



(10) **DE 10 2008 042 438 B4** 2010.11.04

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2008 042 438.2**
(22) Anmeldetag: **29.09.2008**
(43) Offenlegungstag: **08.04.2010**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **04.11.2010**

(51) Int Cl.⁸: **G03F 7/20** (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen, DE

(72) Erfinder:
Mann, Hans-Jürgen, 73447 Oberkochen, DE;
Kaiser, Winfried, 73432 Aalen, DE

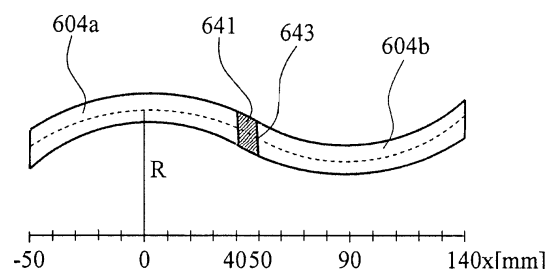
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

US 2006/01 04 413 A1
US 52 55 051 A

(54) Bezeichnung: **Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit mindestens zwei Arbeitszuständen**

(57) Hauptanspruch: Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen mit mindestens zwei Arbeitszuständen umfassend eine reflektive Maske in einer Objektebene (5, 805), wobei

im ersten Arbeitszustand ein erster Teilbereich (604a, 704a) der Maske durch eine erste Strahlung, die an jedem Punkt des ersten Teilbereiches (604a, 704a) eine zugeordnete erste Schwerpunktrichtung mit einem ersten Schwerpunktrichtungsvektor besitzt, beleuchtet wird und im zweiten Arbeitszustand ein zweiter Teilbereich (604b, 704b) der Maske durch eine zweite Strahlung, die an jedem Punkt des zweiten Teilbereiches eine zugeordnete zweite Schwerpunktrichtung mit einem zweiten Schwerpunktrichtungsvektor besitzt, beleuchtet wird, und wobei der erste und der zweite Teilbereich (604a, 704a, 604b, 704b) einen gemeinsamen Überlappbereich (641, 741) besitzen, dadurch gekennzeichnet, dass an jedem Punkt zumindest eines Teilbereiches des Überlappbereiches (641, 741) das Spatprodukt aus dem normierten ersten Schwerpunktrichtungsvektor, dem normierten zweiten Schwerpunktrichtungsvektor und einem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner ist als 0.05.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen mit mindestens zwei Arbeitszuständen, sowie ein Verfahren zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen mittels Lithographie.

[0002] Eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage und ein Verfahren der eingangs genannten Art sind zum Beispiel aus der US 6,295,119 B1 und der US 6,526,118 B2 bekannt.

[0003] Die US 2006/0104413 A1 zeigt ein Verfahren zur Abbildung einer reflektiven Maske, bei dem der Beleuchtungsbereich in zwei orthogonalen Richtungen kleiner als die Maske ist. In der US 5,255,051 A ist ein abschnittsweises Abbilden einer transmissiven Maske auf einen Wafer beschrieben.

[0004] Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen, die zur Produktion von mikroelektronischen Bauelementen verwendet werden, bestehen unter anderem aus einer Lichtquelle und einem Beleuchtungssystem zur Ausleuchtung einer strukturtragenden Maske, dem sogenannten Retikel, und einer Projektionsoptik zur Abbildung der Maske auf ein Substrat, den Wafer. Dieses Substrat enthält eine photosensitive Schicht, die bei Belichtung chemisch verändert wird. Man spricht hierbei auch von einem lithographischen Schritt. Das Retikel ist dabei in der Objektebene und der Wafer in der Bildebene der Projektionsoptik der Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage angeordnet. Durch die Belichtung der photosensitiven Schicht und weitere chemische Prozesse entsteht ein mikroelektronisches Bauelement.

[0005] Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen werden häufig als sogenannte Scanner betrieben. Das bedeutet, dass das Retikel entlang einer Scanrichtung durch ein schlitzförmiges Beleuchtungsfeld bewegt wird, während der Wafer in der Bildebene der Projektionsoptik entsprechend bewegt wird. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten von Retikel und Wafer entspricht der Vergrößerung der Projektionsoptik, die üblicherweise kleiner 1 ist. Die optischen Komponenten des Beleuchtungssystems und der Projektionsoptik können dabei sowohl refraktive als auch reflektive oder diffraktive Komponenten sein. Auch Kombinationen von refraktiven, reflektiven und diffraktiven Komponenten sind möglich. Gleichfalls kann das Retikel sowohl reflektiv als auch transmissiv ausgebildet sein. Vollständig aus reflektiven Komponenten bestehen solche Anlagen insbesondere dann, wenn sie mit einer Strahlung mit einer Wellenlänge kleiner als ca. 100 nm, insbesondere zwischen 5 nm und 15 nm betrieben werden.

[0006] Eine solche Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage besitzt ein begrenztes Beleuchtungsfeld und auch ein begrenztes Feld, das abgebildet werden kann. Es kann jedoch wünschenswert sein, ein strukturtragende Maske in die Bildebene abzubilden, in der das Substrat mit der photosensitiven Schicht angeordnet ist, auch wenn die Maske so groß ist, dass sie entweder nicht vollständig abgebildet werden kann oder nicht vollständig beleuchtet werden kann.

[0007] Ist die Maske nur in einer Richtung größer als der Bereich, der beleuchtet oder abgebildet werden kann, so kann man die Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage als Scanner betreiben, so dass die Maske durch das schlitzförmige Beleuchtungsfeld in dieser Richtung bewegt wird, während der Wafer in der Bildebene der Projektionsoptik entsprechend bewegt wird. Damit kann zumindest prinzipiell eine Maske, die in dieser Richtung beliebig groß ist, beleuchtet und abgebildet werden.

[0008] Ist die Maske jedoch in beide Richtungen größer als der Bereich, der abgebildet oder beleuchtet werden kann, so kann dies nicht durch Scannen behoben werden. In einem solchen Fall wird die strukturtragende Maske in mindestens zwei Teilbereiche aufgeteilt, die einzeln abgebildet oder beleuchtet werden. Dies lässt sich zusätzlich mit einem Scanprozess kombinieren. In diesem Fall haben die Mittelpunkte der mindestens zwei Teilbereiche einen Abstand senkrecht zur Scanrichtung, so dass die Vereinigung der mindestens zwei Teilbereiche größer ist als jeder der einzelnen Teilbereiche. In Kombination mit der Bewegung in Scanrichtung kann damit eine relativ große strukturtragende Maske beleuchtet und abgebildet werden.

[0009] Damit jedoch insgesamt ein vollständiges Bild der Maskenstruktur in der photosensitiven Schicht entsteht, ist es hilfreich, wenn die Teilbereiche zumindest teilweise überlappen. Hierdurch kann gewährleistet werden, dass es keine Bereiche der Maske gibt, die versehentlich nicht abgebildet oder nicht beleuchtet werden. Diese Überlappbereiche verursachen jedoch Probleme bei der Gestaltung der strukturtragenden Maske. Insbesondere in den Fällen, in denen die Maske nicht senkrecht beleuchtet wird, ist bei der Herstellung der Maske darauf zu achten, welche Schwerpunktsrichtung der Strahlung an einem Punkt der Maske in der Projektionsbelichtungsanlage vorliegt.

[0010] Unter der Schwerpunktsrichtung der einfallenden Strahlung versteht man die mittlere Richtung der einfallenden Strahlung. Wird ein Punkt gleichmäßig von allen Richtungen eines Strahlkegels beleuchtet, so fällt die Symmetrieachse des Strahlkegels mit der Schwerpunktsrichtung zusammen. Bei einer nicht gleichmäßigen Beleuchtung wird im Allgemeinen ein energiegewichtetes Mittel gebildet bei dem jede Richtung mit der Intensität der aus dieser Richtung kommenden Strahlung gewichtet wird. Die Schwerpunktsrichtung ist dann die mittlere energiegewichtete Richtung.

[0011] Die Schwerpunktsrichtung muss bei der Herstellung der Maske berücksichtigt werden, da bei einer schrägen Beleuchtung Schattenwürfe und Projektionseffekte auftreten können, die das Bild der Maske verzerren. Schatteneffekte können auftreten, weil eine solche strukturtragende Maske nicht vollkommen eben ist. Im Falle einer reflektiven Maske sind die nichtreflektierenden Bereiche erhaben, da an diesen Stellen eine oder mehrere Deckschichten auf eine oder mehrer reflektierende Grundschrift aufgebracht wurden. Ein solcher dreidimensionaler Aufbau der Maske kann daher zu Schatteneffekten führen.

[0012] Bei der Herstellung einer Maske können jedoch Schatten- und Projektionseffekte berücksichtigt werden, so dass in der Bildebene der Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage das gewünschte Bild entsteht.

[0013] Wird der Überlappbereich zweimal beleuchtet und abgebildet, so ergeben sich spezielle Erfordernisse an die Schwerpunktsrichtungen der Strahlung von erster und zweiter Belichtung, um weiterhin Schattenwürfe und Projektionseffekte berücksichtigen zu können.

[0014] Durch die vorliegende Erfindung soll eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage und ein Verfahren zur Herstellung mikroelektronischer Bauelemente zur Verfügung gestellt werden, bei denen diese speziellen Erfordernisse erfüllt sind.

[0015] Gemäß der vorliegenden Erfindung wird diese Aufgabe gelöst durch eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen mit mindestens zwei Arbeitszuständen umfassend eine reflektive Maske in einer Objektebene. Die Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage ist dabei so gestaltet, dass im ersten Arbeitszustand ein erster Teilbereich der Maske durch eine erste Strahlung, die an jedem Punkt des ersten Teilbereiches eine zugeordnete erste Schwerpunktsrichtung mit einem ersten Schwerpunktsrichtungsvektor besitzt, beleuchtet wird und im zweiten Arbeitszustand ein zweiter Teilbereich der Maske durch eine zweite Strahlung, die an jedem Punkt des zweiten Teilbereiches eine zugeordnete zweite Schwerpunktsrichtung mit einem zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor besitzt, beleuchtet wird, wobei der erste und der zweite Teilbereich einen gemeinsamen Überlappbereich besitzen. An jedem Punkt zumindest eines Teilbereiches des Überlappbereiches ist das Spatprodukt aus dem normierten ersten Schwerpunktsrichtungsvektor, dem normierten zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor und einem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner sein als 0.05, bevorzugt kleiner als 0.03, besonders bevorzugt kleiner als 0.01. Hierdurch ist gewährleistet, dass entweder der aus dem ersten und dem zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor gemittelte Schwerpunktsrichtungsvektor senkrecht auf der Maske steht, so dass keine Berücksichtigung von Projektions- und Schatteneffekten im Überlappbereich erforderlich sind, oder dass der erste und der zweite Schwerpunktsrichtungsvektor sich nicht wesentlich in ihrer Richtung unterscheiden, so dass die Berücksichtigung der Projektions- und Schatteneffekte problemlos – da in beiden Arbeitszuständen gleich – möglich ist. Im ersten Fall ist das Kreuzprodukt aus erstem und zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor im Wesentlichen senkrecht zum normierten Vektor auf der Maske, so dass das Spatprodukt kleiner als 0.05 ist, bevorzugt kleiner als 0.03, besonders bevorzugt kleiner als 0.01. Im zweiten Fall haben erster und zweiter Schwerpunktsrichtungsvektor im Wesentlichen die gleiche Richtung, so dass bereits der Betrag des Kreuzproduktes klein ist, womit dann auch der Betrag des Skalarproduktes zwischen dem Kreuzprodukt und einem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner ist als 0.05, bevorzugt kleiner als 0.03, besonders bevorzugt kleiner als 0.01.

[0016] Eine Ausgestaltung der Projektionsbelichtungsanlage derart, dass der Überlappbereich kleiner ist als der erste Teilbereich und kleiner ist als der zweite Teilbereich, führt dazu dass die Vereinigung von ersten und zweiten Teilbereich größer ist als jeweils erster und zweiter Teilbereich. Damit kann insgesamt eine größere strukturtragende Maske beleuchtet und abgebildet werden.

[0017] Ist die Projektionsbelichtungsanlage zusätzlich derart gestaltet, dass sich die Orientierung der reflektiven Maske im ersten Arbeitszustand von der Orientierung der Maske im zweiten Arbeitszustand durch eine Drehung um 180° um eine Achse senkrecht zur Objektebene unterscheidet, dann lässt sich eine solche Projektionsbelichtungsanlage besonders einfach zu realisieren. Hierdurch ist es möglich eine Projektionsoptik ein-

zusetzen, deren Eintrittspupille nicht übermäßig weit von der Objektebene entfernt liegt. Solche Projektionsoptiken können mit rotationssymmetrischen reflektiven Komponenten ausgeführt sein, die einfacher herzustellen und zu vermessen sind, als Projektionsoptiken, die auf eine solche Rotationsymmetrie verzichten.

[0018] Die Erfindung betrifft weiterhin eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen mit mindestens zwei Arbeitszuständen. Dabei umfasst die Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage eine reflektive Maske in einer Objektebene, wobei sich die Orientierung der reflektiven Maske im ersten Arbeitszustand von der Orientierung der Maske im zweiten Arbeitszustand durch eine Drehung um 180° um eine Achse senkrecht zur Objektebene unterscheidet. Dies hat den Vorteil, sich die Beleuchtungsrichtungen an der Maske in beiden Arbeitszuständen um die gleiche Drehung unterscheiden. Hierdurch wird erreicht, dass Effekte, die aufgrund der schrägen Beleuchtung bei reflektiven Masken auftreten, kompensiert werden können.

[0019] In der erfindungsgemäßen Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage kann insbesondere eine Strahlung zum Einsatz kommen, die eine Wellenlänge zwischen 5 nm und 15 nm besitzt. Dies hat den Vorteil, dass besonders kleine Strukturen mit Hilfe einer solchen Anlage abgebildet werden können.

[0020] Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen mittels Lithographie, bei dem eine reflektive strukturtragende Maske in einer Objektebene auf ein Substrat in einer Bildebene abgebildet wird. Dieses Verfahren umfasst die folgenden Schritte: Eine erste Belichtung eines ersten Teilbereiches der Maske durch eine erste Strahlung, die an jedem Punkt des ersten Teilbereiches eine erste Schwerpunktsrichtung mit einem ersten Schwerpunktsrichtungsvektor besitzt, und eine zweite Belichtung eines zweiten Teilbereiches der Maske durch eine zweite Strahlung, die an jedem Punkt des zweiten Teilbereiches eine zweite Schwerpunktsrichtung mit einem zweiten Schwerpunktsvektor besitzt, wobei der erste und der zweite Teilbereich einen gemeinsamen Überlappbereich besitzen. In diesem Überlappbereich ist an jedem Punkt das Spatprodukt aus dem normierten ersten Schwerpunktsrichtungsvektor, dem normierten zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor und einem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner als 0.05, bevorzugt kleiner als 0.03, besonders bevorzugt kleiner als 0.01. Dieses Verfahren hat unter anderem den Vorteil, dass eine einfach herzustellende strukturtragende Maske eingesetzt werden kann. Dies liegt daran, dass aufgrund der speziellen Beziehung der Schwerpunktsrichtungsvektoren von erster und zweiter Belichtung des Teilbereichs die Projektions- und Schatteneffekte einfach berücksichtigt werden können.

[0021] Beim erfindungsgemäßen Verfahren kann insbesondere eine Strahlung zum Einsatz kommen, die eine Wellenlänge zwischen 5 nm und 15 nm besitzt. Dies hat den Vorteil, dass besonders kleine Strukturen mit Hilfe solcher Strahlung abgebildet werden können.

[0022] Zusätzlich kann das erfindungsmäße Verfahren auch derart gestaltet sein, dass die erste und die zweite Belichtung mittels eines Scanprozess stattfindet, in dem die Maske während der ersten Belichtung entlang einer ersten Scanrichtung durch ein Beleuchtungsfeld bewegt wird und während der zweiten Belichtung entlang einer zweiten Scanrichtung. Durch den zusätzlichen Scanprozess lässt sich eine noch größere strukturtragende Maske beleuchten und abbilden.

[0023] Wird eine erfindungsgemäße Projektionsbelichtungsanlage als Scanner betrieben, so können die Scanrichtungen beim Belichten benachbarter Teilbereiche parallel oder antiparallel sein. Parallele Scanrichtungen haben den Vorteil, dass alle Belichtungsschritte identisch sind, da die Maske während der Belichtung immer von einer Ausgangsposition in eine Endposition bewegt wird und auf dem Rückweg zur Ausgangsposition keine Belichtung stattfindet. Damit muss der Rückweg zur Ausgangsposition nicht mit der gleichen Genauigkeit eingehalten werden und so sind die Anforderungen an die mechanische Komplexität der Projektionsbelichtungsanlage geringer sind. Andererseits haben antiparallele Scanrichtungen den Vorteil, dass auf dem Rückweg auch eine Belichtung stattfindet, so dass ein schnellerer Belichtungsvorgang ermöglicht werden kann.

[0024] Ist das Verfahren oder die Projektionsbelichtungsanlage zusätzlich dadurch gekennzeichnet, dass der maximale Winkel zwischen zwei beliebigen ersten Schwerpunktsrichtungsvektoren oder zwischen zwei beliebigen zweiten Schwerpunktsrichtungsvektoren kleiner ist als 1° , so liegt nur kleine Variation der Schwerpunktsrichtungsvektoren innerhalb des Überlappbereiches vor. Dies hat den Vorteil, dass auch die Stärke der Schatten- und Projektionseffekte im Überlappbereich nur wenig variieren.

[0025] Ist zusätzlich oder alternativ das Verfahren derart gestaltet, dass der Winkel zwischen einem ersten und einem zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor an jedem Punkt des Überlappbereiches kleiner als 1° ist, so sind die Projektions- und Schatteneffekte während der ersten und zweiten Belichtung im Wesentlichen iden-

tisch, so dass diese Effekte relativ einfach bei der Herstellung der strukturtragenden Maske kompensiert werden können.

[0026] Bei einer zusätzlichen Gestaltung des Verfahrens derart, dass an jedem Punkt des Überlappbereiches der Winkel zwischen der Ebene, die durch den ersten und den zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor gebildet wird, und dem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner ist als 1° , ergibt sich der Vorteil, dass die Richtung der Belichtungsstrahlung gemittelt über die beiden Belichtungen im Wesentlichen senkrecht zur Maske ist. Hierdurch wird gewährleistet, dass im Überlappbereich nur wenige Schatten- und Projektionseffekte auftreten.

[0027] Insbesondere kann das Verfahren auch eine Drehung der strukturtragenden Maske in der Objektebene um 180° zwischen der ersten und der zweiten Belichtung umfassen. Dies hat den Vorteil, sich die Beleuchtungsrichtungen an der Maske in während der ersten und der zweiten Belichtung aufgrund der Drehung unterscheiden. Hierdurch wird erreicht, dass Effekte, die durch die schräge Beleuchtung bei reflektiven Masken auftreten, kompensiert werden können.

[0028] Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnungen.

[0029] [Fig. 1](#) eine Projektionsoptik in einer reflektiven Ausgestaltung

[0030] [Fig. 2](#) Aufriss eines Ausschnitts der strukturtragenden Maske

[0031] [Fig. 3](#) Strahl am Retikel mit Definition der Winkel α und β

[0032] [Fig. 4a](#) eine Aufsicht auf das bogenförmige abzubildende Feld

[0033] [Fig. 4b](#) Winkelverläufe des Schwerpunktsrichtungsvektors bei einer Projektionsbelichtungsanlage, wie sie aus dem Stand der Technik bekannt ist.

[0034] [Fig. 5a](#) aneinander gelegte Teilbereiche, wie sie aus dem Stand der Technik bekannt sind

[0035] [Fig. 5b](#) Winkelverläufe der Schwerpunktsrichtungsvektoren bei einer Ausführungsform nach [Fig. 4a](#), wie sie aus dem Stand der Technik bekannt ist

[0036] [Fig. 6a](#) aneinander gelegte Teilbereiche nach einer Ausführungsform der Erfindung

[0037] [Fig. 6b](#) Winkelverlauf des Schwerpunktsrichtungsvektors bei der erfindungsgemäßen Ausführungsform nach [Fig. 6a](#)

[0038] [Fig. 7a](#) aneinander gelegte Teilbereiche nach einer weiteren Ausführungsform der Erfindung

[0039] [Fig. 7b](#) Winkelverlauf des Schwerpunktsrichtungsvektors bei der erfindungsgemäßen Ausführungsform nach [Fig. 7a](#)

[0040] [Fig. 8](#) objektseitig telezentrische Projektionsoptik

[0041] Die Bezugszeichen sind so gewählt, dass Objekte, die in [Fig. 1](#) dargestellt sind, mit einstelligen oder zweistelligen Zahlen versehen wurden. Die in den weiteren Figuren dargestellten Objekte haben Bezugszeichen, die drei- und mehrstellig sind, wobei die letzten beiden Ziffern das Objekt angeben und die vorangestellten Ziffern die Nummer der Figur, auf der das Objekt dargestellt ist. Damit stimmen die Bezugsziffern von gleichen Objekten, die in mehreren Figuren dargestellt sind, in den letzten beiden Ziffern überein. Zum Beispiel kennzeichnen die Bezugszeichen **3** und **403** das Objekt **3**, das in diesem Fall das Objektfeld ist, in den [Fig. 1](#) und 4. Die Erläuterung eines Objektes mit einer Bezugsziffer findet sich daher gegebenenfalls in der Beschreibung zu einer der vorangegangenen Figuren unter der entsprechenden Bezugsziffer.

[0042] [Fig. 1](#) zeigt eine Darstellung einer reflektiven Projektionsoptik **1** einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wie sie aus dem Stand der Technik bekannt ist. Die Projektionsoptik **1** bildet ein Objektfeld **3**, das in der Objektebene **5** angeordnet ist, in die Bildebene **7** ab. Am Ort des Objektfeldes **3** in der Objektebene **5** ist weiterhin eine strukturtragende Maske (nicht in der Zeichnung dargestellt), das sogenannte Retikel, angeordnet. Weiterhin dargestellt ist ein kartesisches Koordinatensystem, dessen x-Achse in die Figurenebene

hinein zeigt. Die x-y-Koordinatenebene fällt dabei mit der Objektebene **1** zusammen und die z-Achse steht senkrecht auf der Objektebene **1** und zeigt nach unten. Die Projektionsoptik besitzt eine optische Achse **9**, die nicht durch das Objektfeld verläuft. Die Spiegel **11** der Projektionsoptik **1** besitzen eine optische Oberfläche, die rotationssymmetrisch bezüglich der optischen Achse ist. Auf dem im Lichtweg zweiten Spiegel ist in diesem Ausführungsbeispiel die Aperturblende **13** angeordnet. Die Wirkung der Projektionsoptik **1** ist dargestellt mit Hilfe von drei Strahlen, dem Hauptstrahl in der Mitte des Objektfeldes **15** und den beiden Aperturrandstrahlen **17** und **19**. Der Hauptstrahl in der Mitte des Objektfeldes **15**, der unter einem Winkel von 6° zur Senkrechten auf der Objektebene verläuft, schneidet die optische Achse in der Ebene der Aperturblende **13**. Von der Objektebene **5** aus betrachtet scheint der Hauptstrahl **15** die optische Achse in der Eintrittspupillenebene **21** zu schneiden. In der Eintrittspupillenebene **21** liegt somit das virtuelle Bild der Aperturblende **13**, die Eintrittspupille. Die Mitte des Objektfeldes **3** hat einen Abstand R zur optischen Achse **9**, damit bei der reflektiven Ausgestaltung der Projektionsoptik keine unerwünschte Vignettierung der vom Objektfeld ausgehenden Strahlung auftritt.

[0043] [Fig. 2](#) zeigt schematisch einen Aufriss eines Teils der strukturtragenden Maske. Die Maske umfasst eine reflektierende Grundsicht **223** auf einem Substrat **225** und eine absorbierende Deckschicht **227**, die nur in einem ersten Teilbereich **229** aufgebracht wurde. Die Deckschicht **227** hat eine Dicke h , die üblicherweise im Bereich von ca. 100 nm liegt. Der erste Teilbereich **227** hat eine Ausdehnung D . Mit **231** ist die Mitte des ersten Teilbereichs gekennzeichnet. Fällt nun Strahlung mit einem Schwerpunktsrichtungsvektor **235**, der einen Winkel γ zur Senkrechten auf der Maske aufweist, auf die Maske, so wirft die Deckschicht **227** einen Schatten auf die reflektierende Grundsicht, so dass insgesamt ein zweiter Teilbereich **232** nicht beleuchtet wird. Der zweite Teilbereich ist jedoch größer als der Teilbereich **231**. Darüber hinaus ist der Mittelpunkt des zweiten Teilbereichs gegenüber dem Mittelpunkt **231** des ersten Teilbereichs verschoben. Es kommt also aufgrund von Projektions- und Schatteneffekten zu einer Verbreiterung und Verschiebung der nichtreflektierenden Bereiche.

[0044] In [Fig. 3](#) ist beispielhaft ein Schwerpunktsrichtungsvektor **335** der Strahlung vor der Reflektion am Retikel in einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt. Zur besseren Verdeutlichung der räumlichen Orientierung ist die Projektion **337** des Schwerpunktsrichtungsvektors **335** in die x-z-Ebene und die Projektion **339** des Schwerpunktsrichtungsvektors **335** in die y-z-Ebene dargestellt. Der Schwerstrahlwinkel α bezeichnet den Winkel zwischen der Projektion **337** und der z-Achse und der Schwerstrahlwinkel β den Winkel zwischen der Projektion **339** und der z-Achse. Mit Hilfe dieser beiden Winkel lässt sich der normierte Schwerpunktsrichtungsvektor eindeutig beschreiben. Beschreibt man den Schwerpunktsrichtungsvektor vor der Reflektion \vec{s} im dargestellten Koordinatensystem durch

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix}$$

[0045] So sind die Winkel definiert durch

$$\alpha = \arctan\left(\frac{s_x}{s_z}\right) \quad \text{und} \quad \beta = \arctan\left(\frac{s_y}{s_z}\right).$$

[0046] Im dargestellten Fall sind die Komponenten s_x , s_y , und s_z alle negativ (der Vektor **335** zeigt nach links oben). Damit sind die Winkel α und β positiv. Dadurch, dass die Strahlung am Retikel reflektiert wird und das Retikel in der x-y-Ebene angeordnet ist, gilt für den Schwerpunktsrichtungsvektor der Strahlung nach der Reflektion \vec{s}' :

$$\vec{s}' = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ -s_z \end{pmatrix}$$

[0047] Und es gilt für die entsprechenden Winkel nach der Reflektion $\alpha' = -\alpha$ und $\beta' = -\beta$.

[0048] Damit der Schwerpunktsrichtungsvektor \vec{s}' so gerichtet ist, dass er an jedem Punkt des Objektfeldes zur Mitte der Eintrittspupille zeigt, muss der Schwerpunktsrichtungsvektor \vec{s} der Beleuchtungsstrahlung einen speziellen Verlauf haben, der sich aus Lage der Eintrittspupille ergibt.

[0049] [Fig. 4a](#) zeigt eine Aufsicht auf ein bogenförmiges Objektfeld **403**, wie es bei der in [Fig. 1](#) dargestellten

Projektionsoptik **1** vorkommt und ein kartesisches Koordinatensystem, dessen Achsen denen aus [Fig. 1](#) entsprechen. Das Objektfeld **403** ist ein Ausschnitt aus einem Kreisring, dessen Zentrum durch den Schnittpunkt der optischen Achse **409** mit der Objektebene ist. Der mittlere Radius R beträgt im dargestellten Fall 135 mm. Die Breite des Feldes in y -Richtung d ist hier 8 mm. Alternativ kann ein gebogenes Objektfeld auch durch zwei Kreisbögen begrenzt werden, die den gleichen Radius besitzen und in y -Richtung gegeneinander verschoben sind. Zum Betrieb einer Projektionsoptik, wie sie in den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) dargestellt ist, wird das Objektfeld **403** so beleuchtet, dass die Schwerpunktsrichtung der Strahlung an einem Punkt des Objektfeldes **403**, nach Reflexion am reflektiven Retikel im Wesentlichen in Richtung der Verbindungslinie zwischen diesem Punkt des Objektfeldes und der Mitte der Eintrittspupille verläuft. Wird die Projektionsbelichtungsanlage als Scanner betrieben, so verläuft die Scanrichtung in Richtung der kürzeren Ausdehnung des Objektfeldes, das heißt in Richtung der y -Richtung.

[0050] In [Fig. 4b](#) ist ein Verlauf der Schwerstrahlwinkel dargestellt für ein spezielles Ausführungsbeispiel. Die optische Achse hat hier einen Abstand von $R = 135$ mm zur Mitte des Objektfeldes und die Eintrittspupille liegt in einer Entfernung von 1284.4 mm zur Objektebene. Diese Werte ergeben einen Reflektionswinkel zwischen der Schwerpunktsrichtung \vec{s}' und der Senkrechten zur Objektebene von 6° .

[0051] Da nur der in [Fig. 2](#) dargestellte obere Halbbogen relevant ist, gibt es zu jedem Wert x genau einen positiven Wert y , so dass der Punkt (x, y) auf dem Halbkreisbogen mit dem Radius $R = 135$ mm liegt. Somit lassen sich die Winkel α' und β' als Funktion der Koordinate x berechnen, indem man den Punkt (x, y) mit der Mitte der Eintrittspupille verbindet. Mit Hilfe der obigen Beziehung ergeben sich daraus die Winkel α und β vor der Reflexion durch einen Vorzeichenwechsel. Auch wenn die Ausdehnung des Feldes in y -Richtung im vorliegenden Fall 8 mm beträgt, so gibt es zwar zu jedem festen Wert x_0 mehrere Punkte y_0 , so dass der Punkt (x_0, y_0) innerhalb des Objektfeldes liegt, die Schwerstrahlwinkel variieren über diese Punkte jedoch nicht stark. Darüber hinaus wird eine erfindungsgemäße Projektionsbelichtungsanlage üblicherweise in einem Scanmodus betrieben, bei dem die strukturtragende Maske in y -Richtung durch das Objektfeld bewegt wird. Somit wird jeder Punkt der Maske mit der Koordinate x_0 mit Strahlung beleuchtet, die eine, über alle Punkte y_0 gemittelte, Schwerstrahlwinkel besitzt. Aus diesen Gründen ist es für die folgenden Betrachtung ausreichend, die Schwerstrahlwinkel auf dem Halbkreisbogen mit $R = 135$ mm zu betrachten.

[0052] Anhand der [Fig. 4b](#) wird deutlich, dass der Winkel α für x zwischen -50 mm und 50 mm zwischen -2.23° und 2.23° variieren sollte, wohingegen eine Variation des Winkels β zwischen 5.57° und 6° erforderlich ist. Eine solche Variation der Schwerstrahlwinkel erfordert jedoch Anpassungen bei der Auslegung der strukturtragenden Maske. Steht der Schwerpunktsrichtungsvektor nicht senkrecht auf der strukturtragenden Maske, so führt dies aufgrund von Schattenwürfen und Projektionseffekten zu einer Verschiebung des Bildes der Struktur. Solange an allen Stellen der Maske der Schwerpunktsrichtungsvektor identisch ist, ergibt sich im Wesentlichen eine globale Verschiebung. Ändert sich der Schwerpunktsrichtungsvektor jedoch über die strukturtragende Maske, so ergeben sich von Ort zu Ort unterschiedliche Verschiebungen, was insgesamt zu einer Verschiebung und einer Verzerrung des Bildes der Maske führt. Je größer die Variation der Schwerstrahlwinkel ist, umso stärker ist die hieraus resultierende Verzerrung. Im vorliegenden Fall kann die Verzerrung in y -Richtung weitgehend vernachlässigt werden, da der Winkel β nur um ca. 0.4° variiert. Dagegen ist die Variation von α um einen Faktor 10 größer und führt daher zu einer Verzerrung in x -Richtung. Sowohl die Verzerrung als auch die Verschiebung werden bei der Auslegung der Maske berücksichtigt, so dass sich das gewünschte Bild in der Bildebene der Projektionsbelichtungsanlage ergibt.

[0053] In [Fig. 5a](#) sind zwei Teilbereiche **504a** und **504b** der Maske gezeigt. Die Teilbereiche **504a** und **504b** entsprechen jeweils dem in [Fig. 4a](#) dargestellten Objektfeld **403**. Da das Objektfeld der Bereich der Objektebene ist, der mit der gewünschten Güte beleuchtet und abgebildet werden kann, müssen die Teilbereiche kleiner als das Objektfeld oder höchstens genauso groß wie das Objektfeld sein. Um zu erreichen, dass ein möglichst großer Bereich der Maske beleuchtet und abgebildet wird, wählt man die Teilbereiche gleich dem Objektfeld der Projektionsoptik. Es ist aber auch möglich nur einen Teil des Objektfeldes zu beleuchten und abzubilden. Im Folgenden entsprechen die Teilbereiche immer den jeweiligen Objektfeldern.

[0054] Die Projektionsbelichtungsanlage führt in einem ersten Arbeitszustand eine erste Belichtung des linken Teilbereichs **504a** durch und danach eine zweite Belichtung in einem zweiten Arbeitszustand der Projektionsbelichtungsanlage, bei der der rechte Teilbereich **504b** belichtet wird. Das gezeigte Aneinanderlegen der Teilbereiche entspricht dabei hier einer aus dem Stand der Technik bekannten Ausführungsform. Ein solches Aneinanderlegen von Objektfeldern ist immer dann erforderlich, wenn die Ausdehnung der strukturtragenden Maske größer ist als der Bereich, der beleuchtet oder abgebildet werden kann. Von der strukturtragenden Maske wird also im ersten Arbeitszustand ein erster Teilbereich **504a** und im zweiten Arbeitszustand ein zweiter

Teilbereich **504b** beleuchtet. Die beiden Teilbereiche haben einen gemeinsamen Überlappbereich **541**. Aus Darstellungsgründen hat der Überlappbereich hier eine Ausdehnung in x-Richtung von 10 mm. Es ist jedoch vorteilhaft, wenn der Überlappbereich möglichst klein ist, damit sich ein möglichst großer abzubildender Bereich ergibt. Ausdehnungen von 1–2 mm oder weniger in x-Richtung sind wünschenswert. Um die maximale Auflösung einer Projektionsoptik zu verbessern, ist es erforderlich, zu höheren Aperturen überzugehen. Damit jedoch eine vergleichbare oder bessere Abbildungsqualität gewährleistet bleibt, ist es häufig erforderlich die Größe des Objektfeldes zu reduzieren, da ansonsten stärkere Bildfehler auftreten. Hieraus ergibt sich dann die Notwendigkeit eines Aneinanderlegens von Objektfeldern. Ein Überlappbereich der beiden Objektfelder ist erforderlich, um zu verhindern, dass Teile der Struktur nicht beleuchtet oder abgebildet werden. Da ein exaktes Ausrichten der Objektfelder nicht hundertprozentig garantiert werden kann ist es einfacher, einen gewissen Überlappbereich zu haben, so dass auf jeden Fall der komplette gewünschte Bereich beleuchtet und abgebildet wird, als aufgrund einer falschen Einstellung zu riskieren, dass Teile der Struktur nicht abgebildet oder nicht beleuchtet werden. Da aber nun jeder Punkt im Überlappbereich zweimal beleuchtet bzw. abgebildet wird, kann es zu Problemen kommen, da die Schwerstrahlwinkel von erster und zweiter Beleuchtung unterschiedlich sind.

[0055] In [Fig. 5b](#) ist der Verlauf der beiden Schwerstrahlwinkel für Punkte auf den Halbkreisbögen mit Radius $R = 135$ mm gezeigt, wie sie in beiden Arbeitszuständen bei den jeweiligen Objektfeldern vorliegen. Während der Winkel β sich im Überlappbereich **541** in beiden Arbeitszuständen keinen großen Unterschied aufweist, unterscheidet sich der Winkel α in den beiden Arbeitszuständen um mehr als 4° . Die strukturtragende Maske wird im Überlappbereich also in beiden Arbeitszuständen aus unterschiedlichen Richtungen beleuchtet. Damit ist es relativ schwierig, Projektions- und Schatteneffekte bei der Herstellung der Maske zu berücksichtigen. Diese Nachteile werden bei der erfindungsgemäßen Weiterbildung überwunden.

[0056] [Fig. 6a](#) zeigt zwei aneinander gelegte Teilbereiche **604a** und **604b** in einer erfindungsgemäßen Weiterbildung der Projektionsbelichtungsanlage. Dabei wird in einem ersten Arbeitszustand der Projektionsbelichtungsanlage eine erste Belichtung des linken Teilbereichs **604a** durchgeführt und danach eine zweite Belichtung des zweiten Teilbereichs **604b** in einem zweiten Arbeitszustand der Projektionsbelichtungsanlage. Zwischen den beiden Belichtungsschritten wird die strukturtragende Maske um 180° um eine Achse senkrecht zur Objektebene gedreht. Dies führt dazu, dass die beiden bogenförmigen Objektfelder sich in ihrer relativen Orientierung um eine Drehung um 180° unterscheiden. Alternativ ist es auch möglich, die Projektionsoptik und die Beleuchtungsoptik um eine Achse senkrecht zur Objektebene um 180° zu drehen. Auch auf diese Weise ergäbe sich, dass die beiden Objektfelder in den zwei Arbeitszuständen sich um eine Drehung um 180° unterscheiden.

[0057] Die gezeigte Orientierungsänderung der Objektfelder führt dazu, dass sich auch die Schwerstrahlwinkel verändern. In [Fig. 6b](#) ist der Verlauf der Schwerstrahlwinkel für dieses Ausführungsbeispiel dargestellt. Während sich der Verlauf des Winkels α nicht verändert, führt die Drehung der Maske bzw. der Beleuchtungs- und Projektionsoptik zu einem Vorzeichenwechsel des Winkels β . An einem Punkt des Überlappbereichs **641** unterscheiden sich somit die Winkel α und β in den beiden Arbeitszuständen im Wesentlichen um einen Vorzeichenwechsel. Dies hat den Vorteil, dass gemittelt über beide Arbeitszustände die Maske im Überlappbereich senkrecht beleuchtet wird, so es zum Beispiel nicht zu einer Verschiebung der Strukturen kommt, wie sie im Zusammenhang mit [Fig. 2](#) erläutert wurde.

[0058] Als Beispiel kann man den Punkt **643** betrachten, der im Überlappbereich liegt. Dieser Punkt hat die x-Koordinate $x_p = 50$ mm und die y-Koordinate $y_p = 125.4$ mm und liegt damit auf dem Kreisbogen mit Radius 135 mm und liegt im Überlappbereich. Im ersten Arbeitszustand wird der linke Teilbereich **604a** beleuchtet und abgebildet. Die Eintrittspupille liegt in diesem Fall bei den Koordinaten $x_{EP} = 0$, $y_{EP} = 0$, $z_{EP} = 1284.4$ mm. Damit die Schwerpunktsrichtung der Strahlung nach der Reflektion in Richtung der Eintrittspupille verläuft, muss für den ersten Schwerpunktsrichtungsvektor \vec{s}_1 gelten:

$$\vec{s}_1 = \frac{1}{\sqrt{(x_{EP} - x_p)^2 + (y_{EP} - y_p)^2 + (z_{EP} - z_p)^2}} \begin{pmatrix} x_{EP} - x_p \\ y_{EP} - y_p \\ -(z_{EP} - z_p) \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} -0.0387 \\ -0.0971 \\ -0.9945 \end{pmatrix}$$

[0059] Im zweiten Arbeitszustand wird der rechte Teilbereich **604b** beleuchtet und abgebildet. In diesem Fall liegt die Eintrittspupille bei $x_{EP} = 90$, $y_{EP} = 254.56$, $z_{EP} = 1284.4$ mm. Diese Lage ergibt sich daraus, dass der Teilbereich **604a** so liegt, dass sich bei $x = 45$ mm also in der Mitte des Überlappbereiches der Kreisbogen mit der Radius 135 mm des Teilbereichs **604a** mit dem entsprechenden Kreisbogen des Teilbereichs **604b** schneidet.

[0060] Der Schwerpunktsrichtungsvektor \vec{s}_2 hat somit den Wert

$$\vec{s}_2 = \frac{1}{\sqrt{(x_{EP} - x_P)^2 + (y_{EP} - y_P)^2 + (z_{EP} - z_P)^2}} \begin{pmatrix} x_{EP} - x_P \\ y_{EP} - y_P \\ -(z_{EP} - z_P) \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.0310 \\ 0.1000 \\ 0.9945 \end{pmatrix}$$

[0061] Der normierte Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, hat in diesem Koordinatensystem die Darstellung

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

so dass das Spatprodukt den Wert S hat:

$$S = \vec{n} \cdot (\vec{s}_1 \times \vec{s}_2) \approx 0.00086$$

[0062] [Fig. 7a](#) zeigt zwei aneinander Teilbereiche in einer alternativen erfindungsgemäßen Weiterbildung der Projektionsbelichtungsanlage. Dabei wird in einem ersten Arbeitszustand der Projektionsbelichtungsanlage eine erste Belichtung des linken Teilbereichs **704a** durchgeführt und danach eine zweite Belichtung des rechten Teilbereichs **704b** in einem zweiten Arbeitszustand der Projektionsbelichtungsanlage.

[0063] Die Objektfelder der Projektionsoptik sind in diesem Fall rechteckig, so dass auch die Teilbereiche **704a** und **704b** rechteckig sind. Darüber hinaus ist die Projektionsbelichtungsanlage so weitergebildet, dass die Winkel α und β im Wesentlichen keinen Verlauf aufweisen. Dies lässt sich erreichen, indem man eine Projektionsoptik einsetzt, deren Eintrittspupille einen großen Abstand zur Objektebene aufweist, man spricht von einer objektseitig telezentrischen Projektionsoptik. Ein solcher Abstand kann zum Beispiel größer als 3 m, insbesondere größer als 50 m, insbesondere größer als 1000 m sein. Im vorliegenden Fall beträgt der Abstand 5 m. Eine detaillierte Darstellung zu einer Projektionsoptik mit einer Eintrittspupille, die einen Abstand von 1000 m zur Objektebene besitzt, findet sich in der Beschreibung zu [Fig. 8](#).

[0064] In [Fig. 7b](#) ist der Verlauf der Winkel α und β für ein solches System dargestellt. Der Winkel β beträgt im Wesentlichen 6° konstant über das Feld, wohingegen der Winkel α nahezu 0° beträgt. Da die Variation der Winkel über das Feld nur sehr klein ist, unterscheidet sich die Schwerpunktsrichtungsvektoren der Strahlung an einem Punkt im Überlappbereich **741** zwischen erstem und zweitem Arbeitszustand nur minimal, so dass nur minimale Variationen von Projektions- und Schatteneffekten auftreten. Es treten also keine Schwierigkeiten beim Aneinanderlegen von Objektfeldern auf, da sich Schwerpunktsrichtung der Strahlung im Überlappbereich im ersten Arbeitszustand sich von der Schwerpunktsrichtung der Strahlung im Überlappbereich im zweiten Arbeitszustand nicht wesentlich unterscheidet.

[0065] Auch hier kann man beispielhaft den Wert des Spatproduktes am Ort **743** berechnen. Dieser Punkt hat die x-Koordinate $x_p = 50$ mm und die y-Koordinate $y_p = 0$ und liegt damit im Überlappbereich. Im ersten Arbeitszustand wird der linke Teilbereich **704a** beleuchtet. Die Eintrittspupille liegt bei $x_{EP} = 0$, $y_{EP} = -525,52$ mm, $z_{EP} = 5000$ mm. Der Abstand y_p wurde bei der Auslegung der Projektionsoptik so gewählt, dass der mittlere Einfallswinkel am Objektfeld 6° beträgt.

[0066] Damit die Schwerpunktsrichtung der Strahlung nach der Reflektion in Richtung der Eintrittspupille verläuft, muss für den ersten Schwerpunktsrichtungsvektor \vec{s}_1 gelten:

$$\vec{s}_1 = \frac{1}{\sqrt{(x_{EP} - x_P)^2 + (y_{EP} - y_P)^2 + (z_{EP} - z_P)^2}} \begin{pmatrix} x_{EP} - x_P \\ y_{EP} - y_P \\ -(z_{EP} - z_P) \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} -0.0099 \\ -0.1045 \\ -0.9944 \end{pmatrix}$$

[0067] Im zweiten Arbeitszustand wird der rechte Teilbereich **704b** beleuchtet. In diesem Fall liegt die Eintrittspupille bei $x_{EP} = 90$, $y_{EP} = 525.52$ mm, $z_{EP} = 5000$ mm. Diese Lage ergibt sich daraus, dass das Objektfeld **803b** gegen das Objektfeld um 90 mm in x-Richtung versetzt wurde. Der Schwerpunktsrichtungsvektor \vec{s}_2 hat somit den Wert

$$\vec{s}_2 = \frac{1}{\sqrt{(x_{EP} - x_P)^2 + (y_{EP} - y_P)^2 + (z_{EP} - z_P)^2}} \begin{pmatrix} x_{EP} - x_P \\ y_{EP} - y_P \\ -(z_{EP} - z_P) \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.0080 \\ -0.1045 \\ 0.9944 \end{pmatrix}$$

[0068] Der normierte Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, hat in diesem Koordinatensystem die Darstellung

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

so dass das Spatprodukt den Wert S hat:

$$S = \vec{n} \cdot (\vec{s}_1 \times \vec{s}_2) \approx 0.00187$$

[0069] [Fig. 8](#) zeigt das optische Design einer möglichen Projektionsoptik **1**. Dargestellt ist der Strahlengang jeweils zweier Einzelstrahlen **845**, die von fünf in der [Fig. 8](#) übereinanderliegenden und zueinander in der y-Richtung beabstandeten Objektfeldpunkten ausgehen, wobei die zwei Einzelstrahlen **45**, die zu einem dieser fünf Objektfeldpunkte gehören, jeweils zwei unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen für die fünf Objektfeldpunkte zugeordnet sind. Diese zwei Beleuchtungsrichtungen werden durch den oberen Komastrahl und den unteren Komastrahl eines jeden der fünf Objektfeldpunkte wiedergegeben.

[0070] Ausgehend von der Objektebene **805** werden die Einzelstrahlen **845** zunächst von einem ersten Spiegel M1 und anschließend von weiteren Spiegeln reflektiert, die nachfolgend in der Reihenfolge des Strahlengangs als Spiegel M2, M3, M4, M5 und M6 bezeichnet werden. Die Projektionsoptik **801** nach [Fig. 8](#) hat also sechs reflektierende Spiegel. Diese Spiegel tragen eine für die Wellenlänge der Strahlung **833** hoch reflektierende Beschichtung, falls dies aufgrund der Wellenlänge, zum Beispiel im EUV, erforderlich ist. In der Projektionsoptik **801** lassen sich auch Strahlungen mit voneinander stark unterschiedlicher Wellenlänge führen, da diese Optiken im Wesentlichen achromatische Eigenschaften haben. Es ist also möglich, in diesen Optiken zum Beispiel einen Justagelaser zu führen oder ein Autofokussiersystem zu betreiben, wobei gleichzeitig mit einer von deren Arbeitswellenlänge stark verschiedenen Wellenlänge für das Beleuchtungslicht gearbeitet wird. So kann ein Justagelaser bei 632,8 nm, bei 248 nm oder bei 193 nm arbeiten, während gleichzeitig mit einer Strahlung im Bereich zwischen 5 und 15 nm gearbeitet wird.

[0071] Der Spiegel M3 hat eine konvexe Grundform, kann also durch eine konvexe bestangepasste Fläche beschrieben werden. In der nachfolgenden Beschreibung werden derartige Spiegel vereinfacht als konvex und Spiegel, die durch eine konkav bestangepasste Fläche beschrieben werden können, vereinfacht als konkav bezeichnet. Der konvexe Spiegel M3 sorgt für eine gute Petzval-Korrektur bei der Projektionsoptik **801**.

[0072] Eine Eintritts-Pupillenebene der Projektionsoptik **801** nach [Fig. 8](#) liegt im Strahlengang des der Strahlung **833** 1000 mm vor der Objektebene **805**. Die Projektionsoptik **801** nach [Fig. 8](#) hat eine Baulänge, also einen Abstand zwischen der Objektebene **805** und der Bildebene **807**, von 2000 mm.

[0073] Diejenigen Einzelstrahlen **845**, die von beabstandeten Objektfeldpunkten ausgehen und der gleichen Beleuchtungsrichtung zugeordnet sind, laufen zwischen dem Objektfeld **803** und dem ersten Spiegel M1 also nahezu parallel in die Projektionsoptik **801** hinein. Die Hauptstrahlen der Einzelstrahlen **845** schließen im Strahlengang des Strahlung **833** zwischen der Objektebene **805** und dem Spiegel M1 also einen Winkel von nahezu 0° zueinander ein.

[0074] Die zu einer bestimmten Beleuchtungsrichtung der fünf Objektfeldpunkte gehörenden Einzelstrahlen **845** vereinigen sich in einer Pupillenebene **847** der Projektionsoptik **801**, zu der der Spiegel M3 benachbart angeordnet ist. Dieser Spiegel M3 wird daher auch als Pupillenspiegel bezeichnet. In der Pupillenebene **847** kann eine Aperturblende zur Begrenzung des Beleuchtungslicht-Strahlbündels angeordnet sein. Diese Aperturblende kann durch eine mechanische und auswechselbare Blende oder aber in Form einer entsprechenden Beschichtung direkt auf dem Spiegel M3 vorgesehen sein.

[0075] Die Spiegel M1 bis M4 bilden die Objektebene **805** ab in eine Zwischenbildebene **849**. Die zwischenbildseitige numerische Apertur der Projektionsoptik **801** beträgt etwa 0,2. Die Spiegel M1 bis M4 bilden eine erste Teil-Abbildungsoptik der Projektionsoptik **801** mit einem verkleinernden Abbildungsmaßstab von etwa

3,2x. Die nachfolgenden Spiegel M5 und M6 bilden eine weitere Teil-Abbildungsoptik der Projektionsoptik **801** mit einem verkleinernden Abbildungsmaßstab von etwa 2,5x. Im Strahlengang der Strahlung **833** zwischen den Spiegeln M4 und M5 vor der Zwischenbildebene **849** und dieser benachbart ist eine Durchgangsöffnung **851** im Spiegel M6 ausgebildet, durch die die Beleuchtungs- bzw. Abbildungsstrahlung **833** bei der Reflexion vom vierten Spiegel M4 hin zum fünften Spiegel M5 hindurchtritt. Der fünfte Spiegel M5 wiederum hat eine zentrale Durchgangsöffnung **853**, durch die das Strahlungsbündel **855** zwischen dem sechsten Spiegel M6 und der Bildebene **807** hindurchtritt.

[0076] Der fünfte Spiegel M5, der zusammen mit dem sechsten Spiegel M6 die Beleuchtungs- bzw. Abbildungsstrahlung **833** von der Zwischenbildebene **849** in die Bildebene **807** abbildet, ist in der Nähe einer zur ersten Pupillenebene **847** konjugierten weiteren Pupillenebene **857** der Projektionsoptik **801** angeordnet. Die weitere Pupillenebene **857** im Strahlengang des Abbildungslichts liegt räumlich benachbart zum fünften Spiegel M5 und im Strahlengang zwischen dem fünften Spiegel M5 und dem sechsten Spiegel M6, sodass am Ort der weiteren Pupillenebene **857** eine physikalisch zugängliche Blendenebene existiert. In dieser Blendenebene kann alternativ oder zusätzlich ebenfalls eine Aperturblende angeordnet sein, wie vorstehend im Zusammenhang mit der Aperturblende im Bereich der Pupillenebene **847** beschrieben. Die Projektionsoptik **801** hat in einer der Pupillenebenen **847**, **857** eine zentriert angeordnete Obskurationsblende. Hierdurch werden die den zentralen Durchgangsöffnungen **851**, **853** in den Spiegeln M6, M5 zugeordneten Teilstrahlen des Projektionsstrahlengangs obskuriert. Daher wird das Design der Projektionsoptik **801** auch als Design mit zentraler Pupillenobskuration bezeichnet.

[0077] Ein ausgezeichneter Einzelstrahl **845**, der einen zentralen Objektfeldpunkt mit einem zentral ausgeleuchteten Punkt in der Eintrittspupille der Projektionsoptik **801** verbindet, wird auch als Hauptstrahl eines zentralen Feldpunktes bezeichnet. Der Hauptstrahl des zentralen Feldpunktes schließt ab der Reflexion am sechsten Spiegel M6 mit der Bildebene **807** näherungsweise einen rechten Winkel ein, verläuft also in etwa parallel zur z-Achse der Projektionsoptik **803**. Dieser Winkel ist größer als 85° .

[0078] Das Bildfeld **859** ist rechteckig. Parallel zur x-Richtung hat das Bildfeld **859** eine Ausdehnung von 13 mm. Parallel zur y-Richtung hat das Bildfeld **859** eine Ausdehnung von 1 mm. Projektionsoptiken, wie sie aus dem Stand der Technik bekannt sind, haben üblicherweise Bildfelder, die eine Ausdehnung parallel zu x-Richtung haben, die 26 mm oder mehr beträgt. Daher sind die typischen Anwendungen von Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen auf eine solche Ausdehnung angepasst. Das erfindungsgemäße Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage ermöglicht es auch Projektionsoptiken, die eine kleiner Ausdehnung parallel zur x-Richtung besitzen für die gleichen typischen Anwendungen einzusetzen. Das Bildfeld **859** liegt zentrisch hinter dem fünften Spiegel M5. Der Radius R der Durchgangsöffnung **19** muss für eine vignettierungsfreie Abbildung folgende Relation erfüllen:

$$R \geq \frac{1}{2} \cdot D + d_w \cdot NA.$$

[0079] D ist dabei die Diagonale des Bildfelds **859**. d_w ist der freie Arbeitsabstand des Spiegels M5 von der Bildebene. Dieser freie Arbeitsabstand ist definiert als der Abstand zwischen der Bildebene **9** und dem nächstliegenden Abschnitt einer genutzten Reflexionsfläche des nächstliegenden Spiegels der Projektionsoptik **801**, also bei der Ausführung nach [Fig. 8](#) des Spiegels M5. NA ist die bildseitige numerische Apertur.

[0080] Alle sechs Spiegel M1 bis M6 der Projektionsoptik **801** sind als nicht durch eine rotationssymmetrische Funktion beschreibbare Freiformflächen ausgeführt. Es sind auch andere Ausführungen der Projektionsoptik **801** möglich, bei denen mindestens einer der Spiegel M1 bis M6 eine derartige Freiform-Reflexionsfläche aufweist.

[0081] Eine derartige Freiformfläche kann aus einer rotationssymmetrischen Referenzfläche erzeugt werden. Derartige Freiformflächen für Reflexionsflächen der Spiegel von Projektionsoptiken von Projektionsbelichtungsanlagen für die Mikrolithographie sind bekannt aus der US 2007-0058269 A1.

[0082] Die Freiformfläche kann mathematisch durch folgende Gleichung beschrieben werden:

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

wobei gilt:

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

[0083] Z ist die Pfeilhöhe der Freiformfläche am Punkt x, y ($x^2 + y^2 = r$).

[0084] c ist eine Konstante, die der Scheitelpunktkrümmung einer entsprechenden Asphäre entspricht. k entspricht einer konischen Konstante einer entsprechenden Asphäre. C_j sind die Koeffizienten der Monome $X^m Y^n$. Typischerweise werden die Werte von c, k und C_j auf der Basis der gewünschten optischen Eigenschaften des Spiegels innerhalb der Projektionsoptik **7** bestimmt. Die Ordnung des Monoms, $m + n$, kann beliebig variiert werden. Ein Monom höherer Ordnung kann zu einem Design der Projektionsoptik mit besserer Bildfehlerkorrektur führen, ist jedoch aufwendiger zu berechnen. $m + n$ kann Werte zwischen 3 und mehr als 20 einnehmen.

[0085] Freiformflächen können mathematisch auch durch Zernike-Polynome beschrieben werden, die beispielsweise im Manual des optischen Designprogramms CODE V[®] erläutert werden. Alternativ können Freiformflächen mit Hilfe zweidimensionaler Spline-Oberflächen beschrieben werden. Beispiele hierfür sind Bezier-Kurven oder nicht-uniforme rationale Basis-Splines (non-uniform rational basis splines, NURBS). Zweidimensionale Spline-Oberflächen können beispielsweise durch ein Netz von Punkten in einer xy-Ebene und zugehörige z-Werte oder durch diese Punkte und ihnen zugehörige Steigungen beschrieben werden. Abhängig vom jeweiligen Typ der Spline-Oberfläche wird die vollständige Oberfläche durch Interpolation zwischen den Netzpunkten unter Verwendung z. B. von Polynomen oder Funktionen, die bestimmte Eigenschaften hinsichtlich ihrer Kontinuität und Differenzierbarkeit haben, gewonnen. Beispiele hierfür sind analytische Funktionen.

[0086] Die Spiegel M1 bis M6 tragen Mehrfach-Reflexionsschichten zur Optimierung ihrer Reflexion für die auftreffende EUV-Beleuchtungsstrahlung **833**. Die Reflexion ist umso besser, je näher der Auftreffwinkel der Einzelstrahlen **845** auf der Spiegeloberfläche an der senkrechten Inzidenz liegt. Die Projektionsoptik **803** hat insgesamt für alle Einzelstrahlen **845** kleine Reflexionswinkel.

[0087] Die optischen Designdaten der Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6 der Projektionsoptik **803** können den nachfolgenden Tabellen entnommen werden. Die erste dieser Tabellen gibt zu den optischen Oberflächen der optischen Komponenten und zur Aperturblende jeweils den Kehrwert der Scheitelpunktkrümmung (Radius) und einen Abstandswert (Thickness) an, der dem z-Abstand benachbarter Elemente im Strahlengang, ausgehend von der Objektebene, entspricht. Die zweite Tabelle gibt die Koeffizienten der Monome $X^m Y^n$ in der oben angegebenen Freiformflächen-Gleichung für die Spiegel M1 bis M6 an. Nradius stellt dabei einen Normierungsfaktor dar. Nach der zweiten Tabelle ist noch der Betrag in mm angegeben, längs dem der jeweilige Spiegel, ausgehend von einem Spiegel-Referenzdesign dezentriert (Y-Decenter) und verdreht (X-Rotation) wurde. Dies entspricht der Parallelverschiebung und der Verkipfung beim oben beschriebenen Freiformflächen-Designverfahren. Verschieben wird dabei in y-Richtung und verkippt um die x-Achse. Der Verdrehwinkel ist dabei in Grad angegeben.

Oberfläche	Radius	Abstandswert	Betriebsmodus
Objektebene	Unendlich	263,973	
M 1	294,632	-163,973	REFL
M 2	677,341	1121,158	REFL
M 3	318,925	-848,002	REFL
M 4	396,851	1586,844	REFL
M 5	1610,696	-697,387	REFL
M 6	951,407	737,387	REFL
Bildebene	Unendlich	0,000	

Koeffizient	M1	M2	M3	M4	M5	M6
K	-1,107380E+00	-6,922178E-01	4,604190E-01	-9,070490E-01	1,921763E+01	3,351539E-01
Y	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00
X2	-1,128522E-03	-1,453589E-04	-6,996584E-04	-7,777355E-04	-1,436342E-04	3,354789E-05
Y2	-1,159973E-03	-1,432548E-04	-6,658993E-04	-7,779247E-04	-1,460604E-04	3,345270E-05
X2Y	-8,685192E-08	9,438147E-09	2,709788E-07	4,768829E-10	1,219803E-09	7,494169E-10
Y3	-5,480818E-08	1,821581E-08	3,081899E-07	4,735357E-10	2,179734E-09	7,185939E-10
X4	0,000000E+00	0,000000E+00	-3,510369E-09	-6,986158E-11	4,809903E-10	9,888892E-13
X2Y2	0,000000E+00	0,000000E+00	-7,066022E-09	-1,393082E-10	9,641836E-10	1,778472E-12
Y4	0,000000E+00	0,000000E+00	-3,551286E-09	-6,941280E-11	4,830886E-10	7,836027E-13
Nradius	1,000000E+00	1,000000E+00	1,000000E+00	1,000000E+00	1,000000E+00	1,000000E+00

Koeffizient	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Bildebene
Y-decenter	131,752	232,510	15,389	-92,550	-104,036	-104,318	0,000
X-rotation	-12,787	-21,267	-1,854	3,418	-0,205	0,032	0,000

[0088] Ein Objekt-Bildversatz, also ein Abstand zwischen einer Projektion des Mittelpunkts des Objektfeldes **803** auf die Bildebene **807** zum Mittelpunkt des Bildfeldes **859** beträgt bei der Projektionsoptik **3** 208 mm.

Patentansprüche

1. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen mit mindestens zwei Arbeitszuständen umfassend eine reflektive Maske in einer Objektebene (**5**, **805**), wobei im ersten Arbeitszustand ein erster Teilbereich (**604a**, **704a**) der Maske durch eine erste Strahlung, die an jedem Punkt des ersten Teilbereiches (**604a**, **704a**) eine zugeordnete erste Schwerpunktrichtung mit einem ersten Schwerpunktrichtungsvektor besitzt, beleuchtet wird und im zweiten Arbeitszustand ein zweiter Teilbereich (**604b**, **704b**) der Maske durch eine zweite Strahlung, die an jedem Punkt des zweiten Teilbereiches eine zugeordnete zweite Schwerpunktrichtung mit einem zweiten Schwerpunktrichtungsvektor besitzt, beleuchtet wird, und wobei der erste und der zweite Teilbereich (**604a**, **704a**, **604b**, **704b**) einen gemeinsamen Überlappbereich (**641**, **741**) besitzen, **dadurch gekennzeichnet**, dass an jedem Punkt zumindest eines Teilbereiches des Überlappbereiches (**641**, **741**) das Spatprodukt aus dem normierten ersten Schwerpunktrichtungsvektor, dem normierten zweiten Schwerpunktrichtungsvektor und einem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner ist als 0.05.

2. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass an jedem Punkt zumindest eines Teilbereiches des Überlappbereiches (**641**, **741**) das Spatprodukt aus dem normierten ersten Schwerpunktrichtungsvektor, dem normierten zweiten Schwerpunktrichtungsvektor und einem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner ist als 0.03.

3. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass an jedem Punkt zumindest eines Teilbereiches des Überlappbereiches (**641**, **741**) das Spatprodukt aus dem normierten ersten Schwerpunktrichtungsvektor, dem normierten zweiten Schwerpunktrichtungsvektor und einem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner ist als 0.01.

4. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 1–3 dadurch gekennzeichnet, dass der Überlappbereich (**641**, **741**) kleiner ist als der erste Teilbereich (**604a**, **704a**) und kleiner ist als der zweite Teilbereich (**604b**, **704b**).

5. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 1–4 dadurch gekennzeichnet, dass sich die Orientierung der reflektiven Maske im ersten Arbeitszustand von der Orientierung der Maske im zweiten Arbeitszustand durch eine Drehung um 180° um eine Achse senkrecht zur Objektebene (**5**) unterscheidet.

6. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen mit mindestens zwei Arbeitszuständen umfassend eine reflektive Maske in einer Objektebene (**5**) dadurch gekennzeichnet, dass sich die Orientierung der reflektiven Maske im ersten Arbeitszustand von der Orientierung der Maske im zweiten Arbeitszustand durch eine Drehung um 180° um eine Achse senkrecht zur Objektebene (**5**) unterscheidet.

7. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 1–6 umfassend eine Projektionsoptik zur Abbildung eines Objektfeldes auf ein Bildfeld dadurch gekennzeichnet, dass das Bildfeld eine maximalen Ausdehnung von 13 mm besitzt.

8. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 1–7 dadurch gekennzeichnet, dass die Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit Strahlung der Wellenlänge zwischen 5 nm und 15 nm betrieben werden kann.

9. Verfahren zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen mittels Lithographie, bei dem eine reflektive strukturtragende Maske in einer Objektebene auf ein Substrat in einer Bildebene abgebildet wird, wobei ein erster Teilbereich (**604a**, **704a**) im Rahmen einer ersten Belichtung durch eine erste Strahlung belichtet wird, die an jedem Punkt des ersten Teilbereiches eine erste Schwerpunktsrichtung mit einem ersten Schwerpunktsrichtungsvektor besitzt, und im Rahmen einer zweiten Belichtung ein zweiter Teilbereich (**604b**, **704b**) der Maske durch eine zweite Strahlung belichtet wird, die an jedem Punkt des zweiten Teilbereiches eine zweite Schwerpunktsrichtung mit einem zweiten Schwerpunktsvektor besitzt, wobei der erste und der zweite Teilbereich einen gemeinsamen Überlappbereich (**641**, **741**) besitzen, dadurch gekennzeichnet, dass an jedem Punkt des Überlappbereiches (**641**, **741**) das Spatprodukt aus dem normierten ersten Schwerpunktsrichtungsvektor, dem normierten zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor und einem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner ist als 0.05.

10. Verfahren nach Anspruch 9 dadurch gekennzeichnet, dass an jedem Punkt des Überlappbereiches (**641**, **741**) das Spatprodukt aus dem normierten ersten Schwerpunktsrichtungsvektor, dem normierten zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor und einem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner ist als 0.03.

11. Verfahren nach Anspruch 9 dadurch gekennzeichnet, dass an jedem Punkt des Überlappbereiches (**641**, **741**) das Spatprodukt aus dem normierten ersten Schwerpunktsrichtungsvektor, dem normierten zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor und einem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner ist als 0.01.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9–11 dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlung eine Wellenlänge zwischen 5 nm und 15 nm besitzt

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 9–12 dadurch gekennzeichnet, dass erste und zweite Belichtung mittels eines Scanprozesses stattfinden, in dem die Maske während der ersten Belichtung entlang einer ersten Scanrichtung durch ein Beleuchtungsfeld bewegt wird und während der zweiten Belichtung entlang einer zweiten Scanrichtung.

14. Verfahren nach Anspruch 13 dadurch gekennzeichnet, dass erste und zweite Scanrichtung parallel oder antiparallel sind.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 9–14 dadurch gekennzeichnet, dass der maximale Winkel zwischen zwei beliebigen ersten Schwerpunktsrichtungsvektoren (**235**, **335**) oder zwischen zwei beliebigen zwei-

ten Schwerpunktsrichtungsvektoren (**235**, **335**) kleiner ist als 1° .

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 9–14 dadurch gekennzeichnet, dass an jedem Punkt des Überlappbereiches der Winkel zwischen einem ersten und einem zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor kleiner ist als 1° .

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 9–14 dadurch gekennzeichnet, dass an jedem Punkt des Überlappbereiches (**641**, **741**) der Winkel zwischen einer Ebene, die durch den ersten und den zweiten Schwerpunktsrichtungsvektor gebildet wird, und dem normierten Vektor, der senkrecht auf der Maske steht, kleiner ist als 1° .

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 9–14 oder 17 dadurch gekennzeichnet, dass zwischen der ersten und der zweiten Belichtung die strukturtragende Maske in der Objektebene (**5**) um 180° gedreht wird.

Es folgen 12 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

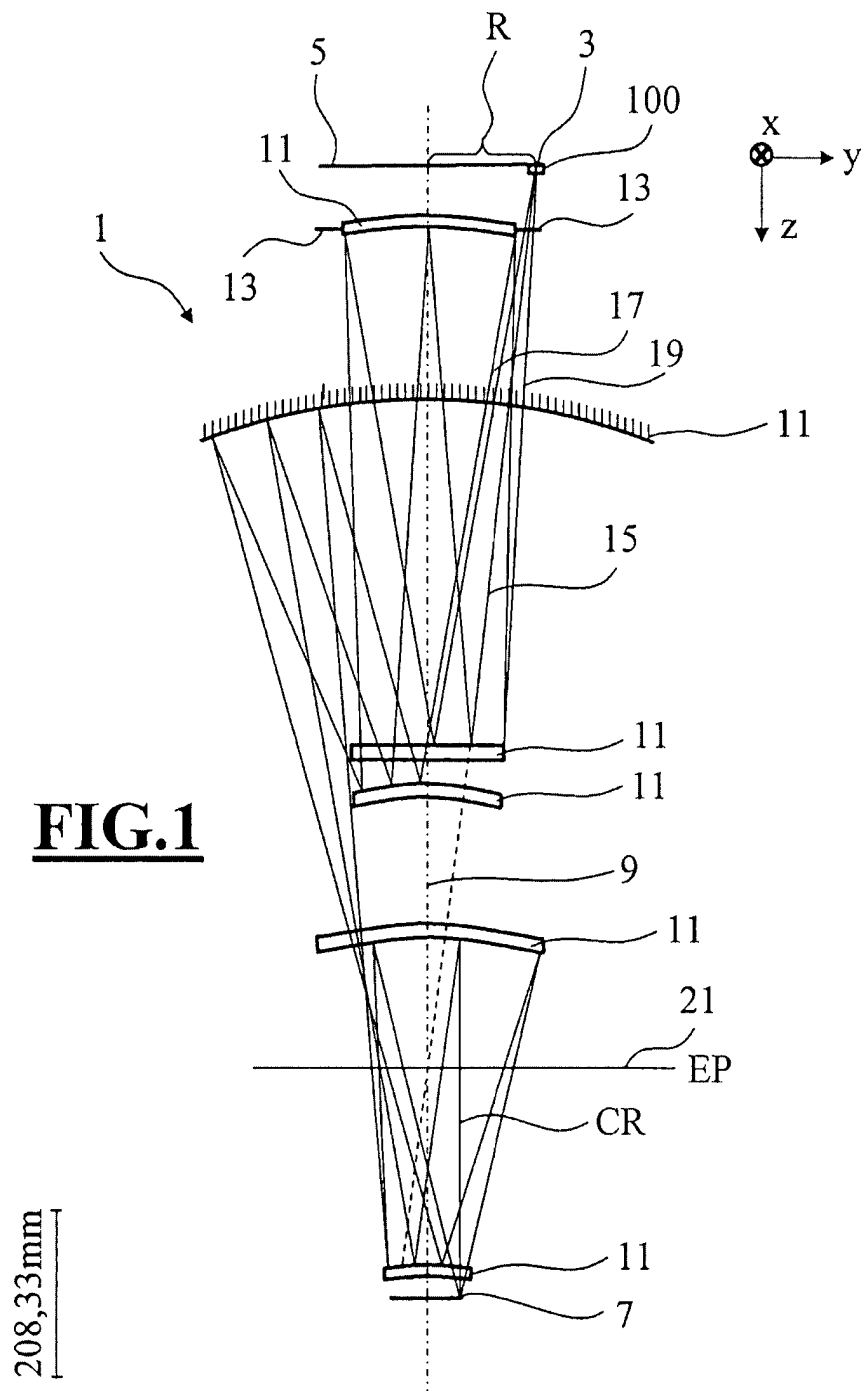


FIG.2

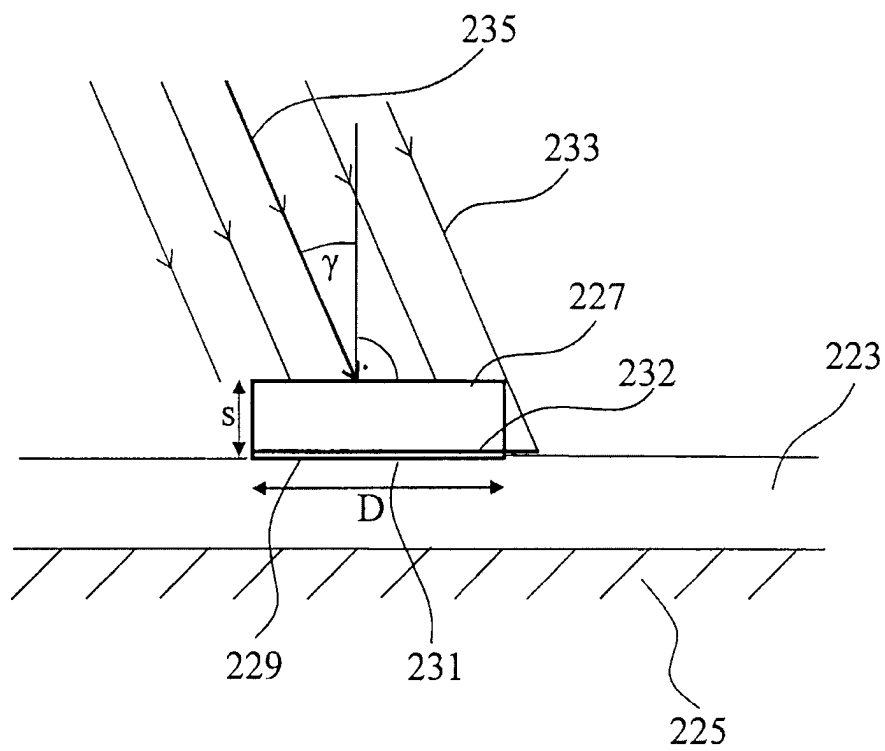


FIG.3

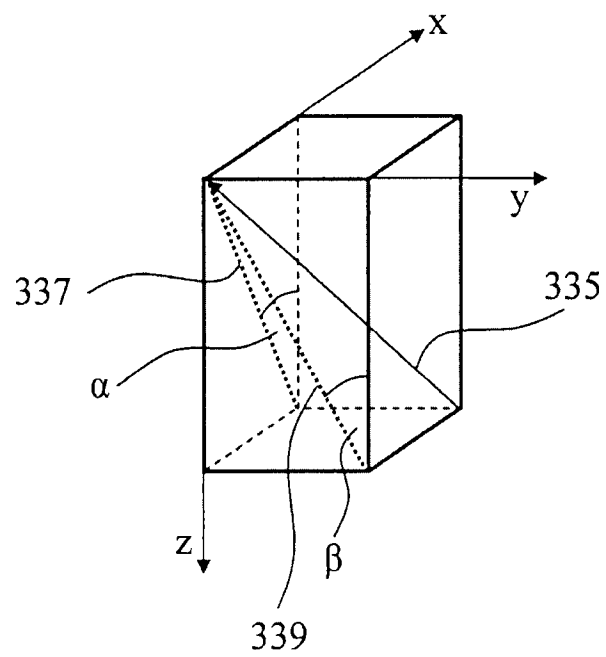


FIG.4a

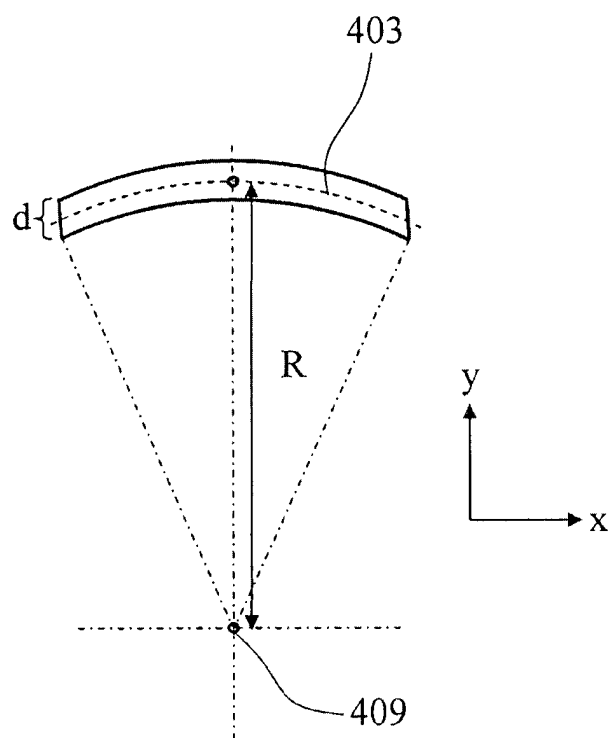


FIG. 4b

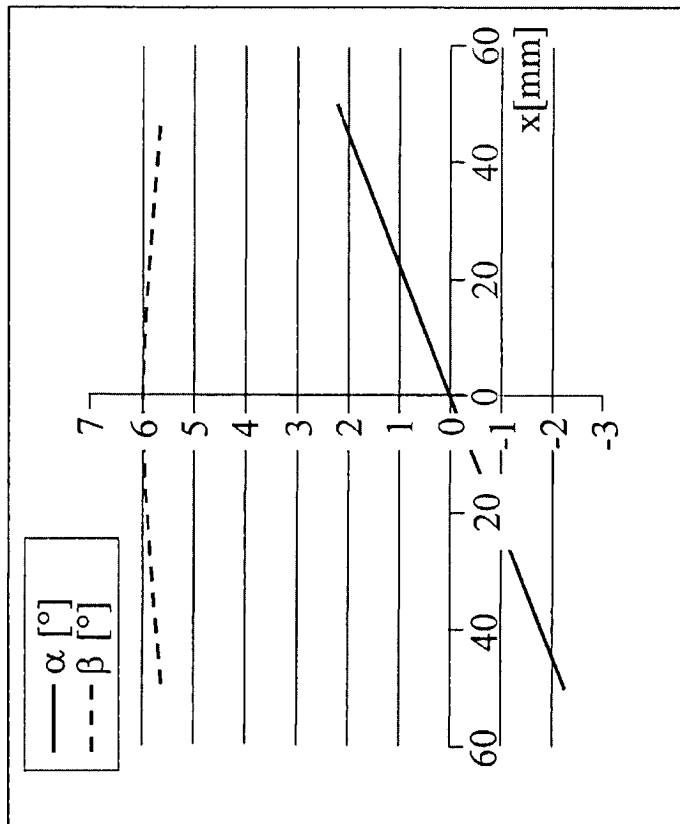


FIG.5a

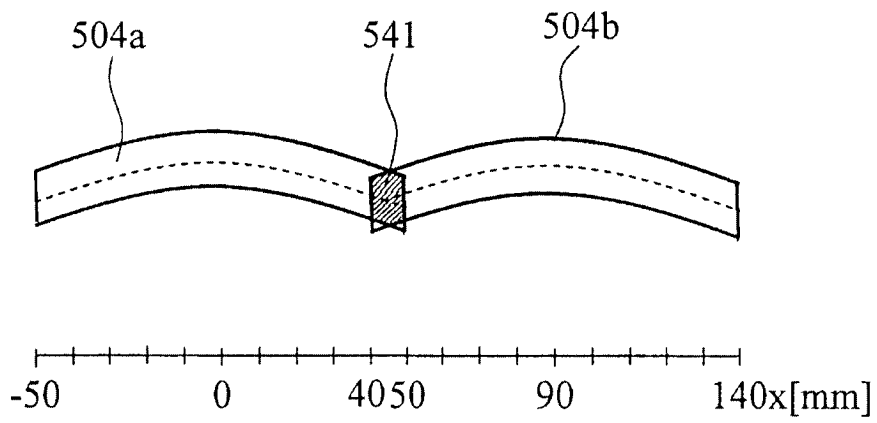


FIG.5b

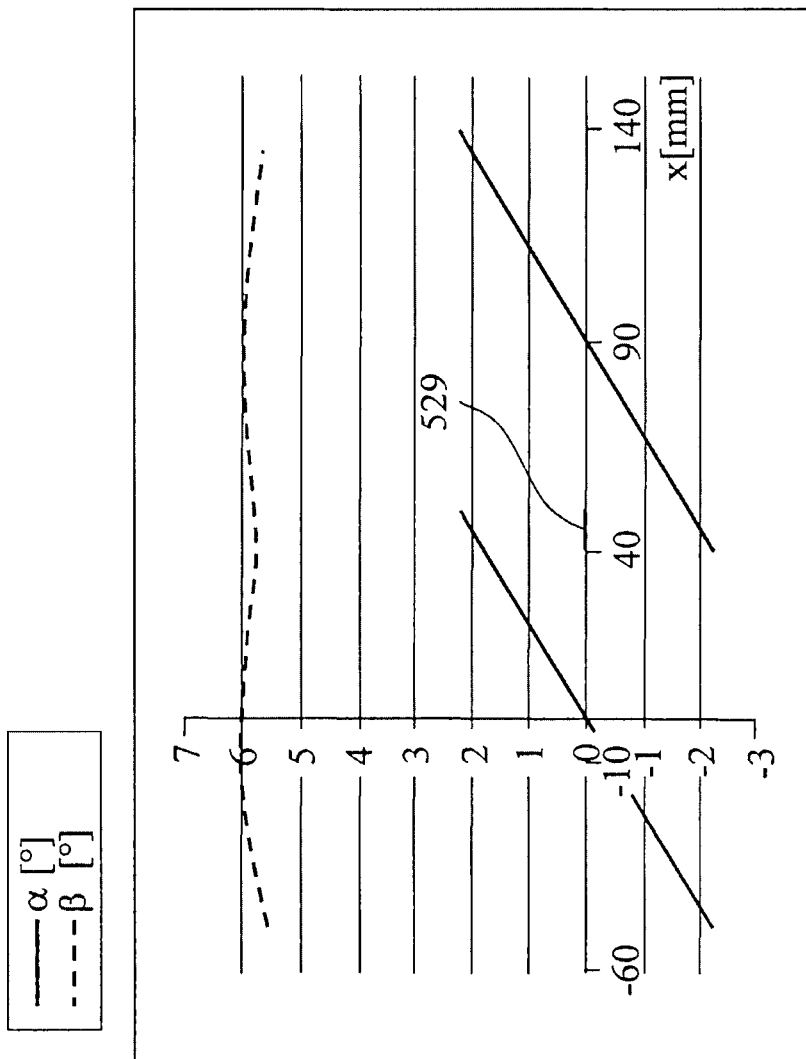


FIG.6a

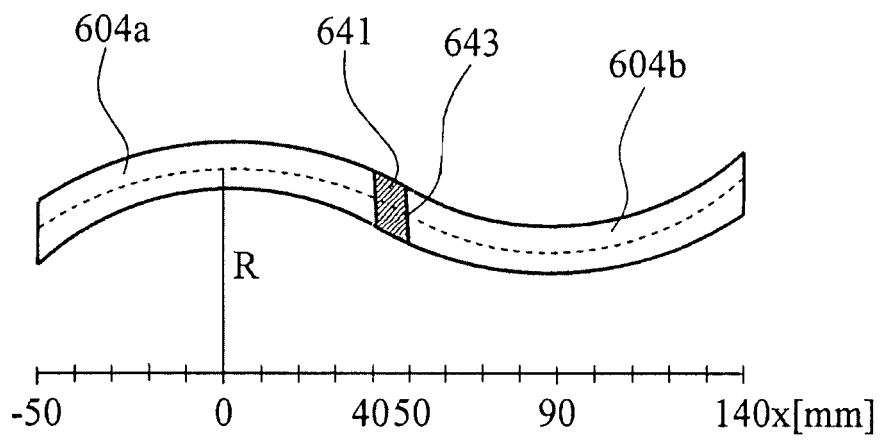


FIG. 6b

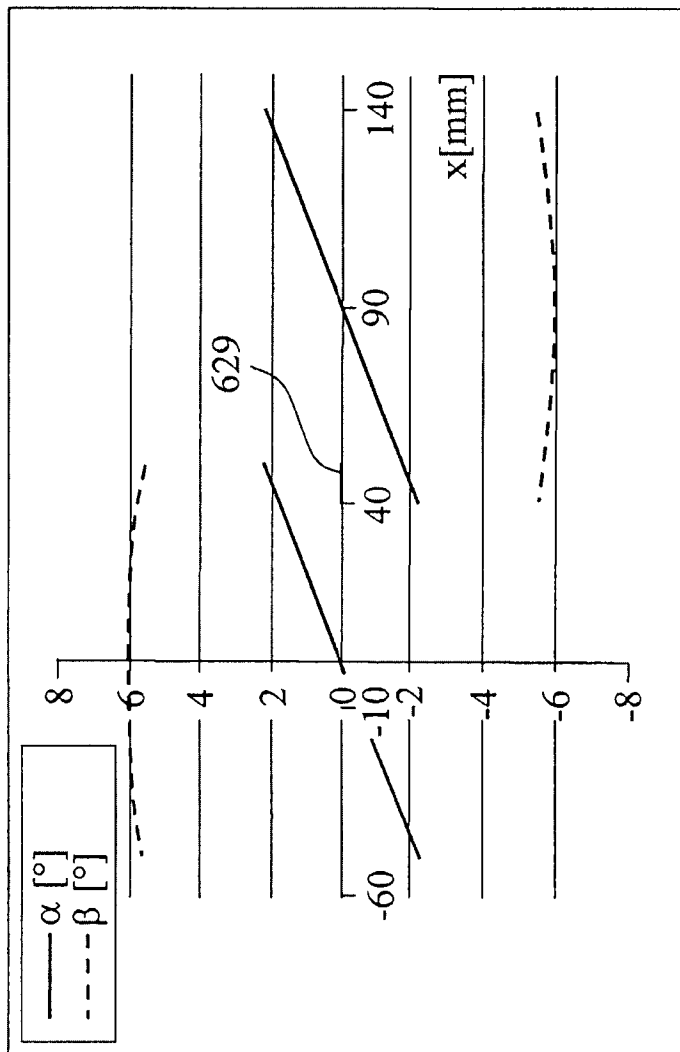
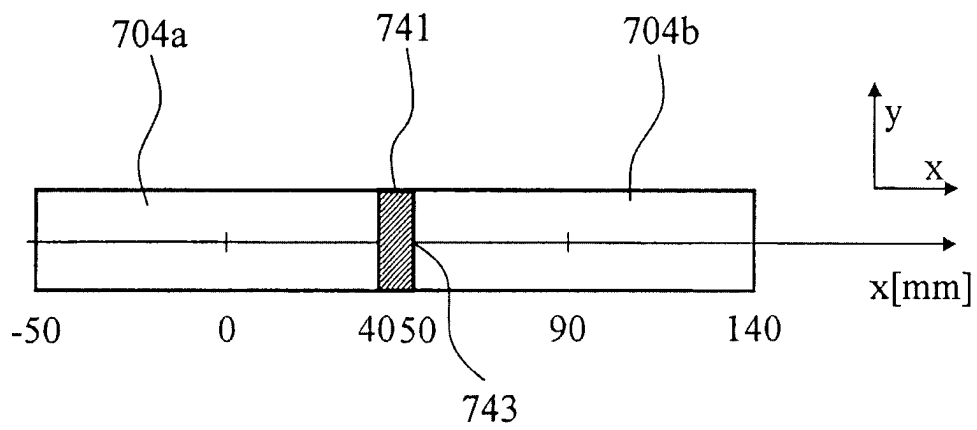


FIG.7a



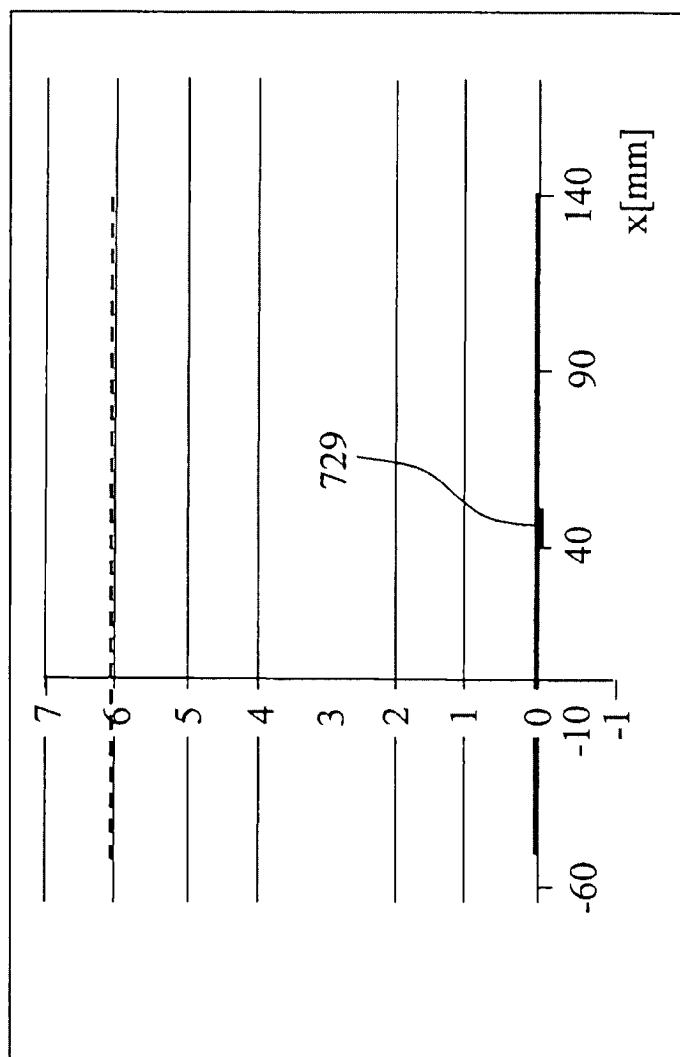
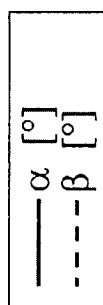


FIG. 7b

FIG.8

