



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2008 054 582 A1 2009.07.09

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2008 054 582.1

(22) Anmeldetag: 12.12.2008

(43) Offenlegungstag: 09.07.2009

(51) Int Cl.⁸: **G03F 7/20** (2006.01)
H04N 1/036 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
61/015,918 21.12.2007 US

(66) Innere Priorität:
10 2008 008 019.5 07.02.2008

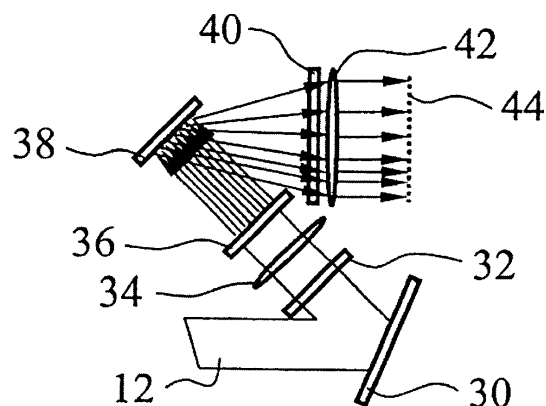
(71) Anmelder:
Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen, DE

(72) Erfinder:
Layh, Michael, 73432 Aalen, DE; Degünther,
Markus, 73432 Aalen, DE; Patra, Michael, 73447
Oberkochen, DE; Wangler, Johannes, 89551
Königsbrunn, DE; Maul, Manfred, 73434 Aalen,
DE; Fiolka, Damian, 73447 Oberkochen, DE; Weiß,
Gundula, 73434 Aalen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage

(57) Zusammenfassung: Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, Beleuchtungsoptik für eine derartige Projektionsbelichtungsanlage, Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine derartige Beleuchtungsoptik, optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) einer derartigen Beleuchtungsoptik, optische Konditionierungseinheit zur Konditionierung eines Beleuchtungsstrahlbündels eines Lasers für eine derartige Beleuchtungsoptik.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine erste Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Beleuchtungsoptik zur Ausleuchtung eines Objektfeldes mit Objektfeldpunkten in einer Objektebene, mit einer Projektionsoptik zur Abbildung des Objektfeldes in ein Bildfeld in der Bildebene, wobei die Beleuchtungsoptik für jeden Objektfeldpunkt des Objektfeldes eine zugehörige Austrittspupille mit einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der Austrittspupille aufweist, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer Vielzahl von Spiegeln zur Einstellung einer Intensitätsverteilung in den zugehörigen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte enthält.

[0002] Die Erfindung betrifft ferner eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie zur homogenen Ausleuchtung eines Objektfeldes mit Objektfeldpunkten in einer Objektebene, wobei die Beleuchtungsoptik für jeden Objektfeldpunkt des Objektfeldes eine zugehörige Austrittspupille aufweist, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer Vielzahl von Spiegeln zur Einstellung einer Intensitätsverteilung in den zugehörigen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte enthält, mit einem Beleuchtungsstrahlbündel von Beleuchtungsstrahlen zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

[0003] Die Erfindung betrifft ferner eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Nutzlichtwellenlänge λ der Projektionsbelichtungsanlage in der Einheit [nm], wobei jeder Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) um mindestens eine Achse um einen maximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ drehbar ist und eine minimale Kantenlänge aufweist.

[0004] Des Weiteren betrifft die vorliegende Erfindung ein optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels und einer Beleuchtungslichtrichtung von der Lichtquelle zur Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

[0005] Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung ist die Bereitstellung einer optischen Konditio-

nierungseinheit zur Konditionierung eines Beleuchtungsstrahlbündels eines Lasers für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, wobei der Laser mehr als eine kohärente Lasermode und einen Laserausgang, sowie das Beleuchtungsstrahlbündel eine Divergenz, ein Strahl- oder Bündelprofil und einen Polarisationszustand aufweist.

[0006] Zusätzlich betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente mit einer Projektionsbelichtungsanlage, mit einer Beleuchtungsoptik, mit einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), mit einem optischen System oder mit einer optischen Konditionierungseinheit, sowie durch ein derartiges Verfahren hergestelltes mikrostrukturiertes Bauelement.

[0007] Projektionsbelichtungsanlagen für die Mikrolithographie mit einer Beleuchtungsoptik zur Strukturierung von Austrittspupillen von Objektfeldpunkten eines Objektfeldes in einer Objektebene der Beleuchtungsoptik sind beispielsweise aus US 6,285,443 B1 bekannt. Hierbei beruht die Strukturierung von Austrittspupillen darauf, dass eine von einer Winkelverteilung eines diffraktiven optischen Elements (DOE) vorgegebene Strukturierung der Intensität im Winkelraum in der Orts- oder Feldebene des DOE durch eine Fourieroptik in eine nachfolgende Pupillenebene abgebildet wird. Dort entsteht dadurch eine, der Winkelverteilung entsprechende Intensitätsverteilung über den Pupillenort.

[0008] Hierbei können zwischen dem DOE und der Pupille auch veränderbare Zoom-Objektive und/oder Axikon-Systeme eingesetzt werden, um die vom DOE vorgegebene Winkelverteilung nachträglich gezielt zu beeinflussen. Damit ist es möglich, z. B. die Kohärenz der Beleuchtung einzustellen, wie z. B. das äußere und/oder das innere σ eines Settings, wobei σ der Kohärenzparameter ist, der unten näher beschrieben wird. Eine komplexere Strukturierung von Austrittspupillen kann damit ebenfalls mit solchen Projektionsbelichtungsanlagen festgelegt werden. Dabei sorgen das Zoom und/oder das Axikon für eine radial- bzw. axialsymmetrische Umverteilung von Licht um die optische Achse der Pupillenebene als Symmetrieachse. Dabei ist ohne Einschränkung von Verallgemeinerungen eine Symmetrie des Axikons bezüglich der optischen Achse angenommen.

[0009] Bei den oben angegebenen Kohärenzparametern ist das äußere σ ein Maß für den Füllgrad an Licht in der Austrittspupille. Umgekehrt ist ein inneres σ ein Maß für den Füllgrad einer zentralen Obskuration oder Abschattung innerhalb des mit Licht gefüllten Bereichs in der Austrittspupille, der durch das äußere σ beschrieben wird. Wenigstens eine weitere Fourieroptik transformiert die Verteilung über den Pu-

pillenort in der Pupilleebene in eine Winkelverteilung in einer nachfolgenden Objektebene, wodurch die Austrittspupillen der Objektfeldpunkte des Objektfeldes in der Objektebene der Beleuchtungsoptik ihre Strukturierung erhalten. Einschränkend an diesen Projektionsbelichtungsanlagen ist, dass eine von einem DOE vorgegebene Strukturierung nur in geringem Umfang, im Wesentlichen radial- bzw. axialsymmetrisch zur optischen Achse durch das Verändern des Zooms bzw. des Axikons zeitlich geändert werden kann. Zum generellen Wechseln einer Strukturierung ist es erforderlich das DOE zu wechseln. Dabei kann in der Praxis die Zeit für die Bereitstellung eines entsprechenden DOEs für eine spezielle Strukturierung mehrere Tage oder sogar Wochen betragen. Somit sind solche Projektionsbelichtungsanlagen nur eingeschränkt geeignet, die Kundenbedürfnisse von schnellen Wechseln zu gewährleisten. Insbesondere, wenn der Wechsel innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde zwischen stark unterschiedlichen Strukturierungen der Austrittspupillen gewünscht ist.

[0010] Projektionsbelichtungsanlagen für die Mikrolithographie mit einer Beleuchtungsoptik zum schnellen Wechsel der Strukturierung von Austrittspupillen mittels Mehrfachspiegelanordnungen (Multi-Mirror-Array, MMA) sind beispielsweise aus WO 2005/026843 bekannt.

[0011] Verfahren zur Berechnung von optimalen Strukturierungen von Austrittspupillen einer Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage in Abhängigkeit von abzubildenden Maskenstrukturen auf dem Retikel sind beispielsweise aus US 6,563,566 und US 2004/0265707 bekannt.

[0012] Es ist eine erste Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Projektionsbelichtungsanlage der eingangs genannten Art weiterzubilden. Insbesondere ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Projektionsbelichtungsanlage mit einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zum schnellen reproduzierbaren Wechsel der Strukturierung von Austrittspupillen von Objektfeldpunkten einer Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage bereitzustellen.

[0013] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die eingangs genannte erste Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie gelöst, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens ein optisches System zur zeitlichen Stabilisierung einer Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) enthält, so dass für jeden Objektfeldpunkt die Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille von einer gewünschten Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille

- bei einem Schwerpunktwinkelwert $\sin(\beta)$ um weniger als zwei Prozent bezogen auf den größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der zugehörigen Aus-

trittspupille und/oder

- bei einer Elliptizität um weniger als zwei Prozent und/oder
- bei einer Pole Balance um weniger als zwei Prozent abweicht.

[0014] Von den Erfindern wurde erkannt, dass das DOE in herkömmlichen Projektionsbelichtungsanlagen, wie z. B. in US 6,285,443 B1 beschrieben, zu einer starken Lichtmischung in den Austrittspupillen führt. Eine starke Lichtmischung bedeutet hierbei, dass die Intensität eines Bereichs in der Austrittspupille durch die Überlagerung einer Vielzahl von Beleuchtungsstrahlen gebildet wird, welche von nahezu allen Orten oder Feldpunkten des DOEs stammen. Damit werden in solchen Systemen die zeitlichen und/oder räumlichen Fluktuationen der Lichtquelle, wie z. B. ein räumlicher Laser-Jitter, durch die starke Lichtmischung des DOEs ausgeglichen. Damit ergibt sich während des Belichtungsprozesses eine zeitlich annähernd stabilisierte Strukturierung in den Austrittspupillen, welche nur in geringem Maße gegenüber einer zeitlich gemittelten Strukturierung in den Austrittspupillen fluktuiert. Es ist nun auf verschiedenste Art und Weise möglich, bei herkömmlichen Projektionsbelichtungsanlagen mit DOE, eine solche zeitlich gemittelte Strukturierung in den Austrittspupillen an eine für den Belichtungsprozess gewünschte Strukturierung anzugleichen. Abschätzungen, die für die Mehrzahl der Systeme anwendbar sind, haben ergeben, dass etwa 80000 und mehr Spiegel einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Projektionsbelichtungsanlage notwendig sind, um die Lichtmischungseigenschaft eines DOEs einer herkömmlichen Projektionsbelichtungsanlage nachzubilden. Solche Mehrfachspiegelanordnungen (Multi-Mirror-Arrays, MMA) mit einer so hohen Anzahl von Spiegeln für Projektionsbelichtungsanlagen zur Erzeugung einer starken Lichtmischung sind derzeit technologisch nicht realisierbar.

[0015] Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass bei Projektionsbelichtungsanlage mit weniger als 80000 Spiegeln eine zeitliche Stabilisierung der Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) ähnlich gute oder sogar bessere zeitlich gemittelte Strukturierungen der Austrittspupillen ergibt. Damit wird eine vom Nutzer der Projektionsbelichtungsanlage als optimal berechnete und gewünschte Strukturierung von Austrittspupillen der Projektionsbelichtungsanlage durch die Projektionsbelichtungsanlage beim Belichtungsprozess mit hoher Genauigkeit reproduzierbar. Fluktuationen der Strukturierung von Austrittspupillen mit nur geringsten tolerablen Abweichungen gegenüber der gewünschten Strukturierung sind also realisierbar. D. h., die vorliegende erste Ausführung der Erfindung erlaubt vorteilhaft, dass die Lichtmischungseigenschaft eines DOEs in der Pupille zur zeitlichen Stabilisierung einer gewünschten Strukturierung einer

Austrittspupille nachgebildet werden kann. Vorteilhaft erfolgt damit eine Entkopplung der Austrittspupille von den zeitlich und/oder räumlichen Fluktuationen der Lichtquelle, wie z. B. eines Lasers-Jitters eines Excimerlasers, durch eine zeitliche Stabilisierung der Ausleuchtung in einer Orts- oder Feldebene der Beleuchtungsoptik, in der sich z. B. das MMA mit weniger als 80.000 Spiegeln befindet.

[0016] Die Strukturierung einer Austrittspupille ist hierbei gleichbedeutend mit einer Intensitätsverteilung in der Austrittspupille. In der Fachsprache wird hierbei auch von Setting anstatt von einer Strukturierung einer Austrittspupille gesprochen.

[0017] Die Austrittspupille eines Objektfeldpunktes wird in Optiklehrbüchern definiert als das Bild der aperturbegrenzenden Blende, welches durch die Abbildung dieser Blende durch die der Blende nachfolgende Optik im Bildraum entsteht. Anders ausgedrückt ist die Austrittspupille das Bild der aperturbegrenzenden Blende, wie es bei der rückwärtigen Betrachtung der Blende vom Objektfeldpunkt aus betrachtet durch die der Blende nachfolgende Optik erscheint. Befindet sich die aperturbegrenzende Blende in einem geringeren Abstand zur nachfolgenden Optik, als die Brennweite der nachfolgenden Optik beträgt, so ist die Austrittspupille ein virtuelles Bild der aperturbegrenzenden Blende und befindet sich in Lichtrichtung vor der Objektebene des betrachteten Objektfeldpunktes. Befindet sich die Blende jedoch in einem größeren Abstand zur nachfolgenden Optik als die Brennweite dieser Optik beträgt, so ist die Austrittspupille ein reelles Bild der aperturbegrenzenden Blende welches sich, z. B. durch einen Schirm am Ort der Austrittspupille auffangen bzw. darstellen lässt. Bei einem telezentrischen System befindet sich die aperturbegrenzende Blende in einem Abstand zu der nachfolgenden Optik, der der Brennweite der nachfolgenden Optik entspricht, so dass die Austrittspupille als virtuelles Bild der aperturbegrenzenden Blende sich sowohl im Unendlichen in Lichtrichtung vor der Objekfeldebene des betrachteten Objektfeldpunktes, als auch als reelles Bild der aperturbegrenzenden Blende in Lichtrichtung im Unendlichen hinter der Objekfeldebene des betrachteten Objektfeldpunktes befindet. Dieses virtuelle bzw. reelle Bild der aperturbegrenzenden Blende als Austrittspupille eines telezentrischen Systems lässt sich einfach dadurch erhalten, indem diejenigen Beleuchtungsstrahlen des Objektfeldpunktes, welche die aperturbegrenzende Blende gerade noch passieren konnten (Randstrahlen), beim Objektfeldpunkt geradlinig rückwärts oder geradlinig vorwärts bis ins Unendliche verlängert werden. Dabei entspricht ein Ort eines Beleuchtungsstrahls im virtuellen oder reellen Bild der aperturbegrenzenden Blende als Austrittspupille eines Objektfeldpunktes dem zugehörigen Winkel des Beleuchtungsstrahls in der Objektebene im Objektfeldpunkt.

[0018] Die Zuordnung erfolgt hierbei über den Tangens des Winkels des Beleuchtungsstrahls, der gleichzeitig das Verhältnis des Abstandes des Ortes des Beleuchtungsstrahls in der Austrittspupille vom Austrittspupillenzentrum zu der Austrittspupillenerweiterung von der Objekfeldebene ist. Da es sich hierbei um eine ein-eindeutige Zuordnung zwischen Abständen von Orten in der Austrittspupille gegenüber dem Zentrum der Austrittspupille und dem Winkel in der Objekfeldebene über die Funktion des Tangens handelt, soll zusätzlich zu der klassischen Definition der Austrittspupille in den Optiklehrbüchern im Rahmen dieser Anmeldung eine alternative Definition der Austrittspupille über die Winkel in der Objekfeldebene gelten. Die Austrittspupille eines Objektfeldpunktes im Rahmen dieser Anmeldung ist der Winkelbereich bzw. der Winkelraum des Objektfeldpunktes in der Objektebene, der durch die aperturbegrenzende Blende der Beleuchtungsoptik begrenzt ist und innerhalb dessen der Objektfeldpunkt Licht von der Beleuchtungsoptik empfangen kann. Diese Definition der Austrittspupille im Rahmen dieser Anmeldung hat den Vorteil, dass der Winkelbereich bzw. der Winkelraum des Objektfeldpunktes in der Objektebene, innerhalb dessen der Objektfeldpunkt Licht von der Beleuchtungsoptik empfangen kann, einfacher für messtechnische Zwecke zugänglich ist, als das virtuelle bzw. reelle Bild der aperturbegrenzenden Blende im Unendlichen.

[0019] Alternativ kann die Austrittspupille statt in Form eines Winkelbereichs bzw. eines Winkelraums in der Objektebene auch als Fouriertransformierte hiervon in Form einer Pupillenebene einer sogenannten Fourieroptik beschrieben werden. Eine solche Fourieroptik könnte z. B. Bestandteil eines Messinstruments zur Vermessung von Austrittspupillen sein, welches in die Objektebene der Beleuchtungsoptik eingeführt wird. Dabei wird durch die Fourierbeziehung zwischen Objekt- und Pupillenebene der Fourieroptik eine Höhe eines Punktes der Pupillenebene der Fourieroptik gemessen gegen die optische Achse in der Pupillenebene einem Sinus eines Beleuchtungs-Winkels gemessen gegen die optische Achse in der Objektebene zugeordnet.

[0020] Die Strukturierung einer Austrittspupille oder gleichbedeutend die Intensitätsverteilung in einer Austrittspupille kann somit entweder als eine Intensitätsverteilung über die Bildebene des virtuellen bzw. reellen Bildes der aperturbegrenzenden Blende oder als Intensitätsverteilung über die Fläche in einer Pupillenebene einer Fourieroptik oder als eine Intensitätsverteilung über Winkelbereiche bzw. über den Winkelraum in einer Orts-/Bild- oder Feldebene beschrieben werden.

[0021] Im Allgemeinen besitzen Beleuchtungsoptiken für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie einen telezentrischen Strahlengang

in der Objekt- bzw. Retikelebene mit weniger als 50 mrad Abweichung von der Telezentriebedingung. Eine derartige Annäherung an einen telezentrischen Strahlengang in der Retikelebene ist vorteilhaft für die Toleranzen mit denen das Retikel entlang der optischen Achse für eine optimale Abbildung positioniert werden muss. Bei einer perfekten telezentrischen Beleuchtungsoptik mit Telezentriewerten von 0 mrad liegen die virtuellen bzw. reellen Bilder der aperturbegrenzenden Blende als Austrittspupillen des Beleuchtungssystems im Unendlichen und die Austrittspupillen aller Feldpunkte stimmen miteinander überein. Ebenso stimmen die Winkelbereiche der Objektfeldpunkte als Austrittspupillen im Rahmen dieser Anmeldung, in denen die Objektfeldpunkte Licht von der Beleuchtungsoptik empfangen können, überein.

[0022] Bei einem kleinen Telezentrieverlauf unter 50 mrad über das Objektfeld in der Objekt- bzw. Retikelebene sind die virtuellen bzw. reellen Bilder der aperturbegrenzenden Blende als Austrittspupillen in sehr großer Entfernung zur Beleuchtungsoptik gegeneinander dezentriert. Gleichwohl sind die Winkelbereiche der Objektfeldpunkte als Austrittspupillen im Rahmen dieser Anmeldung in der Objektebene gegeneinander gekippt. Aus diesem Grund und aus dem Grund, dass andere Abbildungsfehler der Beleuchtungsoptik zu weiteren Unterschieden in den Austrittspupillen der Objektfeldpunkte führen können, wird im Rahmen dieser Anmeldung nicht eine generelle Austrittspupille einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage betrachtet, sondern es wird nach den einzelnen Austrittspupillen der Objektfeldpunkten und der jeweiligen Intensitätsverteilung in den einzelnen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte unterschieden. Im Idealfall können diese Austrittspupillen, wie schon erwähnt, auch zusammenfallen.

[0023] In den Pupillenebenen von Fourieroptiken bzw. hierzu konjugierten Fourierebenen, z. B. in den Pupillenebenen innerhalb einer Beleuchtungsoptik oder in den Pupillenebenen einer Messoptik zur Vermessung von Pupillen, ist es möglich eine Intensitätsverteilung in der diesbezüglichen Ebene entweder zu beeinflussen oder dort zu messen. Dabei müssen diese Ebenen nicht notwendigerweise Ebenen im Sinne des Wortes „eben“ sein, sondern können auch in bis zu zwei Raumrichtungen gekrümmt sein. Ebenso ist es möglich in den Objekt-/Bild- oder Feldebene bzw. hierzu konjugierten Fourierebenen eine Intensitätsverteilung über den Winkel in der diesbezüglichen Ebene entweder zu beeinflussen oder dort zu messen. Auch hier gilt bezüglich dem Begriff „Ebene“ die, bei der Pupillenebenen aufgeführten Verallgemeinerung.

[0024] Als Maß für eine Abweichung einer gewünschten Intensitätsverteilung von einer an einer

Projektionsbelichtungsanlage realisierten Intensitätsverteilung einer Austrittspupille eines Objektfeldpunktes dient unter anderem die Differenz des Schwerpunktswinkelwerts $\sin(\beta)$ der beiden Intensitätsverteilungen bezogen auf den größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der zugehörigen Austrittspupille. Unter Winkelwerten wird im Rahmen dieser Anmeldung der Sinus $\sin(x)$ des entsprechenden Winkels x verstanden. Somit wird unter dem Randwinkelwert der Sinus des Winkels verstanden, unter dem ein Randpunkt der Austrittspupille vom Objektfeldpunkt aus mit Bezug zur optischen Achse oder einer hierzu parallelen Achse gesehen wird. Mit der alternativen Definition der Austrittspupille als Winkelbereich eines Objektfeldpunktes, innerhalb dessen der Objektfeldpunkte Licht von der Beleuchtungsoptik empfangen kann, ist der Randwinkelwert der Sinus eines Rand- oder Grenzwinkels des Winkelbereichs, der als Austrittspupille hierbei gilt. Der größte Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ ist der betragsmäßig größte Winkelwert aller Randwinkel von allen Randpunkten der Austrittspupille bzw. der betragsmäßig größte Winkelwert aller Randwinkel des Winkelbereichs, der hierbei als Austrittspupille gilt. Der Schwerpunktswinkelwert $\sin(\beta)$ ist der Sinus des Schwerpunktswinkels β einer Intensitätsverteilung in der Austrittspupille, und dieser wiederum ist der Winkel der Richtung, in der der Schwerpunkt der Intensitätsverteilung in der Austrittspupille von einem Objektfeldpunkt aus wahrgenommen wird.

[0025] Die Richtung in der der Schwerpunkt der Intensitätsverteilung in der Austrittspupille wahrgenommen wird, wird vielfach auch als Schwerstrahlrichtung bezeichnet. Der Schwerpunktswinkelwert bzw. der Sinus des Schwerstrahlwinkels ist gleichzeitig das Maß für die Telezentrie der Austrittspupille bei einer gegebenen Intensitätsverteilung.

[0026] Bei der Telezentrie wird vielfach auch zwischen geometrischer und energetischer Telezentrie (siehe unten) unterschieden. Darüber hinaus wird bei der geometrischen Telezentrie zwischen der Hauptstrahltelezentrie (siehe unten) und der geometrischen Telezentrie bei gleichmäßiger rotationssymmetrischer Füllung der Austrittspupille unterschieden.

[0027] Letzteres ist gleichbedeutend mit dem Schwerpunktswinkelwert bzw. dem Sinus des Schwerstrahlwinkels bei einer gleichförmigen rotationssymmetrischen Füllung der Austrittspupille mit Licht bis zu einem Grenzwinkelwert, der zwischen Null und dem größten Randwinkelwert variiert werden kann.

[0028] Bei einer nahezu gleichförmigen rotationssymmetrischen Füllung der Austrittspupille mit Licht, also einer nahezu gleichförmigen rotationssymmetrischen Intensitätsverteilung in der Austrittspupille, wird auch von sogenannten σ -Settings oder partiell

kohärenten Settings gesprochen. Dabei wird in der Fachliteratur als das äußere σ eines Settings das Verhältnis des Sinus desjenigen Winkels zum Sinus des größten Randwinkels verstanden, bei dem der mit Licht gefüllte Bereich in der Austrittspupille abrupt endet. Mit dieser Definition des äußeren σ eines Settings werden jedoch die Verhältnisse in einer realen Beleuchtungsoptik vernachlässigt, insbesondere das Vorhandensein von Abbildungsfehlern, Geisterbildern und Streulicht. Einen abrupten Übergang von hellen und dunklen Bereichen in der Austrittspupille lässt sich nur näherungsweise durch die Nutzung von Blenden in einer Pupillenebene der Beleuchtungsoptik realisieren, da dann größtenteils die Abbildungsfehler, die Geisterbilder und das Streulicht vernachlässigt werden können. Die Nutzung von Blenden in den Pupillenebenen der Beleuchtungsoptik zur Realisierung von Settings führt jedoch zwangsläufig zu Lichtverlusten und somit zu einer Reduktion des Durchsatzes an zu belichtenden Substraten bzw. Wafer. Im Rahmen dieser Anmeldung soll die dargelegte Definition des äußeren σ eines Settings nur für Beleuchtungsoptiken für Projektionsbelichtungsanlagen gelten, welche mittels Blenden ein gewünschtes Setting realisieren. Für alle anderen Beleuchtungsoptiken soll abweichend von der oben dargelegten lehrbuchmäßigen Definition des äußeren σ eines Settings aufgrund der oben dargelegten Gründe gelten, dass das äußere σ das Verhältnis des Sinus desjenigen Winkels zum Sinus des größten Randwinkels ist, innerhalb dessen sich 90% der gesamten Intensität der Austrittspupille befindet. Somit gilt für alle anderen Beleuchtungsoptiken: äußeres $\sigma = \text{Winkelwert}(90\% \text{ Intensität})/\sin(\gamma)$.

[0029] Im Allgemeinen resultieren für die Telezentrie bei unterschiedlichen σ Settings und für die Hauptstrahltelezentrie für ein und denselben Objektfeldpunkt unterschiedliche Werte aufgrund der Abbildungsfehler der Beleuchtungsoptik, die zwischen null und einigen mrad betragen können.

[0030] Unter der Hauptstrahltelezentrie eines Objektfeldpunktes wird der Winkel des Hauptstrahls gegenüber der optischen Achse oder einer hierzu parallelen Achse am Ort des Objektfeldpunktes verstanden. Der Hauptstrahl ist hierbei derjenige Strahl, der vom Objektfeldpunkt aus gesehen aus dem geometrischen Zentrum der Austrittspupille kommt.

[0031] Ebenso resultieren für die Telezentriewerte bei annularen Settings und für die Hauptstrahltelezentrie für ein und denselben Objektfeldpunkt im Allgemeinen unterschiedliche Werte. Bei einem annularen Setting handelt es sich um eine Intensitätsverteilung in der Austrittspupille, die nicht nur ein äußeres σ für eine Begrenzung des Lichts in der Austrittspupille aufweist, sondern auch ein inneres σ . Mit dem inneren σ eines Settings wird die Ausdehnung einer zentralen Abschattung oder Obskuration in der Austritt-

spupille beschrieben. Dabei wird in der Fachliteratur als das innere σ eines Settings das Verhältnis des Sinus desjenigen Winkels zum Sinus des größten Randwinkels verstanden, bei dem die zentrale Abschattung oder Obskuration in der Austrittspupille abrupt endet. Aus den gleichen, oben zum äußeren σ dargelegten Gründen, eignet sich diese Definition des inneren σ eines Settings sehr gut für Beleuchtungsoptiken, bei denen die Settings durch Blenden in den Pupillenebenen realisiert werden. Bei allen anderen Beleuchtungsoptiken soll abweichend von dieser Definition im Rahmen dieser Anmeldung für das innere σ eines Settings gelten, dass das innere σ eines Settings das Verhältnis des Sinus desjenigen Winkels zum Sinus des größten Randwinkels ist, innerhalb dessen sich 10% der gesamten Intensität der Austrittspupille befindet. Somit gilt für alle anderen Beleuchtungsoptiken: inneres $\sigma = \text{Winkelwert}(10\% \text{ Intensität})/\sin(\gamma)$.

[0032] Die energetische Telezentrie resultiert hingegen daraus, dass unterschiedliche Teile der Austrittspupille unterschiedliche Intensitätswerte besitzen, oder daraus, dass unterschiedliche Teile der Austrittspupille durch die Abbildungsfehler der Beleuchtungsoptik unterschiedlich verzerrt oder besser gesagt verzeichnet abgebildet werden.

[0033] Da die Telezentrie aufgrund der unterschiedlichen Betrachtungsweisen keine eindeutige Größe ist, wird im Rahmen dieser Anmeldung der Schwerpunktswinkelwert als eindeutige Vergleichs-Größe verwendet, d. h. der Sinus des Schwerpunktswinkels bzw. des Schwerstrahlwinkels. Diese Größe umfasst sowohl energetische als auch geometrische Ursachen für den Schwerstrahlwinkel der Intensitätsverteilung in den Austrittspupillen und stellt letztendlich auch diejenige Größe dar, die den Einfluss des Schwerpunktswinkels bzw. des Schwerstrahlwinkels insgesamt auf den Abbildungsprozess der Maskenabbildung beschreibt.

[0034] Ein weiteres Maß für eine Abweichung einer gewünschten Intensitätsverteilung von einer an einer Projektionsbelichtungsanlage realisierten Intensitätsverteilung einer Austrittspupille eines Objektfeldpunktes ist die Differenz der Elliptizität zwischen der gewünschten Intensitätsverteilung und der realisierten Intensitätsverteilung. Zur Berechnung der Elliptizität einer Intensitätsverteilung einer Austrittspupille wird diese in vier Quadranten unterteilt. Hierbei sind zwei Möglichkeiten der Anordnung der Quadranten in Bezug auf das Koordinatensystem in der Objektfeldenebene mit einer x-Richtung und einer y-Richtung gebräuchlich. Bei der ersten Anordnung der Quadranten wird die Austrittspupille durch eine Linie in x-Richtung und durch eine Linie in y-Richtung aufgeteilt. Diese Aufteilung wird xy-Aufteilung genannt.

[0035] Bei der zweiten Anordnung verlaufen die Li-

nien unter 45° zum xy-Koordinatensystem. Letztere Aufteilung der Austrittspupille trägt den Namen HV-Aufteilung, da sich die Quadranten in horizontaler (H) und vertikaler (V) Richtung zum Objektfeld befinden.

[0036] Unter einer Elliptizität einer Intensitätsverteilung in einer Austrittspupille wird nun der um Hundert Prozent multiplizierte Betragswert der Differenz zwischen der Summe der Intensität in den beiden H-Quadranten der Austrittspupille und der Summe der Intensität in den beiden V-Quadranten der Austrittspupille normiert auf die Summe aus den beiden Summen verstanden. Analog ist die Elliptizität bei einer XY-Aufteilung der Austrittspupille definiert.

[0037] Ein weiteres Maß für eine Abweichung einer gewünschten Intensitätsverteilung von einer an einer Projektionsbelichtungsanlage realisierten Intensitätsverteilung einer Austrittspupille eines Objektpunktes ist die Differenz der Pole Balance zwischen der gewünschten Intensitätsverteilung und der realisierten Intensitätsverteilung. Zur Berechnung der Pole Balance einer Intensitätsverteilung einer Austrittspupille wird diese je nach Anzahl der Pole bzw. Bereiche mit Intensität in der Austrittspupille entsprechend in gleich große Abschnitte radialsymmetrisch um die optische Achse unterteilt. D. h., bei einem Dipol-Setting mit zwei sich in der Austrittspupille gegenüberliegenden Bereichen mit Intensität wird die Austrittspupille in zwei Hälften als Abschnitte aufgeteilt. Bei einem Quadrupol-Setting mit vier Bereichen mit Intensität in der Austrittspupille, wird die Austrittspupille in vier Quadranten als Abschnitte aufgeteilt. Analog wird bei n-Pole-Settings, mit n Bereichen mit Intensität in der Austrittspupille, die Austrittspupille in n Abschnitte aufgeteilt. Unter einer Pole Balance einer Intensitätsverteilung in einer Austrittspupille wird nun der um Hundert Prozent multiplizierte Wert der Differenz zwischen der maximalen Intensität eines Abschnitts der Austrittspupille und der minimalen Intensität eines Abschnitts der Austrittspupille normiert auf die Summe der Intensität aus den beiden Abschnitten verstanden.

[0038] Unter zeitlichen und/oder räumlichen Fluktuationen einer Lichtquelle werden im Rahmen dieser Anmeldung unter anderem zeitliche und/oder räumliche Änderungen in den folgenden Eigenschaften eines von der Lichtquelle ausgehenden Beleuchtungsstrahlbündels verstanden: Position des Beleuchtungsstrahlbündels senkrecht zur optischen Achse zwischen Lichtquelle und Beleuchtungsoptik, Position von Teilen des Beleuchtungsstrahlbündels gegenüber dem restlichen Beleuchtungsstrahlbündel senkrecht zur optischen Achse zwischen Lichtquelle und Beleuchtungsoptik, Richtung des Beleuchtungsstrahlbündels, Richtung von Teilen des Beleuchtungsstrahlbündels gegenüber der Richtung des restlichen Beleuchtungsstrahlbündels, Intensität und Po-

larisation des Beleuchtungsstrahlbündels, Intensität und Polarisation von Teilen des Beleuchtungsstrahlbündels gegenüber der Intensität und Polarisation des restlichen Beleuchtungsstrahlbündels sowie jedwede Kombination der genannten Eigenschaften.

[0039] Als Lichtquellen für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie kommen Lichtquellen mit Wellenlängen zwischen 365 nm und 3 nm in Betracht, insbesondere Quecksilber-Hochdruckdampflampen, Laser wie z. B. Excimer-Laser, wie z. B. ArF_2^- , KrF_2 -Laser oder EUV-Lichtquellen. Bei Excimer-Lasern als Lichtquelle mit typischen Wellenlängen von 248 nm, 193 nm, 157 nm und 126 nm werden im Rahmen dieser Anmeldung unter anderem auch Änderung in der Modenanzahl und der Modenzusammensetzung der Lasermoden der Laserpulse der Lichtquelle als zeitlich und/oder räumliche Fluktuation der Lichtquelle verstanden.

[0040] Unter einer zeitlich stabilisierten Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) wird im Rahmen dieser Anmeldung eine räumliche Intensitätsverteilung des Beleuchtungsstrahlbündels in der Ebene der Mehrfachspiegelspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) bzw. auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) verstanden, welche sich mit der Zeit als gleitendes Ensemblemittel (siehe unten) oder als gleitendes Zeitmittel (siehe unten) in ihrer räumlichen Verteilung nur um weniger als 25 Prozent, insbesondere weniger als 10 Prozent bezogen auf die mittlere bzw. gemittelte räumliche Verteilung aller Ensemblemittel oder Zeitmittel ändert. Das gleitende Ensemblemittel ist hierbei ein gleitender Mittelwert über ein Ensemble von Lichtpulsen einer pulsierenden Lichtquelle (siehe unten). Das gleitende Zeitmittel ist entsprechend ein gleitender Mittelwert über eine bestimmte Belichtungszeit einer kontinuierlichen Lichtquelle (siehe unten).

[0041] Die integrale Intensität der Intensitätsverteilung bzw. Ausleuchtung über die Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) kann sich hierbei sehr wohl z. B. von Lichtpuls zu Lichtpuls zeitlich stark ändern, jedoch nicht die räumliche Verteilung der Ausleuchtung über die Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) als gleitendes Ensemblemittel oder als gleitendes Zeitmittel. Ferner sollte sich auch die mittlere oder gemittelte integrale Intensität der Intensitätsverteilung über die Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) als gleitendes Ensemblemittel oder als gleitendes Zeitmittel nicht stark ändern, da hierdurch sich die Dosis eines Bildfeldpunktes der Projektionsbelichtungsanlage stark ändern würde, was in aller Regel für die Belichtung unerwünscht ist.

[0042] Unter einem gleitenden Ensemblemittel wird der gleitende Mittelwert einer Größe über ein En-

semble von einer Anzahl n nacheinander erfolgenden Lichtimpulsen verstanden. Gleitend bedeutet hierbei, dass es sich bei dem ersten Lichtpuls des Ensembles von n nacheinander erfolgenden Lichtimpulsen um einen beliebigen Lichtpuls der Lichtquelle handelt, und dass somit das Ensemblemittel mit dem ersten Lichtpuls des Ensembles in der Zeit gleitet. Entsprechend verhält es sich mit dem gleitenden Zeitmittel über eine bestimmte Belichtungszeit einer kontinuierlichen Lichtquelle, bei dem der gleitende Mittelwert einer Größe über eine bestimmte Belichtungszeit, mit dem Startzeitpunkt der zu betrachtenden Belichtungszeit, in der Zeit gleitet.

[0043] Die Anzahl n der Lichtpulse des Ensembles bzw. die bestimmte Belichtungszeit bestimmt sich danach, wie viele Lichtpulse bzw. welche Belichtungszeit zur Belichtung eines Bildfeldpunktes des zu belichtenden Werkstückes benötigt werden. Das Ensemble kann somit je nach Projektionsbelichtungsanlage, angefangen bei Projektionsbelichtungsanlagen für die sogenannte maskenlose Lithographie, über sogenannte Scanner bis hin zu sogenannten Steppern, zwischen einem Lichtpuls und mehreren Hundert Lichtpulsen, bzw. entsprechenden Belichtungszeiten betragen.

[0044] Sowohl die Strukturierung einer Austrittspupille bzw. die Intensitätsverteilung in einer Austrittspupille, als auch der Schwerpunktwinkelwert, die Elliptizität, die Pole Balance, das äußere und das innere σ einer Austrittspupille eines Objektfeldpunktes einer Projektionsbelichtungsanlage sind im Rahmen dieser Anmeldung unter anderem als weitere gleitende Ensemblemittelwerte bzw. gleitende Zeitmittelwerte zu verstehen. Denn nur diese Ensemblemittelwerte bzw. Zeitmittelwerte einer Größe sind für die Belichtung eines Bildfeldpunktes insgesamt relevant, da nur Sie die während des Belichtungsprozess mit den notwendigen Lichtpulsen des Ensembles bzw. der notwendigen Belichtungszeit vorherrschenden Beleuchtungs- bzw. Abbildungsbedingungen insgesamt charakterisieren bzw. beschreiben.

[0045] Eine weitere, zweite Lösung der oben genannten ersten Aufgabe der vorliegenden Erfindung ergibt sich durch die eingangs genannte erste Projektionsbelichtungsanlage, d. h. eine Projektionsbelichtungsanlage,

- mit einer Beleuchtungsoptik zur Ausleuchtung eines Objektfeldes mit Objektfeldpunkten in einer Objektebene,
- mit einer Projektionsoptik zur Abbildung des Objektfeldes in ein Bildfeld in der Bildebene,
- wobei die Beleuchtungsoptik für jeden Objektfeldpunkt des Objektfeldes eine zugehörige Austrittspupille mit einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der Austrittspupille aufweist,
- wobei die Beleuchtungsoptik mindestens eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array,

MMA) mit einer Vielzahl von Spiegeln zur Einstellung einer Intensitätsverteilung in den zugehörigen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte enthält, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens ein optisches System zur zeitlichen Stabilisierung der Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) enthält, so dass für jeden Objektfeldpunkt eine erste eingestellte Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille von einer zweiten eingestellten Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille um weniger als den Wert 0,1 im äußeren und/oder inneren σ abweicht.

[0046] Erfindungsgemäß lässt sich ein schneller Wechsel zwischen annularen Settings, die sich nur geringfügig im äußeren und/oder inneren σ unterscheiden, mittels einer Projektionsbelichtungsanlage mit einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) dann besonders gut realisieren, wenn für eine zeitliche Stabilisierung der annularen Settings gegenüber den zeitlichen und/oder räumlichen Fluktuationen der Lichtquelle in Form einer zeitlichen Stabilisierung der Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) gesorgt wird.

[0047] Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass eine zeitliche Stabilisierung der Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) einer Projektionsbelichtungsanlage mit weniger als 80000 Spiegeln vorteilhaft ist, um die Lichtmischeigenschaften eines DOEs nachzubilden, wie dies bereits im Zusammenhang mit der ersten erfindungsgemäßen Projektionsbelichtungsanlage beschreiben wurden. Damit ist es möglich, einen vom Nutzer der Projektionsbelichtungsanlage vorgesehenen Wechsel zwischen zwei sich nur geringfügig im äußeren und/oder inneren σ unterscheidenden annularen Settings beim Belichtungsprozess mit hoher Genauigkeit reproduzierbar durchzuführen, ohne große Fluktuationen und mit geringsten Abweichungen gegenüber der gewünschten Strukturierung in Form der annularen Settings. Somit kann der Nutzer der erfindungsgemäßen Projektionsbelichtungsanlage schnell und dabei genau, zeitlich stabil, sowie reproduzierbar zwischen zwei annularen Settings bzw. gewünschten Intensitätsverteilungen in den Austrittspupillen wechseln, die sich nur geringfügig im äußeren und/oder inneren σ unterscheiden.

[0048] Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen zu den dargestellten erfindungsgemäßen Projektionsbelichtungsanlagen und aus der Beschreibung der Ausführungsbeispiele anhand der Zeichnungen.

[0049] Es ist eine weitere, zweite Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithogra-

phie mit einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) der eingangs erwähnten Art weiterzubilden, wobei insbesondere eine Intensitätsverteilung in den Austrittspupillen von Objektfeldpunkten eines Objektfeldes der Beleuchtungsoptik gegenüber zeitlichen und/oder räumlichen Fluktuationen einer Lichtquelle der Projektionsbelichtungsanlage stabilisiert ist.

[0050] Diese Aufgabe wird durch die eingangs genannte Beleuchtungsoptik gelöst, d. h. durch eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie zur homogenen Ausleuchtung eines Objektfeldes mit Objektfeldpunkten in einer Objektebene, wobei die Beleuchtungsoptik für jeden Objektfeldpunkt des Objektfeldes eine zugehörige Austrittspupille aufweist, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer Vielzahl von Spiegeln zur Einstellung einer Intensitätsverteilung in den zugehörigen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte enthält, mit einem Beleuchtungsstrahlbündel von Beleuchtungsstrahlen zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), wobei die Beleuchtungsoptik mindestens ein optisches System zur zeitlichen Stabilisierung einer Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) enthält, und wobei die zeitliche Stabilisierung durch Überlagerung von Beleuchtungsstrahlen des Beleuchtungsstrahlbündels auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) erfolgt.

[0051] Erfindungsgemäß führt vorteilhaft eine Überlagerung von Beleuchtungsstrahlen eines Beleuchtungsstrahlbündels einer Lichtquelle zur Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zu einer zeitlichen Stabilisierung der Ausleuchtung und somit zu einer Stabilisierung der Intensitätsverteilung in den Austrittspupillen gegenüber zeitlichen und/oder räumlichen Fluktuationen der Lichtquelle der Projektionsbelichtungsanlage.

[0052] Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen zu der dargestellten erfindungsgemäßen Beleuchtungsoptik und aus der Beschreibung der Ausführungsbeispiele anhand der Zeichnungen.

[0053] Es ist eine weitere, dritte Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage der eingangs erwähnten Art weiterzubilden, wobei die Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zum schnellen Wechsel der Strukturierung von Austrittspupillen von Objektfeldpunkten einer Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage geeignet

sein soll.

[0054] Diese Aufgabe wird durch die eingangs genannte Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) gelöst, die für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Nutzlichtwellenlänge λ der Projektionsbelichtungsanlage in der Einheit [nm] geeignet ist, wobei jeder Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung um mindestens eine Achse um einen maximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ drehbar ist und eine minimale Kantenlänge aufweist, wobei die minimale Kantenlänge größer ist als $200 \text{ [mm-nm]} \cdot \sin(\alpha) / \lambda$

[0055] Von den Erfindern wurde erkannt, dass sich ein schneller Wechsel zwischen zwei annularen Settings, die sich nur geringfügig im äußeren und/oder inneren σ unterscheiden, mit hoher Genauigkeit, zeitlich stabil, sowie reproduzierbar mit einer Projektionsbelichtungsanlage mit einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) einfacher realisieren lässt, sofern eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit mehr als 40000 Spiegeln mit einer Kantenlänge von unter $100 \mu\text{m}$ und einem maximalen Kippwinkel von mehr als 4° bei einer Wellenlänge von z. B. 193 nm hierfür zur Verfügung steht. Dann nämlich lässt sich die Strukturierung der Austrittspupille sehr fein durch Spots der einzelnen Spiegel zusammensetzen und die Projektionsbelichtungsanlage in einem für den Nutzer akzeptablen Bauraum unterbringen, wie die folgenden Überlegungen zeigen.

[0056] Insbesondere geben die folgenden Überlegungen jedoch auch und vor allem Handlungsanweisungen für Mehrfachspiegelanordnungen (Multi-Mirror-Array, MMA) mit weniger als 40000 Spiegeln und/oder maximalen Spiegelkippwinkeln von weniger als 4° .

[0057] Der Spottdurchmesser eines einzelnen Spiegels der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) ergibt sich, bei einer idealen Fourieroptik zwischen der Feldebene der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) und der Pupillenebene der Fourieroptik, in dieser Ebenen aus dem Produkt der Brennweite der Fourieroptik und dem vollen Divergenzwinkel des Teils des Beleuchtungsstrahlbündels, welches den einzelnen Spiegel verlässt. Andererseits ergibt sich der Radius der Pupille in der Pupillenebene aus dem Produkt der Brennweite der Fourieroptik und dem maximalen Kippwinkels eines einzelnen Spiegels. Hieraus folgt, dass sich als Maß für die Auflösung oder Rasterung in der Pupillenebene das Verhältnis von maximalem Kippwinkel eines Einzelspiegels zu vollem Divergenzwinkel des Teils des Beleuchtungsstrahlbündels nach dem Einzelspiegel eignet. Ein niedriger Divergenzwinkel und ein hoher maximaler Kippwinkel sorgen somit für eine hohe Auflösung in der Pupille, wie sie zum Wechseln

zwischen annularen Settings mit nur geringem Unterschied im äußeren oder inneren σ notwendig ist. Ein niedriger Divergenzwinkel, als erste Möglichkeit, die Auflösung in der Pupille zu steigern, sorgt jedoch auch für kleine Spots in der Pupille und damit zwangsläufig auch für eine geringe Durchmischung des Lichts der Spots in der Pupille. Dies führt dazu, dass die Strukturierung der Austrittspupille von den zeitlichen und/oder räumlichen Fluktuationen der Lichtquelle abhängig wird, siehe hierzu die obige Diskussion der Lichtmischungseigenschaften eines DOE.

[0058] Eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer hohen Anzahl von Spiegeln von mehr als 40000 kann bei einem sehr niedrigen Divergenzwinkel dafür Sorge tragen, dass ein Bereich einer Austrittspupille durch viele Spiegel ausgeleuchtet wird, so dass eine Mittelung über diese Spiegel und damit eine Entkopplung von den zeitlichen und/oder räumlichen Fluktuationen der Lichtquelle erfolgt. Eine solche Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit etwa 40000 Spiegeln ist derzeit technologisch nur sehr aufwendig umsetzbar. Darüber hinaus sind Mehrfachspiegelanordnungen (Multi-Mirror-Array, MMA) mit hohen Werten für den maximalen Kippwinkel von mehr als 4° , eine weitere Möglichkeit, die Auflösung in der Pupille zu steigern. Solche Mehrfachspiegelanordnungen (Multi-Mirror-Array, MMA) sind derzeit technologisch ebenfalls nur sehr aufwendig umsetzbar.

[0059] Neben der Auflösung in der Pupille ist auch die Größe der Pupille eine Randbedingung, die es zu beachten gilt.

[0060] In einer Pupillenebene einer Beleuchtungsoptik befindet sich in der Regel ein felderzeugendes Element (field defining element, FDE) mit intrinsischer Lichtmischung oder ein refraktives optisches Element (ROE) mit nachfolgender Lichtmischung in einer nachfolgenden Feldebene. Die Lichtmischung dient in beiden Fällen zur Erzeugung einer homogenen Ausleuchtung des Objektfeldes der Beleuchtungsoptik. Die funktionale Auslegung dieser Elemente in der Pupillenebene erfordert eine gewisse Mindestgröße der Pupille. Die Größe der Pupille in der Pupillenebene wird durch den maximalen Kippwinkel und durch die Brennweite der Fourieroptik zwischen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) und Pupillenebene bestimmt. Somit ist es z. B. möglich, wenn der maximale Kippwinkel nicht weiter erhöht werden kann, die Brennweite der Fourieroptik zu erhöhen. Da die doppelte Brennweite der Fourieroptik aber auch den Abstand der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) von der nachfolgenden Pupillenebene definiert, sind üblicherweise einer beliebigen Erhöhung der Brennweite bauraumtechnische Grenzen gesetzt.

[0061] Neben der Auflösung in der Pupille und der Größe der Pupille sind auch der Lichtverlust in der Beleuchtungsoptik und das Falschlicht in der Pupille Randbedingungen, die es zu beachten gilt. Der Lichtverlust in der Beleuchtungsoptik führt zu einer Reduzierung des Durchsatzes an Substraten bzw. Wafern einer Projektionsbelichtungsanlage. Das Falschlicht in der Pupille, z. B. verursacht durch Streulicht oder Geisterbilder, führt im schlimmsten Fall dazu, dass gewisse gewünschte Strukturierungen der Austrittspupille nicht realisiert werden können. In der Regel wird das Falschlicht in der Pupille aber dazu führen, dass ein Wechsel zwischen annularen Settings, die sich nur geringfügig im äußeren oder inneren σ unterscheiden, nicht möglich sind, da durch das Falschlicht eine feine Auflösung in der Pupille verhindert wird. Sollen Lichtverlust und Falschlicht in einer Beleuchtungsoptik mit einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) vermieden werden, so sollte beachtet werden, dass es aufgrund von Beugungseffekten, und somit abhängig von der Wellenlänge λ des Beleuchtungslichts der Projektionsbelichtungsanlage, Untergrenzen für die minimale Kantenlänge eines Spiegels einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) gibt.

[0062] Neben den oben genannten Randbedingungen sind auch die Kosten einer Beleuchtungsoptik als eine weitere Randbedingung zu beachten. Daraus folgt, dass eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) und somit die Fläche des einzelnen Spiegels der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) auch nicht beliebig groß gemacht werden kann, da die Fläche der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zusammen mit dem maximalen Kippwinkel den Lichtleitwert (engl. geometrical flux) bestimmt, der für den Durchmesser und somit für die Kosten der nachfolgenden Optik verantwortlich ist. Ferner wird dadurch die Größe des Objektfeldes der Beleuchtungsoptik bei einer gegebenen numerischen Apertur NA ebenfalls mitbestimmt.

[0063] Die vorliegende Erfindung nutzt in der erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) die obigen Erkenntnisse für eine Beleuchtungsoptik mit einer Nutzlichtwellenlänge λ in der Einheit [nm]. Dabei ist jeder Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung um mindestens eine Achse um einen maximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ drehbar und weist eine minimale Kantenlänge auf, wobei die minimale Kantenlänge größer ist als $200 \text{ [mm}\cdot\text{nm]}\cdot\sin(\alpha)/\lambda$. Damit ergibt sich als Vorteil einer Beleuchtungsoptik mit einer solchen erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), einen schnellen Wechsel der Strukturierung von Austrittspupillen von Objektfeldpunkten einer Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage zu ermöglichen, die sich nur geringfügig im äußeren und/oder inneren σ unterscheiden. Dabei

erfolgt dieser Wechsel genau, zeitlich stabil, sowie reproduzierbar.

[0064] Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen zu der dargestellten erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung und aus der Beschreibung der Ausführungsbeispiele anhand der Zeichnungen.

[0065] Es ist eine weitere, vierte Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie weiterzubilden.

[0066] Diese vierte Aufgabe wird durch das eingangs genannte optische System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie gelöst. Dabei weist das erfindungsgemäße optische System ein Beleuchtungsstrahlbündel mit einer Divergenz und eine Beleuchtungslichtrichtung von der Lichtquelle zur Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) auf, wobei die Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels in Beleuchtungslichtrichtung hinter dem optischen System weniger als das fünffache der Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels vor dem optischen System beträgt.

[0067] Es wurde von den Erfindern der vorliegenden Erfindung erkannt, dass eine räumliche Homogenisierung der Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) einer Beleuchtungsoptik durch ein erfindungsgemäßes optisches System der Beleuchtungsoptik für eine zeitliche Stabilisierung der Ausleuchtung auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) und somit für eine zeitliche Stabilisierung der Intensitätsverteilung in den Austrittspupillen sorgt. Somit werden die Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) und die Intensitätsverteilung in den Austrittspupillen durch das optische System zur Homogenisierung von den zeitlichen und/oder räumlichen Fluktuationen der Lichtquelle der Projektionsbelichtungsanlage entkoppelt. Wie oben in der Diskussion des Zusammenhangs von vollem Divergenzwinkel und Auflösung in der Pupille ausgeführt, haben die Erfindern darüber hinaus erkannt, dass das optische System zur Homogenisierung der Ausleuchtung auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) die Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels nicht wesentlich erhöhen darf, da sonst die notwendige Auflösung in der Pupille für einen Wechsel von annularen Settings, die sich nur in geringem Umfang im äußeren und/oder inneren σ unterscheiden, nicht gegeben ist.

[0068] Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung

ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen zu dem dargestellten erfindungsgemäßen optischen System und aus der Beschreibung der Ausführungsbeispiele anhand der Zeichnungen.

[0069] Es ist eine weitere, fünfte Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine optische Konditionierungseinheit zur Konditionierung eines Beleuchtungsstrahlbündels eines Lasers für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie weiterzubilden.

[0070] Diese fünfte Aufgabe wird gelöst durch die eingangs genannte optische Konditionierungseinheit zur Konditionierung eines Beleuchtungsstrahlbündels eines Lasers für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie. Dabei hat der Laser mehr als eine kohärente Lasermode und einen Laserausgang. Ferner weist das Beleuchtungsstrahlbündel eine Divergenz, ein Strahl- oder Bündelprofil und einen Polarisationszustand auf, wobei die erfindungsgemäße optische Konditionierungseinheit mindestens die Divergenz und/oder das Strahl- bzw. Bündelprofil und/oder den Polarisationszustand des Beleuchtungsstrahlbündels zwischen dem Laserausgang und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-array, MMA) ändert.

[0071] Es wurde von den Erfindern erkannt, dass es unter Umständen günstig ist die Größe der Ausleuchtung und/oder den Divergenzwinkel und/oder den Polarisationszustand des Beleuchtungsstrahlbündels beim Auftreffen auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zu konditionieren, präparieren oder zu verändern, damit ein schneller Wechsel der Strukturierung von Austrittspupillen von Objektfeldpunkten zwischen zwei annularen Settings bzw. gewünschten Intensitätsverteilungen in den Austrittspupillen, die sich nur geringfügig im äußeren und/oder inneren σ unterscheiden, erfolgen kann. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn zwischen zwei annularen Settings gewechselt wird, die sich stark in der Größe der Intensitätsverteilung in den Austrittspupillen unterscheiden. Hierbei ist es unter Umständen günstiger für eines der beiden Settings eine andere Anzahl von Spiegeln der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) und/oder einen anderen Divergenzwinkel des Beleuchtungsstrahlbündels zu wählen, siehe obige Diskussion zur Auswirkung der Anzahl von Spiegeln auf die Stabilisierung einer Intensitätsverteilung in den Austrittspupillen und zur Auswirkung des vollen Divergenzwinkels eines Teils des Beleuchtungsstrahlbündels nach einem Spiegel auf die Auflösung in der Austrittspupille. Ebenso kann es für die Abbildungseigenschaften eines der beiden Settings günstig sein, den Polarisationszustand zu ändern. Auch dies ist umso wahrscheinlicher, je stärker sich die beiden annularen Settings in der Größe der Intensitätsverteilung in den Austrittspupillen unterscheiden.

[0072] Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen zu der dargestellten erfindungsgemäßen optischen Konditionierungseinheit und aus der Beschreibung der Ausführungsbeispiele anhand der Zeichnungen.

[0073] Eine weitere, sechste Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauteile sowie ein hierdurch herstellbares Bauelement anzugeben.

[0074] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauteile mit folgenden Schritten gelöst:

- Bereitstellen eines Substrats, auf das zumindest teilweise eine Schicht aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist,
- Bereitstellen einer Maske, die abzubildende Strukturen aufweist und/oder,
- Bereitstellen einer optischen Konditionierungseinheit für eine Beleuchtungsoptik und/oder,
- Bereitstellen eines optischen Systems für eine Beleuchtungsoptik und/oder,
- Bereitstellen einer Mehrfachspiegelanordnung für eine Beleuchtungsoptik und/oder,
- Bereitstellen einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage und/oder,
- Bereitstellen einer Projektionsbelichtungsanlage,
- Projizieren wenigstens eines Teils der Maske auf einen Bereich der Schicht mithilfe einer Projektionsoptik der Projektionsbelichtungsanlage, sowie durch ein mikrostrukturiertes Bauelement, das nach einem derartigen Verfahren hergestellt ist.

[0075] Vorteile dieser Gegenstände ergeben sich aus den oben in Zusammenhang mit der Projektionsbelichtungsanlage, der Beleuchtungsoptik, der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), dem optischen System und der optischen Konditionierungseinheit angegebenen Vorteilen und aus der Beschreibung der Ausführungsbeispiele anhand der Zeichnungen.

[0076] Die Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnungen näher erläutert. In diesen zeigen:

[0077] [Fig. 1](#) schematisch eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Beleuchtungsoptik mit einem Stab als Integrator als Stand der Technik;

[0078] [Fig. 2](#) schematisch eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Beleuchtungsoptik mit einem FDE als Integrator als Stand der Technik;

[0079] [Fig. 3](#) schematisch eine erfindungsgemäße Pupillenformungseinheit einer erfindungsgemäßen Beleuchtungsoptik mit erfindungsgemäßer Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA);

[0080] [Fig. 4](#) schematisch ein erfindungsgemäßes optisches System zur Stabilisierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA);

[0081] [Fig. 5](#) schematisch ein erfindungsgemäßes optisches System zur Stabilisierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer Intensitätsverteilung über die erfindungsgemäße Mehrfachspiegelanordnung;

[0082] [Fig. 6](#) schematisch ein erfindungsgemäßes optisches System zur Stabilisierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einem erfindungsgemäßen periodischen Phasenelement;

[0083] [Fig. 7](#) schematisch ein erfindungsgemäßes optisches System zur Stabilisierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einem erfindungsgemäßen Phasenelement mit zufälligem Phasenverlauf;

[0084] [Fig. 8](#) schematisch ein erfindungsgemäßes optisches System zur Stabilisierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einem erfindungsgemäßen rotierenden Phasenelement;

[0085] [Fig. 9](#) schematisch einen Strahlengang eines Beleuchtungsstrahlungsbündels bis zur ersten Pupillenebene nach der erfindungsgemäßen Pupillenformungseinheit;

[0086] [Fig. 10](#) schematisch einen Strahlengang eines Beleuchtungsstrahlungsbündels bis zur ersten Pupillenebene nach der erfindungsgemäßen Pupillenformungseinheit mit einem erfindungsgemäßen Linsenarray;

[0087] [Fig. 11](#) schematisch eine erfindungsgemäße Konditionierungseinheit zur Konditionierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einem erfindungsgemäßen Misch- und/oder Streuelement;

[0088] [Fig. 12](#) schematisch eine erfindungsgemäße Konditionierungseinheit zur Konditionierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einem erfindungsgemäßen Misch- und/oder Streuelement und einer erfindungsgemäßen Symmetrisierungseinheit;

[0089] [Fig. 13](#) schematisch eine erfindungsgemäße Symmetrisierungseinheit für eine erfindungsgemäße Konditionierungseinheit;

[0090] [Fig. 14](#) schematisch eine erfindungsgemäße Konditionierungseinheit zur Konditionierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einem erfindungsgemäßen Misch- und/oder Streuelement und einer erfindungsgemäßen Symmetrisierungseinheit und einer erfindungsgemäßen Blende;

[0091] [Fig. 1–Fig. 5](#) schematisch ein erfindungsgemäßes Phasenelement für eine erfindungsgemäße Konditionierungseinheit;

[0092] [Fig. 16](#) schematisch ein erfindungsgemäßes optisches System zur Stabilisierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einem erfindungsgemäßen Wabenkondensator als erfindungsgemäßer Integrator und einer erfindungsgemäßen Tele- bzw. Relais-Optik;

[0093] [Fig. 17](#) schematisch ein erfindungsgemäßes optisches System zur Stabilisierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einem erfindungsgemäßen Stab oder einem erfindungsgemäßen Lichtleiter als erfindungsgemäßen Integrator und einer erfindungsgemäßen Tele- bzw. Relais-Optik;

[0094] [Fig. 18](#) schematisch ein erfindungsgemäßes optisches System zur Stabilisierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einem erfindungsgemäßen Plate-Mixer als erfindungsgemäßen Integrator und einer erfindungsgemäßen Tele- bzw. Relais-Optik;

[0095] [Fig. 19](#) schematisch ein erfindungsgemäßes optisches System zur Stabilisierung der Ausleuchtung einer erfindungsgemäßen Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einem erfindungsgemäßen Cube-Mixer als erfindungsgemäße optische Konditionierungseinheit, welche gleichzeitig als einfacher erfindungsgemäßer Integrator dient und einer erfindungsgemäßen Tele- bzw. Relais-Optik;

[0096] Die [Fig. 1](#) zeigt schematisch ein Beispiel einer bekannten Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie. Die Lichtquelle **1** erzeugt ein Beleuchtungsstrahlbündel **12** dass in einer Strahlauweitungs-optik **14** angepasst wird. Anschließend trifft das angepasste Beleuchtungsstrahlbündel **12** auf ein diffraktives optisches Element **3a** (DOE) auf. Das diffraktive optische Element **3a** steht in einer Feldebene der Beleuchtungsoptik und erzeugt, je nach aufgeprägten oder umfassenden diffraktive Strukturen, eine Beleuchtungswinkelverteilung. Das Beleuch-

tungsstrahlbündel **12** wird dann, mit der durch das diffraktive optische Element aufgeprägten Beleuchtungswinkelverteilung, durch das optische Modul **2** in eine nachfolgende Pupillenebene übergeführt. Diese nicht näher dargestellte Pupillenebene befindet sich in der Nähe des refraktiven optischen Elementes **3b**. Das optische Modul **2** umfasst zur weiteren Strukturierung des Beleuchtungsstrahlbündels **12** ein Zoomsystem, schematisch dargestellt durch die bewegliche Linse **22**, und ein Axikon, schematisch dargestellt durch die beiden Elemente **21**. Durch das auseinanderfahren der Axikonelemente **21** ist es möglich, das innere σ eines Settings, bzw. die Berandungen des Querschnitts des Beleuchtungsstrahlbündels eines Beleuchtungssettings einzustellen. Andererseits ist es möglich, durch das Verfahren des Zooms bzw. der schematisch dargestellten Zoomlinse **22** das äußere σ eines Beleuchtungssettings einzustellen, oder allgemein die äußere Berandung des Beleuchtungsstrahlbündelquerschnitts. Durch eine geeignete Auslegung des diffraktiven optischen Elementes **3a** und durch eine geeignete Wahl der Position der Axikonelemente **21** und des Zooms **22** ist es möglich, am Ausgang des optischen Moduls **2**, in einer Pupillenebene in der Nähe des refraktiven optischen Elements **3b**, eine beliebige gewünschte Intensitätsverteilung darzustellen, d. h. zu erzeugen. Dieser Intensitätsverteilung des Beleuchtungsstrahlbündels **12** in der Pupillenebene wird durch das refraktive optische Element **3b** eine Feldwinkelverteilung aufgeprägt, um eine gewünschte Feldform in einer Feldebene zu erhalten, wie z. B. eine rechteckige Feldform mit einem Aspektverhältnis von 10:1. Diese Feldwinkelverteilung des Beleuchtungsstrahlbündels **12** in der Pupillenebene, wird durch die nachfolgende Feldlinsenoptik **4** in ein Beleuchtungsfeld **5e** am Eingang eines Stabes **5** überführt. Das beleuchtete Feld **5e** am Eingang des Stabes **5** befindet sich dabei in einer Feldebene der Beleuchtungsoptik und besitzt eine Beleuchtungswinkelverteilung mit einem maximalen Beleuchtungswinkelwert der in der Regel, aber nicht notwendigerweise, der numerischen Apertur der vorhergehenden Feldlinsenoptik **4** entspricht. Das Feld **5e** besitzt im Gegensatz zu dem Feld bei dem diffraktiven Element **3a** den vollen Lichtleitwert der Beleuchtungsoptik. Dieser Lichtleitwert (engl. geometrical flux) ist das Ergebnis einer zweifachen Einführung von Lichtleitwerten. Zuerst wurde durch das diffraktive optische Element **3a** Lichtleitwert für die Pupille eingeführt, um die Beleuchtungswinkelverteilung in einer nachfolgenden Feldebene einzustellen. In einem zweiten Schritt wurde durch das refraktive optische Element **3b** Lichtleitwert für das Feld eingeführt, um die ausgeleuchtete Feldform in der nachfolgenden Feldebene einzustellen, so dass nachfolgend dem optischen Element **3b** der volle Lichtleitwert der Beleuchtungsoptik zur Verfügung steht. Das beleuchtete Feld **5e** am Eingang des Stabes **5** wird durch den Stab **5** zum Ausgang des Stabes in ein Feld **5a** überführt. Dabei entsprechen die

maximalen Beleuchtungswinkel im Feld **5a** des Stabausgangs denjenigen im Feld **5e** des Stabeingangs. Durch vielfache Totalreflexionen an den Stabwänden des Stabes **5** entstehen am Stabaustritt in den Austrittspupillen der Feldpunkte des Feldes **5a** sekundäre Lichtquellen mit der Feldform des Feldes **5e** am Stabeintritt als Form jeder einzelnen sekundären Lichtquelle. Durch diesen Kaleidoskopeffekt des Stabes **5** ist das Feld **5a** hinsichtlich der Intensitätsverteilung über das Feld homogenisiert, da in diesem Feld **5a** sozusagen das Licht vieler sekundärer Lichtquellen überlagert wird.

[0097] Eine Feldblende **51** begrenzt das Feld **5a** in seiner lateralen Ausdehnung und sorgt für einen scharfen Hell-Dunkelübergang des Feldes. Ein nachfolgendes, sogenanntes REMA-Objektiv **6** bildet das Feld **5a** in die Retikelebene **7** ab. Dabei werden die Hell-Dunkelkanten der Feldblende **51** scharf in die Objekt- bzw. Feldebene **7** transferiert. Aus dieser Funktion der scharfen Kantenabbildung der Feldblende **51** in die Retikel- oder Feldebene **7**, auch als „Maskieren“ des Retikels bezeichnet (im Englischen „reticle masking“), resultiert der Name REMA (REticleMAsking) dieser Objektivgruppe. Das REMA-Objektiv **6** besteht z. B. aus einer Kondensor-Gruppe **61**, einem Pupillenbereich in der Nähe einer Pupillenebene **62**, einer Pupillenlinsengruppe **63**, einem Umlenkspiegel **64** und einer abschließenden Feldlinsengruppe **65**.

[0098] In dem Pupillenbereich **62** des REMA-Objektivs können beispielweise verschiedenste Manipulationen der Pupille im Hinblick auf Transmission oder Polarisation vorgenommen werden. Das REMA-Objektiv **6** sorgt für eine Abbildung des Feldes **5a** mit den scharfen Feldekanten der Feldblende **51** in die Retikelebene oder Feldebene **7**. Dabei wird auch die Beleuchtungswinkelverteilung des Feldes **5a** in eine entsprechende Beleuchtungswinkelverteilung in der Feldebene **7** übersetzt. Jeder Objektfeldpunkt des Beleuchtungsfeldes in der Retikelebene bzw. Feldebene **7** erhält somit seine Beleuchtungswinkelverteilung bzw. seine Austrittspupille.

[0099] Im Allgemeinen beleuchtet ein REMA-Objektiv **6** die Retikel- bzw. Feldebene **7** telezentrisch, d. h., die Beleuchtungswinkelverteilung eines jeden Objektfeldpunktes um die optische Achse bzw. einer hierzu parallelen Achse ist symmetrisch. Die rückwärtige, in Richtung der Beleuchtungsoptik bzw. Lichtquelle **1** geometrische Verlängerung der Beleuchtungslichtstrahlen in einem Objektfeldpunkt der Feldebene **7** ergibt im unendlichen die virtuelle Austrittspupille der Beleuchtungsoptik für diesen Objektfeldpunkt. Die vorwärtige Projektion der Beleuchtungswinkelverteilung eines Objektfeldpunktes in der Objektfeldebene **7** in Richtung der nachfolgenden Projektionsoptik **8** ergibt im unendlichen eine reelle Austrittspupille der Beleuchtungsoptik für diesen be-

trachteten Objektfeldpunkt. Die virtuelle bzw. reelle Austrittspupille der Beleuchtungsoptik ist eine direkte Konsequenz im Falle eines telezentrischen Strahlengangs der Beleuchtungsoptik in der Feldebene **7**. Dabei ist die Höhe eines Punktes in der Austrittspupille gegenüber dem Zentrum der Austrittspupille eines Objektfeldpunktes gegeben durch den Tangens des Beleuchtungsstrahlwinkels dieses Objektfeldpunktes multipliziert mit der Entfernung der Austrittspupille.

[0100] Die Objektfeldebene **7** stellt die Trennebene zwischen einer Beleuchtungsoptik und einer Projektionsoptik, z. B. einem Projektionsobjektiv **8**, einer Projektionsbelichtungsanlage dar. Die Beleuchtungsoptik hat die Aufgabe, ein scharfkantig begrenztes Feld homogen zu beleuchten und dabei die Beleuchtungswinkelverteilung bzw. Austrittspupille eines Objektfeldpunktes entsprechend den Vorgaben zu strukturieren.

[0101] Die Strukturierung einer Beleuchtungswinkelverteilung eines Objektfeldpunktes ist hierbei im Rahmen dieser Anmeldung gleichbedeutend mit Strukturierung einer Intensitätsverteilung in der Austrittspupille eines Objektfeldpunktes, da ein bestimmter Beleuchtungswinkel eines Objektfeldpunktes mit dem entsprechenden Ort in der Austrittspupille über die Tangensbedingungen verknüpft ist.

[0102] In die Objektfeldebene **7** werden zur Chip-Produktion Retikels bzw. Masken eingebracht. Diese Masken werden mittels des durch die Beleuchtungsoptik präparierten Beleuchtungstrahlbündels **12** beleuchtet. Das Projektionsobjektiv **8** bildet die beleuchtete Maske in eine weitere Feldebene, die Bildfeldebene **10** ab. Dort befindet sich ein Substrat **9**, welches an seiner Oberseite eine photosensitive Schicht trägt. Die Maskenstrukturen werden durch das Projektionsobjektiv **8** in entsprechende belichtete Bereiche der photosensitiven Schicht übertragen. Hierbei gibt es im allgemeinen zwei unterschiedliche Arten von Projektionsbelichtungsanlagen, den sogenannten Stepper, bei dem das ganze Maskenfeld in einem Belichtungsschritt auf das photosensitive Substrat **9** übertragen wird, und den sogenannten Scanner, bei dem nur Teile der Maske auf Teile des Substrates **9** in einem Belichtungsschritt übertragen werden, und dabei die Maske und das Substrat entsprechend synchronisiert bewegt werden, um die ganze Maske zu übertragen.

[0103] Nach dem Belichtungsprozessschritt wird das belichtete Substrat **9** nachfolgenden Prozessschritten unterworfen, wie z. B. dem Ätzen. In der Regel erhält das Substrat **9** anschließend eine neue photosensitive Schicht und wird einem neuen Belichtungsprozessschritt unterzogen. Diese Prozessschritte werden solange wiederholt, bis der fertige Mikrochip bzw. das fertige mikrostrukturierte Bauelement erhalten wird.

[0104] **Fig. 2** zeigt schematisch ein weiteres Beispiel einer bekannten Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie. Die Elemente in **Fig. 2**, die denjenigen in **Fig. 1** entsprechen, sind dabei mit gleichen Bezugszeichen bezeichnet.

[0105] Die Projektionsbelichtungsanlage in **Fig. 2** unterscheidet sich von der Projektionsbelichtungsanlage in **Fig. 1** lediglich in der Beleuchtungsoptik. Die Beleuchtungsoptik in **Fig. 2** unterscheidet sich von der Beleuchtungsoptik in **Fig. 1** dadurch, dass der Stab **5** zur Erzeugung sekundärer Lichtquellen fehlt. Ferner unterscheidet sich die Beleuchtungsoptik in **Fig. 2** dadurch, dass ein felddefinierendes Element **3c** (auf Englisch: field defining element, FDE) nicht nur für die Erzeugung der notwendigen Feldwinkel in der Pupillenebene sorgt, sondern auch, durch den Aufbau als zweistufiger Wabenkondensator, für die Erzeugung der sekundären Lichtquellen sorgt. Somit beinhaltet das felderzeugende Element **3c** in **Fig. 2** sowohl die Funktionalität des refraktiven optischen Elements (ROE) **3b** aus **Fig. 1**, als auch die Funktionalität des Stabes **5** aus **Fig. 1**. Das Felderzeugende Element **3c**, ausgeführt als zweistufiger Wabenkondensator, führt einerseits die notwendigen Feldwinkel in der Pupillenebene ein und erzeugt andererseits die sekundären Lichtquellen in der Pupillenebene. Dadurch wird in den nachfolgenden Feldebene der Beleuchtungsoptik eine entsprechende Feldform mit einer gewünschten homogenisierten Intensitätsverteilung über das Feld durch die Überlagerung von Licht der sekundären Lichtquellen erzeugt.

[0106] Die **Fig. 3** zeigt schematisch eine erfindungsgemäße Pupillenformungseinheit für eine Beleuchtungsoptik für eine lithographische Projektionsbelichtungsanlage, wie sie z. B. in **Fig. 1** oder **Fig. 2** dargestellt ist. Hierbei dient die erfindungsgemäße Pupillenformungseinheit aus **Fig. 3** als Ersatz für die Pupillenformungseinheit **2** dieser Projektionsbelichtungsanlage gemäß den **Fig. 1** oder **Fig. 2**. Der Einsatz der Pupillenformungseinheit der **Fig. 3** ist jedoch nicht auf diese Projektionsbelichtungsanlagen, wie in **Fig. 1** oder **Fig. 2** dargestellt, begrenzt. Die Pupillenformungseinheit der **Fig. 3** endet in der Pupillenebene **44**, die sich in **Fig. 1** in der Nähe des refraktiven optischen Elements **3b** und in **Fig. 2** in der Nähe des Felderzeugenden Elementes **3c** befindet. Anstatt einem DOE **3a** in **Fig. 1** und in **Fig. 2** sorgt eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) **38** für eine Beleuchtungswinkelverteilung die sich in der Pupillenebene **44** zu einer Intensitätsverteilung in dieser Pupillenebene überlagert. Diese Intensitätsverteilung der Pupillenebenen **44** entspricht der Intensitätsverteilung in der Austrittspupille bzw. der Beleuchtungswinkelverteilung eines Objektfeldpunktes, sofern eine ideale Fourieroptik zur Übertragung zugrunde gelegt wird. Ein Beleuchtungsstrahlbündel **12** einer Lichtquelle wird durch ein Umlenkspiegel **30** durch einen Wabenkondensator **32** in einzelne Teilbe-

leuchtungsstrahlbündel zerlegt und nachfolgend durch eine Relais-Optik **34**, bzw. einen Kondensator **34** auf ein Linsenarray **36** geleitet. Dieses Linsenarray **36** konzentriert die Teil-Beleuchtungsstrahlbündel auf die einzelnen Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung **38**. Die einzelnen Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung **38** können unterschiedlich gekippt werden, d. h. wenigstens ein Teil der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung sind um wenigstens eine Achse zur Veränderung eines Einfallswinkels des zugehörigen Teilbeleuchtungsstrahlbündels drehbar, so dass in der Pupillenebene **44** unterschiedliche Intensitätsverteilungen einstellbar sind. Die von den Spiegeln der Mehrfachspiegelanordnung **38** ausgehenden Teilbeleuchtungsstrahlbündel werden durch eine nachfolgende Streuscheibe **40** und eine nachfolgende Kondensoroptik **42** in die Pupillenebene **44** abgebildet.

[0107] **Fig. 4** zeigt schematisch und vergrößert den Abschnitt der **Fig. 3** zwischen Spiegel **30** und Mehrfachspiegelanordnung **38**. Hierbei wurde jedoch auf die Darstellung eines optionalen Linsenarrays **36** zwischen der Kondensoroptik **34** und der Mehrfachspiegelanordnung **38** verzichtet. In der **Fig. 4** ist ein Teilbeleuchtungsstrahlbündel des Beleuchtungsstrahlbündels **12** der **Fig. 3** dargestellt, wie es zwischen Wabenkondensator **32** und dem Kondensator **34** auf die Mehrfachspiegelanordnung **38** abgebildet wird. Der Kondensator **34** bildet hierbei z. B. eine Fourieroptik in dessen vorderen Brennebene sich die zweite Wabenkanalplatte des Wabenkondensators **32** befindet, und in dessen hinterer Brennebene sich die Mehrfachspiegelanordnung **38** befindet. Zur Abbildung der Strahlengänge der Beleuchtungsstrahlen des Teilbeleuchtungsstrahlbündels sind die Abbildungsstrahlengänge der Beleuchtungsstrahlen in Form von durchgezogenen und gestrichelten Linien dargestellt. Die optische Achse ist in Form einer strichpunktieren Linie dargestellt. Die Abbildungsstrahlengänge in Form einer durchgezogenen Linie, stellen diejenigen Beleuchtungsstrahlen des Teilbeleuchtungsstrahlbündels dar, die den entsprechenden Wabenkanal des Wabenkondensators **32** unter einem größtmöglichen Winkel treffen. Die Abbildungsstrahlengänge in gestrichelter Form, stellen diejenigen Beleuchtungsstrahlen des Teilbeleuchtungsstrahlbündels dar, die den einzelnen Wabenkanal des Wabenkondensators **32** parallel zur optischen Achse und somit unter einem kleinstmöglichen Winkel treffen.

[0108] Somit ist die Divergenz des Teilbeleuchtungsstrahlbündels vor dem Wabenkondensator **32** gegeben durch den vollen Öffnungswinkel zwischen den Abbildungsstrahlengängen der Beleuchtungsstrahlen des Teilbeleuchtungsstrahlbündels in Form der durchgezogenen Linie. Diese Divergenz ist in **Fig. 4** symbolisch durch den ausgefüllten Kreis **a** dargestellt. Dabei soll die ausgefüllte Fläche des Kreises

a ein Maß für die Divergenz des Teilbeleuchtungsstrahlbündels sein.

[0109] Nach dem Wabenkondensator **32** sind es die Abbildungsstrahlengänge in Form der gestrichelten Linie, die die Divergenz des Teilbeleuchtungsstrahlbündels bestimmen. Diese Divergenz ist wiederum symbolisch dargestellt in Form eines ausgefüllten Kreises b. Der ausgefüllte Kreis b hat eine größere Fläche als der ausgefüllte Kreis a vor dem Wabenkondensator und repräsentiert damit die divergenzerhöhende Wirkung eines Wabenkondensators **32** auf ein Teilbeleuchtungsstrahlbündel.

[0110] Die [Fig. 5](#) zeigt im Gegensatz zur [Fig. 4](#) die Abbildung zweier Teilbeleuchtungsstrahlbündel des Beleuchtungsstrahlbündels **12** durch zwei Wabenkanäle des Wabenkondensators **32** in Form von durchgezogenen und gestrichelten Linien auf die Mehrfachspiegelanordnung **38**. In beiden dargestellten Abbildungsstrahlengängen der beiden Teilbeleuchtungsstrahlbündel handelt es sich um die Abbildungsstrahlengänge von Beleuchtungsstrahlen die parallel zur optischen Achse und somit senkrecht auf den Wabenkondensator **32** auftreffen.

[0111] Anhand der [Fig. 5](#) ist zu erkennen, dass die beiden Abbildungsstrahlengänge der Teilbeleuchtungsstrahlbündel durch den Kondensator **34** auf der Mehrfachspiegelanordnung **38** überlagert werden. Dies ist nochmals verdeutlicht anhand der Abbildungsstrahlengänge **12a** und **12b** aus den beiden Wabenkanälen des Wabenkondensators **32** dargestellt. Die Abbildungsstrahlengänge **12a** und **12b** überlagern sich am gleichen Ort auf der Mehrfachspiegelanordnung **38**, obwohl sie aus zwei verschiedenen Wabenkanälen stammen.

[0112] Besitzen die beiden dargestellten Teilbeleuchtungsstrahlbündel eine räumliche Kohärenz zueinander so kann dies, bei einer hohen räumlichen Kohärenz dazu führen, dass sich bei der Überlagerung der beiden Teilbeleuchtungsstrahlbündel auf der Mehrfachspiegelanordnung **38** periodische Intensitätsschwankungen über die Mehrfachspiegelanordnung **38** hinweg ergeben. Als Beispiel einer solchen Intensitätsschwankung über die Mehrfachspiegelanordnung **38** hinweg ist in [Fig. 5](#) die Funktion **100** dargestellt. Diese Funktion **100** wechselt periodisch zwischen einem Maximal- und einem Minimalwert als Funktion des Ortes über der Mehrfachspiegelanordnung **38**.

[0113] [Fig. 6](#) zeigt schematisch eine Erweiterung des Grundaufbaues aus [Fig. 5](#), bei dem zur Vermeidung der räumlichen Kohärenz ein periodisches Phasenelement **33a** eingesetzt wird. Im oberen Teil der [Fig. 6](#) ist der Abbildungsstrahlengang der beiden Teilbeleuchtungsstrahlbündel der oberen beiden Wabenkanäle des Wabenkondensators **32** für das umfas-

sende Teilbeleuchtungsstrahlbündel **121** als eine zur [Fig. 5](#) analoge Situation dargestellt. In [Fig. 6](#) ist angenommen, dass die beiden Teilbeleuchtungsstrahlbündel resultierend aus dem Teilbeleuchtungsstrahlbündel **121** der beiden oberen Wabenkanäle des Wabenkondensators **32** zueinander räumlich kohärent sind. Im Gegensatz zur [Fig. 5](#) befindet sich jedoch in [Fig. 6](#) zwischen den beiden Wabenkanalplatten des Wabenkondensators **32** ein periodisches Phasenelement **33a**. Dieses Phasenelement **33a** sorgt dafür, dass die beiden Teilbeleuchtungsstrahlbündel der oberen beiden Wabenkanäle des Wabenkondensators **32** gegeneinander in der Phase verschoben werden, sodass zusätzlich zur ersten räumlich periodischen Intensitätsverteilung über die Mehrfachspiegelanordnung **38** eine zweite räumlich periodische Intensitätsverteilung über die Mehrfachspiegelanordnung **38** resultiert, welche gegenüber der ersten räumlich verschoben ist. Die Funktion **100a** zeigt diese beiden räumlich gegeneinander verschobenen periodischen Intensitätsverteilungen über die Mehrfachspiegelanordnung **38**. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Intensität als Summe dieser beiden periodischen Intensitätsverteilungen nicht mehr zwischen dem Maximalwert und dem Minimalwert schwankt, sondern nur noch zwischen dem Maximalwert und einem mittleren Wert. Das heißt, das Phasenelement **33a** führt aufgrund seiner periodischen Phasenfunktion dazu, dass die räumlichen Interferenzerscheinungen über die Mehrfachspiegelanordnung **38** durch die räumliche Kohärenz der Teilbeleuchtungsstrahlbündel reduziert werden. Für das untere Teilbeleuchtungsstrahlbündel **122**, mit seinen beiden räumlich zueinander kohärenten Teilbeleuchtungsstrahlbündeln in den beiden unteren Wabenkanälen des Wabenkondensators **32**, gilt das gesagte entsprechend.

[0114] In [Fig. 7](#) ist schematisch eine analoge Situation zur [Fig. 6](#) dargestellt, wobei alternativ ein Phasenelement mit beliebiger Phasenfunktion **33b** vor dem Wabenkondensator **32** dazu benutzt die räumlichen Interferenzerscheinungen in der Intensitätsverteilung über die Mehrfachspiegelanordnung **38** zu reduzieren. Dabei wird die zweite notwendige räumliche Intensitätsverteilung über die Mehrfachspiegelanordnung **38** dadurch realisiert, indem die beiden Teilbeleuchtungsstrahlbündel der unteren beiden Wabenkanäle des Wabenkondensators **32** vor Eintritt in den Wabenkondensator **32** durch das Phasenelement **33b** gekippt werden. Die beiden zueinander räumlich kohärenten Teilbeleuchtungsstrahlbündel, angedeutet durch das einfallende Teilbeleuchtungsstrahlbündel **122**, werden durch die Verkippung vor dem Wabenkondensator **32**, bzw. der ersten Wabenkondensatorplatte des Wabenkondensators **32**, innerhalb der zweiten Wabenkondensatorplatte des Wabenkondensators **32** so verschoben, dass eine räumlich verschobene zweite periodische Intensitätsverteilung über der Mehrfachspiegelanordnung resultiert. Die Funkti-

on **100b** stellt die beiden räumlich zueinander verschobenen periodischen Intensitätsverteilung über die Mehrfachspiegelanordnung **38** dar. Es ist zu erkennen, dass die gesamte Intensität als Summe der beiden Intensitätsverteilungen mm nicht mehr zwischen einem Maximalwert und einem Minimalwert schwankt, sondern, dass die Schwankung der Intensität lediglich zwischen einem Maximalwert und einem gemittelten Wert schwankt. Die Reduktion der Abhängigkeit der räumlichen Intensitätsverteilung über die Mehrfachspiegelanordnung **38**, verursacht durch die räumliche Kohärenz der Teilbeleuchtungsstrahlbündel, erfolgt in **Fig. 7**, im Gegensatz zur **Fig. 6**, nicht dadurch, dass zwei räumlich kohärente Teilbeleuchtungsstrahlbündel durch ein periodisches Phasenelement zu zwei getrennten, räumlich gegeneinander verschobenen Intensitätsverteilungen beitragen, sondern dadurch, dass die beiden Teilbeleuchtungsstrahlbündel mit ihrer räumlichen Kohärenz zu einer periodischen Intensitätsverteilung beitragen, die durch das Phasenelement **33b** gegen die periodischen Intensitätsverteilung anderer räumlich kohärenter Teilbeleuchtungsstrahlbündel verschoben wird.

[0115] **Fig. 8** zeigt schematisch eine weitere Ausführungsform eines Phasenelementes **33c** zur Reduktion des Einflusses der räumlichen Kohärenz von Teilbeleuchtungsstrahlbündeln auf die räumliche Intensitätsverteilung über die Mehrfachspiegelanordnung **38**. Bei dem Phasenelement **33c** handelt es sich zum Beispiel um einen rotierbaren Keil der dafür sorgt, dass die räumliche Intensitätsverteilung über die Mehrfachspiegelanordnung **38** zeitlich derart hin- und herwandert, dass eine zeitlich gemittelte Gesamtintensitätsverteilung zwischen einem Maximalwert und einem gemittelten Wert schwankt. In **Fig. 8** ist hierzu eine Intensitätsverteilung **100c** dargestellt, die einer Momentanaufnahme der räumlichen Intensitätsverteilung über der Mehrfachspiegelanordnung **38** bei einer beliebigen festen Position des rotierbaren Phasenelementes **33c** darstellt. Bei Rotation des Phasenelementes **33c** bewegt sich diese Intensitätsverteilung **100c** entsprechend des in **Fig. 8** dargestellten Doppelpfeils, d. h. die Intensitätsverteilung über der Mehrfachspiegelanordnung **38** verschiebt sich zeitlich über die Oberfläche der Spiegelanordnung **38**, wodurch eine zeitliche Ausmischung der Intensität auf einem Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung resultiert.

[0116] Die **Fig. 9** zeigt schematisch den Abbildungsstrahlengang des Beleuchtungsstrahlbündels **12** vom Eintritt des Beleuchtungsstrahlbündels **12** in den Wabenkondensator **32** über den Einzelspiegel **38s** bis zur Pupillenebene **44**. Der Abbildungsstrahlengang in Form der durchgezogenen Linien kennzeichnet in **Fig. 9** diejenigen Beleuchtungsstrahlen, die jeweils durch die Randzone (im optischen Sinne) der einzelnen Pupillenwaben gelangen. Der Abbildungs-

strahlengang in Form der gestrichelten Linien in **Fig. 9** kennzeichnet diejenigen Beleuchtungsstrahlen die durch den Randbereich der jeweiligen Pupillenwabe gelangen. Die Strichpunktierte Linie in **Fig. 9** stellt die optische Achse dar. Alle dargestellten Abbildungsstrahlengänge in **Fig. 9** werden nach dem Wabenkondensator **32** durch den Kondensator **34** auf einen einzelnen Spiegel **38s** der Mehrfachspiegelanordnung **38** geführt. Von dort reflektiert werden alle dargestellten Abbildungsstrahlengänge durch den weiteren Kondensator **42** auf dem Flächenelement **44a** in der Pupillenebene **44** überlagert. Der Kondensator **42**, der in Strahlrichtung des Beleuchtungsstrahlbündels **12** nach der Mehrfachspiegelanordnung angeordnet ist, ist optional und kann insbesondere bei gekrümmten Spiegeln **38s** entfallen.

[0117] Die **Fig. 10** zeigt den gleichen Abbildungsstrahlengang wie **Fig. 9** jedoch mit einem Linsenarray **36** zwischen dem Kondensator **34** und der Mehrfachspiegelanordnung **38** mit den Einzelspiegeln **38s**. Das Linsenarray **36** sorgt nun für eine stärkere Konzentrierung bzw. Fokussierung der Abbildungsstrahlengänge auf dem einzelnen Spiegel **38s** der Mehrfachspiegelanordnung **38**. In der Ausführung nach **Fig. 10** werden die durchgezogenen und gestrichelten Abbildungsstrahlengänge durch den nachfolgenden Kondensator **42** nicht mehr in der Pupillenebene **44** überlagert, sondern ergänzen sich gegenüber dem Flächenelement **44a** in **Fig. 9** zu einem größeren Flächenelement **44b** in der Pupillenebene **44**. Durch entsprechende Dimensionierung von Linsenarray **36**, einer Krümmung der reflektierenden Fläche des Einzelspiegels **38s** und des dem Einzelspiegel **38s** in Lichtrichtung folgenden Kondensators **42**, kann die Ausdehnung des in der Pupillenebene durch den Einzelspiegel ausgeleuchteten Flächenelementes **44b** festgelegt werden. Als Ergebnis einer solchen Dimensionierung kann bei der Ausführung nach **Fig. 10** das ausgeleuchtete Flächenelement **44b** in der Pupillenebene **44** auch gleich oder kleiner sein als das entsprechende Flächenelement **44a** in der Ausführung nach **Fig. 9**.

[0118] Die **Fig. 11** zeigt entsprechend einer weiteren Ausführungsform der Erfindung schematisch den Abbildungsstrahlengang eines Beleuchtungsstrahlbündels vom Eingang einer Pupillenformungseinheit bis zur Mehrfachspiegelanordnung **38** der Pupillenformungseinheit. Die Pupillenformungseinheit umfasst hierbei ein diffraktives optisches Element **3d** und einen Kondensator bzw. Fourieroptik **34**. Die Mehrfachspiegelanordnung **38** besteht hierbei aus einzelnen Spiegeln **38s** wie im Detailbild gezeigt. Die einzelnen Spiegel **38s** können hierbei um eine oder mehrere Achsen gekippt werden. Damit ist es möglich, die auf die einzelnen Spiegel **38s** einfallenden Lichtstrahlen in unterschiedliche, einstellbare Ausfallrichtungen zu reflektieren. Das diffraktive optische Element **3d** hat die Aufgabe das Beleuchtungsstrahl-

bündel **12** in sehr viele Teilbeleuchtungsstrahlbündel zu zerlegen und diese Teilbeleuchtungsstrahlbündel mit Hilfe des Kondensors **34** auf die einzelnen Spiegel **38s** der Mehrfachspiegelanordnung **38** zu überlagern und dabei gleichzeitig auch auf den Einzelspiegeln zu konzentrieren, bzw. zu fokussieren. Dargestellt ist dies schematisch in einer weiteren Detailansicht mit den ausgeleuchteten Bereichen **381** auf den jeweiligen einzelnen Spiegeln **38s** der Mehrfachspiegelanordnung **38**.

[0119] [Fig. 12](#) zeigt erfindungsgemäß schematisch eine weitere optische Konditionierungseinheit **400** vor der Pupillenformungseinheit der [Fig. 11](#). Die optische Konditionierungseinheit **400** empfängt das Beleuchtungsstrahlbündel **12** welches ein gewisses Intensitätsstrahlprofil **401** aufweist. Die optische Konditionierungseinheit **400** ergibt an ihrem Ausgang in Lichtrichtung ein bezüglich einer optischen Achse (nicht dargestellt) symmetrisches Beleuchtungsstrahlbündel mit den Teilintensitätsprofilen **402** und **403** oberhalb und unterhalb der optischen Achse. Am Ausgang der Pupillenformungseinheit aus DOE **3d**, Kondensator **34** und Mehrfachspiegelanordnung **38**, entsprechend [Fig. 11](#), erfolgt eine Überlagerung der beiden Intensitätsstrahlprofile **402** und **403**.

[0120] [Fig. 13](#) zeigt schematisch eine Detailansicht eines Beispiels für eine optische Konditionierungseinheit **400** nach [Fig. 12](#) und der durch diese hervorgerufenen Symmetrisierung des Beleuchtungsstrahlbündels in Form der Intensitätsstrahlprofile **402** und **403**. Das Beleuchtungsstrahlbündel **12** mit dem Intensitätsprofil **401** und einer linearen Polarisation senkrecht zur Zeichenebene, angedeutet durch die kleinen Kreissymbole, wird durch den teildurchlässigen Spiegel **505** als Intensitätsstrahlprofil **402** mit einer linearen Polarisation senkrecht zur Zeichenebene zum Ausgang der optischen Konditionierungseinheit teilweise durchgelassen. Der andere Teil des Beleuchtungsstrahlbündels **12** mit dem Intensitätsstrahlprofil **401** und der linearen Polarisation senkrecht zur Zeichenebene wird durch den teildurchlässigen Spiegel **505** bei Erhaltung der Polarisationsrichtung reflektiert. Dieser reflektierte Teil wird durch einen Polarisator **504** in einer Richtung entgegen der ursprünglichen Lichtrichtung des Beleuchtungsstrahlbündels **12** reflektiert. Anschließend passiert dieser Anteil des Beleuchtungsstrahlbündels **12** eine $\lambda/4$ -Platte **502**, welche auch gegen einen optischen Rotator ausgetauscht werden kann, der um 45° dreht. Dabei wird die Polarisation des restlichen Anteils des Beleuchtungsstrahlbündels **12** von einer lineareren Polarisation senkrecht zur Zeichenebene in eine nicht dargestellte zirkuläre Polarisation umgewandelt. Dieser umgewandelte Anteil des Beleuchtungsstrahlbündels **12** wird nachfolgende am Spiegel **501** reflektiert und passiert auf dem Rückweg wiederum die $\lambda/4$ -Platte **502**. Dabei wird die zirkuläre Polarisation des Lichtes in eine lineare Polarisation in der

Zeichenebene umgewandelt. Dadurch ist es möglich, dass der restliche Anteil des Beleuchtungsstrahlbündels **12** auf dem Rückweg den Polarisator **504** als linear polarisiertes Licht in der Zeichenebene passiert. Eine nachfolgende $\lambda/2$ -Platte **503** dreht die Polarisation des linear polarisierten Lichtes von der Ausrichtung in der Zeichenebene zu einer Ausrichtung senkrecht zur Zeichenebene zurück, wodurch am Ausgang der optischen Konditionierungseinheit **400** ein zweites Intensitätsstrahlprofil **403** mit einer linearen Polarisation senkrecht zur Zeichenebene entsteht. Dieses Intensitätsstrahlprofil **403** besitzt einen spiegelsymmetrischen Intensitätsverlauf zum Intensitätsprofil **402**.

[0121] Die [Fig. 14](#) zeigt schematisch zusätzlich zur [Fig. 12](#) eine Blendenvorrichtung **600**. Die Blendenvorrichtung **600** dient dazu das Beleuchtungsstrahlbündel **12** in Form des symmetrisierten Intensitätsstrahlprofils **402** und **403** zu begrenzen, wodurch vorwiegend etwaiges in der Konditionierungseinheit **400** generiertes Streulicht ausgeblendet werden kann.

[0122] [Fig. 15](#) zeigt schematisch als weiteren Teil der Erfindung ein Phasenelement **701**, welches optional vor dem diffraktiven optischen Element **3d** der Ausführungsform nach einer der [Fig. 11](#), [Fig. 12](#) und [Fig. 14](#) eingesetzt werden kann. Das Phasenelement **701**, das ein asphärisches Linsenelement und/oder ein Linsenelement mit einer Freiformfläche sein oder umfassen kann, dient zur Anpassung der Wellenfront **700** des Beleuchtungsstrahlbündels **12**. [Fig. 15](#) zeigt eine Wellenfront **700** des Beleuchtungsstrahlbündels **12** vor dem passieren des Phasenelementes **701**. Des Weiteren zeigt [Fig. 15](#) die Wellenfront **702** des Beleuchtungsstrahlbündels **12** nach dem Phasenelement **701**. Es ist anhand von [Fig. 15](#) deutlich zu erkennen, dass die Wellenfront **702** nach der Passage des Phasenelementes **701** z. B. eine geringere Krümmung aufweist als die ursprüngliche Wellenfront **700** des Beleuchtungsstrahlbündels **12**. Somit ist es möglich durch eine geeignete Wahl des Phasenelementes **701** die Wellenfront des Beleuchtungsstrahlbündels **12** vor Eintritt in die Beleuchtungsoptik einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie zu ändern. Durch die Änderung der Krümmung der Wellenfront eines Beleuchtungsstrahlbündels **12** wird auch dessen Divergenz geändert. Somit dient das Phasenelement **701** in [Fig. 15](#) nicht nur zur Änderung der Krümmung der Wellenfront eines Beleuchtungsstrahlbündels **12**, sondern auch zur Änderung bzw. Konditionierung der Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels **12**.

[0123] Die [Fig. 16](#) zeigt schematisch eine erfindungsgemäße Pupillenformungseinheit bestehend aus einem Wabenkondensator **32**, einer Kondensator- bzw. Relais- oder Tele-Optik **34**, einen Linsenarray **36** und einer Mehrfachspiegelanordnung **38**. Da der Wabenkondensator **32**, wie in [Fig. 4](#) gezeigt bzw. in der

Beschreibung zur [Fig. 4](#) erläutert, nicht wesentlich die Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels erhöht, ist es notwendig, dass ein Kondensator bzw. eine Relais-Optik **34** mit großer Brennweite, diese niedrigen Divergenzwerte in korrespondierende Höhen gegenüber der optischen Achse auf der Mehrfachspiegelanordnung **38** übersetzt. Aus bauraumtechnischen Gründen ist es daher sinnvoll diesen Kondensator **34**, bzw. die Relaisoptik **34** mit großer Brennweite, durch Prismen oder Spiegel entsprechend zu Falten.

[0124] [Fig. 17](#) zeigt schematisch eine alternative Pupillenformungseinheit bei der, gegenüber der Ausführung nach [Fig. 16](#) der Wabenkondensator **32** gegen einen entsprechenden Stab **32a** oder eine Lichtleitfaser **32a** oder ein entsprechendes Lichtleitfaserbündel **32a** getauscht wurde.

[0125] [Fig. 18](#) zeigt schematisch eine weitere erfindungsgemäße Ausführungsform einer Pupillenformungseinheit. Bei dieser Ausführungsform ist die Relais-Optik, bzw. die Kondensator-Optik **34** in zwei separate Relais-Optiken **34a** und **34b** aufgeteilt. Als Lichtmischungseinrichtung **32b** dient in [Fig. 18](#) im Gegensatz zu den vorherigen Ausführungsformen ein optisches System, welches aus „Hilfslinsen“ von zwei zueinander senkrecht stehenden dünnen optischen Platten gebildet wird. Die beiden dünnen senkrecht zueinander stehen Platten sorgen für die entsprechende Lichtmischung auf der Mehrfachspiegelanordnung **38**. In der erfindungsgemäßen Ausführungsform gemäß [Fig. 18](#) sorgt eine optionale Strahlformungseinheit **31a** für eine Anpassung der Größe und der Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels. Durch die beiden Schnittebenen **31b** senkrecht zur Strahlausbreitungsrichtung ist angedeutet, dass erfindungsgemäße Elemente der Pupillenformungseinheit, bzw. der Konditionierungseinheit der Beleuchtungsoptik, sich auch vor der Gehäusewand der Beleuchtungsoptik, angedeutet durch **31b**, befinden können.

[0126] [Fig. 19](#) zeigt schematisch eine weitere erfindungsgemäße Ausführungsform einer Pupillenformungseinheit. In dieser Ausführungsform dient eine optische Konditionierungseinheit **32c** dazu, dass Beleuchtungsstrahlbündel am Ausgang der Konditionierungseinheit **32c** zu symmetrisieren, ohne dabei auf die Polarisationsseigenschaften des Lichtes zur Symmetrisierung zurückzugreifen. Die Funktionsweise der optischen Konditionierungseinheit **32c** basiert darauf, dass ein Teil des Beleuchtungsstrahlbündels durch die Spiegel **37a** und **37b** umgelenkt wird, wobei dieser Teil des Beleuchtungsstrahlbündels ein sogenanntes Dove-Prisma **35** passiert. Innerhalb des Dove-Prismas **35** erfolgt die eigentliche Spiegelung bzw. Symmetrisierung des Teilbelichtungsstrahlbündels, so dass am Ausgang der optischen Konditionierungseinheit **32c** ein Belichtungsstrahlbündel vor-

liegt, das aus zwei zueinander, gegenüber einer Achse entlang der Ausbreitungsrichtung des Lichts, symmetrisierten Teilbelichtungsstrahlbündeln gebildet ist. In dem Ausführungsbeispiel gemäß [Fig. 19](#) kann auf eine weitere, über die Symmetrisierung des Beleuchtungsstrahlbündels hinausgehende Lichtmischung durch eine weitere Lichtmischungseinheit, wie zum Beispiel einen Wabenkondensator oder einen Stab verzichtet werden. Kombinationen mit den weiteren, z. B. den genannten Lichtmischeinheiten sind jedoch möglich. Abhängig von der Qualität des Lichtes der Lichtquelle bzw. des Laserlichts, welches das Beleuchtungsstrahlbündel **12** bildet, kann es in der Ausführungsform nach [Fig. 19](#) genügen, die Symmetrisierungseigenschaft der optischen Konditionierungseinheit **32c** ohne zusätzliche Lichtmischung zur Homogenisierung der Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung **38** einzusetzen.

[0127] Die erfindungsgemäße Pupillenformungseinheit der [Fig. 3](#), [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#), das erfindungsgemäße optische System der [Fig. 4](#) bis [Fig. 8](#) und [Fig. 16](#) bis [Fig. 19](#), und die erfindungsgemäße optische Konditionierungseinheit der [Fig. 11](#) bis [Fig. 14](#) gewähren durch die Überlagerung von Teilbelichtungsstrahlbündel auf der Mehrfachspiegelanordnung eine zeitliche Stabilisierung der Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) **38** einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie.

[0128] Diese verschiedenen Ausführungsformen zeigen somit eine erfindungsgemäße Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie zur homogenen Ausleuchtung eines Objektfeldes mit Objektfeldpunkten in einer Objektebene, wobei die Beleuchtungsoptik für jeden Objektfeldpunkt des Objektfeldes eine zugehörige Austrittspupille aufweist, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer Vielzahl von Spiegeln zur Einstellung einer Intensitätsverteilung in den zugehörigen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte enthält, mit einem Beleuchtungsstrahlbündel von Beleuchtungsstrahlen zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) wobei die Beleuchtungsoptik mindestens ein optisches System zur zeitlichen Stabilisierung einer Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) enthält, wobei die zeitliche Stabilisierung durch Überlagerung von Beleuchtungsstrahlen des Beleuchtungsstrahlbündels auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) erfolgt.

[0129] Eine Stabilisierung der Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) ist notwendig, um diese Ausleuchtung und so-

mit die Austrittspupillen der Objektfeldpunkte einer Projektionsbelichtungsanlage von den Fluktuationen einer Lichtquelle zu entkoppeln.

[0130] Durch diese Entkopplung ist es möglich, dass die mit einer Projektionsbelichtungsanlage, mit der erfindungsgemäßen Pupillenformungseinheit der [Fig. 3](#), [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#), dem erfindungsgemäßen optische System der [Fig. 4](#) bis [Fig. 8](#) und [Fig. 16](#) bis [Fig. 19](#), und der erfindungsgemäßen optische Konditionierungseinheit der [Fig. 11](#) bis [Fig. 14](#), realisierte Intensitätsverteilung in den Austrittspupillen von Objektfeldpunkten von einer gewünschten Intensitätsverteilung im Bezug auf den Schwerpunktwinkelwert, die Elliptizität und die Pole Balance nur geringfügig abweicht.

[0131] Diese genannten Ausführungsformen zeigen eine erfindungsgemäße Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Beleuchtungsoptik zur Ausleuchtung eines Objektfeldes mit Objektfeldpunkten in einer Objektebene, mit einer Projektionsoptik zur Abbildung des Objektfeldes in ein Bildfeld in der Bildebene, wobei die Beleuchtungsoptik für jeden Objektfeldpunkt des Objektfeldes eine zugehörige Austrittspupille mit einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der Austrittspupille aufweist, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer Vielzahl von Spiegeln zur Einstellung einer Intensitätsverteilung in den zugehörigen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte enthält, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens ein optisches System zur zeitlichen Stabilisierung einer Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) enthält, so dass für jeden Objektfeldpunkt die Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille von einer gewünschten Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille

- bei einem Schwerpunktwinkelwert $\sin(\beta)$ um weniger als zwei Prozent bezogen auf den größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der zugehörigen Austrittspupille und/oder
- bei einer Elliptizität um weniger als zwei Prozent und/oder
- bei einer Pole Balance um weniger als zwei Prozent abweicht.

[0132] Ebenso ist es durch diese Entkopplung möglich, dass die mit einer erfindungsgemäßen Projektionsbelichtungsanlage realisierte erste Intensitätsverteilung in den Austrittspupillen von Objektfeldpunkten von einer realisierten zweiten Intensitätsverteilung nur geringfügig im äußeren σ oder inneren σ abweicht.

[0133] Somit zeigen die oben genannten Ausführungsformen

ebenso eine erfindungsgemäße Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Beleuchtungsoptik zur Ausleuchtung eines Objektfeldes mit Objektfeldpunkten in einer Objektebene, mit einer Projektionsoptik zur Abbildung des Objektfeldes in ein Bildfeld in der Bildebene, wobei die Beleuchtungsoptik für jeden Objektfeldpunkt des Objektfeldes eine zugehörige Austrittspupille mit einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der Austrittspupille aufweist, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer Vielzahl von Spiegeln zur Einstellung einer Intensitätsverteilung in den zugehörigen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte enthält, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens ein optisches System zur zeitlichen Stabilisierung der Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) enthält, so dass für jeden Objektfeldpunkt eine erste eingestellte Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille von einer zweiten eingestellten Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille um weniger als den Wert 0,1 im äußeren und/oder inneren σ abweicht.

[0134] Die erfindungsgemäße Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) **38** der [Fig. 3](#) bis [Fig. 12](#), [Fig. 14](#) und [Fig. 16](#) bis [Fig. 19](#) ist gemäß der oben in der Beschreibungseinleitung dargelegten Überlegungen ausgelegt, um den Anforderungen an eine notwendige Auflösung in der Pupille für einen Wechsel zwischen annularen Settings zu genügen, welche sich nur geringfügig im äußeren und/oder inneren σ unterscheiden. Darüber hinaus genügt die erfindungsgemäße Mehrfachspiegelanordnung **38** in den genannten Ausführungsformen der gezeigten Figuren unter anderem den Anforderungen an den Bauraum einer Projektionsbelichtungsanlage und den Anforderungen an eine Mindestgröße der Pupille in der Pupillenebene **44**.

[0135] Somit zeigen die genannten Ausführungsformen eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Nutzlichtwellenlänge λ der Projektionsbelichtungsanlage in der Einheit [nm], wobei jeder Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung um mindestens eine Achse um einen maximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ drehbar ist und eine minimale Kantenlänge aufweist, wobei die minimale Kantenlänge größer ist als $200 [\text{mm} \cdot \text{nm}] \cdot \sin(\alpha) / \lambda$

[0136] Das erfindungsgemäße optische System der [Fig. 4](#) bis [Fig. 8](#) und [Fig. 16](#) bis [Fig. 19](#), gewährt durch die Überlagerung von Teilbeleuchtungsstrahlbündel auf der Mehrfachspiegelanordnung eine, über

einer reinen zeitlichen Stabilisierung der Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) **38** hinausgehende Homogenisierung dieser Ausleuchtung. Hierbei führt das erfindungsgemäße optische System in den genannten Ausführungsformen, aus den oben in der Beschreibungseinleitung genannten Gründen, nur wenig zusätzlichen Lichtleitwert in Form einer Erhöhten Divergenz der Teilbeleuchtungsstrahlbündel hinter dem erfindungsgemäßen optischen System ein.

[0137] Somit zeigen die genannten Ausführungsformen ein erfindungsgemäßes optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels und einer Beleuchtungslichtrichtung von der Lichtquelle zur Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), wobei die Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels in Beleuchtungslichtrichtung hinter dem optischen System weniger als die fünffache Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels vor dem optischen System beträgt.

[0138] Die erfindungsgemäße optische Konditionierungseinheit der [Fig. 11](#) bis [Fig. 15](#) ist in der Lage, die Divergenz und/oder das Strahl- bzw. Bündelprofil und/oder den Polarisationszustand des Beleuchtungsstrahlbündels **12** zwischen dem Laserausgang und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-array, MMA) **38** zu ändern.

[0139] Somit zeigen die genannten Ausführungsformen eine erfindungsgemäße optische Konditionierungseinheit zur Konditionierung eines Beleuchtungsstrahlbündels eines Lasers für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, wobei der Laser mehr als eine kohärente Lasermode und einen Laserausgang, sowie das Beleuchtungsstrahlbündel eine Divergenz, ein Strahl- oder Bündelprofil und einen Polarisationszustand aufweist, wobei die optische Konditionierungseinheit mindestens die Divergenz und/oder das Strahl- bzw. Bündelprofil und/oder den Polarisationszustand des Beleuchtungsstrahlbündels zwischen dem Laserausgang und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-array, MMA) ändert.

[0140] Die vorliegende Erfindung ist nicht auf die in den Patentansprüchen genannten Ausführungsformen, oder auf die Ausführungsformen der Ausführungsbeispiele beschränkt.

[0141] Auch solche Ausführungsformen, die sich aus einer Kombination von Merkmalen einzelner Ausführungsformen ergeben, die unter die Patentansprüche fallen, oder die in den oben beschriebenen Ausführungsbeispielen dargestellt sind, werden unter die Erfindung fallend betrachtet.

[0142] Beispielhaft sei die Kombination der Ausführungen nach den [Fig. 16](#) und [Fig. 17](#) genannt, wobei die Integratoren **32** und **32a** durch sequentielles Anordnen in Lichtausbreitungsrichtung auch gemeinsam betrieben werden können. Ebenfalls beispielhaft sei auf die vielen Kombinationsmöglichkeiten der Konditionierungseinheit **400**, welche beispielhaft im Zusammenhang mit den [Fig. 12](#) bis [Fig. 14](#) beschrieben wurde, mit einem Integrator **32** oder **32a** hingewiesen, wobei sich beide nacheinander in beliebiger Reihenfolge in Lichtrichtung vor der Mehrfachspiegelanordnung **38** im Beleuchtungsstrahlbündel anordnen lassen.

[0143] Zusätzlich können neben den Ausführungsformen, die durch Kombination von Merkmalen aus einzelnen der oben bezeichneten Ausführungsformen oder -beispiele entstehen, auch erfindungsgemäße Ausführungen durch Austausch von Merkmalen aus den genannten Ausführungsformen oder -beispiele hergestellt werden, die ebenfalls unter die Erfindung fallend betrachtet werden.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 6285443 B1 [[0007](#), [0014](#)]
- WO 2005/026843 [[0010](#)]
- US 6563566 [[0011](#)]
- US 2004/0265707 [[0011](#)]

Patentansprüche

1. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie

- mit einer Beleuchtungsoptik zur Ausleuchtung eines Objektfeldes mit Objektfeldpunkten in einer Objektebene,
- mit einer Projektionsoptik zur Abbildung des Objektfeldes in ein Bildfeld in der Bildebene,
- wobei die Beleuchtungsoptik für jeden Objektfeldpunkt des Objektfeldes eine zugehörige Austrittspupille mit einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der Austrittspupille aufweist,
- wobei die Beleuchtungsoptik mindestens eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer Vielzahl von Spiegeln zur Einstellung einer Intensitätsverteilung in den zugehörigen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte enthält, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Beleuchtungsoptik mindestens ein optisches System zur zeitlichen Stabilisierung einer Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) enthält, so dass für jeden Objektfeldpunkt die Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille von einer gewünschten Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille
 - bei einem Schwerpunktswinkelwert $\sin(\beta)$ um weniger als zwei Prozent bezogen auf den größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der zugehörigen Austrittspupille und/oder
 - bei einer Elliptizität um weniger als zwei Prozent und/oder
 - bei einer Pole Balance um weniger als zwei Prozent abweicht.

2. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie

- mit einer Beleuchtungsoptik zur Ausleuchtung eines Objektfeldes mit Objektfeldpunkten in einer Objektebene,
- mit einer Projektionsoptik zur Abbildung des Objektfeldes in ein Bildfeld in der Bildebene,
- wobei die Beleuchtungsoptik für jeden Objektfeldpunkt des Objektfeldes eine zugehörige Austrittspupille mit einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der Austrittspupille aufweist,
- wobei die Beleuchtungsoptik mindestens eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer Vielzahl von Spiegeln zur Einstellung einer Intensitätsverteilung in den zugehörigen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte enthält, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Beleuchtungsoptik mindestens ein optisches System zur zeitlichen Stabilisierung der Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) enthält, so dass für jeden Objektfeldpunkt eine erste eingestellte Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille von einer zweiten eingestellten Intensitätsverteilung in der zugehörigen Austrittspupille um

weniger als den Wert 0,1 im äußeren und/oder inneren σ abweicht.

3. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 1 oder 2 mit einer Nutzlichtwellenlänge λ der Projektionsbelichtungsanlage in der Einheit [nm], wobei jeder Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung um mindestens eine Achse um einen maximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ drehbar ist und eine minimale Kantenlänge aufweist **dadurch gekennzeichnet**, dass die minimale Kantenlänge größer ist als $200 [\text{mm}\cdot\text{nm}]\cdot\sin(\alpha)/\lambda$

4. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 3 mit einer ausgeleuchteten Objektfeldfläche des Objektfeldes der Größe OF und einer ausgeleuchteten Fläche der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) der Größe AF **dadurch gekennzeichnet**, dass

$$AF = c \cdot \sin(\gamma') / \sin(\alpha) \cdot OF \text{ gilt,}$$

mit einer Konstanten c für die gilt $0,1 < c < 1$, dem maximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) und einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma')$ der größten Randwinkelwerte $\sin(\gamma)$ der Austrittspupillen der Objektfeldpunkte.

5. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 4 **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Füllfaktor der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) als ein Verhältnis einer Summe der Flächeninhalte aller ausgeleuchteten Spiegel zur ausgeleuchteten Fläche AF mehr als 10% beträgt.

6. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass eine mittlere Reflektivität der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) bei einem Einfallswinkel zwischen 0° und 60° mehr als 25 Prozent beträgt.

7. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 6 **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Standardabweichung der Reflektivität der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) bei einem Einfallswinkel zwischen 0° und 60° von der mittleren Reflektivität weniger als 50 Prozent bezogen auf die mittlere Reflektivität beträgt.

8. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens eine Kantendicke eines Spiegels der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mehr als $30 \mu\text{m}$

(Stonys-Gleichung?) beträgt

9. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche

wobei die Projektionsbelichtungsanlage als sogenannter Scanner betrieben wird dadurch gekennzeichnet, dass

die Intensitätsverteilung der Austrittspupillen der Objektfeldpunkte während des Scann-Vorgangs geändert wird.

10. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zwischen 2000 und 40000 Mikrospiegel aufweist.

11. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine Flächenausdehnung von 2 cm² bis 80 cm² aufweist.

12. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass ein ausgeleuchteter Raumwinkelbereich in der zugehörigen Austrittspupille eines Objektfeldpunktes, der von einem Mikrospiegels der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) erzeugt wird, einen maximalen Winkelbereichswert aufweist, der weniger als 5 Prozent, insbesondere weniger als 1 Prozent bezogen auf den größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der zugehörigen Austrittspupille beträgt.

13. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass ein Raumwinkelbereich in der zugehörigen Austrittspupille eines Objektfeldpunktes mit einer von Null verschiedenen Intensität und einem Winkelbereichswert von weniger als 10 Prozent, insbesondere weniger als 2 Prozent bezogen auf den größten Randwinkelwert der zugehörigen Austrittspupille von mindestens zwei Spiegeln der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), insbesondere von mindestens vier Spiegeln der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) beleuchtet wird.

14. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass jeder einzelne Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) innerhalb einer zehntel Sekunde, bevorzugt innerhalb einer hundertstel Sekunde auf einen gewünschten Winkel eingestellt werden kann.

15. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche

dadurch gekennzeichnet, dass jeder einzelne Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mindestens einen kapazitiven, piezoresistiven oder optischen Sensor zur Messung mindestens einer Spiegelstellung oder mindestens einer Spiegelposition aufweist.

16. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass der größte Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der zugehörigen Austrittspupille eines Objektfeldpunktes für alle Objektfeldpunkte größer als 0,2 ist.

17. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche mit einem Beleuchtungsstrahlbündel von Beleuchtungsstrahlen zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) dadurch gekennzeichnet, dass eine zeitlichen Stabilisierung der Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) durch das optische System durch eine Überlagerung von Beleuchtungsstrahlen des Beleuchtungsstrahlbündels auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) erfolgt.

18. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 17 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System zur räumlich homogenen Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) ausgelegt ist.

19. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 17 oder 18 mit einer Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels und einer Beleuchtungslichtrichtung von der Lichtquelle zur Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) dadurch gekennzeichnet, dass die Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels in Beleuchtungslichtrichtung hinter dem optischen System weniger als das Doppelte der Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels vor dem optischen System beträgt.

20. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass das optische System mindestens einem optischen Integrator umfasst.

21. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 20 dadurch gekennzeichnet, dass der Integrator ein Wabenkondensator ist.

22. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 21 dadurch gekennzeichnet, dass der Wabenkondensator eine Brennweite von größer 5 m besitzt.

23. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche

che dadurch gekennzeichnet, dass das optische System einen teleskopischen Strahlengang besitzt und dieser 25 teleskopische Strahlengang durch mindestens ein Prisma oder ein Spiegel gefaltet wird.

24. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 17 bis 23 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System Beleuchtungsstrahlen des Beleuchtungsstrahlbündels auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) inkohärent überlagert.

25. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 21 dadurch gekennzeichnet, dass eine inkohärente Überlagerung eines Beleuchtungsstrahlbündels auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zeitlich geändert wird.

26. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 25 dadurch gekennzeichnet, dass eine zeitliche Änderung der inkohärenten Überlagerung durch eine rotierende Keilplatte erreicht wird.

27. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 24 oder 25 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System ein optisches Element zur Streuung und/oder ein optisches Element zur Mischung des Beleuchtungsstrahlbündels zur inkohärenten Überlagerung umfasst.

28. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 27 dadurch gekennzeichnet, dass das optische Element zur Streuung eine Streuscheibe mit einem Streuwinkel kleiner als 1 mrad (HWHM), insbesondere kleiner 0,4 mrad (HWHM) ist.

29. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 27 dadurch gekennzeichnet, dass das optische Element zur Mischung ein diffraktives optisches Element ist.

30. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 24 oder 25 mit einer optischen Achse zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), wobei ein Beleuchtungsstrahl des Beleuchtungsstrahlbündels in einer Ebene zwischen der Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) senkrecht zur optischen Achse eine Höhe mit Bezug zur optischen Achse aufweist dadurch gekennzeichnet, dass abhängig von der Höhe des Beleuchtungsstrahls zur optischen Achse eine Phasenverzögerung des Beleuchtungsstrahls eingeführt wird.

31. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 30 dadurch gekennzeichnet,

dass die Phasenverzögerung des Beleuchtungsstrahls durch ein optisches Phasenelement zwischen der Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung realisiert wird.

32. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche mit Beleuchtungsstrahlen eines Beleuchtungsstrahlbündels zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), wobei die Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) Spiegelflächen aufweisen dadurch gekennzeichnet, dass das optische System mindestens eine optische Vorrichtung zur Konzentrierung von Beleuchtungsstrahlen des Beleuchtungsstrahlbündels auf den Spiegelflächen der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) aufweist.

33. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 32 dadurch gekennzeichnet, dass die optische Vorrichtung ein Linsenarray und/oder ein Spiegelarray und/oder ein diffraktives optisches Element (DOE) umfasst.

34. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche mit einem Laser zur Erzeugung eines Beleuchtungsstrahlbündels, wobei der Laser mehr als eine kohärente Lasermode und einen Laserausgang, sowie das Beleuchtungsstrahlbündel eine Divergenz, ein Strahl- oder Bündelprofil und einen Polarisationszustand aufweist dadurch gekennzeichnet, dass das optische System eine optische Konditionierungseinheit zur Änderung mindestens der Divergenz und/oder des Strahlprofils und/oder des Polarisationszustandes des Beleuchtungsstrahlbündels zwischen dem Ausgang des Lasers und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-array, MMA) umfasst.

35. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 34 dadurch gekennzeichnet, dass die optische Konditionierungseinheit mindestens ein anamorphotisches Element und/oder ein asphärisches Element und/oder ein Element mit einer Freiformfläche und/oder ein DOE umfasst.

36. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 35 dadurch gekennzeichnet, dass die optische Konditionierungseinheit mindestens ein Spiegel und/oder eine Strahlteilerfläche umfasst.

37. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass eine Mehrzahl der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine Umrandung aufweist, welche aus einem Polygonzug besteht.

38. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 1 bis 36 dadurch gekennzeichnet, dass eine Mehrzahl der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine Umrandung aufweist, die es erlaubt die Mehrzahl der Spiegel facettiert anzuordnen.

39. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 37 bis 38 dadurch gekennzeichnet, dass

- die Projektionsbelichtungsanlage als sogenannter Scanner betrieben wird
- die Umrandung mindestens eine Symmetrierichtung aufweist und
- diese Symmetrierichtung nicht parallel zur Scanrichtung ist.

40. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass eine Mehrzahl der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine von einer planen Oberfläche abweichende konkave oder konvexe Oberfläche aufweist.

41. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Spiegel einen anderen Flächeninhalt aufweist als ein anderer Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

42. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Spiegel eine andere Oberflächenkrümmung aufweist als ein anderer Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

43. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Spiegel einen anderen kürzesten Abstand zum nächstliegenden benachbarten Spiegel aufweist, als ein anderer Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

44. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Beleuchtungsoptik für den Betrieb von mindestens zwei Multi-Mirror-Arrays (MMA) vorgesehen ist, welche sich mindestens in einer Eigenschaft eines Spiegels unterscheiden.

45. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 44 dadurch gekennzeichnet, dass eine Vorrichtung zur Wahlweisen Nutzung der mindestens zwei Multi-Mirror-Arrays (MMA) vorgesehen ist.

46. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 44 dadurch gekennzeichnet, dass eine Vorrichtung zum Austausch der mindestens zwei Multi-Mirror-Arrays (MMA) vorgesehen ist.

47. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 44 dadurch gekennzeichnet, dass die mindestens zwei Multi-Mirror-Arrays (MMA) gleichzeitig betrieben werden können.

48. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie zur homogenen Ausleuchtung eines Objektfeldes mit Objektfeldpunkten in einer Objektebene, wobei die Beleuchtungsoptik für jeden Objektfeldpunkt des Objektfeldes eine zugehörige Austrittspupille aufweist, wobei die Beleuchtungsoptik mindestens eine Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mit einer Vielzahl von Spiegeln zur Einstellung einer Intensitätsverteilung in den zugehörigen Austrittspupillen der Objektfeldpunkte enthält, mit einem Beleuchtungsstrahlbündel von Beleuchtungsstrahlen zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) dadurch gekennzeichnet, dass die Beleuchtungsoptik mindestens ein optisches System zur zeitlichen Stabilisierung einer Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) enthält, wobei die zeitliche Stabilisierung durch Überlagerung von Beleuchtungsstrahlen des Beleuchtungsstrahlbündels auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) erfolgt.

49. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 48 mit einer Nutzlichtwellenlänge λ der Projektionsbelichtungsanlage in der Einheit [nm], wobei jeder Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung um mindestens eine Achse um einen maximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ drehbar ist und eine minimale Kantenlänge aufweist dadurch gekennzeichnet, dass die minimale Kantenlänge größer ist als $200 [\text{mm}\cdot\text{nm}]\cdot\sin(\alpha)/\lambda$

50. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 49 mit einer ausgeleuchteten Objektfeldfläche des Objektfeldes der Größe OF, einer ausgeleuchteten Fläche der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) der Größe AF und einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der Austrittspupille eines Objektfeldpunktes dadurch gekennzeichnet, dass

$$AF = c \cdot \sin(\gamma) / \sin(\alpha) \cdot OF \text{ gilt,}$$

mit einer Konstanten c für die gilt $0,1 < c < 1$, dem ma-

ximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) und einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma')$ der größten Randwinkelwerte $\sin(\gamma)$ der Austrittspupillen der Objektfeldpunkte.

51. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 50 dadurch gekennzeichnet, dass ein Füllfaktor der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) als ein Verhältnis einer Summe der Flächeninhalte aller ausgeleuchteten Spiegel zur ausgeleuchteten Fläche AF mehr als 10% beträgt.

52. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 51 dadurch gekennzeichnet, dass eine mittlere Reflektivität der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) bei einem Einfallswinkel zwischen 0° und 60° mehr als 25 Prozent beträgt.

53. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 52 dadurch gekennzeichnet, dass eine Standardabweichung der Reflektivität der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) bei einem Einfallswinkel zwischen 0° und 60° von der mittleren Reflektivität weniger als 50 Prozent bezogen auf die mittlere Reflektivität beträgt.

54. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 53 dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Kantendicke eines Spiegels der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mehr als $30 \mu\text{m}$ (Stonys-Gleichung?) beträgt

55. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 54 wobei die Projektionsbelichtungsanlage als sogenannter Scanner betrieben wird dadurch gekennzeichnet, dass die Intensitätsverteilung der Austrittspupillen der Objektfeldpunkte der Beleuchtungsoptik während des Scann-Vorgangs geändert wird.

56. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 55 dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zwischen 2000 und 40000 Mikrospiegel aufweist.

57. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine Flächenausdehnung von 2 cm^2 bis 80 cm^2 aufweist.

58. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 57 mit einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der Austrittspupille eines Objektfeldpunktes dadurch gekennzeichnet, dass ein ausgeleuchteter Raumwinkelbereich in der zugehörigen Austrittspupille eines Objektfeldpunktes, der von einem Mikrospiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) erzeugt wird, einen maximalen Winkelbereichswert aufweist, der weniger als 5 Prozent, insbesondere weniger als 1 Prozent bezogen auf den größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der zugehörigen Austrittspupille beträgt.

59. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 58 mit einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der Austrittspupille eines Objektfeldpunktes dadurch gekennzeichnet, dass ein Raumwinkelbereich in der zugehörigen Austrittspupille eines Objektfeldpunktes mit einer von Null verschiedenen Intensität und einem Winkelbereichswert von weniger als 10 Prozent, insbesondere weniger als 2 Prozent bezogen auf den größten Randwinkelwert der zugehörigen Austrittspupille von mindestens zwei Spiegeln der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), insbesondere von mindestens vier Spiegeln der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) beleuchtet wird.

60. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 59 dadurch gekennzeichnet, dass jeder einzelne Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) innerhalb einer zehntel Sekunde, bevorzugt innerhalb einer hundertstel Sekunde auf einen gewünschten Winkel eingestellt werden kann.

61. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 60 dadurch gekennzeichnet, dass jeder einzelne Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mindestens einen kapazitiven, piezoresistiven oder optischen Sensor zur Messung mindestens einer Spiegelstellung oder mindestens einer Spiegelposition aufweist.

62. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 61 mit einem größten Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der Austrittspupille eines Objektfeldpunktes dadurch gekennzeichnet, dass der größte Randwinkelwert $\sin(\gamma)$ der zugehörigen Austrittspupille eines Objektfeldpunktes für alle Objektfeldpunkte größer als 0,2 ist.

63. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 62 dadurch gekennzeichnet, dass

das optische System zur räumlich homogenen Ausleuchtung der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) ausgelegt ist.

64. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 63 mit einer Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels und einer Beleuchtungslichtrichtung von der Lichtquelle zur Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) dadurch gekennzeichnet, dass die Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels in Beleuchtungslichtrichtung hinter dem optischen System weniger als das Doppelte der Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels vor dem optischen System beträgt.

65. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass das optische System mindestens einem optischen Integrator umfasst.

66. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 65 dadurch gekennzeichnet, dass der Integrator ein Wabenkondensator ist.

67. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 66 dadurch gekennzeichnet, dass der Wabenkondensator eine Brennweite von größer 5 m besitzt.

68. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 68 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System einen teleskopischen Strahlengang besitzt und dieser teleskopische Strahlengang durch mindestens ein Prisma oder ein Spiegel gefaltet wird.

69. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 63 bis 68 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System Beleuchtungsstrahlen des Beleuchtungsstrahlbündels auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) inkohärent überlagert.

70. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 69 dadurch gekennzeichnet, dass eine inkohärente Überlagerung eines Beleuchtungsstrahlbündels auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zeitlich geändert wird.

71. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 70 dadurch gekennzeichnet, dass eine zeitliche Änderung der inkohärenten Überlagerung durch eine rotierende Keilplatte erreicht wird.

72. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 69 oder 70 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System ein optisches Element zur Streuung und/oder ein optisches Element zur Mischung des Beleuchtungsstrahlbündels zur inkohärenten Überlagerung umfasst.

73. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 72 dadurch gekennzeichnet, dass das optische Element zur Streuung eine Streuscheibe mit einem Streuwinkel kleiner als 1 mrad (HWHM), insbesondere kleiner 0,4 mrad (HWHM) ist.

74. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 72 dadurch gekennzeichnet, dass das optische Element zur Mischung ein diffraktives optisches Element ist.

75. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 69 oder 70 mit einer optischen Achse zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), wobei ein Beleuchtungsstrahl des Beleuchtungsstrahlbündels in einer Ebene zwischen der Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) senkrecht zur optischen Achse eine Höhe mit Bezug zur optischen Achse aufweist dadurch gekennzeichnet, dass abhängig von der Höhe des Beleuchtungsstrahls zur optischen Achse eine Phasenverzögerung des Beleuchtungsstrahls eingeführt wird.

76. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 75 dadurch gekennzeichnet, dass die Phasenverzögerung des Beleuchtungsstrahls durch ein optisches Phasenelement zwischen der Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung realisiert wird.

77. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 76 mit Beleuchtungsstrahlen eines Beleuchtungsstrahlbündels zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), wobei die Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) Spiegelflächen aufweisen dadurch gekennzeichnet, dass das optische System mindestens eine optische Vorrichtung zur Konzentrierung von Beleuchtungsstrahlen des Beleuchtungsstrahlbündels auf den Spiegelflächen der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) aufweist.

78. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 77 dadurch gekennzeichnet, dass die optische Vor-

richtung ein Linsenarray und/oder ein Spiegelarray und/oder ein diffraktives optisches Element (DOE) umfasst.

79. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 78 mit einem Laser zur Erzeugung eines Beleuchtungsstrahlbündels, wobei der Laser mehr als eine kohärente Lasermode und einen Laserausgang, sowie das Beleuchtungsstrahlbündel eine Divergenz, ein Strahl- oder Bündelprofil und einen Polarisationszustand aufweist dadurch gekennzeichnet, dass das optische System eine optische Konditionierungseinheit zur Änderung mindestens der Divergenz und/oder des Strahlprofils und/oder des Polarisationszustandes des Beleuchtungsstrahlbündels zwischen dem Ausgang des Lasers und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-array, MMA) umfasst.

80. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 79 dadurch gekennzeichnet, dass die optische Konditionierungseinheit mindestens ein anamorphotisches Element und/oder ein asphärisches Element und/oder ein Element mit einer Freiformfläche und/oder ein DOE umfasst.

81. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 79 dadurch gekennzeichnet, dass die optische Konditionierungseinheit mindestens ein Spiegel und/oder eine Strahlteilerfläche umfasst.

82. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 81 dadurch gekennzeichnet, dass eine Mehrzahl der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine Umrandung aufweist, welche aus einem Polygonzug besteht.

83. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 81 dadurch gekennzeichnet, dass eine Mehrzahl der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine Umrandung aufweist, die es erlaubt die Mehrzahl der Spiegel facettiert anzuordnen.

84. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 82 bis 83 dadurch gekennzeichnet, dass

- die Projektionsbelichtungsanlage als sogenannter Scanner betrieben wird
- die Umrandung mindestens eine Symmetrierichtung aufweist und
- diese Symmetrierichtung nicht parallel zur Scanrichtung ist.

85. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelich-

tungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 84 dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine von einer planen Oberfläche abweichende konkave oder konvexe Oberfläche aufweist.

86. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 85 dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Spiegel einen anderen Flächeninhalt aufweist als ein anderer Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

87. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 86 dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Spiegel eine andere Oberflächenkrümmung aufweist als ein anderer Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

88. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 87 dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Spiegel einen anderen kürzesten Abstand zum nächstliegenden benachbarten Spiegel aufweist, als ein anderer Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

89. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 48 bis 88 dadurch gekennzeichnet, dass die Beleuchtungsoptik für den Betrieb von mindestens zwei Multi-Mirror-Arrays (MMA) vorgesehen ist, welche sich mindestens in einer Eigenschaft eines Spiegels unterscheiden.

90. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 89 dadurch gekennzeichnet, dass eine Vorrichtung zur Wahlweisen Nutzung der mindestens zwei Multi-Mirror-Arrays (MMA) vorgesehen ist.

91. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 90 dadurch gekennzeichnet, dass eine Vorrichtung zum Austausch der mindestens zwei Multi-Mirror-Arrays (MMA) vorgesehen ist.

92. Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 89 dadurch gekennzeichnet, dass die mindestens zwei Multi-Mirror-Arrays (MMA) gleichzeitig betrieben werden können.

93. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Nutzlichtwellenlänge λ der Projektionsbelich-

tungsanlage in der Einheit [nm], wobei jeder Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung um mindestens eine Achse um einen maximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ drehbar ist und eine minimale Kantenlänge aufweist dadurch gekennzeichnet, dass die minimale Kantenlänge größer ist als $200 \text{ [mm}\cdot\text{nm]}\cdot\sin(\alpha)/\lambda$

94. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 93 mit einer Größe der Fläche der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) und einem maximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) dadurch gekennzeichnet, dass die Größe der Fläche der Mehrfachspiegelanordnung gegeben ist durch $c \cdot \text{NA} / \sin(\alpha) \cdot \text{OF}$, mit einer Konstanten c für die gilt $0,1 < c < 1$, der numerischen Apertur der Beleuchtungsoptik in einer Objektfeldebene, dem maximalen Kippwinkelwert $\sin(\alpha)$ der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) und der Größe des Objektfeldes OF der Beleuchtungsoptik in der Objektfeldebene.

95. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 94 dadurch gekennzeichnet, dass ein Füllfaktor der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) als ein Verhältnis einer Summe der Flächeninhalte aller Spiegelflächen zur Größe der Fläche der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mehr als 10% beträgt.

96. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 95 dadurch gekennzeichnet, dass eine mittlere Reflektivität der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) bei einem Einfallswinkel zwischen 0° und 60° mehr als 25 Prozent beträgt.

97. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 96 dadurch gekennzeichnet, dass eine Standardabweichung der Reflektivität der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) bei einem Einfallswinkel zwischen 0° und 60° von der mittleren Reflektivität weniger als 50 Prozent bezogen auf die mittlere Reflektivität beträgt.

98. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 97 dadurch ge-

kennzeichnet, dass mindestens eine Kantendicke eines Spiegels der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mehr als $30 \mu\text{m}$ (Stonys-Gleichung?) beträgt

99. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 98 dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zwischen 2000 und 40000 Mikrospiegel aufweist.

100. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 99 dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine Flächenausdehnung von 2 cm^2 bis 80 cm^2 aufweist.

101. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 100 dadurch gekennzeichnet, dass jeder einzelne Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) innerhalb einer zehntel Sekunde, bevorzugt innerhalb einer hundertstel Sekunde auf einen gewünschten Winkel eingestellt werden kann.

102. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 101 dadurch gekennzeichnet, dass jeder einzelne Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) mindestens einen kapazitiven, piezoresistiven oder optischen Sensor zur Messung mindestens einer Spiegelstellung oder mindestens einer Spiegelposition aufweist.

103. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 102 dadurch gekennzeichnet, dass eine Mehrzahl der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine Umrandung aufweist, welche aus einem Polygonzug besteht.

104. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 102 dadurch gekennzeichnet, dass eine Mehrzahl der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine Umrandung aufweist, die es erlaubt die Mehrzahl der Spiegel facettiert anzuordnen.

105. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 103 bis 104 dadurch gekennzeichnet, dass eine Mehrzahl der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) eine von einer planen Oberfläche abweichende konkave oder konvexe Oberfläche aufweist.

106. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 105 dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Spiegel einen anderen Flächeninhalt aufweist als ein anderer Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

107. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 106 dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Spiegel eine andere Oberflächenkrümmung aufweist als ein anderer Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

108. Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 93 bis 107 dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Spiegel einen anderen kürzesten Abstand zum nächstliegenden benachbarten Spiegel aufweist, als ein anderer Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA).

109. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels und einer Beleuchtungslichtrichtung von der Lichtquelle zur Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) dadurch gekennzeichnet, dass die Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels in Beleuchtungslichtrichtung hinter dem optischen System weniger als die fünffache Divergenz des Beleuchtungsstrahlbündels vor dem optischen System beträgt.

110. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 109 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System mindestens einem optischen Integrator umfasst.

111. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung

einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 110 dadurch gekennzeichnet, dass der Integrator ein Wabenkondensator ist.

112. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 111 dadurch gekennzeichnet, dass der Wabenkondensator eine Brennweite von größer 5 m besitzt.

113. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 109 bis 112 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System einen teleskopischen Strahlengang besitzt und dieser teleskopische Strahlengang durch mindestens ein Prisma oder ein Spiegel gefaltet wird.

114. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 109 bis 113 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System Beleuchtungsstrahlen des Beleuchtungsstrahlbündels auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) inkohärent überlagert.

115. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 114 dadurch gekennzeichnet, dass eine inkohärente Überlagerung eines Beleuchtungsstrahlbündels auf der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) zeitlich geändert wird.

116. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 115 dadurch gekennzeichnet, dass eine zeitliche Änderung der inkohärenten Überlagerung durch eine rotierende Keilplatte erreicht wird.

117. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 114 oder 115 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System ein optisches Element zur Streuung und/oder ein optisches Element zur Mischung des Beleuchtungsstrahlbündels zur inkohärenten Überlagerung umfasst.

118. Optisches System zur Homogenisierung ei-

ner Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 117 dadurch gekennzeichnet, dass das optische Element zur Streuung eine Streuscheibe mit einem Streuwinkel kleiner als 1 mrad (HWHM), insbesondere kleiner 0,4 mrad (HWHM) ist.

119. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 117 dadurch gekennzeichnet, dass das optische Element zur Mischung ein diffraktives optisches Element ist.

120. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 114 oder 115 mit einer optischen Achse zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), wobei ein Beleuchtungsstrahl des Beleuchtungsstrahlbündels in einer Ebene zwischen der Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) senkrecht zur optischen Achse eine Höhe mit Bezug zur optischen Achse aufweist dadurch gekennzeichnet, dass abhängig von der Höhe des Beleuchtungsstrahls zur optischen Achse eine Phasenverzögerung des Beleuchtungsstrahls eingeführt wird.

121. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 120 dadurch gekennzeichnet, dass die Phasenverzögerung des Beleuchtungsstrahls durch ein optisches Phaselement zwischen der Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung realisiert wird.

122. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach einem der Ansprüche 109 bis 121 mit Beleuchtungsstrahlen eines Beleuchtungsstrahlbündels zwischen einer Lichtquelle und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA), wobei die Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) Spiegelflächen aufweisen dadurch gekennzeichnet, dass das optische System mindestens eine optische Vorrichtung zur Konzentrierung von Beleuchtungsstrahlen des Beleuchtungsstrahlbündels auf den Spiegelflächen der Spiegel der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-Array, MMA) aufweist.

123. Optisches System zur Homogenisierung einer Ausleuchtung einer Mehrfachspiegelanordnung

einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 122 dadurch gekennzeichnet, dass die optische Vorrichtung ein Linsenarray und/oder ein Spiegelarray und/oder ein diffraktives optisches Element (DOE) umfasst.

124. Optische Konditionierungseinheit zur Konditionierung eines Beleuchtungsstrahlbündels eines Lasers für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, wobei der Laser mehr als eine kohärente Lasermode und einen Laserausgang, sowie das Beleuchtungsstrahlbündel eine Divergenz, ein Strahl- oder Bündelprofil und einen Polarisationszustand aufweist dadurch gekennzeichnet, dass die optische Konditionierungseinheit mindestens die Divergenz und/oder das Strahl- bzw. Bündelprofil und/oder den Polarisationszustand des Beleuchtungsstrahlbündels zwischen dem Laserausgang und der Mehrfachspiegelanordnung (Multi-Mirror-array, MMA) ändert.

125. Optische Konditionierungseinheit zur Konditionierung eines Beleuchtungsstrahlbündels eines Lasers für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 124 dadurch gekennzeichnet, dass die optische Konditionierungseinheit mindestens ein anamorphotisches Element und/oder ein asphärisches Element und/oder ein Element mit einer Freiformfläche und/oder ein DOE umfasst.

126. Optische Konditionierungseinheit zur Konditionierung eines Beleuchtungsstrahlbündels eines Lasers für eine Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie nach Anspruch 124 dadurch gekennzeichnet, dass die optische Konditionierungseinheit mindestens ein Spiegel und/oder eine Strahlteilerfläche umfasst.

127. Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauteile mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen eines Substrats, auf das zumindest teilweise eine Schicht aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist,
- Bereitstellen einer Maske, die abzubildende Strukturen aufweist,
- Bereitstellen einer Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 1 bis 47,
- Projizieren wenigstens eines Teils der Maske auf einen Bereich der Schicht mithilfe einer Projektionsoptik der Projektionsbelichtungsanlage.

128. Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauteile mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen eines Substrats, auf das zumindest teilweise eine Schicht aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist,

- Bereitstellen einer Maske, die abzubildende Strukturen aufweist,
- Bereitstellen einer Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 48 bis 92,
- Bereitstellen einer derartigen Projektionsbelichtungsanlage,
- Projizieren wenigstens eines Teils der Maske auf einen Bereich der Schicht mithilfe einer Projektionsoptik der Projektionsbelichtungsanlage.

129. Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauteile mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen eines Substrats, auf das zumindest teilweise eine Schicht aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist,
- Bereitstellen einer Maske, die abzubildende Strukturen aufweist,
- Bereitstellen einer Mehrfachspiegelanordnung für eine Beleuchtungsoptik nach einem der Ansprüche 93 bis 108,
- Bereitstellen einer derartigen Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage,
- Bereitstellen einer derartigen Projektionsbelichtungsanlage,
- Projizieren wenigstens eines Teils der Maske auf einen Bereich der Schicht mithilfe einer Projektionsoptik der Projektionsbelichtungsanlage.

130. Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauteile mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen eines Substrats, auf das zumindest teilweise eine Schicht aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist,
- Bereitstellen einer Maske, die abzubildende Strukturen aufweist,
- Bereitstellen eines optischen Systems für eine Beleuchtungsoptik nach einem der Ansprüche 109 bis 123,
- Bereitstellen einer derartigen Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage,
- Bereitstellen einer derartigen Projektionsbelichtungsanlage,
- Projizieren wenigstens eines Teils der Maske auf einen Bereich der Schicht mithilfe einer Projektionsoptik der Projektionsbelichtungsanlage.

131. Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauteile mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen eines Substrats, auf das zumindest teilweise eine Schicht aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist,
- Bereitstellen einer Maske, die abzubildende Strukturen aufweist,
- Bereitstellen einer optischen Konditionierungseinheit für eine Beleuchtungsoptik nach einem der Ansprüche 124 bis 126,

- Bereitstellen einer derartigen Beleuchtungsoptik für eine Projektionsbelichtungsanlage,
- Bereitstellen einer derartigen Projektionsbelichtungsanlage,
- Projizieren wenigstens eines Teils der Maske auf einen Bereich der Schicht mithilfe einer Projektionsoptik der Projektionsbelichtungsanlage.

132. Mikrostrukturiertes Bauelement, das nach einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 127 bis 131 hergestellt ist.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

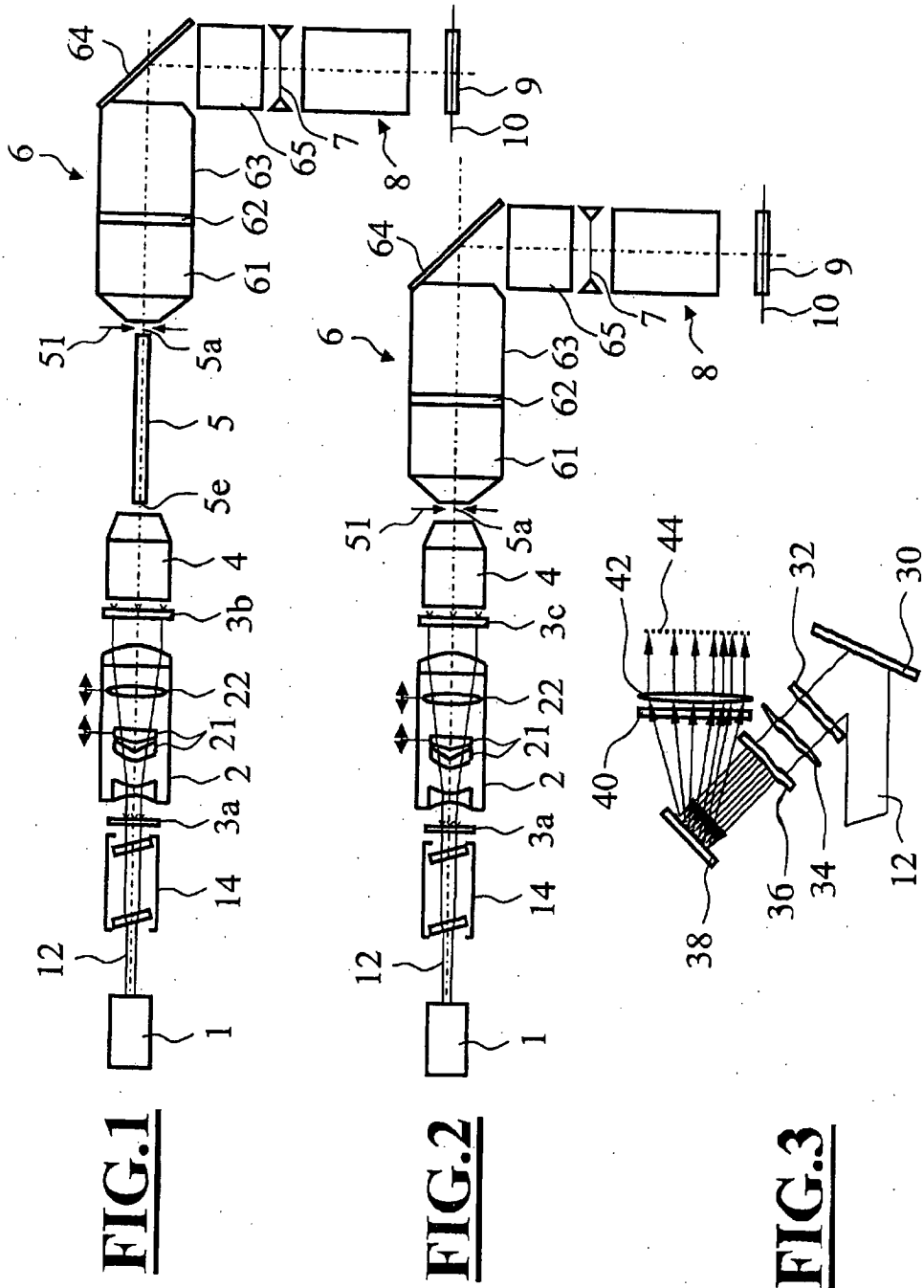


FIG.6

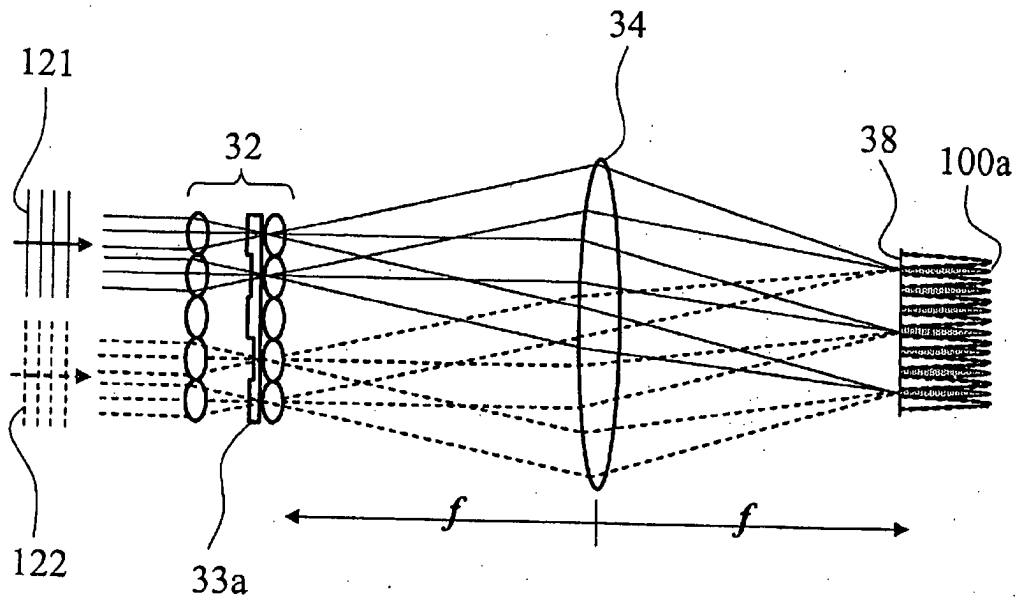


FIG.7

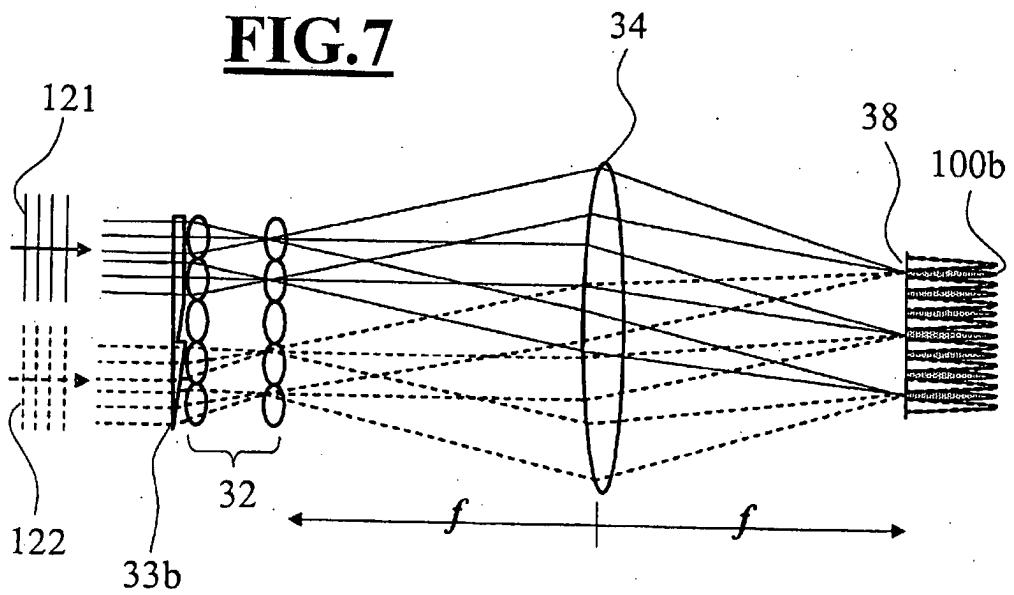


FIG.8

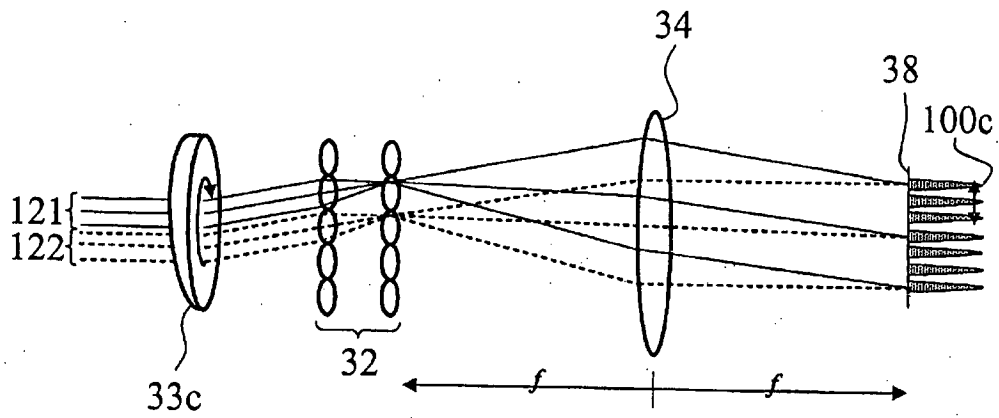


FIG.9

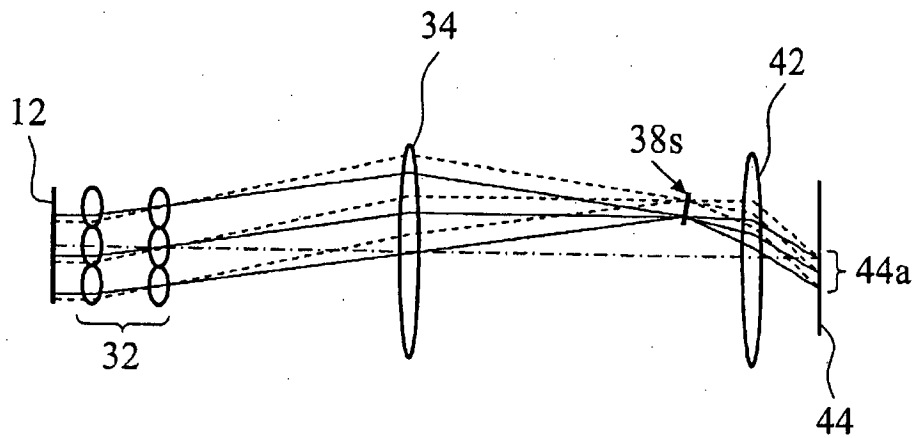


FIG.10

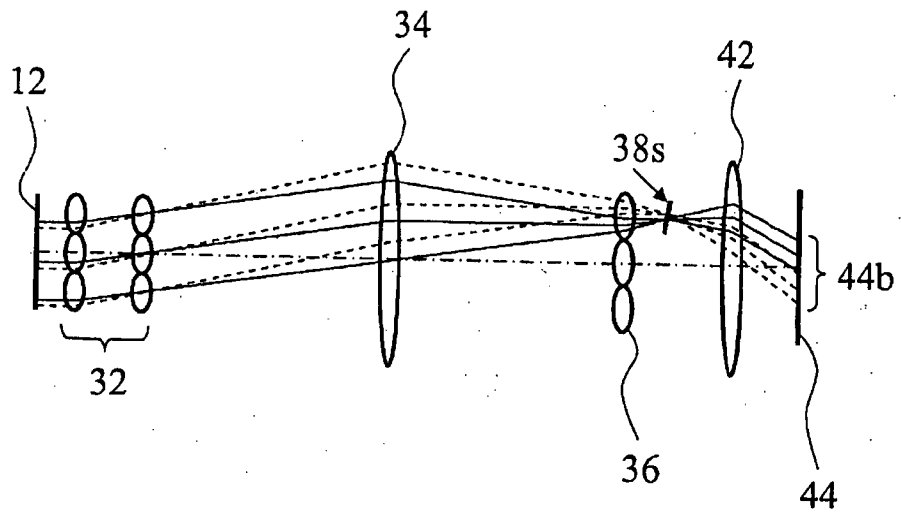


FIG.11

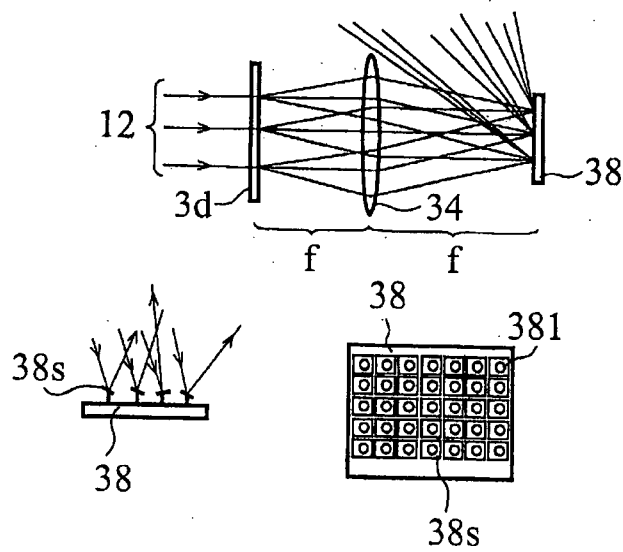


FIG.12

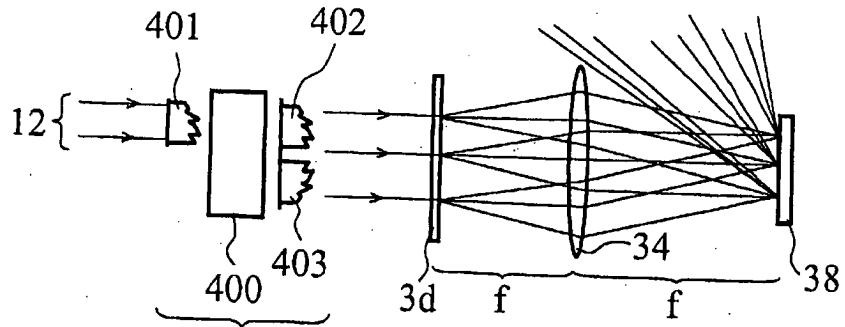


FIG.13

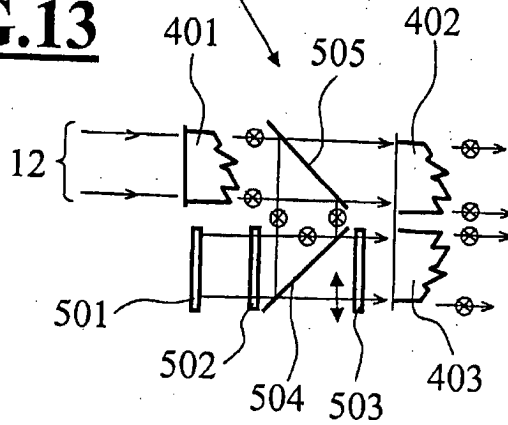


FIG.14

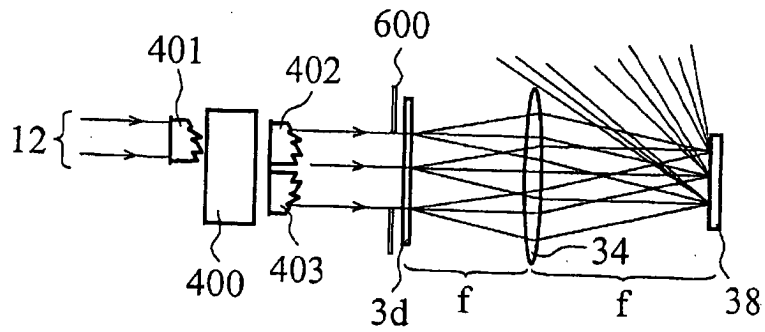


FIG.15

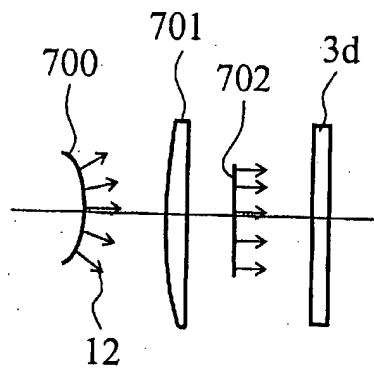


FIG.16

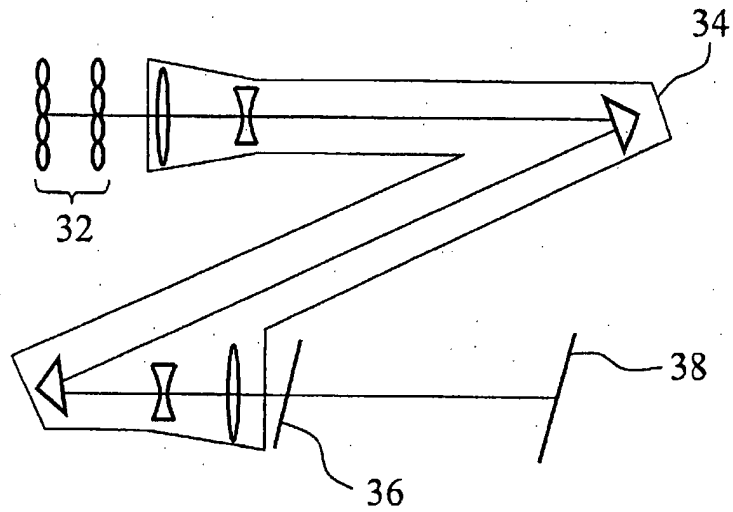


FIG.17

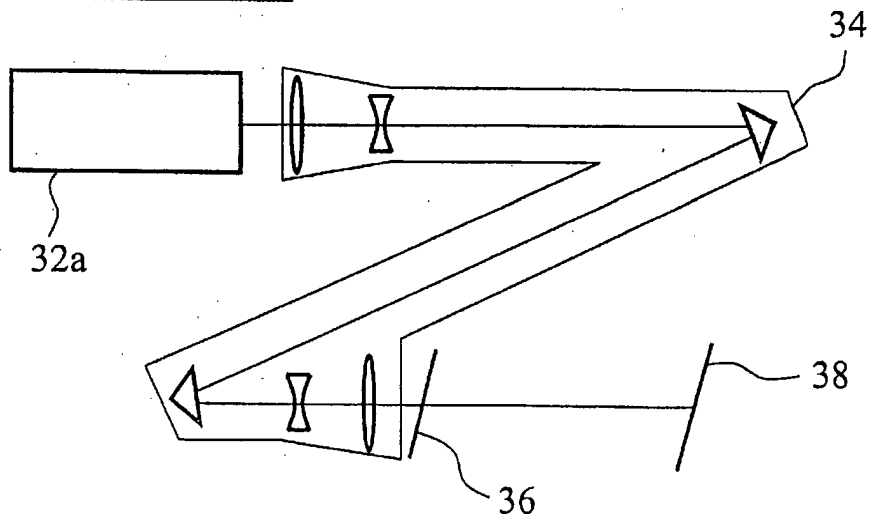


FIG.18

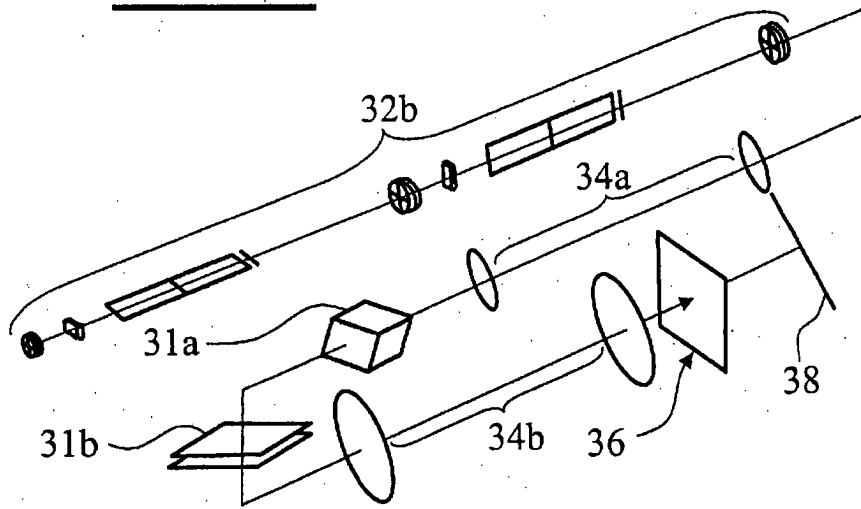


FIG.19

