



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 051 671 A1** 2009.05.07

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 051 671.3**

(22) Anmeldetag: **26.10.2007**

(43) Offenlegungstag: **07.05.2009**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G02B 17/00** (2006.01)

**G03F 7/20** (2006.01)

**B81C 5/00** (2006.01)

(71) Anmelder:

**Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen, DE**

(72) Erfinder:

**Mann, Hans-Jürgen, 73447 Oberkochen, DE;  
Ulrich, Wilhelm, 73434 Aalen, DE; Müllender,  
Stephan, 73432 Aalen, DE; Enkisch, Hartmut,  
73431 Aalen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**US 70 50 152 B2**

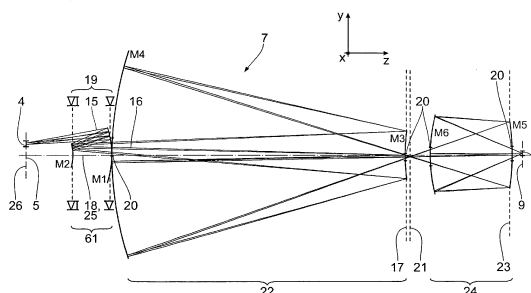
**EP 19 30 771 A1**

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Abbildende Optik sowie Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer derartigen abbildenden Optik**

(57) Zusammenfassung: Eine abbildende Optik (7) hat eine Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M6). Diese bilden ein Objekt (4) in einer Objektebene (5) in ein Bildfeld (8) in einer Bildebene (9) ab. Bei der abbildenden Optik (7) ist ein Verhältnis aus einem maximalen Einfallswinkel von Abbildungsstrahlung (15) auf Reflexionsflächen der Spiegel (M1 bis M6) und einer beidseitigen numerischen Apertur der abbildenden Optik (7) kleiner als  $33,8^\circ$ . Es resultiert eine abbildende Optik, die gute Voraussetzungen für eine Reflexionsbeschichtung der Spiegel bietet, mit der geringe Reflexionsverluste für Abbildungsstrahlung beim Durchgang durch die abbildende Optik insbesondere auch bei Wellenlängen im EUV-Bereich kleiner als 10 nm realisiert werden können.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine abbildende Optik nach den Oberbegriffen der Ansprüche 1, 7 und 8. Ferner betrifft die Erfindung eine Projektionsbelichtungsanlage mit einer derartigen abbildenden Optik, ein Verfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Bauteils mit einer derartigen Projektionsbelichtungsanlage sowie ein mit diesem Verfahren hergestelltes mikrostrukturiertes Bauelement.

**[0002]** Abbildenden Optiken der eingangs genannten Art sind bekannt aus der US 6,750,948 B2, der US 2006/0232867 A1, der EP 0 267 766 A2, der US 7,209,286 B2 und der WO 2006/069 725 A1.

**[0003]** Die dort beschriebenen abbildenden Optiken haben beim Einsatz für EUV-Strahlung insbesondere mit einer Wellenlänge, die kleiner ist als 10 nm, aufgrund hoher Reflexionsverluste der Strahlung an den Spiegeln beim Durchgang durch die abbildende Optik nicht tolerierbare Transmissionseigenschaften.

**[0004]** Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine abbildende Optik der eingangs genannten Art derart weiterzubilden, dass gute Voraussetzungen für eine Reflexionsbeschichtung der Spiegel geschaffen sind, mit der geringe Reflexionsverluste für Abbildungsstrahlung beim Durchgang durch die abbildende Optik insbesondere auch bei Wellenlängen im EUV-Bereich kleiner als 10 nm realisiert werden können.

**[0005]** Diese Aufgabe ist erfindungsgemäß gelöst durch eine abbildende Optik mit den im Anspruch 1, den im Anspruch 4 sowie den in den Ansprüchen 7 und 8 angegebenen Merkmalen.

**[0006]** Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass eine abbildende Optik mit einem sehr geringen Verhältnis aus dem maximalen Einfallswinkel und der numerischen Apertur zur Möglichkeit führt, alle Reflexionsflächen der Spiegel der abbildenden Optik mit einer Mehrlagen-Beschichtung zu versehen, die, auf Kosten einer geringen Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite, eine hohe Reflektivität aufweist. Da bei der erfindungsgemäßen abbildenden Optik die Einfallswinkel nur in sehr geringem Maße variieren, kann eine solche Mehrlagen-Beschichtung mit geringer Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite eingesetzt werden. Das Verhältnis aus dem minimalen Einfallswinkel und der numerischen Apertur kann kleiner als 33,0°, kleiner als 32,5°, kleiner als 32,0°, kleiner als 31,5° und sogar kleiner als 30,7° sein.

**[0007]** Mindestens ein obskurierter Spiegel nach Anspruch 2 erleichtert das Design der abbildenden Optik im Blick auf eine Minimierung des maximalen Einfallswinkels bei gegebener bildseitiger numerischer Apertur.

**[0008]** Ein Design nach Anspruch 3 hat sich zur Minimierung des Verhältnisses aus dem maximalen Einfallswinkel und der bildseitigen numerischen Apertur als besonders geeignet herausgestellt.

**[0009]** Reflexionsbeschichtungen auf den Spiegeln nach den Ansprüchen 4 bis 6 erlauben eine Strukturauflösung, die kleiner ist als 10 nm. Mit einer abbildenden Optik nach Anspruch 5 lässt sich eine Strukturauflösung von 6 nm oder sogar eine Auflösung noch kleinerer Strukturen erreichen. Als Reflexionsbeschichtungen können B<sub>4</sub>C/CsI-Multilager zum Einsatz kommen.

**[0010]** Jede Multilager-Reflexionsbeschichtung kann aus 300 B<sub>4</sub>C/CsI-Bilayern aufgebaut sein. Eine Schichtdicke der einzelnen Bilayer kann mit zunehmendem Abstand der Schicht von einer optischen Achse der abbildenden Optik parabolisch zunehmen. Hierdurch erhöht sich die Reflektivität der Spiegel für am Spiegelrand stärker von der senkrechten Incidenz abweichende Einfallswinkel.

**[0011]** Eine abbildende Optik mit einem Auflösungsvermögen nach den Anspruch 7 oder 8 ermöglicht die Auflösung feinsten Strukturen. Auf diese Weise können höchstintegrierte mikro- bzw. nanostrukturierte Bauelemente hergestellt werden. Die numerischen Aperturen nach Anspruch 8 sind zur Erzielung dieses Auflösungsvermögens noch relativ moderat, wobei bevorzugt eine bildseitige numerische Apertur zum Einsatz kommt, die höchstens 0,4 beträgt. Dies erleichtert das Design der abbildenden Optik.

**[0012]** Die erfindungsgemäße abbildende Optik kann die vorstehend diskutierten Merkmale auch in anderen als den beanspruchten Kombinationen aufweisen.

**[0013]** Die Vorteile einer Projektionsbelichtungsanlage nach den Ansprüchen 9 und 10 entsprechen denen, die vorstehend in Bezug auf die erfindungsgemäße abbildende Optik ausgeführt wurden. Die Lichtquelle der Projektionsbelichtungsanlage kann breitbandig ausgeführt sein und beispielsweise eine Bandbreite haben, die größer ist als 1 nm, die größer ist als 10 nm oder die größer ist als 100 nm. Zudem kann die Projektionsbelich-

tungsanlage so ausgeführt sein, dass sie mit Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlängen betrieben werden kann. Auch Lichtquellen für andere, insbesondere für die Mikrolithographie eingesetzte Wellenlängen, sind im Zusammenhang mit der erfindungsgemäßen abbildenden Optik einsetzbar, beispielsweise Lichtquellen mit den Wellenlängen 365 nm, 248 nm, 193 nm, 157 nm, 126 nm, 109 nm und insbesondere auch mit Wellenlängen, die kleiner sind als 100 nm. Je nach verwendeter Wellenlänge wird dann eine entsprechend angepasste Beschichtung der optischen Flächen benötigt.

**[0014]** Eine Lichtquelle nach Anspruch 10 erfordert Reflexionsbeschichtungen auf den Spiegeln, die, um eine Mindestreflektivität zu erfüllen, nur eine geringe Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite haben. Mit der erfindungsgemäßen abbildenden Optik kann diese Forderung einer geringen Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite erfüllt werden.

**[0015]** Entsprechende Vorteile gelten für das Herstellungsverfahren nach Anspruch 11 und das hierdurch hergestellte mikro- bzw. nanostrukturierte Bauteil nach Anspruch 12.

**[0016]** Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnung näher erläutert. In dieser zeigen:

**[0017]** [Fig. 1](#) schematisch eine Projektionsbelichtungsanlage für die EUV-Mikrolithographie;

**[0018]** [Fig. 2](#) ein Ausführungsbeispiel einer abbildenden Optik der Projektionsbelichtungsanlage, dargestellt im Meridionalschnitt;

**[0019]** [Fig. 3](#) vergrößert ein Objektfeld der abbildenden Optik nach [Fig. 2](#);

**[0020]** [Fig. 4](#) einen Schnitt durch Abbildungsstrahlen ausgewählter Feldpunkte sowie durch eine optische Achse der abbildenden Optik nach [Fig. 2](#) im Bereich einer Objektebene von dieser;

**[0021]** [Fig. 5](#) einen Schnitt durch die Abbildungsstrahlen nach [Fig. 4](#) durch eine Ebene V-V in [Fig. 2](#);

**[0022]** [Fig. 6](#) einen Schnitt durch die Abbildungsstrahlen nach [Fig. 4](#) durch eine Ebene VI-VI in [Fig. 2](#);

**[0023]** [Fig. 7](#) ein Ergebnis einer partiell kohärenten Luftbildberechnung einer Strukturabbildung mit der abbildenden Optik nach [Fig. 2](#) in Form eines Diagramms, welches eine relative Intensität der Abbildungsstrahlen als Funktion einer Verlagerung im Bildfeld der abbildenden Optik darstellt;

**[0024]** [Fig. 8](#) in einer zu [Fig. 7](#) ähnlichen Darstellung das Ergebnis einer partiell kohärenten Luftbildberechnung einer Strukturabbildung mit im Vergleich zu [Fig. 7](#) geringerer Strukturbreite;

**[0025]** [Fig. 9](#) in einer zu [Fig. 2](#) ähnlichen Darstellung ein weiteres Ausführungsbeispiel einer abbildenden Optik für die Projektionsbelichtungsanlage nach [Fig. 1](#);

**[0026]** [Fig. 10](#) in einer zu [Fig. 4](#) ähnlichen Darstellung Durchstoßpunkte von Abbildungsstrahlen ausgewählter Feldpunkte der abbildenden Optik nach [Fig. 9](#);

**[0027]** [Fig. 11](#) einen Schnitt durch die Abbildungsstrahlen nach [Fig. 10](#) durch eine Ebene XI-XI in [Fig. 9](#);

**[0028]** [Fig. 12](#) einen Schnitt durch die Abbildungsstrahlen nach [Fig. 10](#) durch eine Ebene XII-XII in [Fig. 9](#);

**[0029]** [Fig. 13](#) einen Schnitt durch einen Ausschnitt eines der Spiegel der Ausführungsbeispiele der abbildenden Optik, wobei der Schnitt senkrecht durch eine Reflexionsbeschichtung einer Reflexionsfläche des Spiegels geführt ist; und

**[0030]** [Fig. 14](#) ein Diagramm, welches die Reflektivität von Reflexionsbeschichtungen nach Art von [Fig. 13](#) in Abhängigkeit vom Einfallswinkel von Abbildungsstrahlung auf der Reflexionsfläche des Spiegels für zwei auf verschiedene Einfallswinkel optimierte Reflexionsbeschichtungen darstellt.

**[0031]** Eine Projektionsbelichtungsanlage 1 für die Mikrolithographie hat eine Lichtquelle 2 für Beleuchtungslicht bzw. Beleuchtungsstrahlung 3. Bei der Lichtquelle 2 handelt es sich um eine EUV-Lichtquelle, die Licht in einem Wellenlängenbereich beispielsweise zwischen 5 nm und 30 nm, insbesondere zwischen 5 nm und 10

nm erzeugt. Bei der Lichtquelle **2** kann es sich insbesondere um eine Lichtquelle mit einer Wellenlänge von 6,9 nm handeln. Auch andere EUV-Wellenlängen sind möglich. Generell sind sogar beliebige Wellenlängen, zum Beispiel sichtbare Wellenlängen oder auch andere Wellenlängen, die in der Mikrolithographie Verwendung finden können und für die geeigneten Laserlichtquellen und/oder LED-Lichtquellen zur Verfügung stehen (beispielsweise 365 nm, 248 nm, 193 nm, 157 nm, 129 nm, 109 nm), für das in der Projektionsbelichtungsanlage **1** geführte Beleuchtungslicht **3** möglich. Ein Strahlengang des Beleuchtungslichts **3** ist in der [Fig. 1](#) äußerst schematisch dargestellt.

**[0032]** Zur Führung des Beleuchtungslichts **3** von der Lichtquelle **2** hin zu einem Objektfeld **4** (vgl. [Fig. 3](#)) in einer Objektebene **5** dient eine Beleuchtungsoptik **6**. Mit einer Projektionsoptik bzw. abbildenden Optik **7** wird das Objektfeld **4** in ein Bildfeld **8** (vgl. [Fig. 2](#)) in einer Bildebene **9** mit einem vorgegebenen Verkleinerungsmaßstab abgebildet. Für die Projektionsoptik **7** kann eines der in den [Fig. 2](#) ff. dargestellten Ausführungsbeispiele eingesetzt werden. Die Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) verkleinert um einen Faktor **8**. Auch andere Verkleinerungsmaßstäbe sind möglich, zum Beispiel 4x, 5x oder auch Verkleinerungsmaßstäbe, die größer sind als 8x. Für das Beleuchtungslicht **3** mit EUV-Wellenlänge eignet sich insbesondere ein Abbildungsmaßstab von 8x, da hierdurch ein objektseitiger Einfallswinkel auf einer Reflexionsmaske **10** klein gehalten werden kann. Ein Abbildungsmaßstab von 8x führt zudem nicht zur Notwendigkeit, unnötig große Masken einzusetzen. Die Bildebene **9** ist bei der Projektionsoptik **7** in den Ausführungen nach den [Fig. 2](#) ff. parallel zur Objektebene **5** angeordnet. Abgebildet wird hierbei ein mit dem Objektfeld **4** zusammenfallender Ausschnitt der Reflexionsmaske **10**, die auch als Retikel bezeichnet wird.

**[0033]** Die Abbildung durch die Projektionsoptik **7** erfolgt auf die Oberfläche eines Substrats **11** in Form eines Wafers, der von einem Substrathalter **12** getragen wird. In der [Fig. 1](#) ist schematisch zwischen dem Retikel **10** und der Projektionsoptik **7** ein in diese einlaufendes Strahlenbündel **13** des Beleuchtungslichts **3** und zwischen der Projektionsoptik **7** und dem Substrat **11** ein aus der Projektionsoptik **7** auslaufendes Strahlenbündel **14** des Beleuchtungslichts bzw. Abbildungslichts **3** dargestellt. Eine bildfeldseitige numerische Apertur der Projektionsoptik **7** in der Ausführung nach [Fig. 2](#) beträgt 0,40. Dies ist in der [Fig. 1](#) nicht maßstäblich wiedergegeben.

**[0034]** Zur Erleichterung der Beschreibung der Projektionsbelichtungsanlage **1** sowie der verschiedenen Ausführungen der Projektionsoptik **7** ist in der Zeichnung ein kartesisches xyz-Koordinatensystem angegeben, aus dem sich die jeweilige Lagebeziehung der in den Figuren dargestellten Komponenten ergibt. In der [Fig. 1](#) verläuft die x-Richtung senkrecht zur Zeichenebene in diese hinein. Die y-Richtung verläuft nach rechts und die z-Richtung nach unten.

**[0035]** Die Projektionsbelichtungsanlage **1** ist vom Scannertyp. Sowohl das Retikel **10** als auch das Substrat **11** werden beim Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage **1** in der y-Richtung gescannt. Auch ein Steppertyp der Projektionsbelichtungsanlage **1**, bei dem zwischen einzelnen Belichtungen des Substrats **11** eine schrittweise Verlagerung des Retikels **10** und des Substrats **11** in der y-Richtung erfolgt, ist möglich.

**[0036]** [Fig. 2](#) zeigt das optische Design einer ersten Ausführung der Projektionsoptik **7**. Dargestellt ist der Strahlengang jeweils dreier Einzelstrahlen **15**, die von zwei in der [Fig. 2](#) zueinander in der y-Richtung beabstandeten Objektfeldpunkten ausgehen. Die drei Einzelstrahlen **15**, die zu einem dieser zwei Objektfeldpunkte gehören, sind jeweils drei unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen für die zwei Objektfeldpunkte zugeordnet. Hauptstrahlen **16**, die durch das Zentrum einer Pupillenebene **17** der Projektionsoptik **7** verlaufen, sind in der [Fig. 2](#) nur aus darstellerischen Gründen eingezeichnet, da es sich aufgrund der zentralen Pupillenobskuration nicht um reale Abbildungsstrahlengänge der Projektionsoptik **7** handelt. Diese Hauptstrahlen **16** verlaufen, ausgehend von der Objektebene **5**, zunächst divergent. Dies wird nachfolgend auch als negative Schnittweite einer Eintrittspupille der Projektionsoptik **7** bezeichnet. Die Eintrittspupille der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) liegt nicht innerhalb der Projektionsoptik **7**, sondern im Strahlengang vor der Objektebene **5**. Dies ermöglicht es beispielsweise, im Strahlengang vor der Projektionsoptik **7** eine Pupillenkomponente der Beleuchtungsoptik **6** in der Eintrittspupille der Projektionsoptik **7** anzuordnen, ohne dass zwischen dieser Pupillenkomponente und der Objektebene **5** weitere abbildende optische Komponenten vorhanden sein müssen. Alternativ hierzu ist auch eine positive Schnittweite der Eintrittspupille oder als weitere Alternative ein objektseitig telezentrischer Strahlengang möglich. Letzterer wird beispielsweise im Zusammenhang mit einer Reflexionsmaske als Retikel **10** in der Objektebene **5** unter Zuhilfenahme eines Strahlteilerelements oder in Verbindung mit einer Transmissionsmaske als Retikel in der Objektebene **5** eingesetzt.

**[0037]** Die Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) hat insgesamt sechs Spiegel, die in der Reihenfolge des Strahlengangs der Einzelstrahlen **15**, ausgehend vom Objektfeld **4**, mit M1 bis M6 durchnummeriert sind. Dargestellt sind in der [Fig. 2](#) lediglich die berechneten Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6. Die Spiegel M1 bis M6

sind in der Regel größer als die tatsächlich genutzten Reflexionsflächen.

**[0038]** Die optischen Daten der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) werden nachfolgend anhand zweier Tabellen wiedergegeben. Die erste Tabelle zeigt in der Spalte „Radius“ jeweils den Krümmungsradius der Spiegel M1 bis M6. Die dritte Spalte (Dicke) beschreibt den Abstand, ausgehend von der Objektebene **5**, jeweils zur nachfolgenden Oberfläche in z-Richtung.

**[0039]** Die zweite Tabelle beschreibt die genaue Oberflächenform der Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6, wobei die Konstanten K sowie A bis E in folgende Gleichung für die Pfeilhöhe z einzusetzen sind:

$$z(h) = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2 h^2}} + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12}$$

**[0040]** h stellt hierbei den Abstand zu einer optischen Achse **18** der Projektionsoptik **7** dar. Es gilt also  $h^2 = x^2 + y^2$ . Für c wird der Kehrwert von „Radius“ eingesetzt.

Oberfläche	Radius (1/c)	Dicke	Betriebsmodus
Objektebene	UNENDLICH	348,222	
M1	-379,407	-157,578	REFL
M2	-202,767	1353,319	REFL
BLLENDE	UNENDLICH	0,000	
M3	1127,182	-1195,630	REFL
M4	1374,690	1626,377	REFL
M5	-975,061	-330,747	REFL
M6	681,443	375,745	REFL
Bildebene	UNENDLICH	0,000	

Oberfläche	K	A	B
M1	0,000000E+00	-6,780209E-11	-1,455553E-15
M2	0,000000E+00	2,307286E-09	2,337524E-14
M3	0,000000E+00	1,500225E-09	1,781600E-14
M4	0,000000E+00	-1,573831E-12	-8,140292E-19
M5	0,000000E+00	6,446612E-10	2,597249E-15
M6	0,000000E+00	3,799673E-10	1,680031E-15
Oberfläche	C	D	E
M1	-3,423358E-21	0,000000E+00	0,000000E+00
M2	5,367802E-18	0,000000E+00	0,000000E+00
M3	-2,232896E-19	0,000000E+00	0,000000E+00
M4	-5,798511E-26	0,000000E+00	0,000000E+00
M5	4,409975E-20	1,865473E-25	-9,721913E-32
M6	5,791990E-21	0,000000E+00	0,000000E+00

**[0041]** Die Spiegel M1 und M2 einer ersten Spiegelgruppe **19** werden ringsegmentförmig und in Bezug auf die optische Achse **18** off-axis genutzt. Die genutzte optische Reflexionsfläche der Spiegel M1 und M2 liegt also von der optischen Achse **18** entfernt. Das Objektfeld **4** und das Bildfeld **8** sind beabstandet zur optischen Achse **18** angeordnet. Die Reflexionsflächen aller Spiegel M1 bis M6 sind gemäß obiger Gleichung für die Pfeilhöhe z in Bezug auf die optische Achse **18** rotationssymmetrisch.

**[0042]** Die optisch genutzten Bereiche der Spiegel M1 und M2 haben keine Durchgangsöffnung zum Durchtritt von Abbildungslicht, sind also nicht obskuriert. Bei der ersten Spiegelgruppe **19** handelt es sich also um

eine nicht obskurierte Spiegelgruppe. Die Reflexionsflächen der Spiegel M1 und M2 sind einander zugewandt.

**[0043]** Die Spiegel M1, M4, M5 und M6 sind als Konkavspiegel ausgeführt. Die Spiegel M2 und M3 sind als Konvexspiegel ausgeführt.

**[0044]** Im Abbildungsstrahlengang zwischen den Spiegeln M2 und M3 durchtreten die Einzelstrahlen **15** eine Durchgangsöffnung **20** im Spiegel M4. Der Spiegel M4 wird um die Durchgangsöffnung **20** herum genutzt. Beim Spiegel M4 handelt es sich also um einen obskurierten Spiegel. Neben dem Spiegel M4 sind auch die Spiegel M3, M5 und M6 obskuriert, die ebenfalls jeweils eine nahezu zentrische Durchgangsöffnung **20** aufweisen. Insgesamt liegen bei der Projektionsoptik **7** also zunächst zwei nicht obskurierte Spiegel, nämlich die Spiegel M1 und M2, und nachfolgend vier obskurierte Spiegel, nämlich die Spiegel M3 bis M6, vor.

**[0045]** Die Pupillenebene **17** liegt im Strahlengang in der Projektionsoptik **7** im Bereich der Reflexion der Einzelstrahlen **15** am Spiegel M3.

**[0046]** Die Spiegel M1 und M4 sind, was die Orientierung ihrer Reflexionsflächen angeht, Rücken an Rücken angeordnet.

**[0047]** Im Abbildungsstrahlengang zwischen den Spiegeln M4 und M5 liegt eine Zwischenbildebene **21** der Projektionsoptik **7**. Die Einzelstrahlen **15** durchtreten die Zwischenbildebene **21** direkt nach dem Durchgang der Einzelstrahlen **15** durch die Durchtrittsöffnung **20** des Spiegels M3.

**[0048]** Die Spiegel M3 und M4 stellen eine erste obskurierte Spiegelgruppe **22** der Projektionsoptik **7** zwischen der Pupillenebene **17** und der Zwischenbildebene **21** dar, die der nicht obskurierten Spiegelgruppe **19** im Abbildungsstrahlengang nachgeordnet ist. Die Reflexionsflächen der Spiegel M3 und M4 sind einander zugewandt.

**[0049]** Im Strahlengang zwischen der Zwischenbildebene **21** und dem Spiegel M5 durchtreten die Einzelstrahlen **15** die Durchgangsöffnung **20** im Spiegel M6. Im Bereich der Reflexion der Einzelstrahlen **15** am Spiegel M5 liegt eine weitere Pupillenebene **23** der Projektionsoptik **7** vor.

**[0050]** Die Spiegel M5 und M6 stellen eine weitere obskurierte Spiegelgruppe **24** der Projektionsoptik **7** zwischen der Zwischenbildebene **20** und der Bildebene **9** dar, die der obskurierten Spiegelgruppe **22** nachgeordnet ist. Die Reflexionsflächen der Spiegel M5 und M6 sind einander zugewandt.

**[0051]** Nach der Reflexion der Einzelstrahlen **15** am Spiegel M6 durchtreten die Einzelstrahlen **15** die Durchgangsöffnung **20** im Spiegel M5 und erreichen das Bildfeld **8**. Die nachfolgende Tabelle zeigt die maximalen und minimalen Einfallswinkel für die Einzelstrahlen **15** im Meridionalschnitt nach [Fig. 2](#). Es handelt sich hierbei jeweils um die maximalen und minimalen Einfallswinkel auf den Spiegeln M1 bis M6.

Spiegel	max. Einfallswinkel (Meridionalschnitt) [°]	min. Einfallswinkel (Meridionalschnitt) [°]
M1	7,52	5,87
M2	12,35	9,16
M3	10,38	0,81
M4	2,35	0,42
M5	12,10	1,66
M6	10,41	2,19

**[0052]** Ein Verhältnis aus dem maximalen Einfallswinkel von Abbildungsstrahlung auf den Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6 und der numerischen Apertur der Projektionsoptik **7** ist also vorgegeben durch den maximalen Einfallswinkel auf dem Spiegel M2, der 12,35° beträgt. Das Verhältnis aus diesem maximalen Einfallswinkel und der numerischen Apertur beträgt bei der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) also 30,9°.

**[0053]** Der kleine maximale Einfallswinkel führt zur Möglichkeit, eine Reflexionsbeschichtung auch für kleine EUV-Wellenlängen beispielsweise im Bereich von 6,9 nm einzusetzen, die aufgrund des kleinen maximalen Einfallswinkels eine vergleichsweise große Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite haben. Dies wird nachfolgend noch anhand der



[0054] **Fig. 14** erläutert. Diese Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite der Reflexionsbeschichtung vergrößert sich, je kleiner der maximale Einfallswinkel ist, für den die Reflexionsbeschichtung ausgelegt ist. Auch Reflexionsbeschichtungen, die als Schichtstapel mit einer großen Anzahl insbesondere alternierend aufeinanderfolgender Schichtmaterialien mit unterschiedlichem Brechungsindex ausgeführt sind, sind möglich. Derartige Beschichtungen haben beim Einsatz vom Beleuchtungslicht **3** mit einer Wellenlänge, die kleiner ist als 10 nm, eine entsprechend geringe Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite. Die Beleuchtungsoptik **7** kann daher mit im Vergleich zum Stand der Technik geringeren Reflexionsverlusten sowie mit geringeren Unterschieden in der Reflektivität der einzelnen Spiegel über deren Reflexionsfläche auch bei derart geringen Wellenlängen eingesetzt werden.

[0055] Die optische Achse **18** ist in der **Fig. 2** strichpunktiert angedeutet. Diese strichpunktierte Linie stellt gleichzeitig die Schnittlinie einer Haupt-Trennebene **25** (xz-Ebene in der **Fig. 2**) mit der Meridionalebene (yz-Ebene in der **Fig. 2**) nach **Fig. 2** dar. Diese Haupt-Trennebene **25** steht senkrecht auf der Zeichenebene der **Fig. 2**. In der Haupt-Trennebene **25** liegt die optische Achse **18**. Zudem steht eine Normale **26** von einem in der Meridionalebene nach **Fig. 2** liegenden zentralen Objektfeldpunkt auf die optische Achse **18** senkrecht auf der Haupt-Trennebene **25**. Diese Normale **26** liegt ebenfalls in der Zeichenebene nach **Fig. 2** und fällt mit der Schnittlinie der Objektebene **5** (xy-Ebene in der **Fig. 2**) mit der Meridionalebene, also der Zeichenebene nach **Fig. 2**, zusammen.

[0056] Die im Meridionalschnitt verlaufenden Abbildungsstrahlen des optischen Systems durchtreten in der ersten, nicht obskurierten Spiegelgruppe **19** der Projektionsoptik **7** die Haupt-Trennebene **25** nicht. Die Haupt-Trennebene **25** wird erst von Einzelstrahlen **15** nach der Reflexion am Spiegel M2 im Abbildungsstrahlengang zwischen den Spiegeln M2 und M3, also am Übergang zwischen den Spiegelgruppen **19** und **22**, durchtreten. Von den Hauptstrahlen **16** wird die Haupt-Trennebene **25** erst in der Pupillenebene **17** durchtreten.

[0057] **Fig. 3** zeigt vergrößert das Objektfeld **4** der Projektionsoptik **7**. Das Bildfeld **8** hat, abgesehen davon, dass es um einen Faktor **8** verkleinert ist, exakt die gleiche Form. Das Feld **4** hat die Form eines Bogenfeldes, das begrenzt ist durch zwei Teilkreise **27**, **28** mit gleichem Radius R, die zueinander in der y-Richtung um einen Abstand YS parallel verschoben sind. Zudem ist das Feld **4** begrenzt durch zwei die beiden Enden der Teilkreise **27**, **28** jeweils verbindende Grenzlinien **29**, **30**, die parallel zur Normalen **26** verlaufen. Die beiden Grenzlinien **29**, **30** weisen zueinander einen Abstand XS, die sogenannte Scanschlitzbreite, auf. Die Haupt-Trennebene **25** durchtritt die beiden Grenzlinien **29**, **30** mittig. Die optische Achse **18** liegt daher genau zwischen den Mitten der beiden Grenzlinien **29**, **30**. Das Feld **4** ist aufgrund dieser Anordnung der optischen Achse **18** zwischen den Grenzlinien **29**, **30** daher ein Feld mit einem minimalen Ringfeldradius R. Dieser ist gegeben durch folgende Beziehung:

$$R = SQRT \left[ \left( \frac{XS}{2} \right)^2 + \left( \frac{YS}{2} \right)^2 \right]$$

[0058] Das Objektfeld **4** hat bei der Projektionsoptik **7** nach **Fig. 2** die Dimensionen XS = 104 mm (Scanschlitzbreite) und YS = 8 mm (Scanschlitzlänge). Hieraus ergibt sich ein Ringfeldradius R des Objektfelds **4** von 52,154 mm.

[0059] Zwischen den Grenzlinien **29**, **30** und dem in der **Fig. 3** oben dargestellten Teilkreis **28** hat das Feld **4** Begrenzungsübergänge **31**, **32**, wo der Teilkreis **28** in die gerade verlaufenden Grenzlinien **29**, **30** übergeht. Zwischen den Begrenzungsübergängen **31**, **32** überstreicht ein Feldradiusvektor **33** einen Azimutwinkel  $\alpha$ , der sich durch folgende Formel berechnet:

$$\alpha = 2 \arcsin(\frac{1}{2}XS/R)$$

[0060] Für das Objektfeld **4** ergibt sich ein Azimutwinkel  $\alpha$  von 171,2°. Den gleichen Azimutwinkel hat das Bildfeld **8**. Dieser hohe Azimutwinkel führt dazu, dass bei einer gegebenen XS-Erstreckung das Feld **4** maximal nahe an der optischen Achse **18** angeordnet ist. Dies erleichtert eine Abbildungsfehlerkorrektur bei der Abbildung durch das Projektionsobjektiv **7** zwischen dem Objektfeld **4** und dem Bildfeld **8**. Zudem führt der große Azimutwinkel zu kleinen Parentdurchmessern und zu kleinen Asphäritäten der Spiegel M1 bis M6. Der Parentdurchmesser eines Spiegels ist definiert in dem Fachartikel „EUV Engineering Test Stand“ von D. A. Tichenor et al., Lawrence Livermore National Laboratory, 14.02.2000, Fig. 6 (preprint UCRL-JC-137668). Zudem ist es bei dem großem Azimutwinkel möglich, die Einfallswinkel auf den Spiegeln M1 bis M6 klein zu halten.

[0061] [Fig. 4](#) bis [Fig. 6](#) zeigen den Verlauf von Strahlenbündeln **34** zu ausgewählten Objektfeldpunkten innerhalb der nicht obskurieren Spiegelgruppe **19**. Die Strahlenbündel **34** aller Strahlenbündel-Gruppen, die nachfolgend im Zusammenhang mit den [Fig. 4](#) bis [Fig. 6](#) erläutert werden, sind jeweils den gleichen fünfundzwanzig Objektfeldpunkten zugeordnet. Dargestellt sind die Strahlenbündel **34** von insgesamt fünf Strahlenbündel-Gruppen **35**, **36**, **37**, **38**, **39**. Die Strahlenbündel-Gruppen **35** bis **39** sind in der [Fig. 4](#) von links nach rechts durchnummeriert. Jede Strahlenbündel-Gruppe **35** bis **39** hat fünf Strahlenbündel **34**, die zu Objektfeldpunkten mit dem gleichen x-Wert gehören und in y-Richtung äquidistant zueinander beabstandet sind. Die in der [Fig. 4](#) mittlere Strahlenbündel-Gruppe **37** gehört zu in der Meridionalebene gelegenen Objektfeldpunkten.

[0062] [Fig. 4](#) zeigt die Strahlenbündel **34** in der Nähe der Objektebene **5**, so dass die Form des bogenförmigen Objektfelds **4** erkennbar ist. Die beiden randseitigen Strahlenbündel-Gruppen **35** und **39** gehen von auf den Grenzlinien **29**, **30** liegenden Objektfeldpunkten aus. Die Darstellung nach [Fig. 4](#) ist in y-Richtung gestaucht, so dass der Bogenfeldradius  $R$  in y-Richtung kleiner erscheint als in x-Richtung.

[0063] Der Feldradiusvektor  $R$ , der zur mittleren Strahlenbündel-Gruppe **37** gehört, zeigt in der [Fig. 4](#) nach oben. Die Strahlenbündel-Gruppen **35** bis **39** bilden in der [Fig. 4](#) einen Halbkreis um die optische Achse **18**, der nach unten geöffnet ist.

[0064] [Fig. 5](#) zeigt die Strahlenbündel **34** in einer Schnittebene  $V$  der [Fig. 2](#), also im Bereich des Spiegels  $M1$ . Am Spiegel  $M1$  reflektierte Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** liegen auf einem Ringsegment und bilden in der [Fig. 5](#) einen äußeren Halbkreis um die optische Achse **18**, der nach unten geöffnet ist.

[0065] Weiterhin wird die Ebene  $V$  von Strahlenbündel-Gruppen **45** bis **49** durchtreten, die im Strahlengang zwischen den Spiegeln  $M2$  und  $M3$  verlaufen.

[0066] Auch die Strahlenbündel-Gruppen **45** bis **49** bilden einen Halbkreis um die optische Achse **18**, der in der [Fig. 5](#) nach unten geöffnet ist. Der Halbkreis der Strahlenbündel-Gruppen **45** bis **49** liegt dabei zwischen der optischen Achse **18** und dem Halbkreis, der durch die Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** gebildet ist.

[0067] Aufgrund der Tatsache, dass sich die beiden Halbkreise der Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** einerseits und **45** bis **49** andererseits jeweils nach unten öffnen, lässt sich bei kompakter Anordnung der Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **49** ein ausreichend großer Minimalabstand zwischen den einzelnen Strahlenbündeln **34** der Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** einerseits und **45** bis **49** andererseits realisieren. Dieser Abstand ist in der [Fig. 5](#) mit  $A$  bezeichnet. Zwischen den Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** einerseits und **45** bis **49** andererseits lässt sich also ohne weiteres die Durchgangsöffnung **20** im Spiegel  $M4$  begrenzen, wie in der [Fig. 5](#) durch eine strichpunktierte Linie angedeutet. In der Praxis ist der Abstand  $A$  notwendig, da in der Regel die Spiegel  $M1$  bis  $M6$  nicht in Perfektion randscharf hergestellt werden können. Zudem dient der Abstand  $A$  als Toleranz für die Systemmontage und Justage. Üblicherweise beträgt der Abstand  $A$  einige Millimeter.

[0068] [Fig. 6](#) zeigt in einer zu [Fig. 5](#) ähnlichen Darstellung die Strahlenbündel **34** zu den fünfundzwanzig Objektfeldpunkten in einer Ebene  $VI$ , in deren Bereich der Spiegel  $M2$  angeordnet ist. Benachbart zur optischen Achse **18** liegen Strahlenbündel-Gruppen **50**, **51**, **52**, **53**, **54** am Ort der Reflexion der Strahlenbündel **34** am Spiegel  $M2$ . Die Strahlenbündel-Gruppen **50** bis **54** sind in einem Halbkreis angeordnet, der sich in der [Fig. 6](#) nach unten hin öffnet. Dieser Halbkreis wird umgeben von einem sich ebenfalls nach unten öffnenden Halbkreis aus Strahlenbündel-Gruppen **55** bis **59**, die die Ebene  $VI$  im Abbildungsstrahlengang zwischen der Objektebene **5** und dem Spiegel  $M1$  durchtreten. Auch in der Ebene  $VI$  sind die Halbkreis-Öffnungen der Halbkreise, die den Strahlenbündel-Gruppen **50** bis **54** einerseits und **55** bis **59** andererseits zugeordnet sind, also in der gleichen Richtung geöffnet, so dass zwischen diesen Strahlenbündel-Gruppen **50** bis **54** einerseits und **55** bis **59** andererseits ein Abstand  $A$  bei gleichzeitig kompakter Anordnung gewährleistet ist. Auch hier ist daher eine randseitige Begrenzung **60** des Spiegels  $M2$  ohne Vignettierung der Strahlenbündel-Gruppen **50** bis **54** einerseits und **55** bis **59** andererseits möglich, wie in der [Fig. 6](#) strichpunktiert angedeutet.

[0069] Zwischen den Ebenen  $V$  und  $VI$  durchlaufen die Einzelstrahlen **15** also einen Mehrfachdurchgangsbereich **61** (vgl. [Fig. 2](#)). Dieser Mehrfachdurchgangsbereich **61** wird insgesamt dreifach durchlaufen, nämlich einerseits von Einzelstrahlen **15** zwischen der Objektebene **5** und dem Spiegel  $M1$ , andererseits von Einzelstrahlen **15** zwischen den Spiegeln  $M1$  und  $M2$  und zum dritten von Einzelstrahlen **15** zwischen den Spiegeln  $M2$  und  $M3$ . Im Mehrfachdurchgangsbereich **61** liegt keine Pupillenebene der Projektionsoptik **7**. Die Pupillenebenen **17** und **23** sind außerhalb des Mehrfachdurchgangsbereichs **61** angeordnet.

[0070] [Fig. 7](#) zeigt das Ergebnis einer partiell kohärenten Luftbildberechnung des Projektionsobjektivs **7**. Dar-



gestellt ist ein Diagramm, bei dem nach oben eine relative Intensität  $I$  in Abhängigkeit von einer nach rechts aufgetragenen Position  $V$  im Bildfeld **8** aufgetragen ist. Das Diagramm nach [Fig. 7](#) zeigt das Ergebnis einer Abbildung einer Rechteckstruktur mit insgesamt sieben Einzelstrukturen B mit einer bildseitigen Strukturbreite von 10 nm und Zwischenräumen C mit einem bildseitigen Strukturabstand ebenfalls von 10 nm. Die objektseitige Strukturbreite ergibt sich aus der bildseitigen Strukturbreite über den Abbildungsmaßstab und beträgt im vorliegenden Fall  $8 \times 10 \text{ nm} = 80 \text{ nm}$ . Diese Struktur ist im Objektfeld **4**, also auf dem Retikel **10**, angeordnet. Als in etwa sinusförmige Linien sind im Diagramm nach [Fig. 7](#) die relativen Intensitäten bei verschiedenen  $y$ -Werten während eines Scans durch das Bildfeld **8** aufgetragen. Die Wellenlänge des Abbildungslichts beträgt 6,9 nm.

**[0071]** Die relativen Intensitäten schwanken zwischen etwa 0,06 am Ort der 10 nm-Strukturen B und 0,62 in der Mitte der 10 nm-Zwischenräume C.

**[0072]** Aufgrund der deutlichen Änderung der relativen Intensität zwischen den Strukturbereichen B und den Strukturzwischenräumen C ist diese 10 nm-Struktur ohne weiteres in der Bildebene **9** auflösbar und kann zur Herstellung einer entsprechenden Struktur im Bildfeld **8** durch Belichtung eines entsprechenden Photoresists auf dem Substrat **11** genutzt werden.

**[0073]** [Fig. 8](#) zeigt in einer zu [Fig. 7](#) ähnlichen Darstellung das Ergebnis einer partiell kohärenten Luftbildberechnung des Projektionsobjektivs **7** nach [Fig. 2](#) bei einer Strukturauflösung von Strukturen B mit Strukturzwischenräumen C mit einer Ausdehnung von bildseitig jeweils 6 nm. Auch hier wurde eine Wellenlänge von 6,9 nm eingesetzt. Die relative Intensität variiert hierbei ebenfalls in etwa sinusförmig von einem Wert von etwa 0,2 in der Mitte der Strukturen B bis hin zu etwa 0,37 in der Mitte des Zwischenraums C zwischen den Strukturen B. Auch die 6 nm-Strukturen lassen sich daher mit für eine Photoresist-Entwicklung ausreichender Intensitätsvariation abbilden.

**[0074]** Auch hier wurde eine Wellenlänge von 6,9 nm eingesetzt.

**[0075]** [Fig. 9](#) zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Projektionsoptik **7**. Komponenten sowie Einzelheiten, die denjenigen entsprechen, die unter Bezugnahme auf die [Fig. 1](#) bis [Fig. 8](#) bereits erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugsziffern und werden nicht nochmals im Einzelnen diskutiert.

**[0076]** Die optischen Daten der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 9](#) werden nachfolgend anhand zweier Tabellen wiedergegeben, die vom Aufbau her den Tabellen der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) entsprechen.

Oberfläche	Radius (1/c)	Dicke Betriebsmodus
Objektebene	UNENDLICH	320,330
M1	-393,803	-170,123 REFL
M2	-208,260	1326,985 REFL
BLLENDE	UNENDLICH	0,000
M3	3524,853	-1156,745 REFL
M4	1373,092	1633,832 REFL
M5	-2070,870	-417,088 REFL
M6	729,502	462,810 REFL
Bildebene	UNENDLICH	0,000

Oberfläche	K	A	B
M1	0,000000E+00	-1,464839E-15	-2,256168E-10
M2	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00
M3	0,000000E+00	1,686353E-09	1,384199E-14
M4	0,000000E+00	-1,141200E-12	-1,895182E-19
M5	0,000000E+00	3,648003E-10	9,829850E-16
M6	0,000000E+00	1,500658E-10	5,461440E-16
Oberfläche	C	D	E
M1	-9,891998E-20	4,705529E-24	-1,095685E-28
M2	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00
M3	4,803348E-20	6,493470E-24	-2,340102E-29
M4	1,242408E-24	-7,309532E-30	1,625546E-35
M5	1,150420E-20	-2,504098E-25	2,419328E-30
M6	1,394218E-21	6,518915E-27	1,785169E-32

**[0077]** Die Ausführung nach [Fig. 9](#) hat eine numerische Apertur von 0,50. Die Zwischenbildebene **21** liegt im Strahlengang zwischen den Spiegeln M4 und M5 räumlich vor dem Spiegel M3 und zu diesem benachbart. Der Spiegel M2 ist sphärisch. Ansonsten entspricht das Design der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 9](#) dem der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#).

**[0078]** In der nachfolgenden Tabelle sind die maximalen Einfallswinkel für die Einzelstrahlen **15** auf den Spiegeln M1 bis M6 zusammengestellt. Die dritte Spalte zeigt zudem die maximale Abweichung der Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6 von einer Kugelfläche, die der Reflexionsfläche fehlerminimiert angepasst ist (Best Fit-Sphäre). Die maximale Abweichung beträgt 180 µm. Damit sind die Asphäritäten aller Spiegel M1 bis M6 der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 9](#) klein und der Spiegel M2 ist sogar sphärisch, was die Herstellung von deren Reflexionsflächen vereinfacht.

Spiegel	Max. Einfallswinkel (Meridionalschnitt) [°]	min. Einfallswinkel (Meridionalschnitt) [°]	Max. Abweichung der Flächen von einer best-fit-Sphäre [µm]
M1	6,95	4,61	5
M2	11,96	7,45	0
M3	9,75	0,47	160
M4	3,82	0,81	6
M5	15,34	2,27	104
M6	10,41	2,20	180

**[0079]** Das Verhältnis aus dem maximalen Einfallswinkel von Abbildungsstrahlung auf den Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6 der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 9](#), nämlich dem Einfallswinkel 15,34° beim Spiegel M5, und der numerischen Apertur von 0,5 beträgt bei der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 9](#) 30,68°.

**[0080]** Das Projektionsobjektiv **7** nach [Fig. 9](#) hat eine Gesamtbaulänge von 2000 mm. Die maximale zentrale Pupillenobskuration in der Fläche beträgt weniger als 7 Prozent.

**[0081]** [Fig. 10](#) bis [Fig. 12](#) zeigen in einer Darstellung, die derjenigen der [Fig. 4](#) bis [Fig. 6](#) entspricht, die Anordnung der Strahlenbündel-Gruppen **35** bis **39** im Bereich der Objektebene **5** ([Fig. 10](#)), der Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** sowie **45** bis **49** in einer Ebene XI im Bereich des Spiegels M1 ([Fig. 11](#)) sowie die Strahlenbündel-Gruppen **50** bis **54** sowie **55** bis **59** in einer Ebene XII im Bereich des Spiegels M2 ([Fig. 12](#)). Die Anordnung der Strahlenbündel-Gruppen unterscheiden sich bei den Projektionsobjektiven **7** nach [Fig. 2](#) und nach [Fig. 9](#) im Durchmesser der Strahlenbündel und im Abstand der Strahlenbündel zueinander, nicht jedoch in der halbkreisförmigen Anordnung der Strahlenbündel-Gruppen und der jeweils gleich orientierten Öffnung dieser zueinander beabstandeten Halbkreise nach unten.

**[0082]** Im Mehrfachdurchgangsbereich **61** des Projektionsobjektivs **7** nach [Fig. 9](#) zwischen den Ebenen XI und XII liegt, wie auch beim Projektionsobjektiv **7** nach [Fig. 2](#), keine Pupillenebene der Projektionsoptik **7**.

**[0083]** In den nicht obskurierten Spiegelgruppen ist die numerische Apertur jeweils wesentlich geringer als in den obskurierten Spiegelgruppen.

**[0084]** [Fig. 13](#) zeigt einen schematischen Schnitt durch einen Ausschnitt eines der Spiegel M1 bis M6 der vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele der erfindungsgemäßen Projektionsoptik **7**. Da alle Spiegel M1 bis M6 der vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele von der Schichtabfolge her prinzipiell ähnlich aufgebaute Reflexionsschichten aufweisen, genügt es, diesen Schichtaufbau anhand der [Fig. 13](#) für einen dieser Spiegel darzustellen, der nachfolgend als Spiegel M bezeichnet wird. Der Schnitt nach [Fig. 13](#) ist senkrecht zur Reflexionsfläche des Spiegels M ausgeführt.

**[0085]** Bei der Ausführung der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) ist eine Reflexionsbeschichtung **80** auf einer Substratoberfläche **81** des Spiegels M aus insgesamt 300 Bilayern **82** aufgebaut, von denen in der [Fig. 13](#) die beiden obersten und der direkt auf der Substratoberfläche aufgetragene Bilayer dargestellt sind. Im in der [Fig. 13](#) unterbrochenen Zwischenraum zwischen diesen dargestellten Bilayern **82** sind die restlichen nicht dargestellten Bilayer angeordnet.

**[0086]** Jeder Bilayer **82** hat eine Schichtdicke  $d_0$  von 3,5 nm. Jeder Bilayer **82** hat eine als Abstandsschicht (Spacer) **83** dienende Schicht aus Borcarbid ( $B_4C$ ) mit einer Schichtdicke von 2,1 nm. Ferner hat jeder Bilayer **82** eine Absorberschicht **84** aus Cäsiumiodid (CsI) mit einer Schichtdicke von 1,4 nm. Diese Schichtstärken hat die Reflexionsbeschichtung **80** längs der optischen Achse **18**. Über die Reflexionsfläche des Spiegels M variiert die Schichtdicke der Reflexionsbeschichtung **80**, wie nachfolgend noch erläutert wird.

**[0087]** Schichtdaten, nämlich die wellenlängenabhängigen Brechzahlen  $n$  und die Extinktionskoeffizienten  $k$  der Schichten **83**, **84** sowie den Schichtdickenverlauf  $d(r)$  der Reflexionsbeschichtung **80** charakterisierende Koeffizienten sind in den beiden nachfolgenden Tabellen zusammengefasst:

Materialien und Brechzahlen					
Wellenlänge [nm]	6.8	6.9	7.0	7.1	7.2
B <sub>4</sub> C (n)	0.99710128	0.99591714	0.99503712	0.99431133	0.99368046
B <sub>4</sub> C (k)	0.00055386	0.00058077	0.00060834	0.00063680	0.00066696
CsI (n)	0.98456682	0.98382320	0.98305499	0.98224658	0.98139078
CsI (k)	0.00149566	0.00155002	0.00161212	0.00168633	0.00178452

Schichtdickenverlauf		
Koeffizient	C0	C2
M1	0.9991	0.000E+00
M2	1.0100	0.000E+00
M3	0.9937	1.450E-06
M4	0.9940	0.000E+00
M5	0.9940	1.098E-06
M6	0.9940	6.300E-07

**[0088]** Der Schichtdickenverlauf der Reflexionsbeschichtung **80** wird dabei durch die Gleichung

$$d(r)=d_0\cdot(C0 + C2\cdot r^2)$$

beschrieben.  $d(r)$  gibt die lokale Schichtdicke eines Bilayers **82** der Reflexionsbeschichtung **80**, also des Schichtstapels, in Abhängigkeit vom radialen Abstand des jeweils betrachteten lokalen Punktes auf der Reflexionsfläche des Spiegels M von der optischen Achse **18** an. Die Schichtdicke der Reflexionsbeschichtung **80** hat also für  $C2 \neq 0$  einen parabolischen Verlauf, wobei für  $C2 > 0$  die Schichtdicke mit größerem Abstand zur

optischen Achse wächst.

**[0089]** Das Verhältnis der Schichtstärken der Abstandsschicht **83** zur Absorberschicht **84** innerhalb jedes der Bilayer **82** bleibt unabhängig vom Abstand  $r$  zur optischen Achse **18** konstant. Dieses Verhältnis beträgt:

$$\gamma = d(\text{Absorberschicht})/d(\text{Bilayer}) = 0,4$$

$d$  bezeichnet hier die Schichtdicke der jeweiligen Schicht.

**[0090]** Die Spiegel M1 bis M6 haben mit den Reflexionsbeschichtungen **80** gemäß den vorstehenden Tabellen eine mittlere Spiegelreflektivität für eine Wellenlänge des Beleuchtungslichts **3** von 6,9 nm von 58%. Die resultierende Gesamtreflektivität der Projektionsoptik **7** ist also 3,92%. Nach Reflexion an allen Spiegeln M1 bis M6 der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) erreichen somit 3,92% der Intensität des vom Objektfeld **4** ausgehenden Beleuchtungslichts **3** das Bildfeld **8**.

**[0091]** Die Spiegel M1 bis M6 der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 9](#) können eine entsprechende Multilager-Reflexionsbeschichtung tragen, wie diese vorstehend für die Ausführung nach [Fig. 2](#) erläutert wurde. Die Koeffizienten CO und C2 für die Beschreibung des parabolischen Schichtdickenverlaufs sind dann an die Einfallswinkelverteilung auf den Spiegel M1 bis M6 angepasst.

**[0092]** [Fig. 14](#) zeigt die einfallswinkelabhängige Reflektivität der Reflexionsbeschichtung **80** für zwei für verschiedene Einfallswinkel optimierte Reflexionsbeschichtungen **80**, nämlich für 0° (durchgezogene Linie) und für 10° (gestrichelte Linie). Deutlich ist zu sehen, dass die Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite für die Reflexionsbeschichtung **80**, die für einen Einfallswinkel von 0° optimiert ist, deutlich höher ist als für die Reflexionsbeschichtung, die für einen Einfallswinkel von 10° optimiert ist. Diese Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite nimmt monoton mit dem Einfallswinkel, für den die Reflexionsbeschichtung **80** optimiert ist, ab. Je kleiner der maximale Einfallswinkel auf einem der Spiegel M1 bis M6 ist, desto kleiner ist der Einfallswinkel, auf den die Reflexionsbeschichtung **80** optimiert werden kann und desto größer ist die Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite der für diesen Spiegel M1 bis M6 dann einsetzbaren Reflexionsbeschichtung **80**.

**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 6750948 B2 [\[0002\]](#)
- US 2006/0232867 A1 [\[0002\]](#)
- EP 0267766 A2 [\[0002\]](#)
- US 7209286 B2 [\[0002\]](#)
- WO 2006/069725 A1 [\[0002\]](#)

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- „EUV Engineering Test Stand“ von D. A. Tichenor et al., Lawrence Livermore National Laboratory, 14.02.2000, [\[0060\]](#)

**Patentansprüche**

1. Abbildende Optik (7) mit einer Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M6), die ein Objektfeld (4) in einer Objektebene (5) in ein Bildfeld (8) in einer Bildebene (9) abbilden, gekennzeichnet durch ein Verhältnis aus
  - einem maximalen Einfallswinkel von Abbildungslicht (3) auf Reflexionsflächen aller Spiegel (M1 bis M6) und
  - einer bildseitigen numerischen Apertur der abbildenden Optik (7), welches kleiner ist als  $33,8^\circ$ .
2. Abbildende Optik nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die abbildende Optik (7) mindestens einen obskurtierten Spiegel (M3 bis M6) mit einer Durchgangsöffnung (20) zum Durchtritt von Abbildungsstrahlung (15) aufweist.
3. Abbildende Optik nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die abbildende Optik (7) sechs Spiegel (M1 bis M6) aufweist, von denen mindestens drei Spiegel, bevorzugt genau vier Spiegel (M3 bis M6), obskurtiert sind.
4. Abbildende Optik (7) mit einer Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M6), die ein Objektfeld (4) in einer Objektebene (5) in ein Bildfeld (8) in einer Bildebene (9) abbilden, dadurch gekennzeichnet, dass jeder der Spiegel (M1 bis M6) eine Reflexionsbeschichtung (80) für Abbildungslicht (3) mit einer Wellenlänge, die kleiner ist als 10 nm, trägt.
5. Abbildende Optik nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Spiegel (M1 bis M6) eine mittlere Reflektivität haben, die größer ist als 50%.
6. Abbildende Optik nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass jeder der Spiegel (M1 bis M6) eine Reflexionsbeschichtung (80) trägt, so dass die Spiegel (M1 bis M6) für Abbildungslicht (3) mit einer Wellenlänge von 6,9 nm eine mittlere Reflektivität haben, die größer ist als 58%.
7. Abbildende Optik zum Einsatz für Abbildungslicht (3) mit einer Wellenlänge, die kleiner ist als 10 nm, gekennzeichnet durch ein Auflösungsvermögen, das besser ist als 20 nm, bevorzugt besser ist als 16 nm, mehr bevorzugt besser ist als 11 nm, noch mehr bevorzugt besser ist als 8 nm und noch mehr bevorzugt besser ist als 6 nm.
8. Abbildende Optik mit einer bildseitigen numerischen Apertur, die höchstens 0,5 beträgt, gekennzeichnet durch ein Auflösungsvermögen, das besser ist als 20 nm, bevorzugt besser ist als 16 nm, mehr bevorzugt besser ist als 11 nm, noch mehr bevorzugt besser ist als 8 nm und noch mehr bevorzugt besser ist als 6 nm.
9. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie
  - mit einer abbildenden Optik (7) nach einem der Ansprüche 1 bis 8,
  - mit einer Lichtquelle (2),
  - mit einer Beleuchtungsoptik (6) zur Führung der Beleuchtungsstrahlung (3) hin zum Objektfeld (4) der abbildenden Optik (7).
10. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtquelle (2) zur Erzeugung von Beleuchtungsstrahlung (3) mit einer Wellenlänge ausgebildet ist, die geringer ist als 10 nm.
11. 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) mithilfe der Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 9 oder 10,
  - Erzeugen einer Mikrostruktur (B, C) auf dem Wafer (11).
12. Mikrostrukturiertes Bauelement, hergestellt nach einem Verfahren nach Anspruch 11.

Es folgen 13 Blatt Zeichnungen





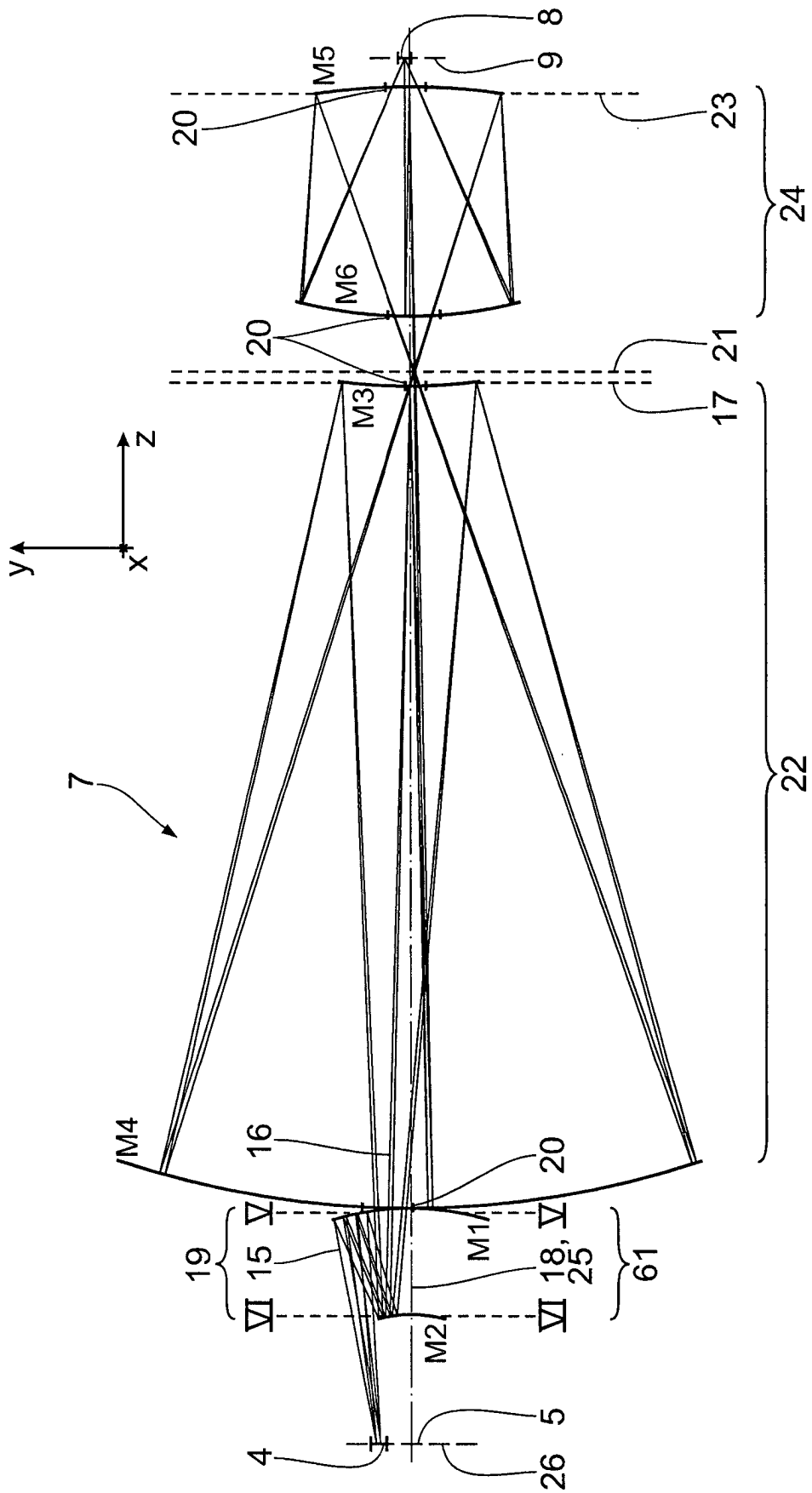


Fig. 2

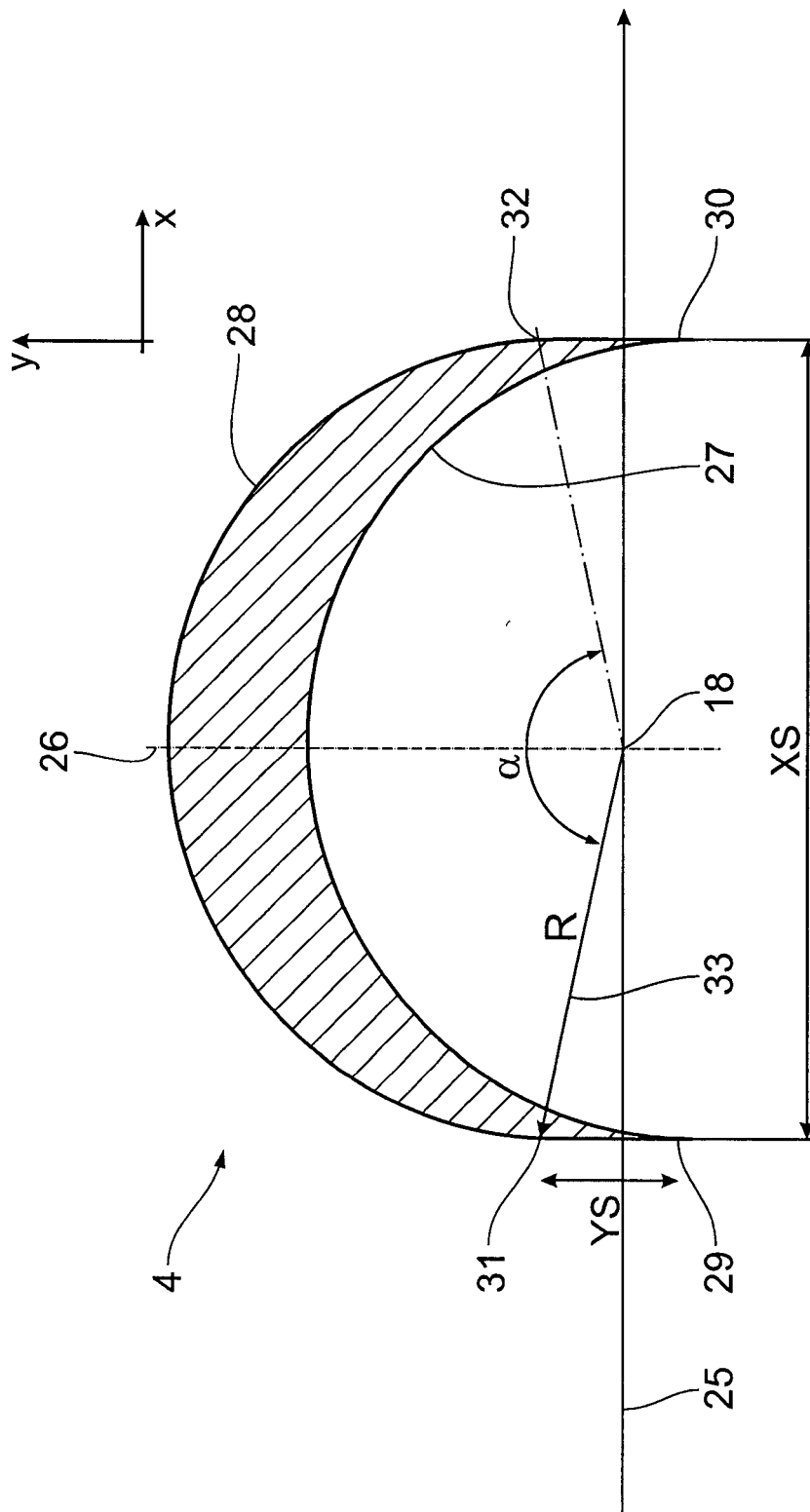


Fig. 3

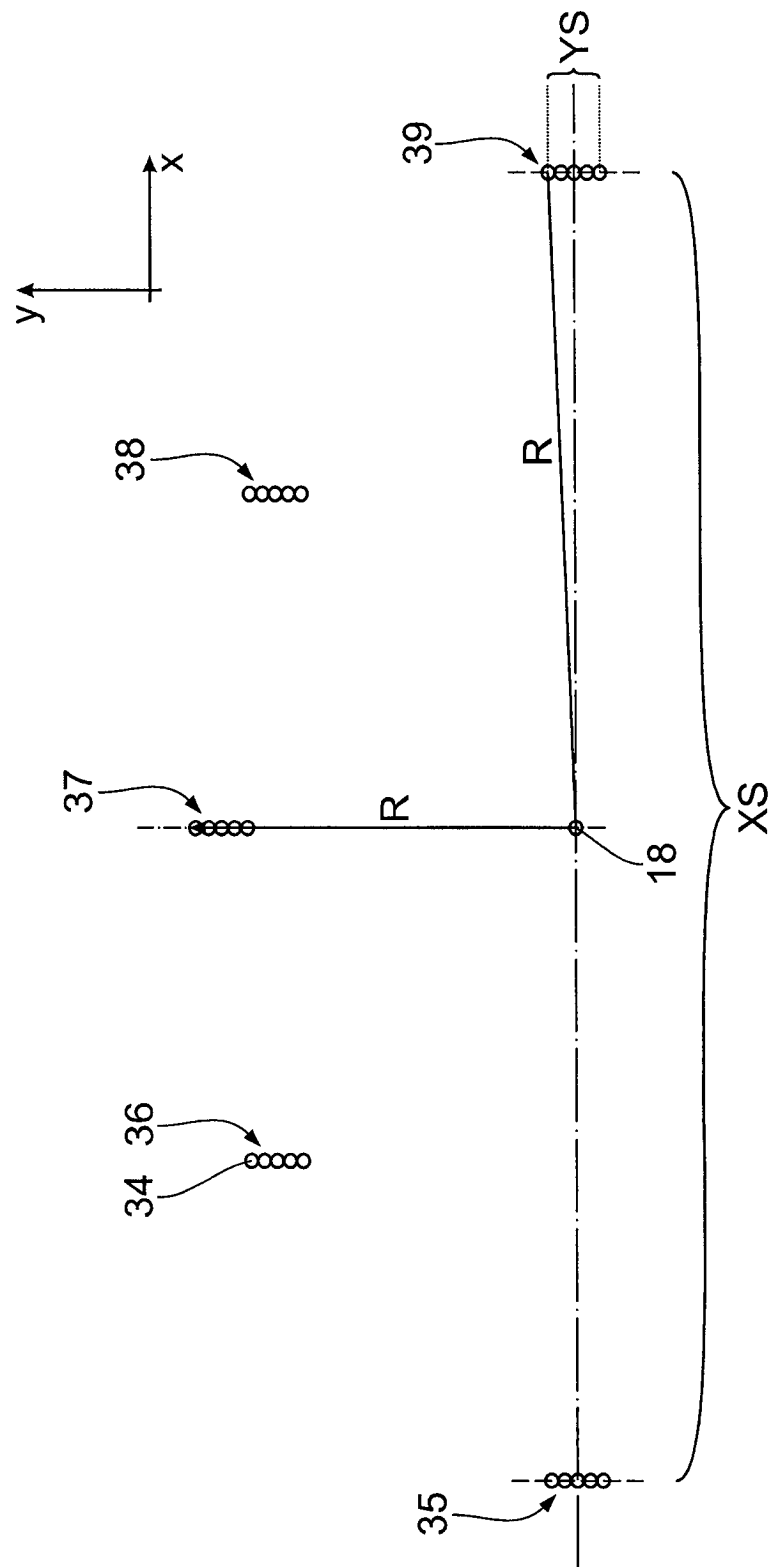


Fig. 4

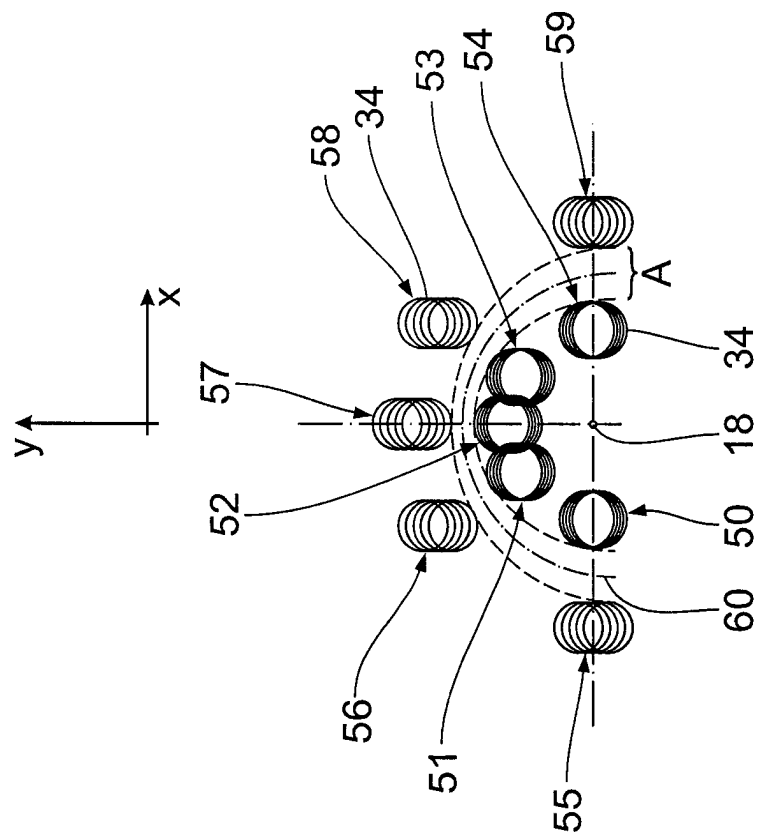


Fig. 5

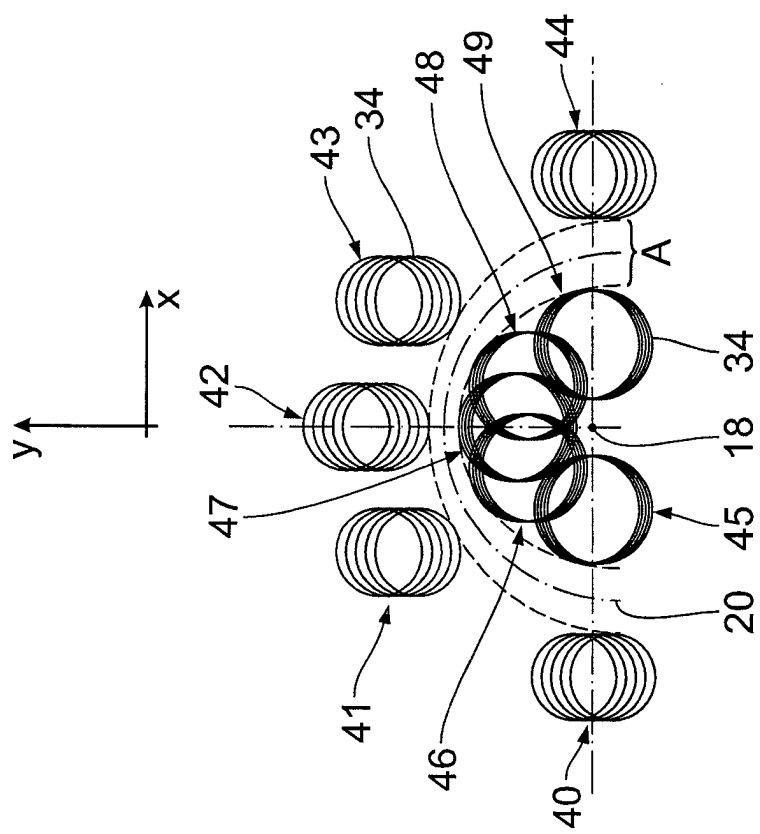


Fig. 6

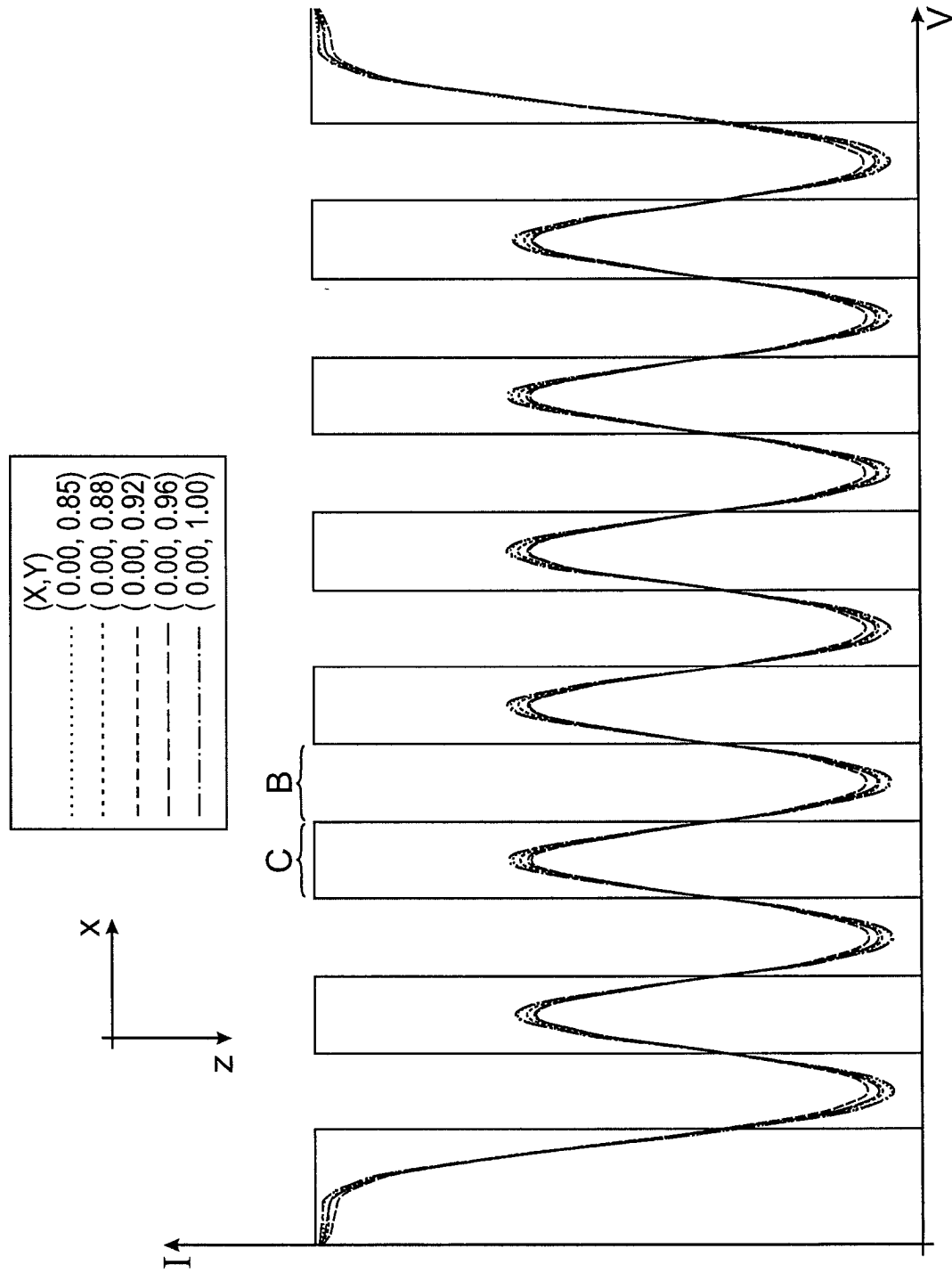


Fig. 7



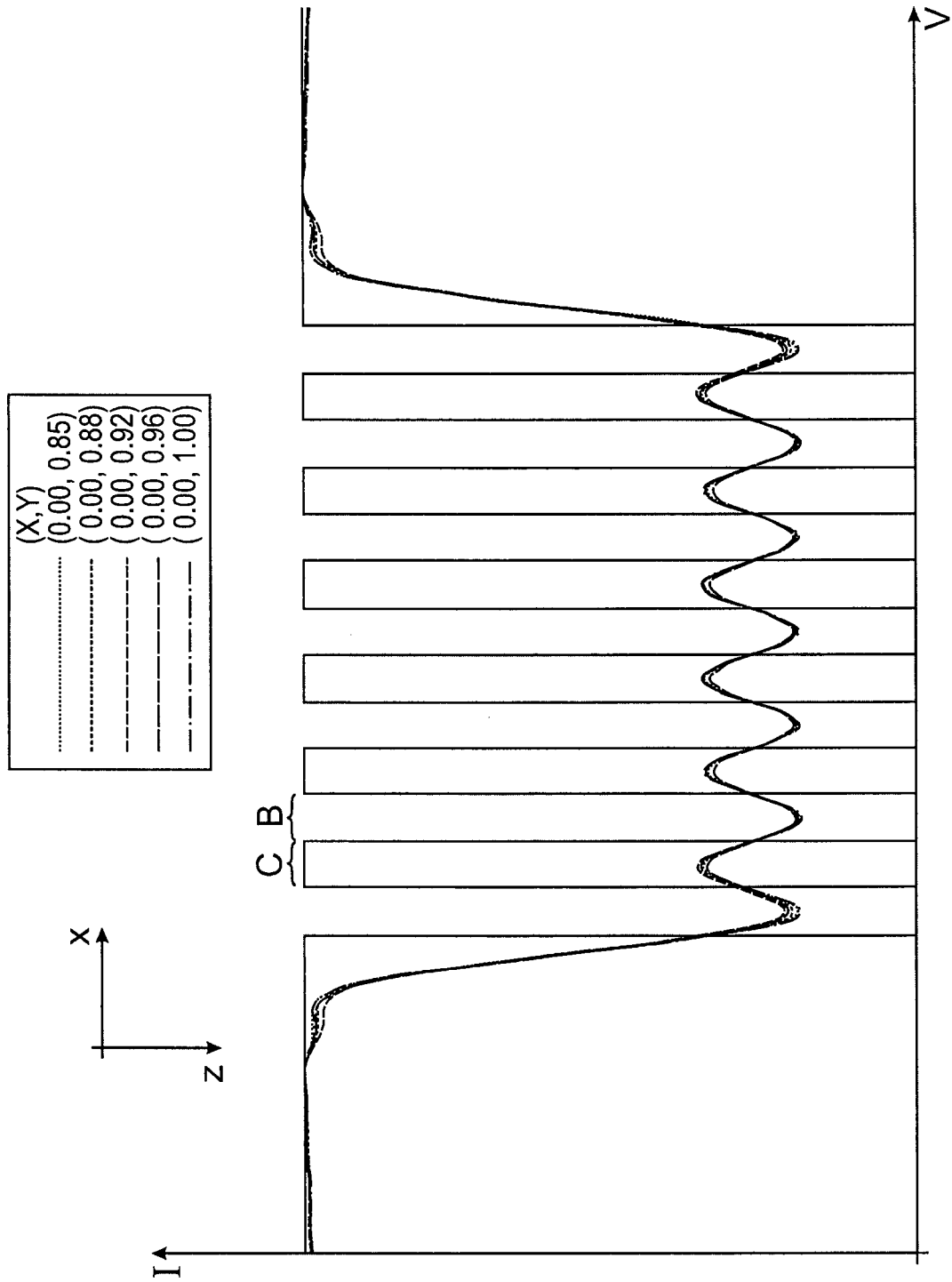


Fig. 8

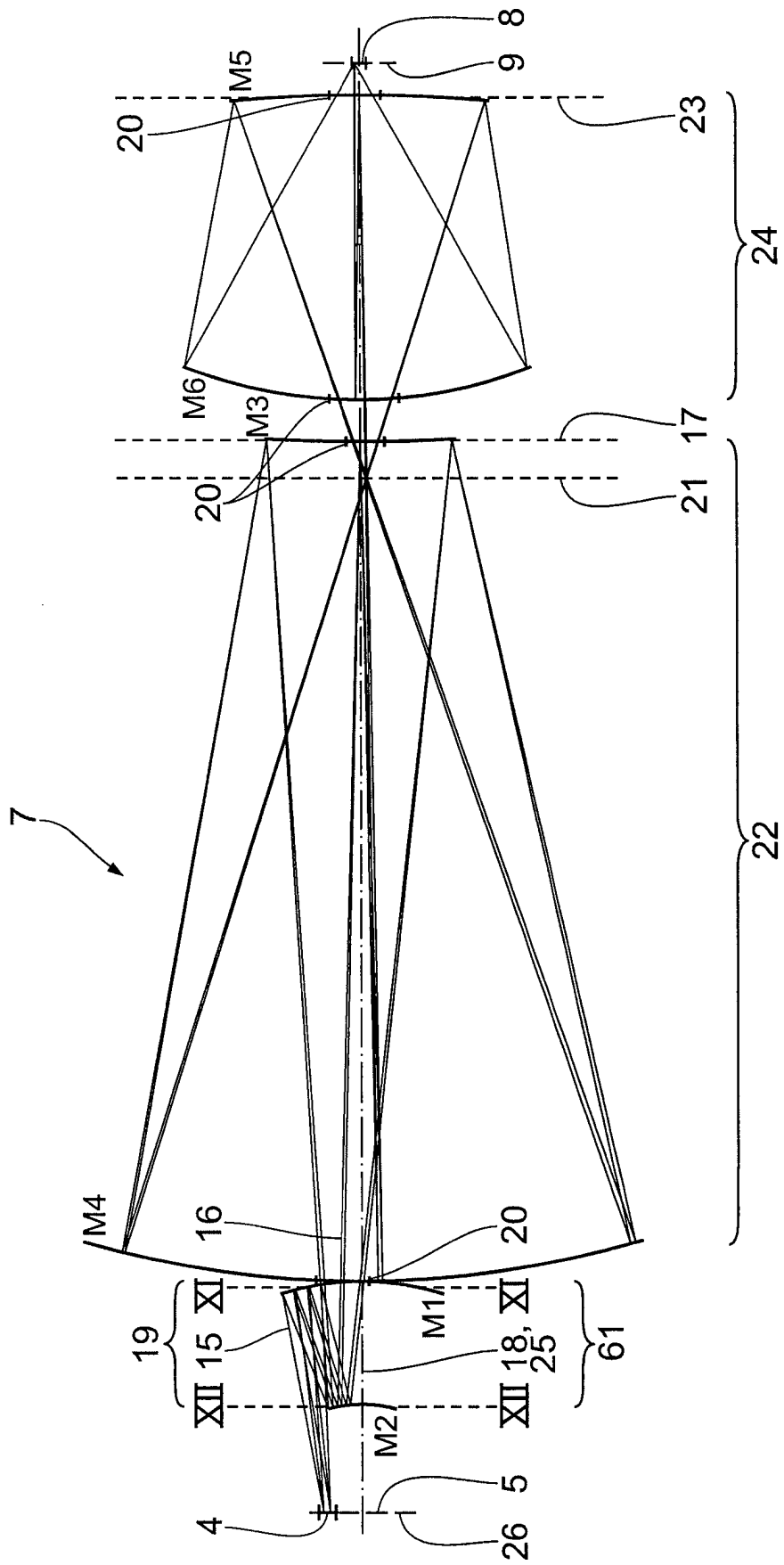


Fig. 9

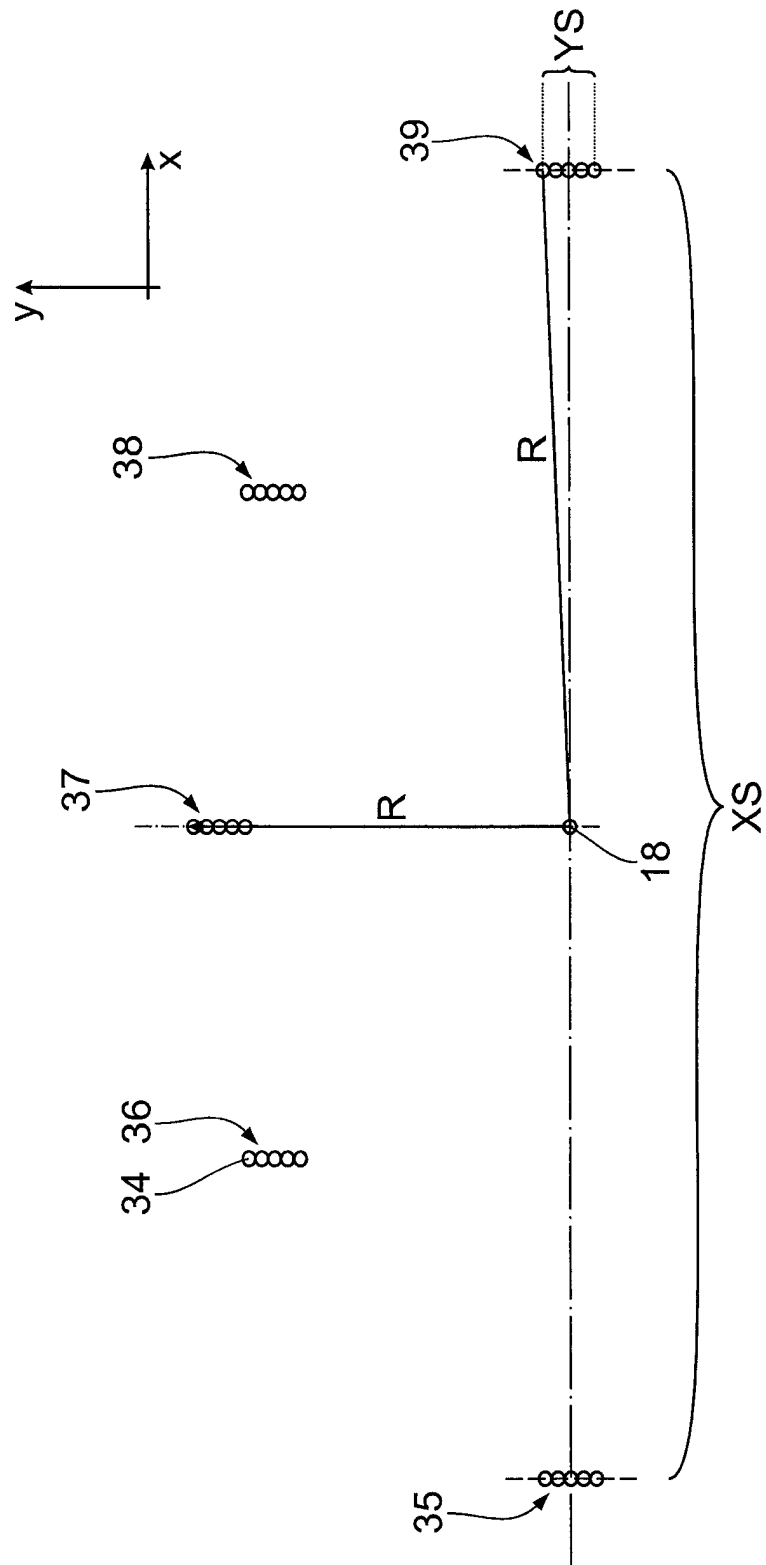


Fig. 10

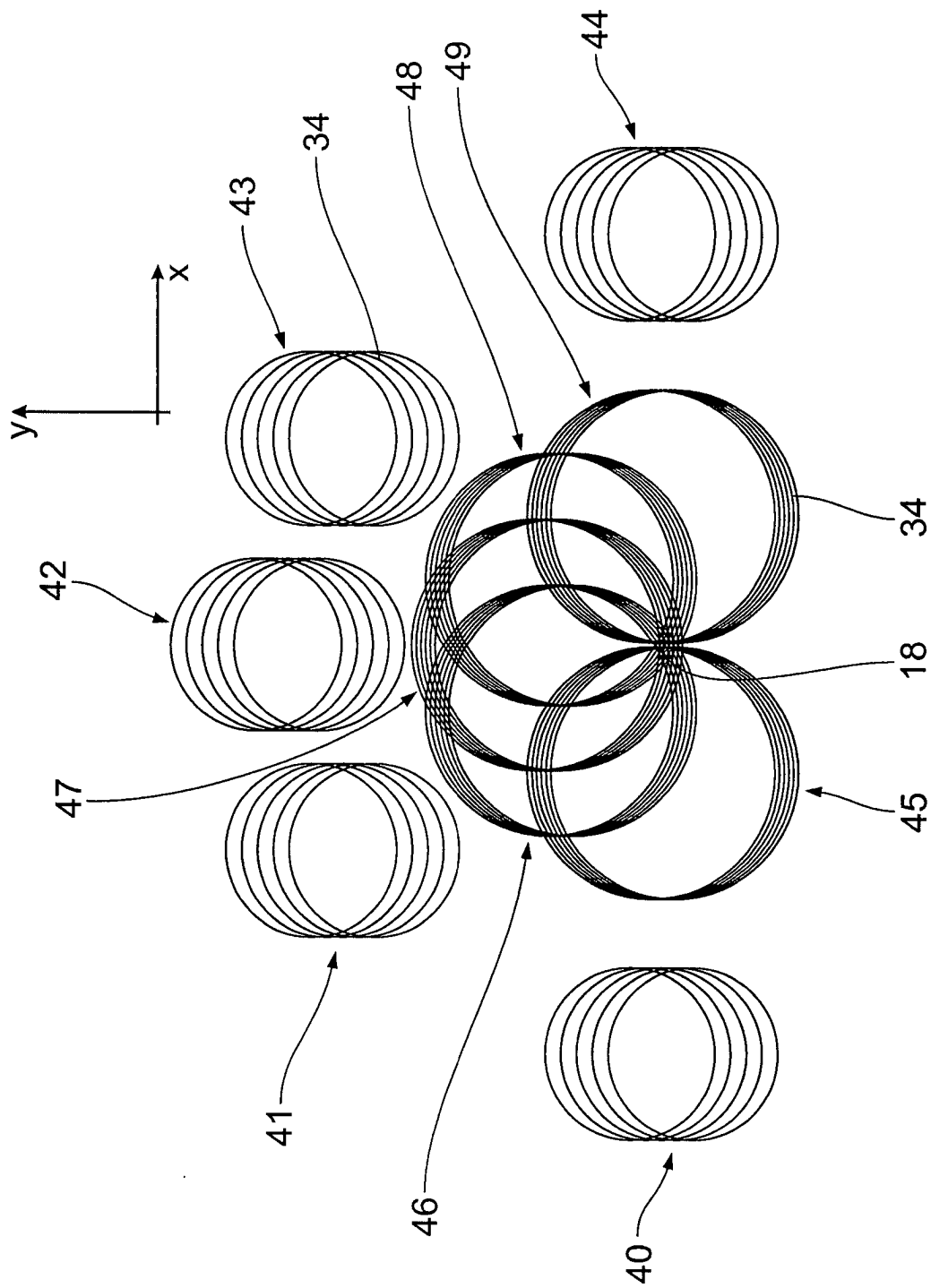


Fig. 11

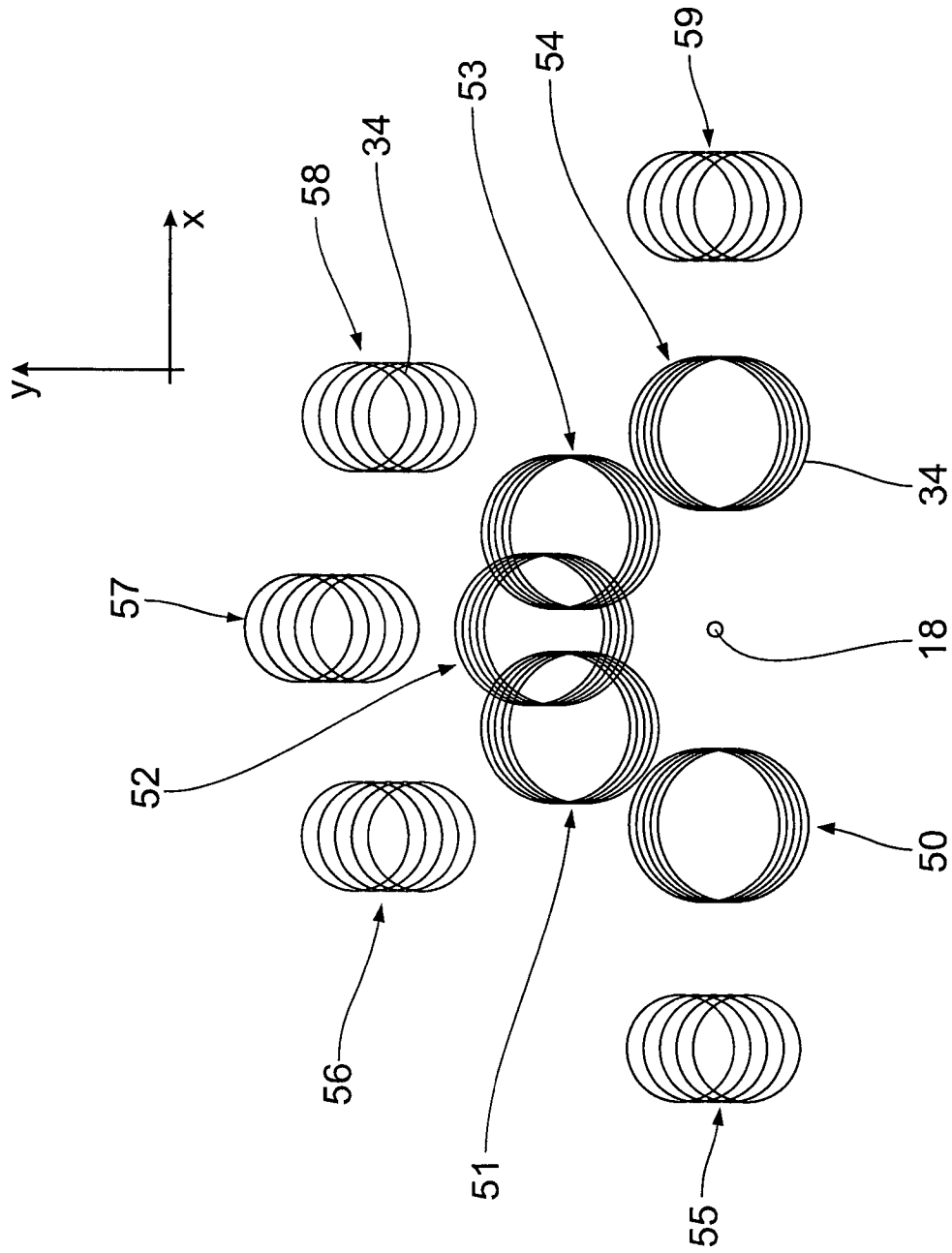


Fig. 12

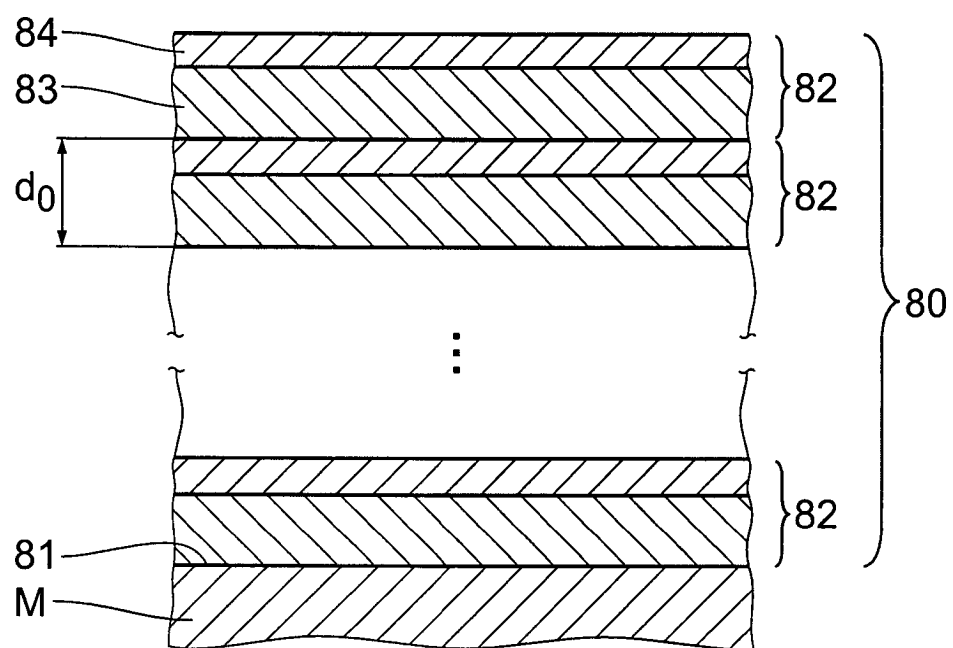


Fig. 13



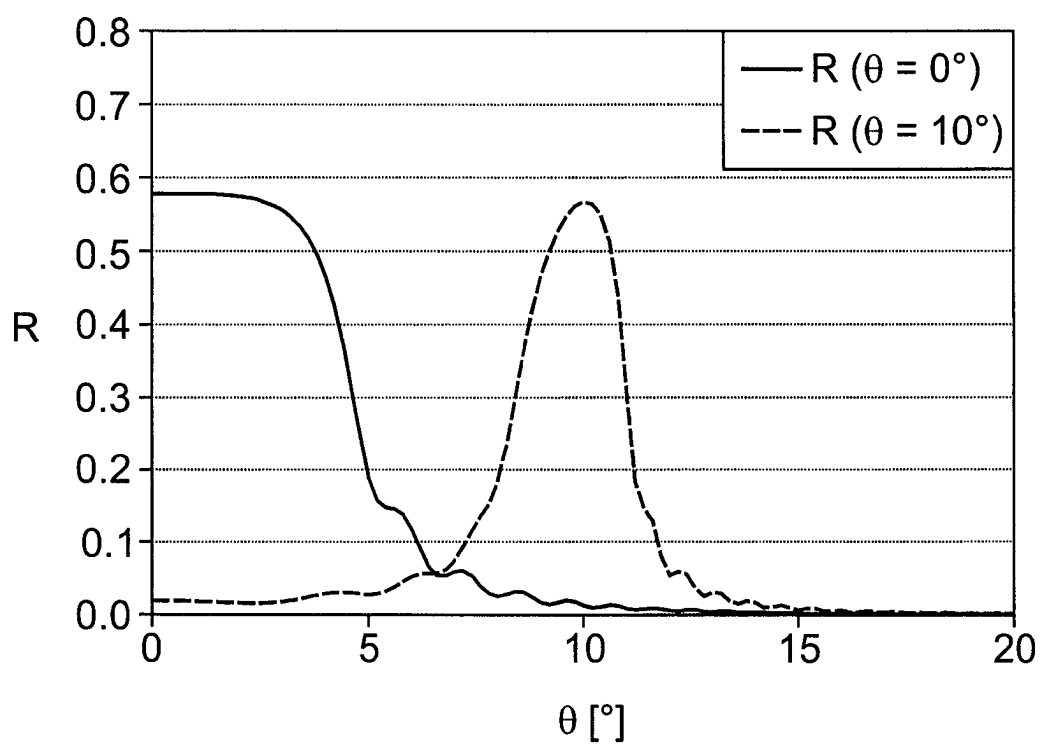


Fig. 14