

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
23. Juli 2015 (23.07.2015)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2015/107116 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation:
G02B 5/08 (2006.01) *G21K 1/06* (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2015/050687
- (22) Internationales Anmeldedatum:
15. Januar 2015 (15.01.2015)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2014 200 932.4
20. Januar 2014 (20.01.2014) DE
- (71) Anmelder: **CARL ZEISS SMT GMBH** [DE/DE];
Rudolf-Eber-Str. 2, 73447 Oberkochen (DE).

- (72) Erfinder: **SCHICKETANZ, Thomas**; Jahnstrasse 13, 73431 Aalen (DE). **DIER, Oliver**; Isaak-Hess-Weg 4, 73466 Lauchheim (DE). **STROBEL, Sebastian**; Ludwigstrasse 27, 73430 Aalen (DE). **WINTER, Ralf**; Spatzenäckerweg 26, 73529 Schwäbisch Gmünd (DE).
- (74) Anwalt: **PATENTANWÄLTE RUFF, WILHELM, BEIER, DAUSTER & PARTNER**; 10 40 36, 70035 Stuttgart (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: EUV MIRROR AND OPTICAL SYSTEM COMPRISING EUV MIRROR

(54) Bezeichnung : EUV-SPIEGEL UND OPTISCHES SYSTEM MIT EUV-SPIEGEL

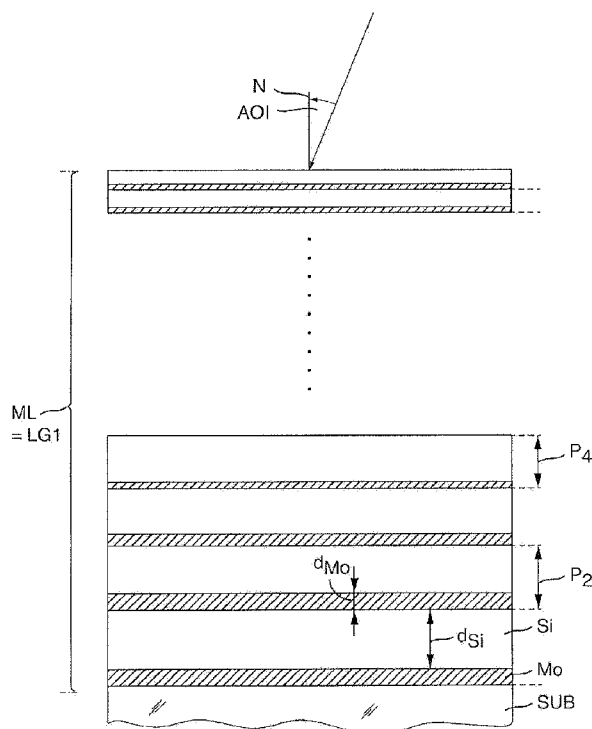


Fig. 1

(57) Abstract: An EUV mirror comprises a substrate (SUB) and a multilayer arrangement (ML) applied to the substrate which reflects radiation with a wavelength λ in the extreme ultraviolet (EUV) range and comprises a plurality of layer pairs consisting of alternating layers of a high-refractive layer material and a low-refractive layer material, the high-refractive material having a larger real component of the refractive index for the wavelength than the low-refractive material. The multilayer arrangement comprises a first radiation-reflecting layer group (LG1) with ten or more first layer pairs, each first layer pair having a first layer (H) of a high-refractive first layer material with a first layer thickness, a second layer (L) of a low-refractive second layer material with a second layer thickness and a period thickness (P) corresponding to the sum of the layer thicknesses of all the layers of a first layer pair. The layer thicknesses of one of the layer materials can be defined according to the period number by a simple monotonic first layer thickness curve function, for example by a linear, quadratic or exponential layer thickness curve function. The layer thicknesses of the other layer material vary according to the period number in accordance with a second layer thickness curve function.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2015/107116 A1



(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,

CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Ein EUV-Spiegel umfasst ein Substrat (SUB) und eine auf dem Substrat aufgebrachte Mehrlagen-Schichtanordnung (ML), die für Strahlung einer Wellenlänge λ aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) reflektierend wirkt und eine Vielzahl von Schichtpaaren mit abwechselnden Schichten aus einem hoch brechenden Schichtmaterial und einem niedrig brechenden Schichtmaterial umfasst, wobei das hoch brechende Schichtmaterial bei der Wellenlänge einen größeren Realteil des Brechungsindex aufweist als das niedrig brechende Schichtmaterial. Die Mehrlagen-Schichtanordnung weist eine für die Strahlung reflektierend wirkende erste Schichtgruppe (LG1) mit zehn oder mehr von ersten Schichtpaaren auf, wobei jedes erste Schichtpaar eine erste Schicht (H) aus einem hoch brechenden ersten Schichtmaterial mit einer ersten Schichtdicke, eine zweite Schicht (L) aus einem niedrig brechenden zweiten Schichtmaterial mit einer zweiten Schichtdicke sowie eine Periodendicke (P) aufweist, die der Summe der Schichtdicken aller Schichten eines ersten Schichtpaares entspricht. Die Schichtdicken eines der Schichtmaterialien sind in Abhängigkeit von der Periodennummer durch eine einfach monotone erste Schichtdickenverlaufsfunktion definierbar, z.B. durch eine lineare, quadratische oder exponentielle Schichtdickenverlaufsfunktion. Die Schichtdicken des anderen der Schichtmaterialien variieren in Abhängigkeit von der Periodennummer gemäß einer zweiten Schichtdickenverlaufsfunktion.

EUV-Spiegel und optisches System mit EUV-Spiegel

ANWENDUNGSGEBIET UND STAND DER TECHNIK

Die Erfindung bezieht sich auf einen EUV-Spiegel gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1 und auf ein optisches System mit einem EUV-Spiegel gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 16. Ein
5 bevorzugtes Anwendungsgebiet ist die EUV-Mikrolithographie. Andere Anwendungsgebiete liegen in der EUV-Mikroskopie und der EUV-Maskenmetrologie.

Zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen, z.B. Masken für die Mikrolithographie, werden heutzutage überwiegend mikrolithographische Projektionsbelichtungsverfahren eingesetzt. Dabei werden Masken (Retikel) oder andere Mustererzeugungseinrichtungen verwendet, die das Muster einer abzubildenden Struktur tragen oder
10 bilden, z.B. ein Linienmuster einer Schicht (Layer) eines Halbleiterbauelementes. Das Muster wird in einer Projektionsbelichtungsanlage zwischen einem Beleuchtungssystem und einem Projektionsobjektiv im Bereich der Objektebene des Projektionsobjektivs positioniert und mit einer vom Beleuchtungssystem bereitgestellten Beleuchtungsstrahlung beleuchtet. Die durch
15 das Muster veränderte Strahlung läuft als Projektionsstrahlung durch das Projektionsobjektiv, welches das Muster auf das zu belichtende, mit einer strahlungsempfindlichen Schicht beschichtete Substrat abbildet, dessen Oberfläche in der zur Objektebene optisch konjugierten Bildebene des Projektionsobjektivs liegt.

Um immer feinere Strukturen erzeugen zu können, wurden in den letzten Jahren optische Systeme entwickelt, die bei moderaten numerischen Aperturen arbeiten und hohe Auflösungsvermögen im Wesentlichen durch die kurze Wellenlänge der verwendeten elektromagnetischen Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) erzielen, insbesondere mit Arbeitswellenlängen im Bereich zwischen 5 nm und 30 nm. Bei der EUV-Lithographie mit Arbeitswellenlängen um 13.5 nm kann beispielsweise bei bildseitigen numerischen Aperturen von $NA=0.3$
25 theoretisch eine Auflösung in der Größenordnung von $0.03\ \mu\text{m}$ bei typischen Schärfentiefen in der Größenordnung von ca. $0.15\ \mu\text{m}$ erreicht werden.

Strahlung aus dem extrem Ultraviolettbereich kann nicht mit Hilfe refraktiver optischer Elemente fokussiert oder geführt werden, da die kurzen Wellenlängen von den bekannten, bei höheren Wellenlängen transparenten optischen Materialien absorbiert werden. Daher werden für die
30 EUV-Lithographie Spiegelsysteme eingesetzt. Eine Klasse von EUV-Spiegeln arbeitet bei relativ hohen Inzidenzwinkeln der einfallenden Strahlung, also bei streifendem Einfall (grazing in-

cidence) nach dem Prinzip der Totalreflexion. Für senkrechten oder nahezu senkrechten Strahlungseinfall werden Mehrlagenspiegel (Multilayer-Spiegel) genutzt. Ein solcher für Strahlung aus dem EUV-Bereich reflektierend wirkender Spiegel (EUV-Spiegel) hat ein Substrat, auf dem eine für Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) reflektierend wirkende Mehrlagen-Schichtanordnung (multilayer) aufgebracht ist, die viele Schichtpaare mit abwechselnd niedrigbrechendem und hochbrechendem Schichtmaterial aufweist. Schichtpaare für EUV-Spiegel werden häufig mit den Schichtmaterial-Kombinationen Molybdän/Silizium (Mo/Si) oder Ruthenium/Silizium (Ru/Si) aufgebaut.

Es ist bekannt, dass die Reflektivität bzw. das Reflexionsvermögen von Multilayer-Spiegeln stark vom Inzidenzwinkel und von der Wellenlänge der auftreffenden EUV-Strahlung abhängt. Ein hoher Maximalwert der Reflektivität kann erreicht werden, wenn die Mehrlagen-Schichtanordnung im Wesentlichen aus einer periodischen Schichtenfolge mit Vielzahl identischer Schichtpaare besteht. Dann ergibt sich jedoch sowohl bei der Abhängigkeit der Reflektivität vom Inzidenzwinkel als auch bei der Abhängigkeit der Reflektivität von der Wellenlänge eine relativ geringe Halbwertsbreite (full width at half maximum, FWHM) der Reflektivitätskurve.

In optischen Systemen für den EUV-Bereich mit relativ hoher numerischer Apertur, beispielsweise in Projektionsobjektiven für die EUV-Mikrolithographie, können jedoch an gewissen Positionen im Strahlengang relativ hohe Inzidenzwinkelvariationen auftreten. Hierfür werden EUV-Spiegel benötigt, deren Reflexionsvermögen über den jeweils auftretenden Inzidenzwinkelbereich nur relativ wenig variiert. Es sind schon zahlreiche Vorschläge zum Aufbau solcher im Inzidenzwinkelbereich breitbandigen Multilayer-Spiegel gemacht worden.

In dem Artikel „EUV multilayer mirrors with tailored spectral reflectivity“ von T. Kuhlmann, S. Yulin, T. Feigl und M. Kaiser in: Proceedings of SPIE Vol. 4782 (2002) Seiten 196 bis 203 wird ein Schichtaufbau von breitbandig wirkenden EUV-Spiegeln beschrieben. Die Mehrlagen-Schichtanordnung umfasst eine Mehrzahl von Schichtgruppen, die jeweils eine periodische Abfolge von mindestens zwei eine Periode bildenden Einzelschichten unterschiedlicher Materialien aufweisen. Die Anzahl der Perioden und die Dicke der Perioden der einzelnen Schichtgruppen nehmen vom Substrat zur Oberfläche hin ab. Ein Ausführungsbeispiel hat drei unterschiedliche Schichtgruppen. Durch diesen Schichtaufbau soll erreicht werden, dass einerseits die Peak-Wellenlängen der Reflexionsmaxima der jeweiligen Schichtgruppen vom Substrat zur Oberfläche hin zu kürzeren Wellenlängen verschoben werden, so dass durch die Überlagerung der Reflexion der einzelnen Schichtgruppen ein breiterer Reflexionspeak des Gesamtsystems erzeugt wird. Andererseits können alle Schichtgruppen in etwa gleich zur Reflektivität des Ge-

samtsystems beitragen. Auf diese Weise lässt sich eine nahezu konstante Reflektivität über einen großen Wellenlängenbereich bzw. Winkelbereich erreichen.

In dem Artikel „Broadband multilayer mirrors for optimum use of soft x-ray source output“ von Z. Wang und A. G. Michette in: J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2 (2000) Seiten 452 – 457 sowie in dem Artikel “Optimisation of depth-graded multilayer designs for EUV and X-ray optics“ von Z. Wang und A. G. Michette in: Proceedings of SPIE Vol. 4145 (2001) Seiten 243 - 253 sind Beispiele für breitbandig wirkende EUV-Spiegel angegeben, bei denen die Breitbandigkeit dadurch erreicht wird, dass die Schichtdicken der Einzelschichten der Mehrlagenbeschichtung in Tiefenrichtung der Mehrlagen-Schichtanordnung als Ergebnis eines Optimierungsprozesses individuell variieren. Derartige Mehrlagen-Schichtanordnungen mit einer mit einem Simulationsprogramm optimierten stochastischen Abfolge einzelner Schichten werden auch als „depth-graded multilayers“ bezeichnet. Die Herstellung derartiger Mehrlagen-Schichtanordnungen kann schwierig sein, da Schichten mit vielen unterschiedlichen Schichtdicken aufeinanderfolgend in einem Beschichtungsprozess erzeugt werden müssen.

EUV-Spiegel mit einer aperiodischen Mehrlagen-Schichtanordnung sind auch aus der WO 2009/043374 A1 bekannt. Die Mehrlagen-Schichtanordnung weist auf der Strahlungseintrittsseite eine Schutzschicht ("capping layer") auf. Die Schichtdicken einzelner Schichten variieren dabei in mindestens einem Teilbereich der Mehrlagen-Schichtanordnung chaotisch.

Aus dem Stand der Technik sind breitbandige EUV-Spiegel für senkrechten oder nahezu senkrechten Strahlungseinfall bekannt, die eine Mehrlagen-Schichtanordnung mit unterschiedlichen Gruppen von Schichtenpaaren aufweisen. Eine oberflächennahe Schichtgruppe (surface layer film group) ist an der Strahlungseintrittsseite der Mehrlagen-Schichtanordnung angeordnet. Gegenüber der Strahlungseintrittsseite folgt eine zusätzliche Schicht (additional layer). Darauf folgt in Richtung des Substrats eine tiefer liegende Gruppe von Schichtpaaren (deep layer film group). Dabei ist die Reflektivität der oberflächennahen Schichtgruppe höher als die Reflektivität der substratnahen tieferen Schichtgruppe und die reflektierte Strahlung wird aufgrund der Anwesenheit der zusätzlichen Schicht so phasenverschoben, dass ein Reflektivitätsmaximalwert (reflectivity peak value) der gesamten Mehrlagen-Schichtanordnung geringer ist und die Reflektivität um die Peak-Wellenlänge höher ist als in Abwesenheit der zusätzlichen Schicht. Die optische Schichtdicke der zusätzlichen Schicht soll etwa ein Viertel der Wellenlänge der EUV-Strahlung (d.h. $\lambda/4$) bzw. die Hälfte der Periodendicke der Mehrlagen-Schichtanordnung oder diesem Wert zuzüglich einem ganzzahligen Vielfachen der Periodendicke entsprechen.

AUFGABE UND LÖSUNG

Es ist eine Aufgabe der Erfindung, einen EUV-Spiegel gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1 bereitzustellen, der über einen großen Inzidenzwinkelbereich nur eine geringe Variation des Reflexionsvermögens aufweist und der weiterhin mit hoher Präzision reproduzierbar hergestellt werden kann.

Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung einen EUV-Spiegel mit den Merkmalen von Anspruch 1 bereit. Weiterhin wird ein optisches System mit einem EUV-Spiegel mit den Merkmalen von Anspruch 16 bereitgestellt. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

Die erste Schichtgruppe hat eine ausreichend hohe Anzahl erster Schichtpaare, die insgesamt eine Vielzahl von Grenzflächen zwischen relativ hoch brechendem und relativ niedrig brechendem Schichtmaterial bilden, welche jeweils einen Anteil der auftreffenden EUV-Strahlung reflektieren, so dass die erste Schichtgruppe insgesamt für die Strahlung reflektierend wirkt und einen substantiellen Beitrag zur Gesamt-Reflektivität der Mehrlagen-Schichtanordnung leistet. Um dieses zu erreichen, hat die erste Schichtgruppe mindestens zehn erste Schichtpaare. Es können auch deutlich mehr als zehn erste Schichtpaare vorgesehen sein, beispielsweise 15 oder mehr, oder 20 oder mehr, oder 30 oder mehr, oder 50 oder mehr erste Schichtpaare.

Ein Schichtpaar umfasst jeweils eine erste Schicht aus einem relativ hoch brechenden Schichtmaterial und eine zweite Schicht aus einem relativ dazu niedrig brechenden Schichtmaterial. Solche Schichtpaare werden auch als „Periode“, „Doppelschicht“ oder „Bilayer“ bezeichnet und können durch eine Periodendicke charakterisiert werden, die im Rahmen dieser Anmeldung der Summe der (geometrischen oder optischen) Schichtdicken aller Schichten eines ersten Schichtpaares entspricht. Ein Schichtpaar kann zusätzlich zu den beiden Schichten aus relativ hoch brechendem bzw. relativ niedrig brechendem Schichtmaterial noch eine oder mehrere weitere Schichten aufweisen, beispielsweise eine zwischengeschaltete Barrierschicht zur Reduzierung der Interdiffusion zwischen benachbarten Schichten.

Die nominellen Schichtdicken eines der Schichtmaterialien (erstes Schichtmaterial oder zweites Schichtmaterial) sind durch eine einfach monotone erste Schichtdickenverlaufsfunktion in Abhängigkeit von der Periodennummer definierbar, während die Schichtdicken des anderen der Schichtmaterialien (zweites Schichtmaterial oder erstes Schichtmaterial) in Abhängigkeit von der Periodennummer gemäß einer zweiten Schichtdickenverlaufsfunktion variiert. Der Begriff

„Periodennummer“ bezieht sich hierbei auf eine Nummerierung der unmittelbar aufeinander folgenden Perioden bzw. Schichtpaare beginnend auf der dem Substrat zugewandten Seite und endend an der Strahlungseintrittsseite der ersten Schichtgruppe. Die Periodennummer kann auch als Schichtpaar-Nummer bezeichnet werden.

- 5 Die nominellen Schichtdicken der einzelnen Schichten der Schichtpaare folgen somit bestimmten Schichtdickenverlaufsfunctionen, wobei sich die nominelle Schichtdicke einer jeweiligen Schicht als Funktionswert der Schichtdickenverlaufsfunction für das jeweilige Argument (Periodennummer bzw. Schichtpaar-Nummer) ergibt. Die tatsächlichen Schichtdicken müssen dabei nicht den mathematisch exakten Funktionswerten der Schichtdickenverlaufsfunction (d.h. den
- 10 nominellen Schichtdicken) entsprechen. Die tatsächlichen Schichtdicken dürfen vielmehr im Rahmen von Fertigungstoleranzen von demjenigen Funktionswert abweichen, der sich aus der jeweiligen Schichtdickenverlaufsfunction ergibt. Fertigungstoleranzen können pro Einzelschicht z.B. im Bereich von 5% oder maximal 10 % der absoluten Schichtdicke der Einzelschicht liegen.

- Für eines der Schichtmaterialien (erstes Schichtmaterial oder zweites Schichtmaterial) folgen
- 15 die (nominellen) Schichtdicken einer einfach monotonen ersten Schichtdickenverlaufsfunction. Damit wird hier eine Schichtdickenverlaufsfunction bezeichnet, die sich analytisch durch maximal fünf Schichtdickenparameter vollständig beschreiben lässt. Die Erfinder haben erkannt, dass sich hierdurch erhebliche Vorteile hinsichtlich der Präzision der Schichtdicken bei der Fertigung und/oder bei der Stabilität der hergestellten Mehrschicht-Schichtanordnung erreichen
- 20 lassen.

- Die Schichtdicken, welche der einfach monotonen ersten Schichtdickenverlaufsfunction folgen, variieren somit nicht beliebig oder auf komplizierte Weise, sondern folgen einer gewissen, relativ einfach parametrisierbaren Systematik. Eine solche Systematik erlaubt es zum Beispiel, aus Messungen leichter auf Fertigungsfehler zu schließen. Weiterhin kann beispielsweise die
- 25 Schichtrauheit einer Schicht besser eingestellt und/oder kontrolliert werden, wenn die Schichtdicke dieses Schichtmaterials einer einfach monotonen ersten Schichtdickenverlaufsfunction folgt.

- In der Praxis ist z.B. davon auszugehen, dass sich eine Beschichtungsanlage während des gesamten Beschichtungsprozesses, also bei der Herstellung der aufeinanderfolgenden Einzelschichten einer Mehrlagen-Schichtanordnung, hinsichtlich einiger für das Beschichtungsergebnis relevanter Eigenschaften zeitlich verändern kann. Dadurch wird es normalerweise schwierig, aus den Ergebnissen von Messungen, beispielsweise Reflektivitätsmessungen, auf die Schichtdicken der jeweiligen Einzelschichten zu schließen. So ist beispielsweise möglich, dass
- 30

sich durch Fehler in der Beschichtungsratenbestimmung ein linearer Fehler der Schichtdicke ergibt, so dass die Größe des Fehlers von der Design-Schichtdicke (d.h. der nominellen Schichtdicke) abhängt. Alternativ oder zusätzlich kann sich ein linearer Drift der Einzelschichtdicken aufgrund von Veränderungen der Beschichtungsanlage während der Beschichtung ergeben, so dass sich beispielsweise anstelle einer über viele Schichtpaare konstanten Schichtdicke eines ausgewählten Schichtmaterials eine allmähliche Vergrößerung oder Verkleinerung der Schichtdicken dieses Schichtmaterials mit zunehmendem Abstand vom Substrat ergibt. Ist die erste Schichtdickenverlaufsfunktion eine lineare Funktion, so müssen diese beiden Effekte nicht getrennt bestimmt werden, so dass es möglich ist, die Ergebnisse der Messungen leichter zu interpretieren. Würden dagegen die nominellen Schichtdicken keiner einfach monotonen Schichtdickenverlaufsfunktion folgen, so müssten beiden Fehler separat bekannt sein, um die richtigen Schichtdicken bestimmen zu können.

Die Schichtdicke des anderen Schichtmaterials sollte in Abhängigkeit von der Schichtpaar-Nummer gemäß einer zweiten Schichtdickenverlaufsfunktion variieren, so dass sich für dieses andere Schichtmaterial innerhalb der ersten Schichtgruppe Schichtdickenunterschiede ergeben, die deutlich außerhalb der Fertigungstoleranzen liegen.

Durch die Kombination dieser Vorgaben für die Schichtdicken sind Mehrlagen-Schichtanordnungen bzw. EUV-Spiegel realisierbar, die bei ausreichend hoher Reflektivität im Winkelraum eine ausreichend niedrige Variation der Reflektivität für bestimmte Inzidenzwinkelintervalle haben und die gleichzeitig mit hoher Präzision reproduzierbar hergestellt werden können.

Die genannten Bedingungen gelten bei EUV-Spiegeln unabhängig davon, ob die Schichtdicke als geometrische Schichtdicke oder als optische Schichtdicke (Produkt aus geometrischer Schichtdicke und Realteil des Brechungsindex) angegeben wird, da der Realteil des Brechungsindex bei den relevanten Materialien nahe bei 1 liegt.

Bei der beanspruchten Erfindung ist die erste Schichtdickenverlaufsfunktion durch einen, zwei oder drei Schichtdickenparameter vollständig definierbar. Bei Einhaltung dieser Bedingung reichen somit maximal drei Schichtdickenparameter aus, um die Werte der nominellen Schichtdicken eines der Schichtmaterialien über die gesamte erste Schichtgruppe vollständig festzulegen. Hierdurch ergibt sich eine sehr einfache Beschreibung der betroffenen Schichtdicken und eine entsprechend einfache und präzise Möglichkeit der Interpretation von Messergebnissen, um z.B. auf unkontrollierbare Veränderungen im Beschichtungsprozess rückschließen zu können.

Bei manchen Ausführungsformen ist die erste Schichtdickenverlaufsfunktion eine konstante Funktion, so dass die Schichtdicken eines der Schichtmaterialien über die gesamte erste Schichtgruppe (im Rahmen der Toleranzen) konstant sind. Die erste Schichtdickenverlaufsfunktion ist dann durch einen einzigen Schichtdickenparameter, nämlich die gewünschte Schichtdicke, gegeben, beispielsweise durch die Angabe

$$d(n) = a;$$

wobei $d(n)$ die nominelle Schichtdicke der betroffenen Schichten im Schichtpaar n (mit $n = 1, 2, 3 \dots$) die Periodennummer und a die vorgegebene konstante Schichtdicke der betroffenen Schichtmaterialien ist. Bei dem Schichtmaterial, welches innerhalb der ersten Schichtgruppe mit konstanter Schichtdicke erzeugt werden soll, kann es sich je nach Materialkombination um ein relativ hoch brechendes erstes Schichtmaterial oder um ein relativ niedrig brechendes zweites Schichtmaterial handeln.

Es kann beispielsweise aus Gründen der Kontrolle von Schichtrauheit vorteilhaft sein, Einzelschichtdicken bestimmter Materialien nicht zu variieren. Bei manchen Ausführungsformen ist das Schichtmaterial, welches gemäß einer konstanten ersten Schichtdickenverlaufsfunktion erzeugt wird, ausgewählt aus der Gruppe Molybdän (Mo), Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh) und Palladium (Pd).

Bei manchen Ausführungsformen, insbesondere bei solchen, bei denen eines der Schichtmaterialien in der gesamten ersten Schichtgruppe im Wesentlichen die gleiche Schichtdicke hat (konstante erste Schichtdickenverlaufsfunktion), definiert die zweite Schichtdickenverlaufsfunktion eine stochastische Schichtdickenverteilung des anderen Schichtmaterials. Bei diesem anderen Schichtmaterial kann es sich beispielsweise um Silizium (Si) handeln. Damit kann beispielsweise die Schichtspannung auch bei stark unterschiedlichen Schichtdicken vorhergesagt werden.

Bei manchen Ausführungsformen ist die erste Schichtdickenverlaufsfunktion eine linear steigende oder linear fallende Funktion, so dass die Schichtdicken eines der Schichtmaterialien über die gesamte erste Schichtgruppe linear steigen oder abfallen. In diesen Fällen reicht die Angabe von zwei Schichtdickenparametern aus, um die nominellen Schichtdicken des betroffenen Schichtmaterials vollständig zu bestimmen. Die Schichtdickenverlaufsfunktion kann beispielsweise wie folgt formuliert werden:

$$d(n) = a + b \cdot n,$$

wobei a ein Anfangswert der jeweiligen Schichtdicke, $n = 1, 2, 3 \dots$ die Periodennummer und b der Gradient bzw. die Steigung der Schichtdickenverlaufsfunktion ist. Der Gradient bzw. die Steigung gibt dabei an, um welchen Betrag sich die Schichtdicken unmittelbar benachbarter Schichten des gleichen Schichtmaterials unterscheiden.

- 5 Bei manchen Ausführungsformen, die sich dadurch auszeichnen, dass die erste Schichtdickenverlaufsfunktion eine linear steigende oder linear fallende Funktion ist, ist vorgesehen, dass auch die zweite Schichtdickenverlaufsfunktion eine linear steigende oder linear fallende Funktion ist. Hierdurch ist für beide Schichtmaterialien eine besonders einfach analysierbare Beschreibung der nominellen Schichtdicken aller Einzelschichten innerhalb der ersten Schichtgruppe möglich.

- 10 Es kann dabei sein, dass die zweite Schichtdickenverlaufsfunktion gegenläufig zur ersten Schichtdickenverlaufsfunktion verläuft, so dass beispielsweise bei linear fallender Schichtdicke des ersten Schichtmaterials die Schichtdicke des zweiten Schichtmaterials linear ansteigt oder umgekehrt. In diesen Fällen kann es sein, dass die Periodendicke innerhalb der ersten Schichtgruppe konstant bleibt oder nur leicht, d.h. weniger stark als die Einzelschichtdicken, variiert. Es ist jedoch auch möglich, dass die Schichtdicken beider Schichtmaterialien gleichermaßen linear abfallen oder gleichermaßen linear ansteigen, wobei die Gradienten für die einzelnen Schichtmaterialien gleich oder unterschiedlich sein können. In diesen Fällen wird die Periodendicke ebenfalls linear ansteigen oder abfallen.

- 20 Bei manchen Ausführungsformen ist vorgesehen, dass die erste Schichtdickenverlaufsfunktion eine quadratische oder eine exponentielle Funktion ist, so dass sich eine allmähliche Zunahme oder eine allmähliche Abnahme der Schichtdicke des betroffenen Schichtmaterials in kleinen systematischen Schritten innerhalb der ersten Schichtgruppe ergibt, wobei außerdem die Schrittgröße, d.h. der Schichtdickenunterschied zwischen unmittelbar benachbarten Schichten des gleichen Schichtmaterials, mit zunehmendem Abstand vom Substrat zunimmt oder abnimmt. Quadratische und exponentielle erste Schichtdickenverlaufsfunktionen lassen sich jeweils durch genau drei Schichtdickenverlaufsparemeter a , b und c vollständig bestimmen, beispielsweise nach folgenden Gleichungen:

$$d(n) = a + b \cdot \exp(c \cdot n) \text{ (exponentiell)}$$

30
$$d(n) = a + b \cdot n + c \cdot n^2 \text{ (quadratisch)}$$

Bei manchen Ausführungsformen ist vorgesehen, dass die zweite Schichtdickenverlaufsfunction eine quadratische oder eine exponentielle Function ist. Insbesondere kann sowohl die erste als auch die zweite Schichtdickenverlaufsfunction eine quadratische oder eine exponentielle Function sein. Dabei kann es sein, dass die zweite Schichtdickenverlaufsfunction gegenläufig zur ersten Schichtdickenverlaufsfunction verläuft, so dass die Periodendicke weniger stark variiert als die Schichtdicke der stärker variierenden Einzelschicht.

Es ist möglich, dass die erste Schichtgruppe die einzige für die EUV-Strahlung reflektierend wirkende Schichtgruppe der Mehrlagen-Schichtanordnung ist.

In manchen Fällen ergeben sich weitere vorteilhafte Freiheitsgrade bei der Auslegung der Winkelabhängigkeit des Reflektivitätsverhaltens, wenn die Mehrlagen-Schichtanordnung zusätzlich zu der ersten Schichtgruppe eine für die Strahlung reflektierend wirkende zweite Schichtgruppe mit zehn oder mehr zweiten Schichtpaaren aufweist, wobei die erste Schichtgruppe zwischen dem Substrat und der zweiten Schichtgruppe angeordnet ist. Die zweite Schichtgruppe befindet sich also an der dem Substrat abgewandten Seite der ersten Schichtgruppe, also näher an der Strahlungseintrittsseite der Mehrlagen-Schichtanordnung. Um zu erreichen, dass auch die zweite Schichtgruppe einen substantiellen Beitrag zur Gesamt-Reflektivität leistet, hat die zweite Schichtgruppe mindestens zehn zweite Schichtpaare. Es können auch deutlich mehr als zehn zweite Schichtpaare vorgesehen sein, beispielsweise 15 oder mehr, oder 20 oder mehr, oder 30 oder mehr, oder 50 oder mehr zweite Schichtpaare.

Die nominellen Schichtdicken der einzelnen Schichten der zweiten Schichtgruppe können nach ähnlichen oder anderen Bildungsgesetzen wie die nominellen Schichtdicken der ersten Schichtgruppe ausgelegt sein. Insbesondere kann es so sein, dass innerhalb der zweiten Schichtgruppe die Schichtdicken eines der Schichtmaterialien in Abhängigkeit von der Periodennummer durch eine einfach monotone erste Schichtdickenverlaufsfunction definierbar sind und die Schichtdicken des anderen der Schichtmaterialien in Abhängigkeit von der Periodennummer gemäß einer zweiten Schichtdickenverlaufsfunction variieren. Bei Ausführungsbeispielen mit einer eintrittsseitigen zweiten Schichtgruppe ergeben sich für das Design mehr Freiheitsgrade, um eine relativ homogene Reflektivität zu erreichen.

Beispielsweise gibt es Ausführungsformen, bei denen innerhalb der ersten Schichtgruppe die Schichtdicken des ersten Schichtmaterials und des zweiten Schichtmaterials jeweils gegenläufig linear variieren und die Schichtdicken dieser Schichtmaterialien auch innerhalb der zweiten Schichtgruppe gegenläufig linear variieren, jedoch gegebenenfalls mit anderen Anfangswerten

und Steigungen. Hierdurch lassen sich in manchen Fällen besonders geringe Variationen der Reflektivität über einen relativ großen Inzidenzwinkelbereich erreichen.

Insbesondere kann es so sein, dass eine Variation von Schichtdicken der Schichtmaterialien innerhalb der dem Substrat näher liegenden ersten Schichtgruppe wesentlich stärker ist als innerhalb der der Strahlungseintrittsseite näher liegenden zweiten Schichtgruppe. Innerhalb der substratnahen ersten Schichtgruppe kann die Variation der Schichtdicken z.B. mindestens doppelt so groß oder mindestens dreimal so groß oder mindestens viermal so groß sein wie innerhalb der zweiten Schichtgruppe näher bei der Strahlungseintrittsseite. Der Begriff „Variation“ bezeichnet hier den Unterschied zwischen minimaler und maximaler Schichtdicke eines Schichtmaterials innerhalb einer Schichtgruppe. Bei einem Monostack (konstante Schichtdicken beider Schichtmaterialien) ist die nominelle Variation gleich null. Während geringe Schichtdickenvariationen näher an der Strahlungseintrittsseite günstig für hohe Reflektivitätswerte sein können, wirken sich große Schichtdickenvariationen in der Nähe des Substrats günstig auf die Breitbandigkeit im Winkelraum aus.

Die Schichtdicken der Schichtmaterialien innerhalb der zweiten Schichtgruppe können also derart gewählt werden, dass die zweite Schichtgruppe einen relativ großen Beitrag zur maximalen Reflektivität der Mehrlagen-Schichtanordnung liefert, während die erste Schichtgruppe Beiträge zur Breitbandigkeit leistet. Bei manchen Ausführungsformen weist innerhalb der zweiten Schichtgruppe eines der Schichtmaterialien, insbesondere Molybdän, über die gesamte zweite Schichtgruppe eine konstante Schichtdicke auf, und die Schichtdicke des anderen Schichtmaterials, insbesondere Silizium, innerhalb der zweiten Schichtgruppe ist ebenfalls konstant, so dass sich innerhalb der zweiten Schichtgruppe ein Schichtaufbau ähnlich wie bei einem „Monostack“ ergibt.

Die Erfindung betrifft auch ein optisches System mit mindestens einem EUV-Spiegel der oben oder nachfolgend näher beschriebenen Art.

Bei dem optischen System kann es sich z.B. um ein Projektionsobjektiv oder um ein Beleuchtungssystem für eine mit EUV-Strahlung arbeitende Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage handeln. Der EUV-Spiegel kann eine ebene Spiegelfläche oder eine konvex oder konkav gekrümmte Spiegelfläche haben. In einem Projektionsobjektiv kann z.B. der Spiegel, an dem das größte Inzidenzwinkelintervall auftritt, wie hier beschrieben aufgebaut sein, ggf. auch mehrere oder alle EUV-Spiegel. Der EUV-Spiegel kann ein einachsiger oder mehrachsiger verkipper Einzelspiegel eines steuerbaren Multi-Mirror-Arrays (MMA) sein, an dem je nach Kippstellung unterschiedliche Inzidenzwinkelintervalle auftreten können. Hier

kann eine breitbandige Wirkung besonders vorteilhaft sein. Ein Multi-Mirror-Array kann mehrere EUV-Spiegel der hier beschriebenen Art aufweisen. EUV-Spiegel können auch bei anderen optischen Systemen verwendet werden, z.B. im Bereich der Mikroskopie.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

- 5 Weitere Vorteile und Aspekte der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen und aus der nachfolgenden Beschreibung von bevorzugten Ausführungsbeispielen der Erfindung, die nachfolgend anhand der Figuren erläutert sind. Dabei zeigen:
- Fig. 1 zeigt einen schematischen Vertikalschnitt durch die Schichtstruktur einer Mehrlagen-Schichtanordnung gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel;
- 10 Fig. 2 zeigt ein Schichtdickendiagramm des ersten Ausführungsbeispiels;
- Fig. 3 zeigt ein Schichtdickendiagramm eines zweiten Ausführungsbeispiels;
- Fig. 4 zeigt ein Schichtdickendiagramm eines dritten Ausführungsbeispiels;
- Fig. 5 zeigt ein Vergleichsdiagramm zur Inzidenzwinkelabhängigkeit der Reflektivitäten des ersten bis dritten Ausführungsbeispiels und eines Referenzspiegels mit einem Mo/Si-Monostacks (MS);
- 15 Fig. 6 zeigt ein Schichtdickendiagramm eines vierten Ausführungsbeispiels;
- Fig. 7 zeigt ein Schichtdickendiagramm eines fünften Ausführungsbeispiels;
- Fig. 8 zeigt ein Vergleichsdiagramm zur Inzidenzwinkelabhängigkeit der Reflektivitäten des vierten und fünften Ausführungsbeispiels;
- 20 Fig. 9 zeigt Komponenten einer EUV-Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gemäß einer Ausführungsform der Erfindung.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

Im Folgenden werden Aspekte der Erfindung am Beispiel von mehreren Ausführungsbeispielen von EUV-Spiegeln erläutert, die für eine EUV-Arbeitswellenlänge von $\lambda = 13.5 \text{ nm}$ und für Inzidenzwinkel aus dem Intervall $10^\circ \leq \text{AOI} \leq 17.5^\circ$ ausgelegt sind, also für einen mittleren Inzidenzwinkel $\text{AOI}_M = 13.75^\circ$. Der Inzidenzwinkel (Angle of Incidence, AOI) bezeichnet hierbei den Winkel, den ein auf die Spiegeloberfläche auftreffender Strahl mit der Oberflächennormalen N

25

des Spiegels am Auftreffpunkt einschließt (vgl. Fig.1). Inzidenzwinkelintervalle dieser Art können beispielsweise in optischen Systemen für die EUV-Mikrolithographie auftreten, welche mit hoher numerischer Apertur arbeiten.

- Bei derartigen Inzidenzwinkeln werden bekanntlich Mehrlagenspiegel (Multilayer-Spiegel) mit einer für die EUV-Strahlung reflektierend wirkenden Mehrlagen-Schichtanordnung (Multilayer) genutzt, die viele Schichtpaare (Bilayer) enthalten, welche alternierend aufgebraute Schichten eines Schichtmaterials mit höherem Realteil des Brechungsindex (auch „Spacer“ genannt) und eines Schichtmaterials mit relativ dazu niedrigerem Realteil des Brechungsindex (auch „Absorber“ genannt) aufweisen. Schichtpaare können z.B. mit den Schichtmaterial-Kombinationen Molybdän/Silizium (Mo/Si) und/oder Ruthenium/Silizium (Ru/Si) aufgebaut sein. Dabei bildet Silizium jeweils das Spacer-Material, während Mo bzw. Ru als Absorbermaterial dienen. Ein Schichtpaar kann mindestens eine weitere Schicht enthalten, insbesondere eine zwischengeschaltete Barrierschicht, die z.B. aus C, B_4C , Si_xN_y , SiC oder aus einer Zusammensetzung mit einem dieser Materialien bestehen kann und Interdiffusion an der Grenzfläche unterbinden soll.
- Die nachfolgend dargestellten Ausführungsbeispiele sollen zur Veranschaulichung einiger Grundprinzipien dienen. Als Schichtmaterialien kommen jeweils Molybdän (Mo) und Silizium (Si) zum Einsatz, wodurch sich eine übersichtliche Darstellung ergibt. Die Grundprinzipien können auch bei anderen Wellenlängen, anderen Inzidenzwinkelintervallen und/oder anderen Schichtmaterial-Kombinationen genutzt werden. Die Grundprinzipien wirken außerdem unabhängig vom Einsatz von Barrierschichten und/oder Schutzschichten, die zusätzlich in einem Schichtstapel vorgesehen sein können.

Fig. 1 zeigt einen schematischen Vertikalschnitt durch die Schichtstruktur einer Mehrlagen-Schichtanordnung ML gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel.

- Fig. 2 zeigt ein zugehöriges Schichtdickendiagramm. Auf der Abszisse ist die Schichtnummer LN der einzelnen Schichten und auf der Ordinate deren geometrische Schichtdicke d in [nm] angegeben. Die punktförmigen Symbole stehen für Einzelschichten aus Molybdän (Mo), während die Dreieckssymbole für Einzelschichten aus Silizium (Si) stehen. Die quadratischen Symbole repräsentieren die (geometrische) Periodendicke P der Schichtpaare. Die Einzelschichten mit Schichtnummern 1 und 2 gehören zum Schichtpaar mit der Periodennummer 1 ($n = 1$), die unmittelbar folgenden Einzelschichten mit Schichtnummern 3 und 4 gehören zum Schichtpaar mit der Periodennummer 2 ($n = 2$) etc. Das nicht dargestellte Substrat befindet sich an der linken Seite, so dass die Einzelschicht mit der Schichtnummer 1 direkt an das Substrat angrenzt.

Die Strahlungseintrittsseite liegt entsprechend rechts bei der höchsten Schichtnummer. Diese Darstellungsweise gilt für alle Schichtdickendiagramme dieser Anmeldung.

Der EUV-Spiegel aus Fig. 1 oder Fig. 2 hat ein Substrat SUB, das eine mit optischer Präzision bearbeitete Substratoberfläche hat, auf der eine Mehrlagen-Schichtanordnung ML aufgebracht ist, die im Folgenden auch als „Multilayer“ bezeichnet wird. Die Mehrlagen-Schichtanordnung besteht im Beispiel aus 78 Einzelschichten, wobei Molybdänschichten (schraffiert) und Siliziumschichten (ohne Schraffur) abwechseln. Dadurch werden 39 Mo/Si-Schichtpaare gebildet, die auch als Mo/Si-Bilayer oder Perioden bezeichnet werden.

Die Mehrlagen-Mehrschichtanordnung ML wird im Wesentlichen oder ausschließlich durch eine für die eintretende EUV-Strahlung reflektierend wirkende erste Schichtgruppe LG1 gebildet, die 39 erste Schichtpaare, nämlich die 39 Mo/Si-Schichtpaare aufweist. Das Schichtmaterial Silizium ist bei dieser Materialpaarung dasjenige Schichtmaterial mit dem höheren Realteil des Brechungsindex, also das relativ hoch brechende erste Schichtmaterial, während Molybdän bei der EUV-Wellenlänge einen relativ niedrigeren Realteil des Brechungsindex hat und somit das relativ niedrig brechende zweite Schichtmaterial ist. Die geometrische Schichtdicke einer Si-Schicht wird mit d_{Si} bezeichnet, die geometrische Schichtdicke der Mo-Einzelschicht mit d_{Mo} . Die Summe der geometrischen Schichtdicken aller Einzelschichten eines Schichtpaars wird hier als Periodendicke P_i bezeichnet, wobei der Index i für die Periodennummer steht. In die Periodendicke gehen neben den Schichtdicken d_{Mo} und d_{Si} auch noch die geometrischen Schichtdicken eventueller weiterer Schichten ein, beispielsweise von diffusionshemmenden Zwischenschichten, deren Schichtdicken jedoch in der Regel um ein Mehrfaches geringer sind als die Schichtdicken von Mo und Si.

Innerhalb der ersten Schichtgruppe LG1 fällt die Schichtdicke der Mo-Schichten mit zunehmendem Abstand vom Substrat in Richtung der Strahlungseintrittsseite kontinuierlich gemäß einer linearen ersten Schichtdickenverlaufsfunktion ab. Unmittelbar benachbarte Mo-Schichten haben somit jeweils den gleichen Schichtdickenunterschied zueinander. Die Einzelschichtdicken der Si-Schichten nehmen ebenfalls von der Substratseite zur Strahlungseintrittsseite in gleichen Schritten linear ab, wobei diese Abhängigkeit von der Schichtpaar-Nummer durch eine lineare zweite Schichtdickenverlaufsfunktion gegeben ist. Das Schichtdickendiagramm in Fig. 2 veranschaulicht dieses Verhalten. Die Einzelschichtdicken von Mo und Si variieren jeweils linear mit der Schichtpaar-Nummer. Gleiches gilt auch für die Periodendicke. Die Schichtdickenverlaufsfunktion in Abhängigkeit von der Schichtpaar-Nummer n ($1 \leq n \leq 39$) lautet jeweils $d(n)=a+b \cdot n$. Der Schichtdickenparameter a gibt dabei jeweils einen Anfangswert der Schichtdicke und der

Schichtdickenparameter b die Steigung bzw. den Gradienten des Schichtdickenverlaufs an. Für die Schichtdickenparameter gilt:

5	Mo:	$a=3.58,$	$b=-0.01$
	Si:	$a=4.22,$	$b=-0.01$

Der Einfluss dieses besonderen Schichtaufbaus auf die Abhängigkeit der Reflektivität R vom Inzidenzwinkel AOI wird anhand von Fig. 5 im Vergleich zur Inzidenzwinkelabhängigkeit der Reflektivität eines Referenzspiegels dargestellt, dessen Mehrlagen-Schichtanordnung als reiner Mo/Si-Monostack ausgebildet ist. Der Begriff „Monostack“ steht hier für eine Mehrlagen-Schichtanordnung, bei der alle aufeinanderfolgenden Schichtpaare die gleiche Schichtmaterial-Kombination und die gleichen Einzelschichtdicken von Mo und Si haben. Die strichpunktierte Kurve „MS“ mit einem maximalen Reflexionskoeffizienten von ca. 68% bei AOI ungefähr 14.8° zeigt die Inzidenzwinkelabhängigkeit der Reflektivität eines solchen Monostacks mit 26 Schichtpaaren.

Die durchgezogene Linie mit Bezeichnung „1“ zeigt den entsprechenden Reflektivitätsverlauf beim ersten Ausführungsbeispiel (Fig. 1 und 2), also mit linearem Abfall der Einzelschichtdicken von Molybdän und Silizium zwischen Substrat und Strahlungseintrittsseite. Es ist unmittelbar erkennbar, dass die Maximalreflektivität beim reinen Monostack mit 68% deutlich höher liegt als die beim gleichen Inzidenzwinkel auftretende Reflektivität des ersten Ausführungsbeispiels (ca. 64%). Jedoch ist die Variation der Reflektivität über den Inzidenzwinkelbereich beim ersten Ausführungsbeispiel deutlich geringer als beim reinen Monostack. Während bei dem Referenzsystem das Reflexionsvermögen zwischen ca. 60% (bei 10°) und ca. 68% (bei ca. 15°), also um ca. 8%-Punkte variiert, variiert das Reflexionsvermögen im gleichen Inzidenzwinkelintervall bei dem ersten Ausführungsbeispiel nur um ca. 6%-Punkte, nämlich zwischen ca. 58% (bei 17.5°) und 64% (bei ca. 15°). Es ist somit ersichtlich, dass der lineare Schichtdickenverlauf bei den Einzelschichten zu einer Homogenisierung der Inzidenzwinkelabhängigkeit der Reflektivität in dem ausgewählten Inzidenzwinkelbereich führt, für den die Mehrlagen-Schichtanordnung ausgelegt ist.

Anhand des Schichtdickenverlaufdiagramms in Fig. 3 wird ein zweites Ausführungsbeispiel erläutert, welches gegenüber dem ersten Ausführungsbeispiel eine nochmals verringerte Variation der Reflektivität innerhalb des ausgewählten Inzidenzwinkelbereichs, also eine verbesserte Breitbandigkeit im Winkelraum zeigt. Bei diesem Ausführungsbeispiel hat die Mehrlagen-Schichtanordnung insgesamt 44 Schichtpaare bzw. Perioden, die sich auf genau zwei jeweils unterschiedlich ausgelegte und übereinander angeordnete Schichtgruppen verteilen. Eine erste

Schichtgruppe LG1 mit 18 ersten Schichtpaaren ist in der Nähe des Substrats angeordnet. Auf diese erste Schichtgruppe ist eine zweite Schichtgruppe LG2 mit insgesamt 26 zweiten Schichtpaaren aufgebracht in der Weise, dass die erste Schichtgruppe LG1 zwischen dem Substrat und der zweiten Schichtgruppe LG2 angeordnet ist.

5 In jeder der beiden Schichtgruppen nimmt die geometrische Schichtdicke der Mo-Einzelschichten von der Substratseite zur Strahlungseintrittsseite gemäß einer linearen ersten Schichtdickenverlaufsfunktion linear ab, während die Schichtdicken der Si-Einzelschichten von der Substratseite zur Strahlungseintrittsseite jeweils gemäß einer linearen zweiten Schichtdickenverlaufsfunktion linear zunehmen. In beiden Schichtgruppen verläuft somit die zweite
10 Schichtdickenverlaufsfunktion gegenläufig zur ersten Schichtdickenverlaufsfunktion. Dabei ist in der ersten Schichtgruppe LG1 die Zunahme der Schichtdicken der Si-Schichten relativ stärker als die gegenläufige Abnahme der Schichtdicken der Mo-Einzelschichten, so dass die Periodendicke von der Substratseite zur Strahlungseintrittsseite linear zunimmt. Innerhalb der zweiten Schichtgruppe LG2 ist dagegen die Abnahme der Schichtdicken der Mo-Schichten relativ
15 stärker als die gegenläufige Zunahme der Schichtdicken der Si-Schichten, so dass die Periodendicke von der Seite der ersten Schichtgruppe bzw. von der Substratseite zur Strahlungseintrittsseite leicht gemäß einer linearen Funktion abnimmt. Die Variation von Schichtdicken der Schichtmaterialien (Schichtdickenunterschied zwischen kleinster und größter Schichtdicke eines Schichtmaterials) ist innerhalb der ersten Schichtgruppe LG1 mehr als viermal so groß wie
20 innerhalb der zweiten Schichtgruppe LG2. Letztere wirkt dadurch ähnlich einem „Monostack“ relativ stark reflektierend, während die substratnähere erste Schichtgruppe die Breitbandigkeit erhöht. Werden die Einzelschichtdicken jeweils als Funktion der Periodennummer bzw. Schichtpaar-Nummer n gemäß der Gleichung $d(n)=a+b \cdot n$ angegeben, so gelten folgende Werte für die Schichtdickenparameter:

25 Substratnahe erste Schichtgruppe LG1: ($1 \leq n \leq 18$)

Mo: $a=4.31$, $b=-0.07$

Si: $a=0.84$, $b=0.25$

30 Substratferne zweite Schichtgruppe LG2 ($1 \leq n \leq 26$)

Mo: $a=4.03$, $b=-0.05$

Si: $a=3.37$, $b=0.04$

Für jede der Schichtgruppen ist es also möglich, den Schichtdickenverlauf der Mo-Schichten und der Si-Schichten jeweils anhand von genau zwei Schichtdickenparametern a und b eindeutig zu bestimmen.

Der Effekt dieses Schichtaufbaus auf die Inzidenzwinkelabhängigkeit der Reflektivität wird anhand von Fig. 5 erkennbar, wo die Reflektivitätskurve des zweiten Ausführungsbeispiels durch die gestrichelte Kurve mit Bezeichnung „2“ angegeben ist. Die Variation der Reflektivität über den Inzidenzwinkelbereich ist beim zweiten Ausführungsbeispiel deutlich geringer als beim Referenzsystem (Monostack) und auch deutlich geringer als beim ersten Ausführungsbeispiel. Das Reflexionsvermögen variiert im Inzidenzwinkelintervall zwischen 10° und 17.5° nur zwischen ca. 61.5% (bei AOI = 17.5°) und ca. 64.4% (bei AOI ungefähr 11.4°), wobei bei diesem Inzidenzwinkel auch die maximale Reflektivität von ca. 64.4% erreicht wird. Das Reflexionsvermögen im angestrebten Inzidenzwinkelintervall variiert somit nur um ca. 3%-Punkte.

Es sind auch andere, mathematisch relativ einfach beschreibbare, jedoch nicht-lineare Schichtdickenverläufe möglich, die zu einer Verbesserung der Breitbandigkeit im Winkelraum genutzt werden können. Anhand von Fig. 4 wird ein drittes Ausführungsbeispiel erläutert. Ähnlich wie bei dem ersten Ausführungsbeispiel hat die Mehrlagen-Schichtanordnung nur eine einzige erste Schichtgruppe, in der die Schichtdicken aller Einzelschichten durch einfache monotone Schichtdickenverlaufsfunktionen definiert werden können. Die Mehrlagen-Schichtanordnung hat 36 Schichtpaare. Die Einzelschichtdicken für die Mo-Schichten und die Si-Schichten variieren jeweils gemäß einer exponentiellen Schichtdickenverlaufsfunktion, wobei die Schichtdicken der Mo-Schichten von der Substratseite zur Strahlungseintrittsseite exponentiell abnehmen, während die Schichtdicken der Si-Schichten von der Substratseite zur Strahlungseintrittsseite exponentiell zunehmen. Die Schichtdickenverläufe sind so gewählt, dass die Periodendicke von der Substratseite zur Strahlungseintrittsseite zunächst abfällt und im Abstand von einigen Schichtpaaren zur Strahlungseintrittsseite ein Minimum durchläuft, so dass zwischen diesem Minimum und der Strahlungseintrittsseite eine leichte Vergrößerung der Periodendicke erfolgt. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Schichtdicken der Si-Schichten im Bereich der Strahlungseintrittsseite stärker ansteigen als die Schichtdicken der Mo-Einzelschichten in diesem Abschnitt abfallen. Die Schichtdickenverlaufsfunktionen in Abhängigkeit von der Schichtpaar-Nummer n ($1 \leq n \leq 36$) können jeweils durch folgende Schichtdickenparameter definiert werden:

Mo:	a=5.57,	b=-0.91,	c=0.03
Si:	a=3.30,	b=0.03,	c=0.11

Für die Schichtgruppe ist es also möglich, den Schichtdickenverlauf aller Mo-Schichten und aller Si-Schichten jeweils anhand von nur drei Schichtdickenparametern a, b und c eindeutig zu bestimmen.

Die Inzidenzwinkelabhängigkeit der Reflektivität des dritten Ausführungsbeispiels ist in Fig. 5
5 anhand der punktierten Linie mit Bezeichnung „3“ erkennbar. Der Reflektivitätsverlauf ist sehr ähnlich demjenigen des ersten Ausführungsbeispiels, bei dem ebenfalls nur eine erste Schichtgruppe vorgesehen ist, deren Schichtdicken einer relativ einfachen Systematik folgen.

Anhand des Schichtdickendiagramms in Fig. 6 wird der Aufbau einer Mehrlagen-Schichtanordnung eines vierten Ausführungsbeispiels erläutert. Die Mehrlagen-
10 Schichtanordnung hat hier nur eine einzige erste Schichtgruppe LG1 mit 40 Schichtpaaren. Über die ganze erste Schichtgruppe hinweg haben die Mo-Schichten die gleiche Schichtdicke, so dass die Schichtdicken der Mo-Schichten durch eine sehr einfache monotone erste Schichtdickenverlaufsfunktion definiert werden können, nämlich allein durch die Angabe derjenigen konstanten Schichtdicke, die für alle Mo-Einzelschichten gilt. Es ist somit nur ein einziger
15 Schichtdickenparameter zur Definition aller Mo-Schichten nötig. Die Schichtdicken des anderen Schichtmaterials, nämlich Silizium, variieren dagegen in Abhängigkeit von der Periodennummer gemäß einer stochastischen zweiten Schichtdickenverlaufsfunktion. Die Schwankungsbreite der Einzelschichtdicken um einen Mittelwert ist dabei im substratnahen Bereich, beispielsweise zwischen den Schichtpaar-Nummern 1 und 20, relativ groß (d.h. es kommen Einzelschichten
20 vor, die um mehr als 20% vom Mittelwert abweichen) und nimmt in Richtung der Strahlungseintrittsseite deutlich ab, so dass beispielsweise in den letzten 10 Si-Schichten in der Nähe der Strahlungseintrittsseite die Einzelschichtdicken nur um maximal 5% von einem hierauf bezogenen Mittelwert abweichen.

Bei dem vierten Ausführungsbeispiel ist erkennbar, dass die Schichtdicken der Silizium-
25 Einzelschichten an der Strahlungseintrittsseite nicht sehr stark schwanken. Eine ähnliche optische Performance ist erzielbar, wenn die Schwankungsbreite von Si-Schichtdicken im Bereich der Strahlungseintrittsseite auf null reduziert wird, so dass nicht nur die Mo-Schichtdicken, sondern auch die Si-Schichtdicken im substratfernen Bereich (in der zweiten Schichtgruppe) konstant sind. Fig. 7 zeigt das Schichtdickendiagramm eines entsprechenden fünften Ausführungs-
30 beispiels. Die Mehrlagen-Schichtanordnung lässt sich in eine substratnahe erste Schichtgruppe LG1 und eine substratferne zweite Schichtgruppe LG2 unterteilen. Innerhalb der ersten Schichtgruppe LG1, die insgesamt 20 Schichtpaare umfasst, ist die Schichtdicke der Molybdän-Einzelschichten konstant, während die Schichtdicken der Si-Einzelschichten und damit auch die Periodendicken zufallsverteilt variieren. Auf diese erste Schichtgruppe LG1 ist eine zweite

Schichtgruppe LG2 mit insgesamt 20 Schichtpaaren aufgebracht. Die zweite Schichtgruppe LG2 ist nach Art eines „Monostacks“ aufgebaut, indem sowohl die Mo-Schichtdicken als auch die Si-Schichtdicken jeweils in allen zweiten Schichtpaaren konstant sind.

Ähnlichkeiten und Unterschiede der Reflektivitätskurven werden anhand von Fig. 8 ersichtlich, in der die durchgezogene Kurve „4“ den Reflektivitätsverlauf des vierten Ausführungsbeispiels und die gestrichelte Kurve „5“ den Reflektivitätsverlauf des fünften Ausführungsbeispiels zeigt. Beim vierten Ausführungsbeispiel wird eine maximale Reflektivität von 64.7% bei ca. 11.5° Inzidenzwinkel erreicht, die Variation der Reflektivität im betrachteten Inzidenzwinkelbereich beträgt ca. 4%-Punkte (zwischen ca. 64.7% und ca. 61.5% bei 17.5°). Beim fünften Ausführungsbeispiel ergibt sich eine ähnliche Variation der Reflektivitäten, wobei jedoch das Reflektivitätsniveau insgesamt gegenüber dem vierten Ausführungsbeispiel um ca. 0.3%-Punkte abgesenkt ist. Wenn die geringfügigen Performance-Nachteile des fünften Ausführungsbeispiels für den Anwendungsfall akzeptabel sind, kann ein zweiteiliger Schichtaufbau ähnlich dem fünften Ausführungsbeispiel gewählt werden, bei dem sich die substratferne zweite Schichtgruppe LG2 aufgrund der gleichbleibenden Schichtdicken leichter fertigen lässt als im Falle des vierten Ausführungsbeispiels.

Bei allen Ausführungsbeispielen kann zwischen dem Substrat und dem substratnächsten ersten Schichtpaar der ersten Schichtgruppe eine Zwischenschicht angeordnet sein, die wiederum aus einer oder mehreren Einzelschichten aufgebaut sein kann. Solche Zwischenschichten können beispielsweise zur Reduktion von Spannungen zwischen dem Substrat und der reflektierenden ersten Schichtgruppe der Mehrlagen-Schichtanordnung vorgesehen sein. Auf der Strahlungseintrittsseite kann in jedem Fall eine einlagige oder mehrlagige Deckschicht (Cap Layer) zum Schutz der Mehrlagen-Schichtanordnung gegen Oxidation und andere schädliche Einflüsse vorgesehen sein. Die Deckschicht kann beispielsweise eine Schicht aus Ruthenium (Ru) enthalten oder durch eine solche gebildet sein.

Einige der gezeigten Ausführungsbeispiele haben genau eine Schichtgruppe (erste Schichtgruppe), während andere der gezeigten Ausführungsbeispiele genau zwei Schichtgruppen (erste und zweite Schichtgruppe) haben. Es ist auch möglich, dass eine Mehrlagen-Schichtanordnung mehr als zwei reflektierende Schichtgruppen aufweist, z.B. drei oder vier Schichtgruppen oder mehr, wobei mindestens eine erste Schichtgruppe enthalten sein muss, die die beschriebenen systematisch einfachen Schichtdickenverläufe aufweist.

Beispielsweise kann eine Mehrlagen-Schichtanordnung genau drei Schichtgruppen aufweisen, in denen die Schichtdicken der Schichtmaterialien jeweils einer linearen Schichtdickenverlaufs-

funktion folgen. Eine Mehrlagen-Schichtanordnung kann also nicht nur mehr als zwei (jeweils reflektierende) Schichtgruppen, aufweisen, sondern auch mehr als zwei (jeweils reflektierende) Schichtgruppen, mit jeweils einfachen Schichtdickenverläufen. Beispielsweise könnte eine Variante des in Fig. 3 gezeigten Beispiels so aufgebaut sein, dass zehn oder mehr der an der Strahlungseintrittseite liegenden Perioden (z.B. Schichtnummern 60 bis 90) ersetzt werden durch einen „Monostack“ mit einer entsprechenden Anzahl von Schichtpaaren mit konstanten Schichtdicken beider Schichtmaterialien.

Eine erste und eine zweite Schichtgruppe können unmittelbar, d.h. ohne Zwischenschaltung einer Zwischenschicht, aufeinanderliegen. Es ist auch möglich, zwischen der ersten und der zweiten Schichtgruppe eine Zwischenschicht anzuordnen, die aus einer einzigen oder mehrere Einzelschichten bestehen kann.

EUV-Spiegel der in dieser Anmeldung beschriebenen Art können in unterschiedlichen optischen Systemen genutzt werden, z.B. im Bereich der EUV-Mikrolithographie.

Figur 9 zeigt beispielhaft optische Komponenten einer EUV-Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage WSC gemäß einer Ausführungsform der Erfindung. Die EUV-Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage dient zur Belichtung eines im Bereich einer Bildebene IS eines Projektionsobjektivs PO angeordneten strahlungsempfindlichen Substrats W mit mindestens einem Bild eines im Bereich einer Objektebene OS des Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer reflektiven Mustererzeugungseinrichtung oder Maske M.

Zur Erleichterung der Beschreibung ist ein kartesisches xyz-Koordinatensystem angegeben, aus dem sich die jeweilige Lagebeziehung der in den Figuren dargestellten Komponenten ergibt. Die Projektionsbelichtungsanlage WSC ist vom Scannertyp. Die Maske M und das Substrat werden beim Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage in der y-Richtung synchron bewegt und dadurch gescannt.

Die Anlage wird mit der Strahlung einer primären Strahlungsquelle RS betrieben. Ein Beleuchtungssystem ILL dient zum Empfang der Strahlung der primären Strahlungsquelle und zur Formung von auf das Muster gerichteter Beleuchtungsstrahlung. Das Projektionsobjektiv PO dient zur Abbildung der Struktur des Musters auf ein lichtempfindliches Substrat.

Die primäre Strahlungsquelle RS kann unter anderem eine Laser-Plasma-Quelle oder eine Gasentladungsquelle oder eine Synchrotron-basierte Strahlungsquelle sein. Solche Strahlungsquellen erzeugen eine Strahlung RAD im EUV-Bereich, insbesondere mit Wellenlängen zwi-

schen 5 nm und 15 nm. Damit das Beleuchtungssystem und das Projektionsobjektiv in diesen Wellenlängenbereich arbeiten können, sind sie mit für EUV-Strahlung reflektiven Komponenten aufgebaut.

Die von der Strahlungsquelle RS ausgehende Strahlung RAD wird mittels eines Kollektors COL
5 gesammelt und in das Beleuchtungssystem ILL geleitet. Das Beleuchtungssystem umfasst eine Mischeinheit MIX, eine Teleskopoptik TEL und einen feldformenden Spiegel FFM. Das Beleuchtungssystem formt die Strahlung und leuchtet damit ein Beleuchtungsfeld aus, das in der Objektebene OS des Projektionsobjektivs PO oder in dessen Nähe liegt. Form und Größe des Beleuchtungsfeldes bestimmen dabei Form und Größe des effektiv genutzten Objektfeldes OF in
10 der Objektebene OS.

In der Objektebene OS ist bei Betrieb der Anlage ein reflektives Retikel oder eine andere reflektive Mustererzeugungseinrichtung angeordnet.

Die Mischeinheit MIX besteht im Wesentlichen aus zwei Facettenspiegeln FAC1, FAC2. Der erste Facettenspiegel FAC1 ist in einer Ebene des Beleuchtungssystems angeordnet, die zur
15 Objektebene OS optisch konjugiert ist. Er wird daher auch als Feldfacettenspiegel bezeichnet. Der zweite Facettenspiegel FAC2 ist in einer Pupillenebene des Beleuchtungssystems angeordnet, die zu einer Pupillenebene des Projektionsobjektivs optisch konjugiert ist. Er wird daher auch als Pupillenfacettenspiegel bezeichnet.

Mit Hilfe des Pupillenfacettenspiegels FAC2 und der im Strahlengang nachgeschalteten abbildenden optischen Baugruppe, die die Teleskopoptik TEL und den mit streifenden Einfall (grazing incidence) betriebenen feldformenden Spiegel FFM umfasst, werden die einzelnen spiegelnden Facetten (Einzelspiegel) des ersten Facettenspiegels FAC1 in das Objektfeld abgebildet.
20

Die räumliche (örtliche) Beleuchtungsintensitätsverteilung am Feldfacettenspiegel FAC1 bestimmt die örtliche Beleuchtungsintensitätsverteilung im Objektfeld. Die räumliche (örtliche) Beleuchtungsintensitätsverteilung am Pupillenfacettenspiegel FAC2 bestimmt die Beleuchtungswinkelintensitätsverteilung im Objektfeld.
25

Das Projektionsobjektiv PO dient zur verkleinernden Abbildung des in der Objektebene OS des Projektionsobjektivs angeordneten Musters in die zur Objektebene optisch konjugierte und parallel zu dieser liegende Bildebene IS. Diese Abbildung erfolgt mittels elektromagnetischer
30

Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) um eine Arbeitswellenlänge λ , die im Beispielsfall bei 13.5 nm liegt.

Das Projektionsobjektiv hat sechs Spiegel M1 bis M6 mit Spiegelflächen, die in einem Projektionsstrahlengang PR zwischen der Objektebene OS und der Bildebene IS derart angeordnet sind, dass ein in der Objektebene bzw. im Objektfeld OF angeordnetes Muster mittels der Spiegel M1 bis M6 in die Bildebene bzw. das Bildfeld IF abbildbar ist.

Die für Strahlung aus dem EUV-Bereich reflektierend wirkenden Spiegel (EUV-Spiegel) M1 bis M6 haben jeweils ein Substrat, auf dem eine für Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich reflektierend wirkende Mehrlagen-Schichtanordnung (multilayer) aufgebracht ist, die viele Schichtpaare mit abwechselnd relativ niedrigbrechendem und relativ hochbrechendem Schichtmaterial aufweist.

Die Spiegel M1 bis M6 haben jeweils gekrümmte Spiegelflächen, so dass jeder der Spiegel zur Abbildung beiträgt. Die vom Objektfeld OF kommenden Strahlen des Projektionsstrahlengangs fallen zunächst auf den leicht konvex gewölbten ersten Spiegel M1, der die Strahlen zum leicht konkav gewölbten zweiten Spiegel M2 reflektiert. Dieser reflektiert die Strahlen zum konvexen dritten Spiegel M3, welcher die Strahlen seitlich zum Konkavspiegel M4 umlenkt. Dieser reflektiert die Strahlen auf den geometrisch in der Nähe der Bildebene angeordneten fünften Spiegel M5, der eine leicht konvex gewölbte Spiegelfläche hat und die Strahlen zum großen Konkavspiegel M6 reflektiert, welcher der letzte Spiegel vor der Bildebene ist und die Strahlen in Richtung des Bildfeldes IF fokussiert.

Das Projektionsobjektiv besteht aus zwei Teilobjektiven. Dabei bilden die ersten vier Spiegel M1 bis M4 ein erstes Teilobjektiv, welches im Strahlweg zwischen dem vierten Spiegel M4 und dem fünften Spiegel M5 ein Zwischenbild IMI erzeugt. Das Zwischenbild liegt in einer Zwischenbildebene, die zur Objektebene und zur Bildebene optisch konjugiert ist. Geometrisch ist das Zwischenbild neben dem sechsten Spiegel M6 angeordnet. Das zweite Teilobjektiv, das aus dem fünften und dem sechsten Spiegel besteht, bildet das Zwischenbild verkleinert auf die Bildebene ab.

Projektionsbelichtungsanlagen und Projektionsobjektive mit diesem oder ähnlichem Aufbau sind beispielsweise im Patent US 7,977,651 B2 gezeigt. Die Offenbarung dieses Patents wird durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht.

Mindestens einer der Spiegel M1 bis M6 kann einen Schichtaufbau gemäß einer Ausführungsform der Erfindung aufweisen. Insbesondere an dem fünften Spiegel M5, an dem das größte Inzidenzwinkelintervall auftritt, kann eine im Winkelraum breitbandig wirkende reflektive Beschichtung günstig sein. Es können auch mehrere oder alle Spiegel M1 bis M6 gemäß einer

5 Ausführungsform der Erfindung ausgelegt sein.

Im Beleuchtungssystem ILL können mit Ausnahme des mit streifendem Strahlungseinfall betriebenen feldformenden Spiegels FFM alle Spiegel von Mehrlagen-Breitband-Beschichtungen der hier vorgeschlagenen Art profitieren. Dies gilt insbesondere auch für die mehrachsige verkippten Einzelspiegel der Facettenspiegel FAC1 und FAC1, die aufgrund der Verkipptbarkeit

10 unter unterschiedlichen Inzidenzwinkelintervallbereichen betrieben werden können.

In Tabelle A sind für alle bildlich dargestellten Ausführungsbeispiele (B) die geometrischen Schichtdicken d [nm] der einzelnen Schichten von der substratnächsten Schicht (LN = 1) bis zur eintrittsseitigen letzten Schicht (höchste Schicht-Nr. bzw. höchster LN-Wert) angegeben.

Tabelle A

B		1	2	3	4	5
Fig.		2	3	4	6	7
LN	Material	d [nm]	d [nm]	d [nm]	d [nm]	d [nm]
1	Mo	3,57	4,24	4,63	3,37	3,33
2	Si	4,21	1,08	3,32	3,62	1,49
3	Mo	3,56	4,17	4,6	3,37	3,33
4	Si	4,2	1,33	3,32	1,35	4,32
5	Mo	3,55	4,1	4,56	3,37	3,33
6	Si	4,19	1,58	3,33	3,08	1,49
7	Mo	3,54	4,03	4,53	3,37	3,33
8	Si	4,18	1,82	3,33	2,98	3,05
9	Mo	3,53	3,96	4,5	3,37	3,33
10	Si	4,16	2,07	3,34	4,96	4,55
11	Mo	3,52	3,89	4,46	3,37	3,33
12	Si	4,15	2,32	3,34	2,64	4,45
13	Mo	3,51	3,82	4,43	3,37	3,33
14	Si	4,14	2,57	3,35	4,27	2,86
15	Mo	3,5	3,75	4,39	3,37	3,33
16	Si	4,13	2,81	3,35	3,9	4,6
17	Mo	3,49	3,68	4,35	3,37	3,33
18	Si	4,12	3,06	3,36	4,14	2,73
19	Mo	3,48	3,61	4,31	3,37	3,33
20	Si	4,11	3,31	3,37	3,12	5,25
21	Mo	3,47	3,54	4,27	3,37	3,33
22	Si	4,09	3,56	3,37	3,84	4,11
23	Mo	3,46	3,47	4,23	3,37	3,33

24	Si	4,08	3,8	3,38	1,71	4,61
25	Mo	3,45	3,4	4,19	3,37	3,33
26	Si	4,07	4,05	3,39	4,11	1
27	Mo	3,44	3,33	4,15	3,37	3,33
28	Si	4,06	4,3	3,41	3,84	2,58
29	Mo	3,43	3,26	4,1	3,37	3,33
30	Si	4,05	4,54	3,42	3,02	3,56
31	Mo	3,42	3,19	4,05	3,37	3,33
32	Si	4,03	4,79	3,43	2,4	3,93
33	Mo	3,41	3,12	4	3,37	3,33
34	Si	4,02	5,04	3,45	4,43	3,34
35	Mo	3,4	3,05	3,95	3,37	3,33
36	Si	4,01	5,29	3,47	3,61	4,22
37	Mo	3,39	3,99	3,9	3,37	3,33
38	Si	4	3,4	3,49	4,34	4,12
39	Mo	3,38	3,94	3,85	3,37	3,33
40	Si	3,99	3,44	3,51	3,87	4,04
41	Mo	3,37	3,89	3,79	3,37	3,33
42	Si	3,97	3,48	3,53	3,77	3,88
43	Mo	3,36	3,85	3,73	3,37	3,33
44	Si	3,96	3,51	3,56	3,99	3,88
45	Mo	3,35	3,8	3,68	3,37	3,33
46	Si	3,95	3,55	3,59	3,95	3,88
47	Mo	3,34	3,75	3,62	3,37	3,33
48	Si	3,94	3,58	3,62	3,65	3,88
49	Mo	3,33	3,71	3,55	3,37	3,33
50	Si	3,93	3,62	3,66	4,03	3,88
51	Mo	3,32	3,66	3,49	3,37	3,33
52	Si	3,92	3,65	3,7	3,88	3,88
53	Mo	3,31	3,62	3,42	3,37	3,33
54	Si	3,9	3,69	3,75	3,64	3,88
55	Mo	3,3	3,57	3,35	3,37	3,33
56	Si	3,89	3,72	3,8	4,12	3,88
57	Mo	3,29	3,52	3,28	3,37	3,33
58	Si	3,88	3,76	3,86	3,7	3,88
59	Mo	3,28	3,48	3,21	3,37	3,33
60	Si	3,87	3,79	3,92	3,9	3,88
61	Mo	3,27	3,43	3,13	3,37	3,33
62	Si	3,86	3,83	3,99	3,86	3,88
63	Mo	3,26	3,38	3,05	3,37	3,33
64	Si	3,84	3,86	4,07	3,86	3,88
65	Mo	3,25	3,34	2,97	3,37	3,33
66	Si	3,83	3,9	4,15	3,81	3,88
67	Mo	3,24	3,29	2,89	3,37	3,33
68	Si	3,82	3,93	4,25	3,88	3,88
69	Mo	3,23	3,25	2,8	3,37	3,33
70	Si	3,81	3,97	4,36	3,81	3,88
71	Mo	3,22	3,2	2,71	3,37	3,33
72	Si	3,8	4	4,47	3,85	3,88
73	Mo	3,21	3,15		3,37	3,33
74	Si	3,79	4,04		3,78	3,88
75	Mo	3,2	3,11		3,37	3,33

76	Si	3,77	4,07		3,78	3,88
77	Mo	3,19	3,06		3,37	3,33
78	Si	3,76	4,11		3,63	3,88
79	Mo		3,01		3,37	3,33
80	Si		4,14		1	3,88
81	Mo		2,97			
82	Si		4,18			
83	Mo		2,92			
84	Si		4,21			
85	Mo		2,88			
86	Si		4,25			
87	Mo		2,83			
88	Si		4,28			

Patentansprüche

1. EUV-Spiegel umfassend:

ein Substrat (SUB) und

eine auf dem Substrat aufgebrachte Mehrlagen-Schichtanordnung (ML), die für Strahlung einer Wellenlänge λ aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) reflektierend wirkt und eine Vielzahl von Schichtpaaren mit abwechselnden Schichten aus einem hoch brechenden Schichtmaterial und einem niedrig brechenden Schichtmaterial umfasst, wobei das hoch brechende Schichtmaterial bei der Wellenlänge einen größeren Realteil des Brechungsindex aufweist als das niedrig brechende Schichtmaterial, wobei:

die Mehrlagen-Schichtanordnung eine für die Strahlung reflektierend wirkende erste Schichtgruppe (LG1) mit zehn oder mehr ersten Schichtpaaren aufweist;

jedes erste Schichtpaar eine erste Schicht (H) aus einem hoch brechenden ersten Schichtmaterial mit einer ersten Schichtdicke, eine zweite Schicht (L) aus einem niedrig brechenden zweiten Schichtmaterial mit einer zweiten Schichtdicke sowie eine Periodendicke (P) aufweist, die der Summe der Schichtdicken aller Schichten eines ersten Schichtpaares entspricht;

die Schichtdicken eines der Schichtmaterialien in Abhängigkeit von der Periodennummer durch eine einfach monotone erste Schichtdickenverlaufsfunktion definierbar sind, welche durch einen, zwei, oder drei Schichtdickenparameter vollständig definierbar ist; und

die Schichtdicken des anderen der Schichtmaterialien in Abhängigkeit von der Periodennummer gemäß einer zweiten Schichtdickenverlaufsfunktion variieren.

2. EUV-Spiegel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Schichtgruppe (LG1) 15 oder mehr, oder 20 oder mehr, oder 30 oder mehr, oder 50 oder mehr erste Schichtpaare aufweist.

3. EUV-Spiegel nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Schichtdickenverlaufsfunktion eine konstante Funktion ist, so dass die Schichtdicken eines der Schichtmaterialien über die gesamte erste Schichtgruppe (LG1) konstant sind.

4. EUV-Spiegel nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Schichtmaterial, dessen Schichtdicken über die gesamte erste Schichtgruppe (LG1) konstant ist, ausgewählt ist aus der Gruppe Molybdän (Mo), Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh) und Palladium (Pd).

5. EUV-Spiegel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Schichtdickenverlaufsfunktion eine stochastische Schichtdickenverteilung des anderen Schichtmaterials definiert.
6. EUV-Spiegel nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass das Schichtmaterial, dessen Schichtdicken über die gesamte erste Schichtgruppe (LG1) stochastisch variiert, Silizium (Si) ist.
7. EUV-Spiegel nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Schichtdickenverlaufsfunktion eine linear steigende oder linear fallende Funktion ist, so dass die Schichtdicken eines der Schichtmaterialien über die gesamte erste Schichtgruppe (LG1) linear zunehmen oder linear abnehmen.
8. EUV-Spiegel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Schichtdickenverlaufsfunktion eine linear steigende oder linear fallende Funktion ist.
9. EUV-Spiegel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Schichtdickenverlaufsfunktion eine quadratische oder exponentielle Funktion ist.
10. EUV-Spiegel nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Schichtdickenverlaufsfunktion gegenläufig zur ersten Schichtdickenverlaufsfunktion verläuft.
11. EUV-Spiegel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrlagen-Schichtanordnung eine für die Strahlung reflektierend wirkende zweite Schichtgruppe (LG2) mit zehn oder mehr zweiten Schichtpaaren aufweist, wobei die erste Schichtgruppe (LG1) zwischen dem Substrat (SUB) und der zweiten Schichtgruppe (LG2) angeordnet ist.
12. EUV-Spiegel nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass innerhalb der zweiten Schichtgruppe (LG2) die Schichtdicken eines der Schichtmaterialien in Abhängigkeit von der Periodennummer durch eine einfach monotone erste Schichtdickenverlaufsfunktion definierbar sind und die Schichtdicken des anderen der Schichtmaterialien in Abhängigkeit von der Periodennummer gemäß einer zweiten Schichtdickenverlaufsfunktion variieren.

13. EUV-Spiegel nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtdicken des ersten Schichtmaterials und des zweiten Schichtmaterials innerhalb der ersten Schichtgruppe (LG1) und innerhalb der zweiten Schichtgruppe (LG2) jeweils gegenläufig linear variieren.
14. EUV-Spiegel nach einem der Ansprüche 11 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass eine Variation von Schichtdicken der Schichtmaterialien innerhalb der ersten Schichtgruppe (LG1) wesentlich stärker ist als innerhalb der zweiten Schichtgruppe (LG2), insbesondere mindestens doppelt so groß.
15. EUV-Spiegel nach einem der Ansprüche 11 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass eines der Schichtmaterialien über die gesamte zweite Schichtgruppe (LG2) eine konstante Schichtdicke aufweist und die Schichtdicke des anderen Schichtmaterials innerhalb der zweiten Schichtgruppe (LG2) ebenfalls konstant ist.
16. Optisches System mit mindestens einem EUV-Spiegel gemäß einem der Ansprüche 1 bis 15.
17. Optisches System nach Anspruch 16 dadurch gekennzeichnet, dass das optische System ein Projektionsobjektiv (PO) oder ein Beleuchtungssystem (ILL) für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (WSC) ist.

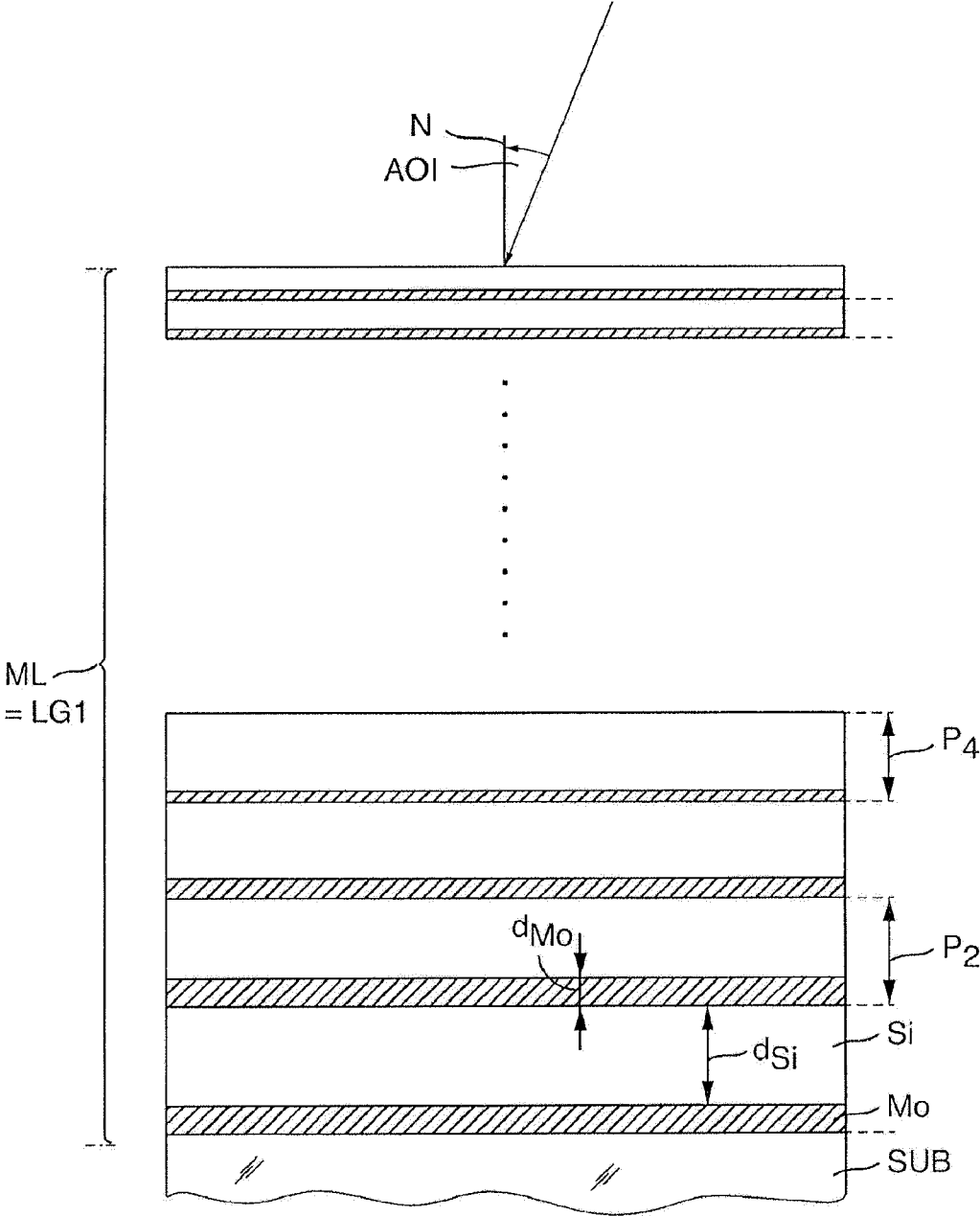


Fig. 1

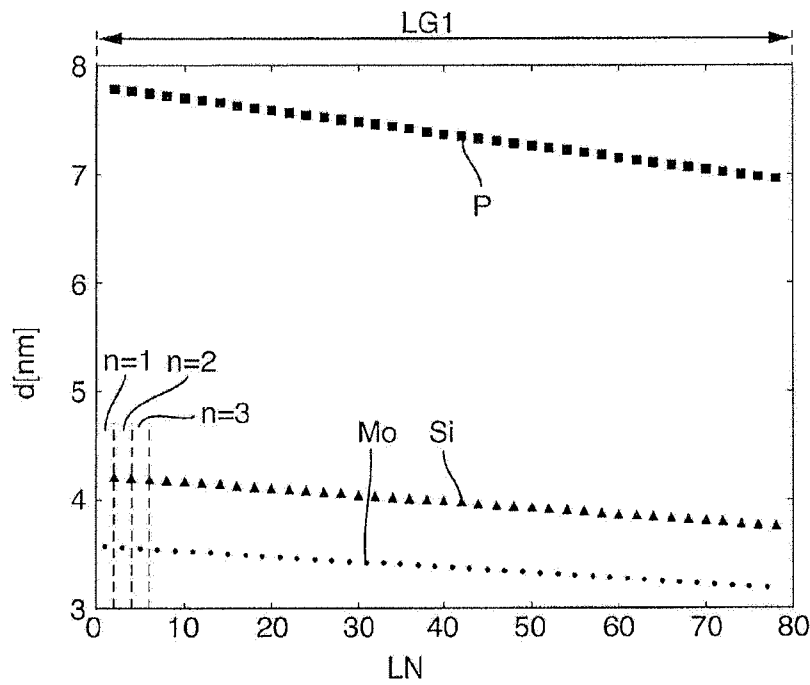


Fig. 2

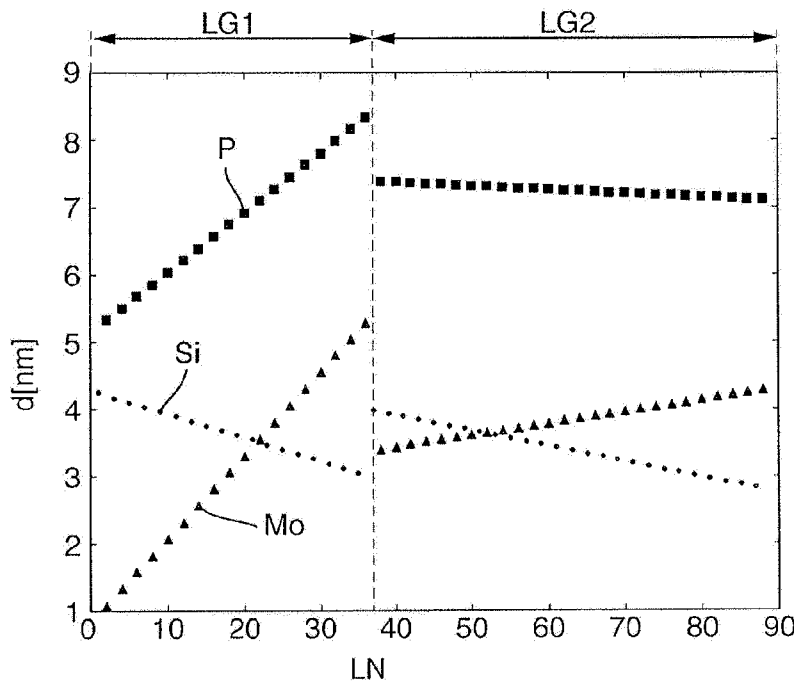


Fig. 3

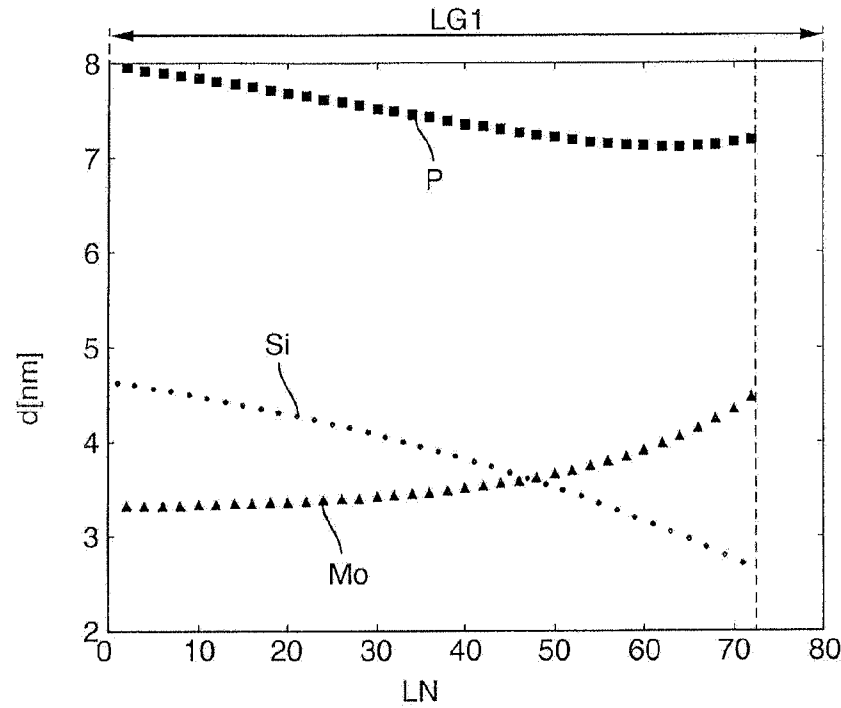


Fig. 4

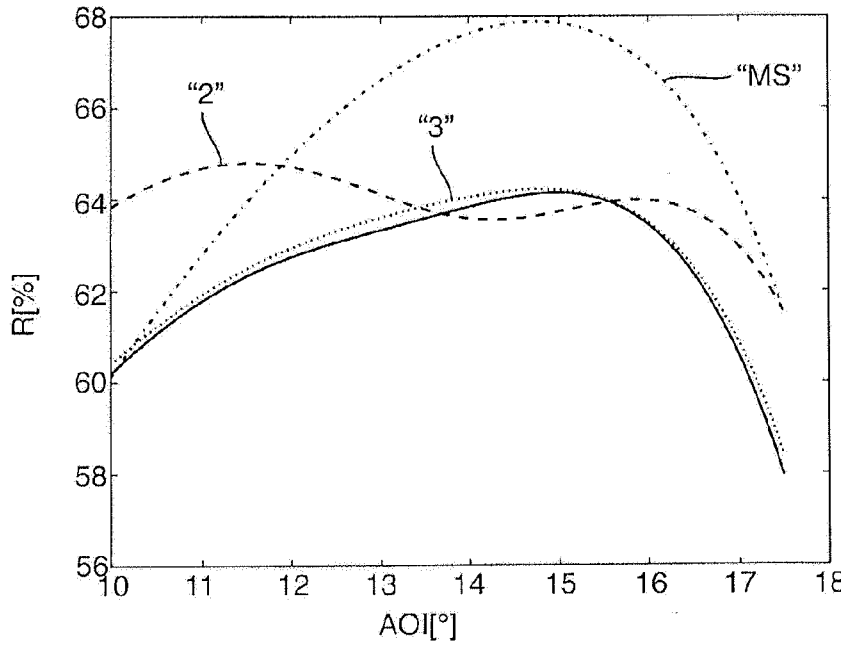


Fig. 5

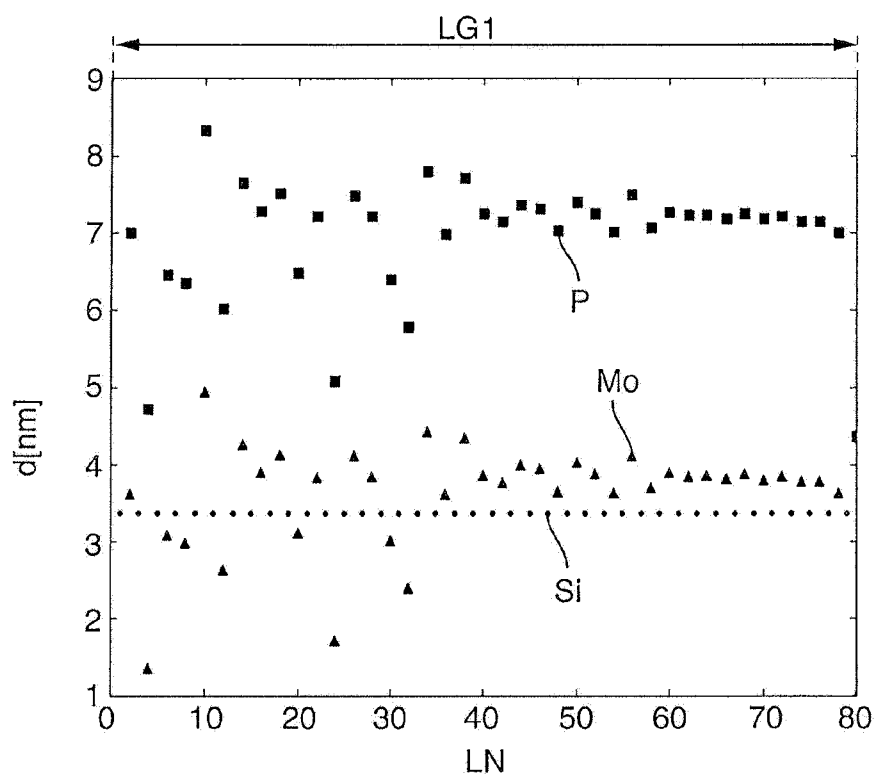


Fig. 6

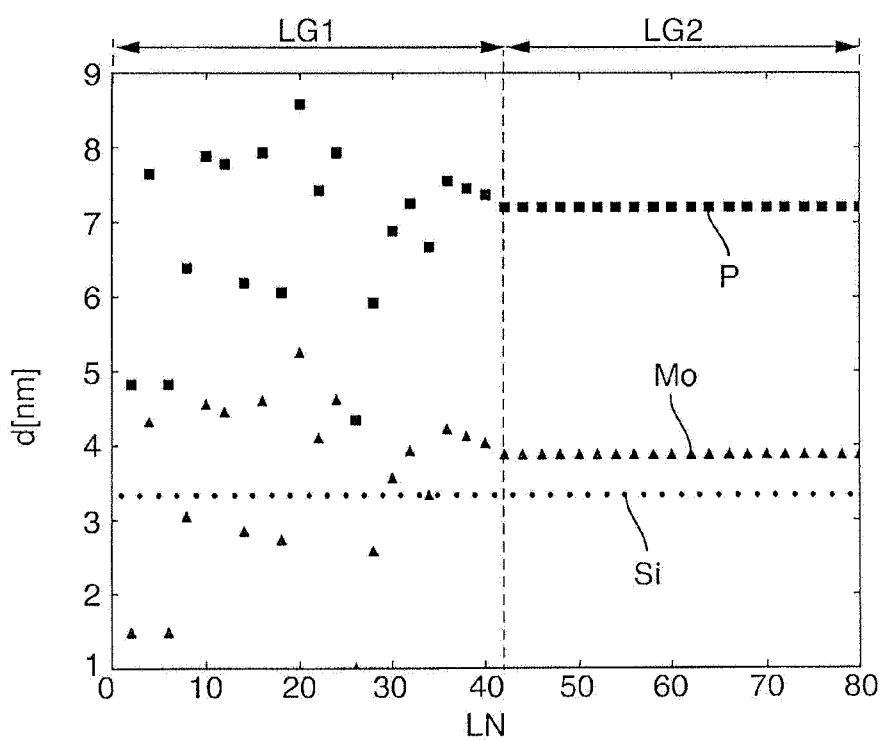


Fig. 7

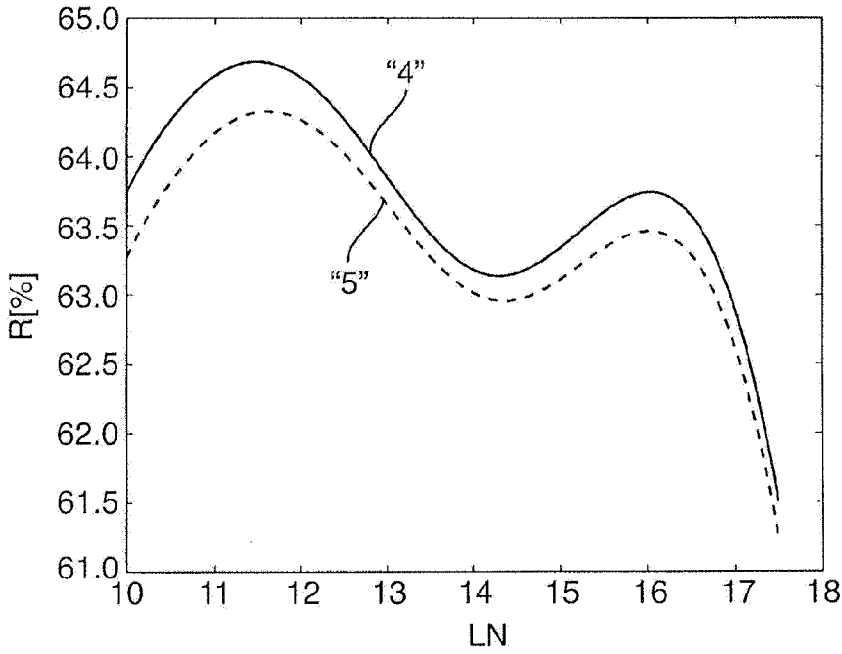


Fig. 8

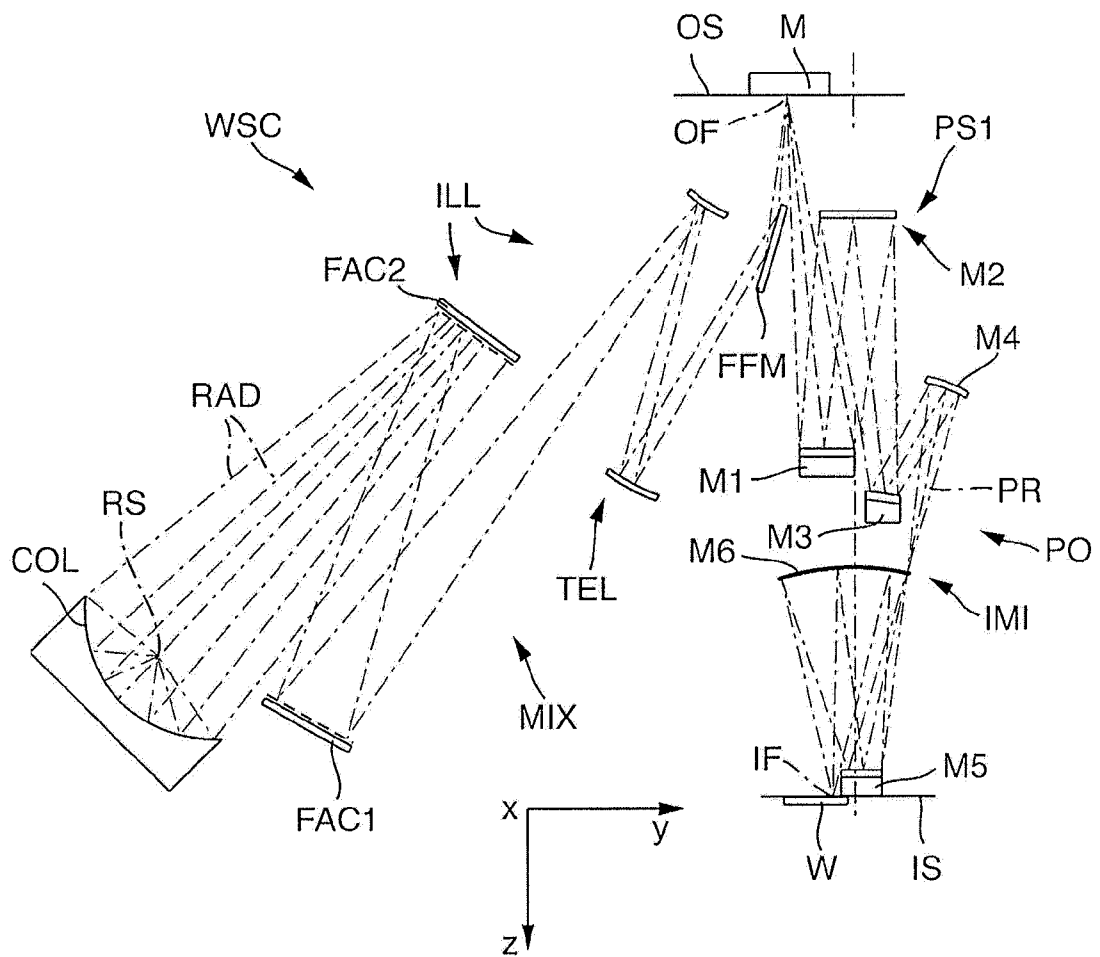


Fig. 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2015/050687

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. G02B5/08 G21K1/06
 ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B G21K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	THOMAS KUHLMANN ET AL: "<title>EUV multilayer mirrors with tailored spectral reflectivity</title>", PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 4782, 1 December 2002 (2002-12-01), pages 196-203, XP055100948, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.451348 cited in the application figure 3	1-6
X	----- DE 600 36 510 T2 (ASML NETHERLANDS BV [NL]) 19 June 2008 (2008-06-19) paragraph [0047]; figure 2 ----- -/-	1,2,7,8, 10-13, 16,17



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

14 April 2015

Date of mailing of the international search report

22/04/2015

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Mollenhauer, Ralf

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2015/050687

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DE 101 50 874 A1 (ZEISS CARL [DE]) 30 April 2003 (2003-04-30) paragraphs [0025], [0028], [0073] - [0077] -----	1,7,8, 16,17
X	US 2012/239138 A1 (WEBER JAN [NL] ET AL) 20 September 2012 (2012-09-20) paragraphs [0026] - [0027] -----	1-5,16
X	WO 2004/097467 A1 (ZEISS CARL SMT AG [DE]; WEDOWSKI MARCO [DE]) 11 November 2004 (2004-11-11) page 3, lines 11-13; figure 1c -----	1
A	US 2008/137810 A1 (LIU CHIAN Q [US] ET AL) 12 June 2008 (2008-06-12) paragraph [0023] -----	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/050687

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 60036510	T2	19-06-2008	DE 60018328 D1 07-04-2005
			DE 60018328 T2 06-04-2006
			DE 60036510 T2 19-06-2008
			EP 1065532 A2 03-01-2001
			EP 1065568 A2 03-01-2001
			EP 1801658 A2 27-06-2007
			JP 3652221 B2 25-05-2005
			JP 4068285 B2 26-03-2008
			JP 2001051106 A 23-02-2001
			JP 2001059901 A 06-03-2001
			KR 20010066880 A 11-07-2001
			KR 20010066881 A 11-07-2001
			TW 561279 B 11-11-2003
			TW I267704 B 01-12-2006
			US RE42338 E1 10-05-2011
			US 6449086 B1 10-09-2002
			US 6724462 B1 20-04-2004
			US 2003043456 A1 06-03-2003
DE 10150874	A1	30-04-2003	CN 1565035 A 12-01-2005
			DE 10150874 A1 30-04-2003
			EP 1438725 A1 21-07-2004
			JP 2005505930 A 24-02-2005
			US 2004253426 A1 16-12-2004
			WO 03032329 A1 17-04-2003
US 2012239138	A1	20-09-2012	US 2012239138 A1 20-09-2012
			WO 2012125676 A1 20-09-2012
WO 2004097467	A1	11-11-2004	DE 10319005 A1 25-11-2004
			JP 4504358 B2 14-07-2010
			JP 2007507082 A 22-03-2007
			US 2006076516 A1 13-04-2006
			US 2009173895 A1 09-07-2009
			US 2011261343 A1 27-10-2011
			WO 2004097467 A1 11-11-2004
US 2008137810	A1	12-06-2008	NONE

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/050687

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G02B5/08 G21K1/06
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G02B G21K

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	THOMAS KUHLMANN ET AL: "<title>EUV multilayer mirrors with tailored spectral reflectivity</title>", PROCEEDINGS OF SPIE, Bd. 4782, 1. Dezember 2002 (2002-12-01), Seiten 196-203, XP055100948, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.451348 in der Anmeldung erwähnt Abbildung 3	1-6
X	----- DE 600 36 510 T2 (ASML NETHERLANDS BV [NL]) 19. Juni 2008 (2008-06-19) Absatz [0047]; Abbildung 2	1,2,7,8, 10-13, 16,17
X	----- DE 101 50 874 A1 (ZEISS CARL [DE]) 30. April 2003 (2003-04-30) Absätze [0025], [0028], [0073] - [0077] ----- -/-	1,7,8, 16,17

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

- * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
- "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
 - "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
 - "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
 - "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
 - "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
 - "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
 - "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
 - "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
 - "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
14. April 2015	22/04/2015
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Mollenhauer, Ralf

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2012/239138 A1 (WEBER JAN [NL] ET AL) 20. September 2012 (2012-09-20) Absätze [0026] - [0027] -----	1-5,16
X	WO 2004/097467 A1 (ZEISS CARL SMT AG [DE]; WEDOWSKI MARCO [DE]) 11. November 2004 (2004-11-11) Seite 3, Zeilen 11-13; Abbildung 1c -----	1
A	US 2008/137810 A1 (LIU CHIAN Q [US] ET AL) 12. Juni 2008 (2008-06-12) Absatz [0023] -----	1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/050687

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 60036510	T2	19-06-2008	DE 60018328 D1 07-04-2005
			DE 60018328 T2 06-04-2006
			DE 60036510 T2 19-06-2008
			EP 1065532 A2 03-01-2001
			EP 1065568 A2 03-01-2001
			EP 1801658 A2 27-06-2007
			JP 3652221 B2 25-05-2005
			JP 4068285 B2 26-03-2008
			JP 2001051106 A 23-02-2001
			JP 2001059901 A 06-03-2001
			KR 20010066880 A 11-07-2001
			KR 20010066881 A 11-07-2001
			TW 561279 B 11-11-2003
			TW I267704 B 01-12-2006
			US RE42338 E1 10-05-2011
			US 6449086 B1 10-09-2002
			US 6724462 B1 20-04-2004
			US 2003043456 A1 06-03-2003
DE 10150874	A1	30-04-2003	CN 1565035 A 12-01-2005
			DE 10150874 A1 30-04-2003
			EP 1438725 A1 21-07-2004
			JP 2005505930 A 24-02-2005
			US 2004253426 A1 16-12-2004
			WO 03032329 A1 17-04-2003
US 2012239138	A1	20-09-2012	US 2012239138 A1 20-09-2012
			WO 2012125676 A1 20-09-2012
WO 2004097467	A1	11-11-2004	DE 10319005 A1 25-11-2004
			JP 4504358 B2 14-07-2010
			JP 2007507082 A 22-03-2007
			US 2006076516 A1 13-04-2006
			US 2009173895 A1 09-07-2009
			US 2011261343 A1 27-10-2011
			WO 2004097467 A1 11-11-2004
US 2008137810	A1	12-06-2008	KEINE