinen günstig auf die Leistungsfähigkeit der
15 mit Hilfe derartiger Anlagen hergestellten mikrostrukturierten Bauelemente auswirkt.

Die Größe der definierbaren Strukturen hängt vor allem von dem Auflösungsvermögen des verwendeten Projektionsobjektivs ab. Da das Auflösungsvermögen der Projektionsobjektive um-
20 gekehrt proportional zu der Wellenlänge des Projektionslichts ist, besteht ein Ansatz zur Erhöhung des Auflösungsvermögens darin, Projektionslicht mit immer kürzeren Wellenlängen einzusetzen. Die kürzesten zur Zeit verwendeten Wellenlängen liegen im tiefen ultravioletten Spektral-
25 bereich (DUV, *deep ultraviolet*) und betragen 193 nm oder gelegentlich sogar 157 nm.

Ein anderer Ansatz zur Erhöhung des Auflösungsvermögens geht von der Überlegung aus, in einen Immersionsraum, der zwischen einer bildseitig letzten Linse des Projektionsobjektivs und dem Photolack oder einer anderen zu belichtenden lichtempfindlichen Schicht verbleibt, eine Immersionsflüssigkeit mit hoher Brechzahl einzubringen. Projektionsobjektive, die für den Immersionsbetrieb ausgelegt sind und deswegen auch als Immersionsobjektive bezeichnet werden, können numerische Aperturen von mehr als 1, z.B. 1.3 oder 1.4, erreichen. Die Immersion ermöglicht jedoch nicht nur hohe numerische Aperturen und dadurch ein vergrößertes Auflösungsvermögen, sondern wirkt sich auch günstig auf die Schärfentiefe aus. Je größer die Schärfentiefe ist, desto weniger hoch sind die Anforderungen an eine exakte Positionierung des Wafers in der Bildebene des Projektionsobjektivs. Im weiteren Sinne spricht man auch dann von Immersion, wenn die lichtempfindliche Schicht von einer Immersionsflüssigkeit bedeckt ist, ohne daß notwendigerweise das bildseitig letzte optische Element des Projektionsobjektivs in die Immersionsflüssigkeit eintaucht.

Die Durchführung eines Immersionsbetriebs erfordert allerdings einen erheblichen baulichen und prozeßtechnischen Zusatzaufwand. So muß beispielsweise sichergestellt sein, daß die optischen Eigenschaften der Immersionsflüssigkeit zumindest innerhalb des dem Projektionslicht ausgesetzten Volumens räumlich homogen und zeitlich konstant sind, und zwar selbst dann, wenn sich der Wafer mit dem darauf aufgetragenen Photolack relativ zu dem Projektionsobjektiv be-

wegt. Die hiermit zusammenhängenden technologischen Schwierigkeiten sind zur Zeit noch nicht befriedigend gelöst.

Aus der US 4 346 164 ist eine Projektionsbelichtungsanlage bekannt, die zur Aufnahme des Wafers einen oben offenen Behälter aufweist, dessen oberer Rand höher liegt als die untere Grenzfläche der letzten bildseitigen Linse des Projektionsobjektivs. In den Behälter münden Zu- und Ableitungen für eine Immersionsflüssigkeit, die mit einer Pumpe, einer Temperiereinrichtung sowie einem Filter zur Reinigung der Immersionsflüssigkeit verbunden sind. Während des Betriebs der Projektionsbelichtungsanlage wird die Immersionsflüssigkeit in einem Flüssigkeitskreislauf umgewälzt, wobei ein Zwischenraum ausgefüllt bleibt, der zwischen der unteren Grenzfläche der letzten bildseitigen Linse des Projektionsobjektivs und des Wafers verbleibt.

Trotz der Reinigung der Immersionsflüssigkeit mit Hilfe des in dem Flüssigkeitskreislauf angeordneten Filters können Verunreinigungen der bildseitig letzten Linse des Projektionsobjektivs allerdings nicht zuverlässig vermieden werden. Diese Verunreinigungen gehen vor allem von dem Photolack aus, der in unmittelbaren Kontakt mit der Immersionsflüssigkeit steht. Die in die Immersionsflüssigkeit übergehenden Stoffe können das Linsenmaterial derart angreifen, daß diese Linse durch eine neue Linse ersetzt oder zumindest außerhalb des Projektionsobjektivs einer gründlichen Reinigung unterzogen werden muß. In beiden Fällen sind ein Ausbau der letzten Linse und ein Einbau einer neuen oder ge-

reinigten Linse mit vollständiger Neujustierung erforderlich. Da es sich bei der bildseitig letzten Linse im allgemeinen um eine hochaperturige dicke Linse handelt, ist deren Justierung mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Da
5 während des Austauschs der Linse die Projektionsbelichtungsanlage nicht betrieben werden kann, führt dies aufgrund von Produktionsausfällen zu erheblichen Folgekosten.

Aus der WO 99/49504 ist eine Projektionsbelichtungsanlage bekannt, bei dem eine kleine Menge an Immersionsflüssigkeit
10 in dem Zwischenraum gehalten wird, der zwischen der bildseitlich letzten Linse des Projektionsobjektivs und dem Wafer verbleibt. Auch wenn sich der Wafer bei einer Verfahrensbewegung unter dem Projektionsobjektiv hinwegbewegt, bleibt die Immersionsflüssigkeit unterhalb der bildseitig letzten
15 Linse. Dies wird durch mehrere Zu- und Ableitungen ermöglicht, die dicht um diesen Bereich herum verteilt sind. Die Immersionsflüssigkeit tritt dabei kontinuierlich aus den Zuläufen aus und wird an den Abläufen wieder abgesaugt. Dadurch wird verhindert, daß die Immersionsflüssigkeit von
20 dem sich bewegenden Wafer mitgeführt wird.

Durch die kontinuierliche Zu- und Abfuhr von Immersionsflüssigkeit kommt es allerdings in erheblichem Umfang zur Bildung von Gasblasen. Diese können, sofern sie in den von Projektionslicht durchsetzten Bereich der Immersionsflüssigkeit eindringen, die Abbildung stören und dadurch Ausschuß verursachen.
25

Gleiches gilt auch für solche Projektionsbelichtungsanlagen, bei denen die Immersionsflüssigkeit mit Hilfe von Gasströmungen unterhalb der bildseitig letzten Linse gehalten wird, während sich der Wafer unter dem Projektionsobjektiv
5 hinwegbewegt. Je schneller dabei die Scangeschwindigkeit ist, mit der der Wafer an dem Projektionsobjektiv vorbeigeführt wird, desto stärker ist im allgemeinen die Blasenbildung, da dann die Immersionsflüssigkeit stärker angeströmt werden muß, damit sie nicht von dem sich bewegenden Wafer
10 mitgerissen wird.

Bei einer Projektionsbelichtungsanlage, die aus der US
5 610 683 bekannt ist, wird das Problem der Blasenbildung dadurch gelöst, daß der Wafer in eine abgeschlossene Kassette eingesetzt wird, die mit Immersionsflüssigkeit ge-
15 füllt ist. Eine planparallele transparente Abdeckplatte stellt dabei das bildseitig letzte optische Element des Projektionsobjektivs dar, das die Bewegungen des Wafers mitvollzieht. Es kann dadurch nicht zu Verwirbelungen aufgrund von Scherkräften kommen, die durch Relativbewegungen
20 zwischen der bildseitig letzten Linse und dem Wafer entstehen. Allerdings ist der Aufwand relativ groß, jeden Wafer in eine Kassette einzusetzen und diese dann mit einer Immersionsflüssigkeit mit genau definierten Eigenschaften zu füllen.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Aufgabe der Erfindung ist es deswegen, eine für einen Immersionsbetrieb ausgelegte Projektionsbelichtungsanlage anzugeben, die bei einfachem Aufbau einen zuverlässigen und wartungsarmen Betrieb ermöglicht.

Gelöst wird diese Aufgabe durch eine Projektionsbelichtungsanlage mit einer Beleuchtungseinrichtung zur Erzeugung von Projektionslicht und einem Projektionsobjektiv, mit dem ein in einer Objektebene des Projektionsobjektivs anordenbares Retikel auf eine in einer Bildebene des Projektionsobjektivs anordenbare lichtempfindliche Schicht abbildbar ist. Das Projektionsobjektiv ist außerdem für einen Immersionsbetrieb ausgelegt, bei dem eine bildseitig letzte Linse des Projektionsobjektivs in eine Immersionsflüssigkeit eintaucht. Erfindungsgemäß ist ein für das Projektionslicht durchlässiges Abschlußelement vorgesehen, das zwischen der bildseitig letzten Linse und der lichtempfindlichen Schicht derart anordenbar ist, daß es zumindest mit seiner bildseitigen Grenzfläche in die Immersionsflüssigkeit eintaucht.

Das Vorsehen eines Abschlußelements in dem Zwischenraum zwischen der bildseitig letzten Linse des Projektionsobjektivs und der lichtempfindlichen Schicht hat u.a. den Vorteil, daß aus der lichtempfindlichen Schicht austretende Bestandteile oder sonstige dort entstehende Verunreinigungen sich allenfalls noch zu einem vernachlässigbaren Teil an der bildseitig letzten Linse anlagern können, da das Ab-

schlußelement, und zwar insbesondere dessen der lichtempfindlichen Schicht zugewandte Seite, wie ein Schutzschild für die bildseitig letzte Linse wirkt. Auf diese Weise muß nicht die letzte bildseitige Linse des Projektionsobjektivs, sondern nur noch das Abschlußelement gelegentlich
5 entfernt und nach Reinigung oder Austausch wieder montiert werden. Insbesondere wenn das Abschlußelement von außen an dem Projektionsobjektiv befestigt ist und ohne Demontage des Projektionsobjektivs entfernt und montiert werden kann,
10 bleibt der hierfür erforderliche Aufwand vergleichsweise gering.

Besonders bevorzugt ist es, wenn zwischen der bildseitig letzten Linse des Projektionsobjektivs und dem Abschlußelement ein Zwischenraum verbleibt, der zumindest teilweise
15 mit Immersionsflüssigkeit auffüllbar ist. Das Abschlußelement taucht somit bei dieser Weiterbildung beidseitig in Immersionsflüssigkeit ein, so daß es auch an der objektseitigen Grenzfläche des Abschlußelements nur zu einer geringen Lichtbrechung kommt. Dementsprechend gering sind die
20 Anforderungen an die Justierung und Fertigungsgenauigkeit des Abschlußelements. Besonders bei großen numerischen Aperturen reagiert nämlich selbst ein Abschlußelement mit planparalleler Form sehr empfindlich auf Fertigungsfehler, z.B. Abweichungen von der Solldicke, der Parallelität der
25 Grenzflächen und Paßfehler.

Ist der Zwischenraum nicht vollständig, sondern nur teilweise mit Immersionsflüssigkeit gefüllt, so verbleibt zwi-

schen der Immersionsflüssigkeit und der bildseitig letzten Linse ein gasgefüllter Bereich. Dies kann beispielsweise dann vorteilhaft sein, wenn das Projektionsobjektiv mit möglichst wenig Aufwand zwischen einem Trockenbetrieb und
5 einem Immersionsbetrieb umbaubar sein soll. Je weniger Zwischenräume zwischen festen optischen Elementen wie Linsen oder Abschlußelementen mit Immersionsflüssigkeit gefüllt sind, desto weniger wirkt sich im allgemeinen eine Umstellung auf den Immersionsbetrieb auf die Abstimmung des Projektionsobjektivs aus. Unter diesem Gesichtspunkt kann es
10 sogar vorteilhaft sein, das Projektionsobjektiv nicht in die Immersionsflüssigkeit eintauchen zu lassen, sondern zwischen dem Abschlußelement und der Immersionsflüssigkeit einen gasgefüllten Bereich zu belassen.

Bei einer vorteilhaften Weiterbildung dieser Ausgestaltung weist das Projektionsobjektiv zum Einbringen von Immersionsflüssigkeit in den Zwischenraum zwischen der bildseitig letzten Linse und dem Abschlußelement eine erste Immersionseinrichtung auf, die von einer zweiten Immersionseinrichtung zum Einbringen von Immersionsflüssigkeit in den
20 Zwischenraum zwischen dem letzten optischen Element und der lichtempfindlichen Schicht unabhängig ist, so daß kein Austausch von Immersionsflüssigkeit zwischen den Zwischenräumen möglich ist. Auf diese Weise ist sichergestellt, daß
25 von der lichtempfindlichen Schicht ausgehende Verunreinigungen nicht über die Immersionsflüssigkeit zu der bildseitig letzten Linse des Projektionsobjektivs gelangen können.

Bei einer anderen vorteilhaften Ausgestaltung hat das Abschlußelement den gleichen Brechungsindex wie die bildseitig letzte Linse des Projektionsobjektivs und ist mit seiner objektseitigen Grenzfläche so optisch an diese Linse
5 angekoppelt, daß durch das Projektionsobjektiv hindurchtretendes Projektionslicht zwischen der bildseitig letzten Linse und dem Abschlußelement nicht gebrochen wird. Das Fehlen jeglicher Brechung zwischen der letzten Linse und dem Abschlußelement führt zu einem noch geringeren Justierungsaufwand beim Austausch des Abschlußelements. Realisiert werden kann dies beispielsweise dadurch, daß die
10 bildseitig letzte Linse, das Abschlußelement und auch die sich dazwischen befindende Immersionsflüssigkeit den gleichen Brechungsindex haben.

15 Eine Brechung des Projektionslichts zwischen der bildseitig letzten Linse und dem Abschlußelement wird auch dann unterbunden, wenn das Abschlußelement an die bildseitig letzte Linse angesprengt ist und beide Elemente den gleichen Brechungsindex haben. Ein Ansprengen ist aber auch bei unterschiedlichen Brechungsindizes ggf. sinnvoll, da auf diese
20 Weise die bildseitig letzte Linse unmittelbar durch das daran angesprengte Abschlußelement vor Verunreinigungen geschützt ist. Besonders einfach läßt sich das Abschlußelement an die bildseitig letzte Linse ansprengen, wenn die
25 beiden einander zugewandten Grenzflächen plan sind. Eine Justierung ist dann überflüssig, da die Lage des Abschlußelements entlang der optischen Achse sowie die Orientierung

in der Ebene senkrecht dazu durch die planen Grenzflächen vorgegeben sind.

Bei einer besonders bevorzugten Ausgestaltung verbleibt zwischen der bildseitig letzten Linse des Projektionsobjektivs und dem Abschlußelement ein erster Zwischenraum, der mit einer ersten Immersionsflüssigkeit auffüllbar ist. Zwischen dem Abschlußelement und der lichtempfindlichen Schicht verbleibt ein zweiter Zwischenraum, der mit einer zweiten Immersionsflüssigkeit befüllbar ist. Der erste Zwischenraum ist bei dieser Ausgestaltung somit fluidisch dichtend von dem zweiten Zwischenraum abtrennbar.

Die erste Immersionsflüssigkeit und die zweite Immersionsflüssigkeit müssen nicht notwendigerweise verschieden sein. Die Verwendung unterschiedlicher Immersionsflüssigkeiten hat aber u.a. den Vorteil, daß die Immersionsflüssigkeiten optimal an die spezifischen Gegebenheiten in den beiden Zwischenräumen angepaßt werden können. Die erste Immersionsflüssigkeit, die mit der bildseitig letzten Linse des Projektionsobjektivs in Kontakt steht, kann z.B. eine sehr kleine Oberflächenspannung haben, die für die zweite, mit der lichtempfindlichen Schicht in Berührung kommende Immersionsflüssigkeit nicht mehr akzeptabel wäre. Die erste Immersionsflüssigkeit muß sich auch nicht unbedingt so leicht reinigen lassen wie die zweite Immersionsflüssigkeit, da sie nicht durch die lichtempfindliche Schicht verunreinigt werden kann. Eine Anpassung der beiden Immersionsflüssigkeiten kann ferner unter dem Gesichtspunkt der chemischen

Reaktionsfähigkeit erfolgen. Da beispielsweise Quarzglas und Kalziumfluorid-Kristalle unterschiedlich mit angrenzenden Flüssigkeiten wechselwirken, können die Immersionsflüssigkeiten so ausgewählt werden, daß sie mit den angrenzenden optischen Flächen chemisch möglichst wenig reagieren.

Das Abschlußelement ist bei dieser Ausgestaltung vorzugsweise verfahrbar angeordnet. Die Verfahrbarkeit ermöglicht es, die auf die Immersionsflüssigkeit einwirkenden Scherkräfte, die durch die Relativbewegung zwischen dem feststehenden Projektionsobjektiv und der lichtempfindlichen Schicht entstehen, zwischen der ersten Immersionsflüssigkeit und der zweiten Immersionsflüssigkeit in einem praktisch beliebigen Verhältnis zu verteilen.

Wird das Abschlußelement während eines Scanvorgangs der Projektionsbelichtungsanlage synchron zu der lichtempfindlichen Schicht verfahren, so lassen sich über den gesamten Scanvorgang hinweg gleichbleibende Kräfteverteilungen in den Immersionsflüssigkeiten erzielen. Dies begünstigt die Ausbildung laminarer Flüssigkeitsströmungen, was der Blasenbildung entgegenwirkt. Dies gilt insbesondere, wenn das Abschlußelement in einer zu der lichtempfindlichen Schicht parallelen Ebene verfahren wird.

Im Hinblick auf minimale Bewegungen der zweiten Immersionsflüssigkeit ist es besonders bevorzugt, wenn das Abschlußelement und die lichtempfindliche Schicht während einer Projektion gleiche Verfahrgeschwindigkeiten und Verfah-

richtungen haben. Zwischen dem Abschlußelement und der lichtempfindlichen Schicht gibt es dann keine Relativbewegung mehr. Die zweite Immersionsflüssigkeit ruht dann trotz der gemeinsamen Verbahrbewegung der lichtempfindlichen
5 Schicht und des Abschlußelements bewegungsfrei in dem zweiten Zwischenraum. Sie kann deswegen auch eine höhere Viskosität als die erste Immersionsflüssigkeit haben.

Sofern noch Strömungen innerhalb der zweiten Immersionsflüssigkeit auftreten, so gehen diese auf Trägheitskräfte
10 zurück, die beim Beschleunigen und Abbremsen während eines Scanvorgangs in Erscheinung treten. Wenn diese Trägheitskräfte klein genug sind, kann auf zusätzliche Maßnahmen verzichtet werden, die ansonsten erforderlich sind, um die Immersionsflüssigkeit in den Zwischenraum zwischen der
15 bildseitig letzten Linse und der lichtempfindlichen Schicht zu halten. Da diese Maßnahmen im allgemeinen eine Blasenbildung fördern, erlaubt es diese Ausgestaltung der Erfindung, Blasen im Bereich der zweiten Immersionsflüssigkeit sehr weitgehend zu vermeiden.

20 Im Bereich der ersten Immersionsflüssigkeit kommt es zwar bei einem Scanvorgang zu einer Relativbewegung zwischen dem Projektionsobjektiv und dem Abschlußelement und dadurch auch zu Scherkräften, die auf die erste Immersionsflüssigkeit einwirken. Das Abschlußelement kann aber, anders als
25 der Wafer, mit einer Berandung versehen sein, die ein unerwünschtes Abfließen der ersten Immersionsflüssigkeit während des Scanbetriebs verhindert. Daher sind auch für die

erste Immersionsflüssigkeit keine zusätzlichen Maßnahmen wie etwa ein Anströmen mit Gasen erforderlich, um ein Abfließen der Immersionsflüssigkeit zu verhindern. Folglich können auch in der ersten Immersionsflüssigkeit Blasen
5 nicht oder nicht in nennenswertem Umfang entstehen.

Der Rand kann unmittelbar an dem Abschlußelement ausgebildet sein. Bevorzugt ist es allerdings, wenn der Rand Teil einer zur bildseitig letzten Linse des Projektionsobjektivs hin offenen Wanne ist, in dessen Boden das Abschlußelement
10 angeordnet ist. Die Wanne selbst kann dann aus einem lichtundurchlässigen Material, z.B. einem Metall oder einem Kristall bestehen. Kristalle wie z.B. kristallines Silizium haben den Vorteil, sehr formbeständig zu sein. Wegen ihres geringen spezifischen Gewichts, ihrer Steifigkeit und ihrer
15 geringen chemischen Reaktionsfähigkeit sind auch Keramiken, z.B. auf der Basis von SiC, als Material für die Wanne gut geeignet. Das Abschlußelement, das z.B. aus Quarzglas bestehen kann, bildet dann lediglich eine Art Fenster am Boden der Wanne, durch welches das Projektionslicht hindurch-
20 treten kann.

Zusätzlich zu einer translatorischen Verfahrbarkeit kann das Abschlußelement auch um eine zur Bildebene parallele Kippachse verkippter sein. Die Kippbarkeit stellt einen zusätzlichen Freiheitsgrad dar, mit dem Bewegungen der ersten
25 und der zweiten Immersionsflüssigkeit beeinflusst werden können.

Wird das Abschlußelement beispielsweise während einer Positionierbewegung in einer Belichtungspause so verkippt, daß der größte Abstand zwischen dem Abschlußelement und der lichtempfindlichen Schicht in Bewegungsrichtung vorne
5 liegt, so entsteht eine Art keilförmiger Spalt zwischen dem Abschlußelement und der lichtempfindlichen Schicht. In diesem Spalt wird die zweite Immersionsflüssigkeit bei einer Positionierbewegung des Wafers über die lichtempfindliche Schicht hinweg mitgeführt. Die Verkipfung kann dabei so er-
10 folgen, daß der kürzeste Abstand zwischen dem Abschlußelement und der lichtempfindlichen Schicht so klein ist, daß die zweite Immersionsflüssigkeit diesen Spalt infolge von Kohäsionskräften nicht durchtreten kann. Dadurch ist es auf sehr einfache Art und Weise möglich, die zweite Immersions-
15 flüssigkeit auch über größere Entfernungen und mit größeren Geschwindigkeiten hinweg über die Oberfläche des Wafers hinweg zu verlagern.

Wenn auf dem Abschlußelement eine Berandung vorgesehen ist, so ist diese so zu dimensionieren, daß die zweite Immersi-
20 onsflüssigkeit bei einer Verkipfung des Abschlußelements trotzdem noch durch die Berandung an einem Abfließen gehindert wird. Damit entfällt auch bei Positionierbewegungen des Wafers, die im allgemeinen mit größeren Geschwindigkeiten als die Verfahrensbewegungen während einer Belichtung
25 durchgeführt werden, die Notwendigkeit, mit Hilfe von Anströmungen mit Gasen oder ähnlichen Maßnahmen eine Immersionsflüssigkeit mitzuführen. Somit kann es selbst bei Posi-

tionierbewegungen nicht zu einer nennenswerten Blasenbildung kommen.

Alternativ oder auch zusätzlich zu einer Verkippbarkeit des Abschlußelements kann vorgesehen sein, das Abschlußelement
5 senkrecht zur Bildebene zu verfahren. Der Abstand zwischen der lichtempfindlichen Schicht und dem Abschlußelement kann dann beispielsweise so weit verringert werden, daß die Immersionsflüssigkeit allein durch Kohäsionskräfte in dem zweiten Zwischenraum verbleibt.

- 10 Falls die zweite Immersionsflüssigkeit nicht lediglich durch die Kohäsionskräfte oder einem Verkippen des Abschlußelements bei einer Bewegung des Wafers relativ zum Projektionsobjektiv in der Nähe der bildseitig letzten Linse gehalten werden kann, so kann zusätzlich eine an sich
15 bekannte Halteeinrichtung vorgesehen sein, die vorzugsweise berührungslos die zweite Immersionsflüssigkeit in dem zweiten Zwischenraum hält. Die Halteeinrichtung kann zu diesem Zweck beispielsweise mindestens eine Gasdüse umfassen, deren Austrittsöffnung auf die zweite Immersionsflüssigkeit
20 gerichtet werden kann.

- Bei einer anderen vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist zumindest der erste Zwischenraum in einem verschließbaren Behälter angeordnet. Bei dem Behälter kann es sich beispielsweise um eine Art Gehäuse handeln, welches von dem
25 Projektionsobjektiv durchsetzt wird und die gesamte Tragstruktur für den Wafer überdeckt. Durch Verdampfen der Im-

mersionsflüssigkeit stellt sich nach einiger Zeit ein Sättigungsdampfdruck innerhalb des Behälters ein, der verhindert, daß mehr Immersionsflüssigkeit verdampft, als gleichzeitig wieder kondensiert. Auf diese Weise kann es dort, wo
5 die Immersionsflüssigkeit mit einem umgebenden Gas in Berührung kommt, nicht zur Entstehung von Verdunstungskälte führen. Derartige Wärmesenken bewirken eine inhomogene Temperaturverteilung und damit auch eine inhomogene Brechungsindexverteilung der Immersionsflüssigkeit, wodurch die Ab-
10 bildungseigenschaften verschlechtert werden.

Im allgemeinen dauert es allerdings sehr lange, bis sich in dem Behälter lediglich durch Verdunstung an der relativ kleinen Oberfläche der Sättigungsdampfdruck eingestellt hat. Daher ist es weiter bevorzugt, wenn die Projektionsbe-
15 lichtungsanlage eine Zuführeinrichtung zum Zuführen einer Dampfphase der ersten Immersionsflüssigkeit in dem Behälter umfaßt. Selbst wenn sich die erste Immersionsflüssigkeit von der zweiten Immersionsflüssigkeit unterscheidet, so ist es im allgemeinen nicht erforderlich, auch einer Verdun-
20 stung der zweiten Immersionsflüssigkeit entgegenzuwirken, da infolge des Abschlußelements die Grenzfläche zu einem umgebenden Gas sehr klein ist.

Eine minimale Abkühlung der ersten Immersionsflüssigkeit wird dann erreicht, wenn der Dampfdruck der Dampfphase der
25 ersten Immersionsflüssigkeit in dem Behälter so einstellbar ist, daß er zumindest annähernd gleich dem Sättigungsdampf-

druck der Dampfphase der ersten Immersionsflüssigkeit bei der in dem Behälter herrschenden Temperatur ist.

Eine andere Möglichkeit, Temperaturschwankungen innerhalb der ersten Immersionsflüssigkeit infolge lokaler Verdunstung zu unterbinden, besteht darin, den ersten Zwischenraum nach oben hin zumindest teilweise durch eine Abdeckung abzudecken. Die Abdeckung verkleinert die Grenzfläche zu einem umgebenden Gas, an der es durch Verdunstung zu einer Abkühlung kommen kann. Die Abdeckung kann dabei zum Beispiel so ausgeführt sein, daß zwischen der Abdeckung und der ersten Immersionsflüssigkeit nur ein kleiner, mit einem Gas gefüllter Zwischenraum verbleibt. Dort stellt sich durch Verdunsten relativ rasch der Sättigungsdampfdruck ein.

Bei dem Gas in dem Zwischenraum kann es sich aber auch um ein spezielles Schutzgas handeln, dessen Dichte größer ist als die Dichte eines umgebenden Gases. Infolge der größeren Dichte wird das Schutzgas durch die Schwerkraft in dem Zwischenraum gehalten. Das Schutzgas sollte ferner derart beschaffen sein, daß dessen Löslichkeit in der zweiten Immersionsflüssigkeit möglichst klein, und zwar vorzugsweise kleiner als 10^{-4} Volumenprozent, ist. Einer unerwünschten Verringerung des Transmissionsvermögens oder Brechzahlveränderungen innerhalb der zweiten Immersionsflüssigkeit, die auf in Lösung gegangenes Schutzgas zurückgehen, kann auf diese Weise entgegengewirkt werden.

Günstiger ist es noch, wenn die erste Immersionsflüssigkeit unmittelbar an die Abdeckung angrenzt, so daß eine Grenzfläche zu einem umgebenden Gas oder dem vorstehend erwähnten Schutzgas nur dort verbleibt, wo die Abdeckung unterbrochen ist.

Dies kann beispielsweise im Bereich einer Aussparung der Fall sein, die im Bereich der bildseitig letzten Linse vorgesehen ist. Die Abdeckung berührt dann das Projektionsobjektiv nicht; gleichzeitig kann über den umlaufenden Spalt zwischen der Linse und der Abdeckung ein Niveauausgleich stattfinden, so daß das Volumen zwischen dem Abschlußelement und der Abdeckung stets vollständig mit der ersten Immersionsflüssigkeit gefüllt ist.

Besonders günstig ist es in diesem Zusammenhang, wenn die Wanne einen Rand hat, der während einer Verfahrensbewegung des Abschlußelements dichtend an der Unterseite der Abdeckung entlang gleitet. Der Rand verhindern einerseits ein seitliches Abfließen der ersten Immersionsflüssigkeit. Gleichzeitig bildet er mit seiner nach oben weisenden Randfläche eine zu der Abdeckung hin wirkende Dichtung.

Vorzugsweise verbleibt zwischen einer nach oben weisenden Randfläche des Randes und der Abdeckung stets ein aus der ersten Immersionsflüssigkeit bestehender und als Schmierdichtung wirkender Flüssigkeitsfilm. Damit dieser Flüssigkeitsfilm während einer Bewegung der Wanne nicht abreißt, kann in der nach oben weisenden Randfläche des Randes ein

- Flüssigkeitsreservoir eingelassen sein, aus dem Immersionsflüssigkeit nachfließen kann. Vorzugsweise steht die Immersionsflüssigkeit in dem Flüssigkeitsreservoir unter Druck, so daß der Flüssigkeitsfilm auch dann nicht abreißt, wenn
- 5 die Relativbewegung zwischen der Wanne und der Abdeckung im Randbereich des Randes einen Unterdruck erzeugt. Der Druck in dem Flüssigkeitsreservoir kann z.B. erzeugt werden, indem dem Flüssigkeitsreservoir erste Immersionsflüssigkeit von außerhalb der Wanne unter Druck zuführbar ist.
- 10 Um geringe Mengen der ersten Immersionsflüssigkeit aufzufangen, die den schmalen Spalt zwischen dem Rand der Wanne und der Abdeckung durchtreten und eine Schmierwirkung entfalten, kann an mindestens einer Außenseite des Randes eine Überlaufrinne angeordnet sein, die die überlaufende erste
- 15 Immersionsflüssigkeit auffängt und abführt.
- Bevorzugt ist es bei allen vorstehend erwähnten Ausgestaltungen außerdem, wenn das Abschlußelement zumindest annähernd den gleichen Brechungsindex wie die erste und die zweite Immersionsflüssigkeit hat. Auf diese Weise ist si-
- 20 chergestellt, daß sich geringe Dejustagen des Abschlußelements kaum auf die optischen Eigenschaften derselben auswirken. Vorzugsweise unterscheidet sich deswegen der Brechungsindex des Abschlußelements von dem Brechungsindizes der angrenzenden Immersionsflüssigkeiten um nicht mehr als
- 25 1% und vorzugsweise um nicht mehr als 0,5%.

Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, daß die angrenzenden Immersionsflüssigkeiten Wasser sind und das Abschlußelement aus LiF besteht.

Besonders günstig ist es, wenn das Abschlußelement brech-
5 kraftlos ist. Unter brechkraftlos wird hier die Eigenschaft eines optischen Elements verstanden, keine fokussierende oder defokussierende Wirkung zu haben. Ein Beispiel für ein solches optisches Element ist eine plan-parallele Platte aus einem homogenen Material. Eine solche Platte wirkt sich
10 zwar auf die Lage der Bildebene des Projektionsobjektivs und auf die Korrektur der sphärischen Aberration aus und muß insofern bei dessen Auslegung berücksichtigt werden. Sofern an den Grenzflächen eine Brechungsindexdifferenz besteht, versetzt jedoch eine solche Platte unter einem Win-
15 kel auftreffende Strahlen lediglich parallel, wobei die Größe des Versatzes vom Einfallswinkel abhängt. Ein brechkraftloses Abschlußelement ist deswegen vorteilhaft, weil auf diese Weise die Anforderungen an dessen Justierung weiter gesenkt werden und somit der Justieraufwand nach einer
20 Reinigung oder einem Austausch des Abschlußelements nochmals verringert wird.

Als Material für das Abschlußelement kommt beispielsweise Quarzglas in Betracht. Da bei sehr kurzwelligem Projektionslicht im tiefen ultravioletten Spektralbereich, und zwar
25 insbesondere bei einer Wellenlänge von 157 nm, Quarzglas und andere herkömmliche optische Materialien nicht mehr ausreichend transparent sind, ist als Ersatz die Verwendung

von Kalziumfluorid-, Bariumfluorid- oder Strontiumfluorid-Kristallen oder auch von Mischkristallen wie etwa Kalzium-Barium-Fluorid vorgeschlagen worden. Diese Materialien kommen auch für das Abschlußelement in Betracht. Allerdings
5 weisen diese kubischen Kristalle eine intrinsische Doppelbrechung auf, die zu einer Verschlechterung der Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs führen, sofern keine entsprechenden Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Vorzugsweise umfaßt deswegen das Abschlußelement mindestens
10 zwei Teilelemente aus einem der angeführten Kristalle, deren Dicken so gewählt und deren Kristallgitter so zueinander orientiert sind, daß der Einfluß intrinsischer Doppelbrechung auf hindurchtretendes Projektionslicht zumindest annähernd kompensiert wird.

15 Die Teilelemente können dabei z.B. fugenlos aneinandergefügt oder auch in Richtung der optischen Achse voneinander beabstandet sein. Im letztgenannten Fall kann ein zwischen den Teilelementen verbleibender, vorzugsweise rundum abgeschlossener Zwischenraum ebenfalls mit einer Flüssig-
20 keit gefüllt sein, die für das Projektionslicht durchlässig ist. Die an den Zwischenraum zwischen den Teilelementen angrenzenden Flächen müssen nicht unbedingt plan sein, sondern können auch eine Krümmung aufweisen. Wenn die zu dem Zwischenraum weisende Fläche des objektseitigen Teilele-
25 ments konkav und/oder die zu dem Zwischenraum weisende Fläche des bildseitigen Teilelements konvex ist, so läßt sich auch für Strahlen, die das Abschlußelement unter großen

Öffnungswinkeln durchtreten, eine gute Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung erzielen. Ein Zwischenraum, bei dem die daran angrenzenden Flächen gekrümmt sind und parallel zueinander verlaufen, so daß die Ausdehnung des Zwischenraums entlang der optischen Achse zumindest annähernd
5 konstant ist, hat außerdem den Vorteil, daß ...

Bei einer anderen vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist wenigstens eine von Projektionslicht durchtretene Fläche des Abschlußelements zur Korrektur von Wellenfrontfehlern durch lokalen Materialabtrag nachbearbeitet. Dieses an
10 sich bekannte Verfahren, durch geringfügigen Materialabtrag in der Größenordnung von wenigen Nanometern Wellenfrontdeformationen auszugleichen, ist bei dem Abschlußelement besonders wirkungsvoll einsetzbar, da sich dieses in unmittelbarer Nähe zur Bildebene befindet. Hierbei ist zu beach-
15 ten, daß der Quotient der Brechzahlen des Abschlußelements und der Immersionsflüssigkeit kleiner ist als in Trockensystemen ohne Immersionsflüssigkeit, so daß entsprechend mehr Material abgetragen werden muß, um die gleiche Wirkung wie
20 bei Trockensystemen zu erzielen. Insbesondere dann, wenn es sich bei dem Abschlußelement um eine planparallele Platte handelt, gestaltet sich die Nachbearbeitung einer oder beider Flächen besonders einfach.

Bei einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist auf wenigstens eine Oberfläche des Abschlußelements, die mit Immersionsflüssigkeit in Berührung gelangen kann, eine für Immersionsflüssigkeit undurchlässige Schutz-

schicht aufgebracht. Eine solche Schutzschicht ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn als Material für das Abschlußelement Fluorid-Kristalle verwendet werden, da diese eine relativ hohe Wasserlöslichkeit aufweisen. Durch das
5 Aufbringen einer derartigen Schicht läßt sich verhindern, daß das Material angegriffen wird, wenn Wasser oder eine wasserhaltige Substanz als Immersionsflüssigkeit verwendet wird. Das Anbringen einer solchen Schutzschicht ist nicht nur in Verbindung mit einem Abschlußelement, sondern ganz
10 allgemein bei allen optischen Elementen aus kubischen Fluorid-Kristallen, insbesondere bei Kalziumfluorid-Kristallen, vorteilhaft, die mit der Immersionsflüssigkeit in Berührung kommen können.

Bei der Anbringung einer Schutzschicht ist darauf zu achten, daß diese die zu schützende Fläche vollständig ab-
15 deckt. Selbst kleinste Öffnungen in der Schutzschicht können zu einem Durchtritt von Immersionsflüssigkeit und zur Ausbildung von Hinterschichtkorrosion führen. Unter diesem Gesichtspunkt ist eine ionengestützte Abscheidung einer
20 Schutzschicht mit höchster Kompaktheit (vorzugsweise größer als 98%) vorteilhaft, da dadurch ein lokales Ablösen der Schutzschicht im Verlaufe des Betriebs der Projektionsbeleuchtungsanlage weitgehend verhindert wird. Unter der Kompaktheit eines Materials wird hier bei einem gegebenen Kri-
25 stallisationsgrad das Verhältnis der spezifischen Dichte des Materials zu einer Referenzdichte verstanden, bei der das Material vollkommen frei von Hohlräumen ist.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHUNGEN

Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele anhand der Zeichnung. Darin zeigen:

- 5 Figur 1 einen Meridionalschnitt durch eine Projektionsbelichtungsanlage gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung in stark vereinfachter, nicht maßstäblicher schematischer Darstellung;
- 10 Figur 2 einen vergrößerten Ausschnitt aus dem bildseitigen Ende eines Projektionsobjektivs, das Bestandteil der in der Figur 1 gezeigten Projektionsbelichtungsanlage ist;
- 15 Figur 3 eine Projektionsbelichtungsanlage gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung in einer der Figur 2 entsprechenden Darstellung, bei der das Abschlußelement an die bildseitig letzte Linse angesprengt ist;
- 20 Figur 4 eine Projektionsbelichtungsanlage mit einer zusätzlichen horizontalen Trennwand gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel der Erfindung in einer ausschnittsweisen, der Figur 1 entsprechenden Darstellung;

- Figur 5 eine Projektionsbelichtungsanlage mit einem ver-
fahren Abschlusselement gemäß einem vierten Aus-
führungsbeispiel der Erfindung in einer aus-
schnittsweisen, der Figur 1 entsprechenden Dar-
5 stellung;
- Figur 6 einen vergrößerten Ausschnitt aus dem bildseiti-
gen Ende des Projektionsobjektivs, das Bestand-
teil der in der Figur 5 gezeigten Projektionsbe-
lichtungsanlage ist, in einer ersten Verfahrstel-
10 lung des Trägers und des Abschlusselements;
- Figur 7 das bildseitige Ende des Projektionsobjektivs aus
der Figur 6 in einer zweiten Verfahrstellung des
Trägers und des Abschlusselements;
- Figur 8 das bildseitige Ende des Projektionsobjektivs aus
15 der Figur 6 mit verkipptem Abschlusselement;
- Figur 9 einen vergrößerten Ausschnitt aus dem bildseiti-
gen Ende eines Projektionsobjektivs gemäß einem
fünften Ausführungsbeispiel der Erfindung, bei
dem eine zusätzliche Abdeckung den ersten Zwi-
20 schenraum überdeckt;
- Figur 10 einen weiter vergrößerten Ausschnitt D aus der
Figur 9, in dem der Übergang zwischen der Abdek-
kung und einem Rand einer die erste Immersions-
flüssigkeit aufnehmenden Wanne gezeigt ist;

- Figur 11 das bildseitige Ende eines Projektionsobjektivs gemäß einem sechsten Ausführungsbeispiel der Erfindung, bei dem die bildseitige Fläche des bildseitig letzten optischen Elements gekrümmt ist;
- 5 Figur 12 das bildseitige Ende eines Projektionsobjektivs gemäß einem siebten Ausführungsbeispiel der Erfindung, bei dem zwischen dem bildseitig letzten optischen Element und der Immersionsflüssigkeit ein gasgefüllter Zwischenraum verbleibt;
- 10 Figur 13 das bildseitige Ende eines Projektionsobjektivs gemäß einem achten Ausführungsbeispiel der Erfindung, bei dem das Abschlußelement entlang einer gekrümmten Fläche in zwei Teilelemente aufgeteilt ist;
- 15 Figur 14 das bildseitige Ende eines Projektionsobjektivs gemäß einem neunten Ausführungsbeispiel der Erfindung mit gekrümmt aufgeteiltem Abschlußelement, das vollständig in Immersionsflüssigkeit aufgenommen ist;
- 20 Figur 15 das bildseitige Ende eines Projektionsobjektivs gemäß einem zehnten Ausführungsbeispiel der Erfindung, bei dem zwischen dem Abschlußelement und der Immersionsflüssigkeit ein gasgefüllter Zwischenraum verbleibt;

Figur 16 das bildseitige Ende eines Projektionsobjektivs gemäß einem elften Ausführungsbeispiel der Erfindung, bei dem nur der Zwischenraum zwischen dem bildseitig letzten optischen Element und dem Abschlußelement mit Immersionsflüssigkeit gefüllt ist.

BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

Die Figur 1 zeigt einen Meridionalschnitt durch eine insgesamt mit 10 bezeichnete mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung in stark vereinfachter schematischer Darstellung. Die Projektionsbelichtungsanlage 10 weist eine Beleuchtungseinrichtung 12 zur Erzeugung von Projektionslicht 13 auf, die u.a. eine Lichtquelle 14, eine mit 16 angedeutete Beleuchtungsoptik und eine Blende 18 umfaßt. Das Projektionslicht hat in dem dargestellten Ausführungsbeispiel eine Wellenlänge von 157 nm.

Zur Projektionsbelichtungsanlage 10 gehört ferner ein Projektionsobjektiv 20, das eine Vielzahl von Linsen enthält, von denen der Übersichtlichkeit halber in der Figur 1 lediglich einige beispielhaft dargestellt und mit L1 bis L5 bezeichnet sind. Aufgrund der kurzen Wellenlänge des Projektionslichts 13 sind die Linsen L1 bis L5 aus Kalziumfluorid-Kristallen gefertigt, die auch bei diesen Wellenlängen noch ausreichend transparent sind. Das Projektionsobjektiv 20 dient dazu, ein in einer Objektebene 22 des

Projektionsobjektivs 20 angeordnetes Retikel 24 verkleinert auf eine lichtempfindliche Schicht 26 abzubilden, die in einer Bildebene 28 des Projektionsobjektivs 20 angeordnet und auf einem Träger 30 aufgebracht ist.

- 5 Der Träger 30 ist am Boden eines wannenartigen, nach oben offenen Behälters 32 befestigt, der in nicht näher dargestellter Weise mit Hilfe einer Vorrichtung parallel zu der Bildebene 28 verfahrbar ist. Der Behälter 32 ist mit einer Immersionsflüssigkeit 34 so weit aufgefüllt, daß das
- 10 Projektionsobjektiv 20 während des Betriebs der Projektionsbelichtungsanlage 10 mit seiner bildseitig letzten Linse L5 in die Immersionsflüssigkeit 34 eintaucht. Bei dieser Linse L5 handelt es sich in dem dargestellten Ausführungsbeispiel um eine hochaperturige und vergleichsweise dicke
- 15 Linse, von dem Begriff "Linse" soll hier aber auch eine planparallele Platte umfaßt sein.

- Über eine Zuleitung 36 und eine Ableitung 38 ist der Behälter 32 mit einer Aufbereitungseinheit 40 verbunden, in der eine Umwälzpumpe, ein Filter zur Reinigung von Immersions-
- 20 flüssigkeit 34 sowie eine Temperiereinrichtung in an sich bekannter und deswegen nicht näher dargestellter Weise enthalten sind. Die Aufbereitungseinheit 40, die Zuleitung 36, die Ableitung 38 sowie der Behälter 32 bilden insgesamt eine mit 42 bezeichnete Immersionseinrichtung, in der die Im-
- 25 mersionsflüssigkeit 34 zirkuliert und dabei gereinigt und auf konstanter Temperatur gehalten wird. Die Immersionseinrichtung 42 dient in an sich bekannter Weise dazu, das Auf-

lösungsvermögen und/oder die Tiefenschärfe des Projektionsobjektivs 20 zu erhöhen.

In einem zwischen der bildseitig letzten Linse L5 und der lichtempfindlichen Schicht 26 verbleibenden Zwischenraum 43
5 ist ein Austauschelement 44 angeordnet, dessen Einzelheiten im folgenden anhand der Figur 2 erläutert werden.

Die Figur 2 zeigt die bildseitige Stirnseite 45 des Projektionsobjektivs 20 in einem vergrößerten Ausschnitt aus der Figur 1. In der vergrößerten Darstellung ist erkennbar, daß
10 das Abschlußelement 44 die Form einer planparallelen Platte mit z.B. kreisrunder oder rechteckiger Grundfläche hat und über zwei mit 46 und 48 angedeutete Befestigungselemente an der bildseitigen Stirnseite 45 des Projektionsobjektivs 20 lösbar und justierbar angebracht ist. Zur Veranschaulichung
15 der Lösbarkeit ist bei dem Befestigungselement 46 eine Schraubverbindung 52 angedeutet. Zur Justierung sind Feintriebe vorgesehen, die in Figur 2 durch Mikrometerschrauben 54, 55, 56 und 57 angedeutet sind.

Das Abschlußelement 44 umfaßt zwei miteinander verbundene
20 plattenförmige Teilelemente 44a und 44b, die die gleichen Abmessungen haben und fugenlos aufeinander aufliegen. Aufgrund der kurzen Wellenlänge des Projektionslichts 13 sind auch die beiden Teilelemente 44a und 44b jeweils aus Kalziumfluorid-Kristallen gefertigt. Die Kristallgitter der beiden
25 Teilelemente 44a, 44b sind dabei so orientiert, daß sich insgesamt eine rotationssymmetrische intrinsische Dop-

pelbrechungsverteilung für das Abschlußelement 44 ergibt. Alternativ hierzu kann das Abschlußelement 44 auch mehr als zwei Teilelemente mit unterschiedlichen Kristallorientierungen umfassen. Bei insgesamt vier planparallelen Teilelementen ist es z.B. möglich, die durch intrinsische Doppelbrechung verursachte Verzögerung sehr weitgehend für beliebige Einfallsrichtungen zu kompensieren. Beispiele für die hier angesprochenen Kristallorientierungen sind z.B. der WO 02/093209 A2, der WO 02/099450 A2 sowie der US 2003/0011896 A1 entnehmbar, deren Offenbarungsgehalt hiermit vollumfänglich zum Gegenstand der vorliegenden Anmeldung gemacht wird.

Bei dem in der Figur 2 gezeigten ersten Ausführungsbeispiel umspült die Immersionsflüssigkeit 34 das Austauschelement 44 von allen Seiten und befindet sich insbesondere in den beiden spaltförmigen Zwischenräumen 64 und 66, die zwischen dem Abschlußelement 44 einerseits und der lichtempfindlichen Schicht 36 bzw. der bildseitig letzten Linse L5 andererseits verbleiben.

Kommt es während des Betriebs der Projektionsbelichtungsanlage 10 zum Austritt von Substanzen aus der lichtempfindlichen Schicht 36 oder zu einer mechanischen Ablösung kleinerer Teile davon, so verhindert das Abschlußelement 44, daß in der Immersionsflüssigkeit 34 enthaltene Verunreinigungen ungehindert auf die plane bildseitige Grenzfläche 68 der letzten Linse L5 des Projektionsobjektivs 30 gelangen können. Zwar ist ein solcher Kontakt auch nicht vollkommen

ausgeschlossen, da die beiden spaltförmigen Zwischenräume 64 und 66 nicht vollständig voneinander getrennt sind, doch ist ein Flüssigkeitsaustausch zwischen den spaltförmigen Zwischenräumen 64 und 66 durch das dazwischen liegende Abschlußelements 44 zumindest erheblich erschwert. Verunreinigte Immersionsflüssigkeit 34 steigt deswegen praktisch nicht zur letzten Linse L5 auf, sondern wird überwiegend über die Ableitung 38 der Aufbereitungseinheit 40 zugeführt und dort gereinigt.

- 10 Aufgrund der Schutzwirkung des Abschlußelements 44 ist es kaum noch erforderlich, die letzte Linse L5 wegen Kontamination durch verunreinigte Immersionsflüssigkeit 34 aufzutauschen und im Zusammenhang damit aufwendig zu justieren.

Ein Austausch des Abschlußelements 44 hingegen, das in weit höherem Maße den von der lichtempfindlichen Schicht 26 ausgehenden Verunreinigungen ausgesetzt ist, gestaltet sich vergleichsweise einfach. Hierzu sind nämlich lediglich die Befestigungselemente 46 und 48 mit Hilfe der Schraubverbindungen 52 von dem Gehäuse des Projektionsobjektivs 20 zu lösen. Justagearm und deswegen einfach ist auch der sich an eine Reinigung oder einen Austausch anschließende Einbau des Abschlußelements 44. Aufgrund der Ausbildung als planparallele Platte ist das Abschlußelement 44 brechkraftlos und hat deswegen nur vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die Abbildungseigenschaften. Dies gilt insbesondere auch deswegen, weil das Abschlußelement 44 in der Immersionsflüssigkeit 34 schwimmt, so daß sich bei geeigneter Wahl

der Immersionsflüssigkeit nur eine sehr geringe oder sogar verschwindende Brechungswirkung an den dem Projektionslicht 13 ausgesetzten Grenzflächen einstellt.

Bei allen optischen Elementen, die aus Fluorid-Kristallen
5 gefertigt sind und mit Immersionsflüssigkeit in Berührung kommen können, ist vorzugsweise zumindest auf den optisch wirksamen Flächen eine Schutzschicht aufgebracht, die die empfindlichen Kristalle vor der Immersionsflüssigkeit schützt. Bei dem in Figur 2 dargestellten ersten Ausführungsbeispiel sind deswegen auf die plane bildseitige
10 Grenzfläche 68 der Linse L5 sowie auf die Oberseite 70 und die Unterseite 72 des Abschlußelements 44 derartige Schutzschichten 74, 76 bzw. 78 aufgebracht.

Die Wahl der Materialien für die Schutzschichten 74, 76 und
15 78 hängt vor allem von der eingesetzten Immersionsflüssigkeit ab, die ihrerseits unter Berücksichtigung der Lichtwellenlänge des verwendeten Projektionslichts gewählt wird. Bei Lichtwellenlängen von 193 nm kommt z.B. Wasser als Immersionsflüssigkeit in Betracht, das kristallines Kalziumfluorid wegen dessen relativ hoher Wasserlöslichkeit rasch angreift. In diesem Fall bestehen die Schutzschichten 74,
20 76, 78 vorzugsweise aus SiO_2 oder LaF_3 , da diese Materialien nicht wasserlöslich sind.

Bei einer Lichtwellenlänge von 157 nm, wie sie in dem vorstehend geschilderten Ausführungsbeispiel verwendet wird,
25 haben bestimmte Öle eine höhere Transparenz als Wasser und

sind deswegen als Immersionsflüssigkeit besser geeignet. Als Materialien für die Schutzschichten 74, 76, 78 kommen dann z.B. die bei dieser Wellenlänge ebenfalls hochtransparenten Materialien MgF_2 und LaF_3 in Betracht.

- 5 Die Schutzschichten 74, 76, 78 aus den genannten Materialien können durch Aufdampfen im Vakuum auf die Grenzflächen der betreffenden optischen Elemente aufgebracht werden.

Die Figur 3 zeigt in einer an die Figur 2 angelehnten Darstellung ein zweites Ausführungsbeispiel einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, wobei für gleiche
10 Teile die gleichen Bezugsziffern wie in der Figur 2 und für einander entsprechende Teile um 200 erhöhte Bezugsziffern verwendet werden. Bei dem zweiten Ausführungsbeispiel ist das Abschlußelement 244 nicht über einen Zwischenraum 66
15 von der bildseitig letzten Linse L205 getrennt, sondern unmittelbar an diese angesprengt. Sofern die Linse L205 und das Abschlußelement 244 aus einem Material mit dem gleichen Brechungsindex gefertigt sind, durchtritt das Projektionslicht 13 die Grenzfläche zwischen dem Abschlußelement 244
20 und der letzten Linse L205, ohne dabei gebrochen zu werden. Die Befestigung durch Ansprengen hat den Vorteil, daß keine Befestigungselemente 46, 48 erforderlich sind. Außerdem muß das Abschlußelement 244 nach einem Austausch praktisch nicht justiert werden, da die beiden planen einander zuge-
25 wandten Grenzflächen 270 und 268 des Abschlußelements 244 bzw. der Linse L205 beim Ansprengen von allein die richtige Anordnung gewährleisten.

Die bildseitige Fläche 272 des Abschlußelements 244 ist an einigen Stellen 79a, 79b durch - in der Figur 3 stark übertrieben dargestellten - Materialabtrag von einigen Nanometern derart nachbearbeitet, daß durch das Projektionsobjektiv 220 verursachte Wellenfrontfehler korrigiert werden. Da
5 derartige Methoden der Nachbearbeitung an sich bekannt sind, wird auf eine eingehendere Erläuterung verzichtet.

Die Figur 4 zeigt in einer an die Figur 1 angelehnten Darstellung ein drittes Ausführungsbeispiel einer Projektionsbelichtungsanlage, wobei für gleiche Teile die gleichen Bezugsziffern wie in der Figur 1 und für einander entsprechende Teile um 300 erhöhte Bezugsziffern verwendet werden. Die in der Figur 4 gezeigte Projektionsbelichtungsanlage unterscheidet sich von der in Figur 1 gezeigten dadurch,
10 daß diese nicht nur eine, sondern zwei voneinander unabhängige Immersionseinrichtungen 342a und 342b umfaßt. Der Behälter 332 ist hier horizontal so durch eine Trennwand 80 in zwei Teilbehälter 332a und 332b unterteilt, daß der spaltförmige Zwischenraum 366 zwischen dem Abschlußelement
15 44 und der bildseitig letzten Linse L5 vollständig in dem Teilbehälter 332a und der spaltförmige Zwischenraum 364 zwischen dem Abschlußelement 44 und der lichtempfindlichen Schicht 26 vollständig in dem Teilbehälter 332b angeordnet ist. Das Abschlußelement 44 ist mit Spiel in einem geeignet
20 geformten Ausschnitt 82 in der Trennwand 80 zwischen den Teilbehältern 332a und 332b eingelassen.
25

Durch die Trennung der Immersionsflüssigkeiten 334a und 334b in getrennten Immersionseinrichtungen 342a und 342b wird verhindert, daß verunreinigte Immersionsflüssigkeit aus dem Teilbehälter 332b in den spaltförmigen Zwischenraum
5 366 zwischen dem Abschlußelement 44 und der Linse L5 gelangen und letztere auf diese Weise kontaminieren kann.

Im folgenden wird ein viertes Ausführungsbeispiel anhand der Figuren 5 und 6 beschrieben, die schematisch einen Ausschnitt aus dem bildseitigen Ende eines Projektionsobjek-
10 tivs bzw. eine vergrößerte Detaildarstellung hiervon zeigen. Gleiche Teile wie in den Figuren 1 bis 4 sind dabei mit gleichen Bezugsziffern und einander entsprechende Teile mit um 400 erhöhten Bezugsziffern bezeichnet.

Bei dem vierten Ausführungsbeispiel ist ein zur Bildebene
15 28 paralleles Abschlußelement 444 vorgesehen. Das Abschlußelement 444 ist ebenfalls als planparallele Platte ausgeführt, die jedoch erheblich größer ist als bei den vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen. Das Abschlußelement 444 hat bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel eine
20 rechteckige Grundform und ist in einen Boden 486 einer Wanne 488 eingelassen. Die Wanne 488, die z.B. aus Metall, einer Keramik oder einem Kristall gefertigt sein kann, dient der Aufnahme einer ersten Immersionsflüssigkeit 434a, bei der es sich im dargestellten Ausführungsbeispiel um deionisiertes Wasser handelt. Ein Rand 490 der Wanne 488 ist da-
25 bei so hoch, daß bei entsprechender Füllhöhe der ersten Immersionsflüssigkeit 434a ein zwischen der bildseitig letz-

ten Linse L5 und dem Abschlußelement 444 verbleibender erster Zwischenraum 492 vollständig mit der ersten Immersionsflüssigkeit 434a ausgefüllt ist.

Zwischen dem Abschlußelement 444 und der lichtempfindlichen
5 Schicht 26 verbleibt ein flacherer zweiter Zwischenraum 494, der mit einer zweiten Immersionsflüssigkeit 434b gefüllt ist. Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel handelt es sich bei der zweiten Immersionsflüssigkeit 434b ebenfalls um deionisiertes Wasser. Der zweite Zwischenraum
10 494 ist dabei so flach, daß die zweite Immersionsflüssigkeit 434b allein durch Kohäsionskräfte an einem seitlichen Abfließen aus dem zweiten Zwischenraum 494 gehindert wird. Je kleiner dabei der Abstand zwischen dem Abschlußelement 444 und der lichtempfindlichen Schicht 26 ist, desto besser
15 halten die Kohäsionskräfte die zweite Immersionsflüssigkeit 434b in dem zweiten Zwischenraum 494.

Um die Anforderungen an die Parallelität des Abschlußelements 444 zur Bildebene 28 zu verringern, kann für das Abschlußelement 444 ein Material gewählt werden, dessen Brechungsindex möglichst gleich dem Brechungsindex der umgebenden Immersionsflüssigkeiten 434a, 434b ist. Bei der Verwendung von Wasser als Immersionsflüssigkeit ist beispielsweise LiF als Material für das Abschlußelement 444 geeignet, das zumindest bei einer Wellenlänge von 193 nm noch
20 hochtransparent ist. Die Differenz der Brechzahlen beträgt
25 dann lediglich 0,0066.

Falls das Projektionslicht eine besonders kurze Wellenlänge, z.B. 157 nm hat, so kann die erste Immersionsflüssigkeit 434 auch aus einem fluorierten Kohlenwasserstoff bestehen, der bei diesen Wellenlängen eine höhere Transmission als Wasser hat. Für die zweite Immersionsflüssigkeit 434b ist die etwas geringere Transmission insofern nicht allzu nachteilig, als die Höhe des zweiten Zwischenraums 494 im allgemeinen sehr gering sein wird. Außerdem hat Wasser den Vorteil, daß es die lichtempfindliche Schicht 26 weniger stark angreift, als dies etwa bei fluorierten Kohlenwasserstoffen der Fall ist.

Bei dem vierten Ausführungsbeispiel ist die Projektionsbeleuchtungsanlage für einen Scanbetrieb ausgelegt. Dies bedeutet, daß das Retikel 24 während der Projektion in der Objektebene 22 verfahren wird. Synchron hierzu wird auch der Träger 30 mit der darauf aufgebrachten lichtempfindlichen Schicht 26 parallel zur Bildebene 28 verfahren. Der Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs 420 bestimmt dabei das Verhältnis der Verfahrgeschwindigkeiten und die Verfahrrichtungen des Retikels 24 und des Trägers 30.

Zu diesem Zweck ist der Träger 30 über in der Figur 5 erkennbare Spannelemente 31a, 31b auf einem verfahrbaren Tisch 33 eingespannt, der üblicherweise als Waferstage bezeichnet wird. Der Tisch 33 kann in an sich bekannter Weise hochgenau mit Hilfe von Stellantrieben parallel zur Bildebene 28 verfahren werden. Die Stellantriebe sind in der

Figur 5 vereinfacht dargestellt und mit 35a und 35b bezeichnet.

Auf dem Tisch 33 sind Manipulatoren 497a, 497b befestigt, so daß diese Verfahrenbewegungen des Tisches 33 mitvollziehen.
5 Die Manipulatoren 497a, 497b sind über Stellarme 498a, 498b mit der Wanne 488 verbunden. Die Manipulatoren 497a, 497b sind dabei so ausgeführt, daß sie die Wanne 488 parallel zur Bildebene 28 und relativ zum Tisch 33 bewegen, senkrecht hierzu, d.h. parallel zu einer Achse OA, verfahren
10 und auch zur Bildebene 28 verkippen können. Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel sind insbesondere Verkippungen um zwei horizontalen Achsen möglich, die senkrecht zu Bewegungsrichtungen des Tisches 33 und senkrecht zu der optischen Achse OA verlaufen.

15 Ferner sind in der Figur 5 optionale Gasaustrittsdüsen 499a, 499b erkennbar, mit denen sich ein Gasstrom auf einen umlaufenden Spalt richten läßt, der zwischen dem Rand 490 der Wanne 488 und der lichtempfindlichen Schicht 26 gebildet wird.

20 Die in den Figuren 5 und 6 gezeigte Projektionsbelichtungsanlage funktioniert wie folgt:

Während eines Scanvorgangs wird mit Hilfe der Stellantriebe 35a, 35b der Tisch 33 zusammen mit den Manipulatoren 497a, 497b in Richtung des Pfeils 496b (siehe Figur 6) verfahren.
25 Die Manipulatoren 497a, 497b führen dabei keine Stellbewe-

gungen aus, so daß sich die Wanne 488 mit dem darin eingelassenen Abschlußelement 444 synchron und mit gleicher Verfahrensgeschwindigkeit und -richtung mit dem Tisch 33 und somit auch mit der lichtempfindlichen Schicht 26 mitbewegt.

5 In der Figur 6 ist dies durch einen Pfeil 496a angedeutet, der gleiche Richtung und Länge wie der Pfeil 496b hat. Die Wanne 488 bewegt sich somit während des Scanvorgangs zusammen mit der lichtempfindlichen Schicht 26 unter dem Projektionsobjektiv 420 hinweg.

10 Die Figur 7 zeigt in einem der Figur 6 entsprechenden Ausschnitt die Relativposition der Wanne 488 und der lichtempfindlicher Schicht 26 einerseits und dem Projektionsobjektiv 420 andererseits am Ende des Scanvorgangs. Da sich die Wanne 488 synchron, parallel und mit gleicher Verfahrensgeschwindigkeit wie die lichtempfindliche Schicht 26 während
15 des Scanvorgangs bewegt, wirken auf die zweite Immersionsflüssigkeit 434b in dem zweiten Zwischenraum 494 keine Schwerkkräfte. Die zweite Immersionsflüssigkeit 434b verbleibt deswegen auch während der Verfahrbewegungen des Trägers 30 in dem zweiten Zwischenraum 494. Eine Anströmung der zweiten Immersionsflüssigkeit 434b mit aus den Austrittsdüsen 499a, 499b austretenden Gasen kann deswegen verringert oder sogar überflüssig werden. Damit entfällt
20 aber auch ganz oder teilweise eine der wesentlichen Ursachen für die Entstehung von Blasen in der zweiten Immersionsflüssigkeit 434b.
25

Da die erste Immersionsflüssigkeit 434a allein aufgrund der Schwerkraft in der Wanne 488 bleibt, ist auch hier kein Anströmen mit Gasen erforderlich, um ein Entweichen der Immersionsflüssigkeit während des Scanvorgangs zu verhindern.

5 Blasen können auch nicht in nennenswertem Umfang durch die Durchmischung entstehen, welche das feststehende Projektionsobjektiv 420 in der sich vorbeibewegenden ersten Immersionsflüssigkeit 434a hervorruft. Eine solche Durchmischung ist durchaus erwünscht, da auf diese Weise der Entstehung

10 größerer Temperaturgradienten entgegengewirkt wird.

Insgesamt läßt sich auf diese Weise somit ein erheblich verringerter Ausschuß erzielen, da weder in der ersten Immersionsflüssigkeit 434a noch in der zweiten Immersionsflüssigkeit 434b Blasen in nennenswertem Umfang infolge der

15 Verfahrensbewegungen während eines Scanvorganges entstehen können.

Zwischen aufeinanderfolgenden Belichtungsvorgängen ist es häufig erforderlich, den Träger 30 mit der darauf aufgetragenen lichtempfindlichen Schicht 26 neu bezüglich des

20 Projektionsobjektivs 420 zu positionieren. Die Verfahrensgeschwindigkeiten sind bei diesen Positionierbewegungen im allgemeinen deutlich höher als bei den Bewegungen während der Belichtung.

Falls die Wanne 488 genauso groß wie die auf dem Träger 30 aufgetragene lichtempfindliche Schicht 26 ist, so kann die

25 Wanne 488 während derartiger Positionierbewegungen genauso

synchron und mit gleicher Geschwindigkeit verfahren werden, wie dies vorstehend im Zusammenhang mit den Scanvorgängen beschrieben worden ist. Im allgemeinen wird es jedoch aus unterschiedlichen Gründen zweckmäßig sein, wenn die Wanne
5 488 parallel zur Bildebene 28 kleinere Abmessungen hat als die auf dem Träger 30 aufgebrachte lichtempfindliche Schicht 26. Je kleiner beispielsweise die Wanne 488 ist, desto geringer ist auch die Grenzfläche der ersten Immersionsflüssigkeit 434a zu einem umgebenden Gas. Dem entsprechend wird der ersten Immersionsflüssigkeit 434a auch weniger
10 Verdunstungswärme entzogen. Dies wiederum wirkt sich günstig auf eine homogene Temperatur- und damit Brechungsindexverteilung innerhalb der ersten Immersionsflüssigkeit 434a aus. Unter diesem Gesichtspunkt wäre es ideal, wenn
15 die Wanne 488 nur geringfügig größer ist als der während eines Scanvorgangs insgesamt auf der lichtempfindlichen Schicht 26 belichtete Bereich.

Für größere Positionierbewegungen bedeutet eine kleinere Wanne 488 allerdings, daß die Wanne 488 diese Bewegung zu-
20 mindest nicht vollständig mitvollziehen kann. In diesem Fall ist eine Relativbewegung zwischen der lichtempfindlichen Schicht 26 und dem Abschlußelement 444 unvermeidlich. Diese Relativbewegung wird durch die Manipulatoren 497a, 497b erzeugt, die auf dem Tisch 33 befestigt sind.

25 Um auch während einer schnelleren Positionierbewegung des Trägers 30 eine Blasenbildung in der zweiten Immersionsflüssigkeit 434b zu verhindern, kann bei dem in den Figuren

5 bis 7 dargestellten vierten Ausführungsbeispiel die gesamte Wanne 488 mit Hilfe der Manipulatoren zusätzlich verkippt werden.

In der Figur 8 ist in einer an die Figuren 6 und 7 angelehnten Darstellung das bildseitige Ende des Projektionsobjektivs 420 gezeigt, wobei die Wanne 488 um 2° verkippt worden ist. Die Kippachse, die in der Figur 8 mit TA bezeichnet ist, verläuft dabei senkrecht sowohl zur optischen Achse OA als auch zur Bewegungsrichtung 496b des Trägers 30. Durch die Verkipfung der Wanne 488 um die Achse TA erhält der zweite Zwischenraum 494, der während eines Scanvorgangs eine konstante Höhe hat, die Form eines Keilprismas. Das in der Bewegungsrichtung 496b hinten liegende Ende der Wanne 488 ist in der verkippten Stellung der Wanne 488 gerade noch so weit von der lichtempfindlichen Schicht 26 entfernt, daß Beschädigungen daran vermieden werden. Die nun stärker wirkenden Kohäsionskräfte verhindern auch bei höheren Positioniergeschwindigkeiten, daß die zweite Immersionsflüssigkeit 434b aus dem zweiten Zwischenraum 494 austritt, während sich der Träger 30 in Richtung des Pfeils 496b unter der feststehenden oder sich allenfalls langsam bewegend Wanne 488 hinwegbewegt.

Falls während der Scanvorgänge der Abstand zwischen der lichtempfindlichen Schicht 26 und dem Abschlusselement 444 so klein ist, daß eine Verkipfung um die Kippachse TA Beschädigungen der Schicht 26 nach sich ziehen könnte, so kann alternativ eine Kippachse gewählt werden, die durch

das in der Bewegungsrichtung 496b hinten liegende Ende der Wanne 488 verläuft. Für die Manipulatoren 497a, 497b bedeutet dies, daß der Manipulator 497b die in Bewegungsrichtung vorn liegende Seite der Wanne 488 um die erforderliche
5 Strecke anhebt.

Um bei dem in den Figuren 5 bis 8 gezeigten dritten Ausführungsbeispiel unerwünschte Wärmeverluste der ersten Immersionsflüssigkeit 434a und der zweiten Immersionsflüssigkeit 434b zu verhindern, weist die Projektionsbelichtungsanlage
10 einen Behälter 90 auf, der den die Immersionsflüssigkeiten 434a, 434b umgebenden Raum dicht nach außen abschließt. Über einen Einlaß 92 kann in den von dem Behälter 90 umgebenden Raum Wasserdampf eingeleitet werden, der von einem Verdampfer 94 erzeugt wird. Der Wasserdampf wird dabei so
15 lange eingeleitet, bis zumindest annähernd der bei der vorliegenden Temperatur geltende Sättigungsdampfdruck innerhalb des von dem Behälter 90 umschlossenen Raums erreicht wird. Auf diese Weise wird verhindert, daß die hier jeweils aus Wasser bestehenden Immersionsflüssigkeiten nach und
20 nach verdunsten, was zu einer Abkühlung der Flüssigkeit an den Grenzflächen zur umgebenden Atmosphäre führen würde. Es versteht sich, daß bei einem Wechsel zu anderen Immersionsflüssigkeiten entsprechend auch andere Flüssigkeiten in dem Verdampfer 94 verdampft werden müssen.

25 Im folgenden wird ein fünftes Ausführungsbeispiel anhand der Figuren 9 und 10 beschrieben, die schematisch einen Ausschnitt aus dem bildseitigen Ende eines Projektionsob-

jektivs bzw. eine vergrößerte Detaildarstellung D hiervon zeigen. Gleiche Teile wie in den Figuren 1 bis 4 sind dabei mit gleichen Bezugsziffern bezeichnet, Teile, die Entsprechungen in dem vierten Ausführungsbeispiel haben, tragen um
5 100 erhöhte Bezugsziffern.

Bei dem fünften Ausführungsbeispiel ist im Unterschied zu dem in den Figuren 5 bis 8 gezeigten dritten Ausführungsbeispiel eine zusätzliche Abdeckplatte 500 vorgesehen, welche die Wanne 588 nach oben hin fast vollständig abdeckt.
10 Die Abdeckplatte 500, die nicht transparent sein muß, weist eine Öffnung 502 auf, durch die hindurch das bildseitige Ende des Projektionsobjektivs 520 in die erste Immersionsflüssigkeit 534a eintaucht. Der Rand 590 der Wanne 588 gleitet bei einer mit einem Pfeil 596a angedeuteten Ver-
15 fahrbewegung der Wanne 588 an der Unterseite der Abdeckplatte 500 entlang.

Der Raum zwischen der Abdeckplatte 500 und der Wanne 588 ist vollständig mit der ersten Immersionsflüssigkeit 534a ausgefüllt. Zu diesem Zweck ist die Öffnung 502 so bemessen, daß um das bildseitige Ende des Projektionsobjektivs 520 herum ein umlaufender Spalt 504 verbleibt, in dem sich
20 ein Flüssigkeitsspiegel einstellen kann.

Die Figur 10 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt D aus dem Bereich des Rands 590. In dem Ausschnitt D ist erkennbar,
25 daß der Rand 590 der Wanne 588 an seiner nach oben weisenden Randfläche mit einer umlaufenden Keilnut 506 und einer

ebenfalls umlaufenden Rechtecknut größeren Querschnitts
versehen ist, die ein Reservoir 508 für die Immersionsflüs-
sigkeit 534a bildet. Das Reservoir 508 und die Keilnut 506,
die über einen Kanal 510 mit dem Reservoir 508 verbunden
5 ist, sind stets mit der ersten Immersionsflüssigkeit 534a
gefüllt, so daß sich an der nach oben weisenden Randfläche
des Randes 590 ein dünner Flüssigkeitsfilm ausbildet. Die-
ser wirkt als Schmierung und ermöglicht so ein reibungsar-
mes und erschütterungsfreies Entlanggleiten der Wanne 588
10 an der Unterseite der Abdeckplatte 500.

Um sicherzustellen, daß der Flüssigkeitsfilm bei einer Be-
wegung der Wanne 588 unter der Abdeckplatte 500 hinweg
nicht abreißt und dabei Gasblasen in die erste Immersions-
flüssigkeit 534a eingetragen werden, steht die erste Immer-
15 sionsflüssigkeit 534a in dem Reservoir 508 und der Keilnut
506 unter einem leichten Überdruck. Dieser wird erzeugt,
indem dem Reservoir 508 über eine Zuleitung 512 ständig un-
ter Druck erste Immersionsflüssigkeit 534a zugeführt wird.
Über eine Ableitung 514 kann gleichzeitig überschüssige er-
20 ste Immersionsflüssigkeit 534a abfließen. Falls als Ge-
gendruck der durch das Eigengewicht der Abdeckplatte 500
erzeugte Anpreßdruck nicht ausreicht, so kann die Abdeck-
platte 500 zusätzlich, z.B. mit Hilfe von Federn, belastet
werden.

25 Für den Fall, daß erste Immersionsflüssigkeit 534a durch
einen etwas breiteren Spalt 516 an der Außenseite des Ran-
des 590 austritt, ist eine umlaufende Überlaufrinne 518

vorgesehen, die austretende erste Immersionsflüssigkeit 534a auffängt und in nicht näher dargestellter Weise abführt. In die Überlaufrinne 518 kann ein Schutzgas 519 eingefüllt sein, das schwerer ist als Luft und z.B. die Eigenschaften haben kann, für die erste Immersionsflüssigkeit 534a nur eine sehr geringe Löslichkeit zu haben. Dadurch wird verhindert, daß aus einem die gesamte Anordnung umgebenden Gas Moleküle in Lösung gehen, welche die optischen Eigenschaften der ersten Immersionsflüssigkeit 534a in unerwünschter Weise beeinträchtigen. Vorzugsweise wird das Schutzgas 519 in der Überlaufrinne 518 fortwährend erneuert, um einer allmählichen Durchmischung mit dem umgebenden Gas entgegenzuwirken.

Die Abdichtung im Bereich des Rands 590 ist insofern von Bedeutung, als der Träger 30 der lichtempfindlichen Schicht 26 häufig nicht nur in einer zur Bildebene 28 parallelen Ebene verfahren wird, sondern zur Verringerung von Abbildungsfehlern auch geringfügig um eine horizontale Achse verkippt werden kann. Falls dann die Abdeckplatte 500 nicht mit verkippt werden soll, muß die Abdichtung zum Rand 590 hin so ausgeführt sein, daß sie auch bei kleineren Verkipnungen der Wanne 588 eine ausreichende Dichtigkeit zur Abdeckplatte 500 gewährleistet.

Falls der Fall auftreten kann, daß die Schmierung durch die erste Immersionsflüssigkeit 534a kurzzeitig nicht ausreicht, so empfiehlt es sich, für die Abdeckplatte 500 und den Rand 590 Materialien oder Beschichtungen dieser Teile

zu wählen, welche eine Kontamination der ersten Immersionsflüssigkeit 534a infolge von Abrieb beim Anlauf minimiert oder sogar ganz vermeidet. Als Beschichtungen kommen hier beispielsweise Aluminiumoxid oder Diamant in Betracht.

5 Die Abdeckplatte 500 hat zum einen den Vorteil, daß das Auftreten von Wellen in der Wanne 588 verhindert wird. Zum anderen begrenzt die Abdeckplatte 500 die Grenzfläche der ersten Immersionsflüssigkeit 534a zu einer umgebenen Atmosphäre auf den schmalen umlaufenden Spalt 504, der zwischen
10 dem bildseitigen Ende des Projektionsobjektivs 520 und der Abdeckplatte 500 verbleibt. Auf diese Weise wird der ersten Immersionsflüssigkeit 534a nur sehr wenig Wärme infolge von Verdunstung entzogen. Dies wiederum verringert den Temperatur- und damit den Brechungsindexgradienten innerhalb der
15 ersten Immersionsflüssigkeit 534a, der sich bei einer Erwärmung durch das Projektionslicht 13 ausbildet. Bei der zweiten Immersionsflüssigkeit 534b besteht das Problem der Verdunstung insoweit nicht in nennenswertem Maße, weil dort die Grenzfläche zwischen der zweiten Immersionsflüssigkeit
20 534b und einer umgebenden Atmosphäre ohnehin sehr klein ist.

Um die Immersionsflüssigkeiten 534a, 534b in den ersten und den zweiten Zwischenraum 592 bzw. 594 einzubringen, wird vorzugsweise auf die lichtempfindliche Schicht 26 zunächst
25 eine relativ geringe Menge der zweiten Immersionsflüssigkeit 534b aufgebracht. Anschließend wird die Wanne 588 mit ihrer Unterseite einseitig oder parallel aufgesetzt und die

zweite Immersionsflüssigkeit 534b blasenfrei ausgedrückt. Der Abstand zwischen der Wanne 588 und der lichtempfindlichen Schicht 26 kann später mit Hilfe der Manipulatoren 497a, 497b präzise eingestellt werden.

- 5 Anschließend wird die Abdeckplatte 500 über die Wanne 588 gelegt. Um die Wanne 588 mit der ersten Immersionsflüssigkeit 534a zu befüllen, kann diese beispielsweise über den umlaufenden Spalt 504, der zwischen dem Projektionsobjektiv 520 und der Abdeckplatte 500 verbleibt, eingefüllt werden.
- 10 Einfacher wird es jedoch sein, wenn der Rand 590 der Wanne 588 mit einem Zulauf und mit einem Ablauf versehen ist, über den die erste Immersionsflüssigkeit 534a in die Wanne 588 eingefüllt und daraus wieder entfernt werden kann. Die erste Immersionsflüssigkeit 534a kann während des Betriebs
- 15 der Projektionsbelichtungsanlage auch in einem Kreislauf fortwährend umgewälzt werden, wie dies im Zusammenhang mit den ersten drei Ausführungsbeispielen erläutert wurde.

- Selbstverständlich kann die in den Figuren 9 und 10 gezeigte Anordnung ebenfalls in einem Behälter 90 untergebracht
- 20 sein, wie dies zu dem vierten Ausführungsbeispiel in der Figur 5 gezeigt ist. Auf diese Weise wird die Verdampfung der Immersionsflüssigkeiten weiter verringert.

- Die Figuren 11 bis 16 zeigen in an die Figur 2 angelehnten schematischen Darstellungen jeweils das bildseitige Ende
- 25 von Projektionsobjektiven gemäß weiteren Ausführungsbeispielen der Erfindung. Dabei werden für gleiche Teile wie

in der Figur 2 die gleichen Bezugswerte und für einander entsprechende Teile um 600, 700, 800, 900, 1000 bzw. 1100 erhöhte Bezugswerte verwendet.

Bei dem in der Figur 11 gezeigten sechsten Ausführungsbeispiel ist die bildseitige Grenzfläche 668 der bildseitig letzten Linse L605 nicht plan, sondern asphärisch konkav gekrümmt. Es hat sich nämlich gezeigt, daß gerade bei Immersionsobjektiven eine asphärisch gekrümmte Fläche in unmittelbarer Nähe der Bildebene 28 besonders gut zur Korrektur von Abbildungsfehlern höherer Ordnung geeignet ist. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß sich die Brechzahlen der bildseitig letzten Linse L605 und der Immersionsflüssigkeit 34 ausreichend voneinander unterscheiden.

Das Abschlußelement 644 umfaßt auch bei dem Projektionsobjektiv 620 zwei Teilelemente 644a, 644b, die aus Kalziumfluorid-Kristallen oder ähnlichen kubisch kristallinen Kristallen mit geeignet gewählten Kristallorientierungen gefertigt sind. Die bildseitig letzte Linse L605 besteht bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel aus Quarzglas. Alternativ hierzu kann die bildseitig letzte Linse L605 ebenfalls aus einem kubisch kristallinen Material bestehen. Die Kristallorientierungen der Kristalle, aus denen die bildseitig letzte Linse L605 und die Teilelemente 644a, 644b bestehen, können dann ebenfalls so ausgerichtet werden, daß eine sehr weitgehende Korrektur der intrinsischen Doppelbrechung erzielt wird. Wie man mit drei zueinander um die optische Achse verdrehten Kristallorientierungen eine ge-

genseitige Doppelbrechungskompensation erzielen kann, ist in den oben bereits erwähnten Druckschriften WO 02/093 209 A2, WO 02/099 450 A2 und US 2003/0011896 A1 ausführlich beschrieben.

5 Bei dem in der Figur 12 dargestellten siebten Ausführungsbeispiel ist der zwischen der bildseitig letzten Linse L705 und dem Abschlußelement 744 verbleibende erste Zwischenraum 792 nicht vollständig, sondern nur teilweise mit Immersionsflüssigkeit 34 gefüllt. Zwischen der bildseitig letzten
10 Linse L705 und der Immersionsflüssigkeit 34 verbleibt deswegen ein spaltartiger, mit einem umgebenden Gas gefüllter Zwischenraum 793.

Diese Variante ist besonders vorteilhaft bei Projektionsobjektiven, die sowohl für einen Trockenbetrieb als auch für
15 einen Immersionsbetrieb vorgesehen sind. Um bei einem Wechsel vom Trockenbetrieb in den Immersionsbetrieb und umgekehrt möglichst wenige Modifikationen an dem Projektionsobjektiv vornehmen zu müssen, sollten sich die optischen Verhältnisse an möglichst wenigen Grenzflächen ändern. Bei dem
20 Projektionsobjektiv 720 grenzt aus diesem Grunde die bildseitige Fläche 768 der bildseitig letzten Linse L705 nach wie vor an ein umgebendes Gas und nicht etwa an Immersionsflüssigkeit 34 an.

Andererseits ist auch bei dem Projektionsobjektiv 720
25 gewährleistet, daß das Abschlußelement 744 von beiden Seiten von der Immersionsflüssigkeit 34 umgeben ist. Lage- und Fertigungstoleranzen des Abschlußelementes 744 können

Fertigungstoleranzen des Abschlußelementes 744 können sich wegen des geringeren Brechzahlquotienten an den Grenzflächen des Abschlußelements 744 somit nur geringfügig auf die Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs 720 aus-

5 wirken.

Bei dem in der Figur 13 gezeigten achten Ausführungsbeispiel umfaßt das insgesamt planparallele Abschlußelement 844 ebenfalls zwei Teilelemente 844a, 844b, die vorzugsweise aus kubisch kristallinen Materialien mit unterschiedli-

10 chen Kristallorientierungen bestehen. Im Gegensatz zu den vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen ist die Grenzfläche zwischen den beiden Teilelementen 844a, 844b bei dem Projektionsobjektiv 820 nicht plan, sondern gekrümmt. Ferner sind die beiden Teilelemente 844a, 844b nicht

15 unmittelbar aneinander angesprengt, sondern voneinander beabstandet angeordnet, so daß zwischen den Teilelementen 844a, 844b ein schmaler Spalt 899 verbleibt, der bei dem Projektionsobjektiv 820 mit einem umgebenden Gas gefüllt ist.

20 Bei dem Projektionsobjektiv 820 kommt nur das bildseitige Teilelement 844b mit der Immersionsflüssigkeit 34 in Berührung. Daher wird es im allgemeinen genügen, nur das Teilelement 844b bei Bedarf auszutauschen. Das objektseitige Teilelement 844a kann hingegen derart an oder in dem Projektionsobjektiv 820 montiert sein, daß ein Austausch nur

25 mit größerem Aufwand durchführbar ist. Somit stellt nur das

Teilelement 844b ein Austauschelement im eigentlichen Wortsinne dar.

Die Aufteilung des Abschlußelements 844 in zwei Teilelemente 844a, 844b entlang einer gekrümmten Trennfläche hat den
5 Vorteil, daß das bildseitige Teilelement 844b ebenfalls relativ unempfindlichen gegenüber Fertigungs- und Lagetoleranzen ist. Einerseits taucht nämlich die bildseitige Fläche in Immersionsflüssigkeit 34 ein, so daß der Brechzahlquotient dort klein ist. Andererseits treten an der objekt-
10 seitigen Fläche des Teilelements 844b aufgrund deren konvexen Krümmung bei Lichtstrahlen, die unter großen Winkeln zur optischen Achse das Abschlußelement 844 durchtreten, nur relativ kleine Eintrittswinkel auf, so daß sich dort Fertigungs- und Lagetoleranzen geringer auswirken können.

15 Das in der Figur 14 gezeigte Projektionsobjektiv 920 gemäß einem neunten Ausführungsbeispiel unterscheidet sich von dem Projektionsobjektiv 820 lediglich dadurch, daß die Immersionsflüssigkeit 34 bis unmittelbar an die bildseitig letzte Linse L905 heranreicht. Daher ist, anders als bei
20 dem in der Figur 13 gezeigten Projektionsobjektiv 820, sowohl der zwischen den beiden Teilelementen 944a, 944b verbleibende Spalt 999 als auch der erste Zwischenraum 992 zwischen der bildseitig letzten Linse L905 und dem Abschlußelement 944 mit Immersionsflüssigkeit 34 aufgefüllt.
25 Lage- und Fertigungstoleranzen des Abschlußelements 944 wirken sich bei dieser Variante noch weniger auf die Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs aus.

Da das objektseitige Teilelement 944a zwar der Immersionsflüssigkeit 34 ausgesetzt ist, durch die bildseitig letzte Linse L905 bzw. durch das bildseitige Teilelement 944b relativ gut geschützt ist, kann sich auch bei dem Projektionsobjektiv 920 ein Austausch von optischen Elementen wegen
5 Kontamination auf das bildseitige Teilelement 944b beschränken. Allerdings erfordert die bis an die bildseitig letzte Linse L905 heranreichende Immersionsflüssigkeit 34 weitergehende Modifikationen, wenn man von einem Trockenbe-
10 trieb auf einen Immersionsbetrieb umstellen möchte.

Die Figur 15 zeigt ein bildseitiges Ende eines Projektionsobjektivs 1020 gemäß einem zehnten Ausführungsbeispiel der Erfindung. Anders als bei den vorher beschriebenen Ausführungsbeispielen taucht das Abschlußelement 1044 nicht in
15 die Immersionsflüssigkeit 34 ein. Die von Projektionslicht durchsetzten Flächen des Abschlußelements 1044 grenzen somit sowohl objektseitig als auch bildseitig an ein umgebendes Gas an. Auch diese Anordnung ist insbesondere bei solchen Projektionsobjektiven vorteilhaft, die sowohl für ei-
20 nen Trockenbetrieb als auch für einen Immersionsbetrieb geeignet sein sollen. Die in der Figur 15 gezeigte Anordnung erfordert nämlich besonders wenige Modifikationen bei einer Umstellung zwischen den Betriebsarten. Andererseits sind die optischen Verhältnisse an den beiden Grenzflächen des
25 Abschlußelements 1044 weitgehend identisch. Dies ist insofern vorteilhaft, weil insbesondere Abbildungsfehler, die durch Lagetoleranzen, z.B. Verkippungen, an der objektseitigen Grenzfläche erzeugt werden, durch gegenläufig wirken-

de Abbildungsfehler auf der bildseitigen Grenzfläche recht gut kompensiert werden.

Das in der Figur 16 gezeigte Projektionsobjektiv 1120 unterscheidet sich von dem in der Figur 15 gezeigten Projektionsobjektiv 1020 dadurch, daß der erste Zwischenraum 1192 zwischen der bildseitig letzten Linse L1105 und dem Abschlußelement 1144 nicht mit einem umgebenden Gas, sondern mit einer Flüssigkeit 1134 ausgefüllt ist. Die bildseitige Fläche des Abschlußelements 1144 ist deswegen vergleichsweise unempfindlich gegenüber Fertigungstoleranzen, und zwar insbesondere Paßfehlern, des Abschlußelements 1144.

Der zweite Zwischenraum 1194 zwischen dem Abschlußelement 1144 und der lichtempfindlichen Schicht 26 kann entweder teilweise mit Immersionsflüssigkeit 34 aufgefüllt sein, wie dies bei dem in der Figur 15 gezeigten Projektionsobjektiv 1020 der Fall ist. Während eines Trockenbetriebs, wie ihn die Figur 16 zeigt, ist die lichtempfindliche Schicht 26 nicht von Immersionsflüssigkeit bedeckt.

Patentansprüche

=====

1. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage, umfassend:
 - a) eine Beleuchtungseinrichtung (12) zur Erzeugung von Projektionslicht (13),
 - 5 b) ein Projektionsobjektiv (20; 220; 320; 420; 520; 620; 720; 820; 920; 1020; 1120),
 - i) mit dem ein in einer Objektebene (22) des Projektionsobjektivs anordenbares Retikel (24) auf eine in einer Bildebene (28) des Projektionsobjektivs anordenbare lichtempfindliche Schicht
10 (26) abbildbar ist und
 - ii) das für einen Immersionsbetrieb ausgelegt ist, bei dem eine bildseitig letzte Linse (L5; L205; L605; L705; L805; L905; L1005; L1105) des Projektionsobjektivs in eine Immersionsflüssigkeit
15 (34; 334a; 434a; 534a) eintaucht,
- gekennzeichnet durch
- c) ein für das Projektionslicht durchlässiges Abschluß-
element (44; 244; 444; 544; 644; 744; 844; 944; 1044;
20 1144), das zwischen der bildseitig letzten Linse und

der lichtempfindlichen Schicht derart anordenbar ist, daß es zumindest mit seiner bildseitigen Grenzfläche (72; 272) in die Immersionsflüssigkeit eintaucht.

2. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (44; 244; 644; 744; 844; 944; 1044; 1144) von außen an dem Projektionsobjektiv (20; 220; 620; 720; 820; 920; 1020; 1120) befestigt ist.
3. Projektionsobjektiv nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (244) an die bildseitig letzte Linse (L205) angesprengt ist.
4. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der bildseitig letzten Linse (L5; L605; L705; L905; L1105) des Projektionsobjektivs (20; 320; 420; 520; 620; 720; 820; 920; 1020; 1120) und dem Abschlußelement (44; 444; 544; 644; 744; 944; 1144) ein Zwischenraum (66; 492; 592; 692; 792; 992; 1192) verbleibt, der zumindest teilweise mit einer Immersionsflüssigkeit (34; 434a; 534a) auffüllbar ist.
5. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Zwischenraum (66; 492; 592; 692; 1192) vollständig mit Immersionsflüssigkeit (34; 334a; 434a; 534a) auffüllbar ist.
6. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Immersionseinrich-

tung (42; 342a, 342b) zum Einbringen einer Immersionsflüssigkeit (34; 334a, 334b) in einen Raum (64, 66; 264; 364, 366) oberhalb der lichtempfindlichen Schicht (26).

7. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche
5 4 oder 5 und nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Projektionsobjektiv (20) zum Einbringen von Immersionsflüssigkeit (334a) in den Zwischenraum (366) zwischen der bildseitig letzten Linse (L5) und dem Abschlußelement (44) eine erste Immersionseinrichtung (342a) aufweist, die
10 von einer zweiten Immersionseinrichtung (342b) zum Einbringen von Immersionsflüssigkeit (334b) in einen Zwischenraum (364) zwischen dem letzten optischen Element (L5) und der lichtempfindlichen Schicht (26) unabhängig ist, so daß kein Austausch von Immersionsflüssigkeit (334a, 334b) zwischen
15 den Zwischenräumen (366, 364) möglich ist.

8. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (244) den gleichen Brechungsindex wie die bildseitig letzte Linse (L205) des Projektionsobjektivs hat
20 und mit seiner objektseitigen Grenzfläche (270) so optisch an diese angekoppelt ist, daß durch das Projektionsobjektiv hindurchtretendes Projektionslicht (13) zwischen der bildseitig letzten Linse (L205) und dem Abschlußelement (244) nicht gebrochen wird.

25 9. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der bildseitig letzten

Linse (L5; L605; L705; L905) des Projektionsobjektivs (20; 320; 420; 520; 620; 720; 920) und dem Abschlußelement (44; 444; 544; 644; 744; 944) ein erster Zwischenraum (66; 492; 592; 692; 792; 992) verbleibt, der zumindest teilweise mit
5 einer ersten Immersionsflüssigkeit (34; 334a; 434a; 534b) auffüllbar ist, und daß zwischen dem Abschlußelement und der lichtempfindlichen Schicht (26) ein zweiter Zwischenraum (64; 494; 594) verbleibt, der zumindest teilweise mit einer zweiten Immersionsflüssigkeit (34; 334b; 434b; 534b)
10 befüllbar ist.

10. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (444; 544) verfahrbar angeordnet ist.

11. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 10, dadurch
15 gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (444; 544) während eines Scanbetriebs der Projektionsbelichtungsanlage (10) synchron zu der lichtempfindlichen Schicht (26) verfahren werden kann.

12. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 10, dadurch
20 gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (444; 544) während einer Projektion in einer zu der der lichtempfindlichen Schicht (26) parallelen Ebene (28) verfahren werden kann.

13. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 12, dadurch
25 gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (444; 544) und

die lichtempfindliche Schicht (26) während einer Projektion gleiche Verfahrensgeschwindigkeiten und Verfahrerrichtungen (496, 496b; 596a, 596b) haben.

14. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche
5 10 bis 13, gekennzeichnet durch einen Rand (490; 590),
der ein seitliches Abfließen der ersten Immersionsflüssigkeit (434a; 534a) von dem Abschlußelement (444; 544) verhindert.

15. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 14, dadurch
10 gekennzeichnet, daß der Rand (490; 590) Teil einer zur
bildseitig letzten Linse (L5) des Projektionsobjektivs (20)
hin offenen Wanne (488; 588) ist, in dessen Boden (486) das
Abschlußelement (444; 544) angeordnet ist.

16. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche
15 9 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (444) um eine zur Bildebene (28) parallele Kippachse (TA) verkipppbar ist.

17. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 16, dadurch
gekennzeichnet, daß die Kippachse (TA) senkrecht zu
20 einer Bewegungsrichtung (496a) des Abschlußelements (444)
verläuft.

18. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 17, dadurch
gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (444) während
einer Belichtungspause so verkippt werden kann, daß der

größte Abstand zwischen dem Abschlußelement (444) und der lichtempfindlichen Schicht (26) in Bewegungsrichtung (496a) vorne liegt.

19. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche
5 9 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (444; 544) senkrecht zur Bildebene (28) verfahrbar ist.

20. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche
9 bis 19, gekennzeichnet durch eine Halteeinrichtung
10 (499a, 499b), welche die zweite Immersionsflüssigkeit (434b; 534b) in dem zweiten Zwischenraum (494; 594) hält.

21. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Halteeinrichtung (499a, 499b) die zweite Immersionsflüssigkeit (434b; 534b) berührungslos
15 in dem zweiten Zwischenraum (494; 594) hält.

22. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Halteeinrichtung mindestens eine Gasdüse (499a, 499b) umfaßt, deren Austrittsöffnung auf die zweite Immersionsflüssigkeit (434b; 534b) gerichtet
20 werden kann.

23. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 9 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Zwischenraum (492; 592) in einem verschließbaren Behälter (90) angeordnet ist.

24. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 23, gekennzeichnet durch eine Zuführeinrichtung (92, 94) zum Zuführen einer Dampfphase der ersten Immersionsflüssigkeit (434a; 534a) in den Behälter (90).

5 25. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß der Dampfdruck der Dampfphase der ersten Immersionsflüssigkeit (434a, 534a) in dem Behälter (90) so einstellbar ist, daß er zumindest annähernd gleich dem Sättigungsdampfdruck der Dampfphase der ersten Immersi-
10 onsflüssigkeit (434a; 534a) bei der in dem Behälter (90) herrschenden Temperatur ist.

26. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 9 bis 25, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Zwischenraum (592) nach oben durch eine Abdeckung (500) abge-
15 deckt ist.

27. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der Abdeckung (500) und der ersten Immersionsflüssigkeit (434a) ein Zwischenraum verbleibt, der mit einem Schutzgas gefüllt ist, dessen
20 Dichte größer ist als die Dichte eines umgebenden Gases.

28. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, daß die Löslichkeit des Schutzgases in der ersten Immersionsflüssigkeit kleiner als 10^{-4} Volumenprozent ist.

29. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 26 bis 28, dadurch gekennzeichnet, daß die Abdeckung (500) im Bereich der bildseitig letzten Linse (L5) eine Aussparung (502) hat.
- 5 30. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 26 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß die Abdeckung (500) die Wanne (588) nach oben hin zumindest weitgehend verschließt.
- 10 31. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 30 bei Rückbezug auf Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Rand (590) während einer Verfahrbewegung des Abschluß- elements dichtend an der Unterseite der Abdeckung (500) entlang gleitet.
- 15 32. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, daß dadurch gekennzeichnet, daß der Rand (590) so ausgeführt ist, daß zwischen einer nach oben weisenden Randfläche des Randes (590) und der Abdeckung (500) stets ein aus der ersten Immersionsflüssigkeit (534a) bestehender Flüssigkeitsfilm verbleibt.
- 20 33. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, daß dadurch gekennzeichnet, daß in der nach oben weisenden Randfläche des Randes (590) ein Flüssigkeitsreservoir (508) eingelassen ist.

34. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 33, dadurch gekennzeichnet, daß dadurch gekennzeichnet, daß die Immersionsflüssigkeit (534a) in dem Flüssigkeitsreservoir (508) unter einem erhöhten Druck steht.
- 5 35. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 34, dadurch gekennzeichnet, daß dem Flüssigkeitsreservoir (508) erste Immersionsflüssigkeit (534a) von außerhalb der Wanne unter Druck zuführbar (512) ist.
36. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche
10 31 bis 35, dadurch gekennzeichnet, daß an mindestens einer Außenseite des Randes (590) eine Überlaufrinne (518) angeordnet ist.
37. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 36, dadurch
15 gekennzeichnet, daß in die Überlaufrinne ein Schutzgas (519) einleitbar ist, dessen Dichte größer ist als die Dichte eines umgebenden Gases.
38. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 26 bis 37, dadurch gekennzeichnet, daß die Abdeckung (500) eine planparallele Platte ist.
- 20 39. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 9 bis 38, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (500) zumindest annähernd den gleichen Brechungsindex hat wie eine angrenzende Immersionsflüssigkeit (534a, 534b).

40. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 39, dadurch gekennzeichnet, daß sich der Brechungsindex des Abschlußelements (500) von den Brechungsindizes der angrenzenden Immersionsflüssigkeiten um nicht mehr als 1%, vorzugsweise um nicht mehr als 0,5% unterscheidet.

41. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, daß die angrenzende Immersionsflüssigkeit (434a, 434b; 534a, 534b) Wasser ist und zumindest die Grenzflächen des Abschlußelements (444; 544) aus LiF bestehen.

42. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 9 bis 41, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (444; 544) parallel zur Bildebene eine rechteckige, runde oder ovale Form hat.

43. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 9 bis 42, dadurch gekennzeichnet, daß sich die erste Immersionsflüssigkeit (434a; 534a) von der zweiten Immersionsflüssigkeit (434b; 534b) unterscheidet.

44. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 43, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Immersionsflüssigkeit (434a; 534a) eine geringere Oberflächenspannung als die zweite Immersionsflüssigkeit (434b; 534b) hat.

45. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 43 oder 44, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Immersionsflüs-

sigkeit (434a; 534a) eine geringere Viskosität als die zweite Immersionsflüssigkeit (434b; 534b) hat.

46. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 43 bis 45, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Immersionsflüssigkeit (434a; 534a) eine geringere chemische Reaktionsfähigkeit als die zweite Immersionsflüssigkeit (434b; 534b) hat.

47. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (44; 244; 444; 544; 644; 744; 844; 944; 1044; 1144) brechkraftlos ist.

48. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (44; 244; 444; 544; 644; 744; 844; 944; 1044; 1144) eine planparallele Platte ist.

49. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Abschlußelement (44) wenigstens zwei Teilelemente (44a, 44b; 644a, 644b; 844a, 844b; 944a, 944b) aus doppelbrechenden kubischen Kristallen umfaßt, deren Dicken so gewählt und deren Kristallgitter so zueinander orientiert sind, daß sich der Einfluß intrinsischer Doppelbrechung auf hindurchtretendes Projektionslicht (13) zumindest annähernd kompensiert.

50. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 49, dadurch gekennzeichnet, daß die zwei Teilelemente (44a, 44b; 644a, 644b) fugenlos aneinandergesetzt sind.
51. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 49, dadurch
5 gekennzeichnet, daß zwischen den zwei Teilelementen (844a, 844b; 944a, 944b) ein Zwischenraum (899; 999) verbleibt.
52. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 51, dadurch
10 gekennzeichnet, daß der Zwischenraum (999) mit einer Flüssigkeit (34) gefüllt ist.
53. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 51 oder 52, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine der an den Zwischenraum angrenzenden Flächen der Teilelemente (844a, 844b; 944a, 944b) gekrümmt ist.
- 15 54. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 53, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden an den Zwischenraum angrenzenden Flächen zumindest annähernd parallel zueinander verlaufen.
- 20 55. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß auf wenigstens eine Fläche (70, 73; 173) des Abschlußelements (44), die mit Immersionsflüssigkeit (34) in Berührung gelangen kann, eine für Immersionsflüssigkeit (34) undurchlässige Schutzschicht (76, 78; 178) aufgebracht ist.

- 68 -

56. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 55, dadurch gekennzeichnet, daß die Schutzschicht eine Kompaktheit von mehr als 98% hat.
57. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens eine von Projektionslicht (13) durchtretene Oberfläche (173) oder eine darauf aufgebrachte Schutzschicht (278) des Abschlußelements (244) zur Korrektur von Wellenfrontfehlern durch lokalen Materialabtrag (79a, 79b) nachbearbeitet ist.
58. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die bildseitig letzte Linse (L605) konvex-konkav oder bikonvex ist.
59. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 58, dadurch gekennzeichnet, daß die bildseitig letzte Linse (L605) eine asphärische nichtplane bildseitige Fläche hat.
60. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 58 oder 59, dadurch gekennzeichnet, daß die bildseitig letzte Linse eine asphärische nichtplane objektseitige Fläche hat.
61. Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung eines mikrostrukturierten Bauelements mit folgenden Schritten:

- 69 -

- a) Bereitstellen einer Projektionsbelichtungsanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das ein Projektionsobjektiv (20; 220; 320; 420; 520; 620; 720; 820; 920; 1020; 1120) enthält;
- 5 b) Bereitstellen eines Trägers (30), auf den zumindest teilweise eine lichtempfindliche Schicht (26) aufgebracht ist;
- c) Anordnen eines Retikels (24), das abzubildende Strukturen enthält, in einer Objektebene (22) des Projektionsobjektivs (20);
- 10 d) Projizieren wenigstens eines Teils des Retikels (24) auf einen Bereich auf der Schicht (26) mit Hilfe der Projektionsbelichtungsanlage (10).
62. Verfahren nach Anspruch 61 bei Rückbezug auf einen der
- 15 Ansprüche 10 bis 15, gekennzeichnet durch die folgenden zusätzlichen Schritte:
- Einbringen der ersten Immersionsflüssigkeit (434a; 534a) in den ersten Zwischenraum (492; 592);
 - Einbringen der zweiten Immersionsflüssigkeit (434b; 543b) in den zweiten Zwischenraum (494; 594);
 - 20 - Synchrones Verfahren des Trägers (30) und des Abschlußelements (444; 544) während einer scannenden

- 70 -

Projektion des Retikels (24) auf die lichtempfindliche Schicht (26).

63. Verfahren nach Anspruch 62, dadurch gekennzeichnet,
daß das Abschlußelement (444) während einer in einer
5 Belichtungspause durchgeführten Positionierbewegung in zur
Bildebene (28) verkippter Stellung synchron mit dem Träger
(30) verfahren wird.

64. Verfahren nach Anspruch 63, dadurch gekennzeichnet,
daß das Abschlußelement (444) um eine Kippachse (TA)
10 verkippt wird, die senkrecht zu einer Bewegungsrichtung
(496b) des Trägers (30) verläuft.

65. Mikrostrukturiertes Bauelement, dadurch gekennzeichnet,
net, daß es nach einem Verfahren nach den Ansprüche 61
bis 64 hergestellt ist.

1 / 12

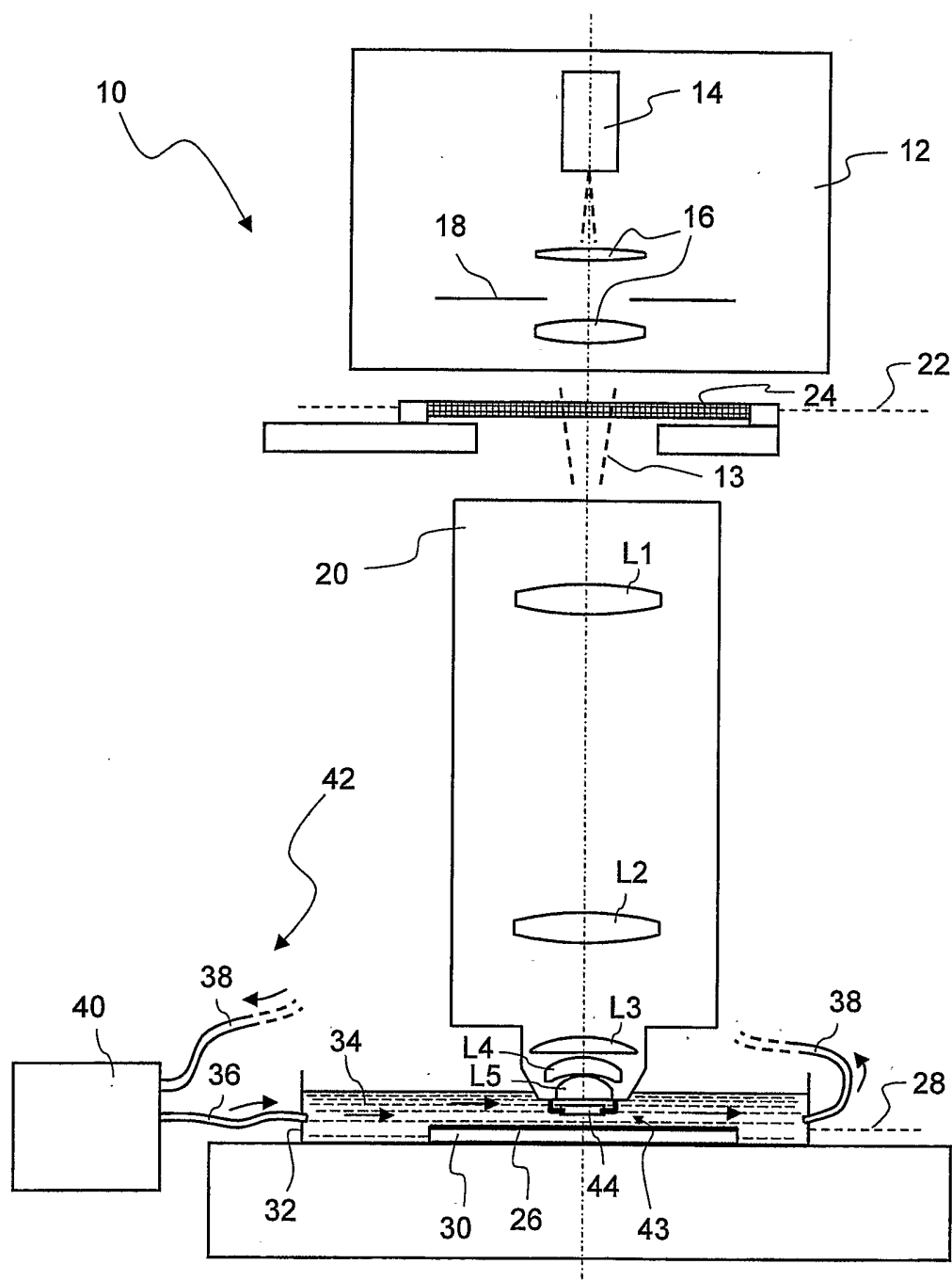


Fig. 1

2 / 12

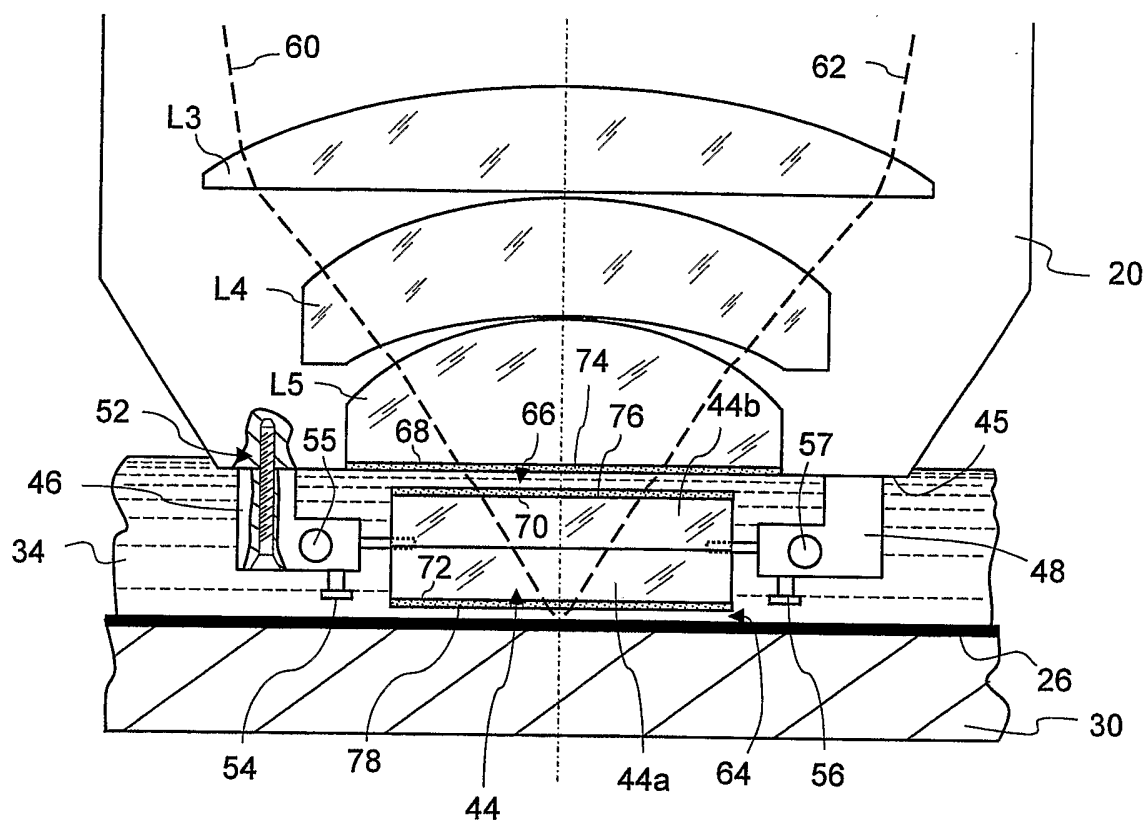


Fig. 2

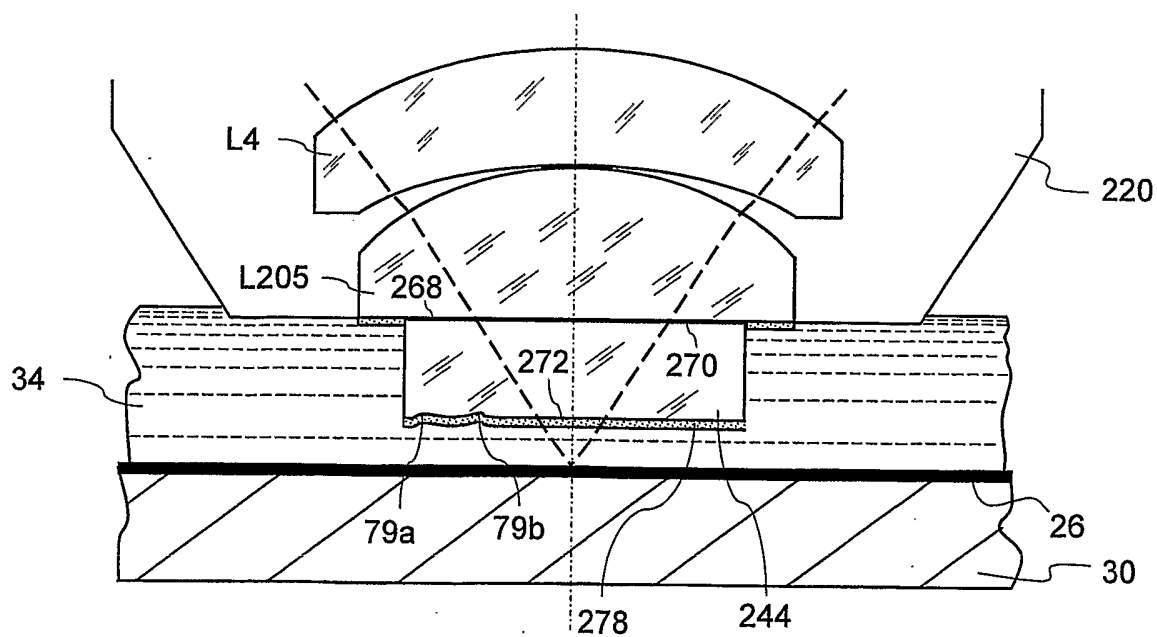


Fig. 3

3 / 12

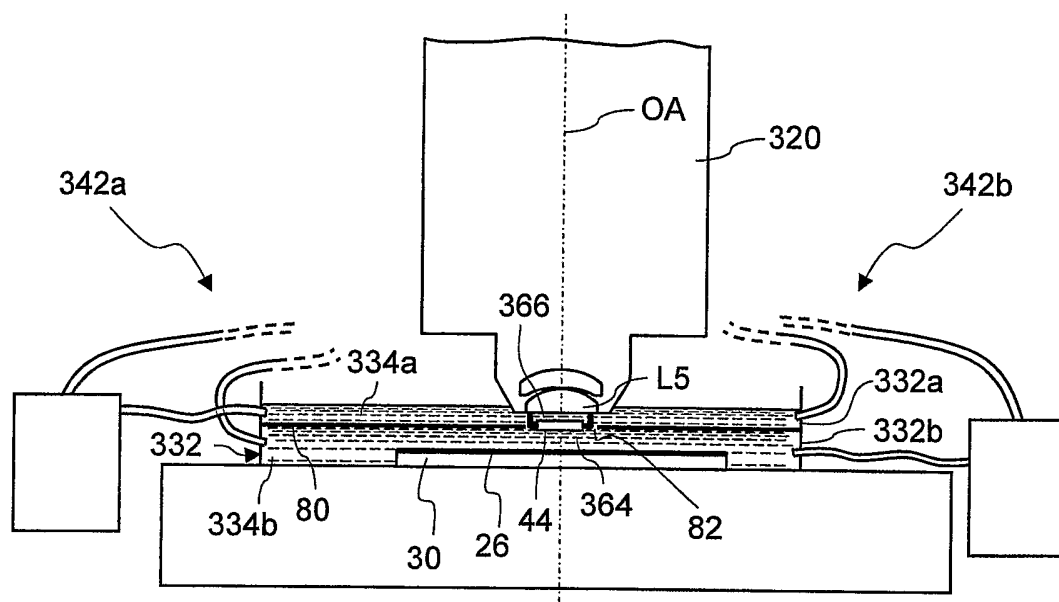


Fig. 4

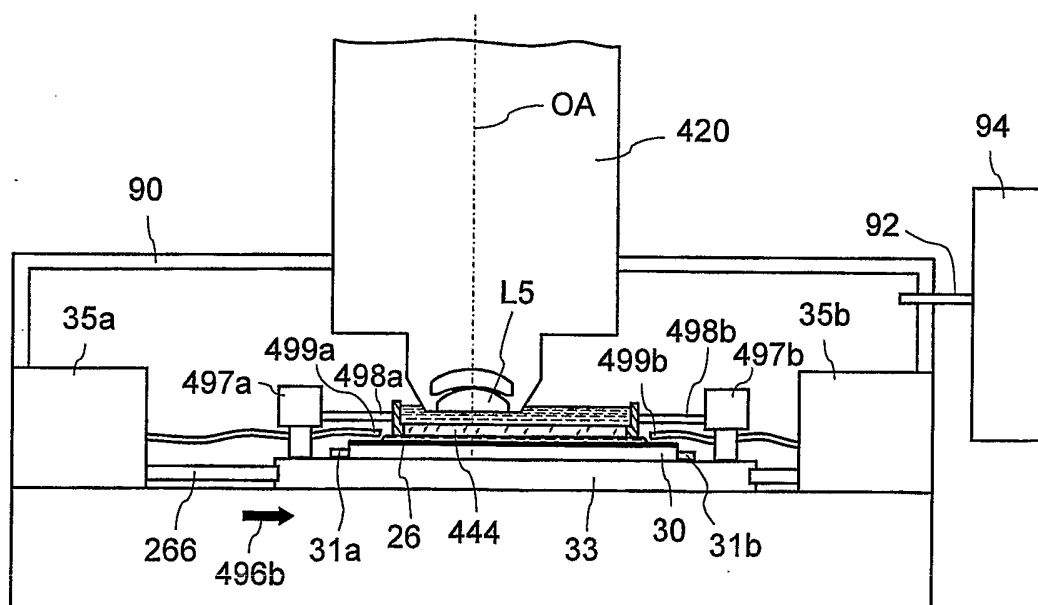


Fig. 5

4 / 12

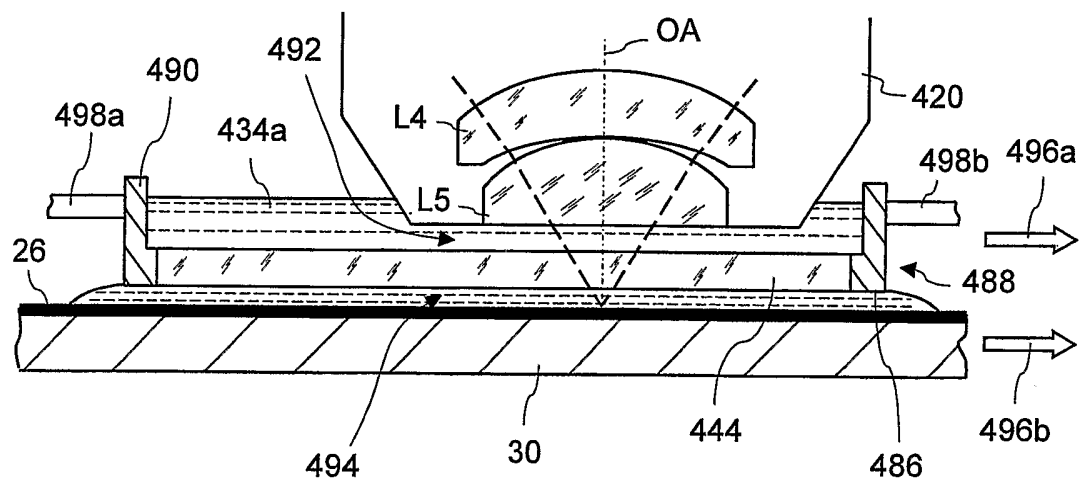


Fig. 6

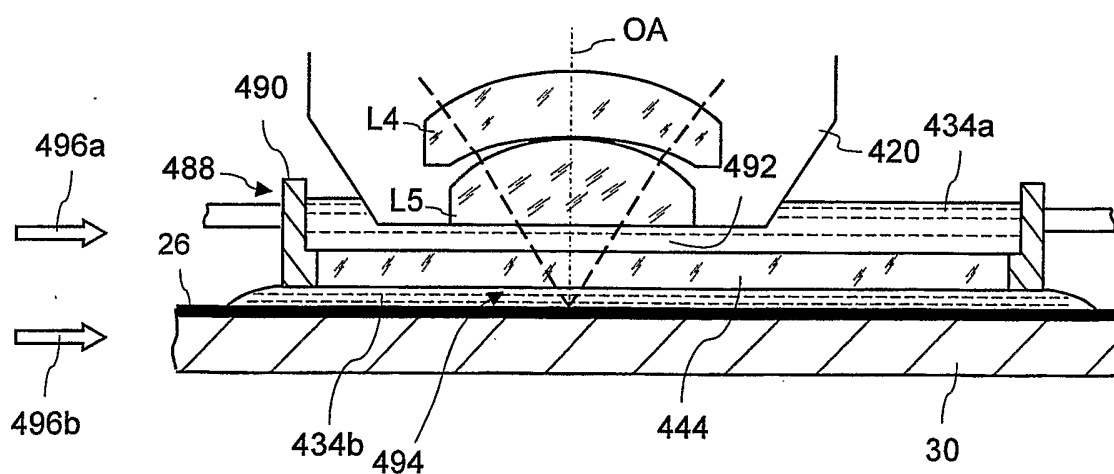


Fig. 7

5 / 12

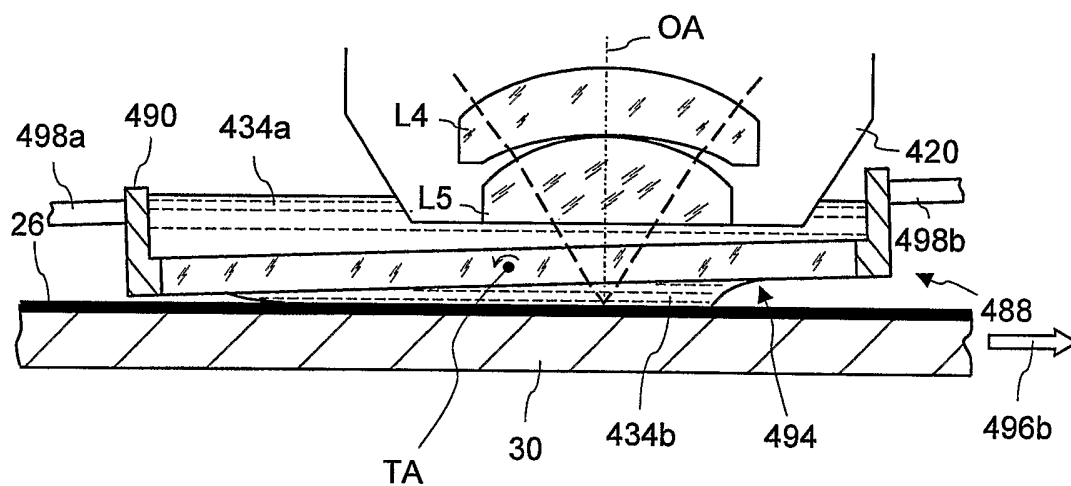


Fig. 8

6 / 12

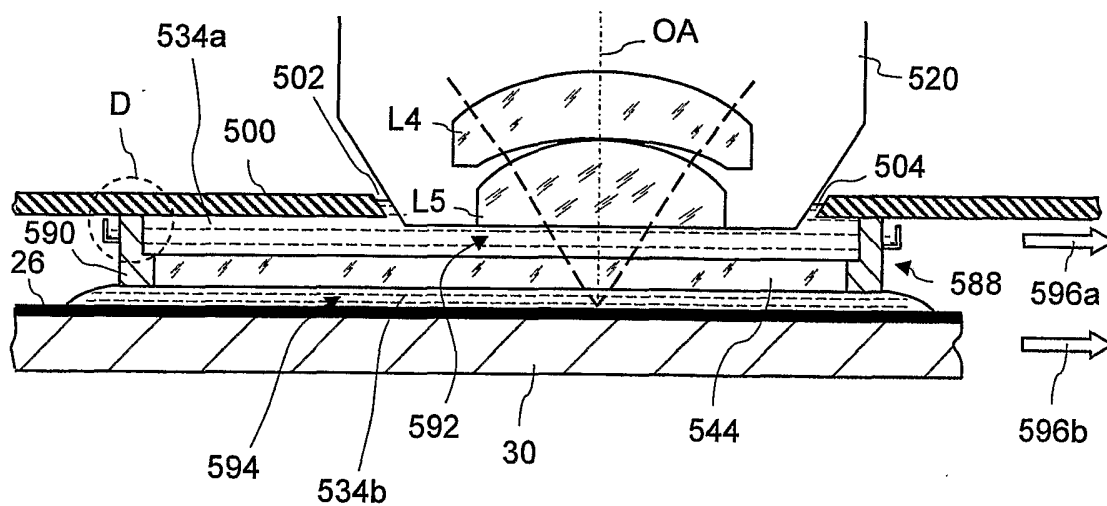


Fig. 9

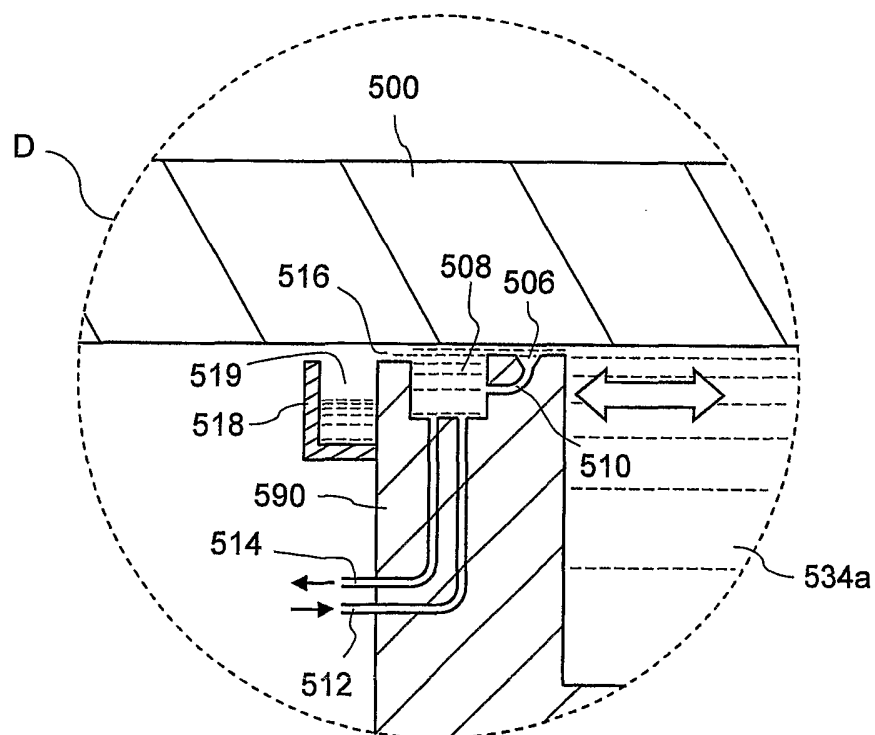


Fig. 10

7 / 12

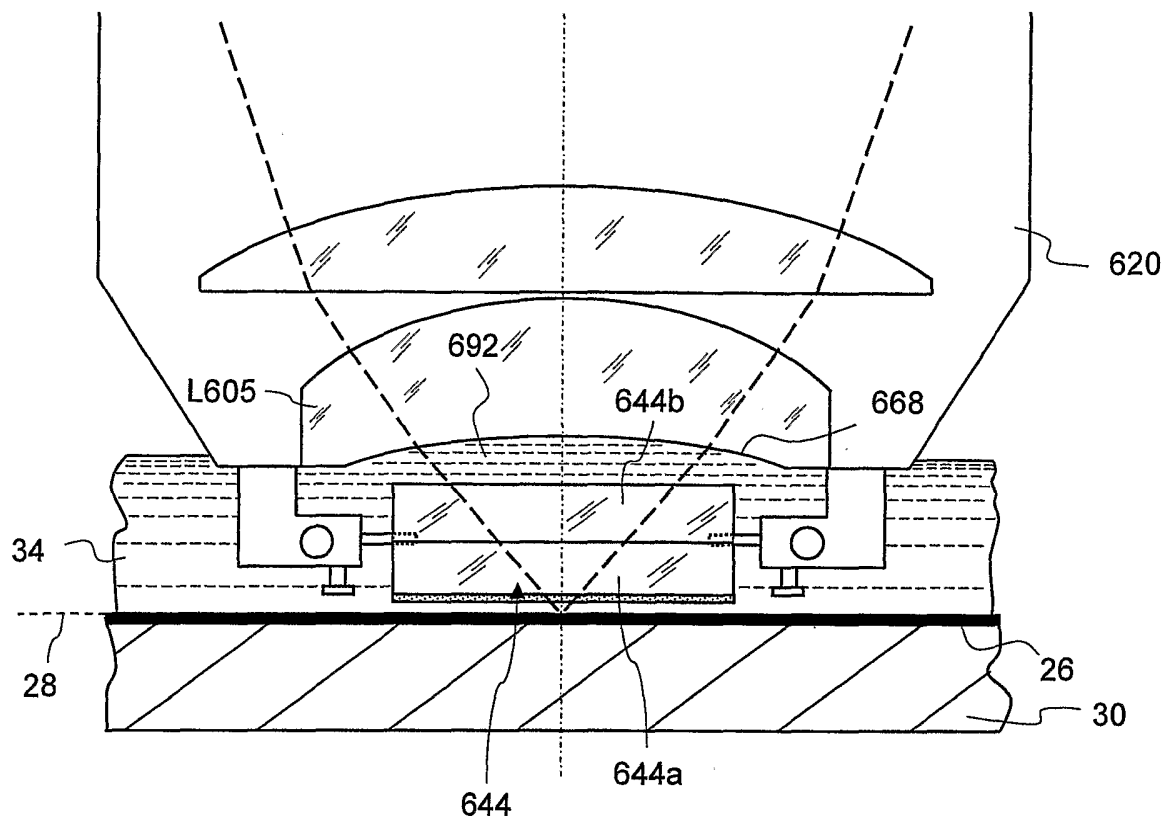


Fig. 11

8 / 12

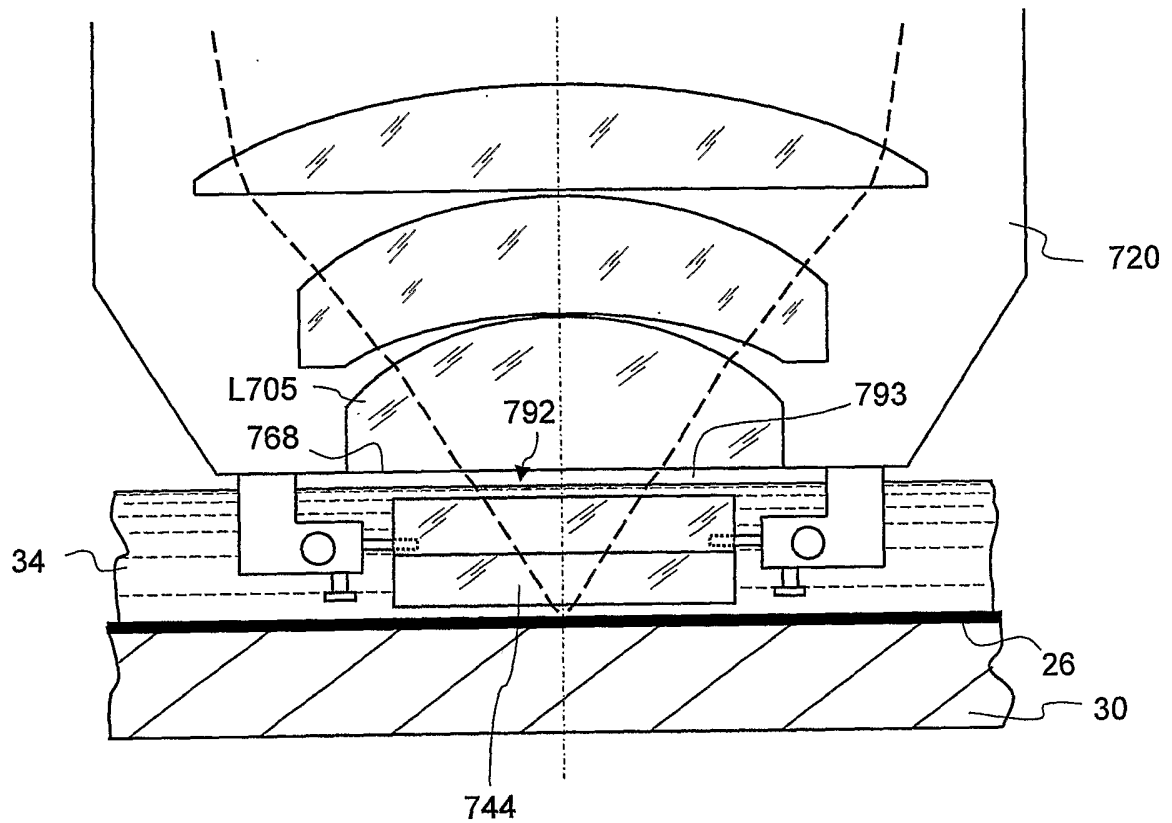


Fig. 12

9 / 12

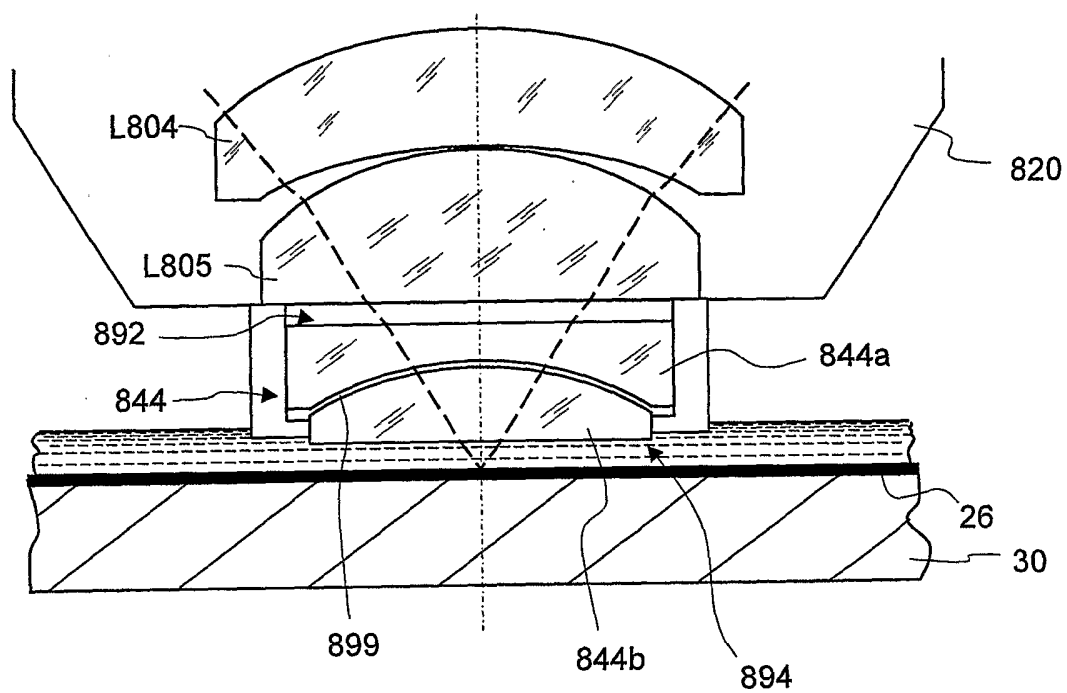


Fig. 13

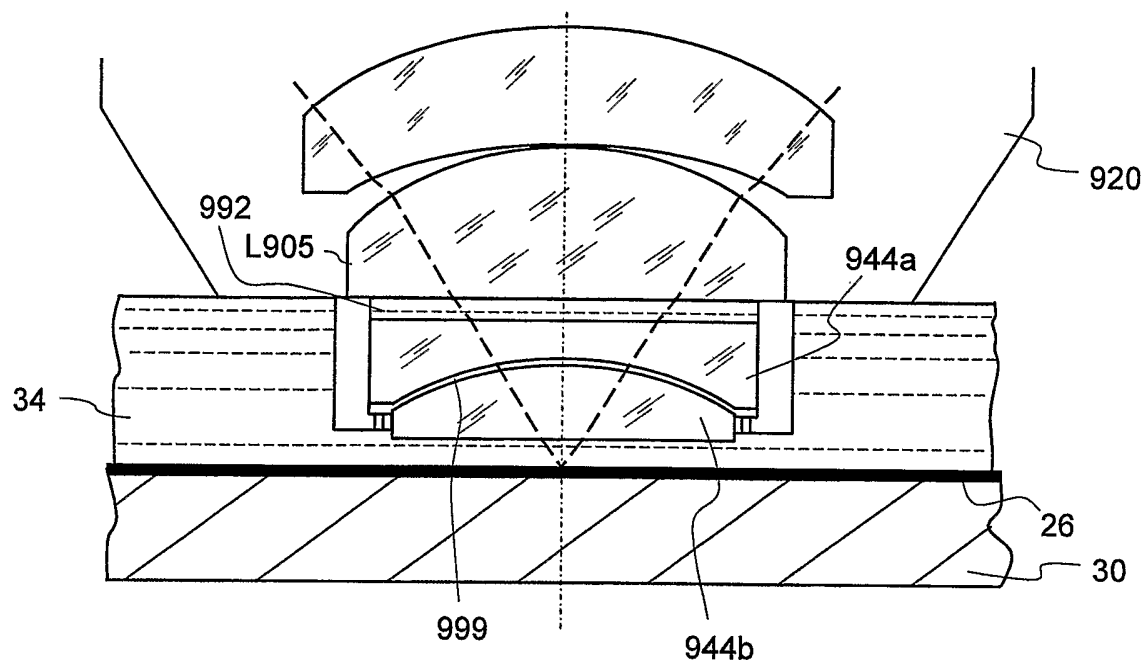


Fig. 14

11 / 12

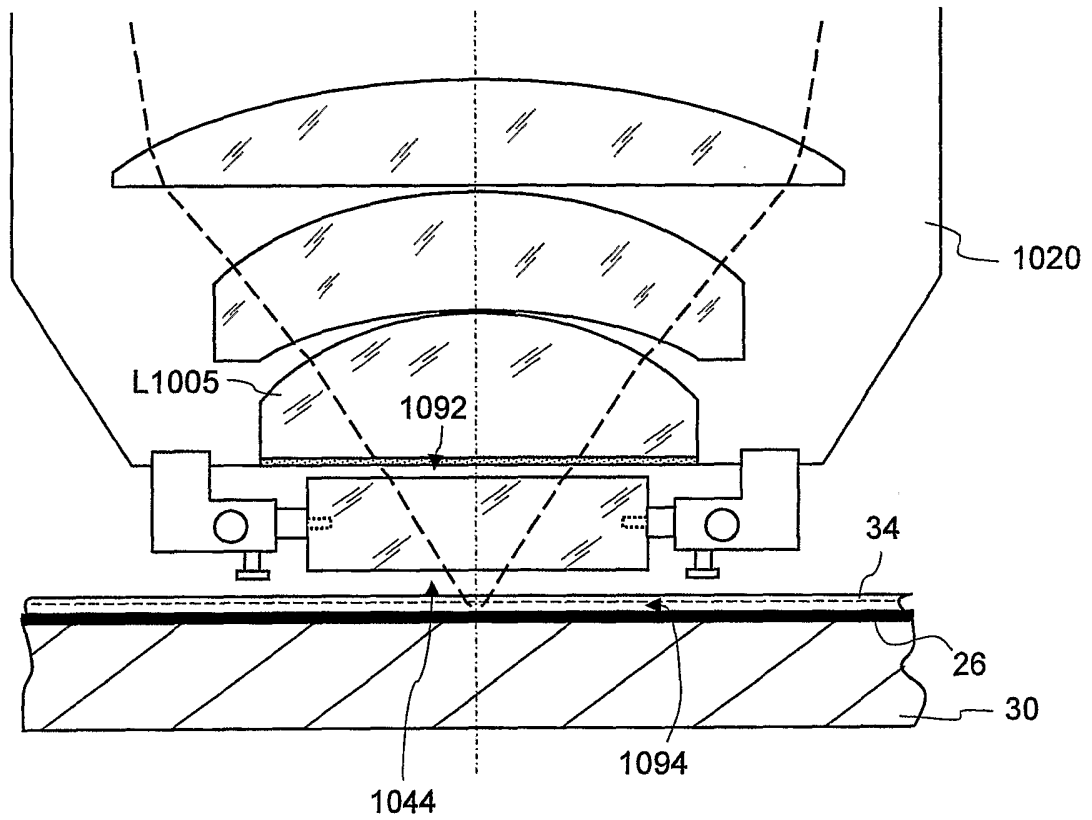


Fig. 15

12 / 12

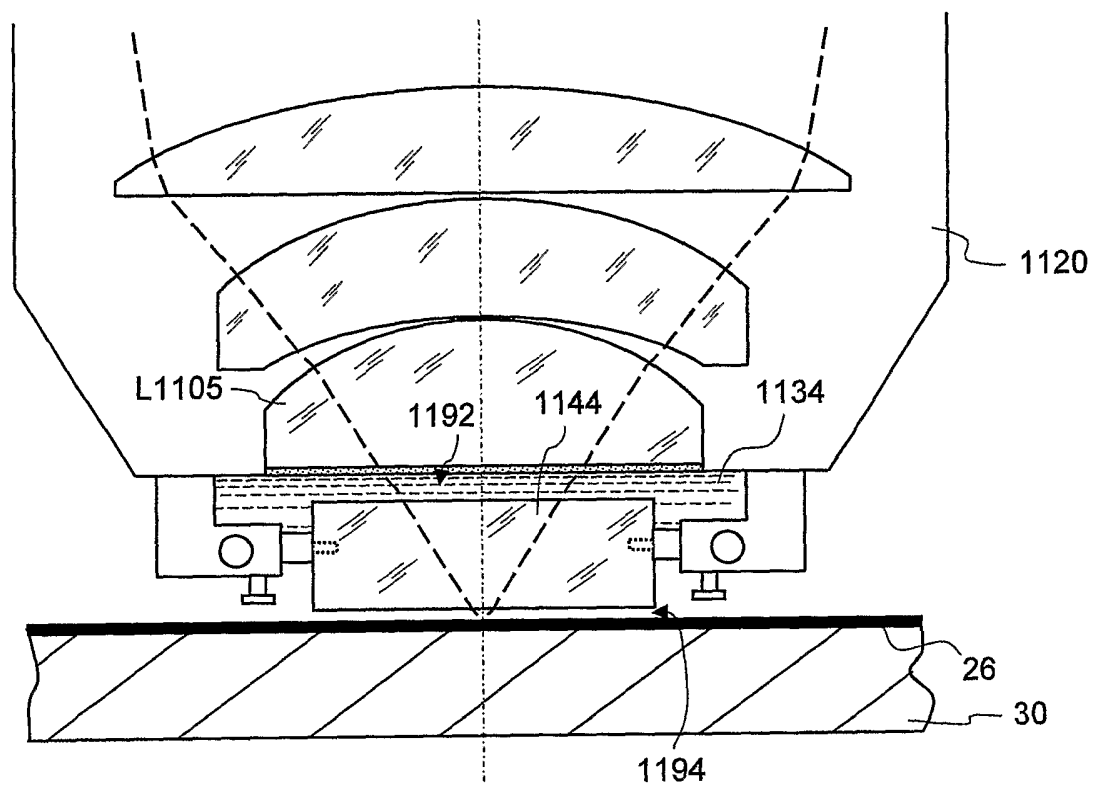


Fig. 16