



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 045 396 A1** 2009.04.23

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 045 396.7**

(22) Anmeldetag: **21.09.2007**

(43) Offenlegungstag: **23.04.2009**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G02B 5/09 (2006.01)**  
**G03F 7/20 (2006.01)**

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

(72) Erfinder:  
**Weth, Christopher, Dr., 73431 Aalen, DE; Dinger,  
Udo, Dr., 73447 Oberkochen, DE**

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

**US2005/02 07 039 A1**

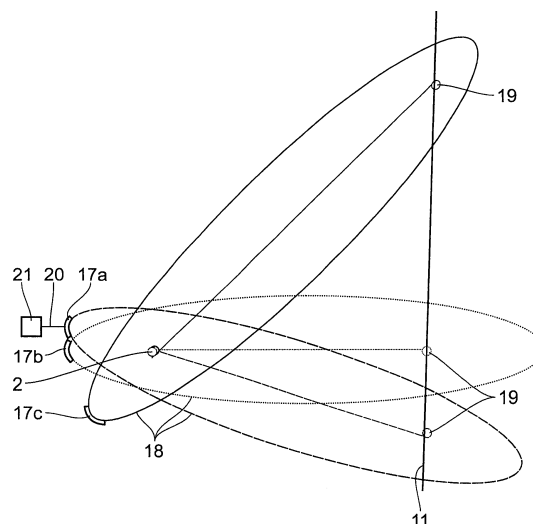
**US2003/00 02 022 A1**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Bündelführender optischer Kollektor zur Erfassung der Emission einer Strahlungsquelle**

(57) Zusammenfassung: ein Bündelführender optischer Kollektor dient zur Erfassung einer Emission einer Strahlungsquelle (2) und zur Formung eines Strahlungsbündels aus der erfassten Emission. Eine reflektierende Oberfläche des Kollektors (10) stellt die erste Bündelformende Oberfläche nach der Strahlungsquelle (2) dar. Die reflektierende Oberfläche ist derart geformt, dass sie die Strahlungsquelle (2) in einer nachgeordneten Ebene (11) in eine Bilderschar aus einer Mehrzahl von Strahlungsquellen-Bildern (19) überführt, die senkrecht zur Strahlrichtung (13) des transformierten Strahlungsbündels (8) in zwei Dimensionen (x, y) zueinander versetzt und in Bezug auf die Strahlrichtung (13) des transformierten Strahlungsbündels (8) nicht rotationssymmetrisch zueinander angeordnet sind, so dass das transformierte Strahlungsbündel (8) in der nachgeordneten Ebene (11) in Bezug auf die Strahlrichtung (13) des transformierten Strahlungsbündels (8) eine nicht rotationssymmetrische Bündel-Randkontur (11a) hat. Es resultiert ein Kollektor, bei dem die durch diesen erzeugte Strahlungsbündelform, also die durch diesen in der dem Kollektor nachgeordneten Ebene definiert erzeugte Beleuchtungsverteilung, in ihrer Form möglichst frei wählbar ist.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft einen bündelführenden optischen Kollektor zur Erfassung einer Emission einer Strahlungsquelle nach dem Oberbegriff des Anspruches 1. Ferner betrifft die Erfindung ein EUV-Beleuchtungssystem, eine EUV-Projektionsbelichtungsanlage, ein Herstellungsverfahren für ein mikrostrukturiertes Bauteil sowie ein mit einem derartigen Verfahren hergestelltes mikrostrukturiertes Bauteil.

**[0002]** Kollektoren der eingangs genannten Art, die insbesondere zur Erfassung der Emission von EUV-(Extrem Ultra Violet-)Strahlungsquellen dienen, die Strahlung beispielsweise im Wellenlängenbereich zwischen 10 nm und 30 nm emittieren, sind beispielsweise bekannt aus der WO 2007/045 434 A2, der US 6,438,199 B1, der US 6,507,440 B1 und der US 5,339,346 A.

**[0003]** EUV-Strahlungsquellen haben in der Regel rotationssymmetrische oder hinsichtlich einer Abstrahlachse achssymmetrische Abstrahlcharakteristiken. Die zugeordneten Kollektoren sind in der Regel so ausgelegt, dass die EUV-Strahlung in einem möglichst großen achssymmetrischen Raumwinkel aufgenommen wird.

**[0004]** Je nach den Anforderungen, die hinsichtlich der definierten Ausleuchtung eines Beleuchtungsfeldes an ein Beleuchtungssystem gestellt werden, zu dem ein derartiger Kollektor gehört, muss ein dem Kollektor nachgeordnetes Strahlungsbündel geformt sein. Diese erforderliche Form des Strahlungsbündels weicht in der Regel von einer rotationssymmetrischen Bündelform ab. Im Stand der Technik sind Kollektoren, die von der Rotationssymmetrie abweichende Strahlungsbündelformen angeben, nur für Spezialfälle geeignet.

**[0005]** Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Kollektor der eingangs genannten Art derart weiterzubilden, dass die durch diesen erzeugte Strahlungsbündelform, also die durch diesen in der dem Kollektor nachgeordneten Ebene definiert erzeugte Beleuchtungsverteilung, in ihrer Form möglichst frei wählbar ist.

**[0006]** Diese Aufgabe ist erfindungsgemäß gelöst durch einen Kollektor mit den im Anspruch 1 sowie durch einen Kollektor mit den im Anspruch 2 angegebenen Merkmalen.

**[0007]** Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass der Ansatz, die Strahlungsquelle in eine Mehrzahl zweidimensional zueinander versetzt liegender Strahlungsquellen-Bilder nach Anspruch 1 oder in eine Bündel-Randkontur nach Anspruch 2 zu überführen, die Möglichkeit bietet, praktisch beliebige Formen von Beleuchtungsverteilungen in einer dem Kollektor nachgeordneten Ebene bereitzustellen, die auch als Bündelformungsebene bezeichnet wird. Der erfindungsgemäße Kollektor eignet sich daher insbesondere für Beleuchtungssysteme, in denen eine von der Rotationssymmetrie definiert abweichende Beleuchtungsverteilung in einem nachgeordneten Beleuchtungsfeld gefordert ist. Diese Beleuchtungsverteilung muss nicht durch Abschatten von Beleuchtungslicht hergestellt werden, sodass sich der Anteil der nutzbaren Emission der Strahlungsquelle erhöht. Die genaue Form der reflektierenden Oberfläche des Kollektors kann mit Hilfe eines entsprechenden und die Abbildung in die Strahlungsquellen-Bilder nach Anspruch 1 oder die Formung der Bündel-Randkontur nach Anspruch 2 modellierenden Algorithmus bestimmt werden. Ein derartiger mathematischer Algorithmus ist bekannt aus Kochengin und Olikier, Inverse Problems 13 (1997), S. 363 bis 367. Die Emission der Strahlungsquelle kann mit dem optischen Kollektor entweder direkt oder über eine Zwischenabbildung der Strahlungsquelle erfasst werden.

**[0008]** Eine Ausgestaltung der reflektierenden Oberfläche nach Anspruch 3 lässt sich insbesondere zur Beleuchtung eines spekularen Reflektors nutzen, der in der US 2006/0132747 A1 beschrieben ist. Die Bündel-Randkontur des transformierten Strahlungsbündels und damit die Beleuchtungsverteilung auf dem spekularen Reflektor ist an die Form des in aller Regel von der Rotationssymmetrie abweichenden Beleuchtungsfeldes angepasst. Insbesondere dann, wenn ein Beleuchtungsfeld mit einem großen Aspektverhältnis ausgeleuchtet werden soll, beispielsweise ein rechteckiges oder ein bogenförmiges Ringfeld, weicht die auf dem spekularen Reflektor geforderte Beleuchtungsverteilung stark von der Rotationssymmetrie ab. Hier kommt die Flexibilität des erfindungsgemäßen Reflektors bei der Herstellung praktisch beliebig geformter Beleuchtungsverteilungen besonders gut zum Tragen. Die Bündel-Randkontur in der nachgeordneten Ebene und somit die Beleuchtungsverteilung kann durch Rückprojektion aus den Formen einerseits einer Pupillen-Beleuchtungsverteilung einer nachgeordneten abbildenden Optik und andererseits der Form eines mit dem transformierten Strahlungsbündel auszuleuchtenden und der abbildenden Optik vorgelagerten Beleuchtungs- oder Objektfeldes erzeugt werden. Die Rückprojektion findet dabei aus Richtung der ausgeleuchteten Pupillenebene der abbildenden Optik durch das Objektfeld auf die nachgeordnete Ebene statt. Die Beleuchtungsverteilung in der nachgeordneten Ebene kann beispielsweise bei einem bogenförmigen Beleuchtungsfeld die Form einer Niere

bzw. einer Bohne haben.

**[0009]** Eine Ausführung der reflektierenden Oberfläche nach Anspruch 4 ist jedenfalls dann von besonderem Vorteil, wenn eine stärker von der Rotationssymmetrie abweichende Ausleuchtung des Feldfacettenspiegels gefordert ist. Ein Beispiel für eine derartige geforderte Ausleuchtung eines Feldfacettenspiegels gibt die US 7,186,983 B2.

**[0010]** Eine Facettenunterteilung nach Anspruch 5 ermöglicht eine Formung der Beleuchtungsverteilung durch Vorgabe der relativen Positionen der von den einzelnen Facetten in der Bündelformungsebene bereitgestellten Strahlungsquellen-Bildern zueinander.

**[0011]** Eine Anordnung der Facetten nach Anspruch 6 in Form einer Parkettierung nutzt vorteilhaft praktisch die gesamte reflektierende Oberfläche, sodass bei der Reflektion am Kollektor praktisch keine Nutzstrahlung verloren geht. Es kann eine lückenlose und überlappungsfreie Überdeckung der reflektierenden Oberfläche realisiert werden. Derartige Parkettierungen sind aus der mathematischen Theorie bekannt. Es sind homogene Parkettierungen, reguläre Parkettierungen oder auch inhomogene Parkettierungen möglich.

**[0012]** Unterschiedliche Facettenflächen nach Anspruch 7 ermöglichen eine Anpassung der Intensitätsverteilung innerhalb der einzustellenden Beleuchtungsverteilung in der Bündelformungsebene. Dies kann auch zum Ausgleich einer inhomogenen Emission der Strahlungsquelle oder aber zum Vorhalten nachgeordneter Inhomogenitäten genutzt werden.

**[0013]** Facetten nach Anspruch 8 gewährleisten einen insbesondere maximalen Belegungsgrad der Gesamtfläche des Kollektors mit den einzelnen Facetten. Es können insbesondere Belegungen gewählt werden, mit denen eine geringe Variation von Einfallswinkeln auf dem Kollektor realisiert werden kann.

**[0014]** Eine Anordnung nach Anspruch 9 führt zu einer eindeutigen Zuordnung der Facetten zu Bereichen der Beleuchtungsverteilung in der Bündelformungsebene.

**[0015]** Reflektorflächen nach den Ansprüchen 10 und 11 ermöglichen eine definierte Abbildung der Strahlungsquelle.

**[0016]** Eine Glättung nach Anspruch 12 oder 13 vermeidet diskrete Intensitätsspitzen in einem Beleuchtungsfeld, welches durch die Strahlungsführung durch den Kollektor ausgeleuchtet werden soll. Die Glättung kann beispielsweise durch Parametrisierung der reflektierenden Oberfläche mit Hilfe eines stetigen Funktionensatzes, beispielsweise mit Hilfe von Zernike-Funktionen, erfolgen. Die Glättung kann auch durch Verwendung von Spline-Funktionen erfolgen.

**[0017]** Durch Formgebung der reflektierenden Oberfläche nach Anspruch 14 kann die Unterteilung der Abbildung der Strahlungsquelle an die jeweiligen Beleuchtungsanforderungen angepasst werden. Beispiele für einen derartigen Kegelschnitt sind ein Kreis, eine Ellipse, eine Hyperbel oder eine Parabel. Bei dem nicht durch einen Kegelschnitt parametrisierbaren Schnitt kann es sich um einen Freiformschnitt handeln, der nicht durch eine geschlossene analytische Funktion beschrieben werden kann, sondern beispielsweise durch eine Reihenentwicklung.

**[0018]** Eine nach Anspruch 15 als Freiformfläche ausgebildete reflektierende Oberfläche bietet genügend Freiheitsgrade zur an die Anforderungen der Beleuchtung angepassten Anordnung der Strahlungsquellen-Bilder. Die Freiformfläche kann in der Art und Weise parametrisiert werden, wie dies beispielsweise bei der Formgebung für Spiegel in Projektionsobjektiven bei Projektionsbelichtungsanlagen für die Mikrolithografie beispielsweise aus der US 2007-0058269 A1 schon bekannt ist. Auch Spline-Funktionen oder Zernike-Funktionen können zur Parametrisierung einer solchen Freiformfläche herangezogen werden.

**[0019]** Eine aktiv formveränderbare reflektierende Oberfläche nach Anspruch 16 ermöglicht es, dynamisch verschiedene Ausleuchtungen in der Bündelformungsebene bereitzustellen, je nach den Anforderungen, die beleuchtungsseitig gestellt werden. So ist es möglich, über die Formgebung des Kollektors Beleuchtungsverteilungen bereitzustellen, die in den nachgelagerten optischen Komponenten eines Beleuchtungssystems zur Vorgabe verschiedener Beleuchtungssettings herangezogen werden können.

**[0020]** Eine Anpassung von Kippwinkeln nach Anspruch 17 verbessert die optischen Eigenschaften der Beleuchtung. Insbesondere Abbildungsfehler nachgeschalteter Optiken in einem Beleuchtungssystem, von dem

der Kollektor ein Bestandteil ist, können hierdurch zumindest teilweise kompensiert werden.

[0021] Die Vorteile eines Beleuchtungssystems nach Anspruch 18 und einer Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 19 entsprechen denen, die vorstehend unter Bezugnahme auf den erfindungsgemäßen Kollektor bereits erläutert wurden.

[0022] Eine Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 20 eignet sich insbesondere zur Vorgabe eines Beleuchtungssettings mit einem einzigen bündelführenden optischen Element zwischen dem Kollektor und dem Objekt. Dies gewährleistet eine möglichst verlustfreie Beleuchtung.

[0023] Die Vorteile eines Herstellungsverfahrens nach Anspruch 21 und eines mikrostrukturierten Bauelements nach Anspruch 22 entsprechen denen, die vorstehend schon diskutiert wurden.

[0024] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnung näher erläutert. In dieser zeigen:

[0025] [Fig. 1](#) einen schematischen Meridionalschnitt durch ein EUV-Beleuchtungssystem einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage;

[0026] [Fig. 1a](#) gegenüber [Fig. 1](#) verkleinert eine Ansicht auf einen Kollektor des EUV-Beleuchtungssystems aus Blickrichtung Ia;

[0027] [Fig. 2](#) die Form einer Beleuchtungsverteilung durch ein EUV-Strahlungsbündel in einer Ebene II-II in [Fig. 1](#);

[0028] [Fig. 3](#) schematisch und unter Darstellung reflektierender Komponenten eine EUV-Projektionsbelichtungsanlage mit dem EUV-Beleuchtungssystem nach [Fig. 1](#);

[0029] [Fig. 4](#) schematisch die abbildende Wirkung dreier ausgewählter Facetten eines bündelführenden optischen Kollektors des EUV-Beleuchtungssystems nach [Fig. 1](#) zur Erfassung der Emission einer EUV-Strahlungsquelle und zur Formung eines EUV-Strahlungsbündels aus der erfassten Emission;

[0030] [Fig. 5](#) schematisch in einer zur [Fig. 1](#) ähnlichen Darstellung die Führung des EUV-Strahlungsbündels zwischen der in der [Fig. 2](#) dargestellten Ebene und einer Eintrittspupillenebene eines Projektionsobjektivs der EUV-Projektionsbelichtungsanlage;

[0031] [Fig. 6](#) die Ausleuchtung eines Objekt- bzw. Beleuchtungsfeldes in einer Objektebene der EUV-Projektionsbelichtungsanlage;

[0032] [Fig. 7](#) die Ausleuchtung einer Eintrittspupille des Projektionsobjektivs;

[0033] [Fig. 8](#) eine Verteilung von Facetten auf dem Kollektor des EUV-Beleuchtungssystems;

[0034] [Fig. 9](#) eine durch die Facettenverteilung nach [Fig. 8](#) hervorgerufene Beleuchtungsverteilung in der Ebene nach [Fig. 2](#) vor einer Glättung der reflektierenden Oberfläche des Kollektors;

[0035] [Fig. 10](#) ein Ablaufschema zur Berechnung von Fringe-Zernike-Polynomen;

[0036] [Fig. 11](#) die Beleuchtungsverteilung nach [Fig. 9](#) nach der Glättung der reflektierenden Oberfläche;

[0037] [Fig. 12](#) eine weitere Ausführung eines EUV-Beleuchtungssystems für eine EUV-Projektionsbelichtungsanlage;

[0038] [Fig. 13](#) einen Feldfacettenspiegel des EUV-Beleuchtungssystems nach [Fig. 12](#);

[0039] [Fig. 14](#) in einer zu [Fig. 8](#) ähnlichen Darstellung eine weitere Ausführung einer Facettenverteilung auf einem EUV-Kollektor, der in einem EUV-Beleuchtungssystem einsetzbar ist, welches zu dem der [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) ähnlich ist;

[0040] [Fig. 15](#) eine durch den Kollektor nach [Fig. 14](#) hervorgerufene Beleuchtungsverteilung in einer Ebene,

in der ein Feldrasterelement des zur [Fig. 12](#) ähnlichen EUV-Beleuchtungssystems angeordnet ist, vor einer Glättung der reflektierenden Oberfläche des Kollektors;

[0041] [Fig. 16](#) die Beleuchtungsverteilung nach [Fig. 15](#) nach der Glättung der reflektierenden Oberfläche des Kollektors; und

[0042] [Fig. 17](#) in einer zu [Fig. 1](#) ähnlichen Darstellung eine Variante der Beleuchtung einer Bündelformungsebene bei einem EUV-Beleuchtungssystem einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage mit einer weiteren Ausführung eines Kollektors.

[0043] Ein EUV-Beleuchtungssystem **1** ist in der [Fig. 1](#) schematisch zwischen einer EUV-Strahlungsquelle **2** und einer Beleuchtungsfeld- bzw. Objektebene **3** dargestellt. Das EUV-Beleuchtungssystem **1** dient zur definierten Ausleuchtung eines bogenförmigen Beleuchtungsfeldes **4**, das in der [Fig. 6](#) dargestellt ist, in der Beleuchtungsfeldenebene **3**. Das Beleuchtungsfeld **4** leuchtet ein reflektierendes Retikel **5** (vgl. [Fig. 3](#)) aus. Das Beleuchtungsfeld **4** wird mittels eines nicht näher dargestellten Projektionsobjektivs in ein Bildfeld in einer Bildebene **6** abgebildet, in der ein Wafer angeordnet ist, der eine für die EUV-Strahlung lichtempfindliche Schicht trägt. Zur Erleichterung der Beschreibung von Lagebeziehungen wird nachfolgend ein kartesisches x-y-z-Koordinatensystem verwendet. Die x-Achse verläuft in der [Fig. 1](#) senkrecht zur Zeichenebene in diese hinein. Die y-Achse verläuft nach oben. Die z-Achse verläuft nach rechts. Das EUV-Beleuchtungssystem **1** und das EUV-Projektionsobjektiv sind Teil einer in der [Fig. 3](#) insgesamt schematisch dargestellten EUV-Projektionsbelichtungsanlage **7** für die Herstellung mikro- bzw. nanostrukturierter integrierter Halbleiterbauelemente. Die EUV-Projektionsbelichtungsanlage **7** ist nach Art eines Scanners ausgeführt. Die Scan-Richtung ist dabei parallel zu den kurzen Seiten des bogenförmigen Beleuchtungsfeldes **4** und verläuft in der [Fig. 1](#) in y-Richtung.

[0044] Die EUV-Strahlungsquelle **2** strahlt EUV-Emission in etwa gleichförmig in alle Richtungen ab. Eine EUV-Emission **8a** mit einem halben Öffnungswinkel  $\alpha$  von  $44,4^\circ$ , also ein quellseitiges Strahlungsbündel, wird von einer für EUV-Strahlung reflektierenden Oberfläche **9** eines EUV-Kollektors **10** erfasst und zu einem transformierten Strahlungsbündel **8** geformt. Die aufgenommene numerische Apertur an der Strahlungsquelle **2** ist also  $NA = 0,7$ . Die reflektierende Oberfläche **9** stellt dabei die erste bündelformende Oberfläche nach der EUV-Strahlungsquelle **2** dar. Die reflektierende Oberfläche **9** ist also die erste bündelführende Oberfläche, die die Form des EUV-Strahlungsbündels **8** beeinflusst. Ein Beispiel für eine bündelführende Oberfläche, die im Unterschied zur reflektierenden Oberfläche **9** keine Formbeeinflussung mit sich bringt, ist eine plane Spiegelfläche.

[0045] Der Abstand der Strahlungsquelle **2** vom Kollektor **10** beträgt 400 mm.

[0046] [Fig. 1a](#) zeigt eine Randkontur **10a** der zur Beaufschlagung mit dem quellseitigen Strahlungsbündel **8a** vorgesehenen Fläche auf dem EUV-Kollektor **10**. Die Randkontur **10a** ist kreisförmig, hat also eine Form, die in Bezug auf zwei senkrecht aufeinanderstehenden Achsen, die die Randkontur **10a** aufspannen, spiegelsymmetrisch ist. Bei diesen beiden Achsen handelt es sich insbesondere um die x- und die y-Achse.

[0047] Die reflektierende Oberfläche **9** ist so geformt, dass sie die EUV-Strahlungsquelle **2** in einer nachgeordneten Bündelformungsebene **11** in eine Mehrzahl von nebeneinander liegenden und definiert zueinander angeordneten Strahlungsquellen-Bildern überführt, wie nachfolgend nach näher erläutert wird.

[0048] In der Bündelformungsebene **11** hat das EUV-Strahlungsbündel **8** im Schnitt eine Randkontur **11a** mit einer in etwa nieren- oder bohnenförmigen Form, sodass dort eine in der [Fig. 2](#) dargestellte Beleuchtungsverteilung **12** vorliegt.

[0049] Die [Fig. 1](#) zeigt das EUV-Beleuchtungssystem gestreckt längs einer optischen Achse **13**, wobei aus Gründen der Vereinfachung der Darstellung weder der gefaltete Aufbau des Beleuchtungssystems **1** noch ab dem Kollektor **10** die reflektierende Wirkung optischer Komponenten dargestellt ist. Die optische Achse **13** verläuft längs der z-Achse in der [Fig. 1](#). Die optische Achse **13** fällt wiederum mit einer Hauptstrahlrichtung für das transformierte EUV-Strahlungsbündel **8** zusammen.

[0050] Die Bündel-Randkontur **11a** ist so geformt, dass sie in Bezug auf maximal eine Achse, nämlich die y-Achse in der [Fig. 2](#), die senkrecht auf einer für das Strahlungsbündel **8** vorgesehenen Hauptstrahlrichtung, die mit der optischen Achse **13** zusammenfällt, im Bereich der Bündelformungsebene **11** steht, spiegelsymmetrisch ist.

[0051] **Fig. 3** zeigt die EUV-Projektionsbelichtungsanlage **7** im Bereich des EUV-Beleuchtungssystems **1** einschließlich der faltenden Wirkung der dort eingezeichneten reflektiven Elemente. Am Ort der Bündelformungsebene **11** ist ein spekulärer Reflektor **14** angeordnet, der das einfallende EUV-Strahlungsbündel **8**, welches auf den spekulären Reflektor mit der Beleuchtungsverteilung **12** auftrifft, so formt, dass das EUV-Strahlungsbündel **8** in der Beleuchtungsebene **3**, also der Retikel- bzw. Objektebene, das Beleuchtungsfeld **4** ausleuchtet, wobei in einer dem Retikel **5** nachgeordneten Eintrittspupillenebene **15** des EUV-Projektionsobjektivs eine homogen ausgeleuchtete, kreisförmig berandete Pupillen-Beleuchtungsverteilung **16** resultiert, die schematisch in der **Fig. 7** dargestellt ist und auch als Beleuchtungssetting bezeichnet ist. Das Beleuchtungssetting **16** stellt dabei ein konventionelles Beleuchtungssetting dar. Eine entsprechende Ausgestaltung der reflektierenden Oberfläche **9** des EUV-Kollektors **10** vorausgesetzt, können auch andere Beleuchtungssettings wie z. B. ein annulares Beleuchtungssetting, ein Dipol-Beleuchtungssetting oder ein Quadrupol-Beleuchtungssetting vorgegeben werden.

[0052] Der Abstand des Kollektors **10** zum spekulären Reflektor **14** beträgt 1800 mm.

[0053] Die Wirkung des spekulären Reflektors **14** ist beschrieben in der US 2006/0132747 A1. Pro Einzelkanal, also pro Facette des spekulären Reflektors **14**, erzeugt dieser ein derart kleines Bild der Strahlungsquelle **2** auf dem Retikel **5**, dass keine Überstrahlung des bogenförmigen Beleuchtungsfeldes **4** erfolgt. Wird ein zentrales kreisförmiges Element mit 2,5 mm Radius in der Bündelformungsebene **11** ausgeblendet, so resultiert in der Objektebene **3** eine ebenfalls kreisförmige und homogene Beleuchtungsverteilung mit einem vergleichbaren Durchmesser. Wird ein entsprechendes außeraxiales kreisförmiges Element mit 2,5 mm Radius in der Bündelformungsebene **11** ausgeblendet, so ändert sich die Beleuchtungsverteilung in der Objektebene **3**, wobei diese Änderung so ist, dass die Funktion des spekulären Reflektors **14** aufrecht erhalten ist.

[0054] Die reflektierende Oberfläche **9** ist so geformt, dass die hierdurch erzeugte Mehrzahl von Strahlungsquellen-Bildern eine Anordnung hat, nämlich die Beleuchtungsverteilung **12**, die an die Form des auszuleuchtenden Beleuchtungsfeldes **4** angepasst ist. Hierzu ist die Oberfläche **9** in eine Mehrzahl reflektierender Facetten **17** unterteilt, die sich zu einer Gesamt-Reflektorfläche der reflektierenden Oberfläche **9** ergänzen. Die Facetten **17** decken dabei die reflektierende Oberfläche **9** nach Art eines Parketts ab, sodass die Gesamt-Reflektorfläche, also die gesamte nutzbare reflektierende Fläche, praktisch genau so groß ist, wie die reflektierende Oberfläche **9** selbst.

[0055] **Fig. 4** zeigt beispielhaft die abbildende Wirkung von drei aus den Facetten **17** ausgewählten Facetten **17a**, **17b** und **17c** der reflektierenden Oberfläche **9**. Die reflektierenden Flächen der einzelnen Facetten **17a** bis **17c** sind Ausschnitte aus Rotationsellipsoiden **18**, die zur Veranschaulichung in der **Fig. 4** komplett im Schnitt dargestellt sind. In einem der beiden Brennpunkte dieser Rotationsellipsoide **18** befindet sich die EUV-Strahlungsquelle **2**. Im zweiten Brennpunkt der Rotationsellipsoide **18** liegt jeweils ein Strahlungsquellen-Bild **19**. Die Strahlungsquellen-Bilder **19** sind Rasterpunkten in der Bündelformungsebene **11** zugeordnet. Über den Kippwinkel der Facetten **17a** bis **17c** kann der jeweilige Rasterpunkt, also der Ort des Strahlungsquellen-Bildes **19** in der Bündelformungsebene **11**, ausgewählt werden. Durch die Raster-Zuordnung sind die Strahlungsquellen-Bilder **19** in zwei Dimensionen, nämlich in der x-Richtung und in der y-Richtung zueinander versetzt angeordnet. Die Mehrzahl der Strahlungsquellen-Bilder **19** gibt eine Bilderschar vor. Die Randkontur dieser Bilderschar stellt gleichzeitig eine Randkontur des transformierten Strahlungsbündels **8** in der Bündelformungsebene **11** dar. Diese Bündel-Randkontur in der Bündelformungsebene **11** ist nicht rotationssymmetrisch in Bezug auf die Strahlrichtung **13** des transformierten Strahlungsbündels **8**.

[0056] Die Facetten **17a** bis **17c** können aktiv verkippt sein. Hierzu ist jede Facette **17a** bis **17c** über eine mechanische Verbindung **20** individuell mit einem Aktuator **21** verbunden, bei dem es sich beispielsweise um einen Piezo-Aktuator handeln kann.

[0057] Durch Verkipptung der Facetten **17a** bis **17c** wird der zweite Brennpunkt der Rotationsellipsoide **18**, also der Ort des jeweiligen Strahlungsquellen-Bildes **19**, entsprechend mitverkippt. Dies führt abhängig vom Kippwinkel dazu, dass die Strahlungsquellen-Bilder **19** aus der Bündelformungsebene **11** herauswandern können. Dies kann zu einer Verschmierung der Strahlungsquellen-Bilder **19** auf dem spekulären Reflektor **14** führen, was, beispielsweise zur Homogenisierung der Ausleuchtung des Beleuchtungsfeldes **4**, durchaus erwünscht sein kann.

[0058] Die einzelnen Facetten **17** können diskret zueinander angeordnet sein, also voneinander unabhängige reflektierende Oberflächen haben. Alternativ ist es möglich, die einzelnen Facetten **17** als ineinander übergehende Abschnitte einer einzigen reflektierenden Oberfläche auszuführen. Die so ausgebildete reflektierende

Oberfläche **9** kann wiederum aktiv deformierbar sein, indem am Ort jeder einzelnen Facette **17** wiederum eine mechanische Verbindung zu einem Aktuator hergestellt ist, sodass die reflektierende Oberfläche **9** am Ort jeweils individueller Facetten **17** deformiert werden kann. Kippwinkel der aktiven Facetten **17** können so angepasst sein, dass Abbildungsfehler, die durch nachfolgende Komponenten eingeführt werden, kompensiert werden.

[0059] [Fig. 5](#) verdeutlicht die Wirkung des spekularen Reflektors **14**. Auch der spekulare Reflektor **14** weist eine Mehrzahl von Einzelfacetten auf, wie in der US 2006/0132747 A1 beschrieben. Ein von einer Untermenge der Facetten des spekularen Reflektors **14** ausgehendes konvergentes Einzel-Strahlungs Bündel **22** mit einem Öffnungswinkel  $\beta$  von  $NA = 0,25/4$  und einem Hauptstrahl **23** erzeugt dabei in der Beleuchtungsebene **3** einen hinreichend kleinen Lichtfleck und leuchtet in der Eintrittspupillenebene **15** die Pupillen-Beleuchtungsverteilung **16** aus. Alle Einzel-Strahlenbündel **22**, die von der nierenförmigen Beleuchtungsverteilung **12** ausgehen, ergänzen sich in der Beleuchtungsebene **3** zum bogenförmigen Beleuchtungsfeld **4** und leuchten jeweils für sich die gesamte Pupillen-Beleuchtungsverteilung **16** aus. Die Form der Beleuchtungsverteilung **12** ist also vorgegeben durch eine Rückprojektion der Form des Beleuchtungsfelds **4** mit der Form der Pupillen-Beleuchtungsverteilung **16**.

[0060] [Fig. 8](#) zeigt eine mögliche Belegung der reflektierenden Oberfläche **9** des EUV-Kollektors **10** mit den Facetten **17** zur Erzeugung der nierenförmigen Beleuchtungsverteilung **12** in der Bündelformungsebene **11**. Diese Belegung stellt eine Parkettierung der reflektierenden Oberfläche **9** dar. Diese Belegung wurde auf Basis eines Algorithmus gewonnen, der beschreiben ist in Kochengin und Olikier, Inverse Problems 13 (1997), S. 363 bis 367. Neben den zur Erzeugung der Beleuchtungsverteilung **12** aktiven Facetten **17** sind in der [Fig. 8](#) randseitig flächenmäßig kleinere, nicht aktive Facetten **24** dargestellt, die innerhalb der nierenförmigen Beleuchtungsverteilung **12** kein Nutzlicht erzeugen. Die nichtaktiven Facetten **24** ergeben sich aus rechentechnischen Gründen, da die Beleuchtungsverteilung von einem rechteckigen Facettenraster ausgeht. Auch Belegungen ohne derartige, nicht aktive Facetten **24** sind möglich, beispielsweise durch Verwendung eines krummlinig berandeten Grundrasters. Die aktiven Facetten **17** haben alle in etwa die gleiche absolute reflektierende Fläche, sind aber hinsichtlich ihrer Berandung unterschiedlich geformt. Zur Erzeugung einer Eindellung **25** der nierenförmigen Beleuchtungsverteilung **12** sind die Facetten **17** in einem Abschnitt **26** der reflektierenden Oberfläche **9**, der in der [Fig. 8](#) oben mittig dargestellt ist, in [Fig. 8](#) vertikaler Richtung deutlich ausgedehnter als in [Fig. 8](#) horizontaler Richtung. Dies bedingt, dass die reflektierende Oberfläche **9** im mittleren Bereich weniger horizontale Reihen aktiver Facetten **17** aufweist, als in seitlichen Abschnitten **27** auf Höhe von Ausbuchtungen **28** der Beleuchtungsverteilung **12**, die der Eindellung **25** benachbart sind. Die Höhe von Zeilen und die Breite von Spalten, in denen die aktiven Facetten **17** angeordnet sind, variiert also längs des Verlaufes der Zeilen und Spalten von einer Seite der reflektierenden Oberfläche **9** des Kollektors **10** zur anderen.

[0061] [Fig. 9](#) zeigt eine diskrete Beleuchtungsverteilung **29** am Ort der Bündelformungsebene **11**, die dann entsteht, wenn diskrete aktive Facetten **17** in der Anordnung nach [Fig. 8](#) vorliegen, deren reflektierende Facettenflächen jeweils abschnittsweise die Form von Rotationsellipsoiden wie die Facetten **17a** bis **17c** nach [Fig. 4](#) haben. In diesem Fall liegt ein diskretes Raster aus Strahlungsquellen-Bildern **19** vor, wobei die Rasteranordnung nach [Fig. 9](#) der Zeilen- und Spaltenzuordnung der aktiven Facetten **17**, die in der [Fig. 8](#) dargestellt ist, entspricht. Die Kippwinkel der aktiven Facetten **17** relativ zu einer Hauptebene des Kollektors **10** sind zur Erzeugung der diskreten Beleuchtungsverteilung **29** daher vergleichsweise gering. Vergleichsweise große Kippwinkel, die absolut gesehen jedoch immer noch klein sind, liegen im Bereich derjenigen aktiven Facetten **17** vor, die den Rand der Eindellung **25** ausleuchten, da dieser Rand von aktiven Facetten **17** ausgeleuchtet wird, die nahe dem Rand des EUV-Kollektors **10** angeordnet sind, gleichzeitig aber die ihnen geordneten EUV-Einzel-Strahlungs Bündel relativ weit auf die optische Achse **13** zu umlenken müssen, damit die Eindellung **25** erzeugt wird.

[0062] Die diskrete Beleuchtungsverteilung **29** wird durch Glättung der Randbereiche der einzelnen Facetten **17**, also durch Aufhebung der diskreten Facettenformen, in die kontinuierliche Beleuchtungsverteilung **12** umgewandelt. Durch die Glättung wird erreicht, dass die reflektierende Oberfläche **9** an jedem Ort innerhalb ihrer Berandung stetig differenzierbar und damit einfacher zu fertigen ist. Die kontinuierliche Beleuchtungsverteilung **12** ist stärker im Detail nochmals in der [Fig. 11](#) dargestellt. Je dichter die mit starken Linien ausgeführte Schraffur innerhalb der Randkontur **11a** ist, desto höher ist dort die Beleuchtungsintensität. Die im der Randkontur **11a** benachbarten Bereich schwächer ausgeführte Schraffur zeigt den Abschnitt niedrigster Intensität innerhalb der Randkontur **11a** an. Die Glättung erfolgt durch Abtasten der reflektierenden Oberfläche **9** des EUV-Kollektors durch ein äquidistantes Raster mit  $1024 \times 1024$  Pixeln und Entwicklung der Oberflächenform nach Fringe-Zernike-Funktionen:

$$\Delta z(x, y) = \sum_{i=1}^N c_i \cdot Z_i \left( \frac{x}{h_0}, \frac{y}{h_0} \right)$$

**[0063]**  $\Delta z$  stellt dabei die Änderung der Pfeilhöhe der reflektierenden Oberfläche **9** am Ort  $x, y$  dar.  $Z_i$  stellt dabei das  $i$ -te Fringe-Zernike-Polynom dar. Die Fringe-Zernike-Polynome  $Z_i$  lassen sich gemäß einer in der [Fig. 10](#) dargestellten Rechenvorschrift mit den in Born und Wolf, Principles of optics, Pergamon Press (1991), Kap. 9.2.1 definierten Polynomen  $U_n^m$  und  $U_n^{-m}$  identifizieren.  $c_i$  ist der zugehörige Entwicklungskoeffizient.  $h_0$  ist ein Normierungsradius. Dieser wird nachfolgend auch als Normhöhe bezeichnet und wird ebenso wie  $\Delta z(x, y)$  in Millimetern angegeben.

**[0064]** Die nachfolgende Tabelle gibt die Koeffizienten  $c_i$  der Fringe-Zernike-Polynome für die verwendeten ersten 81 Terme wieder.

Normhoehe = 321.626000000

Koeffizienten der Frine-Zernike-Polynome:

c1 = -0.36282323E+02	c2 = 0.52718489E-03	c3 = -0.60799468E-02
c4 = -0.37405030E+02	c5 = 0.24561432E+01	c6 = -0.70658271E-04
c7 = -0.59322581E-04	c8 = 0.64653861E-01	c9 = -0.30653572E+00
c10 = -0.22168952E-04	c11 = 0.24047111E+00	c12 = 0.15096336E-01
c13 = 0.55627835E-04	c14 = 0.13773336E-04	c15 = 0.28816122E-02
c16 = 0.15954013E-01	c17 = -0.38551372E+00	c18 = 0.89462434E-05
c19 = 0.15481795E-04	c20 = -0.41014414E-01	c21 = -0.86133808E-02
c22 = -0.29464885E-04	c23 = -0.12191269E-04	c24 = -0.54210939E-02
c25 = 0.14554570E-01	c26 = 0.21155484E-04	c27 = -0.10519986E+00
c28 = -0.55467558E-02	c29 = -0.21573681E-04	c30 = -0.41773659E-04
c31 = -0.14890301E-01	c32 = -0.49759139E-02	c33 = 0.19583693E-04
c34 = 0.12618462E-04	c35 = -0.62806532E-02	c36 = 0.91426547E-02
c37 = 0.38513612E-01	c38 = -0.69523336E-04	c39 = -0.31378782E-04
c40 = 0.31057266E-01	c41 = -0.13750521E-01	c42 = 0.41018648E-04
c43 = 0.38152655E-04	c44 = -0.63965189E-02	c45 = -0.10837851E-04
c46 = -0.86848020E-05	c47 = -0.60701056E-05	c48 = -0.38040827E-02
c49 = 0.44370980E-02	c50 = 0.26018572E-04	c51 = 0.46705923E-01
c52 = -0.16918508E-01	c53 = 0.48502320E-04	c54 = 0.41991300E-04
c55 = 0.88894335E-02	c56 = -0.10982292E-01	c57 = -0.40892313E-04
c58 = -0.17046214E-04	c59 = -0.64149589E-04	c60 = 0.12709571E-02
c61 = -0.17409344E-05	c62 = -0.13007798E-05	c63 = -0.32684958E-04
c64 = 0.17018354E-02	c65 = 0.13159945E-02	c66 = 0.27128648E-04
c67 = 0.17654505E-04	c68 = -0.10203257E-01	c69 = -0.24993567E-02
c70 = -0.42162504E-04	c71 = -0.34044751E-04	c72 = 0.14026511E-02
c73 = -0.64713310E-02	c74 = 0.23205449E-04	c75 = -0.49056809E-05
c76 = 0.22413459E-02	c77 = 0.10284166E-02	c78 = 0.64162272E-05
c79 = -0.42831912E-05	c80 = 0.23257738E-02	c81 = 0.16566163E-03

**[0065]** Über 88% der gesamten kreisförmigen Gesamt-Reflektorfläche des EUV-Kollektors **10** sind mit geglätteten aktiven Facetten **17** belegt.

**[0066]** Das Verhältnis der Fläche, die durch die randseitige Begrenzung der Beleuchtungsverteilung **29** definiert ist, zur Fläche einer kreisförmigen Beleuchtungsverteilung, in die die Beleuchtungsverteilung **29** eingeschrieben ist, beträgt etwa 45%.

**[0067]** [Fig. 12](#) zeigt eine weitere Ausführung eines EUV-Beleuchtungssystems in einer zu [Fig. 3](#) ähnlichen Darstellung. Komponenten, die denjenigen entsprechen, die vorstehend schon unter Bezugnahme auf die [Fig. 1](#) bis [Fig. 11](#) erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugszeichen und werden nicht nochmals im Einzelnen diskutiert.

**[0068]** Bis auf die Formgebung der reflektierenden Oberfläche **9** des EUV-Kollektors **10** entspricht das Beleuchtungssystem nach [Fig. 12](#) dem Beleuchtungssystem nach [Fig. 76](#) in der US 7,186,983 B2. Das vom EUV-Kollektor **10** gesammelte EUV-Strahlungsbündel **8** trifft zunächst auf einen Feldfacettenspiegel **30**. Eine

Facettenanordnung des Feldfacettenspiegels **30** ist beispielhaft in der [Fig. 13](#) dargestellt, die der [Fig. 73](#) der US 7,186,983 B2 entspricht. Die Feldfacetten des Feldfacettenspiegels **30** werden über einen Pupillenfacettenspiegel **31** und eine nachgelagerte Abbildungsoptik, die drei EUV-Spiegel **32**, **33**, **34** umfasst, in das Beleuchtungsfeld **4** in der Objektebene **3** abgebildet.

[0069] Bei der Ausführung nach [Fig. 12](#) liegt die Bündelformungsebene **11**, in der die Strahlungsquellen-Bilder **19** vom EUV-Kollektor **10** erzeugt werden, in einer Feldebene. Der EUV-Kollektor **10** nach [Fig. 12](#) hat eine derart in aktive Facetten **17** unterteilte und geformte reflektierende Oberfläche **9**, dass am Ort des Feldfacettenspiegels **30** eine Beleuchtungsverteilung **35** vorliegt, deren Randbegrenzung mit der gestuften Außenkontur der aktiv reflektierenden Facettenbelegung des Feldfacettenspiegels **30** zusammenfällt.

[0070] [Fig. 14](#) zeigt eine weitere Variante der Facettenbelegung eines EUV-Kollektors **10**. Komponenten, die denjenigen entsprechen, die vorstehend unter Bezugnahme auf die [Fig. 1](#) bis [Fig. 13](#) erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugsziffern und werden nicht nochmals im Einzelnen diskutiert. Auch dieses Beispiel wurde mit einem Algorithmus auf Basis des Fachartikels Kochengin und Oliker, Inverse Problems 13 (1997), S. 363 bis 367, berechnet.

[0071] Mit der Belegung der reflektierenden Oberfläche **9** des Kollektors **10** nach [Fig. 14](#) mit aktiven Facetten **17** wird eine Beleuchtungsverteilung **36** erzeugt, deren geglättete, kontinuierliche Gestalt in der [Fig. 16](#) gezeigt ist. Die Beleuchtungsverteilung **36** hat die Form eines Quadratrahmens, der begrenzt ist von einer äußeren, quadratförmigen Einhüllenden **37** und einer inneren quadratförmigen Einhüllenden **38**. Innerhalb der inneren Einhüllenden **37** und außerhalb der äußeren Einhüllenden **38** liegt, falls überhaupt, nur eine sehr geringe Beleuchtungsintensität vor. Zwischen den Einhüllenden **37**, **38** wächst die Beleuchtungsintensität, ausgehend von der inneren Einhüllenden **37**, zunächst kontinuierlich an, bis die Intensität dann ab etwa der Mitte zwischen den Einhüllenden **37**, **38** zur äußeren Einhüllenden **38** hin wieder kontinuierlich abfällt. Die Zuordnung der Intensitäten zu den verschiedenen Schraffuren der [Fig. 16](#) veranschaulicht eine in der [Fig. 16](#) rechts dargestellte Intensitäts-Skala. Eine derartige Quadratrahmen-Ausleuchtung ist für EUV-Beleuchtungssysteme erwünscht, bei denen zentrale Bereiche des Feldfacettenspiegels **30** nicht in das Beleuchtungsfeld in der Objektebene **3** überführt werden können.

[0072] [Fig. 15](#) zeigt entsprechend [Fig. 9](#) eine diskrete Beleuchtungsverteilung **39** vor der Glättung der reflektierenden Oberfläche **9** des Kollektors **10** nach [Fig. 14](#), also so lange noch diskrete reflektierende Flächen der aktiven Facetten **17** in Form von Rotationsellipsoiden vorliegen. Die Beleuchtungsverteilung **39** hat eine quadratische Randkontur **39a**, hat also eine Form, die wiederum in Bezug auf zwei senkrecht aufeinanderstehende Achsen, die die Randkontur **39a** aufspannen, spiegelsymmetrisch ist. Bei diesen beiden Achsen kann es sich beispielsweise um die beiden Diagonalen der quadratischen Randkontur **39a** oder um die beiden aufeinander senkrecht stehenden Mittelhalbierenden der Bündel-Randkontur **39a** handeln.

[0073] In einem kissenförmigen zentralen Abschnitt **40** der reflektierenden Oberfläche **9** des Kollektors **10** nach [Fig. 14](#) liegen nicht aktive Facetten **24** vor, die wiederum flächenmäßig deutlich kleiner sind als die aktiven Facetten **17**. Ein ebenfalls quadratischer Innenbereich der Beleuchtungsverteilung **39** wird mit den nicht aktiven Facetten **24** beaufschlagt, so dass die dortige Beleuchtungsintensität gegenüber der sonstigen Intensität vernachlässigbar ist. In den Ecken der quadratischen Randkontur liegt eine im Vergleich zur sonstigen Beleuchtungsintensität etwas höhere Beleuchtungsintensität vor. Benachbart zum inneren quadratischen Bereich der Randkontur **39** liegt eine im Vergleich zur sonstigen Beleuchtungsintensität etwas geringere Intensität vor. Dies ist in der [Fig. 15](#) durch entsprechende Schraffuren angedeutet.

[0074] Jeder aktiven Facette **17** ist wiederum ein Strahlungsquellen-Bild **19** zugeordnet, wobei der Rasterplatz des Strahlungsquellen-Bildes **19** jeweils in Zeile und Spalte dem Ort der aktiven Facette **17** entspricht.

[0075] Die Lichtverluste durch die nichtaktiven Facetten **24** betragen bei der Ausführung nach [Fig. 14](#) etwa 5%. Die Gesamtfläche aller nichtaktiven Facetten **24** zusammen beträgt also etwa 1/20 der Fläche der aktiven Facetten **17** bei der Ausführung nach [Fig. 14](#).

[0076] Auch andere Gestaltungen der Form der reflektierenden Oberfläche **9** sind möglich, mit denen erreicht wird, dass in der Bündelformungsebene **11** eine an das weitere EUV-Beleuchtungssystem **1** angepasste und von der Rotationssymmetrie abweichende Form hergestellt wird. All diesen reflektierenden Oberflächen der verschiedenen möglichen Ausführungen für den EUV-Kollektor **10** ist gemeinsam, dass es mindestens einen Schnitt durch die reflektierende Oberfläche **9** gibt, der einen Einfall- und einen Ausfallstrahl ein- und desselben EUV-Emissionsstrahls (vgl. Strahlen **8a** und **8** in der [Fig. 1](#)) beinhaltet, der nicht durch einen Kegelschnitt

parametrisierbar ist.

**[0077]** Generell hat der EUV-Kollektor **10** eine Freiformfläche als reflektierende Oberfläche **9**. Die Pfeilhöhe einer solchen Freiformfläche kann parametrisiert werden, wie dies dem Fachmann beispielsweise im Zusammenhang mit der Parametrisierung der reflektierenden Freiform-Oberflächen von Spiegeln innerhalb eines EUV-Projektionsobjektivs bekannt ist. Auch Spline-Funktionen, beispielsweise NURBS (Non Uniform Rational Bezier Splines), sind zur Parametrisierung derartiger Freiformflächen möglich.

**[0078]** Aktiv deformierbar oder verkipptbar können auch Segmente der reflektierenden Oberfläche **9** sein, die in ihrer Gestalt nicht mit den Facetten übereinstimmen müssen. So kann ein deformierbares oder verkipptbares Segment beispielsweise eine Vielzahl von Facetten beinhalten.

**[0079]** Beim Design der reflektierenden Oberfläche **9** des EUV-Kollektors wird folgendermaßen vorgegangen: Zunächst wird die Beleuchtungsverteilung **12** in der Bündelformungsebene **11** in numerischer oder analytischer Form vorgegeben. Bei der Bündelformungsebene **11**, in der die Beleuchtungsverteilung **12** vorgegeben ist, muss es sich nicht zwingend um eine plane Ebene handeln, es kann sich auch um eine gekrümmte Fläche handeln. Weiterhin wird die Abstrahlcharakteristik der Strahlungsquelle **2** und es wird der zu kollektierende Raumbereich, also z. B. der Öffnungswinkel  $\alpha$ , vorgegeben. Es kann ein beliebig berandeter Raumwinkelbereich  $\Omega$  aufgenommen werden, der keinerlei Symmetrie besitzen muss und auch Obskurationen beinhalten kann. Es muss nicht zwingend die Emission **8a** der Strahlungsquelle **2** direkt kollektiert werden. Genauso kann auch das Bild der Strahlungsquelle **2** erfasst werden, es kann also eine sekundäre Strahlungsquelle kollektiert werden. Nun wird ein Abstand, den der Kollektor **10** zur Strahlungsquelle **2** einhalten soll, vorgegeben und der Kollektor **10** wird an dieser Stelle als numerisch zunächst noch nicht vollständig parametrisierte Fläche in das Beleuchtungssystem im Strahlengang zwischen der Strahlungsquelle **2** und der Bündelformungsebene **11** eingebracht. Nun wird die reflektierende Oberfläche **9** durch einen zur Beschreibung von Freiformflächen geeigneten Funktionensatz parametrisiert. Anschließend wird eine Gütefunktion generiert, die im Wesentlichen auf den Abweichungen eines Ist-Beleuchtungsprofils, den die eingebrachte reflektierende Oberfläche **9** erzeugt, von einem Soll-Beleuchtungsprofil, also der Beleuchtungsverteilung **12**, basiert. Nun werden die Koeffizienten der Parametrisierung der reflektierenden Oberfläche **9** mit gängigen Methoden der lokalen oder globalen Optimierung zur Maximierung der Gütefunktion variiert. Hierbei werden technologische Randbedingungen wie maximal und minimal einzuhaltende Einfallswinkel oder Baugrößen mit berücksichtigt. Eine auf dem Kollektor **10** örtlich variierende Reflektivität der Spiegelschicht kann in iterativer Weise in einem Sollbeleuchtungsprofil vorgehalten werden, so dass über eine entsprechende Variation der Beleuchtung des Kollektors **10** mit dem quellseitigen Strahlungsbündel **8a** ein Ausgleich der variierenden Kollektorreflektivität erfolgt.

**[0080]** In der [Fig. 1](#) ist eine konvergente Beleuchtung des spekularen Reflektors am Ort der Bündelformungsebene **11** dargestellt. Die einzelnen Facetten **17** erzeugen dabei eine gleichsinnige Abbildung der Strahlungsquellen-Bilder **19**, gesehen beispielsweise vom Rand des Kollektors **10** aus. Teilbündel des Strahlungsbündels **8**, die am Rand des Kollektors **10** in einem Umlaufsinn um die optische Achse **13** betrachtet werden, erzeugen die Strahlungsquellen-Bilder **19** im gleichen Umlaufsinn.

**[0081]** [Fig. 17](#) zeigt in einer zu [Fig. 1](#) ähnlichen Darstellung eine divergente Beleuchtung des spekularen Reflektors in der Bündelformungsebene **11**. Hierbei liegt zwischen dem Kollektor **10** und der Bündelformungsebene **11** eine Kaustik-Ebene **45**. Im Gegensatz zur gleichsinnigen Erzeugung der Strahlungsquellen-Bilder **19** bei der konvergenten Beleuchtung nach [Fig. 1](#) erfolgt bei der divergenten Beleuchtung nach [Fig. 17](#) eine gegensinnige Erzeugung der Strahlungsquellen-Bilder **19**. Teilbündel des Strahlungsbündels **8**, die am Rand des Kollektors **10** in einem Umlaufsinn um die optische Achse **13** betrachtet werden, erzeugen die Strahlungsquellen-Bilder **19** im entgegengesetzt verlaufenden Umlaufsinn. Eine Kollektor-Randkontur **10a**, **11a** des Kollektors **10** sowie eine Bündel-Randkontur des EUV-Strahlungsbündels in der Bündelformungsebene **11** entsprechen den Randkonturen, die vorstehend unter Bezugnahme auf die [Fig. 1](#) bis [Fig. 3](#) erläutert wurden.

## 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

- WO 2007/045434 A2 [0002]
- US 6438199 B1 [0002]
- US 6507440 B1 [0002]
- US 5339346 A [0002]
- US 2006/0132747 A1 [0008, 0053, 0059]
- US 7186983 B2 [0009, 0068, 0068]
- US 2007-0058269 A1 [0018]

### Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Kochengin und Olikier, Inverse Problems 13 (1997), S. 363 bis 367 [0007]
- Kochengin und Olikier, Inverse Problems 13 (1997), S. 363 bis 367 [0060]
- Born und Wolf, Principles of optics, Pergamon Press (1991), Kap. 9.2.1 [0063]
- Kochengin und Olikier, Inverse Problems 13 (1997), S. 363 bis 367 [0070]

## Patentansprüche

1. Bündelführender optischer Kollektor (**10**) zur Erfassung einer Emission (**8a**) einer Strahlungsquelle (**2**) und zur Formung eines transformierten Strahlungsbündels (**8**) aus einem erfassten quellseitigen Strahlungsbündel (**8a**)

– mit einer reflektierenden Oberfläche (**9**), die die erste bündelformende Oberfläche nach der Strahlungsquelle (**2**) darstellt,

**dadurch gekennzeichnet**, dass die reflektierende Oberfläche (**9**) derart geformt ist, dass sie die Strahlungsquelle (**2**) in einer nachgeordneten Ebene (**11**) in eine Bilderschar aus einer Mehrzahl von Strahlungsquellen-Bildern (**19**) überführt, die senkrecht zur Strahlrichtung (**13**) des transformierten Strahlungsbündels (**8**) in zwei Dimensionen (x, y) zueinander versetzt und in Bezug auf die Strahlrichtung (**13**) des transformierten Strahlungsbündels (**8**) nicht rotationssymmetrisch zueinander angeordnet sind, so dass das transformierte Strahlungsbündel (**8**) in der nachgeordneten Ebene (**11**) in Bezug auf die Strahlrichtung (**13**) des transformierten Strahlungsbündels (**8**) eine nicht rotationssymmetrische Bündel-Randkontur (**11a**) hat.

2. Bündelführender optischer Kollektor (**10**) zur Erfassung einer Emission (**8a**) einer Strahlungsquelle (**2**) und zur Formung eines transformierten Strahlungsbündels (**8**) aus einem erfassten quellseitigen Strahlungsbündel (**8a**)

– mit einer reflektierenden Oberfläche (**9**), die die erste bündelformende Oberfläche nach der Strahlungsquelle (**2**) darstellt,

dadurch gekennzeichnet, dass

– eine Kollektor-Randkontur (**10a**) der reflektierenden Oberfläche (**9**) eine Form hat, die in Bezug auf zwei senkrecht aufeinanderstehende Achsen (x, y), die die Randkontur (**10a**) aufspannen, spiegelsymmetrisch ist,  
 – die reflektierende Oberfläche (**9**) des Kollektors (**10**) derart geformt ist, dass eine Bündel-Randkontur (**11a**) des transformierten Strahlungsbündels (**8**) in einer nachgeordneten Ebene (**11**) eine Form hat, die in Bezug auf maximal eine Achse (y), die senkrecht auf einer für das transformierte Strahlungsbündel (**8**) vorgesehenen Hauptstrahlrichtung (**13**) im Bereich der Ebene (**11**) steht, spiegelsymmetrisch ist.

3. Kollektor nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die reflektierende Oberfläche (**9**) derart geformt ist, dass die Bündel-Randkontur (**11a**) eine Anordnung hat, die an die Form eines auszuleuchtenden Feldes (**4**) angepasst ist.

4. Kollektor nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die reflektierende Oberfläche (**9**) derart geformt ist, dass die Bündel-Randkontur (**11a**) eine Anordnung hat, die an die Form (**35; 36**) eines auszuleuchtenden Feldfacettenspiegels (**30**) angepasst ist.

5. Kollektor nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die reflektierende Oberfläche (**9**) in eine Mehrzahl reflektierender Facetten (**17**), insbesondere in mehr als 10 Facetten, unterteilt ist, die sich zu einer Gesamt-Reflektorfläche ergänzen.

6. Kollektor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Facetten (**17**) die reflektierende Oberfläche (**9**) nach Art eines Parketts abdecken.

7. Kollektor nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei der Facetten (**17**) unterschiedliche Flächen abdecken.

8. Kollektor nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass zu den Facetten (**17**) solche mit unterschiedlich geformten Randkonturen gehören.

9. Kollektor nach einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Facetten (**17**) in Zeilen und/oder Spalten angeordnet sind, wobei die Zeilenhöhe und/oder die Spaltenbreite längs des Verlaufes von einer Seite der reflektierenden Oberfläche (**9**) zur anderen variiert.

10. Kollektor nach einem der Ansprüche 5 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest einzelne Facetten (**17**) sphärische Reflektorflächen aufweisen.

11. Kollektor nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest einzelne Facetten (**17**) Ellipsoid-Reflektorflächen aufweisen.

12. Kollektor nach einem der Ansprüche 5 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die reflektierende Ober-

fläche (9) zwischen den Facetten (17) geglättet ist, sodass sie an jedem Ort innerhalb einer Berandung der reflektierenden Oberfläche (9) stetig differenzierbar ist.

13. Kollektor nach einem der Ansprüche 5 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die reflektierende Oberfläche (9) zwischen den Facetten (17) derart geglättet ist, dass sich innerhalb der Bündel-Randkontur (11a) eine kontinuierliche Beleuchtungsverteilung ergibt.

14. Kollektor nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass es beliebige senkrecht aufeinanderstehende Schnitte durch die reflektierende Oberfläche (9) gibt, welche einen Einfalls- und einen Ausfallsabschnitt ein- und desselben Strahls beinhalten, wobei maximal einer der beiden Schnitte durch die reflektierende Oberfläche (9) durch einen Kegelschnitt parametrisiert werden kann.

15. Kollektor nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die reflektierende Oberfläche (9) eine Freiformfläche ist.

16. Kollektor nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass Segmente der reflektierenden Oberfläche (9) und/oder die Facetten (17) aktiv deformierbar oder verkipptbar sind.

17. Kollektor nach einem der Ansprüche 5 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass ein Kippwinkel der Facetten (17) so angepasst ist, dass Abbildungsfehler, die durch nachfolgende Komponenten eingeführt werden, kompensiert werden.

18. EUV-Beleuchtungssystem (1)

- mit einer Strahlungsquelle (2),
- mit einem Kollektor nach einem der Ansprüche 1 bis 17.

19. EUV-Projektionsbelichtungsanlage

- mit einem EUV-Beleuchtungssystem nach Anspruch 18,
- mit einem Projektionsobjektiv zur Abbildung eines durch das EUV-Beleuchtungssystem (1) beleuchteten Objektfeldes (3) in ein Bildfeld in einer Bildebene (6).

20. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 19, gekennzeichnet durch ein dem Kollektor (10) nachgeordnetes bündelformendes Element (14), welches in der nachgeordneten Ebene (11) angeordnet ist, die weder mit einer Feldebene noch mit einer Pupillenebene des Projektionsobjektivs noch mit einer hierzu konjugierten Ebene zusammenfällt.

21. Herstellungsverfahren für ein mikrostrukturiertes Bauelement mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen einer Projektionsbelichtungsanlage (7) nach Anspruch 19 oder 20,
- Bereitstellen eines Retikels,
- Projizieren einer im Beleuchtungsfeld (4) angeordneten Oberfläche des Retikels auf eine lichtempfindliche Schicht eines Wafers.

22. Mikrostrukturiertes Bauelement, hergestellt mit einem Verfahren nach Anspruch 21.

Es folgen 14 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

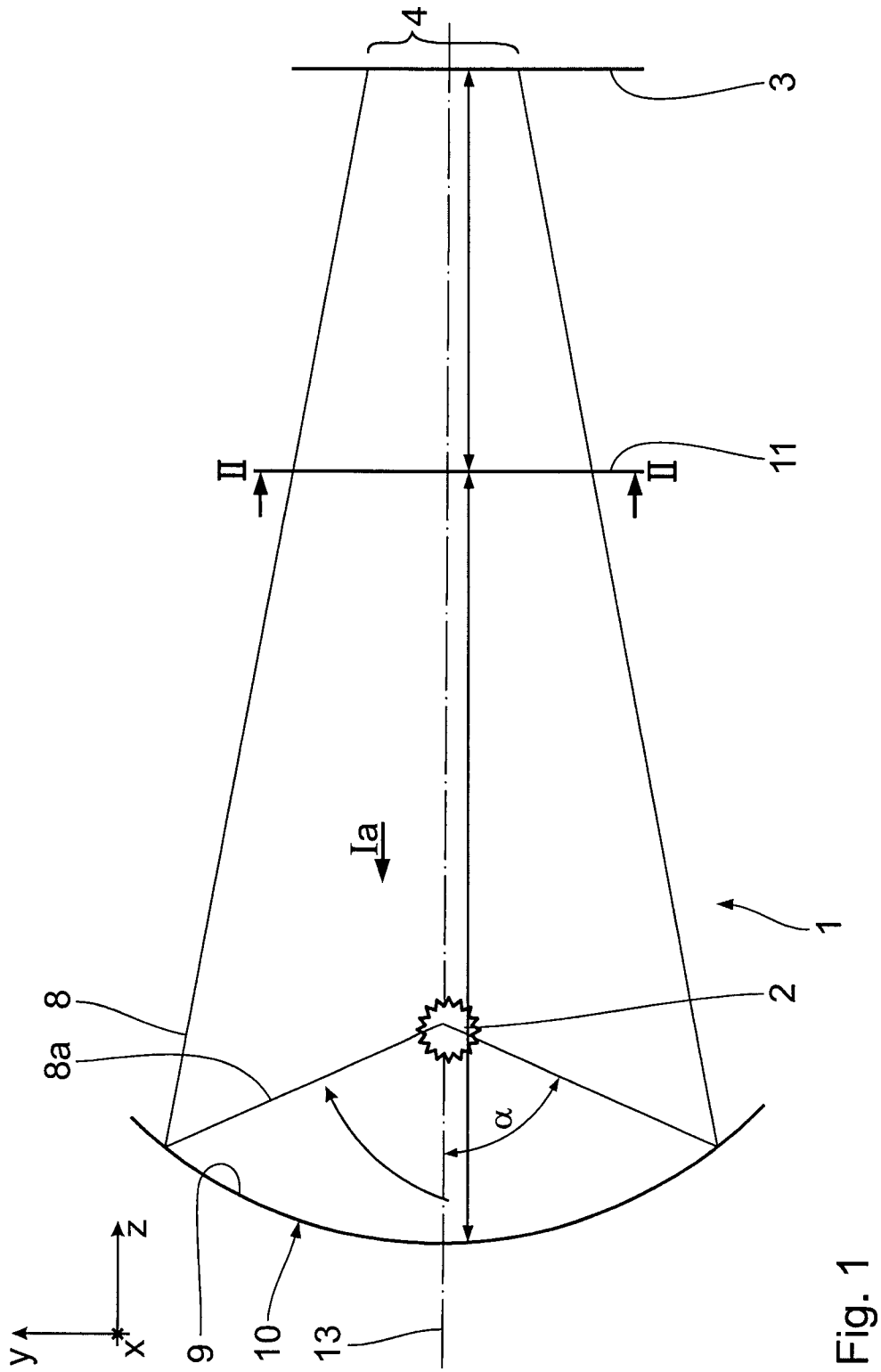


Fig. 1

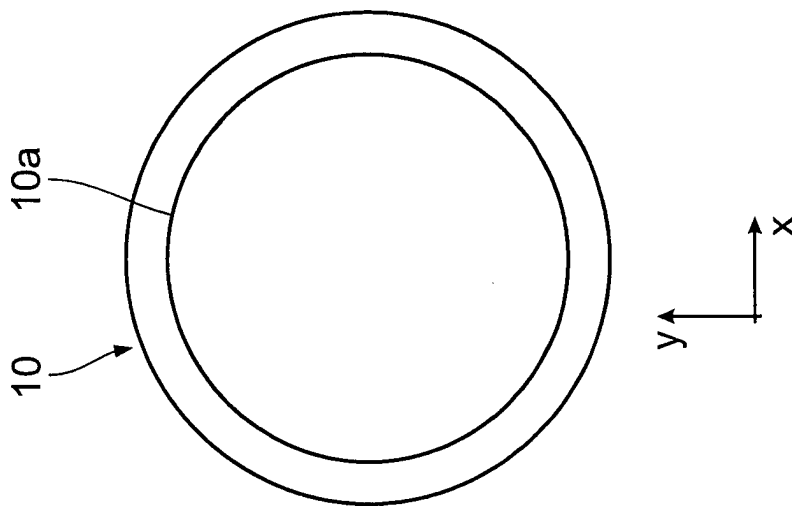


Fig. 1a

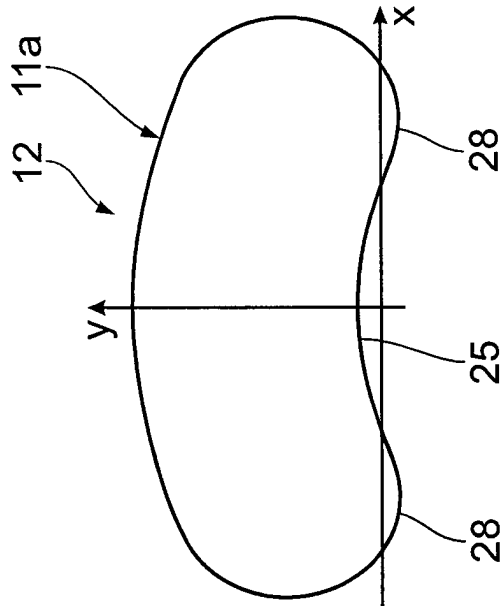


Fig. 2

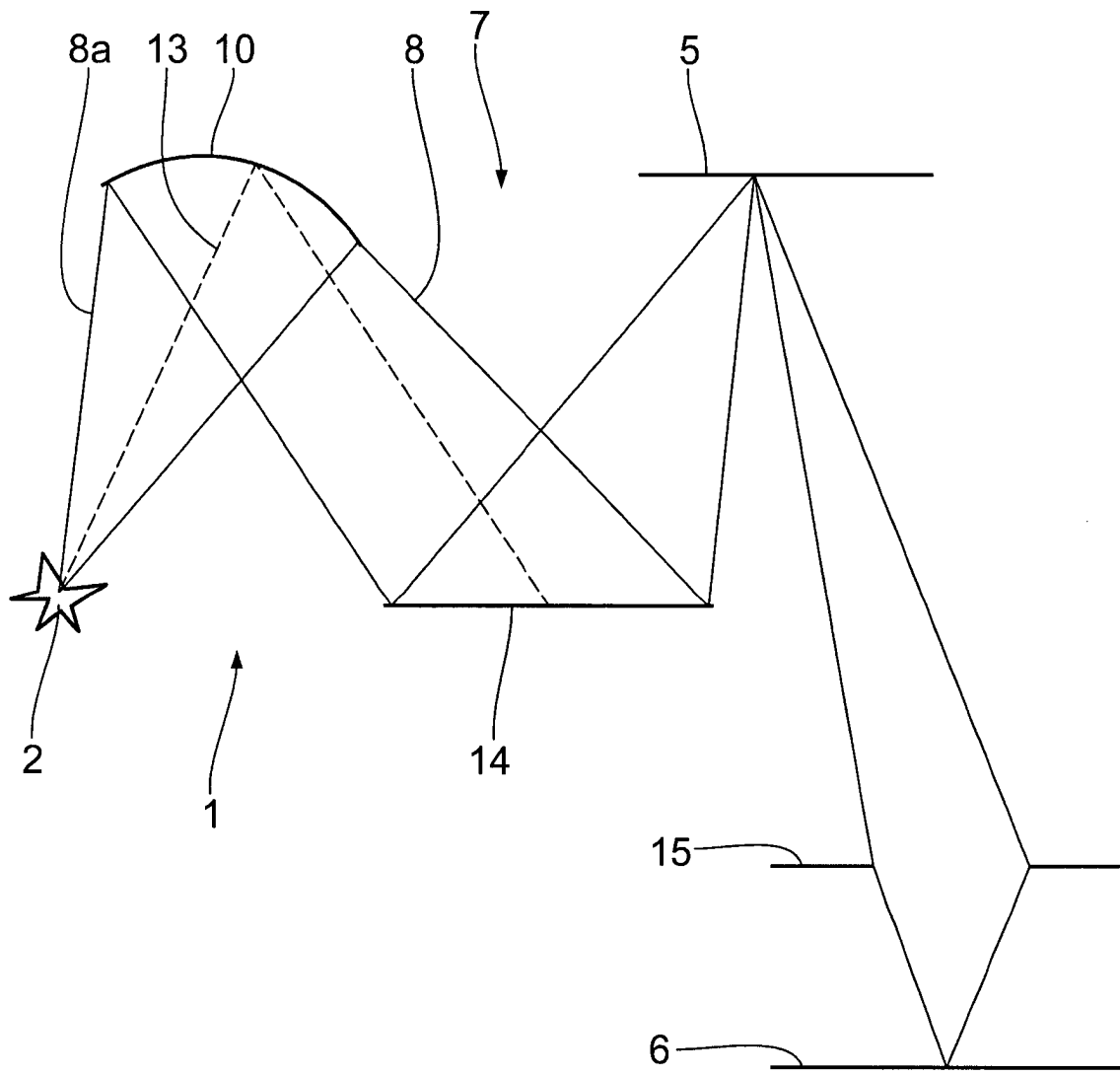


Fig. 3

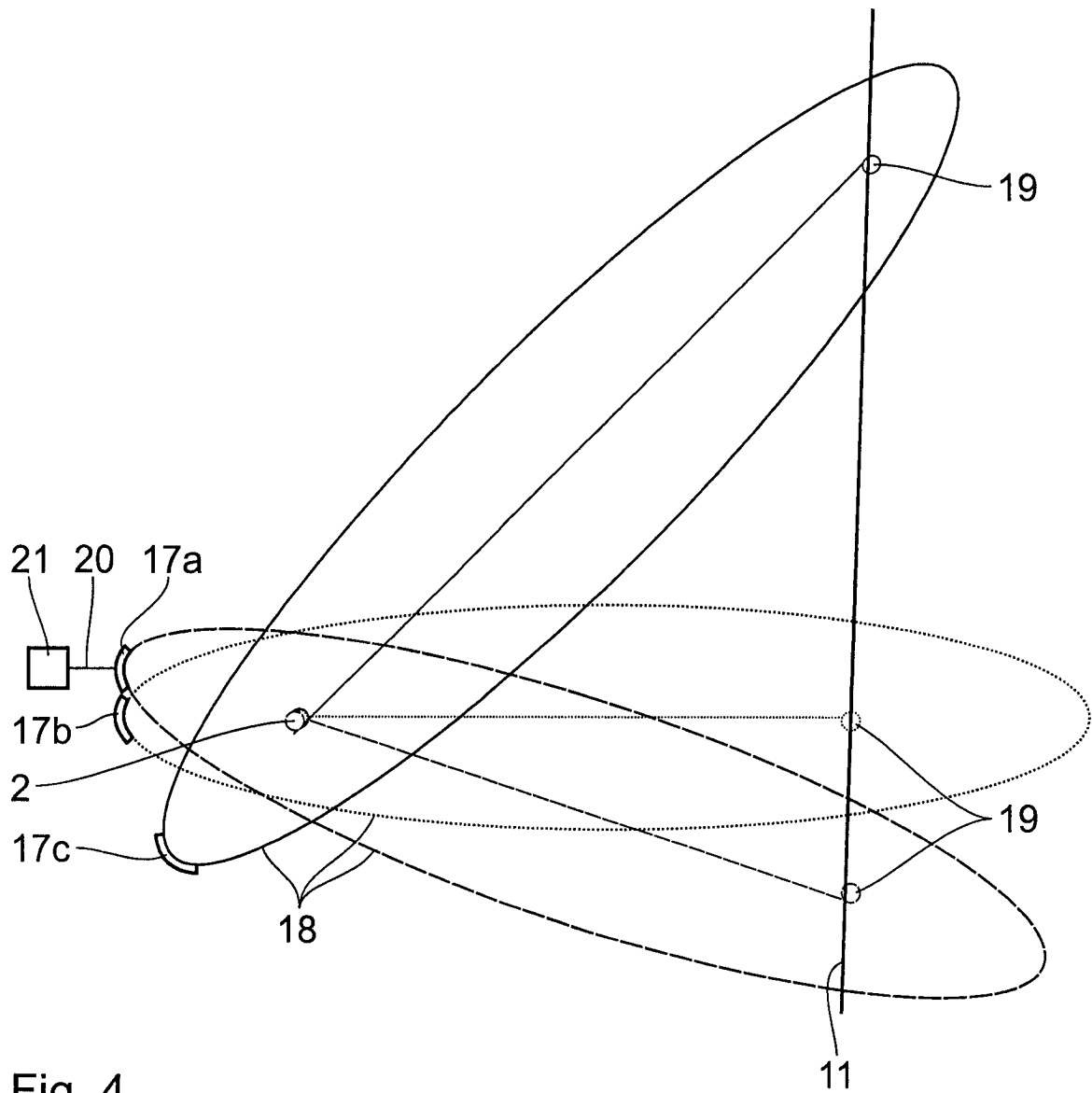


Fig. 4

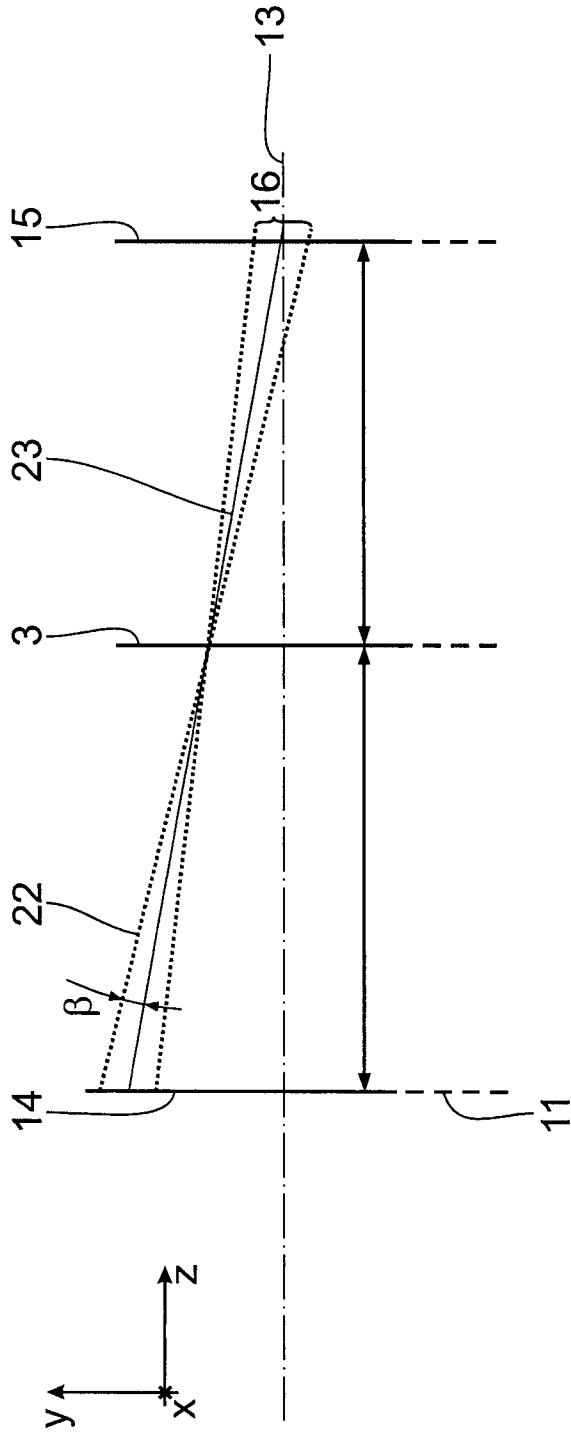


Fig. 5

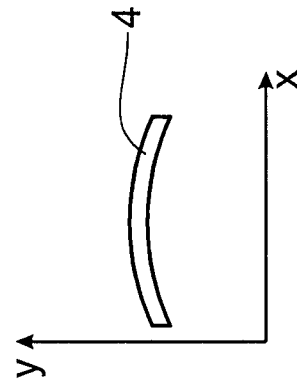


Fig. 6

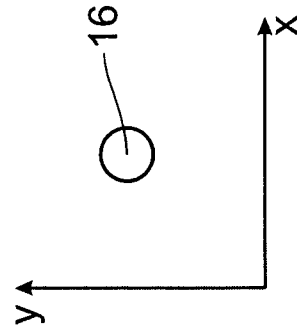


Fig. 7

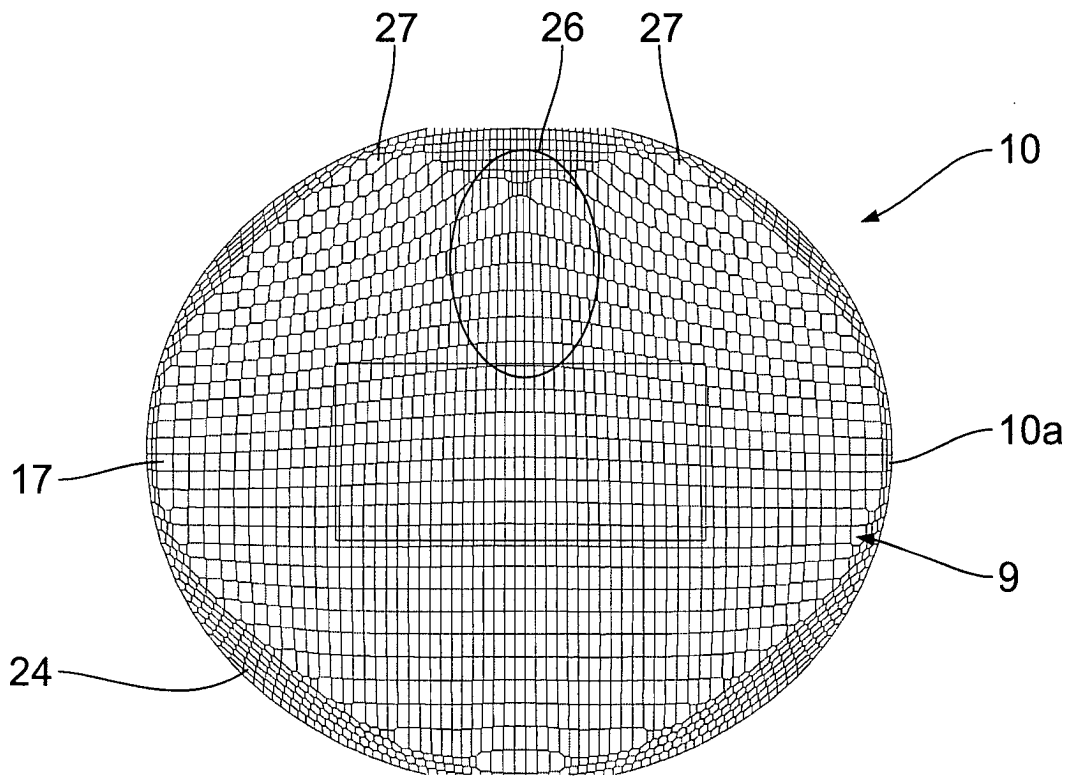


Fig. 8

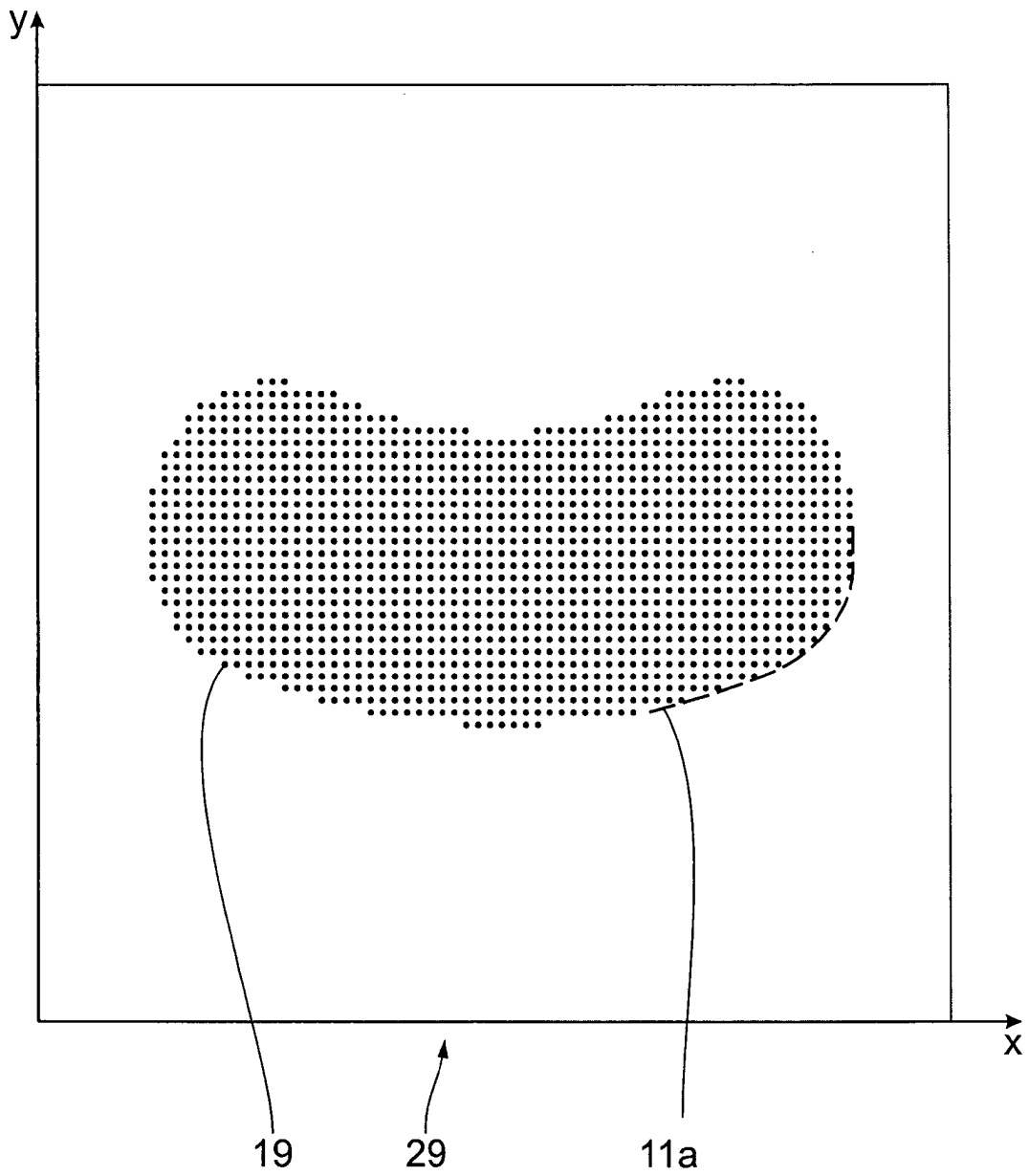


Fig. 9

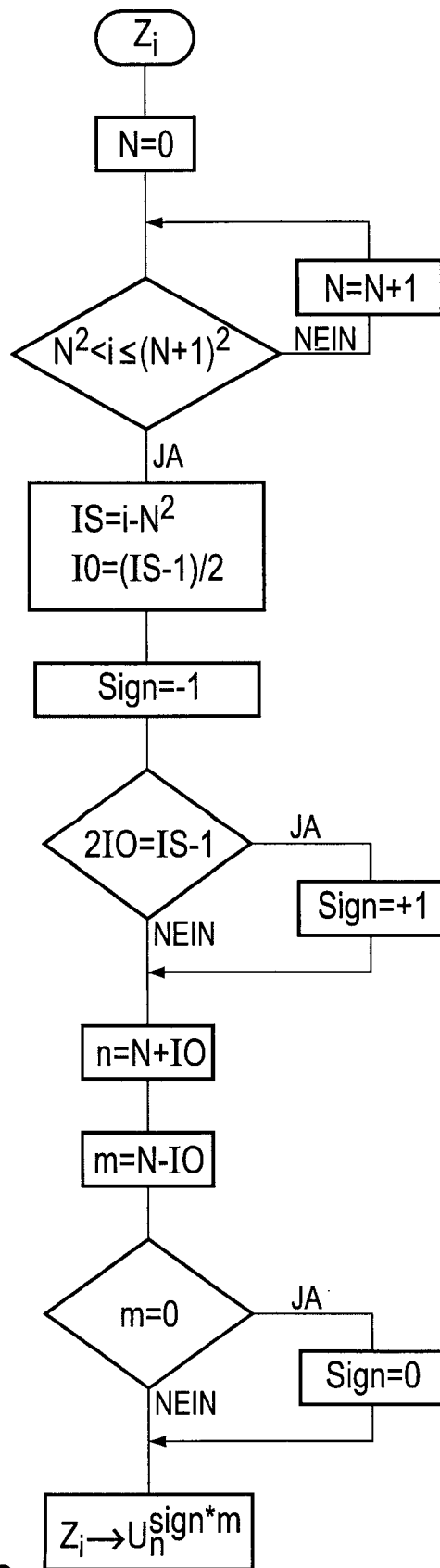


Fig. 10

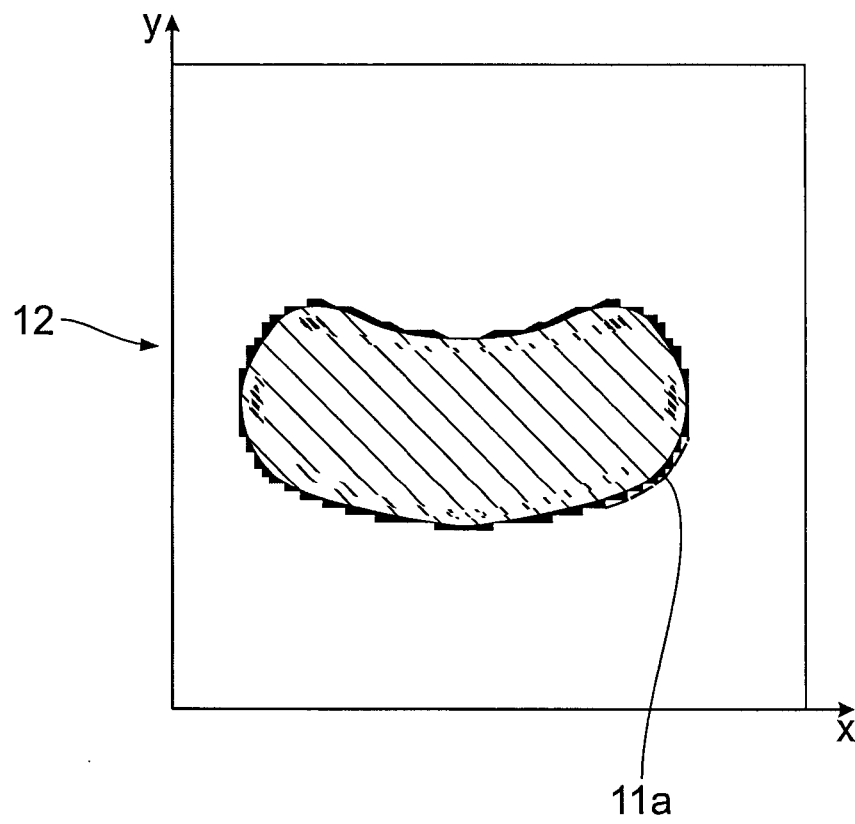


Fig. 11

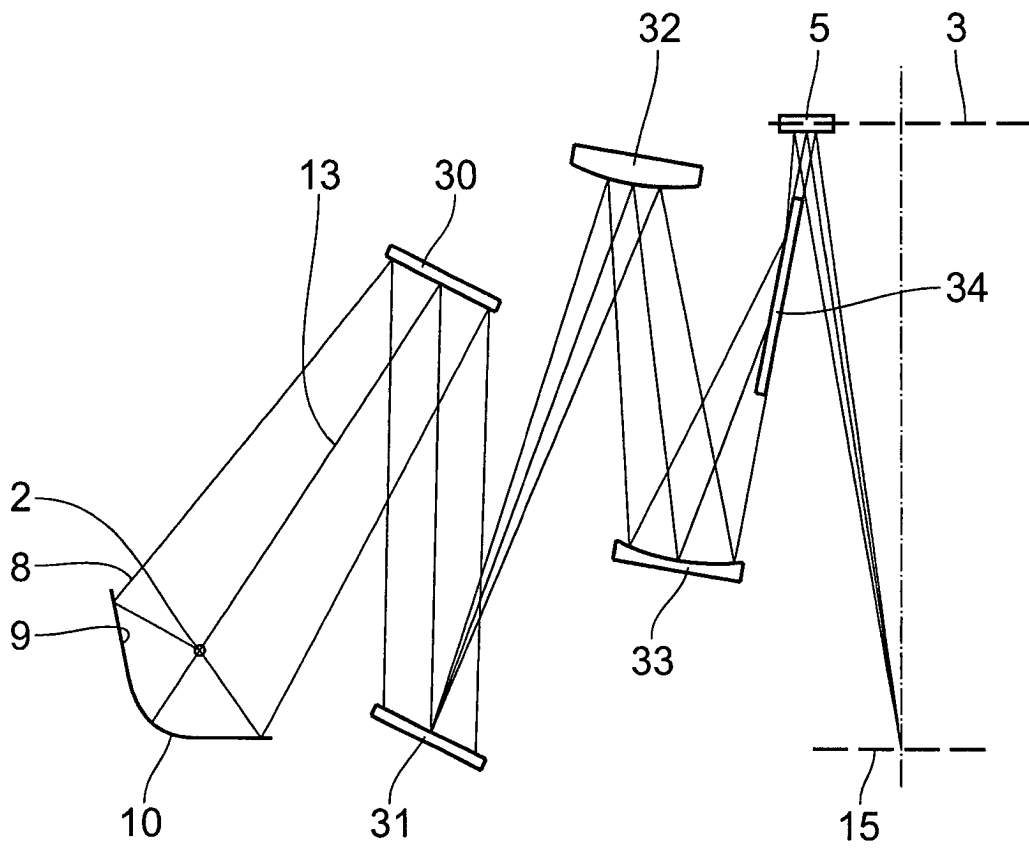


Fig. 12

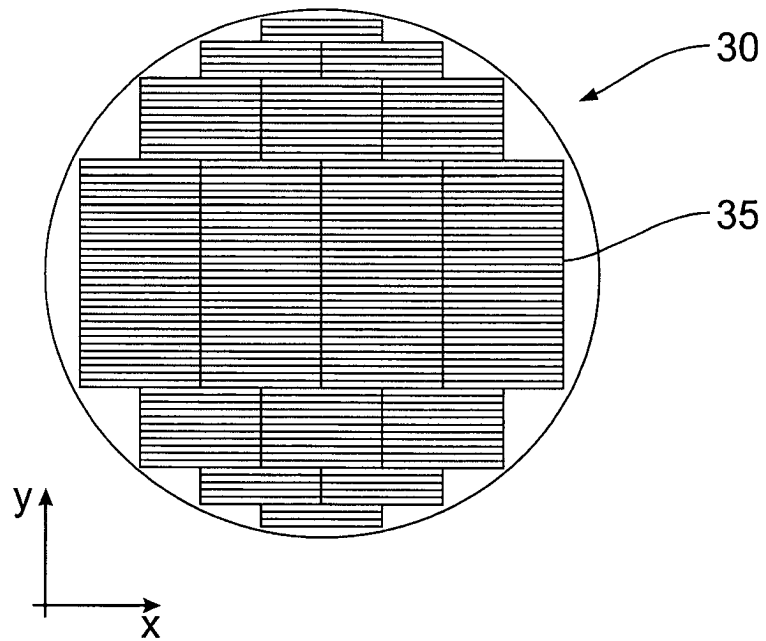


Fig. 13

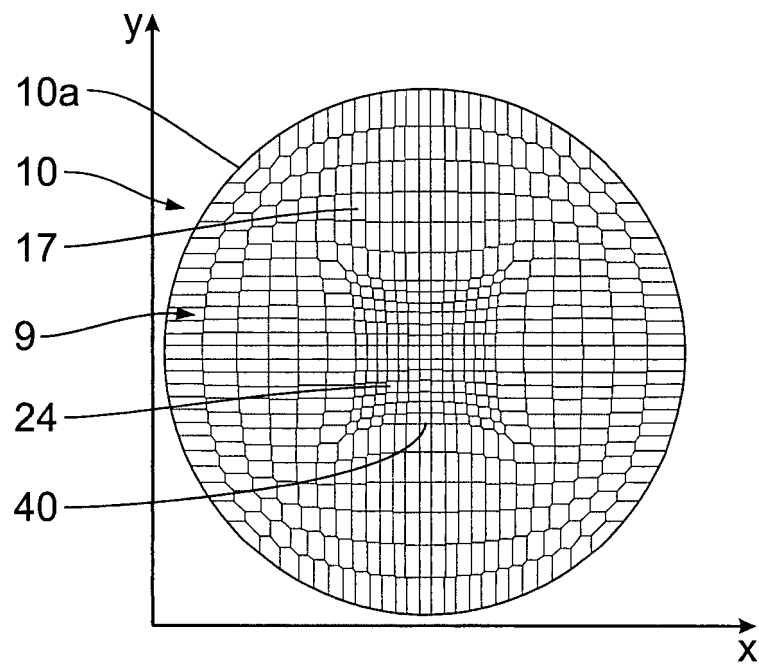


Fig. 14

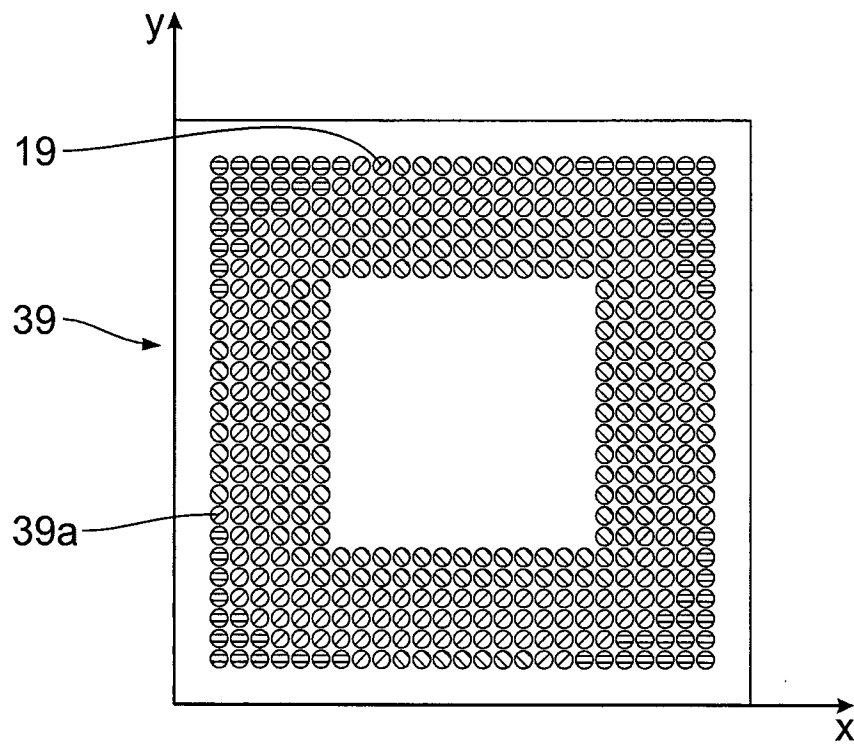


Fig. 15

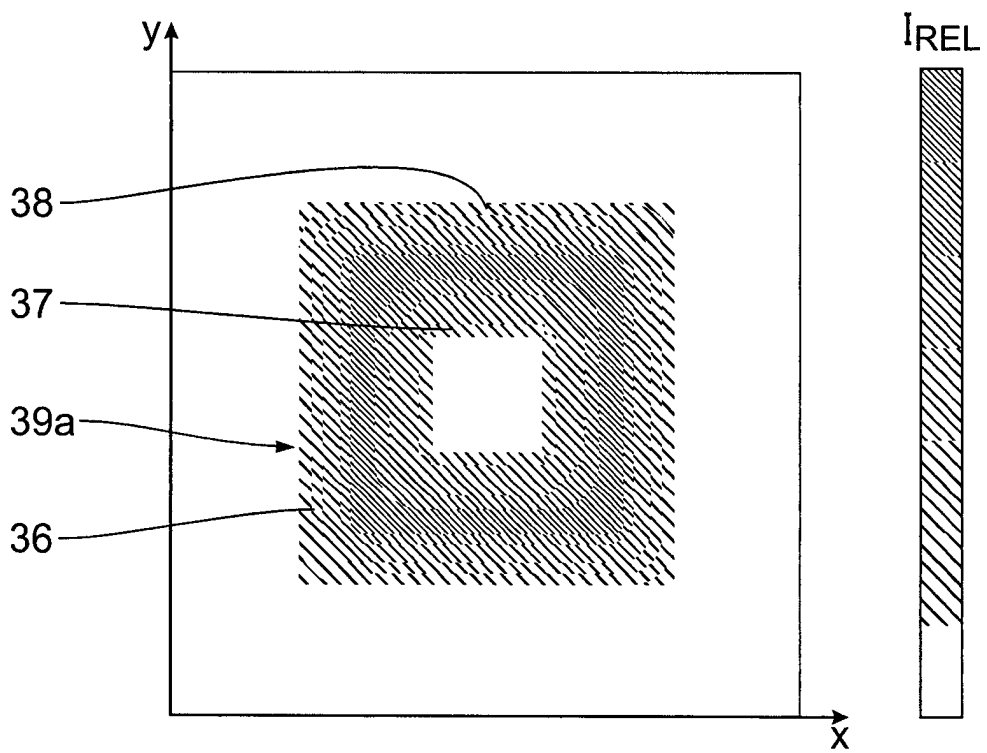


Fig. 16

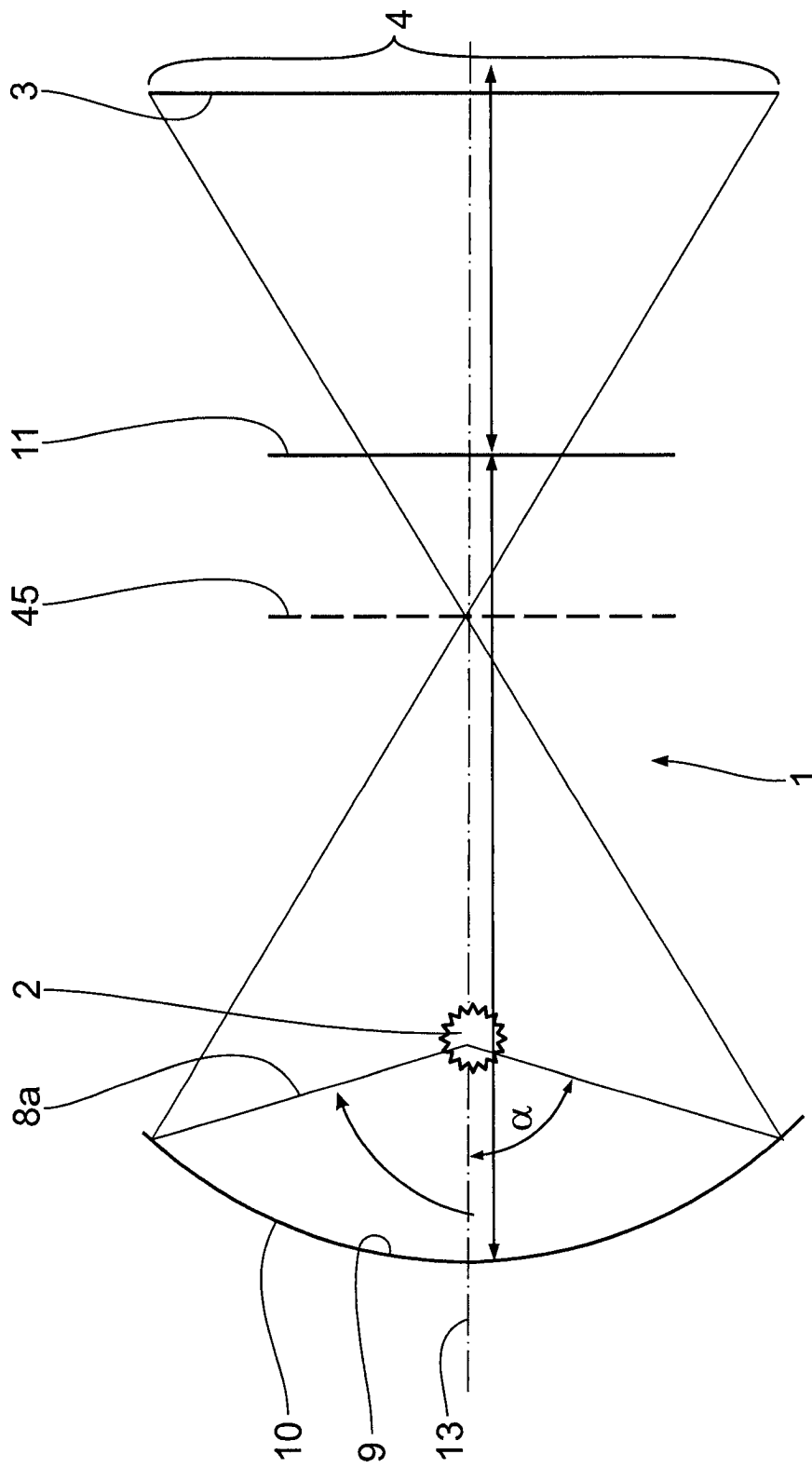


Fig. 17