



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 102 57 766 A1** 2004.07.15

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **102 57 766.8**
(22) Anmeldetag: **10.12.2002**
(43) Offenlegungstag: **15.07.2004**

(51) Int Cl.7: **G02B 13/14**
G03F 7/20

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

(72) Erfinder:
Gräupner, Paul, 73430 Aalen, DE

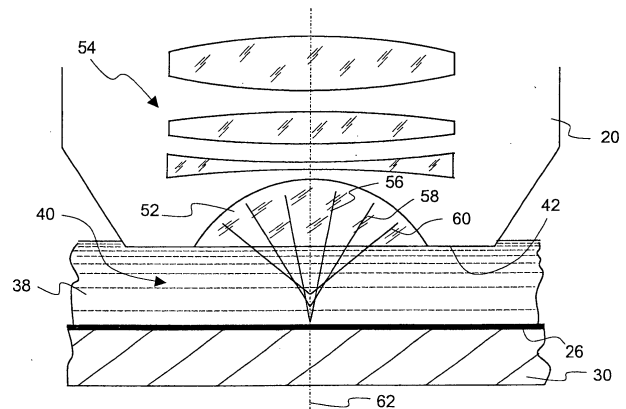
(74) Vertreter:
Ostertag & Partner, Patentanwälte, 70597 Stuttgart

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Einstellung einer gewünschten optischen Eigenschaft eines Projektionsobjektivs sowie mikrolithografische Projektionsbelichtungsanlage**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Verbesserung einer optischen Abbildungseigenschaft eines Projektionsobjektivs (20), das Teil einer mikrolithografischen Projektionsbelichtungsanlage (10) ist, mit der sich ein in einer Objektebene (22) des Projektionsobjektivs (20) angeordnetes Retikel (24) durch das Projektionsobjektiv (20) hindurch auf eine in einer Bildebene (28) angeordnete lichtempfindliche Oberfläche (26) abbilden läßt. Zunächst wird eine Immersionsflüssigkeit (38) in einen Zwischenraum (40) zwischen der lichtempfindlichen Oberfläche (26) und einer dieser Oberflächen (26) zugewandten Endfläche (42) des Projektionsobjektivs (20) eingebracht. Anschließend wird eine Abbildungseigenschaft des Projektionsobjektivs (20) ermittelt. Daran schließt sich ein Vergleich der ermittelten Abbildungseigenschaft mit einer Soll-Abbildungseigenschaft an. Schließlich wird die Temperatur der Immersionsflüssigkeit (38) so lange verändert, bis die ermittelte Abbildungseigenschaft der Soll-Abbildungseigenschaft möglichst nahe kommt. Die Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs (20) lassen sich durch die temperaturinduzierte Veränderung des Brechungsindex der Immersionsflüssigkeit (38) präzise beeinflussen, was z. B. zur Kompensation einer sphärischen Aberration des Projektionsobjektivs (20) benutzt werden kann.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Verbesserung einer optischen Abbildungseigenschaft eines Projektionsobjektivs, das Teil einer mikrolithografischen Projektionsbelichtungsanlage ist, mit der sich ein in einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordnetes Retikel durch das Projektionsobjektiv hindurch auf eine in einer Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnete lichtempfindliche Oberfläche abbilden läßt. Die Erfindung betrifft ferner eine mikrolithografische Projektionsbelichtungsanlage zur Abbildung eines in einer Objektebene eines Projektionsobjektivs angeordneten Retikels durch das Projektionsobjektiv hindurch auf eine in einer Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnete lichtempfindliche Oberfläche, mit Mitteln zum Einbringen einer Immersionsflüssigkeit in einen Zwischenraum zwischen der lichtempfindlichen Oberfläche und einer dieser Oberfläche zugewandten Endfläche des Projektionsobjektivs. Die Erfindung betrifft außerdem eine derartige Projektionsbelichtungsanlage, bei der in den genannten Zwischenraum bereits eine Immersionsflüssigkeit eingebracht ist.

[0002] Ein Verfahren der genannten Art ist allgemein im Stand der Technik bekannt. So läßt sich bei zahlreichen Projektionsobjektiven mikrolithografischer Projektionsbelichtungsanlagen die räumliche Lage einzelner optischer Komponenten mit Hilfe von Manipulatoren so verändern, daß sich die Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs verbessern. Die Lageveränderung der betreffenden optischen Komponenten zur Verbesserung der Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs erfolgt dabei am fertig montierten Projektionsobjektiv, und zwar in der Regel noch vor dessen erstmaliger Inbetriebnahme. Diese Art der Feinjustierung kann aber auch zu einem späteren Zeitpunkt vorgenommen werden, um beispielsweise alterungsbedingte Verschlechterungen der Abbildungseigenschaften zu kompensieren. Häufig geht man bei diesen Verfahren so vor, daß man eine oder mehrere Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs mit Hilfe eines in dessen Bildebene angeordneten Sensors erfasst. Sodann beobachtet man, wie sich Lageveränderungen einzelner optischer Komponenten auf die Abbildungseigenschaften auswirken. Durch mehr oder weniger zielgerichtete Justage der optischen Komponenten können auf diese Weise die optischen Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs optimiert werden.

[0003] Eine mikrolithografische Projektionsbelichtungsanlage der eingangs genannten Art ist aus der EP 0 023 231B1 bekannt. Diese bekannte Projektionsbelichtungsanlage weist zur Aufnahme eines Trägers für eine zu belichtende Halbleiterscheibe einen oben offenen Behälter auf, dessen oberer Rand höher liegt als die untere Begrenzungsfläche des Projektionsobjektivs. Der Behälter ist mit Zu- und Ableitungen für eine Immersionsflüssigkeit versehen, die

in einem Flüssigkeitskreislauf umgewälzt wird. Die Immersionsflüssigkeit füllt beim Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage den Zwischenraum aus, der zwischen der zu belichtenden Halbleiterscheibe und einer dieser zugewandten Grenzfläche des Projektionsobjektivs verbleibt. Durch den höheren Brechungsindex der Immersionsflüssigkeit im Vergleich zu Luft wird das Auflösungsvermögen des Projektionsobjektivs vergrößert.

[0004] Die bekannte Projektionsbelichtungsanlage weist ferner eine in dem Flüssigkeitskreislauf angeordnete Einrichtung zur Temperierung der Immersionsflüssigkeit auf. Auf diese Weise läßt sich die Temperatur der zu belichtenden Halbleiterscheibe konstant halten, so daß durch Wärmebewegungen der Halbleiterscheibe hervorgerufene Abbildungsfehler zu vermieden werden.

[0005] Die Verwendung von Immersionsflüssigkeiten bei mikrolithografischen Projektionsbelichtungsanlagen ist auch aus der JP 10-303 114 A bekannt. Dort wird auf das Problem hingewiesen, daß unerwünschte Temperaturschwankungen der Immersionsflüssigkeit auch zu einer Verschlechterung der Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs führen können. Die Ursache hierfür liegt in der Abhängigkeit des Brechungsindex der Immersionsflüssigkeit von der Temperatur. Zur Lösung dieses Problems werden verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen, mit denen sich die Temperatur der Immersionsflüssigkeit während des Betriebs der Projektionsbelichtungsanlage in engen Grenzen konstant halten läßt.

[0006] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren sowie eine mikrolithografische Projektionsbelichtungsanlage der eingangs genannten Art anzugeben, bei dem sich die optischen Abbildungseigenschaften eines fertig montierten Projektionsobjektivs noch leichter und wirkungsvoller verbessern lassen.

[0007] Bei einem Verfahren der eingangs genannten Art wird diese Aufgabe durch folgende Schritte gelöst:

- a) Einbringen einer Immersionsflüssigkeit in einen Zwischenraum zwischen der lichtempfindlichen Oberfläche und einer dieser Oberfläche zugewandten Endfläche des Projektionsobjektivs;
- b) Ermitteln einer Abbildungseigenschaft der Projektionsobjektivs;
- c) Vergleichen der ermittelten Abbildungseigenschaft mit einer Soll-Abbildungseigenschaft;
- d) Verändern der Temperatur der Immersionsflüssigkeit so lange, bis die ermittelte Abbildungseigenschaft der Soll-Abbildungseigenschaft möglichst nahe kommt.

[0008] Zur Verbesserung der optischen Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs wird die Erkenntnis genutzt, daß die Immersionsflüssigkeit eine optische Komponente der Projektionsbelichtungsanlage darstellt, die deren optische Eigenschaften im

Prinzip genau so beeinflusst wie etwa die im Projektionsobjektiv angeordneten Linsen. Anstatt nun (ausschließlich) die Linsen oder andere optische Komponenten im Projektionsobjektiv mechanisch im Strahlengang des Projektionsobjektivs zu justieren, nutzt die Erfindung die Möglichkeit, den Brechungsindex der optischen Komponente "Immersionsflüssigkeit" über deren Temperatur zu beeinflussen.

[0009] Zwar läßt sich im Prinzip auch der Brechungsindex der im Projektionsobjektiv enthaltenen optischen Komponenten über die Temperatur verändern, doch ist dort eine Temperaturveränderung ungleich schwerer herbeizuführen, da die für die Linsen u. ä. verwendeten Materialien eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen, wodurch die Einstellung einer homogenen Temperaturverteilung über das gesamte optisch wirksame Volumen hinweg erheblich erschwert wird. Die Temperatur der Immersionsflüssigkeit läßt sich hingegen relativ einfach auf einen vorgebbaren Wert bringen und über den entsprechenden optisch wirksamen Bereich hinweg konstant halten, z. B. indem die Flüssigkeit umgewälzt wird.

[0010] Da der Brechungsindex zahlreicher als Immersionsflüssigkeit geeigneter Flüssigkeiten nur recht schwach und – innerhalb kleiner Temperaturintervalle – annähernd linear von der Temperatur abhängt, läßt sich der Brechungsindex der Immersionsflüssigkeit sehr präzise über die Temperatur einstellen. So läßt sich beispielsweise bei einer für eine Wellenlänge von 193 nm ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage, bei der der Zwischenraum zwischen der lichtempfindlichen Oberfläche und der Endfläche des Projektionsobjektivs mit einer 1 mm dicken Wässerschicht aufgefüllt ist, der Brechungsindex von $n = 1,45$ um ein hundertstel Promill verändern, indem die Temperatur um 50 mK erhöht oder erniedrigt wird.

[0011] Theoretisch ist es möglich, zur Ermittlung der Abbildungseigenschaft ein zusätzliches optisches System derart in der Bildebene des Projektionsobjektivs zu positionieren, daß ein von dem Projektionsobjektiv erzeugtes Bild unmittelbar auf einem Schirm oder durch ein Okular hindurch beobachtet werden kann. Vorzugsweise jedoch wird die Abbildungseigenschaft ermittelt, indem ein Testretikel durch das Projektionsobjektiv und die Immersionsflüssigkeit hindurch auf ein in der Bildebene angeordnetes lichtempfindliches Element abgebildet wird. Die Abbildungseigenschaften lassen sich dann reproduzierbar und quantifizierbar ermitteln, indem das auf dem lichtempfindlichen Element gespeicherte Bild mit an sich bekannten Vorrichtungen vermessen wird. Als lichtempfindliches Element kommt bei spielsweise eine Fotoemulsion in Betracht.

[0012] Besonders bevorzugt ist es jedoch, wenn das lichtempfindliche Element eine Sensoreinrichtung, insbesondere ein CCD-Sensor, ist. Ruf diese Weise kann das in der Bildebene erzeugte Bild unmittelbar, d. h. ohne Entwicklung einer Fotoemulsion o. ä., erfasst und ausgewertet werden, um die Abbildungseigenschaften zu ermitteln.

[0013] Alternativ hierzu kann die Abbildungseigenschaft auch unter Verwendung eines Interferometers ermittelt werden, wie es beispielsweise aus der WO 01/632 33 A1 bekannt ist.

[0014] Mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens lassen sich alle optischen Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs verbessern, die durch die Immersionsflüssigkeit beeinflussbar sind. So kann es sich beispielsweise bei der zu verbessernden optischen Abbildungseigenschaft um eine durch das Projektionsobjektiv verursachte sphärische Aberration handeln. Derartige sphärische Aberrationen treten insbesondere bei Projektionsobjektiven mit hoher numerischer Apertur auf.

[0015] Bei der zu verbessernden optischen Eigenschaft kann es sich aber beispielsweise auch um die Brennweite des Projektionsobjektivs handeln. Da zur hochauflösenden Abbildung der in dem Retikel enthaltenen abzubildenden Strukturen auf der lichtempfindlichen Oberfläche letzere sehr genau in der Brennebene des Projektionsobjektivs angeordnet sein muß, weisen herkömmliche Projektionsbelichtungsanlagen häufig eine Verstellmöglichkeit auf, mit der der Träger der lichtempfindlichen Oberfläche entlang der optischen Achse des Projektionsobjektivs bewegt werden kann. Auf diese Weise läßt sich die lichtempfindliche Oberfläche in die Brennebene des Projektionsobjektivs justieren. Diese mechanischen Verstellrichtungen sind allerdings konstruktiv relativ aufwendig. Durch Verändern der Temperatur der Immersionsflüssigkeit läßt sich erfindungsgemäß auf sehr einfache Weise die Brennweite des Projektionsobjektivs beeinflussen, so daß auf eine Verstellmöglichkeit für den Träger der lichtempfindlichen Oberfläche verzichtet werden kann.

[0016] Bei einer Projektionsbelichtungsanlage der eingangs genannten Art wird die oben genannte Aufgabe gelöst durch eine in der Bildebene anordenbare Sensoreinrichtung, insbesondere einen CCD-Sensor, eine Temperaturregelungseinrichtung zur Einstellung einer Soll-Temperatur der Immersionsflüssigkeit, und einer mit der Sensoreinrichtung und der Temperaturregelungseinrichtung verbundenen Recheneinheit, mit der aus von der Sensoreinrichtung erzeugten Signalen die Soll-Temperatur der Immersionsflüssigkeit bestimmbar ist.

[0017] Eine derartige Projektionsbelichtungsanlage erlaubt eine automatisierte Verbesserung der optischen Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs durch Verändern der Temperatur der Immersionsflüssigkeit. Die Recheneinheit kann dabei z. B. so ausgelegt werden, daß sie aus den von der Sensoreinrichtung erzeugten Signalen die Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs ermittelt und mit einer Soll-Abbildungseigenschaft vergleicht. In einem Regelvorgang veranlasst dann die Recheneinheit die Temperatursteuerungseinrichtung, die Temperatur der Immersionsflüssigkeit so lange zu verändern, bis die von der Sensoreinrichtung erfasste Abbildungseigenschaft der Soll-Abbildungseigenschaft

möglichst nahekommmt. Eine derartige Projektionsbelichtungsanlage ermöglicht es einem Betreiber, bestimmte Verschlechterungen der Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs automatisch, d. h. ohne Hinzuziehung von Spezialisten, durch eine Veränderung des Brechungsindex der Immersionsflüssigkeit zu kompensieren. Als Ursache für die Verschlechterungen kommen z. B. alterungsbedingte Materialveränderungen oder Schwankungen des Luftdrucks in Betracht.

[0018] Gegenstand der Erfindung ist ferner eine Projektionsbelichtungsanlage mit einer Immersionsflüssigkeit, deren Temperatur so gewählt ist, daß durch die Immersionsflüssigkeit eine dem Projektionsobjektiv eigene sphärische Aberration kompensiert ist.

[0019] Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels anhand der Zeichnungen. Darin zeigen:

[0020] **Fig. 1** eine vereinfachte Darstellung einer mikrolithografischen Projektionsbelichtungsanlage in einem Längsschnitt;

[0021] **Fig. 2** einen vergrößerten Ausschnitt aus **Fig. 1**, in dem ein Strahlengang im Bereich einer Immersionsflüssigkeit angedeutet ist;

[0022] **Fig. 3** den Ausschnitt gemäß **Fig. 2**, jedoch nach Erhöhung der Temperatur der Immersionsflüssigkeit;

[0023] **Fig. 4** einen der **Fig. 2** entsprechenden vergrößerten Ausschnitt aus einer Projektionsbelichtungsanlage mit einer anderen Abbildungsoptik;

[0024] **Fig. 5** den Ausschnitt gemäß **Fig. 4**, jedoch nach Erhöhung der Temperatur der Immersionsflüssigkeit;

[0025] **Fig. 6** eine vereinfachte Darstellung einer anderen mikrolithografischen Projektionsbelichtungsanlage mit einer in der Bildebene angeordneten Sensoreinrichtung in einem Längsschnitt.

[0026] **Fig. 1** zeigt eine insgesamt mit **10** bezeichnete mikrolithografische Projektionsbelichtungsanlage in einem Längsschnitt. Die Projektionsbelichtungsanlage **10** weist eine Beleuchtungseinrichtung **12** zur Erzeugung eines Projektionslichtbündels **13** auf, die eine Projektionslichtquelle **14**, eine mit **16** angedeutete Beleuchtungsoptik und eine Blende **18** umfasst.

[0027] Die Projektionsbelichtungsanlage **10** hat ferner ein Projektionsobjektiv **20**, das ein in seiner Objektebene **22** angeordnetes Retikel **24** verkleinert auf eine lichtempfindliche Oberfläche **26** abbildet, die in einer Bildebene **28** des Projektionsobjektivs **20** angeordnet ist. Das Projektionsobjektiv **20** enthält eine Vielzahl optischer Komponenten, von denen in **Fig. 1** nur einige beispielhaft dargestellt und nicht näher bezeichnet sind.

[0028] Bei der lichtempfindlichen Oberfläche **26** kann es sich beispielsweise um einen Fotolack handeln, der auf einem Träger **30**, z. B. einem Siliziumwafer, aufgebracht ist. Der Träger **30** ist am Boden ei-

nes wannenartigen, nach oben offenen Behälters **32** befestigt, der durch eine mit **36** bezeichnete erste Verfahrenseinrichtung parallel zur Bildebene verfahrbar ist. Der Behälter **32** ist mit einer Immersionsflüssigkeit **38** soweit aufgefüllt, daß ein Zwischenraum **40** zwischen der lichtempfindlichen Oberfläche **26** und einer dieser Oberfläche **26** zugewandten Endfläche **42** des Projektionsobjektivs **20** vollständig mit der Immersionsflüssigkeit **38** gefüllt ist.

[0029] In dem Behälter **32** ist außerdem eine Temperatureinrichtung **44** vorgesehen, die als reine Heizeinrichtung, aber auch als kombinierte Heiz-/Kühleinrichtung ausgeführt sein kann. Außerdem ist an dem Behälter **32** ein Temperaturfühler **46** befestigt, der die Temperatur der Immersionsflüssigkeit **38** mit hoher Genauigkeit erfasst.

[0030] Die Temperatureinrichtung **44** und der Temperaturfühler **46** sind über die Verfahrensbewegung des Behälters **32** nicht behindernde Leitungen mit einem Temperaturregler **48** verbunden, der einen Schiebeshalter **50** zur Einstellung einer Führungstemperatur aufweist.

[0031] Das Retikel **24**, dessen Strukturen auf der lichtempfindlichen Oberfläche **26** abgebildet werden sollen, ist mit Hilfe einer zweiten Verfahrenseinrichtung **52** in der Objektebene **22** verfahrbar, so daß nach und nach sämtliche strukturierten Bereiche des Retikels **24** auf der lichtempfindlichen Oberfläche **26** abgebildet werden können.

[0032] Die Projektionsbelichtungsanlage **10** funktioniert auf folgende Weise:

Das von der Beleuchtungseinrichtung **12** erzeugte Projektionslichtbündel **13** durchtritt die Strukturen des Retikels **24** und gelangt von dort in das Projektionsobjektiv **20**. Durch dieses werden die Strukturen, die von dem Projektionslichtbündel **13** durchtreten werden, verkleinert auf der lichtempfindlichen Oberfläche **26** abgebildet. Um die gesamte Fläche des Retikels **24** auf der lichtempfindlichen Oberfläche **26** abzubilden, kann das Retikel **24** in einem "step and scan"-Vorgang beleuchtet werden. Dabei wird der Gesamtbereich des Retikels **24** scannend beleuchtet, indem das Retikel **24** mit Hilfe der zweiten Verfahrenseinrichtung **52** durch das von der Blende **18** begrenzte Projektionslichtbündel hindurch bewegt wird. Der Behälter **32** mit dem darin befestigten Träger **30** führt während dieser Scanbewegung eine (meist gegenläufige) Bewegung mit Hilfe der ersten Verfahrenseinrichtung **36** aus, dessen Verfahrensgeschwindigkeit gegenüber derjenigen des Retikels **24** um das Verkleinerungsverhältnis des Projektionsobjektivs **20** herabgesetzt ist.

[0033] Bei dieser Verfahrensbewegung des Behälters **32** wird die Endfläche **42** des Projektionsobjektivs **20** durch die vom Behälter **32** mitgeführte Immersionsflüssigkeit **38** bewegt, was zu einer Durchmischung der Immersionsflüssigkeit **38** führt. Eine solche Durchmischung ist insofern erwünscht, als sich die Immersionsflüssigkeit **38** aufgrund des durchtretenden Projektionslichts lokal erwärmen kann, so daß

der Temperaturfühler **46** ansonsten möglicherweise nicht mehr die tatsächlich in dem Zwischenraum **40** gegebene Temperatur erfassen würde. Falls die Durchmischung aufgrund der Verfahrensbewegung des Behälters **32** nicht ausreichen sollte, können selbstverständlich zusätzliche Mischeinrichtungen im Behälter **32** angeordnet sein. Ebenso ist es möglich, den Behälter **32** in einen Flüssigkeitskreislauf einzufügen, wie dies im Stand der Technik an sich bekannt ist. Die Temperiereinrichtung **44** sowie der Temperaturfühler **46** können dann neben einem ggfs. vorhandener Filter in diesen Temperaturkreislauf integriert sein.

[0034] Falls in einem Testvorgang bei der Justage des Projektionsobjektivs oder im späteren Betrieb durch Prüfung der hergestellten Wafer festgestellt wird, daß die Abbildungseigenschaft des Projektionsobjektivs **20** nicht einer gewünschten Soll-Abbildungseigenschaft entspricht, z. B. weil die Abbildung auf der lichtempfindlichen Oberfläche **26** durch sphärische Aberration verfälscht ist, so wird durch Betätigung des Schiebeschalters **50** die Führungstemperatur des Temperaturreglers **48** verändert und die Belichtung wiederholt. Durch Verändern der Temperatur der Immersionsflüssigkeit **38** verändert sich deren Brechungsindex. Die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Temperatur ist – zumindest in kleinen Temperaturintervallen – bei vielen Immersionsflüssigkeiten **38** annähernd linear, so daß sich auf recht einfache Weise in einem rekursiven Prozess eine Temperatur für die Immersionsflüssigkeit **38** ermitteln läßt, bei der eine oder mehrere Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs **20** verbessert sind. Die weitere Belichtung lichtempfindlicher Oberflächen **26** erfolgt dann bei dieser zuletzt eingestellten Temperatur der Immersionsflüssigkeit **38**.

[0035] Der Einfluss des Brechungsindex der Immersionsflüssigkeit **38** auf die Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs **20** wird im folgenden anhand der Fig. 2 bis 5 näher erläutert.

[0036] Fig. 2 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus Fig. 1, in dem im Bereich des Zwischenraums **40** zwischen der Endfläche **42** des Projektionsobjektivs **20** und der lichtempfindlichen Oberfläche **26** ein Strahlengang angedeutet ist. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist in die Endfläche **42** des Projektionsobjektivs **20** eine plan-konvexe Abschlußlinse **52** bündig abschließend eingelassen, die die letzte optische Komponente der mit **54** lediglich angedeuteten Projektionsoptik des Projektionsobjektivs **20** darstellt. In Fig. 2 sind zu Illustrationszwecken mehrere Projektionslichtstrahlen **56**, **58**, **60** eingezeichnet, die von den vorgelagerten optischen Komponenten der Projektionsoptik **54** auf die Abschlußlinse **52** geworfen werden. Die Darstellung ist stark schematisiert und nicht maßstäblich, um den Einfluß der Temperatur auf die Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs **20** besser erläutern zu können.

[0037] Das in Fig. 2 gezeigte Projektionsobjektiv **20** erzeugt eine durch sphärische Aberration verfälschte

Abbildung. Dies bedeutet, daß sich die Brennweiten der achsennahen Projektionslichtstrahlen **56** und der achsenferneren Projektionslichtbündel **58** und **60** jeweils voneinander unterscheiden. In Fig. 2 liegt nur die Brennebene der achsennahen Projektionslichtstrahlen **56** in der Ebene der lichtempfindlichen Oberfläche **26**, während die Brennebenen der achsenferneren Projektionslichtstrahlen **58** und **60** in dem Zwischenraum **40** liegen. Der Abstand der Brennebenen von der lichtempfindlichen Oberfläche **26** nimmt dabei zu, je weiter entfernt von der mit **62** bezeichneten optischen Achse die Abschlußlinse **52** von den Projektionslichtstrahlen **56**, **58**, **60** durchtreten wird.

[0038] Fig. 3 zeigt den Ausschnitt aus Fig. 2, nachdem die Temperatur der Immersionsflüssigkeit **38** erhöht wurde. Die Immersionsflüssigkeit **38** weist nun einen höheren Brechungsindex auf als in dem in Fig. 2 gezeigten Zustand.

[0039] Dies führt dazu, daß an der Grenzfläche zwischen der Abschlußlinse **52** und der Immersionsflüssigkeit **38** die Projektionslichtstrahlen **56**, **58**, **60** stärker gebrochen werden. Diese stärkere Brechung wirkt sich umso mehr aus, je weiter die Projektionslichtstrahlen von der optischen Achse **62** entfernt sind, da die achsenferneren Projektionslichtstrahlen diese Grenzfläche unter einem größeren Winkel durchtreten. Dies führt dazu, daß sich die Brennweite des Projektionsobjektivs **20** für die achsenferneren Strahlen verlängert, so daß im Idealfall bei entsprechender gewählter Temperatur die Brennebenen aller Projektionslichtstrahlen **56**, **58**, **60** mit der Ebene der lichtempfindlichen Oberfläche **26** angeordnet ist.

[0040] Durch Veränderung der Temperatur der Immersionsflüssigkeit **38** ist es somit möglich, eine dem Projektionsobjektiv **20** immanente sphärische Aberration nachträglich zu kompensieren.

[0041] Fig. 4 zeigt einen der Fig. 2 entsprechenden vergrößerten Ausschnitt einer Projektionsbelichtungsanlage mit einem anderen Projektionsobjektiv **120**. Dabei sind gegenüber

[0042] Fig. 2 veränderte Teile mit um 100 erhöhte Bezugsziffern bezeichnet. Die Projektionsoptik **154** des Projektionsobjektivs **120** weist, anders als die in den Fig. 2 und 3 gezeigte Projektionsoptik **54**, keine immanente sphärische Aberration auf. Die Projektionslichtstrahlen **156**, **158**, **160** treffen sich daher in einem Brennpunkt. Wie in Fig. 4 zu erkennen ist, liegt dieser Brennpunkt jedoch nicht in der Ebene der lichtempfindlichen Oberfläche **26**, d. h. das Projektionsobjektiv **120** weist einen Fokusfehler auf. Ein solcher Fokusfehler könnte beispielsweise behoben werden, indem der Träger **30** mit der lichtempfindlichen Oberfläche **26** geringfügig mit Hilfe einer geeigneten Verfahrenrichtung in Richtung der optischen Achse **62** verfahren wird. Die hierfür erforderliche Genauigkeit ist allerdings mit Hilfe mechanischer Vorrichtungen nur mit großem technischen Aufwand realisierbar.

[0043] Wie Fig. 5 zeigt, kann durch eine Erhöhung

der Temperatur der Immersionsflüssigkeit **38** ebenfalls eine Vergrößerung der Brennweite des Projektionsobjektivs **120** erzielt werden. Zwar wird dadurch eine sphärische Aberration eingeführt, die in **Fig. 5** nicht dargestellt ist. Die Auswirkungen einer solchen sphärischen Aberration können aber so gering sein, daß sie angesichts der Optimierung der Brennweite des Projektionsobjektivs vernachlässigbar oder aber durch andere Maßnahmen kompensierbar sind.

[0044] **Fig. 6** zeigt ausschnittsweise ein weiteres Ausführungsbeispiel einer insgesamt mit **210** bezeichneten Projektionsbelichtungsanlage in einer an die **Fig. 1** angelehnten Darstellung. Auch hier sind gegenüber **Fig. 1** veränderte Teile mit um **200** erhöhten Bezugsziffern versehen.

[0045] **Fig. 6** zeigt die Projektionsbelichtungsanlage **210** in einem Einstellmodus, bei dem der Träger **30** gegen eine Sensoreinrichtung **64** ausgetauscht ist. Bei der Sensoreinrichtung **64** kann es sich beispielsweise um einen an sich bekannten CCD-Sensor handeln. In dem Einstellmodus ist eine lichtempfindliche Oberfläche **66** der Sensoreinrichtung **64** in der Bildebene **28** des Projektionsobjektivs **20** angeordnet. Auf diese Weise wird von der Sensoreinrichtung **64** genau dasjenige Bild erfasst, dem während des normalen Projektionsmodus die zu belichtende lichtempfindliche Oberfläche **26** ausgesetzt ist. Die Projektion erfolgt dabei mit einem besonderen Testretikel **70**, das anstelle des normalen Retikels **24** in der Objektebene **22** des Projektionsobjektivs **20** angeordnet ist.

[0046] Anstelle des CCD-Sensors kann auch in an sich bekannter Weise ein Interferometer als Sensoreinrichtung eingesetzt werden. Damit lassen sich Wellenfronten in Pupillenebenen erfassen. Im einzelnen ist dies in der oben bereits erwähnten WO 01/63233 A1 erläutert.

[0047] Im Unterschied zur Projektionsbelichtungsanlage **10** aus **Fig. 1** weist die Projektionsbelichtungsanlage **210** zusätzlich eine Recheneinheit **68** auf, die mit einem Temperaturregler **248** für die Temperiereinrichtung **44** verbunden ist. Im Einstellmodus funktioniert die Projektionsbelichtungsanlage **210** wie folgt:

Zunächst werden die auf dem Testretikel **70** enthaltenen Strukturen von dem Projektionsobjektiv **20** auf der lichtempfindlichen Oberfläche **66** der Sensoreinrichtung **64** abgebildet. Dieses Abbild wird von der Sensoreinrichtung **64** erfasst und in digitaler Form der Recheneinheit **68** übermittelt. Diese bestimmt aus den erhaltenen Daten eine Führungstemperatur, die an den Temperaturregler **248** weitergegeben wird. Der Temperaturregler **248** stellt nun sicher, daß die Immersionsflüssigkeit **38** auf diese neue Führungstemperatur gebracht wird. Die Sensoreinrichtung **64** erfasst das durch die Temperaturänderung veränderte Abbild der Strukturen des Testretikels **70** und führt auch diese Daten der Recheneinheit **68** zu. Mit Hilfe an sich bekannter Algorithmen stellt die Recheneinheit **68** fest, ob sich durch die Temperaturän-

derung eine Verbesserung oder Verschlechterung der Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs **120** ergeben haben. In Abhängigkeit von diesem Ergebnis wird die Führungstemperatur erneut verändert. Dieser rekursive Vorgang wird so lange fortgesetzt, bis sich keine Verbesserung der Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs durch eine Temperaturveränderung mehr erzielen läßt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Verbesserung einer optischen Abbildungseigenschaft eines Projektionsobjektivs (**20; 120**) das Teil einer mikrolithografischen Projektionsbelichtungsanlage (**10; 210**) ist, mit der sich ein in einer Objektebene (**22**) des Projektionsobjektivs (**20; 120**) angeordnetes Retikel (**24**) durch das Projektionsobjektiv (**20; 120**) hindurch auf eine in einer Bildebene (**28**) des Projektionsobjektivs angeordnete lichtempfindliche Oberfläche (**26; 66**) abbilden läßt, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:

- Einbringen einer Immersionsflüssigkeit (**38**) in einen Zwischenraum (**40**) zwischen der lichtempfindlichen Oberfläche (**26; 66**) und einer dieser Oberfläche (**26; 66**) zugewandten Endfläche (**42**) des Projektionsobjektivs (**20; 120**);
- Ermitteln einer Abbildungseigenschaft des Projektionsobjektivs (**20; 120**);
- Vergleichen der ermittelten Abbildungseigenschaft mit einer Soll-Abbildungseigenschaft;
- Verändern der Temperatur der Immersionsflüssigkeit (**38**) so lange, bis die ermittelte Abbildungseigenschaft der Soll-Abbildungseigenschaft möglichst nahe kommt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Abbildungseigenschaft ermittelt wird, indem ein Testretikel (**70**) durch das Projektionsobjektiv (**20**) und die Immersionsflüssigkeit (**38**) hindurch auf ein in der Bildebene (**28**) angeordnetes lichtempfindliches Element (**64**) abgebildet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das lichtempfindliche Element eine Sensoreinrichtung (**64**), insbesondere ein CCD-Sensor, ist.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Abbildungseigenschaft unter Verwendung eines Interferometers ermittelt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die optische Abbildungseigenschaft die Größe einer durch das Projektionsobjektiv (**20**) verursachten sphärischen Aberration ist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die optische Abbildungseigenschaft die Brennweite des Projektionsobj-

ektiv (120) ist.

7. Mikrolithografische Projektionsbelichtungsanlage zur Abbildung eines in einer Objektebene (22) eines Projektionsobjektivs (20) angeordneten Retikels (24) durch das Projektionsobjektiv (20) hindurch auf eine in einer Bildebene (28) des Projektionsobjektivs (20) angeordnete lichtempfindliche Oberfläche (26), mit Mitteln (32) zum Einbringen einer Immersionsflüssigkeit (38) in einen Zwischenraum (40) zwischen der lichtempfindlichen Oberfläche (26) und einer dieser Oberfläche (26) zugewandten Endfläche (42) des Projektionsobjektivs (20), gekennzeichnet durch eine in der Bildebene (28) anordenbare Sensoreinrichtung (64), insbesondere einen CCD-Sensor, eine Temperaturregelungseinrichtung (248) zur Einstellung einer Soll-Temperatur der Immersionsflüssigkeit (38), und einer mit der Sensoreinrichtung (64) und der Temperaturregelungseinrichtung (248) verbundenen Recheneinheit (68), mit der aus von der Sensoreinrichtung (64) erzeugten Signalen die Soll-Temperatur der Immersionsflüssigkeit (238) bestimmbar ist.

8. Mikrolithografische Projektionsbelichtungsanlage zur Abbildung eines in einer Objektebene (22) angeordneten Retikels (24) durch ein Projektionsobjektiv (20; 120) hindurch auf eine in einer Bildebene (28) angeordnete lichtempfindliche Oberfläche (26), mit einer in einen Zwischenraum (40) zwischen der lichtempfindlichen Oberfläche (26; 126) und einer dieser Oberfläche (26) zugewandten Endfläche (42) des Projektionsobjektivs (20; 120) eingebrachten Immersionsflüssigkeit (38), dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur der Immersionsflüssigkeit (38) so gewählt ist, daß durch die Immersionsflüssigkeit (38) eine dem Projektionsobjektiv (20; 120) eigene sphärische Aberration kompensiert ist.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

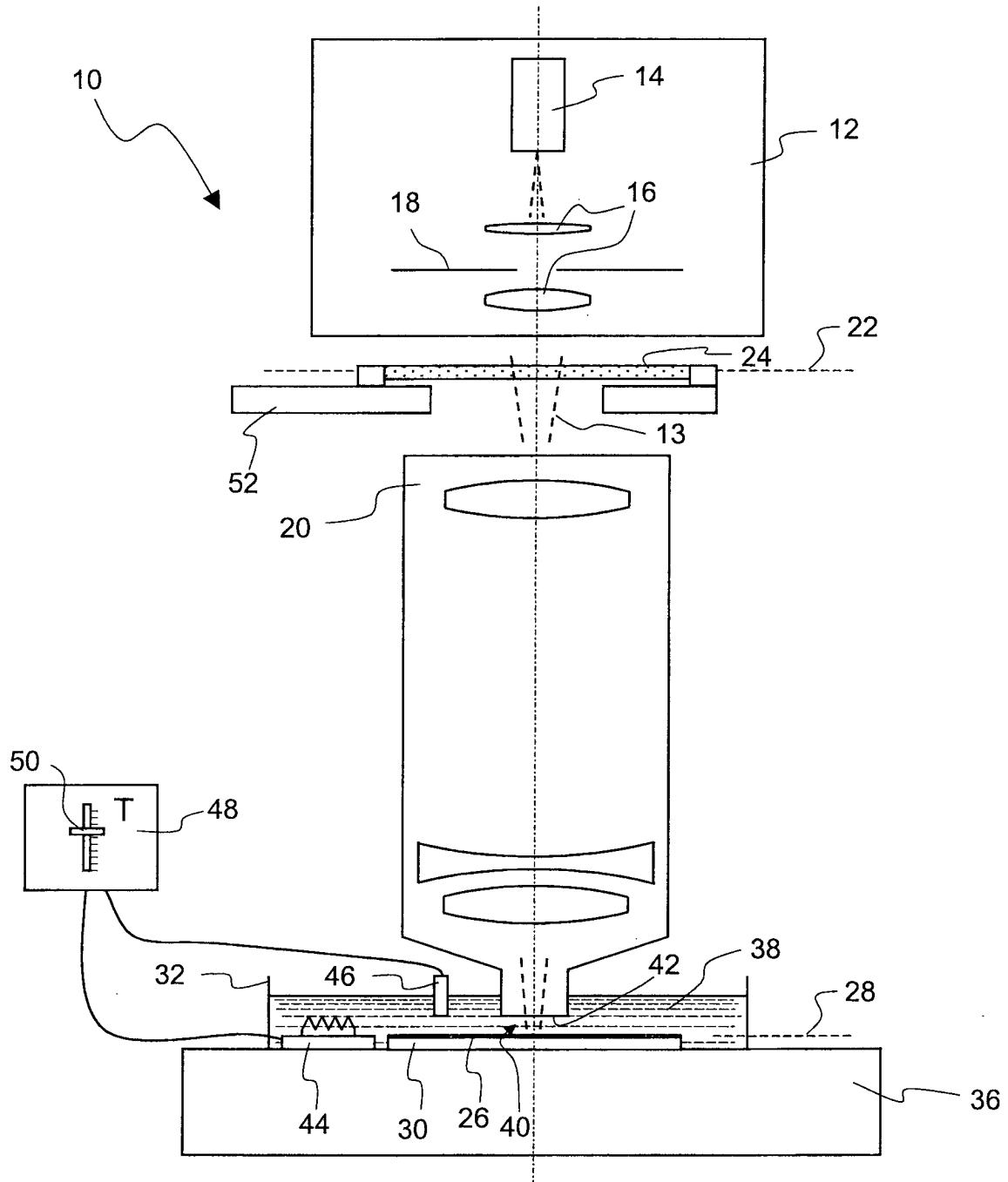


Fig. 1

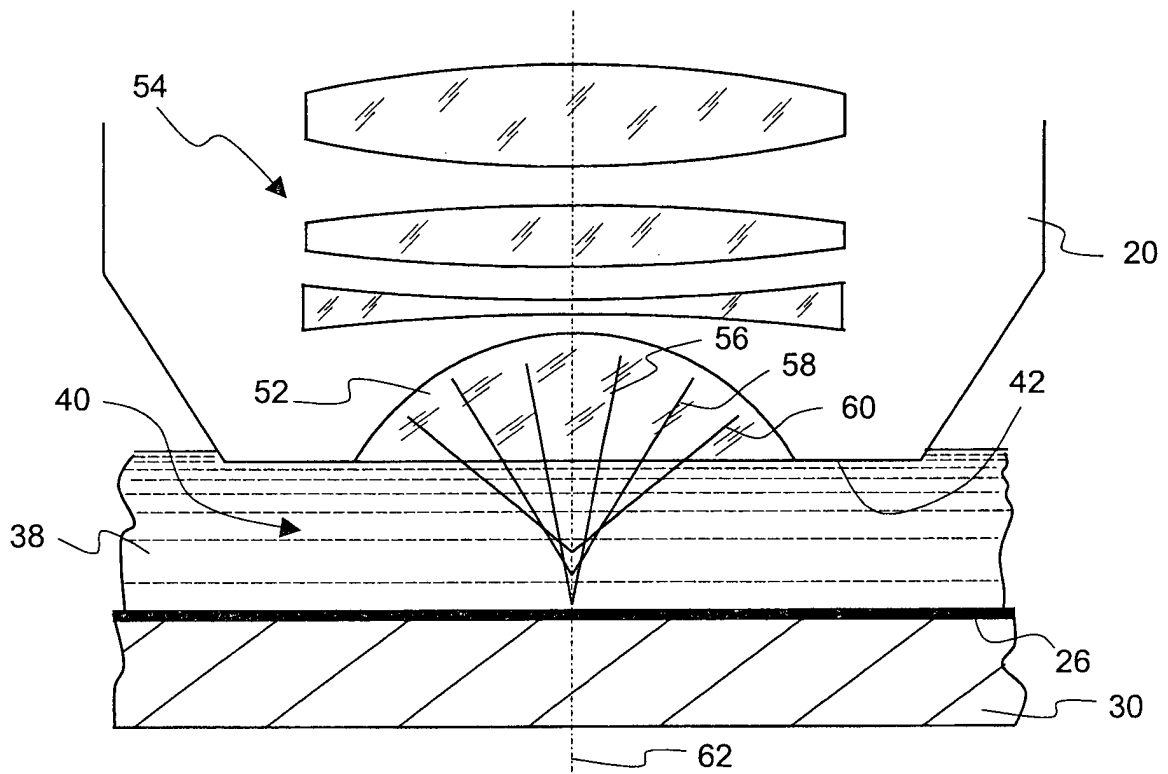


Fig. 2

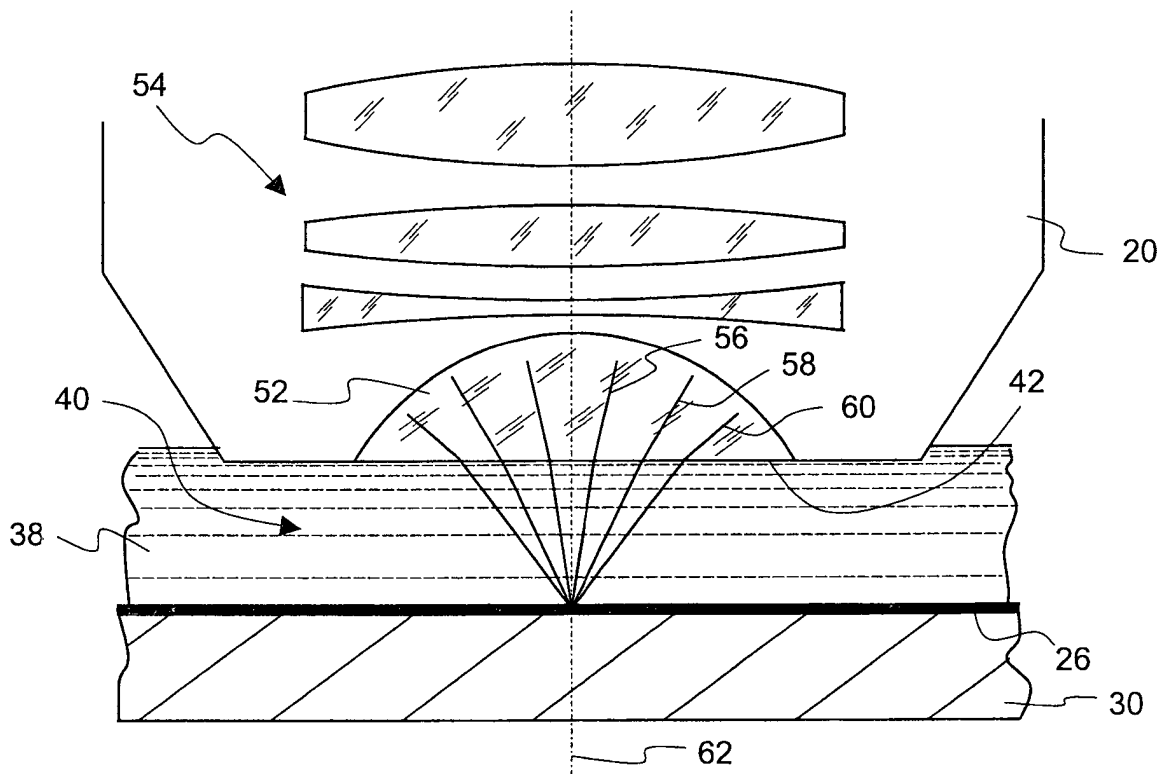


Fig. 3

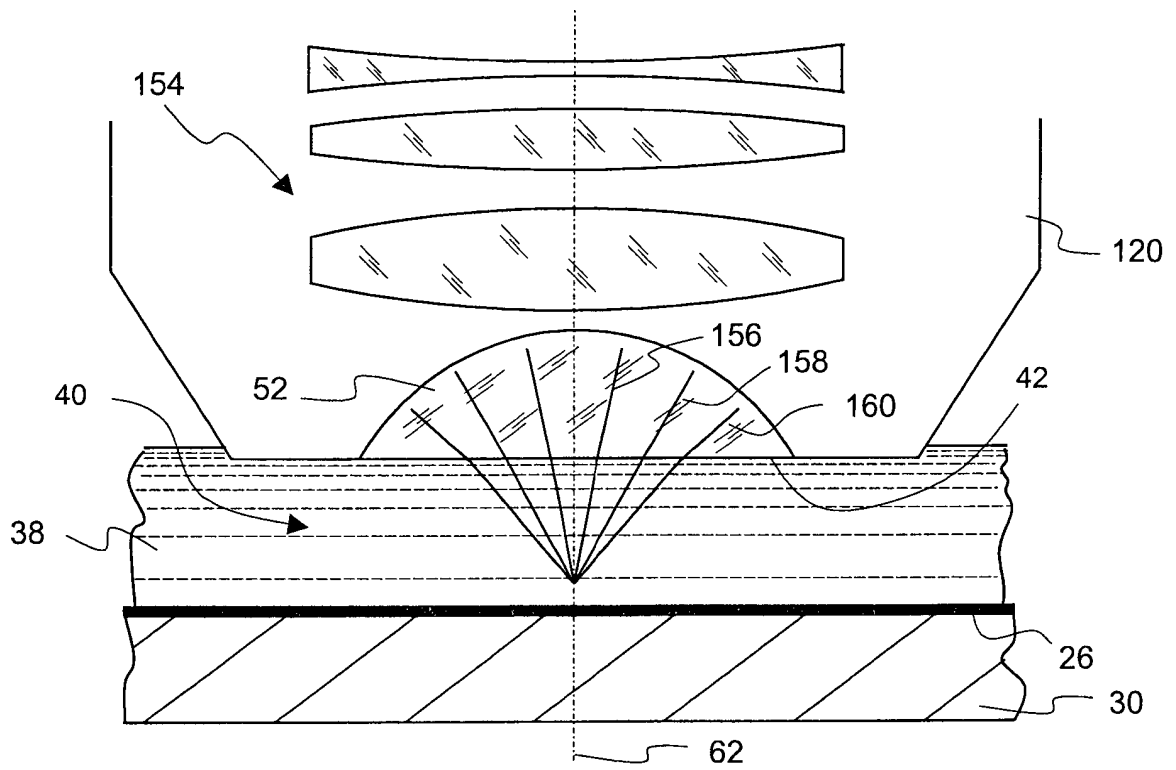


Fig. 4

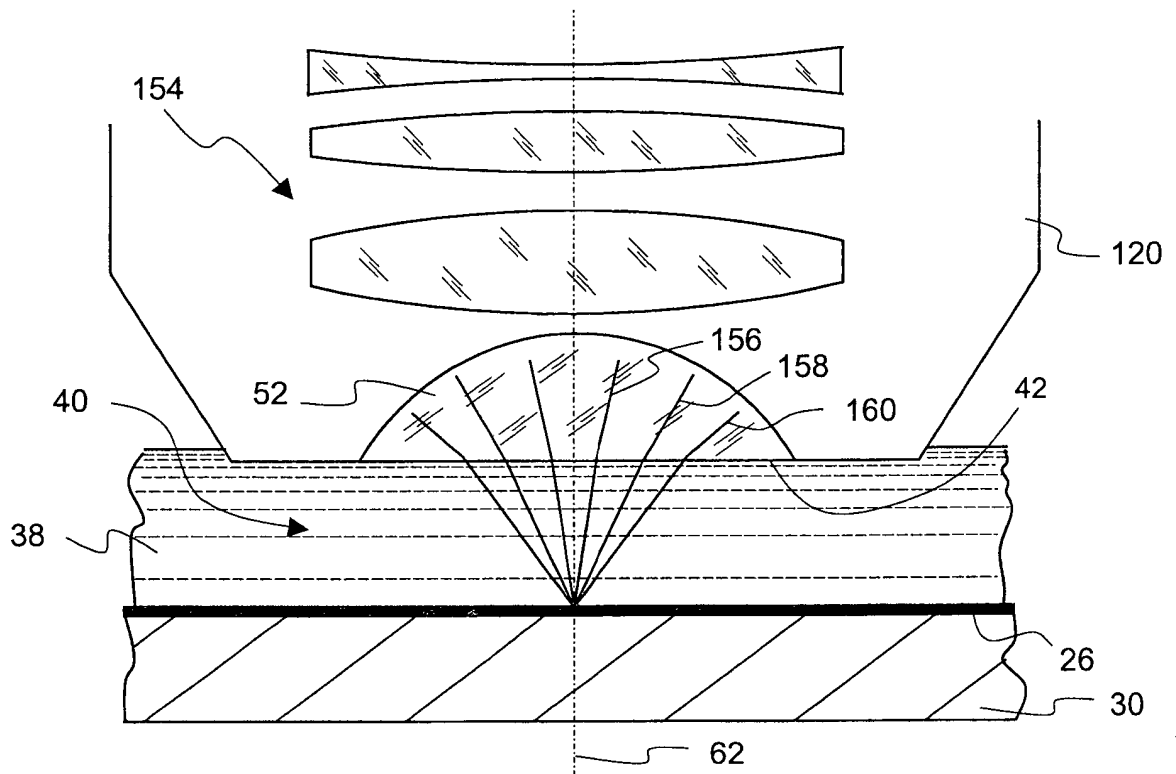


Fig. 5

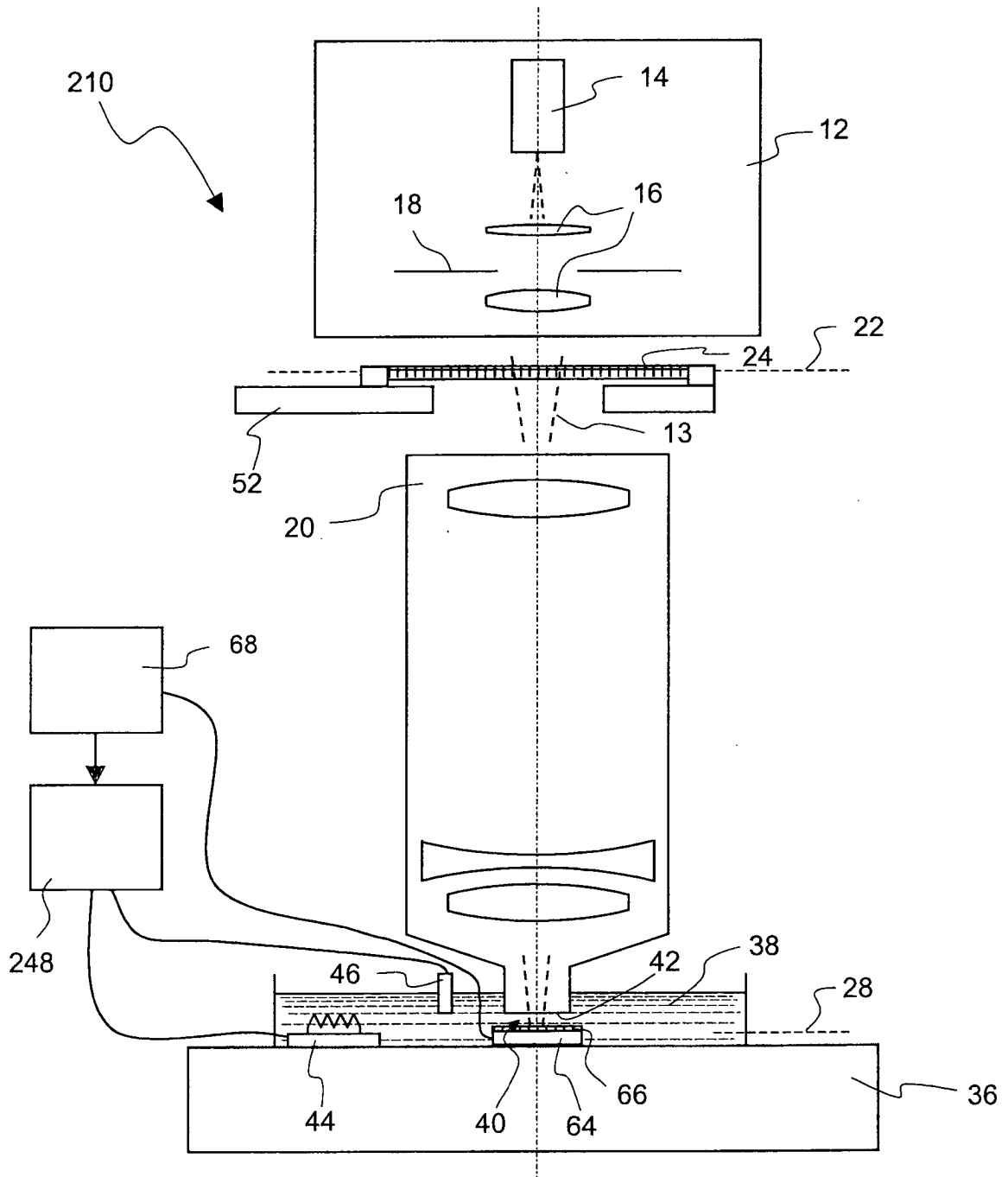


Fig. 6