



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2008 033 342 A1 2010.01.21

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2008 033 342.5

(22) Anmeldetag: 16.07.2008

(43) Offenlegungstag: 21.01.2010

(51) Int Cl.⁸: G02B 17/06 (2006.01)

G02B 13/14 (2006.01)

G03F 7/20 (2006.01)

(71) Anmelder:

Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen, DE

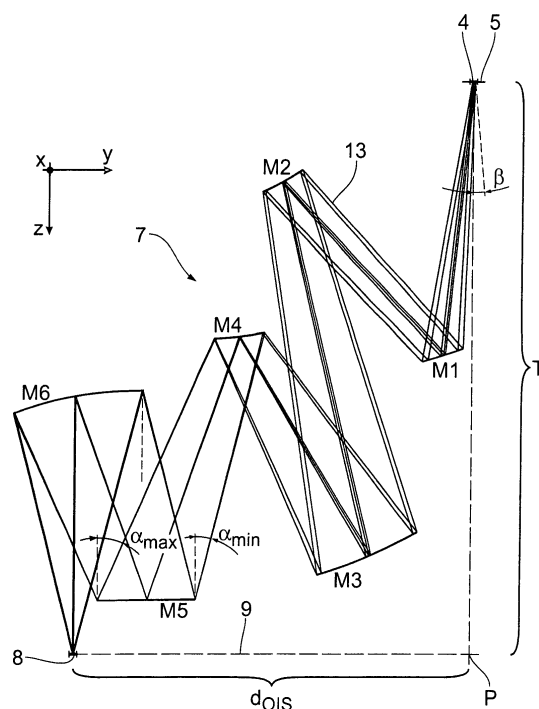
(72) Erfinder:

Zellner, Johannes, 73430 Aalen, DE; Mann,
Hans-Jürgen, 73447 Oberkochen, DE; Endres,
Martin, 89551 Königsbrunn, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie

(57) Zusammenfassung: Ein Projektionsobjektiv (7) für die Mikrolithographie dient zur Abbildung eines Objektfeldes (4) in einer Objektebene (5) in ein Bildfeld (8) in einer Bildebene (9). Das Projektionsobjektiv (7) hat mindestens sechs Spiegel (M1 bis M6), von denen mindestens ein Spiegel eine Freiform-Reflexionsfläche hat. Bei einem Aspekt der Erfindung ist das Verhältnis aus einer Baulänge (T) des Projektionsobjektivs (7) und einem Objekt-Bild-Versatz (d_{OIS}) kleiner als 12. Die Bildebene (9) stellt bei einem weiteren Aspekt der Erfindung die erste Feldebene des Projektionsobjektivs (7) nach der Objektebene (5) dar. Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung hat das Projektionsobjektiv eine Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M6), wobei das Verhältnis aus einer Baulänge (T) und einem Objekt-Bild-Versatz (d_{OIS}) kleiner ist als 2.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie. Ferner betrifft die Erfindung eine Projektionsbelichtungsanlage mit einem derartigen Projektionsobjektiv, ein Verfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Bauteils mit einer derartigen Projektionsbelichtungsanlage und ein mit diesem Verfahren hergestelltes mikrostrukturiertes Bauelement.

[0002] Projektionsobjektive für die Mikrolithographie sind unter anderem bekannt aus der US 6 266 389 B1, der US 2005/0134980 A1, der US 2007/0195317 A1, der US 2007/0058269 A1, der US 2007/0223112 A, der US 6 396 067 B1, der US 6 361 176 B1 und der US 6 666 560 B2.

[0003] Hinsichtlich ihrer Gesamttransmission, hinsichtlich einer unerwünschten Apodisierung sowie hinsichtlich ihrer Bauraumerfordernisse haben die bekannten Projektionsobjektive, insbesondere dann, wenn sie mit EUV-Beleuchtungslicht beaufschlagt werden, noch Verbesserungsbedarf.

[0004] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Projektionsobjektiv der eingangs genannten Art derart weiterzubilden, dass dessen Gesamttransmission verbessert ist und dass negative Apodisierungseinflüsse vermieden oder reduziert sind. Alternativ oder zusätzlich soll das Projektionsobjektiv möglichst kompakt ausgeführt sein.

[0005] Diese Aufgabe ist erfindungsgemäß gelöst durch ein Projektionsobjektiv mit den im Anspruch 1 angegebenen Merkmalen, durch ein Projektionsobjektiv mit den im Anspruch 2 angegebenen Merkmalen, durch ein Projektionsobjektiv mit den im Anspruch 5 angegebenen Merkmalen sowie durch ein Projektionsobjektiv mit den im Anspruch 10 angegebenen Merkmalen.

[0006] Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung ist das Projektionsobjektiv mit mindestens sechs Spiegeln ausgeführt, wobei mindestens einer der Spiegel als Freiformfläche gestaltet ist und wobei das Verhältnis der Baulänge des Projektionsobjektivs und dem Objekt-Bild-Versatz des Projektionsobjektivs kleiner ist als 12. Ein derartiges Projektionsobjektiv kann zwischen der Objektebene und der Bildebene noch eine Zwischenbildebene aufweisen. Hierdurch ist es möglich, gegebene Abbildungsanforderungen zu erfüllen und gleichzeitig die Ausdehnungen der einzelnen Spiegel, also deren absolute Reflexionsfläche, gering zu halten. Bei einer Ausführung mit einer Zwischenbildebene lassen sich zudem relativ geringe Krümmungsradien der eingesetzten Spiegel realisieren. Es lassen sich zudem Objektivdesigns angeben, bei denen ein relativ großer Arbeitsabstand zwischen den beaufschlagten Reflexionsflächen und den an den Spiegeln vorbeigehenden Abbildungsstrahlen eingehalten werden kann. Der Objekt-Bild-Versatz kann absolut einen Wert haben, der größer ist als 120 mm, der bevorzugt größer ist als 150 mm und noch mehr bevorzugt größer ist als 200 mm.

[0007] Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung hat das Projektionsobjektiv mindestens sechs Spiegel, von denen mindestens ein Spiegel eine Freiform-Reflexionsfläche aufweist. Die Bildebene dieses Projektionsobjektivs stellt die erste Feldebene des Projektionsobjektivs nach der Objektebene dar. Wenn demgemäß auf eine Zwischenbildebene zwischen der Objektebene und der Bildebene des Projektionsobjektivs verzichtet wird, kann ein Einfallswinkelspektrum, das heißt eine Differenz zwischen einem größten und einem kleinsten Einfallswinkel für Abbildungsstrahlen auf jeweils einem der Spiegel, klein gehalten werden. Dies reduziert die Anforderungen für eine Reflexionsbeschichtung auf den Spiegeln. Die Reflexionsbeschichtung kann dann entweder auf eine möglichst hohe Spitzenreflexion oder auf eine möglichst gute Gleichmäßigkeit der Reflexion über die Spiegelfläche optimiert werden, wobei in der Praxis keine Rücksicht auf zu stark variierende Einfallswinkel auf einem der Spiegel genommen werden muss. Insgesamt resultiert ein Projektionsobjektiv mit guter Gesamttransmission, wobei der unerwünschte Einfluss einer Apodisierung vermieden oder verringert werden kann. Die Ausführung mindestens eines Spiegels als Freiform-Reflexionsfläche ermöglicht, dass auch ohne eine Zwischenbildebene das erfindungsgemäße Projektionsobjektiv geringe Bildfehler aufweist. Die mindestens sechs Spiegel des Projektionsobjektivs ermöglichen eine gute Bildfehlerkorrektur. Bei dem erfindungsgemäßen Projektionsobjektiv kann es sich um ein Spiegel-Projektionsobjektiv handeln, also um ein Projektionsobjektiv, bei dem alle Komponenten, die Abbildungsstrahlen führen, als reflektive Komponenten ausgeführt sind.

[0008] Ein Projektionsobjektiv nach Anspruch 3 ist bei guter Trennung zwischen dem Objektfeld und dem Bildfeld kompakt. Das Verhältnis aus der Baulänge und dem Objekt-Bild-Versatz ist bevorzugt kleiner als 2, mehr bevorzugt kleiner als 1,5 und noch mehr bevorzugt kleiner als 1,1.

[0009] Eine Freiform-Reflexionsfläche nach Anspruch 4 ermöglicht eine gute Bildfehlerminimierung für das

Projektionsobjektiv. Auch andere Typen von Freiformflächen sind möglich. Derartige Freiformflächen sind nicht durch eine Funktion beschreibbar, die um eine ausgezeichnete Achse, die eine Normale zu einem Flächenabschnitt der Spiegelfläche darstellt, rotationssymmetrisch ist. Derartige Freiformflächen sind insbesondere nicht durch eine Kegelschnitt-Asphärengleichung beschreibbar und erfordern zur Beschreibung der Spiegelfläche mindestens zwei voneinander unabhängige Parameter. Hinsichtlich der Charakterisierung einer Spiegelfläche als Freiformfläche kommt es auf die Form einer Berandung der optisch wirksamen Spiegelfläche nicht an. Natürlich sind aus dem Stand der Technik optisch wirksame Flächen bekannt, die nicht rotationssymmetrisch berandet sind. Derartige optisch wirksame Flächen sind trotzdem durch eine rotationssymmetrische Funktion beschreibbar, wobei ein nicht rotationssymmetrisch berandeter Ausschnitt dieser optischen Fläche zum Einsatz kommt.

[0010] Das Projektionsobjektiv nach Anspruch 5 ist bei guter räumlicher Trennung zwischen dem Objektfeld und dem Bildfeld kompakt. Das Verhältnis zwischen der Baulänge und dem Objekt-Bild-Versatz ist bevorzugt kleiner als 1,5 und mehr bevorzugt kleiner als 1,1. Auch das Projektionsobjektiv nach Anspruch 4 kann als Spiegel-Projektionsobjektiv ausgeführt sein.

[0011] Die Vorteile der Ansprüche 6 bis 9 entsprechen denen, die vorstehend unter Bezugnahme auf die erfindungsgemäßen Projektionsobjektive bereits ausgeführt wurden.

[0012] Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung hat das Projektionsobjektiv eine Mehrzahl von Spiegeln, von denen mindestens ein Spiegel eine Freiform-Reflexionsfläche aufweist, und mindestens eine Zwischenbildebene zwischen der Objektebene und der Bildebene, wobei das Verhältnis aus einer Baulänge des Projektionsobjektivs und einem Objekt-Bild-Versatz kleiner ist als 12. Durch den Einsatz der mindestens einen Freiform-Reflexionsfläche ist es auch bei einem Projektionsobjektiv mit einer Zwischenbildebene möglich, einen deutlichen Objekt-Bild-Versatz herbeizuführen. Dies kann insbesondere dazu genutzt werden, das Beleuchtungslicht an weiteren Komponenten einer Projektionsbelichtungsanlage, innerhalb der die Projektionsoptik eingesetzt ist, vorbeizuführen, ohne hierbei bei den Einfallswinkeln auf den Spiegeln der Projektionsoptik Kompromisse eingehen zu müssen. Insbesondere können für praktisch alle Reflexionen des Beleuchtungslichts kleine Einfallswinkel oder aber sehr große Einfallswinkel (grazing incidence) realisiert werden. Die Zwischenbildebene des Projektionsobjektivs gemäß diesem Aspekt der Erfindung ermöglicht eine Bündelführung des Abbildungslichts zwischen der Objektebene und der Bildebene mit typischen Bündeldimensionen oder Bündeldurchmessern, die bis auf die Bündelführung im Bereich eines letzten und die numerische Apertur des Projektionsobjektivs definierenden Spiegels vergleichsweise klein sind. Dies erleichtert eine Vignettierungskontrolle bei einer Projektionsbelichtung mit der Projektionsoptik. Zudem hat eine Projektionsoptik mit mindestens einer Zwischenbildebene mindestens zwei Pupillenebenen, von denen eine zwischen der Objektebene und der mindestens einen Zwischenbildebene und die andere zwischen der mindestens einen Zwischenbildebene und der Bildebene angeordnet ist. Dies vergrößert die Möglichkeiten einer Kontrolle von Beleuchtungsparametern durch Bündelbeeinflussung in den oder benachbart zu den Pupillenebenen.

[0013] Die Vorteile der Ansprüche 11 und 12 entsprechen denen, die vorstehend unter Bezugnahme auf die erfindungsgemäßen Projektionsobjektive gemäß den anderen Aspekten bereits ausgeführt wurden.

[0014] Ein Strahlengangverlauf des dem zentralen Objektfeldpunkt zugeordneten Hauptstrahls nach Anspruch 13 ermöglicht einen großen Objekt-Bild-Versatz mit kleinen bis moderaten Einfallswinkeln auf den Spiegeln der Projektionsoptik. Bei einem derartigen Hauptstrahlverlauf gibt es keinen Bereich des Strahlengangs des Hauptstrahls, bei dem der Hauptstrahl wieder in Richtung auf die Normale zugeführt wird, was zur Erreichung eines großen Objekt-Bild-Versatzes kontraproduktiv wäre.

[0015] Absolutwerte des Objekt-Bild-Versatzes nach Anspruch 14 haben sich für eine räumliche Trennung eines Beleuchtungslicht-Strahlengangs vor dem Objektfeld der Projektionsoptik vom Abbildungsstrahlengang innerhalb der Projektionsoptik als vorteilhaft herausgestellt.

[0016] Ein Verhältnis aus einem Einfallswinkelspektrum und einer bildseitigen numerischen Apertur nach Anspruch 15 führt zu vorteilhaft niedrigen Anforderungen an Reflexionsbeschichtungen für die Spiegel. Bevorzugt beträgt das Einfallswinkelspektrum maximal 15° , mehr bevorzugt maximal 13° , mehr bevorzugt maximal 12° und noch mehr bevorzugt maximal 10° . Entsprechend beträgt das Verhältnis zwischen dem Einfallswinkelspektrum und der bildseitigen numerischen Apertur des Projektionsobjektivs bevorzugt maximal 60° , mehr bevorzugt maximal 52° , noch mehr bevorzugt maximal 48° und noch mehr bevorzugt maximal 40° . Hierbei kann eine bildseitige numerische Apertur von 0,25 vorhanden sein. Auch eine andere bildseitige numerische Apertur im Bereich zwischen 0,25 und beispielsweise 0,9, also eine bildseitige numerische Apertur von beispielsweise

0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8 oder 0,9 kann vorliegen, wobei sich dann entsprechend andere Verhältnisse zwischen dem Einfallswinkelspektrum und der bildseitigen numerischen Apertur des Projektionsobjektivs ergeben.

[0017] Eine numerische Apertur ($NA = n \sin \alpha$, mit n : Brechungsindex, z. B. von Spülgas, α : halber bildseitiger Öffnungswinkel des Objektivs) nach Anspruch 16 erlaubt eine gute Ortsauflösung des Projektionsobjektivs. Die Differenz zwischen einem größten und einem kleinsten Einfallswinkel von Abbildungsstrahlen auf einem der Spiegel des Projektionsobjektivs ist bevorzugt maximal $0,9 \arcsin(NA)$, mehr bevorzugt maximal $0,8 \arcsin(NA)$ und noch mehr bevorzugt maximal $0,7 \arcsin(NA)$.

[0018] Eine Feldgröße nach Anspruch 17 ermöglicht einen guten Durchsatz beim Betrieb einer Projektionsbelichtungsanlage mit einem derartigen Projektionsobjektiv.

[0019] Ein Einfallswinkel nach Anspruch 18 ermöglicht den Einsatz einer Reflexionsmaske, auf der sich die mit dem Projektionsobjektiv abzubildende Struktur befindet. Der Einfallswinkel beträgt insbesondere 6° .

[0020] Die Vorteile einer Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 19, eines Herstellungsverfahrens nach Anspruch 20 sowie eines mikrostrukturierten Bauteils nach Anspruch 21 entsprechen denjenigen, die vorstehend unter Bezugnahme auf das Projektionsobjektiv nach den Ansprüchen 1 bis 19 bereits erläutert wurden.

[0021] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnung näher erläutert. In dieser zeigen:

[0022] [Fig. 1](#) schematisch eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie;

[0023] [Fig. 2](#) einen beispielhaften Abbildungsstrahlengang beinhaltenen Meridionalschnitt durch eine Ausführung einer Projektionsoptik der Projektionsbelichtungsanlage nach [Fig. 1](#);

[0024] [Fig. 3](#) eine zu [Fig. 2](#) ähnliche Darstellung einer weiteren Ausführung einer Projektionsoptik;

[0025] [Fig. 4](#) eine zu [Fig. 2](#) ähnliche Darstellung einer weiteren Ausführung einer Projektionsoptik;

[0026] [Fig. 5](#) eine zu [Fig. 2](#) ähnliche Darstellung einer weiteren Ausführung einer Projektionsoptik; und

[0027] [Fig. 6](#) schematisch eine Projektionsbelichtungsanlage mit der Projektionsoptik nach [Fig. 5](#).

[0028] Eine Projektionsbelichtungsanlage **1** für die Mikrolithographie hat eine Lichtquelle **2** für Beleuchtungslicht **3**. Bei der Lichtquelle **2** handelt es sich um eine EUV-Lichtquelle, die Licht in einem Wellenlängenbereich zwischen 5 nm und 30 nm erzeugt. Auch andere EUV-Wellenlängen sind möglich. Alternativ kann die Projektionsbelichtungsanlage **1** auch beispielsweise mit Beleuchtungslicht **3** mit sichtbaren Wellenlängen, UV-Wellenlängen, DUV-Wellenlängen oder VUV-Wellenlängen eingesetzt werden. Ein Strahlengang des Beleuchtungslichts **3** ist in der [Fig. 1](#) äußerst schematisch dargestellt.

[0029] Zur Führung des Beleuchtungslichts **3** hin zu einem Objektfeld **4** in einer Objektebene **5** dient eine Beleuchtungsoptik **6**. Mit einer Projektionsoptik **7** in Form eines Projektionsobjektivs wird das Objektfeld **4** in ein Bildfeld **8** in einer Bildebene **9** mit einem vorgegebenen Verkleinerungsmaßstab abgebildet. Dieser Verkleinerungsmaßstab ist 4:1. Die Projektionsoptik **7** verkleinert also vom Objektfeld **4** hin zum Bildfeld **8** um einen Faktor 4.

[0030] Die Projektionsoptik **7** verkleinert beispielsweise um einen Faktor 4. Andere Abbildungsmaßstäbe sind ebenfalls möglich, zum Beispiel 5x, 6x, 8x oder auch Abbildungsmaßstäbe, die größer sind als 8x. Auch Abbildungsmaßstäbe, die kleiner sind als 4x, sind möglich.

[0031] Die Bildebene **9** ist parallel zur Objektebene **5** angeordnet. Abgebildet wird hierbei ein mit dem Objektfeld **4** zusammenfallender Ausschnitt der Reflexionsmaske **10**. Die Abbildung erfolgt auf die Oberfläche eines Substrats **11** in Form eines Wafers, der von einem Substrathalter **12** getragen ist.

[0032] Zur Erleichterung der Beschreibung von Lagebeziehungen wird in der Zeichnung ein xyz-Koordinatensystem verwendet. Die x-Achse verläuft in der [Fig. 1](#) senkrecht zur Zeichenebene und vom Betrachter weg in diese hinein. Die y-Achse verläuft in der [Fig. 1](#) nach rechts. Die z-Achse verläuft in der [Fig. 1](#) nach unten.

[0033] Die Reflexionsmaske **10**, die von einem nicht dargestellten Retikelhalter gehalten ist, und das Substrat **11** werden bei der Projektionsbelichtung in der y-Richtung synchronisiert zueinander gescant.

[0034] **Fig. 2** zeigt eine erste Ausführung eines optischen Designs für die Projektionsoptik **7**. Dargestellt ist der Verlauf von einzelnen Abbildungsstrahlen **13** des Beleuchtungslichts **3**, die von zwei voneinander beabstandeten Feldpunkten ausgehen. Dargestellt als einer der Abbildungsstrahlen **13** ist auch der Hauptstrahl des zentralen Feldpunktes, also der Hauptstrahl des Feldpunktes, der genau auf dem Schnittpunkt der die Ecken des Objektfeldes **4** bzw. des Bildfeldes **8** verbindenden Diagonalen liegt.

[0035] Bei der Projektionsoptik **7** ist die Bildebene **9** die erste Feldebene der Projektionsoptik **7** nach der Objektebene **5**. Die Projektionsoptik **7** weist also keine Zwischenbildebene auf.

[0036] Die Projektionsoptik **7** hat eine bildseitige numerische Apertur von 0,25. Eine Baulänge T , also der Abstand zwischen der Objektebene **5** und der Bildebene **9** der Projektionsoptik **7** beträgt 1585 mm.

[0037] Bei prinzipiell möglichen, jedoch nicht dargestellten Ausführungen von Projektionsoptiken, bei denen die Objektebene **5** nicht parallel zur Bildebene **9** angeordnet ist, ist die Baulänge T definiert als der Abstand eines zentralen Objektfeldpunktes zur Bildebene. Bei einem ebenfalls möglichen, jedoch nicht dargestellten Projektionsobjektiv mit einer ungeraden Spiegelanzahl, beispielsweise mit sieben oder mit neun Spiegeln, ist die Baulänge als der maximale Abstand zwischen einem der Spiegel und einer der Feldebene definiert.

[0038] Ein Objekt-Bild-Versatz d_{OIS} der Projektionsoptik **7** beträgt 1114,5 mm. Der Objekt-Bild-Versatz d_{OIS} ist definiert als der Abstand zwischen einer senkrechten Projektion P eines zentralen Objektfeldpunktes auf die Bildebene **8** und dem zentralen Bildpunkt.

[0039] Das Verhältnis zwischen der Baulänge T und dem Objekt-Bild-Versatz d_{OIS} beträgt bei der Projektionsoptik nach **Fig. 2** daher etwa 1,42.

[0040] Die Feldgröße des Projektionsobjektivs **7** beträgt in der Bildebene **9** 2 mm in y-Richtung und 26 mm in x-Richtung und in der Objektebene **5** 8 mm in y-Richtung und 108 mm in x-Richtung.

[0041] Das Objektfeld **4** und das Bildfeld **8** sind rechteckförmig. Grundsätzlich können die Felder auch teilingförmig mit einem entsprechenden xy-Aspektverhältnis sein, können also auch als gebogene Felder vorliegen.

[0042] Die y-Dimension der Felder wird auch als Schlitzhöhe und die x-Dimension als Schlitzbreite bezeichnet.

[0043] Ein Einfallswinkel β der Abbildungsstrahlen **13** auf das Objektfeld **4**, also auf der Reflexionsmaske **10**, beträgt 6° . Auch andere Einfallswinkel β sind möglich.

[0044] Die Projektionsoptik **7** hat insgesamt sechs Spiegel M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_5 , M_6 , die, ausgehend vom Objektfeld **4**, in der Reihenfolge der Beaufschlagung durch das Beleuchtungslicht **3** nummeriert sind. Die Spiegel M_3 und M_6 sind konkav ausgeführt. Der Spiegel M_4 ist konvex ausgeführt. Dargestellt sind in der **Fig. 2** lediglich die Reflexionsflächen der Spiegel M_1 bis M_6 , nicht jedoch die gesamten Spiegelkörper oder zugehörige Halterungen.

[0045] Die Spiegel M_1 bis M_6 werden mit dem Beleuchtungslicht **3** jeweils mit einem Einfallswinkelspektrum beaufschlagt. Dieses Einfallswinkelspektrum ist die Differenz zwischen einem kleinsten Einfallswinkel α_{min} und einem größten Einfallswinkel α_{max} auf dem jeweiligen Spiegel M_1 bis M_6 . Dies ist der **Fig. 2** am Beispiel des vorletzten Spiegels M_5 dargestellt, der das absolut größte Einfallswinkelspektrum der Projektionsoptik **7** aufweist.

[0046] Die nachfolgende Tabelle gibt das Einfallswinkelspektrum $\alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{min}}$ für die Spiegel M_1 bis M_6 wieder:

Spiegel	$\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$
M1	4,4°
M2	5,5°
M3	2,3°
M4	2,2°
M5	10°
M6	9,6°

[0047] Im in der [Fig. 2](#) dargestellten Meridionalschnitt tritt der kleinste Einfallswinkel α_{\min} am Spiegel M5 an dessen rechtem Rand auf und beträgt etwa 14°. Der größte Einfallswinkel α_{\max} tritt in der [Fig. 2](#) am linken Rand des Spiegels M5 auf und beträgt etwa 24°. Der Spiegel M5 hat also ein Einfallswinkelspektrum von 10°. Dieses Einfallswinkelspektrum stellt gleichzeitig die größte Einfallswinkeldifferenz an einem der Spiegel M1 bis M6 dar.

[0048] Die Einfallswinkel auf den Spiegeln M1 bis M6 der Projektionsoptik **7** bewegen sich daher praktisch ausschließlich in einem Bereich, in dem die Näherung kleiner Winkel ($0^\circ \leq \alpha \leq 7^\circ$) sehr gut erfüllt ist. Die Spiegel M1 bis M6 sind daher jeweils über deren gesamte Reflexionsfläche mit einer Reflexionsbeschichtung mit einheitlicher Dicke beschichtet.

[0049] Bei der Reflexionsbeschichtung handelt es sich insbesondere um eine Multilayer-Beschichtung, also um einen Schichtstapel aus alternierenden Molybdän- und Silizium-Schichten, wie dies für EUV-Reflexionsbeschichtungen bekannt ist. Aufgrund des kleinen maximalen Einfallswinkelspektrums von lediglich 10° ist gewährleistet, dass die Reflexion auf allen Spiegeln M1 bis M6 der Projektionsoptik **7** über deren gesamte Spiegelfläche in guter Näherung konstant ist. Ein unerwünschter Reflexionsverlauf über die jeweilige Spiegelfläche oder eine unerwünscht große Apodisierung tritt bei der Projektionsoptik **7** daher nicht auf. Die Apodisierung ist definiert als die Variation der Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts **3** über die Pupille. Wenn als I_{\max} die maximale Intensität des Beleuchtungslichts **3** in einer Pupillenebene der Projektionsoptik **7** und als I_{\min} die minimale Intensität des Beleuchtungslichts **3** über diese Pupillenebene bezeichnet wird, ist beispielsweise der Wert

$$A = (I_{\max} - I_{\min})/I_{\max}$$

ein Maß für die Apodisierung.

[0050] Mindestens einer der Spiegel M1 bis M6 hat eine Reflexionsfläche, die als Freiform-Reflexionsfläche mit bikonischer Grundform ausgebildet ist und sich durch die nachfolgende Flächenformel beschreiben lässt:

$$z = \frac{cvx \cdot x^2 + cvy \cdot y^2}{1 + \sqrt{1 - cvx^2 (ccx + 1) x^2 - cvy^2 (ccy + 1) y^2}} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i \alpha_{j,i-j} x^j y^{i-j}$$

[0051] x und y bezeichnen dabei die Koordinaten auf der Reflexionsfläche, ausgehend von einem Koordinatenursprung, der als Durchstoßpunkt einer Normalen durch die Reflexionsfläche definiert ist. Dieser Durchstoßpunkt kann theoretisch auch außerhalb der genutzten Reflexionsfläche liegen.

[0052] z bezeichnet die Pfeilhöhe der Freiform-Reflexionsfläche. Die Koeffizienten cvx und cvy beschreiben die Krümmungen der Freiform-Reflexionsfläche im xz - und im yz -Schnitt. Die Koeffizienten ccx und ccy sind konische Parameter.

[0053] Die Freiformflächenformel weist einen führenden bikonischen Term und ein nachfolgendes xy -Polynom mit Koeffizienten auf.

[0054] Mit den nachfolgenden Tabellen wird die Anordnung und Form der optischen Flächen der Spiegel M1 bis M6 innerhalb der Projektionsoptik **7** spezifiziert.

[0055] Die Tabelle 1 definiert in der ersten Spalte ausgewählte Oberflächen als Nummern. In der zweiten Spalte wird der Abstand der jeweiligen Oberfläche zur jeweils nächsten Oberfläche in z -Richtung angegeben. Die dritte Spalte der Tabelle 1 gibt eine y -Dezentrierung des lokalen Koordinatensystems der jeweiligen Fläche bezüglich eines globalen Koordinatensystems an.

[0056] Die letzte Spalte der Tabelle 1 ermöglicht eine Zuordnung der definierten Oberflächen zu den Komponenten der Projektionsoptik 7.

Oberfläche	Abstand nach vorhergehender Oberfläche		y-Dezentrierung	
0	0,000000		0	Bildebene
1	708,322803		0	
2	-617,533694		-91,468948	M6
3	583,375491		-91,682056	M5
4	-593,218566		-91,059467	M4
5	648,730180		-155,250886	M3
6	-403,572644		-96,008370	M2
7	674,571026		-73,556295	M1
8	0,000000		-656,479198	Objektebene

Tabelle 1

[0057] Die Tabelle 2 gibt die Daten zur jeweiligen Freiform-Reflexionsflächen der Spiegel M6 (Oberfläche 2), M5 (Oberfläche 3), M4 (Oberfläche 4), M3 (Oberfläche 5), M2 (Oberfläche 6) und M1 (Oberfläche 7) wieder. Nicht angegebene Koeffizienten sind gleich null. Zudem gilt: $RDX = 1/cvx$; $RDY = 1/cvy$.

Freiformdaten				
Oberfläche	2			
RDY	-970,864728			
RDX	-994,977890			
CCY	0,433521			
CCX	0,477907			
j	i - j	$a_{i,j}$		
0	1	-1,160933E-03		
2	0	-2,807756E-05		
0	2	-2,400704E-05		
2	1	-2,727535E-10		
0	3	-1,561712E-09		
Oberfläche	3			
RDY	-859,920276			
RDX	-909,711920			
CCY	2,066084			
CCX	2,157360			
j	i - j	$a_{i,j}$		
0	1	-6,956243E-03		
2	0	4,069558E-04		
0	2	4,110308E-04		
2	1	-1,135961E-08		
0	3	-3,068762E-08		
Oberfläche	4			

RDY	2123,400000			
RDX	1668,900000			
CCY	11,575729			
CCX	7,435682			
j	i - j	$a_{j,i,j}$		
0	1	1,393833E-01		
2	0	3,570289E-04		
0	2	4,726719E-04		
2	1	4,922014E-08		
0	3	1,301911E-09		
Oberfläche	5			
RDY	1292,100000			
RDX	1411,600000			
CCY	-0,067691			
CCX	0,332429			
j	i - j	$a_{j,i,j}$		
0	1	2,827164E-03		
2	0	3,218435E-05		
0	2	6,355344E-07		
2	1	3,212318E-09		
0	3	3,463152E-09		
Oberfläche	6			
RDY	-2615,500000			
RDX	-11975,000000			
CCY	0,354474			
CCX	58,821858			
j	i - j	$a_{j,i,j}$		
0	1	-1,510373E-01		
2	0	2,929133E-04		
0	2	3,971921E-04		
2	1	-2,211237E-08		
0	3	2,084484E-08		
Oberfläche	7			
RDY	171,052222			
RDX	507,844993			
CCY	-1,000256			
CCX	-1,006263			
j	i - j	$a_{j,i,j}$		
0	1	1,224307E-02		
2	0	-7,916373E-04		

0	2	-2,757507E-03		
2	1	-3,313700E-08		
0	3	-7,040288E-09		

Tabelle 2

[0058] Fig. 3 zeigt eine weitere Ausführung einer Projektionsoptik 14, die anstelle der Projektionsoptik 7 bei der Projektionsbelichtungsanlage 1 nach Fig. 1 zum Einsatz kommen kann. Komponenten der Projektionsoptik 14, die denjenigen entsprechen, die vorstehend unter Bezugnahme auf die Projektionsoptik 7 bereits erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugsziffern und werden nicht nochmals im Einzelnen diskutiert.

[0059] Die Projektionsoptik 14 hat eine bildseitige numerische Apertur von 0,25. Die Baulänge T der Projektionsoptik 14 beträgt 1000 mm. Der Objekt-Bild-Versatz d_{OIS} beträgt bei der Projektionsoptik 14 656,5 mm. Das Verhältnis T/d_{OIS} beträgt daher etwa 1,52.

[0060] Das maximale Einfallswinkelspektrum liegt auch bei der Projektionsoptik 14 beim Spiegel M5 vor und beträgt dort 12°. Der minimale Einfallswinkel liegt beim Spiegel M5 am in der Fig. 3 rechten Rand vor und beträgt etwa 6°. Der maximale Einfallswinkel liegt auf dem Spiegel M5 in der Fig. 3 am linken Rand vor und beträgt etwa 18°. Auch bei der Projektionsoptik 14 ist die Bildebene 9 die erste Feldebene nach der Objektebene 5.

[0061] Auch bei der Projektionsoptik 14 ist mindestens einer der Spiegel M1 bis M6 als bikonische Freiform-Reflexionsfläche ausgebildet.

[0062] Mit den nachfolgenden Tabellen wird die Anordnung und Form der optischen Flächen der Spiegel M1 bis M6 innerhalb der Projektionsoptik 14 spezifiziert.

[0063] Die Tabelle 3 definiert in der ersten Spalte ausgewählte Oberflächen als Nummern. In der zweiten Spalte wird der Abstand der jeweiligen Oberfläche zur jeweils nächsten Oberfläche in z-Richtung angegeben. Die dritte Spalte der Tabelle 3 gibt eine y-Dezentrierung des lokalen Koordinatensystems der jeweiligen Fläche bezüglich eines globalen Koordinatensystems an.

[0064] Die letzte Spalte der Tabelle 3 ermöglicht eine Zuordnung der definierten Oberflächen zu den Komponenten der Projektionsoptik 14.

Oberfläche	Abstand nach vorhergehender Oberfläche		y-Dezentrierung	
0	0,000000		0	Bildebene
1	636,883689		0	
2	-584,268871		-127,232050	M6
3	649,268844		-127,625397	M5
4	-689,518581		-127,310875	M4
5	635,140406		-214,759354	M3
6	-438,983578		-160,525812	M2
7	792,496449		-161,853347	M1
8	0,000000		-978,074419	Objektebene

Tabelle 3

[0065] Die Tabelle 4 gibt die Daten zur jeweiligen Freiform-Reflexionsflächen der Spiegel M6 (Oberfläche 2), M5 (Oberfläche 3), M4 (Oberfläche 4), M3 (Oberfläche 5), M2 (Oberfläche 6) und M1 (Oberfläche 7) wieder. Nicht angegebene Koeffizienten sind gleich null. Zudem gilt: $RDX = 1/cvx$; $RDY = 1/cvy$.

Freiformdaten				
Oberfläche	2			
RDY	-1024,300000			
RDX	-1051,200000			
CCY	0,715756			
CCX	0,739924			
j	i - j	$a_{i,j}$		
0	1	-7,576779E-04		
2	0	-3,738732E-05		
0	2	-4,247383E-05		
2	1	9,295774E-10		
0	3	-2,890724E-09		
4	0	-7,975116E-13		
2	2	-5,165327E-12		
0	4	3,661841E-13		
4	1	-7,996231E-16		
2	3	2,111768E-15		
0	5	-1,722248E-15		
6	0	-5,045304E-19		
4	2	5,124801E-18		
2	4	6,369116E-18		
0	6	-1,032383E-18		
Oberfläche	3			
RDY	-1035,900000			
RDX	-1101,300000			
CCY	2,617124			
CCX	2,951155			
j	i - j	$a_{i,j}$		
0	1	-2,179019E-03		
2	0	4,431389E-04		
0	2	4,560760E-04		
2	1	-1,644268E-08		
0	3	-2,950490E-08		
4	0	2,263165E-11		
2	2	1,778578E-11		
0	4	1,964554E-12		
4	1	1,279827E-14		
2	3	6,648394E-14		
0	5	-2,265488E-14		
6	0	2,095952E-17		
4	2	4,287989E-17		
2	4	-1,642439E-17		
0	6	-2,118969E-17		

Oberfläche	4			
RDY	1665,900000			
RDX	1372,000000			
CCY	9,138623			
CCX	1,926620			
j	i - j	$a_{j,i,j}$		
0	1	2,014437E-01		
2	0	2,109164E-04		
0	2	4,684147E-04		
2	1	1,447739E-09		
0	3	3,484838E-09		
4	0	-1,165581E-24		
2	2	4,175896E-13		
0	4	7,119405E-12		
4	1	5,269322E-14		
2	3	-2,420761E-14		
0	5	-2,012170E-14		
6	0	-3,454027E-16		
4	2	1,557629E-16		
2	4	-1,050420E-15		
0	6	-2,742748E-17		
Oberfläche	5			
RDY	1238,200000			
RDX	1414,200000			
CCY	-0,000012			
CCX	0,119482			
j	i - j	$a_{j,i,j}$		
0	1	1,047982E-02		
2	0	2,196150E-05		
0	2	7,186632E-07		
2	1	4,040466E-09		
0	3	9,100125E-09		
4	0	5,634656E-12		
2	2	-2,298266E-14		
0	4	-4,645176E-13		
4	1	9,046464E-16		
2	3	-2,605868E-16		
0	5	-1,673891E-15		
6	0	-2,618503E-18		
4	2	4,839689E-18		
2	4	-6,947211E-18		
0	6	-4,314040E-18		

Oberfläche	6			
RDY	-3684,400000			
RDX	-3506,300000			
CCY	-0,001235			
CCX	0,415150			
j	i - j	$a_{i,j}$		
0	1	-1,767860E-01		
2	0	5,073838E-04		
0	2	5,272916E-04		
2	1	-3,957421E-08		
0	3	8,058238E-09		
4	0	7,959552E-25		
2	2	-7,112502E-13		
0	4	6,827653E-13		
4	1	-2,253930E-13		
2	3	1,303253E-13		
0	5	1,567942E-15		
6	0	-2,326019E-16		
4	2	-2,314170E-16		
2	4	1,309455E-16		
0	6	-5,879379E-18		
Oberfläche	7			
RDY	167,705178			
RDX	408,126726			
CCY	-1,001961			
CCX	-0,994641			
j	i - j	$a_{i,j}$		
0	1	-2,378224E-04		
2	0	-1,003186E-03		
0	2	-2,870643E-03		
2	1	-3,511331E-09		
0	3	-1,211650E-07		
4	0	-7,010621E-11		
2	2	-5,812898E-12		
0	4	-4,637999E-13		
4	1	-1,913197E-13		
2	3	6,243649E-16		
0	5	4,280774E-16		
6	0	-5,399656E-17		
4	2	-1,237113E-16		
2	4	1,580174E-19		
0	6	6,222451E-19		

Tabelle 4

[0066] Fig. 4 zeigt eine weitere Ausführung einer Projektionsoptik 15, die anstelle der Projektionsoptik 7 bei der Projektionsbelichtungsanlage 1 nach Fig. 1 zum Einsatz kommen kann. Komponenten der Projektionsoptik 15, die denjenigen entsprechen, die vorstehend unter Bezugnahme auf die Projektionsoptik 7 bereits erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugsziffern und werden nicht nochmals im Einzelnen diskutiert. Die Projektionsoptik 15 hat eine bildseitige numerische Apertur von 0,32. Die Baulänge T der Projektionsoptik 15 beträgt 1000 mm. Der Objekt-Bild-Versatz d_{OIS} beträgt bei der Projektionsoptik 15 978 mm. Das Verhältnis T/d_{OIS} beträgt daher etwa 1,02.

[0067] Das maximale Einfallswinkelspektrum liegt auch bei der Projektionsoptik 15 beim Spiegel M5 vor und beträgt dort 13°. Der minimale Einfallswinkel liegt beim Spiegel M5 am in der Fig. 4 rechten Rand vor und beträgt etwa 9°. Der maximale Einfallswinkel liegt auf dem Spiegel M5 in der Fig. 4 am linken Rand vor und beträgt etwa 22°. Auch bei der Projektionsoptik 15 ist die Bildebene 9 die erste Feldebene nach der Objektebene 5.

[0068] Auch bei der Projektionsoptik 15 ist mindestens einer der Spiegel M1 bis M6 als bikonische Freiform-Reflexionsfläche ausgebildet.

[0069] Mit den nachfolgenden Tabellen wird die Anordnung und Form der optischen Flächen der Spiegel M1 bis M6 innerhalb der Projektionsoptik 15 spezifiziert.

[0070] Die Tabelle 5 definiert in der ersten Spalte ausgewählte Oberflächen als Nummern. In der zweiten Spalte wird der Abstand der jeweiligen Oberfläche zur jeweils nächsten Oberfläche in z-Richtung angegeben. Die dritte Spalte der Tabelle 5 gibt eine y-Dezentrierung des lokalen Koordinatensystems der jeweiligen Fläche bezüglich eines globalen Koordinatensystems an.

[0071] Die letzte Spalte der Tabelle 5 ermöglicht eine Zuordnung der definierten Oberflächen zu den Komponenten der Projektionsoptik 15.

Oberfläche	Abstand nach vorhergehender Oberfläche		y-Dezentrierung	
0	0,000000		0,000000	Bildebene
1	726,023335		0,000000	
2	-577,595015		-192,238869	M6
3	745,417411		-192,777551	M5
4	-738,103985		-192,462469	M4
5	994,730526		-243,767917	M3
6	-450,919688		-164,949143	M2
7	885,694809		-165,918838	M1
8	0,000000		-1114,493643	Objektebene

Tabelle 5

[0072] Die Tabelle 6 gibt die Daten zur jeweiligen Freiform-Reflexionsflächen der Spiegel M6 (Oberfläche 2), M5 (Oberfläche 3), M4 (Oberfläche 4), M3 (Oberfläche 5), M2 (Oberfläche 6) und M1 (Oberfläche 7) wieder. Nicht angegebene Koeffizienten sind gleich null. Zudem gilt: $RDX = 1/cvx$; $RDY = 1/cvy$.

Freiformdaten				
Oberfläche	2			
RDY	-1172,300000			
RDX	-1295,000000			

CCY	0,787469			
CCX	1,053600			
j	i - j	$a_{i,j}$		
0	1	-7,219074E-04		
2	0	-3,578974E-05		
0	2	-2,128273E-05		
2	1	7,097815E-10		
0	3	-1,618913E-09		
4	0	-2,252005E-12		
2	2	-3,895991E-12		
0	4	2,750606E-13		
4	1	-4,464498E-15		
2	3	-4,637860E-16		
0	5	-6,920120E-16		
6	0	-3,637297E-18		
4	2	2,537830E-18		
2	4	1,002850E-17		
0	6	-3,044197E-18		
Oberfläche	3			
RDY	-1236,400000			
RDX	-1536,200000			
CCY	2,551177			
CCX	4,047183			
j	i - j	$a_{i,j}$		
0	1	-6,558677E-03		
2	0	3,540129E-04		
0	2	4,133618E-04		
2	1	-1,904320E-08		
0	3	-3,576692E-08		
4	0	1,496417E-12		
2	2	1,864663E-11		
0	4	3,000005E-12		
4	1	-7,105811E-15		
2	3	5,293727E-14		
0	5	-1,509974E-14		
6	0	2,907360E-18		
4	2	5,694619E-17		
2	4	8,177232E-17		
0	6	4,847943E-18		
Oberfläche	4			
RDY	2267,500000			
RDX	1709,200000			
CCY	13,716154			

CCX	2,188445			
j	i - j	$a_{i,j}$		
0	1	2,536301E-01		
2	0	1,786226E-04		
0	2	4,303983E-04		
2	1	-5,494928E-10		
0	3	4,116436E-09		
4	0	-2,775915E-11		
2	2	3,269596E-11		
0	4	3,121929E-12		
4	1	2,286620E-14		
2	3	1,431437E-14		
0	5	-8,016660E-15		
6	0	-8,966865E-17		
4	2	3,631639E-16		
2	4	-3,150250E-16		
0	6	-7,235944E-18		
Oberfläche	5			
RDY	1453,100000			
RDX	1691,600000			
CCY	0,004158			
CCX	0,130787			
j	i - j	$a_{i,j}$		
0	1	1,413720E-02		
2	0	1,853431E-05		
0	2	8,632041E-07		
2	1	2,471907E-09		
0	3	1,031600E-08		
4	0	1,594814E-12		
2	2	1,271047E-13		
0	4	-8,477699E-14		
4	1	1,841514E-15		
2	3	1,063273E-15		
0	5	-3,890516E-16		
6	0	-7,937130E-19		
4	2	4,923627E-18		
2	4	-3,489821E-18		
0	6	-3,625541E-18		
Oberfläche	6			
RDY	-3061,000000			
RDX	-3961,700000			
CCY	0,069638			
CCX	0,416068			

j	i - j	$a_{j,i,j}$		
0	1	-1,950186E-01		
2	0	4,908498E-04		
0	2	5,948960E-04		
2	1	-2,711540E-08		
0	3	1,073427E-08		
4	0	-3,053221E-12		
2	2	-5,601149E-12		
0	4	4,072326E-13		
4	1	-3,675214E-13		
2	3	3,165916E-14		
0	5	-1,649353E-15		
6	0	-8,908751E-17		
4	2	-2,427088E-16		
2	4	2,643106E-16		
0	6	-7,400900E-18		
Oberfläche	7			
RDY	210,148013			
RDX	383,382688			
CCY	-1,001702			
CCX	-0,999069			
j	i - j	$a_{j,i,j}$		
0	1	-2,506963E-04		
2	0	-1,093695E-03		
0	2	-2,285463E-03		
2	1	-7,246135E-09		
0	3	-1,030905E-07		
4	0	-7,535621E-11		
2	2	-4,600461E-12		
0	4	-9,217052E-14		
4	1	-2,057821E-13		
2	3	2,433632E-16		
0	5	1,627316E-16		
6	0	-1,969282E-17		
4	2	-1,033559E-16		
2	4	2,086873E-17		
0	6	1,058816E-18		

Tabelle 6

[0073] [Fig. 5](#) zeigt eine weitere Ausführung einer Projektionsoptik **16**, die anstelle der Projektionsoptik **7** bei der Projektionsbelichtungsanlage **1** nach [Fig. 1](#) zum Einsatz kommen kann. Komponenten der Projektionsoptik **16**, die denjenigen entsprechen, die vorstehend unter Bezugnahme auf die Projektionsoptik **7** bereits erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugsziffern und werden nicht nochmals im Einzelnen diskutiert.

[0074] Die Projektionsoptik **16** hat eine bildseitige numerische Apertur von 0,35. die Baulänge T der Projektionsoptik **16** beträgt 1500 mm. Der Objekt-Bild-Versatz d_{OIS} beträgt 580 mm bei der Projektionsoptik **16**. Das Verhältnis T/d_{OIS} beträgt daher etwa 2,59.

[0075] Auf dem Spiegel M5 der Projektionsoptik **16** liegt ein minimaler Einfallswinkel von $0,15^\circ$ und ein maximaler Einfallswinkel von $23,72^\circ$ vor. Das Einfallswinkelspektrum auf dem Spiegel M5 beträgt daher $23,58^\circ$ und ist das größte Einfallswinkelspektrum auf eifern der Spiegel der Projektionsoptik **16**.

[0076] Die Projektionsoptik **16** hat zwischen den Spiegeln M4 und M5 eine Zwischenbildebene **17**. Diese liegt in etwa dort vor, wo die Abbildungsstrahlen **13** am Spiegel M6 vorbeigedührt werden.

[0077] Die Freiform-Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6 der Projektionsoptik **16** können mathematisch durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=2}^{66} C_j X^m Y^n$$

wobei gilt:

$$j = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1$$

[0078] Z ist die Pfeilhöhe der Freiformfläche am Punkt x, y ($x^2 + y^2 = r$).

[0079] c ist eine Konstante, die der Scheitelpunktkrümmung einer entsprechenden Asphäre entspricht. k entspricht einer konischen Konstante einer entsprechenden Asphäre. C_j sind die Koeffizienten der Monome $X^m Y^n$. Typischerweise werden die Werte von c, k und C_j auf der Basis der gewünschten optischen Eigenschaften des Spiegels innerhalb der Projektionsoptik **16** bestimmt. Die Ordnung des Monoms, $m + n$, kann beliebig variiert werden. Ein Monom höherer Ordnung kann zu einem Design der Projektionsoptik mit besserer Bildfehlerkorrektur führen, ist jedoch aufwendiger zu berechnen. $m + n$ kann Werte zwischen 3 und mehr als 20 einnehmen.

[0080] Freiformflächen können mathematisch auch durch Zernike-Polynome beschrieben werden, die beispielsweise im Manual des optischen Designprogramms CODE V[®] erläutert werden. Alternativ können Freiformflächen mit Hilfe zweidimensionaler Spline-Oberflächen beschrieben werden. Beispiele hierfür sind Bèzier-Kurven oder nicht-uniforme rationale Basis-Splines (non-uniform rational basis splines, NURBS). Zweidimensionale Spline-Oberflächen können beispielsweise durch ein Netz von Punkten in einer xy-Ebene und zugehörige z-Werte oder durch diese Punkte und ihnen zugehörige Steigungen beschrieben werden. Abhängig vom jeweiligen Typ der Spline-Oberfläche wird die vollständige Oberfläche durch Interpolation zwischen den Netzpunkten unter Verwendung z. B. von Polynomen oder Funktionen, die bestimmte Eigenschaften hinsichtlich ihrer Kontinuität und Differenzierbarkeit haben, gewonnen. Beispiele hierfür sind analytische Funktionen.

[0081] Die optischen Designdaten der Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6 der Projektionsoptik **7** können den nachfolgenden Tabellen entnommen werden. Die erste dieser Tabellen gibt zu den optischen Flächen der optischen Komponenten und zur Aperturblende jeweils den Kehrwert der Scheitelpunktkrümmung (Radius) und einen Abstandswert (Thickness) an, der dem z-Abstand benachbarter Elemente im Strahlengang, ausgehend von der Objektebene, entspricht. Die zweite Tabelle gibt die Koeffizienten C_j der Monome $X^m Y^n$ in der oben angegebenen Freiformflächen-Gleichung für die Spiegel M1 bis M6 an. Nradius stellt dabei einen Normierungsfaktor dar. Nach der zweiten Tabelle ist noch der Betrag in mm angegeben, längs dem der jeweilige Spiegel, ausgehend von einem Spiegel-Referenzdesign dezentriert (Y-Decenter) und verdreht (X-Rotation) wurde. Dies entspricht der Parallelverschiebung und der Verkippung beim oben beschriebenen Freiformflächen-Designverfahren. Verschieben wird dabei in y-Richtung und verkippt um die x-Achse. Der Verdrehwinkel ist dabei in Grad angegeben.

Oberfläche	Radius	Abstand	Betriebsmodus
Objektebene	UNENDLICH	727,645	
Spiegel 1	-1521,368	-420,551	REFL
Spiegel 2	4501,739	540,503	REFL
Spiegel 3	501,375	-313,416	REFL
Spiegel 4	629,382	868,085	REFL
Spiegel 5	394,891	-430,827	REFL
Spiegel 6	527,648	501,480	REFL
Bildebene	UNENDLICH	0,000	

Koeffizient	M1	M2	M3	M4	M5	M6
K	-6,934683E+00	-1,133415E+02	-4,491203E+00	2,864941E-01	6,830961E+00	8,266681E-02
Y	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00
X2	-1,784786E-04	-1,625398E-04	-4,091759E-04	-1,283213E-05	1,852188E-04	1,527974E-06
Y2	-1,924874E-04	-2,007476E-04	-4,089273E-04	-3,385713E-05	1,462618E-04	1,999354E-06
X2Y	7,567253E-08	3,033726E-07	4,563127E-07	3,550829E-08	2,779793E-07	6,063643E-10
Y3	4,318244E-08	4,548440E-09	-4,162578E-08	-2,113434E-08	6,705950E-07	5,861708E-09
X4	-4,430972E-10	-1,014203E-09	4,055457E-09	-6,220378E-11	-8,891669E-10	-1,395997E-11
X2Y2	-8,520546E-10	-6,881264E-10	8,939911E-09	-1,392199E-10	5,141975E-09	-1,167067E-11
Y4	-4,543477E-10	9,382921E-10	5,474325E-09	-6,995794E-11	5,400196E-10	3,206239E-12
X4Y	-2,099305E-14	-4,394241E-13	-5,095787E-12	-1,116149E-14	-3,574353E-13	5,504390E-15
X2Y3	-9,594625E-14	-5,563377E-12	-2,467721E-12	1,007439E-14	1,351005E-11	1,988648E-14
Y5	-6,552756E-13	-1,586808E-11	3,433129E-11	1,283373E-12	5,833169E-11	8,273816E-15
X6	-5,518407E-17	-4,175604E-15	-2,733992E-14	-9,578075E-17	-7,907746E-14	-2,844119E-17
X4Y2	1,982470E-16	5,202976E-15	-3,722675E-14	1,225726E-16	2,278266E-14	-2,154623E-17
X2Y4	3,530434E-16	2,469563E-14	-2,047537E-13	-1,207944E-15	2,530016E-13	2,350448E-18
Y6	1,142642E-15	2,708016E-14	-7,131019E-34	1,880641E-14	1,622798E-13	-9,962638E-18
X6Y	-6,790512E-20	-1,328271E-17	-2,926272E-16	-2,248097E-19	-4,457988E-16	8,532237E-21
X4Y3	-6,322471E-19	3,908456E-17	-2,737455E-16	-7,629602E-20	1,416184E-15	3,243375E-20
X2Y5	-1,195858E-17	-5,908420E-17	6,146576E-15	1,102606E-16	3,414825E-15	-2,740056E-21

Y7	2,350101E-17	-1,477424E-15	5,232866E-14	1,218965E-15	1,819850E-15	-1,903739E-19
X8	-6,917298E-22	8,248359E-20	6,770710E-19	9,667078E-22	-3,953231E-39	-4,407667E-23
X6Y2	-4,633739E-22	1,268409E-19	-1,035701E-10	-6,006155E-20	2,725218E-38	-6,933821E-23
X4Y4	-1,497254E-20	-1,719209E-18	-3,217683E-18	-1,742201E-20	-1,679944E-39	4,964397E-23
X2Y6	-3,969941E-20	-3,497307E-18	4,228227E-17	-2,656234E-18	4,611895E-18	1,663632E-22
Y8	6,708554E-20	1,187270E-18	2,685040E-38	-1,611964E-39	4,730942E-18	6,011162E-23
X8Y	-4,466562E-24	3,597751E-23	2,879249E-20	-1,588496E-23	-5,662885E-20	5,805689E-26
X6Y3	2,874487E-23	1,003878E-20	6,793162E-20	3,438183E-23	-1,071225E-20	-1,310631E-25
X4Y5	2,249612E-23	1,390470E-20	1,950655E-19	1,008316E-21	-6,062162E-20	-3,380438E-25
X2Y7	5,258895E-22	2,194560E-20	-2,724912E-18	-3,405763E-20	-1,780372E-19	1,649113E-25
Y9	-4,497858E-21	2,311634E-19	-2,656603E-17	-3,124398E-19	-1,417439E-19	2,296226E-24
X10	0,000000E+00	-6,351950E-24	-8,560053E-23	-4,339912E-26	-8,430614E-22	-3,388610E-28
X8Y2	0,000000E+00	4,523937E-24	9,792140E-22	2,952972E-24	9,614763E-23	1,083831E-27
X6Y4	0,000000E+00	-9,774541E-23	-2,428620E-21	-5,303412E-24	-1,020095E-22	3,199302E-27
X4Y6	0,000000E+00	4,704150E-23	1,195308E-42	2,279968E-23	-6,658041E-23	1,968405E-27
X2Y8	0,000000E+00	1,270549E-22	1,329832E-41	8,858543E-22	5,185397E-22	3,257732E-28
Y10	0,000000E+00	-1,244299E-21	-8,254524E-44	-6,003123E-22	5,204197E-23	1,473250E-27
NRadius	1,000000E+00	1,000000E+00	1,000000E+00	1,000000E+00	1,000000E+00	1,000000E+00

Koeffizient	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Image
Y-Dezentrierung	37,685	-15,713	-139,004	-151,477	-395,184	-440,921	0,000
X-Rotation	0,326	-3,648	-5,539	-5,647	4,878	5,248	0,000

[0082] In der [Fig. 5](#) ist mit der Bezugsziffer **18** ein Hauptstrahl bezeichnet, der zu einem zentralen Objektfeldpunkt gehört. Mit **19** ist in der [Fig. 5](#) eine Normale auf die Objektebene **5** bezeichnet, die durch den zentralen Objektfeldpunkt verläuft. In der Objektebene **5** schneiden sich also der Hauptstrahl **18** und die Normale **19**. Längs des weiteren Strahlengangs des Hauptstrahls **18** zwischen der Objektebene **5** und der Bildebene **9** vergrößert sich der Abstand des Hauptstrahls **18** zur Normalen **19** monoton. Beim Durchtritt des Hauptstrahls **18** durch die Bildebene **9**, also im zentralen Bildfeldpunkt, ist dieser Abstand identisch mit dem Objekt-Bild-Versatz d_{OIS} . Die monotone Vergrößerung des Abstandes des Hauptstrahls **18** von der Normalen **19** im Strahlengang zwischen der Objektebene **5** und der Bildebene **9** bedeutet, dass dieser Abstand längs des Verlaufs des Strahlengangs nirgendwo kleiner wird. Bei der Projektionsoptik **16** wird dieser Abstand bis zum Auftreffen des

Hauptstrahl **18** auf den letzten Spiegel M6 stetig größer. Zwischen dem Auftreffpunkt des Hauptstrahls **18** auf den Spiegel M6 und der Bildebene **9** bleibt dieser Abstand konstant.

[0083] **Fig. 6** zeigt in einer im Vergleich zur **Fig. 1** weniger schematischen Darstellung den Einsatz der Projektionsoptik **16** in der Projektionsbelichtungsanlage **1**. Komponenten, die denjenigen entsprechen, die vorstehend unter Bezugnahme insbesondere auf die **Fig. 1** und **Fig. 5** bereits erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugsziffern und werden nicht nochmals im Einzelnen diskutiert.

[0084] Das von der Lichtquelle **2** emittierte Beleuchtungslicht **3** wird zunächst von einem in der **Fig. 6** schematisch dargestellten Kollektor **20** gesammelt.

[0085] Im Unterschied zur Darstellung nach **Fig. 1** ist bei der Darstellung nach **Fig. 6** die Lichtquelle **2** auf einem Niveau dargestellt, welches in der **Fig. 6** unterhalb des Niveaus der Bildebene **9** liegt. Das vom Kollektor **20** gesammelte Beleuchtungslicht **3** muss daher am Substrathalter **12** vorbeigeführt werden.

[0086] Die Beleuchtungsoptik **6** umfasst bei der Ausführung nach **Fig. 6** einen dem Kollektor **20** nachgeordneten Feldfacettenspiegel **21** und einen diesem nachgeordneten Pupillenfacettenspiegel **22**. Über die beiden Facettenspiegel **21**, **22** erfolgt eine definierte Vorgabe einer Intensitätsverteilung sowie einer Beleuchtungswinkelverteilung des Beleuchtungslichts **3** über das Objektfeld **4**. Zwischen dem Kollektor **20** und dem Feldfacettenspiegel **21** liegt ein Zwischenfokus **23** im Strahlengang des Beleuchtungslichts **3**. Der große Objekt-Bild-Verzerrungsgrad d_{OIS} der Projektionsoptik **16** nach den **Fig. 5** und **Fig. 6** führt dazu, dass der Strahlengang zwischen dem Kollektor **20** und dem Feldfacettenspiegel **21** normal zu der Objektebene **5** und der Bildebene **9**, also vertikal, verlaufen kann. Unnötig große Einfallswinkel auf den das Beleuchtungslicht **3** führenden Spiegel können daher vermieden werden, ohne dass die Vorbeiführung des Beleuchtungslichts **3** am Substrathalter **12** problematisch wäre.

[0087] Die Projektionsoptiken **7**, **14**, **15** und **16** weisen als bündelführende Komponenten ausschließlich Spiegel auf. Es handelt sich also um Spiegel-Projektionsobjektive.

[0088] Zur Herstellung eines mikrostrukturierten Bauteils mit Hilfe der Projektionsbelichtungsanlage **1** werden zunächst die Reflexionsmaske **10** und das Substrat **11** bereitgestellt. Anschließend wird eine Struktur auf der Reflexionsmaske **10** mit der Projektionsoptik **7** der Projektionsbelichtungsanlage **1** auf eine lichtempfindliche Schicht auf dem Wafer **11** projiziert. Durch Entwicklung der lichtempfindlichen Schicht wird dann eine Mikrostruktur auf dem Wafer **11** und hieraus das mikrostrukturierte Bauteil erzeugt.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- US 6266389 B1 [0002]
- US 2005/0134980 A1 [0002]
- US 2007/0195317 A1 [0002]
- US 2007/0058269 A1 [0002]
- US 2007/0223112 A [0002]
- US 6396067 B1 [0002]
- US 6361176 B1 [0002]
- US 6666560 B2 [0002]

Patentansprüche

1. Projektionsobjektiv (**7; 14; 15**) für die Mikrolithographie zur Abbildung eines Objektfeldes (**4**) in einer Objektebene (**5**) in ein Bildfeld (**8**) in einer Bildebene (**9**)
 – mit mindestens sechs Spiegeln (M1 bis M6), von denen mindestens ein Spiegel eine Freiform-Reflexionsfläche aufweist,
 – wobei das Verhältnis aus einer Baulänge (T) des Projektionsobjektivs (**7; 14; 15**) und einem Objekt-Bild-Versatz (d_{OIS}) kleiner ist als 12.

2. Projektionsobjektiv (**7; 14; 15**) für die Mikrolithographie zur Abbildung eines Objektfeldes (**4**) in einer Objektebene (**5**) in ein Bildfeld (**8**) in einer Bildebene (**9**)
 – mit mindestens sechs Spiegeln (M1 bis M6), von denen mindestens ein Spiegel eine Freiform-Reflexionsfläche aufweist,
 – wobei die Bildebene (**9**) die erste Feldebene des Projektionsobjektivs (**7; 14; 15**) nach der Objektebene (**5**) darstellt.

3. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch ein Verhältnis aus einer Baulänge (T) und einem Objekt-Bild-Versatz (d_{OIS}), das kleiner ist als 5.

4. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Freiform-Reflexionsfläche als bikonische Fläche ausgebildet ist.

5. Projektionsobjektiv (**7; 14; 15**) für die Mikrolithographie zur Abbildung eines Objektfeldes (**4**) in einer Objektebene (**5**) in ein Bildfeld (**8**) in einer Bildebene (**9**)
 – mit einer Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M6),
 gekennzeichnet durch ein Verhältnis aus einer Baulänge (T) und einem Objekt-Bild-Versatz (d_{OIS}), das kleiner ist als 2.

6. Projektionsobjektiv nach Anspruch 5, gekennzeichnet durch mindestens sechs Spiegel (M1 bis M6).

7. Projektionsobjektiv nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens einer der Spiegel (M1 bis M6) eine Freiform-Reflexionsfläche aufweist.

8. Projektionsobjektiv nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Freiform-Reflexionsfläche als bikonische Fläche ausgebildet ist.

9. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Bildebene (**9**) die erste Feldebene des Projektionsobjektivs (**7; 14; 15**) nach der Objektebene (**5**) darstellt.

10. Projektionsobjektiv (**16**) für die Mikrolithographie zur Abbildung eines Objektfeldes (**4**) in einer Objektebene (**5**) in ein Bildfeld (**8**) in einer Bildebene (**9**)
 – mit einer Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M6), von denen mindestens ein Spiegel eine Freiform-Reflexionsfläche aufweist,
 – mit mindestens einer Zwischenbildebene (**17**) zwischen der Objektebene (**5**) und der Bildebene (**9**),
 – wobei das Verhältnis aus einer Baulänge (T) des Projektionsobjektivs (**16**) und einem Objekt-Bild-Versatz (d_{OIS}) kleiner ist als 12.

11. Projektionsobjektiv nach Anspruch 10, gekennzeichnet durch ein Verhältnis aus einer Baulänge (T) und einem Objekt-Bild-Versatz (d_{OIS}), das kleiner ist als 5.

12. Projektionsobjektiv nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Freiform-Reflexionsfläche gemäß der Flächengleichung:

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=2}^{66} C_j X^m Y^n$$

beschreibbar ist, wobei gilt:

$$j = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1$$

Z: Pfeilhöhe der Freiformfläche am Punkt x, y ($x^2 + y^2 = r$),

c: Konstante, die der Scheitelpunktkrümmung einer entsprechenden Asphäre entspricht,

k: Konstante einer entsprechenden Asphäre,

C_j : Koeffizienten der Monome $X^m Y^n$.

13. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass sich der Abstand zwischen

– einem Hauptstrahl (**18**) zu einem zentralen Objektfeldpunkt und

– einer durch den zentralen Objektfeldpunkt gehenden Normalen (**19**) auf die Objektebene (**5**)

längs eines Strahlengangs des Hauptstrahls (**18**), der vom Objektfeld (**5**) ausgeht und bis hin zum Bildfeld (**9**) verläuft, monoton vergrößert.

14. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 13, gekennzeichnet durch einen Objekt-Bild-Ver-satz (d_{OIS}), der größer ist als 200 mm.

15. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Verhältnis aus einer Differenz zwischen einem größten (α_{max}) und einem kleinsten (α_{min}) Einfallswinkel von Abbildungsstrahlen (**13**) auf einem der Spiegel (M1 bis M6) einerseits und einer bildseitigen numerischen Apertur des Projektionsobjektivs andererseits maximal 60° beträgt.

16. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 15, gekennzeichnet durch eine bildseitige numerische Apertur von mindestens 0,25.

17. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 16, gekennzeichnet durch eine Feldgröße des Objektfeldes (**4**) und/oder des Bildfeldes (**8**) von mindestens 2 mm \times 26 mm.

18. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 17, gekennzeichnet durch einen Einfallswinkel (β) eines einem zentralen Objektivfeldpunkt zugeordneten Abbildungsstrahls (**13**) auf dem Objektfeld (**4**) im Bereich zwischen 5° und 9° .

19. Projektionsbelichtungsanlage (**1**) mit einer Lichtquelle (**2**), einer Beleuchtungsoptik (**6**) und einer Projektionsoptik (**7**; **14**, **15**) nach einem der Ansprüche 1 bis 18.

20. Verfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Bauteils mit folgenden Verfahrensschritten:

– Bereitstellen eines Retikels (**10**) und eines Wafers (**11**),

– Projizieren einer Struktur auf dem Retikel (**10**) auf eine lichtempfindliche Schicht des Wafers (**11**) mit Hilfe der Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 19,

– Erzeugung einer Mikrostruktur auf dem Wafer (**11**).

21. Mikrostrukturiertes Bauteil, hergestellt nach einem Verfahren nach Anspruch 20.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

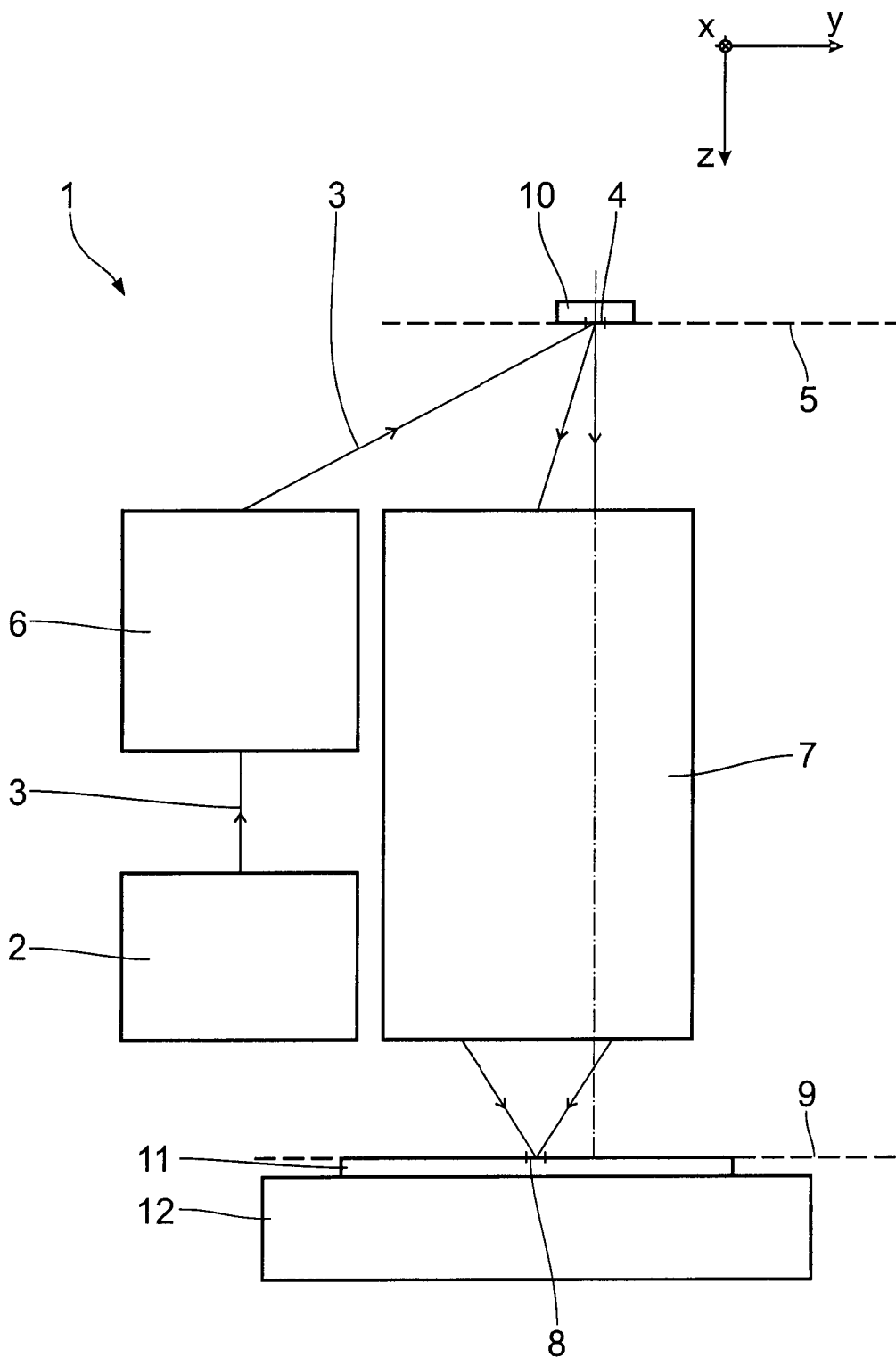


Fig. 1

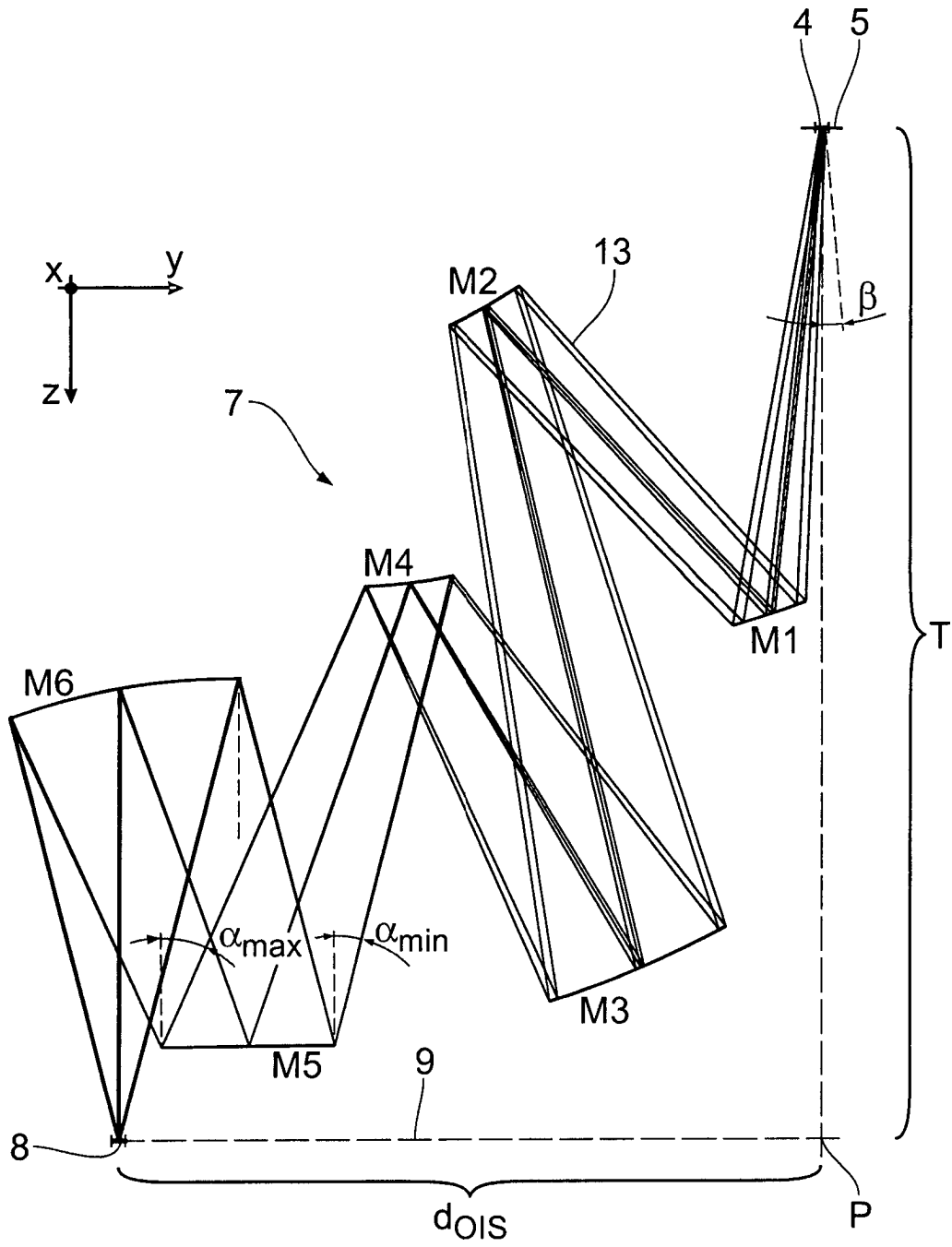


Fig. 2

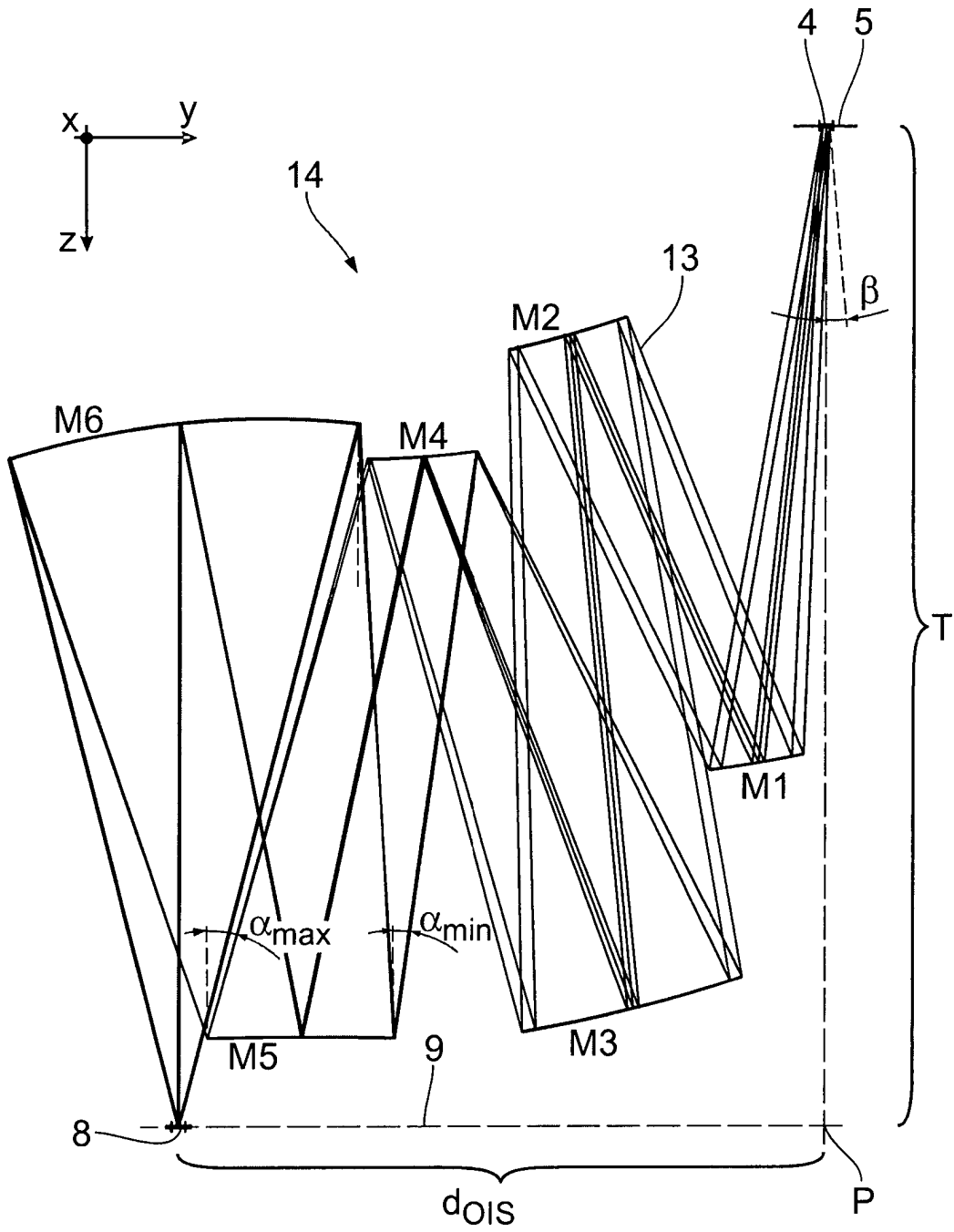


Fig. 3

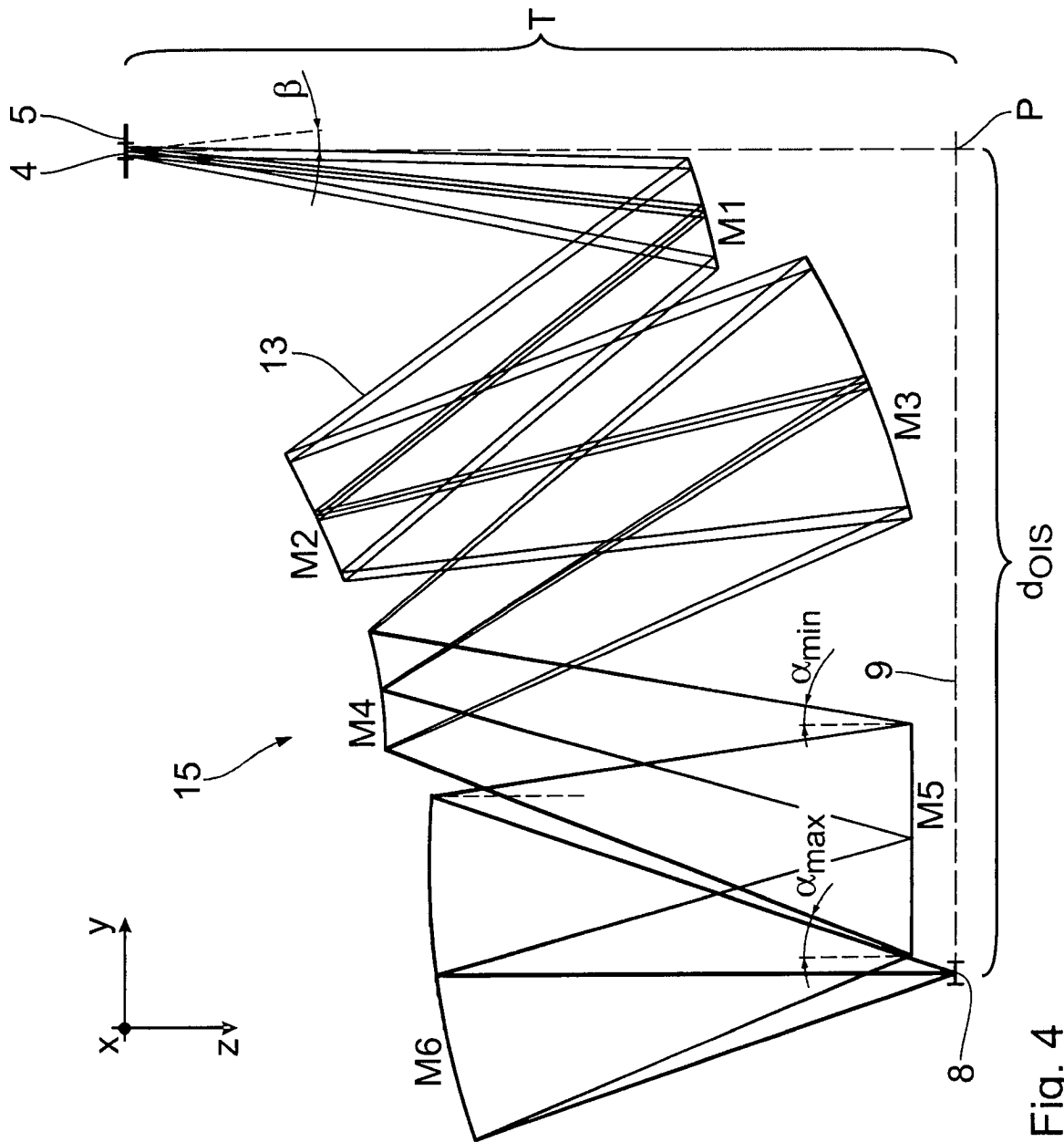


Fig. 4

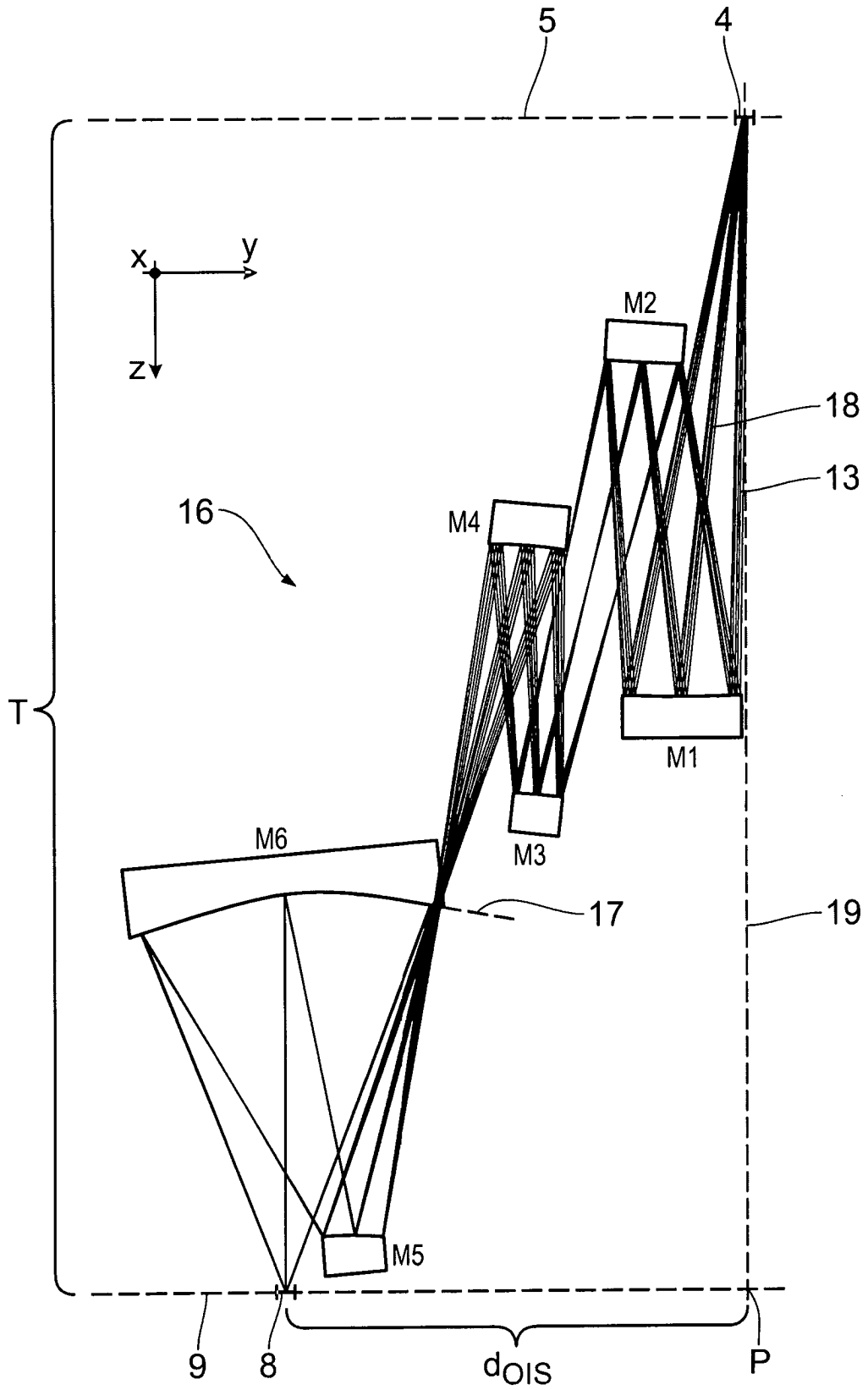


Fig. 5

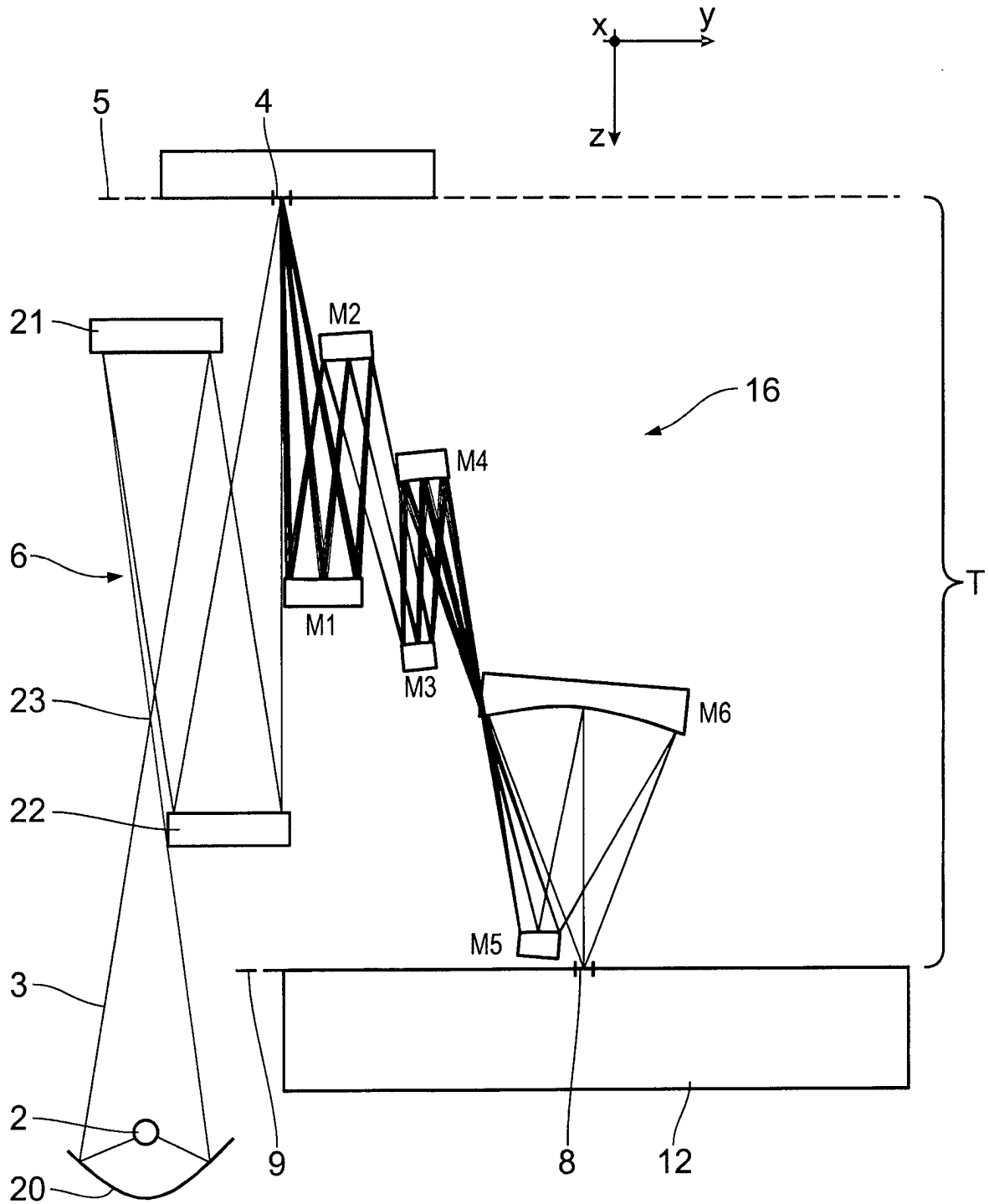


Fig. 6