



(10) **DE 10 2012 010 093 A1 2013.11.28**

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2012 010 093.0**

(22) Anmeldetag: **23.05.2012**

(43) Offenlegungstag: **28.11.2013**

(51) Int Cl.: **G02B 5/09 (2012.01)**

**G02B 5/10 (2012.01)**

**G02B 5/18 (2012.01)**

**G02B 26/08 (2012.01)**

**G03F 7/20 (2012.01)**

(71) Anmelder:

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

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

**DE 10 2006 036 064 A1**

**DE 10 2009 044 462 A1**

**DE 10 2011 082 065 A1**

**US 2011 / 0 001 947 A1**

**US 2012 / 0 262 688 A1**

(72) Erfinder:

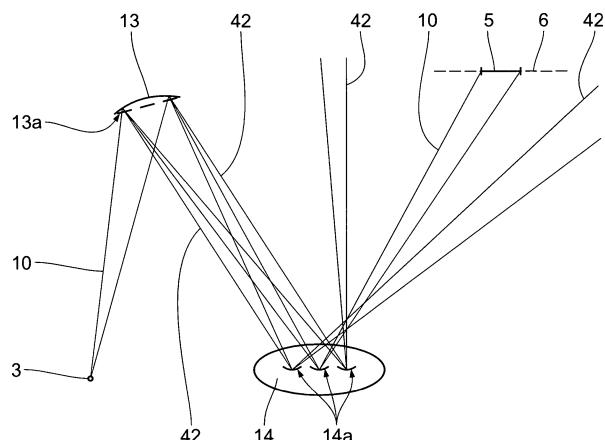
**Bieling, Stig, 73434, Aalen, DE; Degünther,  
Markus, 73432, Aalen, DE; Wangler, Johannes,  
89551, Königsbronn, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Facettenspiegel**

(57) Zusammenfassung: Beleuchtungsoptik (4) zur Beleuchtung eines Objektfeldes (5) in einer Projektionsbelichtungsanlage (1) umfassend einen ersten Facettenspiegel (13) mit einer Struktur, welche in mindestens einer Richtung eine Ortsfrequenz von mindestens  $0,2 \text{ mm}^{-1}$  aufweist, und einen zweiten Facettenspiegel (14) umfassend eine Vielzahl von Facetten (14a), wobei die Facetten (14a) jeweils mit Mitteln zur Dämpfung der Ortsfrequenzen der Struktur des ersten Facettenspiegels (13) versehen sind.



### Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft einen Facettenspiegel für eine Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage. Die Erfindung betrifft weiterhin eine Beleuchtungsoptik zur Beleuchtung eines Objektfeldes in einer Projektionsbelichtungsanlage. Die Erfindung betrifft außerdem ein Beleuchtungssystem für eine Projektionsbelichtungsanlage und eine Projektionsbelichtungsanlage mit einem derartigen Beleuchtungssystem. Schließlich betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung eines mikro- oder nanostrukturierten Bauelements und ein verfahrensgemäß hergestelltes Bauelement.

**[0002]** Ein Spiegel-Array zur Verwendung in einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie ist beispielsweise aus der WO 2009/100856 A1 bekannt. Es besteht fortwährend Bedarf, die Komponenten einer derartigen Projektionsbelichtungsanlage weiterzuentwickeln.

**[0003]** Eine erste Aufgabe der Erfindung besteht darin, einen Facettenspiegel für eine Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage zu verbessern. Diese Aufgabe wird durch die Merkmale der Ansprüche 1 und 2 gelöst.

**[0004]** Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung umfasst der Facettenspiegel eine Vielzahl von Facetten, welche jeweils mit einer Beugungsstruktur zur Beugung von Strahlung in einer Wellenlänge im Infrarotbereich versehen sind. Die Facetten können insbesondere mit einem binären Phasengitter versehen sein. Das Phasengitter weist vorzugsweise eine Furchentiefe auf, welche gerade einem Viertel einer auszublendenenden Wellenlänge entspricht. Die Furchentiefe  $d$  liegt insbesondere im Bereich von 2  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$ , insbesondere im Bereich von 2,5  $\mu\text{m}$  bis 2,7  $\mu\text{m}$ , vorzugsweise etwa 2,65  $\mu\text{m}$ . Die Beugungsstruktur weist eine Gitterperiode  $p$  von höchstens 5 mm, insbesondere höchstens 3 mm, insbesondere höchstens 2 mm, insbesondere höchstens 1 mm auf. Eine kleinere Gitterperiode führt hierbei zu einem größeren Ablenkinkel für die erste Beugungsordnung. Der Ablenkinkel beträgt insbesondere mindestens 3 mrad, insbesondere mindestens 5 mrad.

**[0005]** Prinzipiell können die Facetten auch eine Mehrfachgitterstruktur, insbesondere mit unterschiedlichen Gitterkonstanten, aufweisen. Hierdurch ist es möglich, unterschiedliche Wellenlängen auszulöschen. Für Details sei auf die DE 10 2009 044 462 A1 verwiesen.

**[0006]** Die Facetten können aus einer Vielzahl von Mikrospiegeln zusammengesetzt sein. Es ist auch möglich, die Facetten derart auszubilden, dass jeweils eine einzelne Facette zur Ausleuchtung des gesamten Objektfeldes geeignet ist.

**[0007]** Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung umfasst der Facettenspiegel eine Vielzahl von Facetten, welche jeweils mit Mitteln zur Dämpfung von Ortsfrequenzen oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz versehen sind. Ein derartiger Facettenspiegel kann insbesondere als Pupillenfacettenspiegel eingesetzt werden. Er ermöglicht es, Mikrostrukturen des Feldfacettenspiegels, welche sich störend auf die Uniformität der Maskenausleuchtung im Objektfeld auswirken, zu dämpfen. Ein derartiger Facettenspiegel mit Mitteln zur Dämpfung von Ortsfrequenzen führt auch zu einer Stabilisierung des optischen Systems gegenüber Quellschwankungen und Systemtoleranzen.

**[0008]** Als Mittel zur Dämpfung von Ortsfrequenzen kann eine gezielte Defokusierung der Pupillenfacetten dienen. Dies kann durch eine geeignete Wahl der Krümmungsradien der Pupillenfacetten erreicht werden.

**[0009]** Es können auch torische Pupillenfacetten verwendet werden. Diese sind vorzugsweise derart ausgelegt, dass die Brechkraft in Scanrichtung exakt die Wabenkondensor-Bedingung erfüllt. Hierunter sei verstanden, dass der Zwischenfokus exakt auf den Pupillenfacetten und die Feldfacetten exakt auf das Retikel abgebildet werden, zumindest in einer Raumrichtung. Dies hat zur Folge, dass eine Verschiebung der Strahlungsquelle nicht zu Parallaxen der Feldausleuchtung führt. In Richtung senkrecht zur Scanrichtung können die torischen Pupillenfacetten den gewünschten Defokus einführen.

**[0010]** Vorzugsweise sind die Facetten zur Dämpfung von Ortsfrequenzen mit einer geeigneten Streufunktion versehen. Bei der Streufunktion handelt es sich vorzugsweise um eine eindimensionale Streufunktion. Sie ist geeignet gewählt, um die Ausleuchtung des Objektfeldes ausschließlich in Cross-Scanrichtung zu beeinflussen.

**[0011]** Als vorteilhaft hat sich für die Winkelverteilung der gestreuten Intensität eine Gaußfunktion mit einem Streuwinkel  $\sigma$  von etwa 0,4 mrad erwiesen. Damit lassen sich Ortsfrequenzen von über 1,33  $\text{m}^{-1}$  auf unter

0,01% Kontrast dämpfen. Allgemein weist die Streufunktion einen Streuwinkel  $\sigma$  von mindestens 0,1 mrad, insbesondere mindestens 0,2 mrad, insbesondere mindestens 0,3 mrad auf.

**[0012]** Eine derartige Streufunktion kann durch Schreiben von eindimensionalen Zylindern in die Pupillenfacetten erfolgen. Die Facetten weisen somit eine Reflexionsfläche auf, welche sich aus Zylindermantelabschnitten zusammensetzt. Die Zylindermantelabschnitte haben vorzugsweise jeweils dieselbe Ausrichtung. Sie haben außerdem jeweils denselben Krümmungsradius. Sie weisen jedoch eine unterschiedliche Breite, d. h. einen unterschiedlichen Mittelpunktwinkel auf. Hierdurch kann die angestrebte Streufunktion sehr gut approximiert werden. Es ist auch möglich, die Zylindermantelabschnitte mit unterschiedlichen Krümmungsradien und identischen Breiten oder sowohl mit unterschiedlichen Krümmungsradien und unterschiedlichen Breiten auszubilden. Die Orientierung der Zylinder ist beliebig einstellbar. Sie hängt u. a. mit der geometrischen Feldrotation im Wabenkondensor zusammen.

**[0013]** Es ist auch möglich, eine gezielte spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density; PSD) auf die Oberfläche der Facetten einzubringen. Hierzu wird die Oberfläche der Facetten anisotrop aufgeraut. Dadurch ist es möglich eine gewünschte bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (Englisch: bidirectional reflectance distribution function, BRDF) zu erhalten. Hierbei ist die Kohärenz der Beleuchtungsstrahlung, insbesondere der EUV-Strahlung, zu berücksichtigen.

**[0014]** Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, eine Beleuchtungsoptik zur Beleuchtung eines Objektfeldes in einer Projektionsbelichtungsanlage zu verbessern. Diese Aufgabe wird durch die Merkmale des Anspruchs 7 gelöst.

**[0015]** Der Kern der Erfindung besteht darin, einen ersten Facettenspiegel, welcher eine Struktur mit einer Ortsfrequenz von mindestens  $0,2 \text{ mm}^{-1}$ , insbesondere mindestens  $0,3 \text{ mm}^{-1}$ , insbesondere mindestens  $0,5 \text{ mm}^{-1}$ , insbesondere mindestens  $1 \text{ mm}^{-1}$  aufweist mit einem zweiten Facettenspiegel mit Facetten, welche jeweils mit Mitteln zur Dämpfung von Ortsfrequenzen oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz versehen sind, zu kombinieren.

**[0016]** Eine derartige Kombination zweier Facettenspiegel ist besonders vorteilhaft. So kann mittels des ersten Facettenspiegels die zur Beleuchtung des Objektfeldes verwendete Strahlung sehr flexibel geführt werden, während die Ausbildung des zweiten Facettenspiegels dazu dient, eine Beleuchtung des Objektfeldes mit einer hohen Uniformität zu ermöglichen.

**[0017]** Der erste Facettenspiegel ist vorzugsweise mit einem binären Phasengitter zur Beugung von Strahlung mit einer Wellenlänge im Infrarotbereich versehen. Diesbezüglich wird auf die vorhergehende Beschreibung verwiesen.

**[0018]** Vorzugsweise sind die beiden Facettenspiegel derart aneinander angepasst, dass die Mittel zur Dämpfung der Ortsfrequenzen der Facetten des zweiten Facettenspiegels gerade dazu führen, dass die Ortsfrequenzen der Struktur des ersten Facettenspiegels im Bereich des Objektfeldes einen Kontrast von höchstens 1% aufweisen.

**[0019]** Der erste Facettenspiegel ist insbesondere mit einem binären Phasengitter zur Ausblendung von Strahlung im Infrarot-Bereich versehen. Das Phasengitter weist hierbei vorzugsweise eine Furchentiefe  $d$  auf, welche gerade einem Viertel einer auszublendenden Wellenlänge entspricht.

**[0020]** Das binäre Phasengitter weist vorzugsweise eine Gitterperiode  $p$  auf, welche derart an die Ausbildung der Facetten des zweiten Facettenspiegels angepasst ist, dass die erste und minus erste Beugungsordnung von Strahlung einer auszublendenden Wellenlänge auf Facetten des zweiten Facettenspiegels abgebildet wird, welche benachbart zu einer Facette liegen, auf welche das Bild einer Abbildungsstrahlung zu liegen kommt. Die Pupillenfacetten, auf welche die erste und minus erste Beugungsordnung der auszublendenden Strahlung abgebildet wird, sind derart ausgerichtet, insbesondere derart verkippt, dass die auszublendende Strahlung nicht in das Objektfeld abgebildet wird. Die auszublendende Strahlung kann insbesondere zu einer Lichtfalle abgelenkt werden.

**[0021]** Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein Beleuchtungssystem für eine Projektionsbelichtungsanlage, insbesondere für eine EUV-Projektionsbelichtungsanlage, und eine derartige Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie zu verbessern.

**[0022]** Diese Aufgaben werden durch die Merkmale der Ansprüche 12 und 13 gelöst. Die Vorteile entsprechen den vorhergehend beschriebenen.

**[0023]** Weitere Aufgaben der Erfindung bestehen darin, ein Verfahren zur Herstellung eines mikro- oder nanostrukturierten Bauelements und ein derartiges Bauelement zu verbessern. Diese Aufgaben werden durch die Merkmale der Ansprüche 14 und 15 gelöst. Bezüglich der Vorteile sei wiederum auf die vorhergehend beschriebenen verwiesen.

**[0024]** Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung mehrerer Ausführungsbeispiele anhand der Zeichnungen. Es zeigen:

**[0025]** [Fig. 1](#) schematisch einen Meridionalschnitt durch eine Projektionsbelichtungsanlage für die EUV-Projektionslithographie,

**[0026]** [Fig. 2](#) schematisch eine Ansicht auf einen Ausschnitt eines aus Einzelspiegeln aufgebauten Feldfalten-Spiegels zum Einsetzen der Projektionsbelichtungsanlage nach [Fig. 1](#),

**[0027]** [Fig. 3](#) eine Ansicht eines Ausschnitts einer Einzelspiegel-Zeile des Facettenspiegels nach [Fig. 2](#) aus Blickrichtung III in [Fig. 2](#),

**[0028]** [Fig. 4](#) bis [Fig. 6](#) stark schematisch verschiedene Formen einer aus den Einzelspiegeln der in [Fig. 3](#) dargestellten Einzelspiegel-Zeile gebildeten Zeilen-Reflexionsfläche in verschiedenen Konfigurationen,

**[0029]** [Fig. 7](#) schematisch eine Darstellung des strukturellen Aufbaus einer Facette eines Feldfacettenspiegels gemäß einem Ausführungsbeispiel,

**[0030]** [Fig. 8](#) schematisch eine Darstellung des strukturellen Aufbaus einer Facette eines Feldfacettenspiegels gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel,

**[0031]** [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#) schematische Darstellungen des Strahlengangs in einer Beleuchtungsoptik gemäß einem Ausführungsbeispiel mit einem Feldfacettenspiegel mit einer Beugungsstruktur zur Beugung von Strahlung mit einer Wellenlänge im Infrarotbereich,

**[0032]** [Fig. 11](#) eine schematische Darstellung einer Facette mit einem Phasengitter,

**[0033]** [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) schematische Darstellungen zur Verdeutlichung des Effekts einer Streufunktion auf einer Pupillenfacette,

**[0034]** [Fig. 14](#) schematische Darstellungen der Ausbildung der Reflexionsfläche einer Feldfacette gemäß einem Ausführungsbeispiel und

**[0035]** [Fig. 15](#) eine schematische Darstellung einer Gaußschen Streufunktion durch  $N = 10$  Zylinder.

**[0036]** Zunächst wird der generelle Aufbau einer Projektionsbelichtungsanlage 1 für die Mikro-Lithographie beschrieben.

**[0037]** [Fig. 1](#) zeigt schematisch in einem Meridionalschnitt eine Projektionsbelichtungsanlage 1 für die Mikro-Lithographie. Ein Beleuchtungssystem 2 der Projektionsbelichtungsanlage 1 hat neben einer Strahlungsquelle 3 eine Beleuchtungsoptik 4 zur Belichtung eines Objektfeldes 5 in einer Objektebene 6. Belichtet wird hierbei ein im Objektfeld 5 angeordnetes und in der Zeichnung nicht dargestelltes Retikel, das von einem ebenfalls nicht dargestellten Retikelhalter gehalten ist. Eine Projektionsoptik 7 dient zur Abbildung des Objektfeldes 5 in ein Bildfeld 8 in einer Bildebene 9. Abgebildet wird eine Struktur auf dem Retikel auf eine lichtempfindliche Schicht eines im Bereich des Bildfeldes 8 in der Bildebene 9 angeordneten Wafers, der in der Zeichnung ebenfalls nicht dargestellt ist und von einem ebenfalls nicht dargestellten Waferhalter gehalten ist.

**[0038]** Bei der Strahlungsquelle 3 handelt es sich um eine EUV-Strahlungsquelle mit einer emittierten Nutzstrahlung im Bereich zwischen 5 nm und 30 nm. Es kann sich dabei um eine Plasmaquelle, beispielsweise um eine GDPP-Quelle (Plasmaerzeugung durch Gasentladung, gasdischarge-produced plasma) oder um eine LPP-Quelle (Plasmaerzeugung durch Laser, laser-produced plasma) handeln. Beispielsweise kann Zinn mittels einem bei einer Wellenlänge von 10,6  $\mu\text{m}$ , das heißt im Infrarot-Bereich, arbeitenden Kohlendioxidlaser

zu einem Plasma angeregt werden. Auch eine Strahlungsquelle, die auf einem Synchrotron basiert, ist für die Strahlungsquelle **3** einsetzbar. Informationen zu einer derartigen Strahlungsquelle findet der Fachmann beispielsweise in der US 6,859,515 B2. EUV-Strahlung **10**, die von der Strahlungsquelle **3** ausgeht, wird von einem Kollektor **11** gebündelt. Ein entsprechender Kollektor ist aus der EP 1 225 481 A bekannt. Nach dem Kollektor **11** propagiert die EUV-Strahlung **10** durch eine Zwischenfokusebene **12**, bevor sie auf einen Feldfacetten-Spiegel **13** mit einer Vielzahl von Feldfacetten **13a** trifft. Der Feldfacetten-Spiegel **13** ist in einer Ebene der Beleuchtungsoptik **4** angeordnet, die zur Objektebene **6** optisch konjugiert ist.

**[0039]** Die EUV-Strahlung **10** wird nachfolgend auch als Beleuchtungslicht oder als Abbildungslicht bezeichnet.

**[0040]** Nach dem Feldfacetten-Spiegel **13** wird die EUV-Strahlung **10** von einem Pupillenfacetten-Spiegel **14** mit einer Vielzahl von Pupillenfacetten **14a** reflektiert. Der Pupillenfacetten-Spiegel **14** ist in einer Pupillenebene der Beleuchtungsoptik **4** angeordnet, die zu einer Pupillenebene der Projektionsoptik **7** optisch konjugiert ist. Mit Hilfe des Pupillenfacetten-Spiegels **14** und einer abbildenden optischen Baugruppe in Form einer Übertragungsoptik **15** mit in der Reihenfolge des Strahlengangs bezeichneten Spiegeln **16**, **17** und **18** werden nachfolgend noch näher beschriebene Feld-Einzelfacetten **19**, die auch als Subfelder oder als Einzelspiegel-Gruppen bezeichnet werden, des Feldfacetten-Spiegels **13** in das Objektfeld **5** abgebildet. Der letzte Spiegel **18** der Übertragungsoptik **15** ist ein Spiegel für streifenden Einfall („Grazing Incidence-Spiegel“).

**[0041]** Zur Erleichterung der Beschreibung von Lagebeziehungen ist in der [Fig. 1](#) ein kartesisches xyz-Koordinatensystem als globales Koordinatensystem für die Beschreibung der Lageverhältnisse von Komponenten der Projektionsbelichtungsanlage **1** zwischen der Objektebene **6** und der Bildebene **9** eingezeichnet. Die x-Achse verläuft in der [Fig. 1](#) senkrecht zur Zeichenebene in diese hinein. Die y-Achse verläuft in der [Fig. 1](#) nach rechts. Die z-Achse verläuft in der [Fig. 1](#) nach unten, also senkrecht zur Objektebene **6** und zur Bildebene **9**.

**[0042]** [Fig. 2](#) zeigt Details des Aufbaus des Feldfacetten-Spiegels **13** in einer stark schematischen Darstellung. Eine Gesamtreflexionsfläche **20** des Feldfacetten-Spiegels **13** ist zeilen- und spaltenweise unterteilt in ein Raster aus im Folgenden als Einzelspiegel **21** bezeichneten Spiegel-Elementen. Der Feldfacetten-Spiegel **13** ist somit als Spiegel-Array mit einer Vielzahl von Einzelspiegeln **21** ausgebildet. Die Einzelspiegel **21** weisen jeweils eine Einzelreflexionsfläche **20a** auf. Zur Reflexion der EUV-Strahlung **10** weisen die Einzelspiegel **21** eine Beschichtung mit einem Viellagensystem **34** auf. Gemäß einer ersten Ausführungsform weist das Viellagensystem **34** der Einzelspiegel **21** eine einheitliche Dicke auf. Die erleichtert insbesondere die Herstellung der Einzelspiegel **21** und führt damit zu einer Reduzierung der Kosten.

**[0043]** Die Einzelreflexion-Flächen **20a** der individuellen Einzelspiegel **21** sind zumindest abschnittsweise plan. Zumindest ein Teil der Einzelspiegel **21** kann auch eine vollständig plan ausgebildete Einzelreflexion-Fläche **20a** aufweisen. Es ist auch möglich, dass sämtliche Einzelspiegel **21** eine vollständig plan ausgebildete Einzelreflexions-Fläche **20a** aufweisen. Eine Einzelspiegel-Zeile **22** weist eine Mehrzahl der direkt nebeneinander liegenden Einzelspiegel **21** auf. In einer Einzelspiegel-Zeile **22** können mehrere zehn bis mehrere hundert der Einzelspiegel **21** vorgesehen sein. Im Beispiel nach [Fig. 2](#) sind die Einzelspiegel **21** quadratisch. Auch andere Formen von Einzelspiegeln, die eine möglichst lückenlose Belegung der Gesamt-Reflexionsfläche **20** ermöglichen, können eingesetzt sein. Derartige alternative Einzelspiegel-Formen sind aus der mathematischen Theorie der Parkettierung bekannt.

**[0044]** Der Feldfacetten-Spiegel **13** kann beispielsweise so ausgeführt sein, wie in der DE 10 2006 036 064 A1 beschrieben.

**[0045]** Eine Einzelspiegel-Spalte **23** hat, je nach Ausführung des Feldfacetten-Spiegels **13**, ebenfalls eine Mehrzahl von Einzelspiegeln **21**. Pro Einzelspiegel-Spalte **23** sind beispielsweise einige zehn Einzelspiegel **21** vorgesehen.

**[0046]** Zur Erleichterung der Beschreibung von Lagebeziehungen ist in der [Fig. 2](#) ein kartesisches xyz-Koordinatensystem als lokales Koordinatensystem des Feldfacetten-Spiegels **13** eingezeichnet. Entsprechende lokale xyz-Koordinatensysteme finden sich auch in den nachfolgenden Figuren, die Facetten-Spiegel oder einen Ausschnitt hiervon in Aufsicht zeigen. In der [Fig. 2](#) verläuft die x-Achse horizontal nach rechts parallel zu den Einzelspiegel-Zeilen **22**. Die y-Achse läuft in der [Fig. 2](#) nach oben parallel zu den Einzelspiegel-Spalten **23**. Die z-Achse steht senkrecht auf der Zeichenebene der [Fig. 2](#) und läuft aus dieser heraus.

**[0047]** Bei der Projektionsbelichtung werden der Retikelhalter und der Waferhalter synchronisiert zueinander in y-Richtung gescannt. Auch ein kleiner Winkel zwischen der Scanrichtung und der y-Richtung ist möglich.

**[0048]** In x-Richtung hat die Gesamtreflexionsfläche **20** des Feldfacetten-Spiegels **13** eine Erstreckung von  $x_0$ . In y-Richtung hat die Gesamtreflexionsfläche **20** des Feldfacetten-Spiegels **13** eine Erstreckung von  $y_0$ . Je nach Ausführung des Feldfacetten-Spiegels **13** haben die Einzelspiegel **21** x/y-Erstreckungen im Bereich beispielsweise von  $600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$  bis beispielsweise  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ . Es handelt sich insbesondere um sogenannte Mikrospiegel. Die Mikrospiegel können auch Abmessungen und/oder eine Anordnung auf dem Feldfacetten-Spiegel **13** aufweisen, derart, dass sie eine Beugungsstruktur für Strahlung in einem vorgegebenen Wellenlängenbereich bilden. Sie können insbesondere derart ausgebildet und/oder angeordnet sein, dass sie eine Beugungsstruktur für Strahlung im Infrarot-Wellenlängenbereich, insbesondere für Strahlung mit einer Wellenlänge von  $10,6 \mu\text{m}$ , bilden. Sie können hierfür insbesondere Abmessungen aufweisen, welche im Bereich der zu beugenden Wellenlängen, insbesondere im Infrarot-Bereich, insbesondere im Bereich von  $780 \text{ nm}$  bis  $1 \text{ mm}$ , liegen. Die Einzelspiegel **21** können so geformt sein, dass sie eine bündelnde Wirkung für das Beleuchtungslicht **10** haben. Eine derartige bündelnde Wirkung der Einzelspiegel **21** ist besonders beim Einsatz einer divergenten Beleuchtung des Feldfacetten-Spiegels **13** mit dem Beleuchtungslicht **3** von Vorteil. Der gesamte Feldfacetten-Spiegel **13** hat eine  $x_0/y_0$ -Erstreckung, die je nach Ausführung beispielsweise  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  oder  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$  beträgt. Die Feld-Einzelfacetten **19** haben typische x/y-Erstreckungen von beispielsweise  $25 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,  $83 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,  $83 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  oder von  $104 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ . Andere Abmessungen sind je nach Bedarf möglich. Je nach dem Verhältnis zwischen der Größe der jeweiligen Feld-Einzelfacetten **19** und der Größe der Einzelspiegel **21**, die diese Feld-Einzelfacetten **19** aufbauen, weist jede der Feld-Einzelfacetten **19** eine entsprechende Anzahl von Einzelspiegeln **21** auf.

**[0049]** Jeder der Einzelspiegel **21** ist zur individuellen Ablenkung von auftreffendem Beleuchtungslicht **10** jeweils mit einem Aktor bzw. Aktuator **24** verbunden, wie in der [Fig. 2](#) anhand zweier in einer Ecke links unten der Gesamtreflexionsfläche **20** angeordneten Einzelspiegel **21** gestrichelt angedeutet und näher in der [Fig. 3](#) anhand eines Ausschnitts einer Einzelfacetten-Zeile **22** dargestellt. Die Aktuatoren **24** sind auf der einer reflektierenden Seite der Einzelspiegel **21** abgewandten Seite jedes der Einzelspiegel **21** angeordnet. Die Aktuatoren **24** können beispielsweise als Piezo-Aktuatoren ausgeführt sein. Ausgestaltungen derartiger Aktuatoren sind vom Aufbau von Mikrospiegel-Arrays her bekannt.

**[0050]** Die Aktuatoren **24** einer Einzelspiegel-Zeile **22** sind jeweils über Signalleitungen **25** mit einem Zeilen-Signalbus **26** verbunden. Jeweils einen der Zeilen-Signalbusse **26** ist einer Einzelspiegel-Zeile **22** zugeordnet. Die Zeilen-Signalbusse **26** der Einzelspiegel-Zeilen **22** sind ihrerseits mit einem Haupt-Signalbus **27** verbunden. Letzterer steht mit einer Steuereinrichtung **28** des Feldfacetten-Spiegels **13** in Signalverbindung. Die Steuereinrichtung **28** ist insbesondere zur reihenweise, also zeilen- oder spaltenweise gemeinsamen Ansteuerung der Einzelspiegel **21** ausgeführt.

**[0051]** Jeder der Einzelspiegel **21** ist individuell unabhängig um zwei senkrecht aufeinander stehende Kippachsen verkippbar, wobei insbesondere eine erste dieser Kippachsen parallel zur x-Achse und die zweite dieser beiden Kippachsen parallel zur y-Achse verläuft. Allgemein können die Einzelspiegel **21** in einem beliebigen Azimuth in einem bestimmten Winkelbereich verkippt werden.

**[0052]** Zusätzlich ist mittels der Aktuatoren **24** noch eine individuelle Verlagerung der Einzelspiegel **21** in z-Richtung möglich. Die Einzelspiegel **21** sind also separat voneinander ansteuerbar längs einer Flächennormalen der Gesamtreflexionsfläche **20** verlagerbar. Hierdurch kann die Topographie der Gesamtreflexionsfläche **20** insgesamt verändert werden. Dies ist stark schematisch beispielhaft anhand der [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) dargestellt. Dadurch können auch Konturen der Gesamtreflexionsfläche **20** mit großen Pfeilhöhen, also großen Variationen in der Topografie der Gesamtreflexionsfläche **20**, in Form von insgesamt in einer Ebene angeordneten Spiegelabschnitten nach Art von Fresnel-Linsen gefertigt werden. Außerdem kann auf diese Weise eine Beugungsstruktur, insbesondere ein Beugungsgitter, auf der Gesamtreflexionsfläche **20** des Spiegel-Arrays **13** ausgebildet werden.

**[0053]** [Fig. 4](#) zeigt Einzel-Reflexionsflächen **20a** der Einzelspiegel **21** eines Ausschnitts einer Einzelspiegel-Zeile **22**, wobei alle Einzelspiegel **21** dieser Einzelspiegel-Zeile **22** über die Steuereinrichtung **28** und die Aktuatoren **24** in die gleiche absolute z-Position gestellt sind. Im Falle einer vollständig planen Ausbildung der Einzelspiegel-Reflexionsflächen sämtlicher Einzelspiegel **21** resultiert eine plane Zeilen-Reflexionsfläche der Einzelspiegel-Zeile **22**. Entsprechend kann auch eine plane Spalten-Reflexionsfläche der Einzelspiegel-Spalte **23** erreicht werden.

**[0054]** [Fig. 5](#) zeigt eine Ansteuerung der Einzelspiegel **21** der Einzelspiegel-Zeile **22**, bei der der mittige Einzelspiegel **21<sub>m</sub>** gegenüber benachbarten Einzelspiegeln **21<sub>r1</sub>**, **21<sub>r2</sub>**, **21<sub>r3</sub>** in negativer z-Richtung versetzt eingestellt ist. Hierdurch ergibt sich eine Stufenanordnung, die zu einen entsprechenden Phasenversatz des auf die Einzelspiegel-Zeile **22** nach [Fig. 5](#) auftreffenden Beleuchtungslichts **10** führt. Der Phasenversatz liegt insbesondere für Strahlung im Infrarot-Bereich bei einer viertel Wellenlänge. Der Spiegel **13** weist somit eine sogenannte  $\lambda/4$ -Struktur für Strahlung im Infrarot-Bereich, insbesondere für Strahlung mit einer Wellenlänge von 10,6  $\mu\text{m}$ , auf. Das von den beiden mittigen Einzelspiegeln **21<sub>m</sub>** reflektierte Beleuchtungslicht **10** wird dabei am stärksten phasenverzögert. Die randseitigen Einzelspiegel **21<sub>r3</sub>** erzeugen die geringste Phasenverzögerung. Die zwischenliegenden Einzelspiegel **21<sub>r1</sub>**, **21<sub>r2</sub>** erzeugen entsprechend stufenweise eine, ausgehend von der Phasenverzögerung durch die mittigen Einzelspiegel **21<sub>m</sub>**, zunehmend geringere Phasenverzögerung. Die Einzelspiegel **21** sind insbesondere derart eingestellt, dass zu jedem Einzelspiegel **21** mindestens ein weiterer Einzelspiegel **21** existiert, derart, dass die Einzel-Reflexionsflächen dieser beiden Einzelspiegel **21** in Richtung ihrer Flächennormalen um einen vorgegebenen Versatz V versetzt ist. Der Versatz V liegt hierbei insbesondere im Bereich einer viertel Wellenlänge im Infrarot-Bereich. Der Versatz V liegt insbesondere im Bereich von 1  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$ . Er kann insbesondere 2,65  $\mu\text{m}$  betragen. Es ist jedoch auch denkbar, Einzelspiegel **21** paarweise mit einem hiervon abweichenden Versatz V anzutragen. Allgemein ist der Versatz V vorzugsweise größer als eine vorgegebene Wellenlänge von Strahlung im UV-Bereich, insbesondere größer als 100 nm. Der Versatz V ist insbesondere derart gewählt, dass die nullte Beugungsordnung eines vorgegebenen Wellenlängen-Anteils, der auf den Spiegel **13** auftreffenden Strahlung **10**, insbesondere ein Infrarotanteil, insbesondere mit einer Wellenlänge von 10,6  $\mu\text{m}$ , ausgelöscht wird.

**[0055]** In [Fig. 6](#) ist eine weitere Anordnung der Einzelspiegel **21** dargestellt. Die in [Fig. 6](#) dargestellte Anordnung der Einzelspiegel **21** entspricht im Wesentlichen der aus [Fig. 3](#). Hierbei sind die Einzelspiegel **21<sub>f</sub>**, **21<sub>b</sub>** jeweils alternierend in einer vorderen und hinteren Position angeordnet, wobei diese beiden Positionen jeweils um den vorgegebenen Versatz V in Richtung der Flächennormalen der Einzelspiegel **21<sub>f</sub>**, **21<sub>b</sub>** gegeneinander versetzt sind. Eine derartig versetzte Anordnung kann hierbei sowohl für die Einzelspiegel-Zeilen **22** als auch für die Einzelspiegel-Spalten **23** vorgesehen sein. Die Gesamtreflexionsfläche **20** des Spiegels **13** weist somit ein schachbrettartiges Muster mit vorderen Einzelspiegeln **21<sub>f</sub>** und hinteren Einzelspiegeln **21<sub>b</sub>** auf. Hierbei können sämtliche Einzelspiegel **21** jeweils eine plane Einzel-Reflexionsfläche aufweisen. Eine alternierende Anordnung der Einzelspiegel **21** wird auch als binäre Phasenstruktur oder als binäres Phasengitter bezeichnet. Der Versatz V wird hierbei auch als Furchentiefe des Phasengitters bezeichnet.

**[0056]** In alternativen Ausführungsformen sind die Einzelspiegel **21** nicht in z-Richtung verstellbar. Sie sind mit einem vorgegebenen Versatz-Muster, insbesondere entsprechend den unter Bezugnahme auf die [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) beschriebenen Ausführungsformen, angeordnet. Für weitere Details der Anordnbarkeit der Einzelspiegel **21** und der sich daraus ergebenden Vorteile sei auf die WO 2009/100 856 A1 verwiesen.

**[0057]** Im Folgenden wird unter Bezugnahme auf die [Fig. 7](#) eine weitere Ausführungsform des Spiegels **13** beschrieben. Die Einzel-Reflexionsflächen **20a** der Einzelspiegel **21** des Spiegel-Arrays **13** weisen beim Ausführungsbeispiel gemäß [Fig. 7](#) jeweils vordere Bereiche **31** und hintere Bereiche **32** auf, die parallel zueinander ausgerichtet sind und in Richtung ihrer Flächennormalen um einen vorgegebenen Versatz V gegenüberliegen. Die vorderen Bereiche **31** und die hinteren Bereiche **32** weisen in Richtung senkrecht zur ihrer Flächennormalen eine identische Breite auf. Hierbei wird die Breite der vorderen Bereiche **31** auch als Stegbreite bezeichnet. Der Breite der hinteren Bereiche **32** wird auch als Furchenbreite bezeichnet. Die Einzelreflexions-Fläche **20a** des Einzelspiegels **21** umfasst allgemein mindestens einen derartigen vorderen Bereich **31** und einen derartigen hinteren Bereich **32**. Er kann jedoch auch eine Vielzahl derartiger Bereiche **31**, **32** aufweisen. Durch die Bereiche **31**, **32** ist insbesondere eine Gitterstruktur mit einer Gitterkonstanten G ausgebildet. Hierbei kann es sich insbesondere um ein binäres Gitter handeln. Die Gitterkonstante G wird auch als Gitterperiode p bezeichnet.

**[0058]** Die Gitterkonstante G ist insbesondere derart gewählt, dass elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen oberhalb derer des zur Abbildung des Retikels **7** genutzten Beleuchtungslichts **10** liegt, weggebeugt wird. Die Gitterkonstante G kann insbesondere im Infrarot-Bereich, das heißt im Bereich von 780 nm bis 1 mm, liegen. Die Gitterkonstante G beträgt insbesondere höchstens 5, insbesondere höchstens 3 mm, insbesondere höchstens 2 mm, insbesondere höchstens 1 mm. Sie ist insbesondere derart gewählt, dass die ersten Beugungsordnungen der auszubeugenden Strahlung um einen Winkel abgelenkt werden, welcher gerade dem Durchmesser einer Pupillenfacette **14a** entspricht.

**[0059]** Der Einzelspiegel **21** weist ein Viellagensystem **34** auf. Das Viellagensystem **34** ist auf ein Substrat **35** aufgebracht. Das Viellagensystem **34** der Einzelspiegel **21** bildet insbesondere eine für die EUV-Strahlung **10**

reflexive Beschichtung. Das Viellagensystem 34 kann insbesondere eine Vielzahl von aufeinanderfolgenden Silizium-Molybdän-Doppellagen aufweisen.

**[0060]** Eine weitere Variante des Aufbaus eines Einzelspiegels 21 ist in der [Fig. 8](#) dargestellt. Der Aufbau entspricht im Wesentlichen dem des Einzelspiegels 21 gemäß [Fig. 7](#). Der Einzelspiegel 21 umfasst jedoch eine erste Gitterstruktur mit einem ersten Versatz V<sub>1</sub> und einer ersten Gitterkonstante G<sub>1</sub> und einer zusätzlichen zweiten Gitterstruktur mit einer Versatz V<sub>2</sub> und einer Gitterkonstante G<sub>2</sub>. Beide Gitter sind vorzugsweise selbstähnlich als binäre Gitter ausgebildet. Dabei ist die zweite Gitterstruktur so ausgelegt, dass sie für mindestens eine weitere Wellenlänge, die deutlich kleiner ist als beispielsweise die Wellenlänge, welche von der ersten Gitterstruktur durch destruktive Interferenz in der nullten Beugungsordnung ausgelöscht wird, zur destruktiven Auslöschung in der nullten Beugungsordnung führt. Während mit anderen Worten insbesondere für Infrarotstrahlung – in der [Fig. 8](#) schematisch als IR-Strahlung 36 dargestellt – destruktive Interferenz an der ersten Gitterstruktur mit Gitterkonstante G<sub>1</sub> und Versatz V<sub>1</sub> stattfindet, wird derart langwellige Strahlung von der zweiten Gitterstruktur nicht aufgelöst, während an der zweiten Gitterstruktur mit Gitterkonstante G<sub>2</sub> und Versatz V<sub>2</sub> insbesondere destruktive Interferenz für elektromagnetische Strahlung im sichtbaren (VIS-) und/oder UV-Wellenlängenbereich – in der [Fig. 8](#) schematisch als UV/VIS-Strahlung 37 dargestellt – stattfindet. Die EUV-Strahlung 1 bleibt von den beiden Gitterstrukturen zumindest weitestgehend unbeeinflusst. Hierunter sei verstanden, dass die Intensität der Beugungsordnungen der EUV-Strahlung 10 durch die Gitterstrukturen um höchstens 10%, insbesondere höchstens 5%, insbesondere höchstens 1%, insbesondere höchstens 0,1% reduziert wird.

**[0061]** Der Einzelspiegel 21 ist somit mit einer Mehrfach-Gitterstruktur versehen. Entsprechend der in [Fig. 8](#) dargestellten Ausführungsform mit einer Doppel-Gitterstruktur kann der Einzelspiegel 21 auch mit einer Dreifach-, Vierfach-, Fünffach- etc. Gitterstruktur ausgebildet sein.

**[0062]** Für weitere Details der Gitterstruktur sei auf die DE 10 2009 044 462 A1 verwiesen.

**[0063]** Für sämtliche vorhergehend beschriebenen Ausführungsbeispiele gilt, dass die gegeneinander versetzten Bereiche jeweils durch eine Versatzkante 41 voneinander getrennt sind. Die Versatzkante 41 kann auf einem einzelnen Einzelspiegel 21 oder zwischen zwei Einzelspiegeln 21 ausgebildet sein. Sie weist jeweils eine Ausrichtung in einer bestimmten Richtung auf. Hierbei ist es vorteilhaft, wenn die Versatzkanten 41 derart ausgerichtet sind, dass ihre Projektion entlang der optischen Achse der Beleuchtungsoptik 4 in das Objektfeld 5 schräg, insbesondere senkrecht zur Scanrichtung, verläuft.

**[0064]** Es kann auch vorteilhaft sein, einen Teil der Versatzkanten 41 in einer ersten Richtung auszurichten und einen weiteren Teil der Versatzkanten 41 in einer zweiten, hiervon abweichenden Richtung auszurichten.

**[0065]** Prinzipiell ist es auch möglich, einen Anteil von 50% der Versatzkanten 41 derart auszurichten, dass ihre Projektion in die Objektebene 6 parallel zur x-Richtung ist, während die anderen 50% der Versatzkanten 41 derart ausgerichtet sind, dass ihre Projektion in die Objektebene 6 parallel zur y-Richtung verläuft.

**[0066]** Es ist möglich, das Spiegel-Array mit Einzelspiegeln 21 gemäß mehreren der vorhergehend beschriebenen Ausführungsformen auszubilden. Es ist insbesondere möglich, das Spiegel-Array derart auszubilden, dass ein Teil der Einzelspiegel 21, beispielsweise mindestens 10%, insbesondere mindestens 30%, insbesondere mindestens 50%, insbesondere mindestens 70%, eine plan ausgebildete Einzel-Reflexionsfläche 20a aufweisen, während der restliche Teil der Einzelspiegel 21 jeweils eine oder mehrere Versatzkanten 41 aufweist.

**[0067]** Das Spiegel-Array kann auch sowohl eine Versatzstruktur als auch eine Beugungsstruktur aufweisen.

**[0068]** Für weitere Details der Verlagerbarkeit der Einzelspiegel 21 des Spiegel-Arrays sowie der Einstellung eines vorgegebenen Beleuchtungssettings sei auf die WO 2009/100 856 A1 bzw. DE 10 2008 009 600 A1 verwiesen.

**[0069]** Die Versatzstruktur wurde vorhergehend für ein Spiegel-Array mit einer Vielzahl von Einzelspiegeln 21 beschrieben. Es ist jedoch ebenso möglich, die Feldfacetten 13a des Feldfacettenspiegels 13 als einfache, d. h. nicht aus einer Vielzahl von Einzelspiegeln 21 zusammengesetzte Facetten auszubilden. Sie können dennoch mit einer entsprechenden Beugungsstruktur zur Beugung von Strahlung mit einer Wellenlänge im Infrarotbereich versehen sein. Wie vorhergehend beschrieben, wird die Furchentiefe d des Phasengitters derart gewählt, dass sie gerade einem Viertel einer auszublendenden Wellenlänge  $\lambda_{ex}$  entspricht. Bei der auszublendenden

Wellenlänge  $\lambda_{\text{ex}}$  handelt es sich insbesondere um die Wellenlänge eines Lasers, welcher zur Erzeugung des Plasmas in der EUV-Strahlungsquelle **3** verwendet wird.

**[0070]** Das Phasengitter weist insbesondere Stege und Furchen identischer Breite auf.

**[0071]** Die Gitterperiode  $p$  wird so gewählt, dass der Ablenkinkel für die ersten Beugungsordnungen der auszubeugenden Strahlung in einem Bereich liegt, dass die Bilder der 1. und -1. Beugungsordnungen jeweils auf Pupillenfacetten **14a** fallen, welche benachbart zu der Pupillenfacette **14a** liegen, auf welche das Bild der Beleuchtungsstrahlung **10** zu liegen kommt. Dieses Bild wird auch als spekularer Reflex bezeichnet. Diesbezüglich sei angemerkt, dass die Beleuchtungsstrahlung **10** eine Kohärenzbreite aufweist, welche um mindestens eine Größenordnung geringer ist als die Gitterperiode  $p$ . Die Kohärenzbreite der Beleuchtungsstrahlung liegt insbesondere im Bereich von 5 nm bis 20 µm. Die ersten Beugungsordnungen sind zur Verdeutlichung in den [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#) mit den Bezugszeichen **42** gekennzeichnet.

**[0072]** Prinzipiell ist es auch möglich, die Gitterperiode  $p$  so zu wählen, dass die Bilder der 1. und -1. Beugungsordnungen auf Pupillenfacetten **14a** fallen, welche weiter entfernt zu der Pupillenfacette **14a** liegen, auf welche das Bild der nullten Beugungsordnung der Beleuchtungsstrahlung **10** zu liegen kommt. Es ist prinzipiell auch denkbar, die Infrarotstrahlung so stark zu beugen, dass sie überhaupt nicht mehr auf den Pupillenfacetenspiegel **14** auftrifft.

**[0073]** Der Ablenkinkel liegt insbesondere im Bereich von 3 mrad bis 10 mrad, insbesondere im Bereich von 5 mrad bis 7 mrad.

**[0074]** Die Feldfacetten **13a** weisen ein Aspektverhältnis von mindestens 5:1, insbesondere mindestens 8:1, insbesondere mindestens 13:1 auf. Die exemplarisch in [Fig. 11](#) dargestellte Feldfacette **13a** ist bogenförmig ausgebildet. Sie weist in x-Richtung eine Abmessung von etwa 80 mm auf. Die Abmessung in y-Richtung, d. h. parallel zur Scanrichtung, beträgt etwa 4 mm. Bei einer derartigen Ausbildung der Feldfacette **13a** ist das Phasengitter vorzugsweise orthogonal zur langen Seite ausgerichtet. Das Phasengitter kann jedoch, wie vorhergehend beschrieben, etwas schräg zur Scanrichtung ausgerichtet sein.

**[0075]** Während das Phasengitter zur Beugung unerwünschter Infrarot-Strahlung **36** geeignet ist, kann es sich störend auf die Uniformität der Beleuchtung des Objektfeldes **5** auswirken. Dasselbe gilt für die Struktur des Feldfacetenspiegels **13**, welche durch die Unterteilung in Einzelspiegel **21** gebildet ist. Aufgrund der nicht stetig differenzierbaren Übergänge zwischen benachbarten Einzelspiegeln **21** kann es zu störenden Ortsfrequenzen in der Beleuchtung des Objektfeldes **5** kommen.

**[0076]** Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ist daher vorgesehen, die Pupillenfacetten **14a** mit Mitteln zur Dämpfung von Ortsfrequenzen oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz zu versehen. Der Effekt einer derartigen Ausbildung des Pupillenfacetenspiegels **14** ist in den [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) schematisch dargestellt. Während eine Struktur auf den Feldfacetten **13a** mit Ortsfrequenzen in der Größenordnung von 1 mm<sup>-1</sup> zu Variationen der Intensität der Beleuchtungsstrahlung **10** im Bereich des Objektfeldes **5**, insbesondere in x-Richtung, d. h. senkrecht zur Scanrichtung, führen kann, können derartige Schwankungen der Intensität durch eine geeignete Ausbildung der Pupillenfacetten **14a** gedämpft oder geglättet werden.

**[0077]** Zur Dämpfung von Ortsfrequenzen können die Pupillenfacetten **14a** insbesondere mit einer Streufunktion versehen sein, sodass die gestreute Intensität  $I$  eine Winkelverteilung  $I(\alpha)$  aufweist. Es handelt sich insbesondere um eine eindimensionale Streufunktion. Sie ist vorzugsweise derart ausgebildet, dass sie die Ausleuchtung des Objektfeldes **5** ausschließlich in x-Richtung, d. h. in Cross-Scan-Richtung, beeinflusst. Die exakte Definition der Streufunktion hängt von den zu dämpfenden Ortsfrequenzen, d. h. insbesondere von der Struktur auf dem Feldfacetenspiegel **13**, ab. Bei einem Ausführungsbeispiel hat sich die Ausbildung der Streufunktion als eine eindimensionale Gauß-Funktion mit einem Streuwinkel  $\sigma$  von 0,4 mrad als vorteilhaft erwiesen. Die Winkelverteilung der gestreuten Intensität  $I(\alpha)$  hat insbesondere die folgende Form:

$$I(\alpha) = I_0 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}}.$$

**[0078]** Damit folgt TIS (Total integrated scatter) von 100%, da

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\alpha \ I(\alpha) = I_0,$$

mit  $I_0$  als auf die Pupillenfacette auftreffende Leistung bzw. Intensität. Damit ließen sich Ortsfrequenzen von über  $1,33 \text{ mm}^{-1}$  auf einem Kontrast von weniger als 0,01% im Bereich des Bildfeldes 5 dämpfen.

**[0079]** Diese Streufunktion konnte durch direktes Schreiben von eindimensionalen Zylindern in die Pupillenfacetten 14a realisiert. Die Pupillenfacetten 14a weisen mit anderen Worten jeweils eine Reflexionsfläche 43 auf, welche sich aus Zylindermantelabschnitten zusammensetzt. Die Zylinder sind insbesondere parallel zueinander ausgerichtet. Sie sind um einen Winkel c gegen die y-Richtung verdreht angeordnet. Der Winkel c liegt insbesondere im Bereich von  $0^\circ$  bis  $15^\circ$ , insbesondere im Bereich von  $5^\circ$  bis  $10^\circ$ .

**[0080]** Die Zylinder sind sphärisch ausgebildet. Sie weisen einen einheitlichen Krümmungsradius R auf. Sie weisen unterschiedliche Breiten  $b_i$ , d. h. unterschiedliche Mittelpunktswinkel m, auf. Die Breiten  $b_i$  der Zylinder werden auch als Pitches bezeichnet. Durch eine Kombination einer Mehrzahl unterschiedlicher Pitches kann die Streufunktion, insbesondere die Gauß-Funktion, angenähert werden. Hierzu kann die anznähernde Gauß-Funktion beispielsweise in  $N = 10$  Stufen mit gleichem Intensitätsniveau zerlegt werden. Anschließend kann man bei vorgegebenem Krümmungsradius R die Breiten  $b_i$  der Zylinder bestimmen. Die Summe dieser  $N = 10$  Pitches wird auch als Patch bezeichnet.

**[0081]** Eine Approximation der Streufunktion durch  $N = 10$  Pitches ist exemplarisch in [Fig. 15](#) dargestellt. Hierbei entspricht jeder horizontale Balken dem Streuprofil eines einzelnen Zylinders. Der auf der x-Achse abgetragene Streuwinkel kann bei gegebenem Krümmungsradius R direkt in eine Breite  $b_i$  des entsprechenden Zylinders übersetzt werden.

**[0082]** Vorzugsweise werden mehrere Patches auf einer Pupillenfacette 14a untergebracht. Dabei wird die Reihenfolge der Zylinder vorzugsweise permutiert.

**[0083]** Die Konstruktionsdaten eines Patches mit  $N = 10$  Pitches, einem Krümmungsradius von  $R = 50 \text{ mm}$  und einer Gesamtbreite  $b_{\text{Ges}} = 250 \mu\text{m}$  ist in folgender Tabelle angegeben.

Pitch Nr	Breite [ $\mu\text{m}$ ]	Pfeilhöhe [ $\mu\text{m}$ ]
1	43.7986	0.00479579
2	36.9296	0.0034095
3	32.2401	0.00259857
4	28.4479	0.0020232
5	25.1151	0.00157691
6	22.0206	0.00121227
7	19.0155	0.00090397
8	15.9613	0.000636907
9	12.6703	0.000401341
10	8.73202	0.00019062

**[0084]** Alternativ zu Patches mit einem einheitlichen Krümmungsradius R und Pitches unterschiedlicher Breite  $b_i$  können die Pitches auch unterschiedliche Krümmungsradien  $R_i$  und eine einheitliche Breite b oder unterschiedliche Krümmungsradien  $R_i$  und unterschiedliche Breiten  $b_i$  aufweisen.

**[0085]** Anstelle einer nicht stetig differenzierbaren Oberfläche können die Pupillenfacetten 14a auch mit einer glatten, periodischen Struktur versehen werden.

**[0086]** Alternativ kann eine streuende Wirkung der Pupillenfacetten 14a auch über ein Rauigkeitsprofil eingeführt werden. Für Details sei auf die EP 1 796 147 A1 verwiesen.

**[0087]** Zur Dämpfung von Ortsfrequenzen können die Pupillenfacetten **14a** auch mit einer gezielten Defokussierung versehen werden. Für Details sei auf die US 7,006,595 B2 verwiesen. Vorzugsweise werden die Pupillenfacetten **14a** ausschließlich in Cross-Scan-Richtung defokussiert. Dies kann insbesondere über eine torische Ausbildung der Pupillenfacetten **14a** erreicht werden. Für Details von torischen Pupillenfacetten sei auf die EP 1 811 547 A1 verwiesen.

**[0088]** Schließlich kann auch eine gezielte spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density; PSD) auf die Oberfläche der Pupillenfacetten **14a** eingebracht werden, welche eine entsprechende Streufunktion zur Konsequenz hat. Hierunter wird verstanden, dass die Oberfläche der Pupillenfacetten **14a** aufgeraut, insbesondere anisotrop aufgeraut wird. Auf diese Weise ist es möglich, eine gezielte Reflektanzverteilungsfunktion, insbesondere eine gezielte bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (Englisch: bidirectional reflectance distribution function, BRDF) zu erreichen.

**[0089]** Bezuglich einer Überstrahlung des auszuleuchtenden Objektfelds **5** sei angemerkt, dass das auszuleuchtende Objektfeld üblicherweise ohnehin in Cross-Scan-Richtung überstrahlt ist. Eine Kantenverschmierung durch einen Defokus oder eine Streufunktion führt somit nicht notwendigerweise zu einer größeren Überstrahlung und damit verbundenen Systemtransmissionen. Gegebenenfalls kann dies bei dem Design der Streufunktion, insbesondere des Gradienten derselben im Kantenbereich, berücksichtigt werden.

**[0090]** Eine Ausbildung der Pupillenfacetten **14a** mit Mitteln zur Dämpfung von Ortsfrequenzen, insbesondere eine Ausbildung der Pupillenfacetten **14a** mit einer Streufunktion, kann unabhängig von der Ausbildung des Feldfacettenspiegels **13** vorteilhaft sein. Durch eine entsprechende Ausbildung des Pupillenfacettenspiegels **14** kann insbesondere die Stabilität des Beleuchtungssystems und/oder die Uniformität der Beleuchtung des Objektfeldes **5** verbessert werden.

**[0091]** Als besonders vorteilhaft hat sich die Kombination eines Feldfacettenspiegels **13** mit einer Beugungsstruktur zur Beugung von Strahlung mit einer Wellenlänge im Infrarotbereich und einen Pupillenfacettenspiegel **14** mit einer Streufunktion erwiesen.

**[0092]** Mit Hilfe der Projektionsbelichtungsanlage **1** wird wenigstens ein Teil des Retikels im Objektfeld **5** auf einen Bereich einer lichtempfindlichen Schicht auf dem Wafer im Bildfeld **8** zur lithographischen Herstellung eines mikro- bzw. nanostrukturierten Bauteils, insbesondere eines Halbleiterbauteils, beispielsweise eines Mikrochips, abgebildet. Je nach Ausführung der Projektionsbelichtungsanlage **1** als Scanner oder als Stepper werden das Retikel und der Wafer zeitlich synchronisiert in der y-Richtung kontinuierlich im Scannerbetrieb oder schrittweise im Stepperbetrieb verfahren.

**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 2009/100856 A1 [[0002](#), [0056](#), [0068](#)]
- DE 102009044462 A1 [[0005](#), [0062](#)]
- US 6859515 B2 [[0038](#)]
- EP 1225481 A [[0038](#)]
- DE 102006036064 A1 [[0044](#)]
- DE 102008009600 A1 [[0068](#)]
- EP 1796147 A1 [[0086](#)]
- US 7006595 B2 [[0087](#)]
- EP 1811547 A1 [[0087](#)]

## Patentansprüche

1. Facettenspiegel (13) für eine Beleuchtungsoptik (4) einer Projektionsbelichtungsanlage (1) umfassend eine Vielzahl von Facetten (13a),
  - a. wobei die Facetten (13a) jeweils mit mindestens einer Beugungsstruktur zur Beugung von Strahlung (36) mit einer Wellenlänge im Infrarotbereich versehen sind, und
  - b. wobei die Beugungsstruktur eine Gitterperiode (p) von höchstens 5 mm aufweist.
2. Facettenspiegel (14) für eine Beleuchtungsoptik (4) einer Projektionsbelichtungsanlage (1) umfassend eine Vielzahl von Facetten (14a), wobei die Facetten (14a) jeweils mit Mitteln zur Dämpfung von Ortsfrequenzen oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz versehen sind.
3. Facettenspiegel (14) gemäß Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Facetten (14a) zur Dämpfung von Ortsfrequenzen mit einer Streufunktion versehen sind.
4. Facettenspiegel (14) gemäß Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass es sich um eine eindimensionale Streufunktion handelt.
5. Facettenspiegel (14) gemäß einem der Ansprüche 3 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Streufunktion einen Streuwinkel ( $\sigma$ ) von mindestens 0,1 mrad aufweist.
6. Facettenspiegel (14) gemäß einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Facetten (14a) jeweils eine Reflexionsfläche (43) aufweisen, welche sich aus Zylindermantelabschnitten zusammensetzt.
7. Beleuchtungsoptik (4) zur Beleuchtung eines Objektfeldes (5) in einer Projektionsbelichtungsanlage (1) umfassend
  - a. einen ersten Facettenspiegel (13) und
  - b. einen zweiten Facettenspiegel (14) gemäß einem der Ansprüche 2 bis 6,
  - c. wobei der erste Facettenspiegel (13) zumindest bereichsweise eine Struktur aufweist, welche in mindestens einer Richtung eine Ortsfrequenz von mindestens  $0,2 \text{ mm}^{-1}$  aufweist.
8. Beleuchtungsoptik (4) gemäß Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zur Dämpfung der Ortsfrequenzen der Facetten (14a) des zweiten Facettenspiegels (14) derart an die Struktur der Facetten (13a) des ersten Facettenspiegels (13) angepasst ist, dass die Ortsfrequenzen dieser Struktur im Bereich des Objektfeldes (5) einen Kontrast von höchstens 1% aufweisen.
9. Beleuchtungsoptik (4) gemäß einem der Ansprüche 7 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur des ersten Facettenspiegels (13) ein binäres Phasengitter bildet.
10. Beleuchtungsoptik (4) gemäß Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass das binäre Phasengitter eine Furchentiefe (d) aufweist, welche gerade einem Viertel einer auszublendenden Wellenlänge ( $\lambda_{\text{ex}}$ ) entspricht.
11. Beleuchtungsoptik (4) gemäß einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass das binäre Phasengitter eine Gitterperiode (p) aufweist, welche derart an die Ausbildung der Facetten (14a) des zweiten Facettenspiegels (14) angepasst ist, dass die 1. und -1. Beugungsordnung von Strahlung einer auszublenden Wellenlänge ( $\lambda_{\text{ex}}$ ) auf Facetten (14a) des zweiten Facettenspiegels (14) abgebildet wird, welche benachbart zu einer Facette (14a) liegen, auf welche das Bild der Abbildungsstrahlung (10) zu liegen kommt.
12. Beleuchtungssystem für eine EUV-Projektionsbelichtungsanlage (1) umfassend
  - a. eine Beleuchtungsoptik (4) gemäß einem der Ansprüche 7 bis 11 und
  - b. eine EUV-Strahlungsquelle (3).
13. Projektionsbelichtungsanlage (1) für die Mikrolithografie umfassend eine Beleuchtungsoptik (4) gemäß einem der Ansprüche 7 bis 11.
14. Verfahren zur Herstellung eines mikro- oder nanostrukturierten Bauelements umfassend die folgenden Schritte:
  - Bereitstellen eines Substrats, auf das zumindest teilweise eine Schicht aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist,

- Bereitstellen eines Retikels, das abzubildende Strukturen aufweist,
- Bereitstellen einer Projektionsbelichtungsanlage (1) gemäß Anspruch 13,
- Projizieren wenigstens eines Teils des Retikels auf einen Bereich der lichtempfindlichen Schicht des Substrats mit Hilfe der Projektionsbelichtungsanlage (1).

15. Bauelement hergestellt nach dem Verfahren gemäß Anspruch 14.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

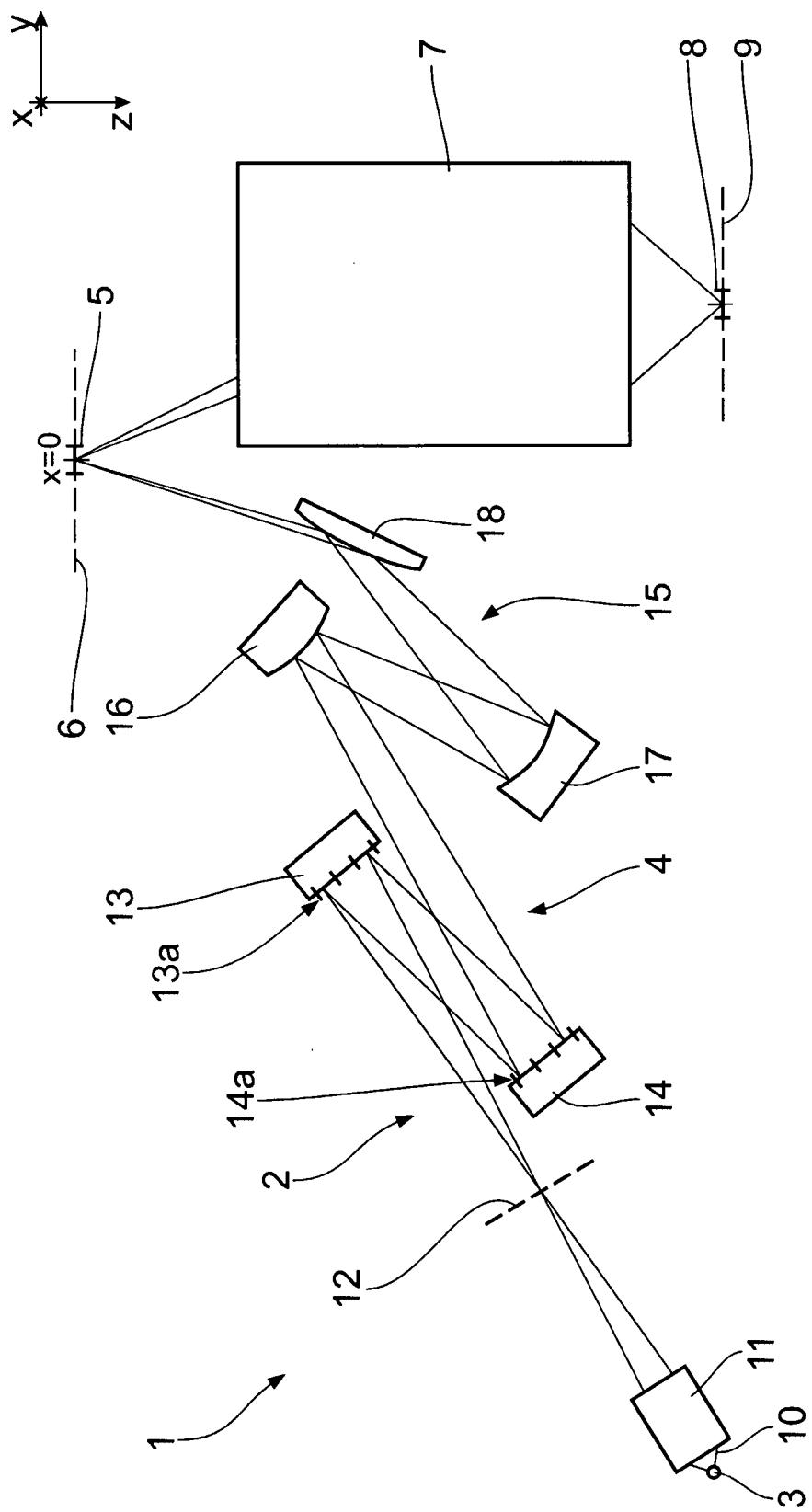


Fig. 1

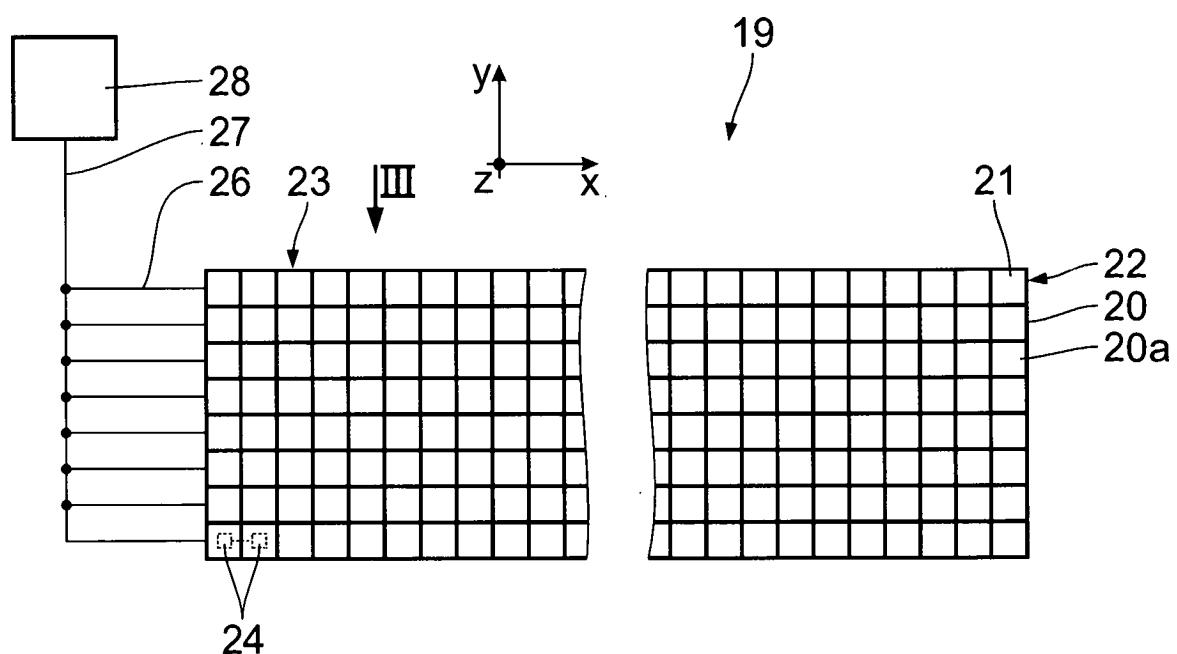


Fig. 2

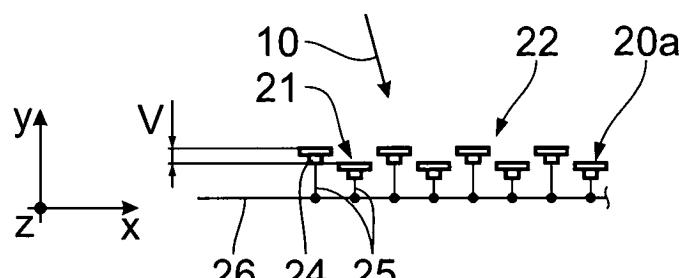


Fig. 3

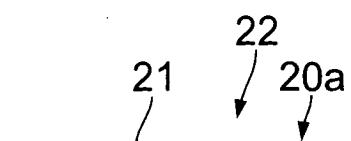


Fig. 4

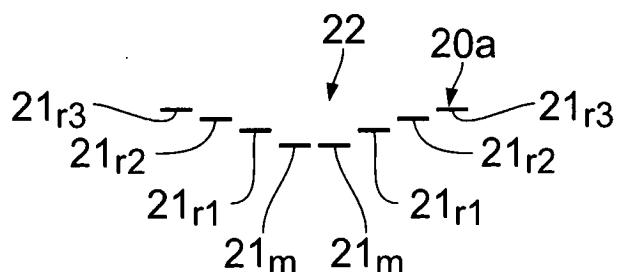


Fig. 5

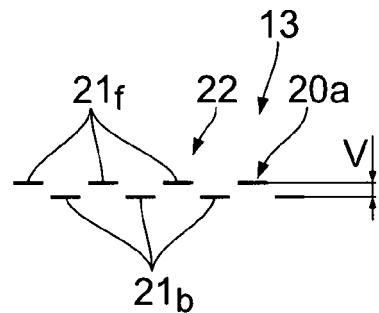


Fig. 6

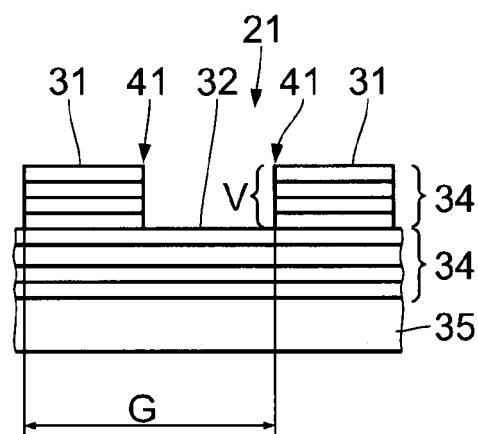


Fig. 7

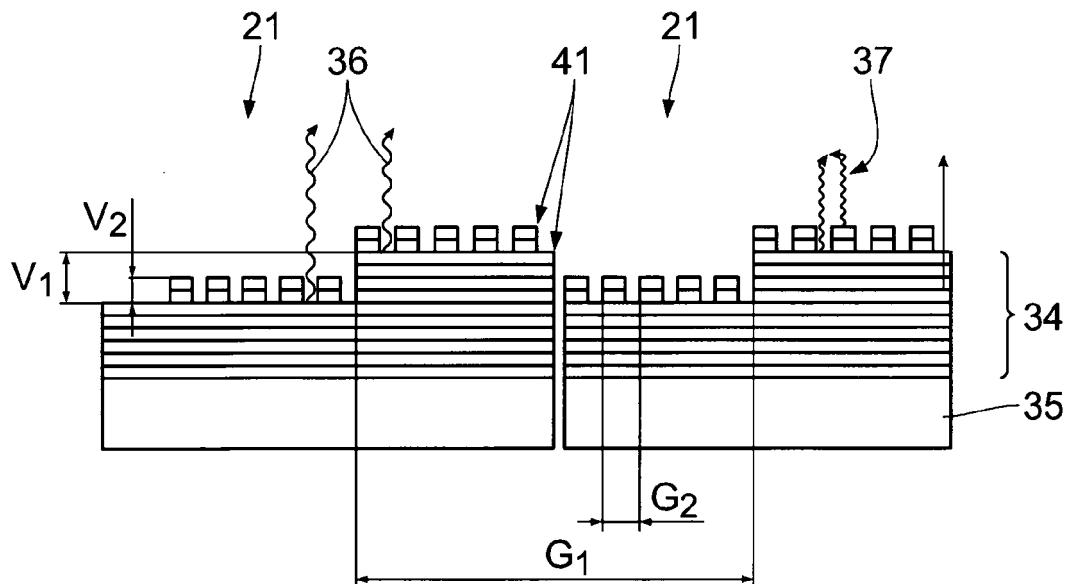


Fig. 8

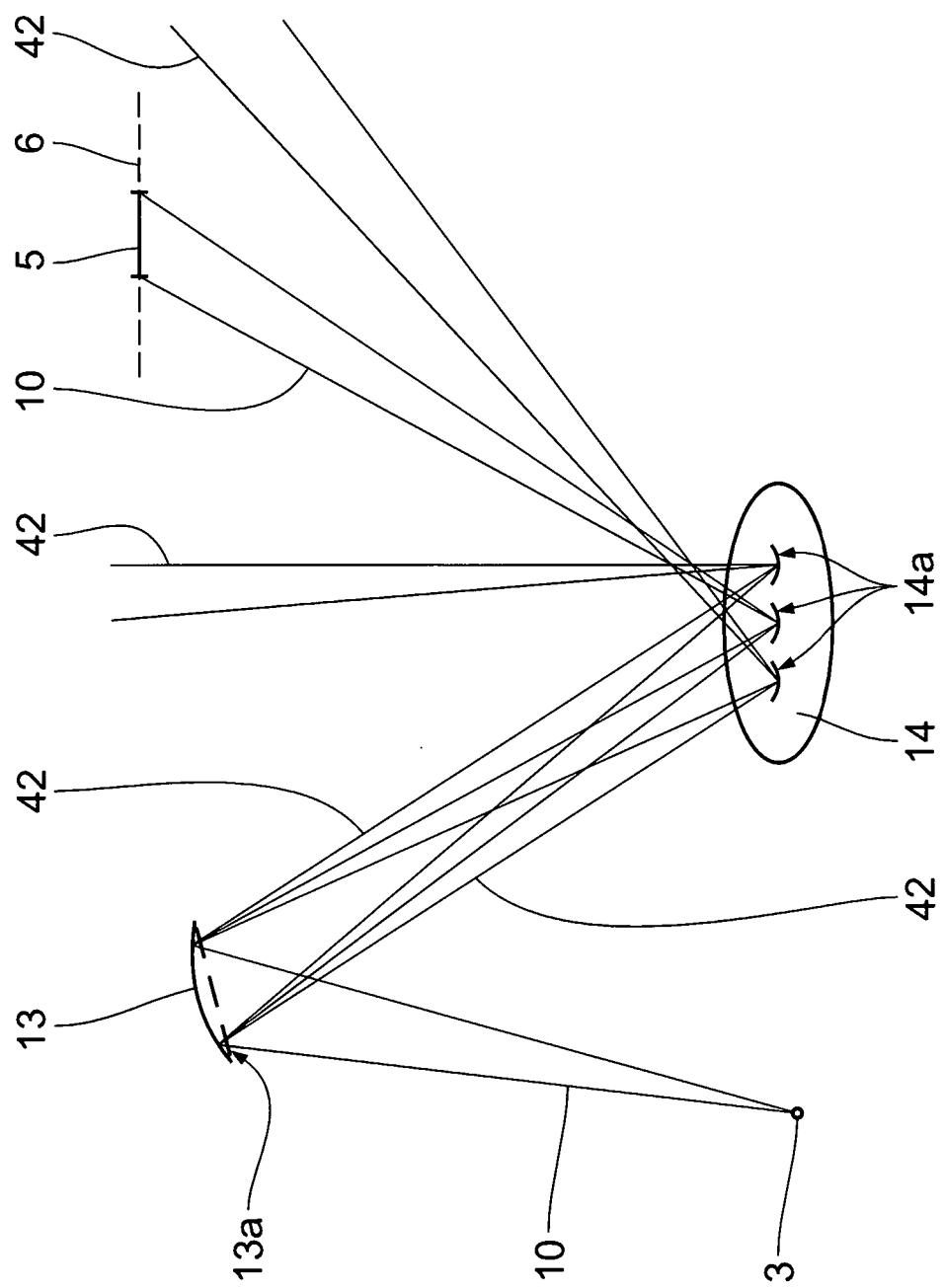


Fig. 9

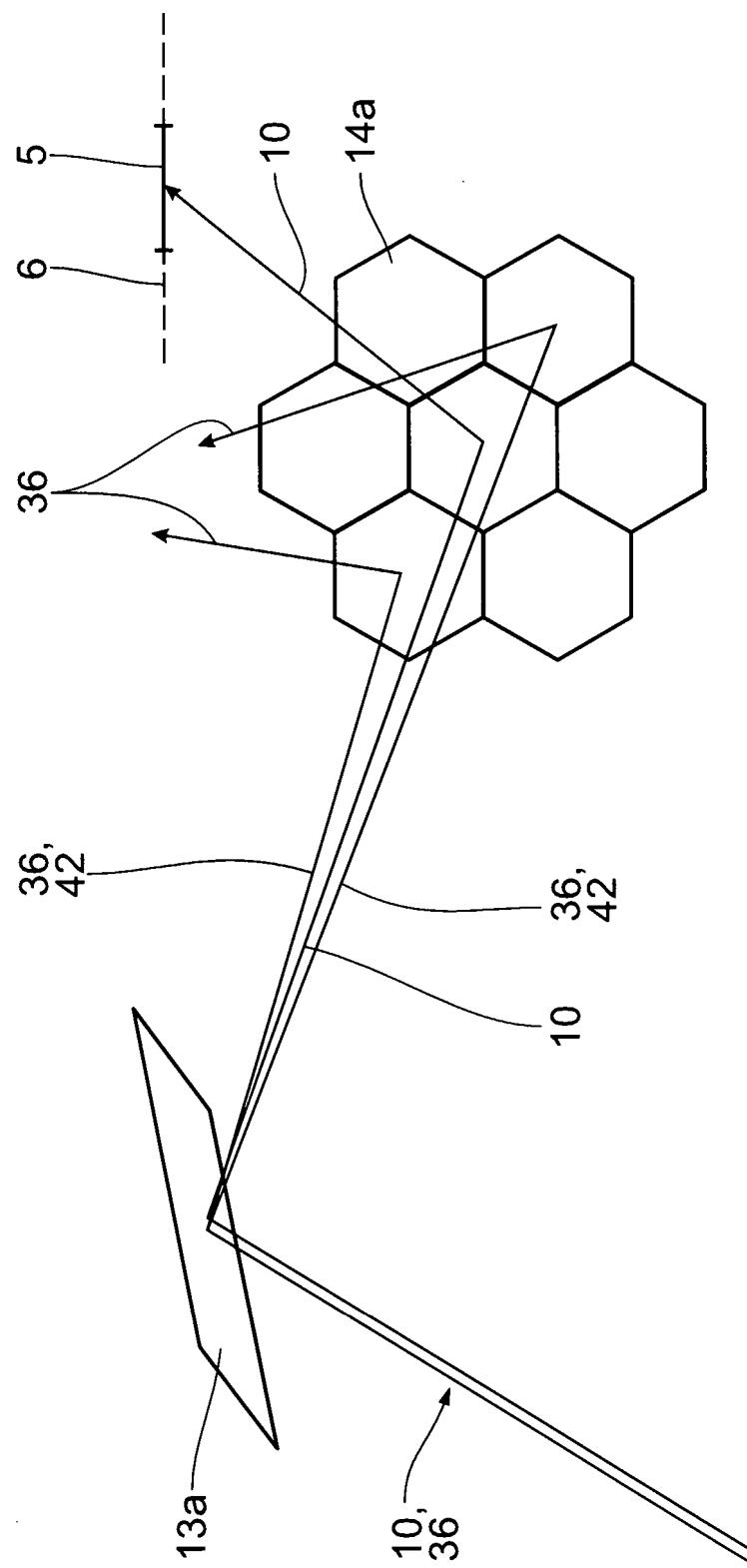


Fig. 10

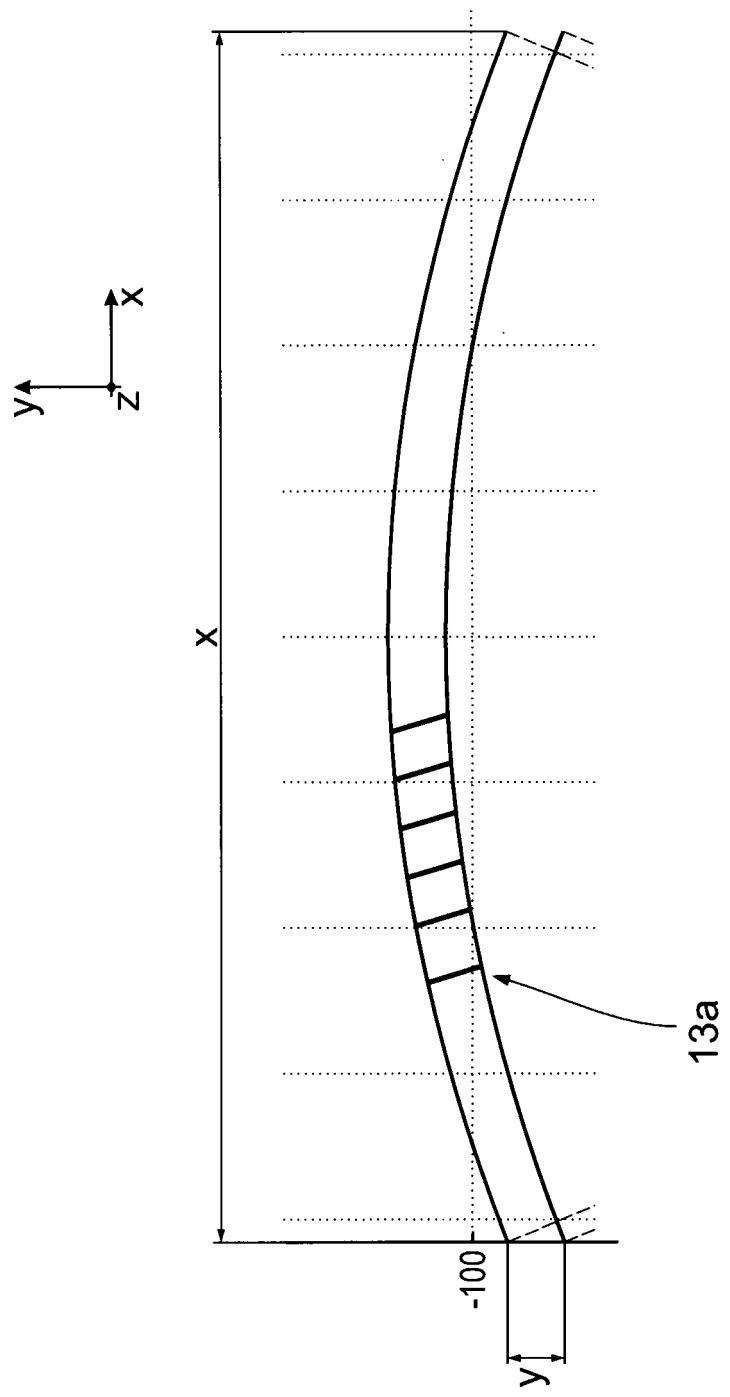


Fig. 11

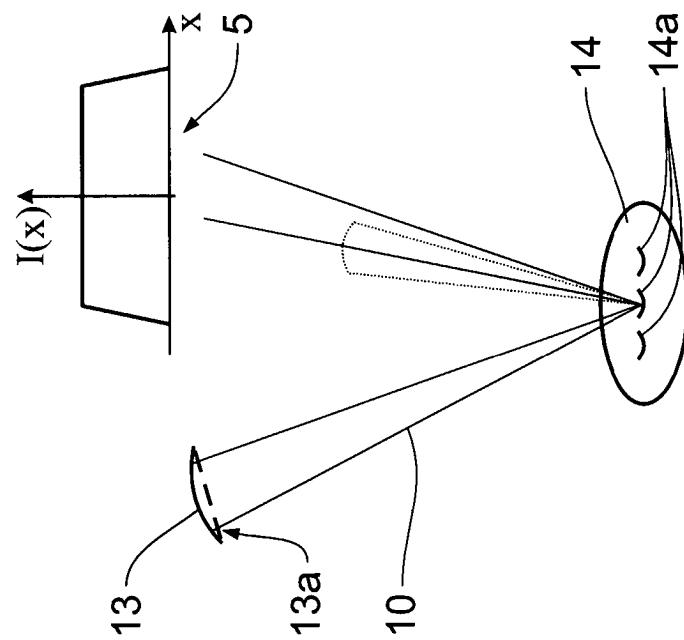


Fig. 13

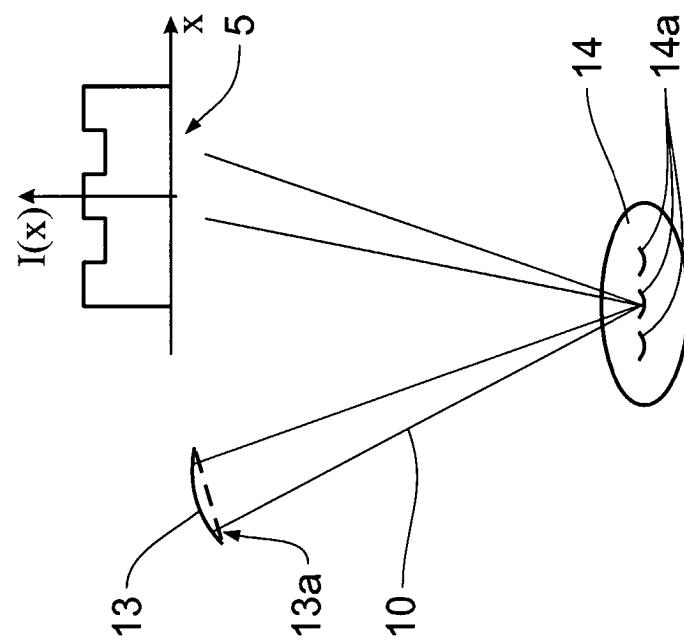


Fig. 12

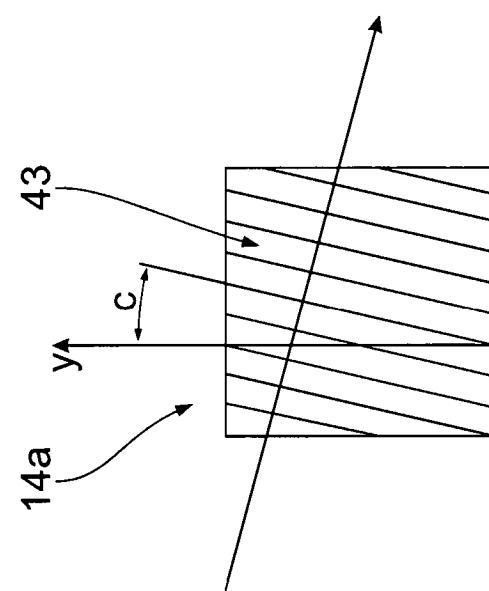
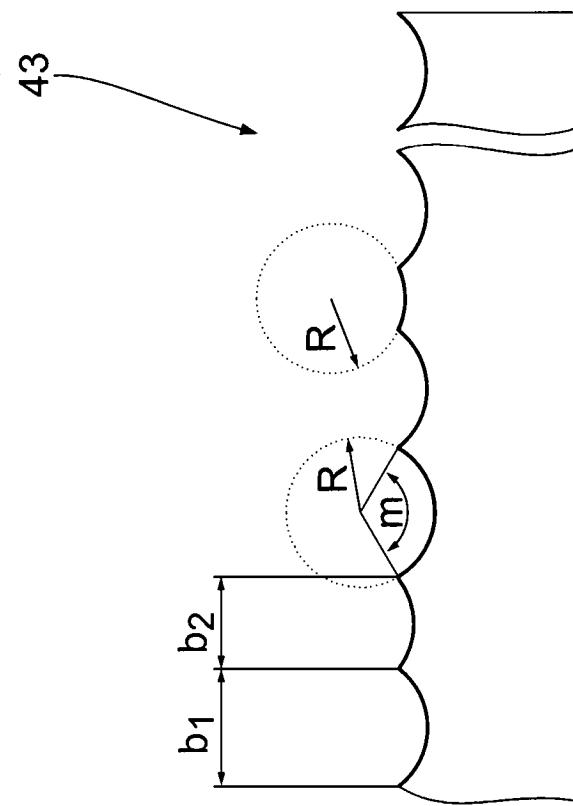


Fig. 14

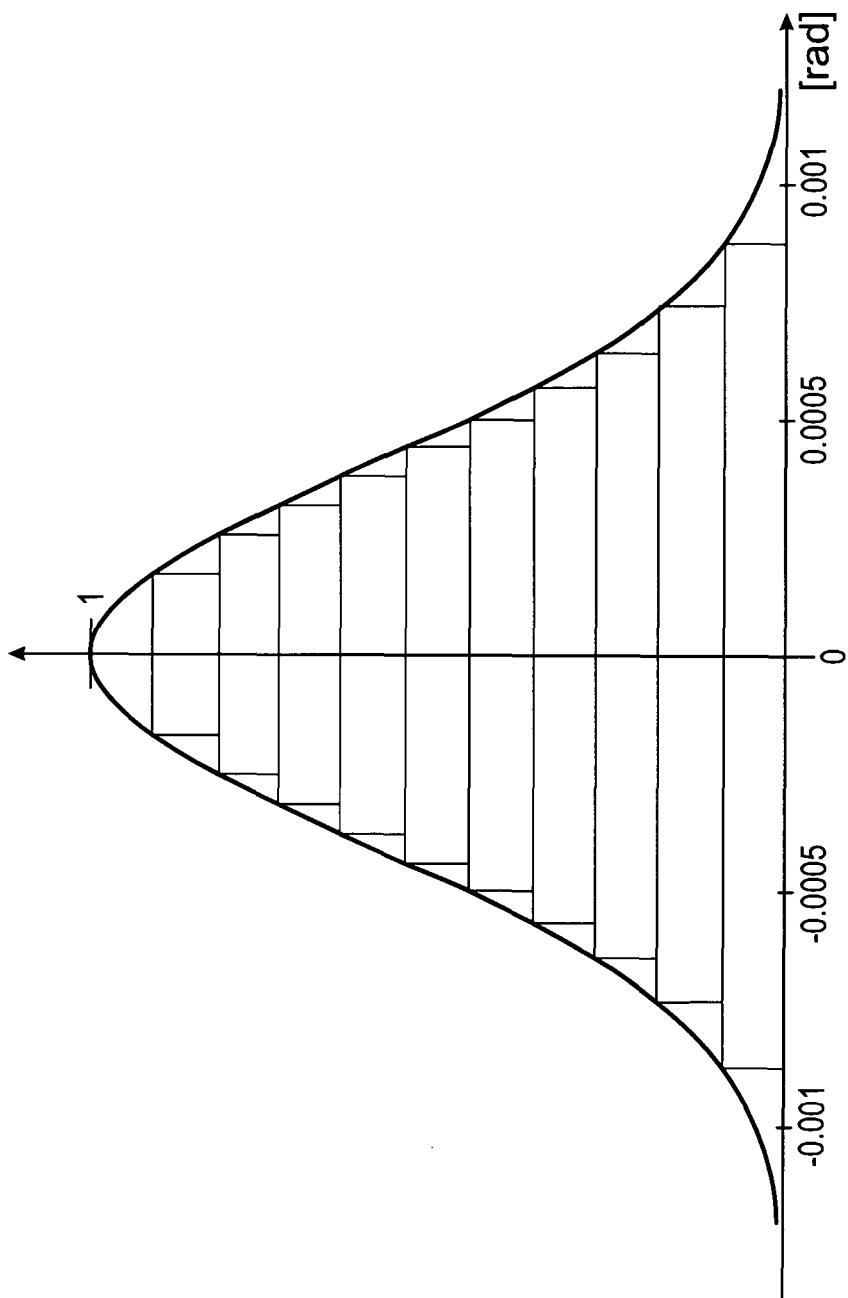


Fig. 15