



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 43 333 A1** 2005.04.14

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **103 43 333.3**

(22) Anmeldetag: **12.09.2003**

(43) Offenlegungstag: **14.04.2005**

(51) Int Cl.⁷: **G03F 7/20**

(71) Anmelder:

Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen, DE

(74) Vertreter:

Patentanwälte Ruff, Wilhelm, Beier, Dauster & Partner, 70174 Stuttgart

(72) Erfinder:

Köhler, Jess, Dr., 88090 Immenstaad, DE; Wangler, Johannes, 89551 Königsbrunn, DE; Brotsack, Markus, 73430 Aalen, DE; Singer, Wolfgang, Dr., 73432 Aalen, DE

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

US2003/00 38 225 A1

US 64 69 827 B1

US 64 28 940 B1

EP 07 47 772 A1

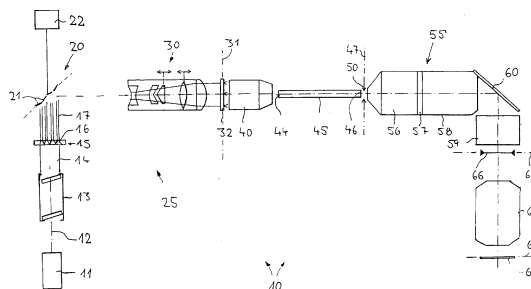
WO 02/27 406 A2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage**

(57) Zusammenfassung: Ein Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage dient dazu, ein Beleuchtungsfeld mit dem Licht einer primären Lichtquelle (11) zu beleuchten. Das Beleuchtungssystem hat eine Lichtverteilungseinrichtung (25), welche Licht der primären Lichtquelle empfängt und aus diesem Licht eine variabel einstellbare, zweidimensionale Intensitätsverteilung in einer Pupillenformungsfläche (31) des Beleuchtungssystems erzeugt. Die Lichtverteilungseinrichtung hat mindestens eine Lichtmodulationseinrichtung (20) mit einem zweidimensionalen Feld von individuell steuerbaren Einzelelementen (21) zur Veränderung der Winkelverteilung des auf die Lichtmodulationseinrichtung auftreffenden Lichts. Die Einrichtung erlaubt eine variable Einstellung unterschiedlichster Beleuchtungsmodi ohne Austausch optischer Komponenten.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Beleuchtung eines Beleuchtungsfeldes mit dem Licht einer primären Lichtquelle.

Stand der Technik

[0002] Die Leistungsfähigkeit von Projektionsbelichtungsanlagen für die mikrolithographische Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen wird wesentlich durch die Abbildungseigenschaften der Projektionsobjektive bestimmt. Darüber hinaus werden die Bildqualität und der mit der Anlage erzielbare Wafer-Durchsatz wesentlich durch Eigenschaften des dem Projektionsobjektiv vorgeschalteten Beleuchtungssystems mitbestimmt. Dieses muss in der Lage sein, das Licht einer primären Lichtquelle, beispielsweise eines Lasers, mit möglichst hohem Wirkungsgrad zu präparieren und dabei in einem Beleuchtungsfeld des Beleuchtungssystems eine möglichst gleichmäßige Intensitätsverteilung zu erzeugen. Zudem soll es möglich sein, am Beleuchtungssystem verschiedene Beleuchtungsmodi einzustellen, um beispielsweise die Beleuchtung entsprechend der Strukturen der einzelnen abzubildenden Vorlagen (Masken, Retikel) zu optimieren. Üblich sind Einstellmöglichkeiten zwischen unterschiedlichen konventionellen Settings mit verschiedenen Kohärenzgraden sowie Ringfeldbeleuchtung und Dipol- oder Quadrupolbeleuchtung. Die nichtkonventionellen Beleuchtungssettings zur Erzeugung einer außeraxialen, schiefen Beleuchtung können unter anderem der Erhöhung der Tiefenschärfe durch Zweistrahlinterferenz sowie der Erhöhung des Auflösungsvermögens dienen.

[0003] Die EP 0 747 772 beschreibt ein Beleuchtungssystem mit einem Zoom-Axicon-Objektiv, in dessen Objektebene ein erstes diffraktives Rasterelement mit zweidimensionaler Rasterstruktur angeordnet ist. Dieses Rasterelement dient dazu, den Lichtleitwert der auftreffenden Laserstrahlung leicht zu erhöhen und die Form der Lichtverteilung so zu verändern, dass sich beispielsweise eine angenäherte Kreisverteilung, Ringverteilung oder Quadrupolverteilung ergibt. Zum Wechsel zwischen diesen Beleuchtungsmodi werden erste Rasterelemente ausgetauscht. Ein zweites Rasterelement, welches sich in der Austrittspupille des Objektivs befindet, wird mit der entsprechenden Lichtverteilung ausgeleuchtet und formt eine rechteckige Lichtverteilung, deren Form der Eintrittsfläche eines nachfolgenden stabförmigen Lichtmischelements entspricht. Durch Verstellung des Zoom-Axicons lassen sich die Annularität der Beleuchtung und die Größe des ausgeleuchteten Bereiches verstellen.

[0004] Die EP 1 109 067 (entsprechend US

2001001247) beschreibt ein Beleuchtungssystem, bei dem eine Wechseleinrichtung zur wahlweisen Einwechslung unterschiedlicher diffraktiver optischer Elemente in den Lichtweg des Beleuchtungssystems vorgesehen ist. Durch Auswechslung der diffraktiven optischen Elemente können verschiedene Beleuchtungsmodi eingestellt werden. Das System kommt ohne Zoom-Axicon-Modul aus.

[0005] Andere bekannte Möglichkeiten zur Erzeugung außeraxialer Beleuchtungen sind beispielsweise in den Patenten US 5,638,211, EP 500 393 B1 (entsprechend US 5,305,054) US 6,252,647 oder US 6,211,944 gezeigt.

[0006] Bei den Beleuchtungssystemen, die zur Einstellung unterschiedlicher Beleuchtungsmodi mit auswechselbaren optischen Elementen (z.B. diffraktiven optischen Elementen oder Raumfiltern) arbeiten, ist die Anzahl unterschiedlicher Beleuchtungssettings durch die Anzahl der unterschiedlichen einwechselbaren Elemente begrenzt. Entsprechende Wechsellvorrichtungen können konstruktiv aufwendig sein.

[0007] Aus der DE 199 44 760 A1 ist eine Belichtungseinrichtung für Druckplatten bekannt, die eine Modulation der Belichtungsintensität beim Integrated-Digital-Screen-Imaging-Verfahren (IDSI) erlaubt. Dabei trifft das Licht einer Lichtquelle auf einen digitalen Lichtmodulator mit einem zweidimensionalen Feld von Zellen, die über eine Computersteuerung aktiviert bzw. deaktiviert werden können, um ein bestimmtes Muster auf ein lichtempfindliches Substrat zu lenken, welches relativ zum Lichtmodulator bewegt wird. Bei einer Ausführungsform besteht der Lichtmodulator aus einer Mikrospiegelanordnung (Digital-Mirror-Device, DMD) mit einer Vielzahl von individuell ansteuerbaren Einzelspiegeln. Beim Drucken werden diejenigen Spiegel, die nicht für die Belichtung des lichtempfindlichen Materials genutzt werden, derart gekippt, dass sie den auf sie fallenden Lichtstrahl vom lichtempfindlichen Material wegleiten. Durch die Steuerung wird somit die Anzahl der für die Belichtung genutzten Einzelspiegel verändert. Ein ähnliches System ist aus der WO 00/36470 bekannt.

Aufgabenstellung

[0008] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage bereitzustellen, das bei einfacher Konstruktion eine große Variabilität bei der Einstellung unterschiedlicher Beleuchtungsmodi ermöglicht.

[0009] Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung ein Beleuchtungssystem mit den Merkmalen von Anspruch 1 bereit. Vorteilhafte Weiterbildungen

sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

[0010] Ein erfindungsgemäßes Beleuchtungssystem hat eine optische Achse und eine Lichtverteilungseinrichtung zum Empfang von Licht einer primären Lichtquelle und zur Erzeugung einer variabel einstellbaren, zweidimensionalen räumlichen Intensitätsverteilung in einer Pupillenformungsfläche des Beleuchtungssystems. Die Lichtverteilungseinrichtung hat mindestens eine Lichtmodulationseinrichtung zur steuerbaren Veränderung der Winkelverteilung der auf die Lichtmodulationseinrichtung auftreffenden Strahlung. Die Lichtmodulationseinrichtung kann ein Feld (Array) von individuell ansteuerbaren Einzelementen umfassen, die jeweils am Ort ihrer Einbauposition eine gezielte Winkelveränderung der Strahlung bewirken können. Die Lichtmodulationseinrichtung wird auch als Ortsvariante Lichtmodulationseinrichtung bezeichnet, da das Ausmaß der Winkelveränderung ortsabhängig einstellbar ist. Vorzugsweise ist das Feld zweidimensional, z.B. mit mehreren Reihen und Spalten von Einzelementen. Dabei erfolgt die Ansteuerung der Einzelemente vorzugsweise derart, dass bei allen eingestellten Beleuchtungsmodi die gesamte, auf die Einzelemente der Lichtmodulationseinrichtung auftreffende Lichtintensität in den nutzbaren Bereich der Pupillenformungsfläche gelenkt wird und somit zur Beleuchtung des Beleuchtungsfeldes beitragen kann. Durch die Lichtmodulationseinrichtung kann somit eine ortsabhängige Umverteilung der Lichtintensität bewirkt werden, ohne dass auftreffendes Licht „verworfen“ wird. Damit ist eine prinzipiell weitgehend verlustfreie, variable Einstellung unterschiedlicher Beleuchtungsmodi möglich.

[0011] Durch die erfindungsgemäße Möglichkeit, kleine Ausschnitte des auf die Lichtmodulationseinrichtung fallenden Lichtes gezielt in vorbestimmbare Bereiche der Pupillenformungsfläche umzulenken, können in der Pupillenformungsfläche fast beliebige Beleuchtungsintensitätsverteilungen eingestellt werden. Dazu gehören beispielsweise bei den konventionellen Beleuchtungssettings runde, um die optische Achse zentrierte Beleuchtungsflecke unterschiedlicher Durchmesser und bei den nichtkonventionellen, außeraxialen Beleuchtungsarten die Ringbeleuchtung (oder annulare Beleuchtung) sowie polare Intensitätsverteilungen, beispielsweise Dipolbeleuchtung oder Quadrupolbeleuchtung. Mit erfindungsgemäßen Beleuchtungssystemen sind jedoch auch hiervon abweichende Intensitätsverteilungen möglich, z.B. Multipolbeleuchtung mit mehr als vier Polen, z.B. Hexapolbeleuchtung. Die Beleuchtungsverteilungen müssen gegebenenfalls keine Symmetrie in Bezug auf die optische Achse aufweisen.

[0012] Die Pupillenformungsfläche des Beleuch-

tungssystems, in welcher die gewünschte Intensitätsverteilung vorliegen soll, kann bei einem in eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage eingebauten Beleuchtungssystem an oder nahe einer Position sitzen, die optisch konjugiert zu einer Pupillenebene eines nachfolgenden Projektionsobjektivs ist. Im Allgemeinen kann die Pupillenformungsfläche einer Pupillenfläche des Beleuchtungssystems entsprechen oder in deren Nähe liegen. Sofern die zwischenliegenden optischen Komponenten winkelerhaltend arbeiten, wird somit die räumliche Lichtverteilung in der Pupille des Projektionsobjektivs durch die räumliche Lichtverteilung (Ortsverteilung) in der Pupillenformungsfläche des Beleuchtungssystems bestimmt. Umfasst das Beleuchtungssystem z.B. einen Wabenkondensor als Lichtmischelement (Lichtintegrator), so kann die Pupillenformungsfläche in der Nähe von dessen Eintrittsseite liegen oder mit dieser zusammenfallen. Bei Systemen, die einen oder mehrere, mit innerer Reflexion arbeitende, stabförmige Lichtintegratoren umfassen, kann die Pupillenformungsfläche eine zur Eintrittsfläche des Lichtintegrators Fourier-transformierte Ebene sein oder in deren Nähe liegen. Es sind auch Systeme möglich, bei denen keines der genannten, klassischen Lichtmischelemente vorhanden ist. Hier kann eine Homogenisierung der Intensitätsverteilung gegebenenfalls durch geeignete Überlagerung von Teilstrahlen mittels Prismen oder dergleichen erfolgen.

[0013] Die Begriffe „Strahlung“ und „Licht“ im Sinne dieser Anmeldung sind weit zu interpretieren und sollen insbesondere elektromagnetische Strahlung aus dem Ultraviolettbereich umfassen, beispielsweise bei Wellenlängen von ca. 365 nm, 248 nm, 193 nm, 157 nm oder 126 nm. Ebenfalls umfasst ist elektromagnetische Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV), beispielsweise weiche Röntgenstrahlung mit Wellenlängen von unterhalb 20 nm.

[0014] Bei einer Weiterbildung ist die Lichtmodulationseinrichtung als Spiegelanordnung mit einem Feld von individuell steuerbaren Einzelspiegeln zur Veränderung der Winkelverteilung der auf die Spiegelanordnung auftreffenden Strahlung ausgebildet. Die Einzelspiegel, die die Einzelemente der Modulationseinrichtung bilden, können rasterartig in einem ein- oder zweidimensionalen Feld angeordnet sein. Gemäß einer anderen Weiterbildung ist die Lichtmodulationseinrichtung als elektrooptisches Element ausgebildet, welches vorzugsweise eine ein- oder zweidimensionale Feldanordnung (Array) von schaltbaren Beugungsgittern oder ein entsprechendes Feld von akustooptischen Elementen umfasst. Jedes dieser Einzelemente, die rasterartig angeordnet sein und entsprechend auch als Rasterelemente bezeichnet werden können, führt am Ort des Rasterelementes einen spezifischen Winkel der abgegebenen Strahlung ein, wobei in der Regel eine Strahlumlenkung der eintreffenden Strahlung, d.h. eine Änderung

der Laufrichtung, eingeführt wird. Durch z.B. elektrische Ansteuerung der Einzelelemente kann die Winkelverteilung der abgegebenen Strahlung variabel eingestellt werden.

[0015] Der Raum zwischen der Lichtmodulationseinrichtung und der Pupillenformungsfläche kann frei von optischen Komponenten, wie Linsen oder anderen abbildenden Elementen sein. In diesem Fall ist es günstig, den Abstand zwischen Lichtmodulationseinrichtung und Pupillenformungsfläche so groß zu wählen, dass die Pupillenformungsfläche im Fernfeldbereich der Lichtmodulationseinrichtung liegt. Unter dieser Bedingung stellt sich in der Pupillenformungsfläche automatisch die gewünschte räumliche Intensitätsverteilung ein.

[0016] Bei einer Weiterbildung ist zwischen der Lichtmodulationseinrichtung und der Pupillenformungsfläche ein optisches System zur Umwandlung der auftreffenden Winkelverteilung in eine räumliche Verteilung (Verteilung im Ortsraum) in der Pupillenformungsfläche vorgesehen. Dieses optische System soll somit eine Fourier-Transformation der Winkelverteilung in die Pupillenformungsfläche vornehmen. Es kann sich dabei um ein einzelnes optische Element, beispielsweise eine Linse fester Brennweite und damit definierter Vergrößerung handeln. Vorzugsweise hat das der Fourier-Transformation dienende optische System eine variable einstellbare Brennweite. Es kann als Zoom-Objektiv ausgestaltet sein. Dadurch kann bei gegebener Beleuchtungsverteilung die Größe des mit dieser Beleuchtungsverteilung ausgeleuchteten Bereichs in der Pupillenformungsfläche, vorzugsweise stufenlos, eingestellt werden. Wird zwischen der Lichtmodulationseinrichtung und der Pupillenformungsfläche ein Axicon-System mit konischen Flächen vorgesehen, so kann durch Verstellung des Axicon-Systems ein gewünschter Grad des Ringfeldcharakters (Annularität) der Beleuchtung, gegebenenfalls stufenlos, eingestellt werden. Bei einer Ausführungsform ist zwischen der Lichtmodulationseinrichtung und der Pupillenformungsfläche ein Zoom-Axicon-Objektiv angeordnet, dessen Aufbau beispielsweise dem Aufbau des in der EP 0 747 772 beschriebenen Zoom-Axicon-Objektivs entsprechen kann. Dabei kann die Lichtmodulationseinrichtung an Stelle des dort gezeigten ersten diffraktiven Rasterelements eingesetzt werden. Der Offenbarungsgehalt der EP 0 747 772 wird durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht.

[0017] Die Lichtmodulationseinrichtung kann reflektiv arbeiten und nach Art eines Umlenkspiegels schräg zur optischen Achse ausgerichtet sein, um beispielsweise im Mittel eine angenäherte 90°-Umlenkung (oder eine Umlenkung um einen kleineren oder größeren Winkel) zu erreichen.

[0018] Für die Funktion der der Pupillenformungsfläche nachfolgenden optischen Komponenten des Beleuchtungssystems ist es in der Regel günstig, wenn die Winkel, unter denen die Strahlen in die Pupillenformungsfläche einfallen, so klein wie möglich sind. Hierzu ist bei bevorzugten Ausführungsformen vorgesehen, den optischen Abstand zwischen Lichtmodulationseinrichtung und der Pupillenformungsfläche so groß zu wählen, dass die Winkel zwischen der optischen Achse und Lichtstrahlen der Winkelverteilung im Bereich der Pupillenformungsfläche weniger als ca. 5°, insbesondere weniger als ca. 3° betragen. Je kleiner die Winkel gewählt werden, desto steiler können z.B. die Flanken am Hell-Dunkel-Übergang zwischen dem beleuchteten Bereich und dem angrenzenden, nicht beleuchteten Bereich sein.

[0019] Eine feinteilige, gezielte Einstellung verschiedener Formen eines zu beleuchtenden Bereichs der Pupillenformungsfläche kann gerade bei Systemen, die Wabenkondensoren als Lichtmischelemente verwenden, von großem Nutzen sein. Bei solchen Systemen kann bekanntlich die gewünschte Vergleichmäßigung der Intensitätsverteilung hinter dem Wabenkondensor nur dann erreicht werden, wenn die einzelnen, durch die „Waben“ gebildeten Strahlungskanäle entweder vollständig oder gar nicht genutzt werden. Die Strahlung eines nur teilweise genutzten Strahlungskanals verschlechtert dagegen die Gleichmäßigkeit (Uniformity). Aus diesem Grunde arbeiten herkömmliche Systeme mit Blenden, um z.B. teilweise beleuchtete Kanäle am Rande eines Ausleuchtungsbereichs zu blockieren. Dies kann zu Lichtverlusten führen.

[0020] Bei Ausführungsformen der Erfindung mit Wabenkondensoren, bei denen die Pupillenformungsfläche normalerweise im Bereich der Eintrittsfläche des Wabenkondensors oder in einer dazu optisch konjugierten Fläche liegt, kann dagegen die räumliche Intensitätsverteilung in der Pupillenformungsfläche so gesteuert bzw. eingestellt werden, dass gezielt nur vollständig beleuchtete und vollständig unbeleuchtete Kanäle bzw. Waben existieren und teilweise beleuchtete Waben vermieden werden. Auf den Einsatz von Blenden zur Blockierung einzelner Kanäle kann dann verzichtet werden. Somit wird bei vereinfachter Konstruktion eine weitgehend verlustfreie Beleuchtungssteuerung möglich.

[0021] Wird eine Spiegelanordnung der Lichtmodulationseinrichtung verwendet, so wird die minimale Größe der beleuchteten Flächen, die durch die Einzelspiegel der Spiegelanordnung erzeugt werden, wesentlich durch die Größe der Einzelspiegel bestimmt, die z.B. Planspiegel sein können. Es ist möglich, die minimale Ausdehnung der erzeugten Lichtflecke zu verkleinern, indem die Einzelspiegel nicht als Planspiegel, sondern als gekrümmte Spiegel mit einer endlichen Spiegelbrennweite ausgebildet sind.

Die Brennweite kann so bemessen sein, dass die auf die Einzelspiegel auftreffende Strahlung im wesentlichen fokussiert auf die Pupillenformungsfläche trifft. Dadurch wird eine sehr differenzierte Einstellung verschiedener räumlicher Intensitätsverteilungen in der Pupillenformungsfläche möglich.

[0022] Die Einzelspiegel der Spiegelanordnung können alle die gleiche Form und Größe haben, was fertigungstechnisch günstig sein kann. Es ist auch möglich, dass die Einzelspiegel eine erste Spiegelgruppe und mindestens eine zweite Spiegelgruppe mit jeweils einem oder mehreren Einzelspiegeln umfassen und dass die Einzelspiegel der Spiegelgruppen unterschiedliche Größe und/oder unterschiedliche Form und/oder unterschiedliche Krümmung haben. Wird beispielsweise die Größe der Einzelspiegel variiert, so kann dies für eine Aufgabenteilung unter den Einzelspiegeln der Spiegelanordnung genutzt werden. Beispielsweise können die flächenmäßig größeren Einzelspiegel die großen Anteile der erzeugten Lichtflecken erzeugen, während kleinere Einzelspiegelchen die Erzeugung einer Feinstruktur der Lichtverteilung ermöglichen.

[0023] Allgemein können die Einzelspiegel jeweils als Erzeuger bestimmter Basislichtverteilungen angesehen werden, die dann zur gewünschten Verteilung in der Pupillenformungsfläche des Beleuchtungssystems zusammengesetzt werden, indem die erzeugten Lichtverteilungen relativ zueinander verschoben werden. Die Variation der Winkelverteilung, und damit die Verschiebung von Lichtflecken in der Pupillenformungsfläche, kann beispielsweise durch geeignete Kippung von Einzelspiegeln um mindestens eine Kippachse erreicht werden.

[0024] Ein weiterer Freiheitsgrad bei der Erzeugung von räumlichen Lichtverteilungen kann dadurch geschaffen werden, dass mindestens ein Teil der Einzelspiegel eine diffraktive optische Struktur oder eine Struktur vergleichbarer Wirkung zur Formung der Verteilung der von dem Einzelspiegel reflektierten Strahlung aufweist. Dadurch kann die „Basisverteilung“, welche durch diesen Einzelspiegel erzeugt wird, noch in sich geformt werden. Beispielsweise kann ein Einzelspiegel so ausgelegt sein, dass er eine Basisverteilung erzeugt, die aus mehreren Lichtflecken bestehen kann, die nicht zusammenhängend sein müssen.

[0025] Die Einzelspiegel der Spiegelanordnung grenzen vorzugsweise unmittelbar aneinander, so dass sie eine facettierte, im wesentlichen geschlossene, zusammenhängende reflektierende Oberfläche bilden. Um eine relative Beweglichkeit benachbarter Einzelspiegel zu erleichtern, kann es günstig sein, wenn sich zwischen den Einzelspiegeln kleine Abstände befinden, die schmale, nicht reflektierende Bereiche ergeben. Insbesondere bei solchen Ausführungs-

formen ist es günstig, wenn vor der Spiegelanordnung eine zweidimensionale Rasteranordnung von optischen Elementen zur Konzentration von auf die optischen Elemente auftreffender Strahlung auf zugeordnete Einzelspiegel der Spiegelanordnung angeordnet ist. Auf diese Weise kann einfallendes Licht, beispielsweise eines Lasers, gebündelt auf die Einzelspiegel geführt werden, wodurch Reflexionsverluste an der Spiegelanordnung auf ein Minimum reduziert werden können. Es kann eine 1:1 Zuordnung zwischen den optischen Elementen der Rasteranordnung und den nachfolgenden Einzelspiegeln vorliegen. Die zweidimensionale Rasteranordnung kann beispielsweise ein zweidimensionales Feld (Array) mit Teleskop-Linsensystemen umfassen, welches vorzugsweise im weitgehend parallelisierten Strahlengang vor der Spiegelanordnung angeordnet ist.

[0026] Insbesondere in Verbindung mit Einzelspiegeln unterschiedlicher Form und/oder Größe kann es günstig sein, die einzelnen optischen Elemente der Rasteranordnung ebenfalls unterschiedlich auszugestalten. Indem beispielsweise unterschiedlich große Bereiche des von der Lichtquelle kommenden, aufgeweiteten Strahls zu Lichtstrahlen gebündelt werden, die dann auf die Einzelspiegel gerichtet werden, kann eine Variation der Lichtenergie auf den Einzelspiegeln der Spiegelanordnung erreicht werden. Auf diese Weise kann der Strahlungsenergieinhalt der einzelnen Basislichtverteilungen verändert werden. Eine vergleichbare Wirkung könnte auch durch einen geeigneten Transmissionsfilter vor und/oder nach der zweidimensionalen Rasteranordnung erreicht werden, wobei allerdings Lichtverluste in Kauf genommen werden müssten.

[0027] Im übrigen kann für den Aufbau und/oder die Ansteuerung der Einzelspiegel der Spiegelanordnung auf bekannte Konzepte des Standes der Technik zurückgegriffen werden, wobei gegebenenfalls bezüglich der Dimensionierung Anpassungen an das jeweilige Beleuchtungssystem vorzunehmen sind. Spiegelanordnungen mit individuell ansteuerbaren Einzelspiegeln, die häufig auch als Digital-Mirror-Array (DMD) bezeichnet werden, sind beispielsweise aus Systemen zur maskenlosen Lithographie bekannt (vgl. z.B. US 5,523,193; US 5,691,541; US 5,870,176 oder US 6,060,224).

[0028] Einige der am Beispiel der Einzelspiegel erläuterten Maßnahmen zur Gestaltung der von der Lichtmodulationseinrichtung erzeugten Austrittsstrahlung können sinngemäß auch bei einem elektrooptischen Element mit schaltbaren Beugungsgittern oder akustooptischen Elementen vorgesehen sein. Hierzu gehören die Möglichkeit der Kippung der Einzelelemente relativ zueinander, die Möglichkeit, durch geeignete Ausgestaltung der Einzelelemente eine Basisverteilung des von einem Einzelelement

abgegebenen Lichtes zu beeinflussen oder die Maßnahme, zur effizienten Nutzung von schaltbaren Beugungsgittern oder akustooptischen Elementen vor der entsprechenden Lichtmodulationseinrichtung optische Elemente zur Konzentration der eintreffenden Strahlung auf die winkelverändernden Einzelelemente vorzusehen. Die Einzelelemente des elektrooptischen Elementes können identisch oder untereinander verschieden ausgestaltet sein.

[0029] Insbesondere bei Ausführungsformen von Beleuchtungssystemen für die Mikrolithographie ist es günstig, im Beleuchtungssystem eine Lichtmischeinrichtung einzusetzen, um einen hohen Grad von Gleichmäßigkeit bzw. Homogenität der auf das Beleuchtungsfeld fallenden Beleuchtung zu erzielen. In erfindungsgemäßen Beleuchtungssystemen können sowohl Lichtmischeinrichtungen mit Wabenkondensoren als auch Lichtmischeinrichtungen mit einem oder mehreren Integratorstäben bzw. Lichtmischstäben oder Kombinationen daraus genutzt werden. Solche Lichtmischeinrichtungen sind sowohl jeweils in refraktiver Ausführung (Wabenkondensor mit Linsenelementen, Integratorstab aus transparentem Material) als auch in reflektiver Ausführung (Wabenkondensor mit Konkavspiegeln, Stab mit Innenverpiegelung) verfügbar.

[0030] Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Beleuchtung eines Beleuchtungsfeldes mit dem Licht einer primären Lichtquelle, wobei das Beleuchtungsfeld insbesondere die Objektebene eines Mikrolithographie-Projektionsobjektivs oder eine dazu konjugierte Ebene ist. Das Beleuchtungsverfahren umfasst eine Änderung der Winkelverteilung des in das Beleuchtungsfeld einfallenden Lichtes im Lichtweg zwischen Lichtquelle und Beleuchtungsfeld. Die Veränderung wird dadurch herbeigeführt, dass das Licht einer primären Lichtquelle auf eine Lichtmodulationseinrichtung mit mindestens zwei unabhängig voneinander veränderbaren Einzelelementen gelenkt wird und diese Einzelelemente relativ zueinander geeignet eingestellt werden. Diese Einstellung kann z.B. eine Verkipfung mindestens eines der Einzelelemente gegenüber dem anderen Einzelelement um eine oder mehrere Kippachsen oder die Veränderung der beugenden Eigenschaften von Beugungselementen umfassen. Dadurch ergibt sich hinter der Lichtmodulationseinrichtung eine von der Relativstellung der Einzelelemente abhängige Winkelverteilung des Lichtes, die durch nachfolgende optische Komponenten in eine Winkelverteilung des in das Beleuchtungsfeld auftreffenden Lichtes transformiert wird. Vorzugsweise hat das von der Lichtmodulationseinrichtung abgegebene Licht deutlich mehr als zwei unabhängig voneinander einstellbare Strahlbündel, beispielsweise mindestens 10 oder mindestens 50 oder mindestens 100 individuell einstellbare Strahlbündel.

Ausführungsbeispiel

[0031] Die vorstehenden und weitere Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei Ausführungsformen der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungen darstellen können.

[0032] Fig. 1 zeigt eine schematische Übersicht einer Ausführungsform eines Beleuchtungssystems für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer Ausführungsform einer Lichtmodulationseinrichtung, die eine Spiegelanordnung mit vielen Einzelspiegeln umfasst;

[0033] Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung zur Erläuterung der Funktionsweise der Spiegelanordnung; und

[0034] Fig. 3 zeigt eine einfache Ausführungsform eines Beleuchtungssystems, bei dem die gewünschte Lichtverteilung ohne optische Abbildungselemente im Fernfeld der Lichtmodulationseinrichtung erzeugt wird.

[0035] Fig. 4 zeigt eine schematische Übersicht einer anderen Ausführungsform eines Beleuchtungssystems für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, bei der die Lichtmodulationseinrichtung eine Rasteranordnung schaltbarer Beugungsgitter umfasst und ein in der Pupillenformungsfläche angeordnetes Rasterelement der Lichtmischeinrichtung dient.

[0036] In Fig. 1 ist ein Beispiel eines Beleuchtungssystems **10** einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie gezeigt, welche bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen einsetzbar ist und zur Erzielung von Auflösungen bis zu Bruchteilen von Mikrometern mit Licht aus dem tiefen Ultraviolettbereich arbeitet. Als Lichtquelle **11** dient ein F₂-Excimer-Laser mit einer Arbeitswellenlänge von ca. 157 nm, dessen Lichtstrahl coaxial zur optischen Achse **12** des Beleuchtungssystems ausgerichtet ist. Andere UV-Lichtquellen, beispielsweise ArF-Excimer-Laser mit 193 nm Arbeitswellenlänge, KrF-Excimer-Laser mit 248 nm Arbeitswellenlänge oder Quecksilberdampflampen mit 365 nm bzw. 436 nm Arbeitswellenlänge oder Lichtquellen mit Wellenlängen unterhalb 157 nm sind ebenfalls möglich.

[0037] Das Licht der Lichtquelle **11** tritt zunächst in einen Strahlaufweiter **13** ein, welcher den Laserstrahl aufweitet und aus dem ursprünglichen Strahlprofil mit 20 mm × 15 mm Querschnitt ein aufgeweitetes Profil **14** mit einem Querschnitt von 80 mm × 80 mm er-

zeugt. Die Divergenzwinkel reduzieren sich dabei von ca. $4 \text{ mrad} \times 2 \text{ mrad}$ auf ca. $1 \text{ mrad} \times 0,4 \text{ mrad}$.

[0038] Hinter dem Strahlaufweiter folgt eine zweidimensionale Rasteranordnung **15** von Teleskopliniensystemen **16**, die aus dem aufgeweiteten Strahlbündel **14** einen Satz regelmäßig angeordneter, zueinander paralleler Strahlbündel **17** erzeugt, die jeweils einen lateralen Abstand zueinander haben.

[0039] Das in Strahlbündel **17** bzw. Teilstrahlen **17** aufgeteilte Licht trifft auf eine als ortsvariante Lichtmodulationseinrichtung dienende Spiegelanordnung **20**, die makroskopisch in einem Winkel von ca. 45° zur optischen Achse **12** ausgerichtet ist und nach Art eines Umlenkspiegels im Mittel eine 90° -Faltung der optischen Achse bewirkt. Auch andere Winkelstellungen und Umlenkwinkel sind möglich. Ein Vorteil kleiner Winkel ist die Tatsache, dass die Objektebene des nachfolgenden Zoom-Systems günstiger liegt und somit der Aufwand für das Zoom-System reduziert werden kann. Die Spiegelanordnung **20** umfasst eine Vielzahl einzelner, kleiner, im Beispielsfall ebener Einzelspiegel **21**, die mit sehr kleinen Zwischenräumen unmittelbar aneinander angrenzen und der Spiegelanordnung **20** insgesamt eine facettierte Spiegeloberfläche verleihen. Jeder der Einzelspiegel **21** ist um zwei senkrecht zueinander ausgerichtete Kippachsen unabhängig von den anderen Einzelspiegeln kippbar. Die Kippbewegungen der Einzelspiegel können von einer Steuereinrichtung **22** über elektrische Signale zu entsprechenden individuellen Antrieben gesteuert werden. Die Spiegelanordnung **20** ist wesentlicher Bestandteil einer Lichtverteilungseinrichtung **25** und dient dazu, die Winkelverteilung der auf die Spiegelanordnung auftreffenden Strahlung orts aufgelöst gezielt zu verändern.

[0040] Die Spiegelanordnung **20** ist im Bereich der Objektebene eines im Strahlengang dahinter angeordneten Zoom-Axicon-Objektivs **30** angeordnet, in dessen Austrittspupille **31** ein diffraktives optisches Rasterelement **32** angeordnet ist. Die Austrittspupille **31** wird hier auch als Pupillenformungsfläche des Beleuchtungssystems bezeichnet. Die im Lichtweg davor angeordneten Komponenten dienen dazu, in dieser Pupillenformungsfläche eine zweidimensionale räumliche Intensitätsverteilung einzustellen, die variabel einstellbar ist.

[0041] Im Detail kann dieser Grundaufbau z.B. wie folgt realisiert sein. Der auf das Teleskoplinien-Array **15** auftreffende, aufgeweitete Laserstrahl **14** wird durch die Segmente des Teleskop-Arrays in eine Vielzahl einzelner Strahlbündel aufgeteilt. Ein Teilbereich von $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ des aufgeweiteten Laserstrahls wird dabei durch ein Teleskop-Segment des Teleskop-Arrays auf einem Strahl **17** mit den Maßen von $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ verkleinert. Auf diese Weise werden $20 \times 20 = 400$ Teilstrahlen bzw. Strahlenbündel

17 erzeugt. Diese treffen auf die zugeordneten Einzelspiegel **21** der Spiegelanordnung, die jeweils eben sind und eine Größe von $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ aufweisen. Jeder der Einzelspiegel befindet sich in einem quadratischen Bereich von $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$. Diese Bereiche liegen auf einem quadratischen Raster nebeneinander, so dass insgesamt $20 \times 20 = 400$ Einzelspiegel vorliegen.

[0042] Bei der Ausführungsform beträgt der axiale Abstand zwischen dem Teleskoplinien-Array **15** und der Spiegelanordnung **20** ca. 100 mm . Der axiale Abstand zwischen der Spiegelanordnung und der Pupillenformungsfläche **31**, in der das refraktive optische Rasterelement **32** sitzt, beträgt mehr als 1000 mm . Der maximale Durchmesser des in der Pupillenformungsfläche **31** ausgeleuchteten Bereiches ist auf ca. 100 mm ausgelegt. Bei dieser Geometrie treten in der Pupillenformungsfläche **31** nur relativ kleine Strahlwinkel mit Werten von weniger als ca. $2,9^\circ$ auf. Dies kann unter der Voraussetzung erreicht werden, dass die (in Fig. 2) oberhalb der optischen Achse liegenden Einzelspiegel nur die Lichtverteilung in der oberen Hälfte der Pupillenformungsfläche **31** und die unterhalb der optischen Achse liegenden Einzelspiegel nur die untere Hälfte dieses Beleuchtungsbereiches beeinflussen. Ein Teilstrahl bzw. ein einzelnes Strahlbündel wird auf dem Lichtweg von ca. 1100 mm normalerweise um maximal ca. $1,1 \text{ mm}$ aufgeweitet. Dieser Wert begrenzt die minimale Größe des Lichtfleckes, den ein von einem Einzelspiegel reflektierter Einzelstrahl in der Pupillenformungsfläche **31** erzeugt.

[0043] Eine hinter der Pupillenformungsfläche **31** angeordnete Einkoppeloptik **40** überträgt das Licht der Intensitätsverteilung auf die rechteckige Eintrittsfläche **44** eines aus synthetischem Quarzglas (oder Kalziumfluorid) gefertigten stabförmigen Lichtintegrators **45**, der das durchtretende Licht durch mehrfache innere Reflexion mischt und homogenisiert. Die Pupillenformungsfläche **31** ist eine Fourier-transformierte Ebene zur Eintrittsfläche **44**, so dass eine räumliche Intensitätsverteilung in Ebene **31** in eine Winkelverteilung am Stabeintritt **44** transformiert wird. Unmittelbar an der Austrittsfläche **46** des Stabes **45** liegt eine Zwischenfeldebene **47**, in der ein Retikel-Masking-System (REMA) **50** angeordnet ist, welches als verstellbare Feldblende dient. Das nachfolgende Objektiv **55** bildet die Zwischenfeldebene **47** mit dem Maskierungssystem **50** auf eine Ebene **65** ab, die hier auch als Retikelebene bezeichnet wird. In der Retikelebene **65** wird ein Retikel **66** angeordnet. Die Ebene **47** des Retikel-Masking-Systems und die Retikelebene **65** sind Ebenen, in denen ein Beleuchtungsfeld des Beleuchtungssystems liegt. Die Retikelebene **65** fällt mit der Objektebene eines Projektionsobjektivs **67** zusammen, welches das Retikelmuster in seine Bildebene **68** abbildet, in der ein mit einer Photolackschicht beschichteter Wafer **69** angeordnet

ist. Das Objektiv **55** enthält eine erste Linsengruppe **56**, eine Pupillenzwischenebene **57**, in die Filter oder Blenden eingebracht werden können, eine zweite und eine dritte Linsengruppe **58**, **59** und einen dazwischen liegenden Umlenkspiegel **60**, der es ermöglicht, die große Beleuchtungseinrichtung horizontal einzubauen und das Retikel waagrecht zu lagern.

[0044] Das Beleuchtungssystem **10** bildet zusammen mit dem Projektionsobjektiv **67**, einem verstellbaren Retikel-Halter, der das Retikel **66** in der Objektebene **65** des Projektionsobjektivs hält, und einem verstellbaren Wafer-Halter eine Projektionsbelichtungsanlage für die mikrolithographische Herstellung von elektronischen Bauteilen, aber auch von optisch diffraktiven Elementen und anderen mikrostrukturierten Teilen. Das Beleuchtungssystem kann sowohl in einem Wafer-Stepper als auch in einem Wafer-Scanner verwendet werden.

[0045] Das Beleuchtungssystem ist so aufgebaut, dass es den kompletten Lichtleitwert in mehreren Stufen einführt. Der vom Laser abgegebene Laserstrahl hat aufgrund der weitgehenden Parallelität der Strahlung und des geringen Strahlquerschnitts einen sehr geringen Lichtleitwert, der durch die Strahlaufweitung und durch die Strahlaufteilung mit Hilfe des Teleskop-Arrays **15** ggf. erhöht wird. Je nach Stellung der Einzelspiegel **21** und der dadurch erzielbaren Winkelverteilung wird durch die Spiegelanordnung **20** der Lichtleitwert weiter erhöht, wobei die Strahlungsverteilung auch in ihrer Form verändert wird. Das Zoom-Axicon-System **30** ist für eine Abbildung ins Unendliche ausgelegt. Die im Bereich der vorderen Brennebene des Zoom-Axicon-Systems **30** angeordnete Spiegelanordnung präpariert zusammen mit der Zoom-Axicon-Optik eine zweidimensionale Intensitätsverteilung variabler Größe in der Austrittspupille **31** des Zoom-Systems, die als Pupillenformungsfläche dient. Das hier angeordnete, refraktive Rasterelement **32** hat eine rechteckige Abstrahlcharakteristik, erzeugt den Hauptanteil des Lichtleitwerts und adaptiert den Lichtleitwert über die Einkoppeloptik **40** an die Feldgröße, d.h. an die Form der rechteckigen Eintrittsfläche **44** des Stabintegrators **45**.

[0046] Die Kipppositionen der Einzelspiegel **21** werden von der Steuereinrichtung **22** über geeignete elektrische Signale eingestellt, wobei aufgrund der Verkippmöglichkeit um zwei Achsen beliebige Orientierungen der Einzelspiegel möglich sind. Die Verkippungen sind jedoch mechanisch oder elektronisch auf derart kleine Kippwinkel begrenzt, dass bei jeder möglichen Einstellung der Einzelspiegel die gesamte von der Spiegelanordnung reflektierte Strahlung in das Objektiv **30** eintreten kann. Durch die Verkippung der Einzelspiegel **21** werden die von diesen ausgehenden Strahlbündel an verschiedene Orte der Pupillenformungsfläche **31** (eine Pupillenebene des Beleuchtungssystems) gelenkt. Die Charakteristika der

zweidimensionalen Lichtverteilungen **35**, die auf diese Weise erzeugt werden können, sind prinzipiell nur durch die Größe der einzelnen Lichtflecke begrenzt. Die gewünschte Größe der erzeugbaren Leuchtflecke kann beispielsweise durch geeignete Wölbung von Einzelspiegeln erreicht werden. Denkbar wäre auch, die Einzelspiegel als adaptive Spiegel auszugestalten, bei denen die Form der Spiegelfläche im begrenzten Umfang über geeignete Aktuatoren, beispielsweise piezoelektrisch, veränderbar ist.

[0047] Bei der hier dargestellten Anwendung der Erfindung ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Verteilung des Lichtes in der Pupillenformungsfläche **31** (einer Pupillenebene des Beleuchtungssystems) in Abhängigkeit von der Struktur der Maske **66** in der Retikelebene **65** eingestellt werden kann. Durch geeignete, computergesteuerte Ausrichtung der Einzelspiegel können alle gängigen zweidimensionalen Beleuchtungslichtverteilungen in der ersten Pupillenformungsfläche **31** eingestellt werden, beispielsweise konventionelle Beleuchtungen unterschiedlicher Durchmesser, annulare Settings, Quadrupol- oder Dipol-Settings. Anders als bei bekannten Systemen sind darüber hinaus auch beliebige andere Lichtverteilungen in der Pupillenformungsfläche **31** variabel einstellbar. Für den Wechsel zwischen den Settings ist kein Austausch optischer Komponenten notwendig. Vor allem kann die Lichtverteilung in der Pupillenebene **31** ohne Zuhilfenahme von Filtern, Blenden oder anderen, Lichtverluste verursachenden Elementen eingestellt werden. Dies gilt insbesondere auch für andere Ausführungsformen, bei denen als Lichtmischelement ein Wabenkondensor eingesetzt wird, dessen Eintrittsseite vorzugsweise im Bereich der Pupillenformungsfläche **31** anzuordnen ist. Die gezielte Einstellbarkeit fast beliebiger Lichtverteilungen in der Pupillenformungsfläche **31** kann auch dazu genutzt werden, um manche Pupilleneigenschaften wie Pupillenelliptizität oder Polbalance zu beeinflussen. Dies kann sehr vorteilhaft sein, da die Intensitätsverteilung üblicher Laserstrahlen keineswegs die gewünschte Form mit scharfem Hell-Dunkel-Übergang (Form einer Top-Head-Funktion) hat. Bei der Ausführungsform betragen die Winkel, unter denen die Lichtstrahlen in die Pupillenebene **31** einmünden, maximal ca. 3°. Dies wirkt sich positiv auf die Füllung des Stabintegrators **45** aus.

[0048] Anhand von **Fig. 3** wird eine vereinfachte Ausführungsform eines Beleuchtungssystems beschrieben. Bei dem Beleuchtungssystem **100** trifft das Licht einer Laser-Lichtquelle **111** unter einem Einfallswinkel von ca. 25° auf eine schräg zur optischen Achse **112** ausgerichtete Spiegelanordnung **120** mit einer Vielzahl individuell ansteuerbarer und jeweils um zwei Kippachsen verkippbarer Einzelspiegel **121**. Je kleiner hier der Anstellwinkel der Spiegelanordnung zur Einstrahlrichtung ist, desto geringer sind bei dieser Ausführungsform die Lichtverluste.

te, da keine Mittel zur Fokussierung der Strahlung auf die Einzelspiegel vorhanden sind. Die Spiegelanordnung **120** dient als Ortsvariante Lichtmodulationseinrichtung und bildet die Lichtverteilungseinrichtung **125** dieses Systems, wird von der Steuereinrichtung **122** angesteuert und hat von der Pupillenformungsfläche **131** des Beleuchtungssystems, in der die gewünschte zweidimensionale Intensitätsverteilung vorliegen soll, einen so großen Abstand, dass die Pupillenformungsfläche **131** im Bereich des Fernfeldes der Spiegelanordnung **120** liegt. In diesem Fall stellt sich die gewünschte Intensitätsverteilung im Bereich der Pupillenformungsfläche **131** automatisch ein, ohne dass die von der Spiegelanordnung **120** abgegebene Winkelverteilung mittels einer Linse oder einer Optik vergleichbarer Wirkung durch Fourier-Transformation in eine räumliche Verteilung umgewandelt werden muss. Eine der Pupillenformungsfläche **131** nachgeschaltete Feldlinse **140** transformiert die Intensitätsverteilung in eine nachfolgende Feldebene **165**, in der beispielsweise eine zu beleuchtende Maske liegt, die dabei aus den gewünschten Richtungen beleuchtet wird. Eine nachfolgende Projektionsoptik **170** bildet das Muster des Retikels auf einen mit einer lichtempfindlichen Beschichtung belegten Wafer in der Bildebene **180** des Projektionsobjektivs **170** ab.

[0049] Der Aufbau des Beleuchtungssystems **210** in **Fig. 4** ist aus dem Aufbau des in **Fig. 1** gezeigten Beleuchtungssystems abgeleitet, weshalb einander entsprechende Merkmale und Bauelemente entsprechende Bezugszeichen, erhöht um **200**, aufweisen. Unterschiede zum System gemäß **Fig. 1** bestehen einerseits beim Aufbau der Ortsvarianten Lichtmodulationseinrichtung **220** und andererseits beim Konzept der Lichtmischung. Hierzu ist bemerkenswert, dass das Beleuchtungssystem **210** ohne gesondertes Lichtmischelement, d.h. ohne Integratorstab oder Wabenkondensor, aufgebaut ist. Wie bei der Ausführungsform gemäß **Fig. 1** liegt das Licht der Laserlichtquelle **211** nach Durchtritt durch einen Strahlaufläufer **213** und eine zweidimensionale Rasteranordnung **215** von Teleskoplinsensystemen als Satz regelmäßig angeordneter, zueinander paralleler Strahlbündel **217** vor, die jeweils einen lateralen Abstand zueinander haben. Die Strahlbündel bzw. Teilstrahlen **217** sind jeweils auf Einzelelemente **221** der Lichtmodulationseinrichtung **220** gerichtet. Diese ist als elektrooptisches Element ausgebildet und hat eine Vielzahl von schaltbaren, reflektiven Beugungsgittern **221**, die die Einzelelemente der Lichtmodulationseinrichtung bilden, in einem zweidimensionalen Raster räumlich angeordnet sind und durch die Steuereinrichtung **222** bezüglich ihrer Beugungseigenschaften unabhängig voneinander einstellbar und veränderbar sind. Mit Hilfe elektrischer Signale lässt sich somit die Winkelverteilung der von der Lichtmodulationseinrichtung **220** in Richtung des Zoom-Axicon-Objektivs **230** reflektierten Strahlung variabel einstellen. Bei ei-

ner anderen Ausführungsform werden die Einzelelemente der Lichtmodulationseinrichtung durch akustooptische Elemente gebildet.

[0050] Die Lichtmodulationseinrichtung **220** ist im Bereich der Objektebene des Zoom-Axicon-Objektivs **230** angebracht, dessen Austrittspupille **231** die Pupillenformungsfläche des Beleuchtungssystems ist. In der Pupillenformungsfläche **231** oder in ihrer Nähe ist ein Rasterelement **232** mit einer zweidimensionalen Anordnung diffraktiver oder refraktiver optischer Elemente angeordnet, das bei dieser Ausführungsform mehrere Funktionen hat. Einerseits wird durch das Rasterelement **232** die eintretende Strahlung so geformt, dass sie nach Durchtritt durch die nachfolgende Einkoppeloptik **240** im Bereich der Feldebene **250** des Beleuchtungssystems ein rechteckförmiges Beleuchtungsfeld ausleuchtet. Das Rasterelement **232** mit rechteckiger Abstrahlcharakteristik erzeugt dabei den Hauptanteil des Lichtleitwertes und adaptiert diesen an die gewünschte Feldgröße und Feldform in der zur Retikelebene **265** optisch konjugierten Feldebene **250**, in der das Retikel-Masken-System angeordnet ist. Das Rasterelement **232** kann als Prismenarray ausgeführt sein, bei dem die in einem zweidimensionalen Feld angeordneten Einzelprismen lokal bestimmte Winkel einführen, um die Feldebene **250** wie gewünscht auszuleuchten. Die durch die Einkoppeloptik **240** durchgeführte Fourier-Transformation bewirkt, dass jeder spezifische Winkel am Austritt des Rasterelementes **232** einem Ort in der Feldebene **250** entspricht, während der Ort des Rasterelementes, d.h. seine Position in Bezug auf die optische Achse **212**, den Beleuchtungswinkel in der Feldebene **250** bestimmt. Die von den einzelnen Rasterelementen ausgehenden Strahlbündel überlagern sich dabei in der Feldebene **250**. Durch geeignete Auslegung des Rasterelementes bzw. seiner Einzelelemente kann erreicht werden, dass das Rechteckfeld in der Feldebene **250** im wesentlichen homogen ausgeleuchtet wird. Das Rasterelement **232** dient somit auch der Homogenisierung der Feldausleuchtung, so dass auf ein gesondertes Lichtmischelement, wie beispielsweise den Integratorstab **45** der Ausführungsform gemäß **Fig. 1**, verzichtet werden kann. Da zwischen der Pupillenformungsfläche **231** und der Austrittsebene **265** des Beleuchtungssystems (Retikelebene) kein gesondertes Lichtmischelement erforderlich ist, können Beleuchtungssysteme dieser Art in diesem Bereich besonders kompakt ausgeführt sein.

[0051] Ein Feldformungs- und Homogenisierungselement vom Typ des Rasterelementes **232**, welches einerseits in Kombination mit einer nachgeschalteten Fourier-Optik zur Einstellung einer Feldgröße und -form und andererseits zur Homogenisierung der Beleuchtung in diesem Feld dient, kann selbstverständlich auch bei Ausführungsform gemäß **Fig. 1** in Kombination mit einer Spiegelanordnung als Lichtmodula-

tionseinrichtung verwendet werden. In diesem Fall kann auf den Integratorstab **45** verzichtet werden. Andererseits kann die Spiegelanordnung gemäß

[0052] Fig. 1 auch durch eine elektrooptische Lichtmodulationseinrichtung mit schaltbaren Beugungsgittern oder optoakustischen Elementen ersetzt werden. Alternativ zu den reflektiven Beugungsgittern gemäß Fig. 4 ist auch die Verwendung von Transmissionsbeugungsgittern bei einer Lichtmodulationseinrichtung möglich.

Patentansprüche

1. Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Beleuchtung eines Beleuchtungsfeldes mit dem Licht einer primären Lichtquelle mit:

einer optischen Achse (**12, 112, 212**) und einer Lichtverteilungseinrichtung (**25, 125, 225**) zum Empfang von Licht der primären Lichtquelle (**11, 111, 211**) und zur Erzeugung einer variabel einstellbaren zweidimensionalen Intensitätsverteilung (**35**) in einer Pupillenformungsfläche (**31, 131, 231**) des Beleuchtungssystems, wobei die Lichtverteilungseinrichtung mindestens eine Lichtmodulationseinrichtung (**20, 120, 220**) zur steuerbaren Veränderung einer Winkelverteilung des auf die Lichtmodulationseinrichtung auftreffenden Lichtes aufweist.

2. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1, bei dem die Lichtmodulationseinrichtung (**20, 120, 220**) ein Feld (Array) von individuell ansteuerbaren Elementen (**21, 121, 221**) zur Winkelveränderung der auf ein Einzelelement auffallenden Strahlung aufweist.

3. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Lichtmodulationseinrichtung derart ausgebildet und ansteuerbar ist, dass im wesentlichen die gesamte, auf die Lichtmodulationseinrichtung auftreffende Lichtintensität in einen nutzbaren Bereich der Pupillenformungsfläche (**31, 131, 231**) gelenkt wird.

4. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen der Lichtmodulationseinrichtung (**20, 120, 220**) und der Pupillenformungsfläche (**31, 231**) ein optisches System (**30, 230**) zur Umwandlung der von der Lichtmodulationseinrichtung erzeugten Winkelverteilung in eine räumliche Verteilung in der Pupillenformungsfläche (**31, 231**) vorgesehen ist.

5. Beleuchtungssystem nach Anspruch 4, bei dem das optische System (**30, 231**) eine variabel, einstellbare Brennweite hat, die vorzugsweise stufenlos einstellbar ist.

6. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen der Lichtmodulationseinrichtung (**20, 220**) und der Pupillenformungsfläche (**31, 231**) ein Axicon-System angeordnet ist.

7. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem ein Raum zwischen der Lichtmodulationseinrichtung (**120**) und der Pupillenformungsfläche (**131**) frei von optischen Komponenten ist.

8. Beleuchtungssystem nach Anspruch 7, bei dem ein Abstand zwischen der Lichtmodulationseinrichtung (**120**) und der Pupillenformungsfläche (**131**) derart groß ist, dass die Pupillenformungsfläche (**131**) im Fernfeldbereich der Lichtmodulationseinrichtung (**121**) liegt.

9. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Lichtmodulationseinrichtung eine reflektive Lichtmodulationseinrichtung (**20, 120, 220**) ist, die nach Art eines Umlenkspiegels schräg zur optischen Achse (**12, 112, 212**) ausgerichtet ist.

10. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen der Lichtmodulationseinrichtung (**20, 120, 220**) und der Pupillenformungsfläche (**31, 131, 231**) ein optischer Abstand besteht, der so gewählt ist, dass die Winkel zwischen der optischen Achse (**12, 112, 212**) und Lichtstrahlen der Winkelverteilung im Bereich der Pupillenformungsfläche (**31, 131, 231**) weniger als ca. 5°, insbesondere weniger als ca. 3° betragen.

11. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Lichtmodulationseinrichtung mindestens eine Spiegelanordnung (**20, 120**) mit einem Feld von individuell steuerbaren Einzelspiegeln (**21, 121**) zur Veränderung einer Winkelverteilung des auf die Spiegelanordnung auftreffenden Lichtes aufweist.

12. Beleuchtungssystem nach Anspruch 11, bei dem mindestens ein Teil der Einzelspiegel, insbesondere alle Einzelspiegel (**21**), eine ebene Spiegelfläche haben.

13. Beleuchtungssystem nach Anspruch 11 oder 12, bei dem mindestens ein Teil der Einzelspiegel, insbesondere alle Einzelspiegel, als gekrümmte Spiegel mit einer endlichen Spiegelbrennweite ausgebildet sind, wobei die Spiegelbrennweite vorzugsweise so bemessen ist, dass die auf die Einzelspiegel auftreffende Strahlung im wesentlichen fokussiert auf die Pupillenformungsfläche trifft.

14. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 11 bis 13, bei dem die Einzelspiegel der Spiegelanordnung (**20, 120**) alle die gleiche Form

und Größe haben.

15. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 11 bis 13, bei dem die Einzelspiegel eine erste Spiegelgruppe und mindestens eine zweite Spiegelgruppe mit jeweils einem oder mehreren Einzelspiegeln umfassen, wobei die Einzelspiegel der Spiegelgruppen unterschiedliche Größe und/oder unterschiedliche Form und/oder unterschiedliche Krümmung haben.

16. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 11 bis 15, bei dem mindestens ein Teil der Einzelspiegel der Spiegelanordnung eine optische Struktur, insbesondere eine diffraktive optische Struktur, zur Formung der Verteilung der von dem Einzelspiegel reflektierten Strahlung aufweist.

17. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 11 bis 16, bei dem Einzelspiegel der Spiegelanordnung (20, 120) relativ zu anderen Einzelspiegeln der Spiegelanordnung verkippbar sind, vorzugsweise um zwei quer zueinander verlaufende Kippachsen.

18. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 10, bei dem die Lichtmodulationseinrichtung (220) ein elektrooptisches Element (220) mit einem Feld (Array) von Einzelelementen (221) ist, die als schaltbare Beugungsgitter und/oder als akustooptische Elemente ausgebildet sind.

19. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 2 bis 18, bei dem zwischen der Lichtquelle und der Lichtmodulationseinrichtung eine zweidimensionale Rasteranordnung (15, 215) von optischen Elementen zur Konzentration von auf die optischen Elemente auftreffender Strahlung auf zugeordnete Einzelelemente (21, 221) der Lichtmodulationseinrichtung (20, 220) angeordnet ist.

20. Beleuchtungssystem nach Anspruch 19, bei dem die Rasteranordnung (15, 215) ein zweidimensionales Feld mit Teleskop-Linsensystemen (16) umfasst.

21. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen der Pupillenformungsfläche (31) und einer Ebene (65) des Beleuchtungsfeldes eine Lichtmischeinrichtung (45) zur Durchmischung von Licht der Intensitätsverteilung angeordnet ist.

22. Beleuchtungssystem nach Anspruch 21, bei dem die Lichtmischeinrichtung mindestens einen Integratorstab (45) mit einer Eintrittsfläche (44) umfasst und vorzugsweise die Pupillenformungsfläche (31) im Bereich einer vor der Eintrittsfläche liegenden Ebene liegt, die eine Fourier-transformierte Ebene zu der Eintrittsfläche ist.

23. Beleuchtungssystem nach Anspruch 21, bei dem die Lichtmischeinrichtung mindestens einen Wabenkondensor mit einer Eintrittsfläche umfasst und vorzugsweise die Pupillenformungsfläche im Bereich der Eintrittsfläche oder einer zur Eintrittsfläche optisch konjugierten Fläche liegt.

24. Beleuchtungssystem nach Anspruch 23, gekennzeichnet durch eine Steuerung der Lichtmodulationseinrichtung derart, dass einzelne Strahlungskanäle des Wabenkondensors entweder im wesentlichen vollständig bestrahlt oder im wesentlichen vollständig unbestrahlt sind.

25. Beleuchtungssystem nach Anspruch 23 oder 24, bei dem dem Wabenkondensor keine Blenden zur individuellen Blockierung von Strahlungskanälen zugeordnet sind.

26. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 20, bei dem zwischen der Pupillenformungsfläche (231) und einer Ebene (265) des Beleuchtungsfeldes kein Wabenkondensator und kein Integratorstab angeordnet ist.

27. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in oder in der Nähe der Pupillenformungsfläche (231) ein Rasterelement (232) zur Formung und Homogenisierung der Intensitätsverteilung in einer nachfolgenden Feldebene (250) des Beleuchtungssystems angeordnet ist.

28. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zur Ansteuerung von Einzelelementen (21, 121, 221) der Lichtmodulationseinrichtung eine Steuereinrichtung (22, 122, 222) vorgesehen ist, die so konfiguriert ist, dass Steuersignale zur Steuerung der Einzelelemente in Abhängigkeit von der Struktur einer zu belichtenden Maske (66) variierbar sind.

29. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen mit folgenden Schritten:

Beleuchtung eines in einer Objektebene eines Projektionsobjektivs angeordneten Retikels mit Hilfe eines Beleuchtungssystems, welches mindestens eine Lichtmodulationseinrichtung mit einer Vielzahl von individuell steuerbaren Einzelelementen zur Veränderung der Winkelverteilung der auf die Lichtmodulationseinrichtung auftreffenden Strahlung aufweist; Erzeugung eines Bildes des Retikels auf einem lichtempfindlichen Substrat;

wobei der Schritt der Beleuchtung des Retikels eine Einstellung der Winkelverteilung des auf das Retikel einfallenden Lichtes durch Relativeinstellung von mindestens zwei der Einzelelemente gegeneinander umfasst.

30. Verfahren nach Anspruch 29, bei dem die

Lichtmodulationseinrichtung eine Spiegelanordnung mit einer Vielzahl von individuell steuerbaren Einzelspiegeln umfasst und die Relativeinstellung der Einzelelemente eine Verkippung mindestens eines der Einzelspiegel gegenüber anderen Einzelspiegeln um eine oder mehrere Kippachsen umfasst.

31. Verfahren nach Anspruch 29, bei dem die Lichtmodulationseinrichtung eine Vielzahl von individuell steuerbaren Beugungsgittern aufweist und die Relativeinstellung unterschiedliche Änderungen der Beugungswirkungen von mindestens zwei der Beugungsgitter umfasst.

32. Verfahren nach einem der Ansprüche 29 bis 31, bei dem das Beleuchtungssystem einen Wabenkondensor mit einer Vielzahl von Strahlungskanälen umfasst und bei dem die Einzelelemente derart gesteuert werden, dass Strahlungskanäle entweder im wesentlichen vollständig ausgeleuchtet oder im wesentlichen vollständig unausgeleuchtet sind.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

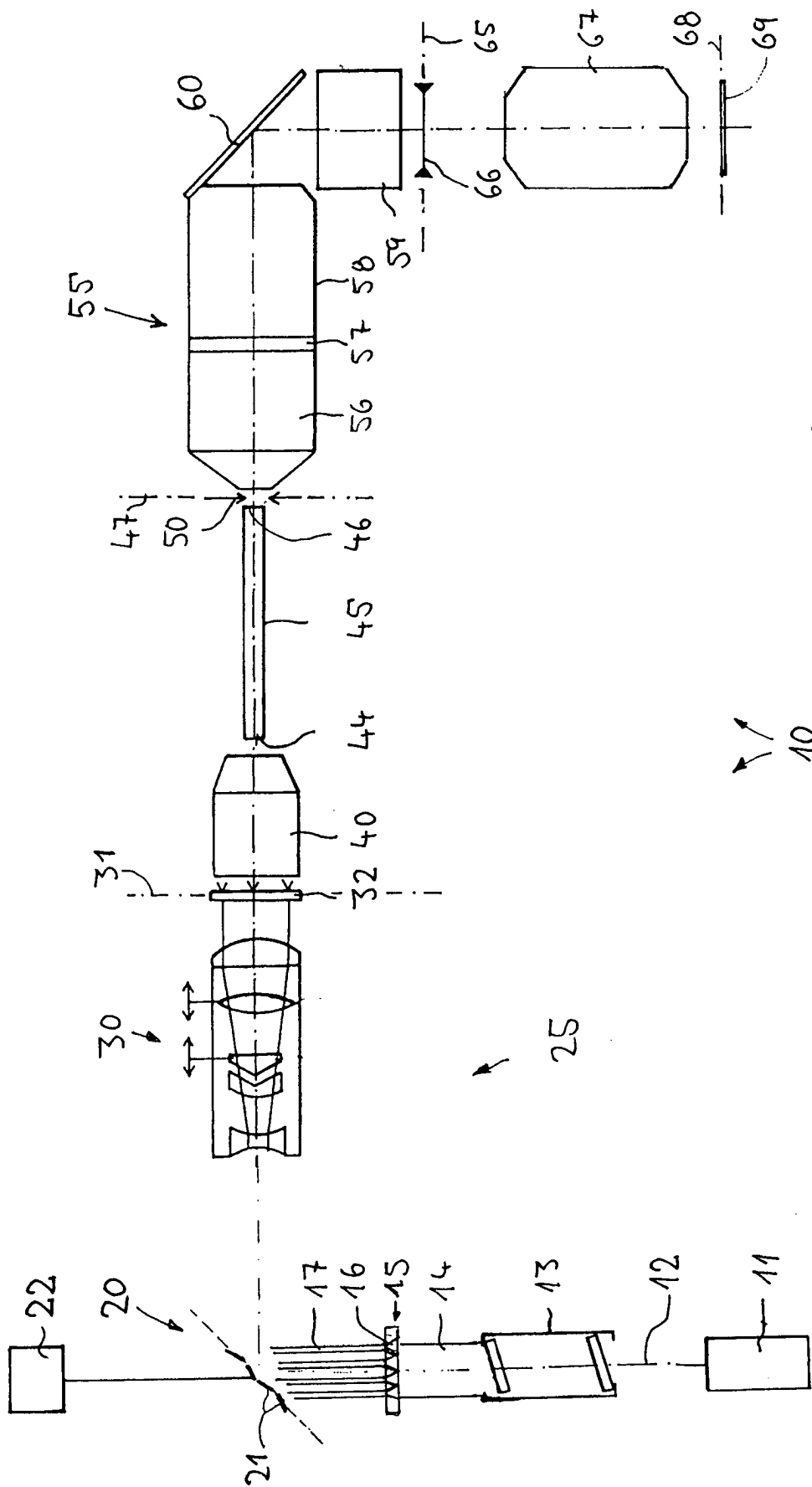
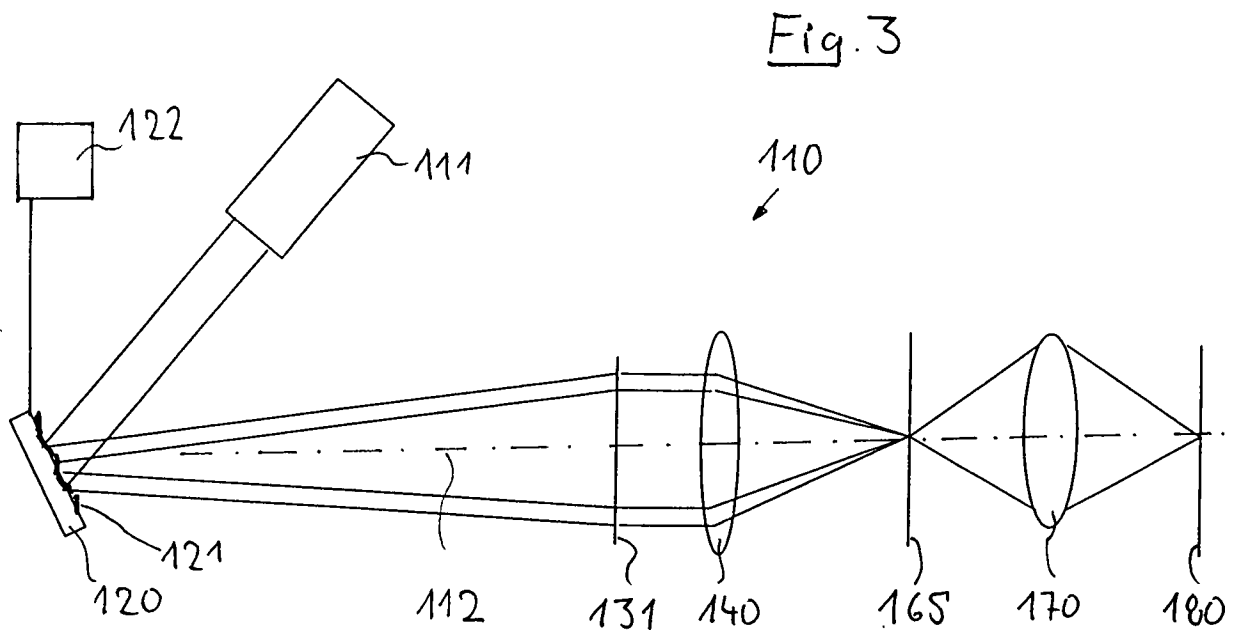
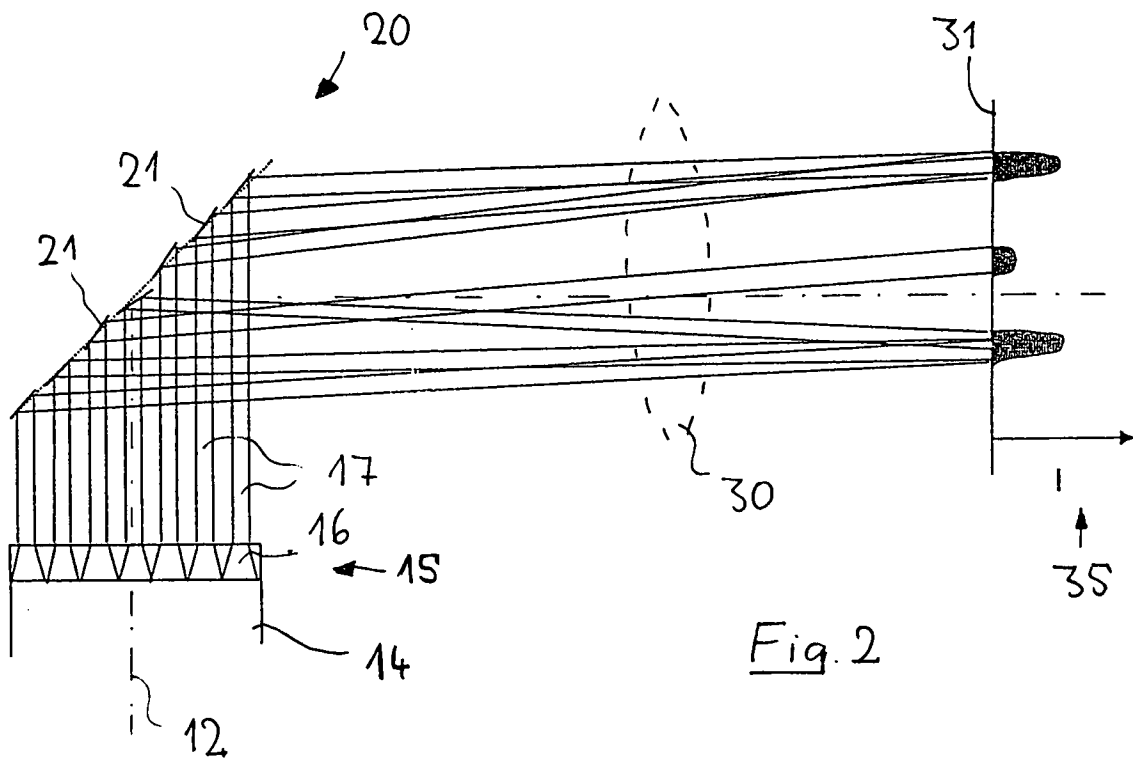


Fig. 1



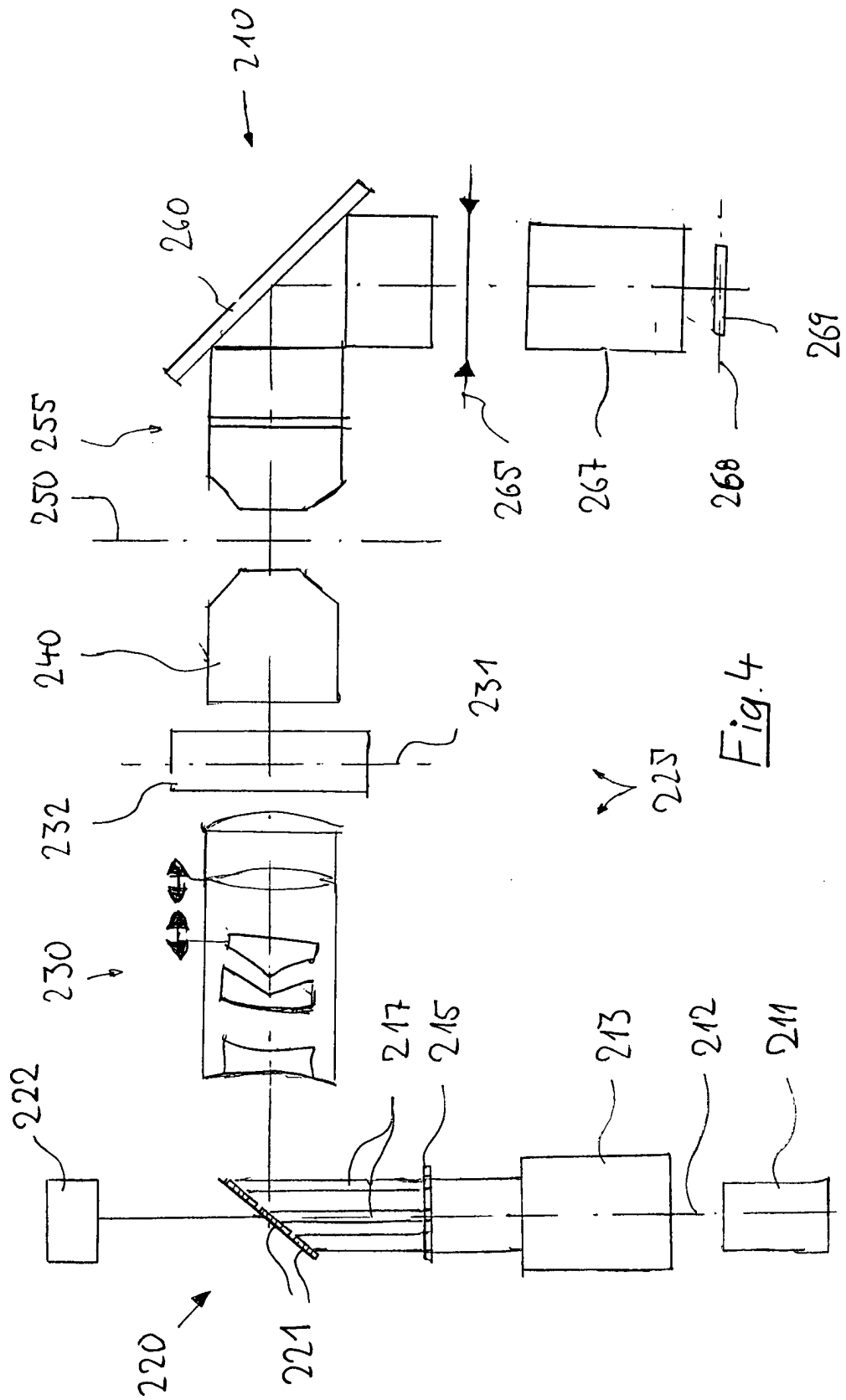


Fig. 4