



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 603 12 871 T2** 2007.12.20

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 540 423 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **603 12 871.8**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/EP03/08413**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **03 790 838.1**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2004/021086**

(86) PCT-Anmeldetag: **30.07.2003**

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: **11.03.2004**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **15.06.2005**

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **28.03.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **20.12.2007**

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

G02B 5/18 (2006.01)

G01J 3/18 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

10239732 26.08.2002 DE

(73) Patentinhaber:

Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen, DE

(74) Vertreter:

**Sawodny, M., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anw.,
89073 Ulm**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,
GR, HU, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK,
TR**

(72) Erfinder:

SINGER, Wolfgang, 73431 Aalen, DE

(54) Bezeichnung: **GITTER BASIERTER SPEKTRALER FILTER ZUR UNTERDRÜCKUNG VON STRAHLUNG AUSSERHALB DES NUTZBANDES IN EINEM EXTREM-ULTRAVIOLETT LITHOGRAPHIESYSTEM**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Dämpfungsglied zum Dämpfen von Wellenlängen, die außerhalb einer Nutzwellenlänge liegen. Die Nutzwellenlänge ist vorzugsweise eine Wellenlänge im Wellenlängenbereich von ≤ 100 nm, insbesondere vorzugsweise in dem Wellenlängenbereich, der für die EUV-Lithografie verwendet werden kann, d.h. im Bereich von 11 bis 14 nm, insbesondere bei 13,5 nm.

[0002] Um eine weitere Reduzierung der Strukturbreiten elektronischer Bauteile zu ermöglichen, insbesondere im Submikronbereich, ist es erforderlich, die Wellenlängen des für die Mikrolithografie benutzten Lichts zu reduzieren. Es ist möglich, Licht zu benutzen, das Wellenlängen von weniger als 100 nm aufweist, z.B. Lithografie mit weichen Röntgenstrahlen, die sogenannte EUV-Lithografie.

[0003] Die EUV-Lithografie ist eine der vielversprechendsten lithografischen Techniken der Zukunft. Derzeit werden Wellenlängen im Bereich von 11 bis 14 nm, insbesondere 13,5 nm bei einer numerischen Apertur von 0,2 bis 0,3 als Wellenlängen für die EUV-Lithografie diskutiert. Die Bildqualität in der EUV-Lithografie wird einerseits durch die Projektionslinse und andererseits durch das Beleuchtungssystem bestimmt. Das Beleuchtungssystem sollte eine gleichmäßige Beleuchtung der Feldebene soweit möglich gewährleisten, in der die Strukturmaske (das sogenannte Retikel) angeordnet ist. Die Projektionslinse bildet die Feldebene in einer Bildebene ab (der sogenannten Fokus- oder Wafer-Ebene), in der eine lichtempfindliche Linse angeordnet ist. Projektionsbelichtungssysteme für die EUV-Lithografie sind mit spiegelnden optischen Elementen ausgestattet. Die Form des Felds in der Fokusebene eines EUV Projektionsbelichtungssystems ist typischerweise die eines Ringfeldes mit einem hohen Geometrieverhältnis von 2 mm (Breite) $\times$ 22 bis 26 mm (Bogenlänge). Die Projektionssysteme werden normalerweise im Scanmodus betrieben. Es wird hiermit auf folgende Publikationen betreffend EUV-Projektionsbelichtungssysteme verwiesen:

W. Ulrich, S. Beiersdörfer, H.J. Mann: "Trends in Optical Design of Projection Lenses for UV and EUV Lithography", in Soft-X-Ray and EUV Imaging Systems, W.M. Kaiser, R.H. Stulen (Hrsg.), Proceedings of SPIE, Vol. 4146 (2000), S. 13–24; und

M. Antoni, W. Singer, J. Schultz, J. Wangler, I. Escudero-Sant, B. Kruizinga: "Illumination Optics Design for EUV Lithography" in Soft X Ray and EUV Imaging Systems, W.M. Kaiser, R.H. Stulen (Hrsg.), Proceedings of SPIE, Vol. 4146 (2000), S. 25–34.

[0004] Im Fall von Beleuchtungssystemen für Wellenlängen ≤ 100 nm besteht das Problem, dass die Lichtquelle solcher Beleuchtungssysteme eine Strahlung abgibt, die zu einer unerwünschten Belichtung des lichtempfindlichen Objekts in der Waferebene des Projektionsbelichtungssystems führen kann und überdies die optischen Komponenten des Belichtungssystems, wie etwa die mehrschichtigen Spiegel, dadurch erhitzt werden. In EUV Systemen bei Wellenlängen von 13,5 nm werden beispielsweise Mehrschichtspiegel benutzt, die eine Spektralfilterung im Bereich um die EUV Wellenlängen ausführen, aber die einfallende Strahlung wieder mit höheren Reflexionsgraden ab beispielsweise 130 nm reflektieren. Die Strahlung im DUV Wellenlängenbereich, insbesondere bei Wellenlängen im Bereich von 130 nm–330 nm, führt zu solchen Belichtungen des lichtempfindlichen Objekts in der Waferebene. Strahlungen im engen UV-Bereich, im sichtbaren oder im Infrarotbereich, d.h. Wellenlängen über 330 nm, führen zu einer Erwärmung der Spiegel.

[0005] Zum Ausfiltern oder Dämpfen dieser unerwünschten Strahlung werden beispielsweise Transmissionsfilter aus Zirkonium in Beleuchtungssystemen für Wellenlängen < 100 nm verwendet.

[0006] Solche Filter oder Dämpfungsglieder haben den Nachteil hoher Lichtverluste. Überdies können sie leicht durch Hitzebelastung zerstört werden.

[0007] Als Alternative ist es möglich, das Filtern mit Gitterelementen nach dem Konzept herkömmlicher Spektralfilterung zu gewährleisten. Bei einer solchen Methode wird die Gitterperiode des Gitterelements so gewählt, dass die Strahlung der Nutzwellenlänge in der ersten Ordnung gebeugt wird. Mit Hilfe einer dem Gitterelement in der Strahlenbahn bzw. dem Strahlweg nachgelagerten bzw. nachgeordnete Blende ist es dann möglich, besonders das Licht der nullten Gitterordnung heraus zu filtern, das eine beträchtliche Strahlungsmenge mit Wellenlängen umfasst, die nicht der Nutzwellenlänge entsprechen, indem Strahlung der nullten Gitterordnung blockiert wird. Die Strahlung der Nutzwellenlänge von 13,5 nm wird dann beispielsweise im wesentlichen komplett in der ersten Ordnung gebeugt und kann über die in der Strahlenbahn bzw. Strahlweg nachgelagerte bzw. nachgeordnete Blende vollständig in das nachfolgende Beleuchtungssystem weiter gehen.

[0008] Der Vorteil eines solchen Spektralfilters besteht darin, dass zumindest die theoretische Möglichkeit besteht, unerwünschte Wellenlängen komplett zu unterdrücken oder zu blockieren. Infolge einer solchen Anord-

nung ist es möglich, die unerwünschte DUV-Strahlung im wesentlichen vollständig zu blockieren, welche Strahlung im Wellenlängenbereich von 130 nm bis 330 nm kennzeichnet. Ein derartiges Filterelement in einem EUV Beleuchtungssystem ist in EP-A-1 202 291 und in der gleichzeitig eingereichten Patentanmeldung US 2002/0186811 A1 sowie in WO 02/12928 A2 dargestellt.

[0009] Die Gitterelemente, die in EP-A-1 202 291 und in der gleichzeitig eingereichten Patentanmeldung US 2002/0186811 A1 insbesondere als Echellegitter beschrieben sind, haben den Nachteil, dass sie eine Gesamteffizienz von weniger als 60% aufweisen und hohe Anforderungen an die Gitterproduktion stellen. Daraus folgt, dass das Gitter eine optische Funktionalität besitzen muss, z.B. einen optischen Brechwert, so dass die Ausbildung der ersten Gitterordnung in gewissem Ausmaß aberrationsfrei auf Nutzwellenlänge stattfinden kann.

[0010] Das Verhalten in Beugungsgittern, wie aus EP-A-1 202 291 und der gleichzeitig eingereichten US-Patentanmeldung 2002/0186811 A1 bekannt, wird durch die Gittergleichung

$$n \frac{\lambda}{p} = \sin \alpha_1 - \sin \beta$$

(1)

beschrieben, wobei p die Gitterperiode, n die Gitterordnung, α_1 der Einfallswinkel relativ zu der Oberfläche normal zum Gitter, β der Winkel des Beugungsstrahls bzw. gebeugten Strahls in Relation zur Oberfläche normal zum Gitter und λ die Wellenlänge ist.

[0011] Das Gitterelement wie in EP-A-1 202 291 und in der gleichzeitig eingereichten Patentanmeldung US 2002/0186811 A1 beschrieben, ist für ein Beleuchtungssystem für Wellenlängen < 200 nm für die Spektralfilterung im Fall geeignet, dass die einzelnen Gitterordnungen und die Wellenlängen deutlich voneinander getrennt sind. Dies wird erreicht durch einen ausreichend großen Beugungswinkel zwischen der nullten Ordnung und einer 1. Ordnung, z.B. mit einem Beugungswinkel $\gamma = \beta - \alpha_1 > 2^\circ$. Die Beugung bei einer Wellenlänge von beispielsweise 13,5 nm um einen größeren Beugungswinkel γ von $\gamma > 2^\circ$ wird beispielsweise so erreicht, dass die Gitterfurchen praktisch senkrecht zu der Einfallsebene der Strahlung angeordnet sind, und das Gitter wird unter streifendem Einfall verwendet, d.h. der Einfallswinkel α ist größer als 70° relativ zur Oberfläche normal zur Oberfläche. Gitterperioden von 500 l/mm bis 1000 l/mm reichen somit beispielsweise aus. Die Einfallsebene ist definiert als die Ebene, die vom Einfallvektor und dem Normalvektor der Gitteroberfläche begrenzt wird, wo der einfallende Strahl die Gitterfläche durchdringt. Der Gittervektor, der senkrecht zu den Gitterfurchen in der tangentialen Ebene an der Gitteroberfläche situiert ist, liegt deshalb nahezu in der Einfallsebene. Wenn der Gittervektor in der Einfallsebene situiert ist, kann die Vektorgleichung der Gitterbeugung auf die oben aufgeführte Gleichung (1) reduziert werden.

[0012] Ein Nachteil der bekannten Spektralfilter oder Dämpfungsglieder besteht darin, dass sie im Fall von Dünnschichten von der Wärmelast zerstört werden können und in der Transmission eine nur sehr geringe Effizienz aufweisen. Wenn Gitter wie in EP-A-1 202 291 beschrieben als Filter oder Dämpfungsglieder verwendet werden, ist es möglich, dass insbesondere die DUV-Strahlung blockiert werden kann. Es besteht indessen ein Nachteil insofern, als im Bereich von EUV-Wellenlängen eine sehr geringe Effizienz vorliegt. Die maximal erreichbare Effizienz solcher Gitter beträgt im Bereich von EUV-Wellenlängen nur 35% bis 50%.

[0013] Es ist folglich ein Ziel der vorliegenden Erfindung, die Nachteile des Standes der Technik zu überwinden und ein Dämpfungsglied bzw. insbesondere einen Spektralfilter zu schaffen, der die unerwünschte Strahlung unterdrücken kann, jedoch eine wesentlich höhere Effizienz aufweist als vorher bekannte Lösungen, um für die eingesetzte Lichtquelle niedrigeren Strombedarf zu ermöglichen.

[0014] Dieses Ziel wird gemäß der Erfindung mit einem Beleuchtungssystem erreicht, welches die in Anspruch 1 definierten Merkmale aufweist. Ein Dämpfungsglied wird geschaffen, das mindestens ein Gitterelement umfasst, wobei das Gitter mit Gitterfurchen versehen ist, die mindestens eine Gitterperiodizität bereitstellen, wobei die Gitterperiodizität wesentlich größer ist als die Nutzwellenlänge, d.h. im Fall von EUV-Strahlung sehr viel größer als die Nutzwellenlänge von 13,5 nm.

[0015] Die Erfinder haben überraschender Weise festgestellt, dass es, um Schäden an den optischen Komponenten, insbesondere an den Spiegeln zu vermeiden, und um eine unerwünschte Exponierung des lichtempfindlichen Substrats an falschen Wellenlängen, beispielsweise im DUV-Bereich zu vermeiden, nicht erforderlich ist, unerwünschte Wellenlängen im Bereich von DUV-Strahlung und/oder Infrarotstrahlung vollkommen

zu unterdrücken, sondern dass es vielmehr ausreicht, diese Strahlung in Relation zu der Strahlung der Nutzwellenlänge zu dämpfen. Je nach den Spektraleigenschaften der Lichtquelle kann beispielsweise eine Dämpfung bestimmter Wellenlängenbereiche um 20% relativ zur Nutzwellenlänge ausreichen.

[0016] Das Filtern oder Dämpfen der unerwünschten Wellenlängen im DUV- oder IR-Bereich mit dem Dämpfungsglied gemäß der Erfindung wird dergestalt erreicht, dass die nullte Gitterordnung anstelle einer 1. Gitterordnung beispielsweise eines Gitterelements, wie in EP-A-1 202 291 offenbart, in einem Beleuchtungssystem verwendet wird, in dem ein Dämpfungsglied gemäß der Erfindung zur Anwendung kommt und die unerwünschte langwellige Strahlung infolge der Gitterperiode des Gitterelements, die viel größer ist als die Wellenlänge des benutzten Lichts, in andere Ordnungen als die nullte Ordnung weggebeugt wird. Wenn eine Blende mit einem Durchmesser ein wenig größer als jener der nullten Gitterordnung in der Nähe der nullten Ordnung angebracht wird, können alle höheren Gitterordnungen, die Strahlungen mit längeren Wellenlängen enthalten, blockiert werden.

[0017] Das Dämpfungsglied gemäß der Erfindung wird in einem Beleuchtungssystem verwendet, z.B. in einem EUV-Beleuchtungssystem mit einer Nutzwellenlänge von beispielsweise 13,5 nm. Die Blende rund um die nullte Ordnung ist in einem solchen Beleuchtungssystem vorzugsweise in einem Strahlenfokus angeordnet, beispielsweise in einem ersten Bild der Quelle. Es ist auch möglich, die unerwünschte Strahlung im Beleuchtungssystem so abzulenken, dass die höheren Gitterordnungen zunächst dem zu beleuchtenden Feld zu liegen kommen. In einem solchen Fall kann die unerwünschte Strahlung durch eine Feldblende blockiert werden. Eine Feldblende besteht aus einer oder mehreren Blenden in der oder nahe der Feldebene, die nur der Strahlung den Durchgang zum beleuchteten Feld erlauben. Die Kante des Spiegels als solche kann als Blende wirksam sein, welche unerwünschte Strahlung blockiert, weil die Kante des Spiegels vorzugsweise so gestaltet werden kann, wie dies für eine vollständige Beleuchtung des zu beleuchtenden Feldes erforderlich ist.

[0018] Aufgrund der Tatsache, dass die unerwünschte Langwellenstrahlung zumindest teilweise in andere Gitterordnungen als die nullte Gitterordnung weggebeugt werden kann, kann Strahlung im DUV- und/oder Infrarotbereich in einem Beleuchtungssystem erheblich gedämpft werden, indem die gebeugte Strahlung beispielsweise mittels einer Blende blockiert wird.

[0019] Die Gitterperiodizität des Gitters gemäß der Erfindung beträgt vorzugsweise mehr als 150 Mal die Nutzwellenlänge, insbesondere vorzugsweise mehr als 200 Mal die Nutzwellenlänge. Überdies kann das Dämpfungsglied gemäß der Erfindung sowohl unter streifendem Einfall wie unter normalem Einfall betrieben werden. In dieser Anmeldung ist unter einem streifenden Einfall zu verstehen, dass die Strahlen eines Strahlenbündels, das auf das Gitter auftrifft, einen Einfallswinkel $\alpha_i > 70^\circ$ relativ zur Normalen der Gitteroberfläche haben. Im Falle des streifenden Einfalls steht der Gittervektor eines Gitters vorzugsweise praktisch senkrecht zur Einfallsebene des Gitters, wobei die Einfallsebene durch den einfallenden Strahl und die Normale der Oberfläche begrenzt wird.

[0020] Der Normaleinfall ist so zu verstehen, dass die Strahlen eines Strahlenbündels, das auf das Gitter auftrifft, einen Einfallswinkel $\alpha_i < 30^\circ$ relativ zur Normalen der Gitteroberfläche haben.

[0021] Der Beugungswinkel $\gamma = \beta - \alpha_i$ kann annäherungsweise anhand der Gleichung (2) bestimmt werden, sowohl im Falle der Gitter, deren Gittervektor praktisch im rechten Winkel zur Einfallsebene liegt, wie auch bei Verwendung von Gittern unter praktisch senkrechtem Einfall, d.h. Einfallswinkeln von $\alpha_i < 30^\circ$ relativ zur Normalen der Oberfläche und bei kleinen Beugungswinkeln:

$$\sin(\gamma) \approx \frac{\lambda}{p}$$

(2)

[0022] Die Gleichung (2) ist eine Annäherung für streifenden Einfall, zumal man sich in der Zone der sogenannten konischen Beugung für ein Gitter mit einem senkrecht zur Einfallsebene stehenden Gittervektor befindet, was bedeutet, dass die Gitterfurchen parallel zum einfallenden Strahl ausgerichtet sind. Die Gitterordnungen liegen sodann auf einer konischen Oberfläche.

[0023] Da das Nutzlicht im Dämpfungsglied oder Gitterelement gemäß der Erfindung nicht weggebeugt wird, sondern die selbe nullte Ordnung benutzt, hat das Gitterelement keinen optischen Effekt auf die Nutzwellenlänge. Dies deshalb, weil in der nullten Ordnung des Gitterelements die optischen Eigenschaften der Trägeroberfläche, auf die das Gitterelement aufgebracht wird, sich nicht wesentlich ändern. Folglich kann das Gitter

ohne Nachteile auf eine gebogene Oberfläche aufgebracht werden. Infolge des Niederfrequenzgitters des Dämpfungsglieds gemäß der Erfindung wird die Nutzwellenlänge gemäß der Gleichung (2) in einer Periode p von annähernd $4 \mu\text{m}$ in die ± 1 . Ordnung um nur $y(13,5 \text{ nm}) \approx 0,2^\circ$ mit Bezug zu $y(130 \text{ nm}) \approx 2^\circ$ für die störende Wellenlänge von 130 nm abgelenkt. In einem weiteren Beispiel findet die Ablenkung in die 1. Ordnung beispielsweise nur annähernd um $0,2 \text{ mrad}$ bei $13,5 \text{ nm}$, aber annähernd 2 mrad bei 130 nm statt. Als Folge des Strahls, der im ersten Beispiel um annähernd 2° oder im zweiten Beispiel um 2 mrad in die ± 1 . Ordnung weggebeugt wird, ist es möglich, beispielsweise durch Einführen einer Blende in die Strahlenbahn bzw. den Strahlweg nach dem Dämpfungsglied die unerwünschten Strahlung bei 130 nm beispielsweise in einem Beleuchtungssystem zu dämpfen.

[0024] Die Betätigung eines Dämpfungsglieds mit mindestens einem Gitterelement in der nullten Gitterordnung für die Nutzwellenlänge hat ferner Vorteile in der Produktion. Es ist deshalb beispielsweise irrelevant, ob das Gitter aus einem Stück oder in Teilen gefertigt ist. Zudem kann das Gitter konisch verjüngte Gitterfurchen besitzen, sofern das Gitter in einer konvergierenden Strahlenbahn bzw. konvergierenden Strahlweg eines Beleuchtungssystems benutzt wird. Diese Anordnung kann auf Wunsch gewählt werden und beeinflusst lediglich die Position und Unschärfe der Gitterordnungen, in denen das störende Licht gebeugt wird. Dies geschieht praktisch ohne irgendeine Relevanz für das Licht in der nullten Gitterordnung, das auch das Licht für die Nutzwellenlänge enthält.

[0025] Das Gitterelement gemäß der Erfindung ist deshalb sehr unempfindlich gegen Produktionsfehler.

[0026] Das Gitter gemäß der Erfindung ist insbesondere vorzugsweise als sogenanntes binäres Gitter ausgeführt, das nur zwei unterschiedliche Höhen aufweist, z.B. eine erste Höhe $H_1 = 0$ mit Bezug auf das lokale Koordinatensystem und eine zweite Höhe $H_2 = h$. Die Zonen unterschiedlicher Höhe können beispielsweise gleich breit gewählt werden, und deshalb halb so breit wie die Gitterperiode p . Das Verhältnis der zwei Breiten der unterschiedlich hohen Zonen ist auch als Geometrieverhältnis bekannt. Im Fall binärer Gitter mit gleich breiten Strukturen unterschiedlicher Höhe liegt somit ein Geometrieverhältnis von 1 vor. Es ist auch möglich, die Breiten unterschiedlich zu wählen, so dass die Periode im Summentotal der Breiten der zwei unterschiedlich hohen Zonen mit den Höhen H_1 und H_2 gewonnen wird. Die Beugungseffizienz kann in den unterschiedlichen Gitterordnungen durch die Variation der Strukturbreiten, also des Geometrieverhältnisses, beeinflusst werden.

[0027] Ein Vorteil binärer Gitter ist die Kantensteilheit. Aufgrund der Steilheit der Kanten sind die Schatten in einem binären Gitter niedrig, wenn es eine Periodizität senkrecht zur Einfallsebene hat. Senkrecht zur Einfallsebene bedeutet in diesem Fall, dass der Gittervektor praktisch senkrecht zur Einfallsebene steht. Infolge dieser Anordnung der Gitterfurchen parallel in Richtung des einfallenden Strahls, d.h. in der Einfallsebene, ist es möglich, insbesondere unter streifendem Einfall bei relativ hohen Gitterstrukturen zu erreichen, dass die Schatten und damit der Lichtverlust für die Nutzwellenlänge niedrig sind. Das Gitter ist dann im wesentlichen unsichtbar für die Nutzwellenlänge.

[0028] Die Beugungseffizienz eines solchen binären Gitterelements erreicht ein Maximum, wenn Folgendes für die Gittertiefe gilt:

$$h_n^\lambda = \left(\frac{2n+1}{2} \right) \cdot \frac{\lambda}{2 \cos \alpha_i} \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

(3)

wobei h_n^λ die Gittertiefe für maximale Beugungseffizienz bei Wellenlänge λ ist und der Einfallswinkel α_i auf die Normale der Oberfläche bezogen und n eine Ganzzahl ist. Wenn in einem bevorzugten Ausführungsbeispiel das Gitterelement als binäres Gitter mit nur zwei Höhen konzipiert ist, namentlich einer ersten Höhe und einer zweiten Höhe, verteilt sich das gebeugte Licht im wesentlichen zwischen nullter und ± 1 . Gitterordnung. Wenn $h = h_n^\lambda$ gemäß Gleichung (3), wird etwa 80% des Lichts in die ± 1 . Gitterordnung für Wellenlänge λ_1 gebeugt, z.B. $\lambda_1 = 130 \text{ nm}$. Dem entsprechend bleibt nur eine Lichtstärke dieser Wellenlänge λ_1 von weniger als 20% in der nullten Gitterordnung. Zur Betrachtung der relativen Dämpfung mit Bezug auf die EUV-Strahlung muss beispielsweise die Reflektivität des Dämpfungsglieds für die EUV-Strahlung bei $13,5 \text{ nm}$ berücksichtigt werden. Bei streifendem Einfall beispielsweise in einem Einfallswinkel $\alpha_i 76^\circ$ relativ zur Normalen der Oberfläche mit einer Rutheniumschicht werden Reflektivitäten von über 80% erreicht, d.h. die gewünschte EUV-Strahlung wird ebenfalls um 20% gedämpft. wird dies berücksichtigt, ist es möglich, für die Wellenlänge λ_1 eine Dämpfung um 80% (DUV, d.h. 130 nm) auf 20% (bei EVU, d.s. $13,5 \text{ nm}$) zu erreichen, d.h. 75% relativ zu dem $\lambda = 13,5 \text{ nm}$. Anhand der Gleichung (3) kann die Tiefe des Gitters so gewählt werden, dass bestimmte Wellen-

längen im wesentlichen aus dem Strahl heraus gebeugt werden. Vorteilhafterweise wird die Tiefe h_n so gewählt, dass in der nullten Ordnung unerwünschte DUV und IR-Wellenlängen in die ± 1 . Ordnung gebeugt werden.

[0029] Es ist zu beachten, dass die Bedingung (3) möglicherweise auch für die Nutzwellenlänge $\lambda = 13,5$ nm erfüllt ist. Jedoch ist der Beugungswinkel bei 13,5 nm in höheren Ordnungen sehr niedrig, z.B. in der ± 1 . Ordnung für ein Gitter, das auf Effizienz konstruiert ist und folglich Licht mit Wellenlängen im DUV-Bereich bricht. Ein solches Gitter umfasst eine Periodizität $p = 4$ μm und eine Gittertiefe von beispielsweise 210 nm. Für solche Gitter kommt Licht der Nutzwellenlänge 13,5 nm, das in die ± 1 . Ordnung gebeugt ist, so nahe an der nullten Ordnung zu liegen, dass dies nur den Effekt einer leichten Unschärfe der nullten Ordnung hat.

[0030] Andererseits hat das Gitter mit der Tiefe h_n einen anderen Effekt bei einer anderen Wellenlänge und bei Tiefen

$$(4) \quad h'_m = m \cdot \frac{\lambda}{2 \cos \alpha_i} \quad m = 0,1,2,3...$$

findet praktisch keine Beugung mehr statt, d.h. das gesamte Licht mit Wellenlängen, die diese Bedingung erfüllen, kann nicht in eine andere Gitterordnung gebeugt werden und bewegt sich zur nullten Gitterordnung und damit zum Spiegelreflex.

[0031] Allgemein kann die Beugungseffizienz η in einer einfachen Formel in Abhängigkeit von der Tiefe eines binären Gitters und der Wellenlänge ausgedrückt werden:

$$(5) \quad \eta(h, \lambda) = c_m \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} h \cos \alpha_i \right)$$

wobei h die Tiefe des Gitters und c_m die maximale Beugungseffizienz in der gewünschten Gitterordnung ist, d.h. annähernd $c_{-1} \approx 40\%$ für die -1 . Gitterordnung und $c_1 \approx 40\%$ für die $+1$. Gitterordnung, insgesamt für beide Gitterordnungen annähernd $c_{-1} + c_1 \approx 80\%$. Die Beugungseffizienz kann von den Materialeigenschaften und zusätzlich von der Wellenlänge oder der Reflektivität des benutzten Gittermaterials bei den entsprechenden Wellenlängen abhängig sein.

[0032] Wie aus der voranstehenden Diskussion zu ersehen ist, kann das Gitterelement gemäß der Erfindung dazu verwendet werden, unterschiedliche Wellenlängen nur in einem bestimmten Ausmaß außerhalb der nullten Ordnung zu brechen. Im Durchschnitt können nur annähernd 50% der maximalen Beugungseffizienz $2c_1$ über einen bestimmten Spektralbereich erreicht werden, d.h. etwa nur 40% der störenden Strahlung können ausgefiltert werden. Durch eine geeignete Wahl der Tiefe kann eine optimale Unterdrückung von besonders stark auftretenden störenden Wellenlängen erreicht werden.

[0033] Wie oben dargelegt, kann das Dämpfungsglied gemäß der Erfindung höchstens 80% der Stärke einer unerwünschten DUV-Strahlung bei bestimmten Wellenlängen ausfiltern. Bei anderen Wellenlängen funktioniert das Gitter beispielsweise nicht. Das Gitter ist deshalb vorzugsweise so konzipiert, dass im DUV-Bereich einige stark auftretende und störende Wellenlängen praktisch vollständig ausgefiltert werden. Um dies zu erreichen, ist die Gittertiefe h in einem vorteilhaften Ausführungsbeispiel so vorgesehen, dass die Bedingung (3) für die größtmögliche Anzahl an Wellenlängen erfüllt ist. In einem weiteren, besonders vorteilhaften Ausführungsbeispiel wird die Gittertiefe h so gewählt, dass die mittlere Beugungseffizienz im gewünschten Spektralbereich ein Maximum annimmt.

[0034] Im Durchschnitt ist es über alle DUV-Wellenlängen möglich, eine mittlere Beugungseffizienz von annähernd 40% zu erreichen, und damit eine Dämpfung dieser unerwünschten Strahlung im selben Ausmaß. Andererseits beträgt die Reflektivität für die Nutzwellenlänge von beispielsweise $\lambda = 13,5$ nm annähernd 80%, wenn in einem bevorzugten Ausführungsbeispiel eine Rutheniumbeschichtung verwendet wird und das Gitter unter streifendem Einfall benutzt wird, also die Strahlen des Strahlenbündels in einem Winkel von $< 20^\circ$ relativ zur Oberflächentangente oder in einem Winkel von $\alpha_i > 70^\circ$ relativ zur Normalen der Oberfläche auftreffen. Mit so einem Gitterelement als Dämpfungsglied ist es möglich, das Ausmaß unerwünschter DUV-Wellenlängen beispielsweise um 25% zu reduzieren. In einem besonders vorteilhaften Ausführungsbeispiel wird mittels einer Optimierung der Tiefe auf annähernd 210 nm in einem Einfallswinkel von 76° relativ zur Normalen der Oberfläche für Wellenlängen des DUV-Spektralbereichs von 130 nm bis 330 nm eine mittlere Beugungseffizienz von

annähernd 68% erreicht. Dies entspricht einer Dämpfung der Menge unerwünschter Strahlung im DUV-Wellenlängenbereich um 60%. Da die Beugungseffizienz im wesentlichen unabhängig von der Gitterperiode ist, gilt dies für mehrere Gitterperioden und kann analog für Dämpfungsglieder gemäß der Erfindung verwendet werden, die bei normalen Einfallswinkeln benützt werden. Derartige Modifikationen liegen für einschlägig bewanderte Fachpersonen freilich auf der Hand.

[0035] Um eine noch höhere Unterdrückung der Strahlung im DUV-Wellenlängen-Bereich zu erreichen, kann das Prinzip der Erfindung in einem bevorzugten Ausführungsbeispiel mehrere Male hintereinander eingesetzt werden, z.B. bei mehreren Reflexionen unter streifendem Einfall oder auch bei Normal-Einfallspiegeln, also Spiegeln, auf die die Strahlen des Strahlenbündels in einem Winkel von $\alpha_i > 20^\circ$ relativ zur Oberflächentangente oder von $< 70^\circ$ relativ zur Normalen der Oberfläche auftreffen.

[0036] Vorzugsweise sind die Gitterfurchen in der konvergierenden Strahlenbahn bzw. Strahlweg und unter streifendem Einfall konisch gestaltet (d.h. verjüngt). Bei kleinen Aperturwinkeln ist dies nicht unbedingt erforderlich. Das komplette Gitter kann auch als einzelnes, großes, binäres Gitter mit der selben Periode ausgeführt sein, wenn kleinere Schatten akzeptabel sind.

[0037] Anstelle von sich verjüngenden Gitterfurchen kann das Gitter auch in einzelnen Segmenten ausgeführt sein, die mit Bezug zum lokalen Einfallswinkel des konvergierenden Strahlenbündels entsprechend ausgerichtet sind. Die Gitterperioden der einzelnen Segmente können sich zudem unterscheiden.

[0038] In einer konvergierenden Strahlenbahn bzw. Strahlweg ändert sich der Einfallswinkel α_i über das Gitter hinweg. Als Ergebnis ändert sich auch die Wellenlänge über das Gitter, für das die Gleichung (1) die höchste Beugungseffizienz erzielt.

[0039] In einem besonders vorteilhaften Ausführungsbeispiel kann die Gittertiefe auch über das Gitter hinweg variieren, anstatt einzelner Gitterelemente mit unterschiedlichen Gittertiefen, die mehrere Male hintereinander angeordnet sind, z.B. durch Segmentierung oder durch eine Produktionsmethode, mit der der Verlauf vorgegeben werden kann.

[0040] Die Erfindung wird nun exemplarisch durch Bezugnahme auf ein Ausführungsbeispiel und die Zeichnungen erklärt.

[0041] [Fig. 1](#) zeigt ein EUV Projektionsbelichtungssystem mit einem Dämpfungsglied in Form eines Gitterelements gemäß der Erfindung;

[0042] [Fig. 2](#) zeigt die Höhen in x-Richtung eines Dämpfungsglieds gemäß der Erfindung;

[0043] [Fig. 3](#) zeigt eine dreidimensionale Anordnung eines Dämpfungsglieds mit Koordinatensystem gemäß der Erfindung;

[0044] [Fig. 4](#) zeigt die Beugungseffizienz über die Wellenlänge für eine gegebene Gittertiefe;

[0045] [Fig. 5](#) zeigt die Beugungseffizienz, gemittelt über einen Spektralbereich in Abhängigkeit von der Gittertiefe;

[0046] [Fig. 6a](#) zeigt das Gitterelement mit konischen Gitterstrichen;

[0047] [Fig. 6b](#) zeigt das Gitterelement, bestehend aus einer großen Zahl einzelner Segmente;

[0048] [Fig. 7](#) zeigt die Schichtstruktur eines Dämpfungsglieds gemäß der Erfindung in einer x-z Querschnittsansicht;

[0049] [Fig. 8a](#) zeigt ein Projektionsbelichtungssystem mit einem Gitterelement gemäß der Erfindung auf einem Normaleinfallspiegel;

[0050] [Fig. 8b](#) zeigt einen Normaleinfallspiegel mit einem Gitter.

[0051] [Fig. 1](#) zeigt ein EUV Projektionsbelichtungssystem mit einem Gitterelement gemäß der Erfindung. Das EUV Projektionsbelichtungssystem umfasst eine Lichtquelle 1, eine fokussierende optische Komponente, ei-

nen sogenannten Kollektor **3**, der als genesteter Kollektor gemäß Deutscher Patentanmeldung DE 101 38 313 A1 und gemäß der gleichzeitig eingereichten Patentanmeldung U.S.-Patent Nr. 2003-0043455 A1, das am 23. Januar 2002 beim United States Patent Office für die Antragsteller eingereicht wurde, angeordnet ist. Der Kollektor **3** projiziert die Lichtquelle **1**, die in der Objektebene des Beleuchtungssystems situiert ist, auf ein Bild der Lichtquelle **5** oder eine sogenannte sekundäre Lichtquelle in oder nahe einer Blendenebene **7**.

[0052] Im vorliegenden Fall ist die Lichtquelle **1**, die eine Laser-Plasmaquelle oder eine Plasma-Entladungsquelle sein kann, in der Objektebene **2** des Beleuchtungssystems situiert. Das Bild der Primärlichtquelle **1** kommt in oder nahe der Blendenebene **7** des Beleuchtungssystems **10** zu liegen. Das Bild der Primärlichtquelle wird auch als Sekundärlichtquelle **5** bezeichnet.

[0053] Eine zusätzliche Blende **24** ist zwischen dem Dämpfungsglied **20** gemäß der Erfindung mit mindestens einem Gitterelement und der physikalischen Blende **22** in der Blendenebene **7** angeordnet. Gemäß der Erfindung kommt der Fokus der nullten Ordnung in der Ebene **7** der Blende **22** zu liegen, d.h. die Lichtquelle wird vom Kollektor und dem Dämpfungsglied in der nullten Gitterordnung auf gewissermaßen stigmatische Weise auf die Ebene der Blende projiziert und führt dort zur Sekundärlichtquelle **5**. Alle anderen Gitterordnungen, etwa $+1$. oder -1 . Gitterordnung, werden von den Blenden **22** und **24** für Licht größerer Wellenlänge blockiert, z.B. langwelligeres Licht bzw. Strahlung. Aufgrund des geringen Ablenkungswinkels der Nutzstrahlung in höheren Gitterordnungen, z.B. in der ± 1 . Gitterordnung, wird dieses Licht von der Blende im allgemeinen nicht blockiert. Stattdessen kommt es zu einer Unschärfe des Lichtes der Nutzwellenlänge nahe der nullten Gitterordnung. Die Ablenkung in andere Gitterordnungen ist in [Fig. 1](#) nicht dargestellt. In diesem Zusammenhang wird auf [Fig. 3](#) verwiesen.

[0054] Das Beleuchtungssystem des Projektionssystems umfasst ferner ein optisches System **50** zum Formen und Beleuchten der Feldebene **100** mit einem ringförmigen Feld, wie in US-Patent-Nr. 6,438,199 B1 beschrieben. Das lokale x, y, z Koordinatensystem ist in der Feldebene **100** abgebildet. Das optische System **50** umfasst zwei facettierte Spiegel, die in Beugungssystemen auch als Fliegenaugenlinsen **54**, **56** bezeichnet werden, als Mischeinheit **52** für die homogene Ausleuchtung des Feldes in der Feldebene **100**. Im weiteren umfasst das Beleuchtungssystem eine Projektionslinse **58** mit zwei Projektionsspiegeln **62**, **64** zusätzlich zu der Mischeinheit **52** und einen feldbildenden Spiegel **70** mit streifendem Einfall. Im optischen System sind zusätzliche Blenden **82**, **84**, **86**, **88** zur Unterdrückung von Nebenlicht angeordnet.

[0055] Der erste facettierte Spiegel **54**, der sogenannte Feldfacettenspiegel, erzeugt eine Mehrzahl von Sekundärlichtquellen im oder nahe dem zweiten facettierten Spiegel **56**, dem sogenannten Pupillenfacettenspiegel. Die folgende Projektionslinse **58** projiziert den Pupillenfacettenspiegel auf die Austrittspupille des Beleuchtungssystems, das in der Eintrittspupille **200** der Projektionslinse **202** zu liegen kommt. Die Eintrittspupille der Projektionslinse **200** ist durch den Schnittpunkt des Hauptstrahls CR mit der optischen Achse HA der Projektionslinse **202** gegeben. Der Neigungswinkel der einzelnen Facetten des ersten Facettenspiegels **54** und des zweiten Facettenspiegels **56** sind so konzipiert, dass die Bilder der einzelnen Feldfacetten des ersten Facettenspiegels sich im wesentlichen in der Feldebene **100** des Beleuchtungssystems überlappen, weshalb eine im wesentlichen homogenisierte Ausleuchtung der Strukturmaske, die in dieser Feldebene zu liegen kommt, ermöglicht wird. Das Segment des Ringfeldes wird über den feldformenden Spiegel **70** mit streifendem Einfall gebildet, der unter dem streifendem Einfall betätigt wird.

[0056] Die Strukturmaske, die in der Feldebene **100** angeordnet ist und auch als Retikel bezeichnet wird, wird über eine Projektionslinse **202** in die Bildebene **204** der Feldebene **100** projiziert. Die Projektionslinse ist eine Sechspiegel-Projektionslinse, wie sie mit der US-Patentanmeldung 60/255214 vom 13. Dezember 2000 beim US Patent Office im Namen des Antragstellers eingebracht oder in U.S.-Patent Nr. 6,353,470 offenbart wurde.

[0057] Das zu belichtende Objekt, etwa ein Wafer, ist in der Bildebene **204** der Projektionslinse angeordnet.

[0058] [Fig. 2](#) zeigt eine Querschnittsdarstellung in x-z-Richtung durch ein Dämpfungsglied gemäß der Erfindung mit mindestens einem Gitterelement. Eine dreidimensionale schematische Ansicht eines solchen Dämpfungsglieds ist in [Fig. 3](#) dargestellt. Die Querschnittsansicht ist senkrecht auf die Einfallrichtung der Strahlen eines auf das Gitterelement auftreffenden Strahlenbündels. Das periodische Höhenprofil $H(z)$ des Gitterelements ist dargestellt. Das Dämpfungsglied gemäß der Erfindung umfasst ein binäres Gitterelement als Gitterelement, das eine erste Höhe H_1 und eine zweite Höhe H_2 umfasst. Die Differenz zwischen der ersten Höhe $H_1 = 0$ und der zweiten Höhe $H_2 = H$ ist die Furchentiefe. Im vorliegenden Fall beträgt die Furchentiefe $h = H - 0 = H$, wie in [Fig. 3](#) dargestellt. Die Periodizität des Gitterelements, die sich aus dem Verlauf der Höhe in x-Richtung ergibt, wird als p bezeichnet. Die Breite der Struktur mit der Höhe $H_1 = 0$ wird als b_1 bezeichnet,

und die Breite der Struktur mit der Höhe $H_2 = H$ mit b_2 . Die Periode ergibt sich aus der Gesamtsumme von $b_1 + b_2 = p$. In dem vorliegenden illustrierten Fall gilt $b_1 = b_2$. Dann ist das Geometrieverhältnis $b_1/b_2 = 1$. Andere Geometrieverhältnisse sind ebenfalls möglich.

[0059] Wenn beispielsweise das Licht im DUV-Wellenlängenbereich von 130 nm um $y = 2^\circ$ in einer +1. oder -1. Ordnung gebeugt werden soll, wird eine Gitterperiode p von annähernd $3,7 \mu\text{m}$ benötigt. EUV-Strahlung, die auch von so einem Gitter in höhere Ordnungen gebeugt wird, z.B. in die ± 1 . Ordnung, wird – wie oben erklärt – nur um $0,2^\circ$ gebeugt und führt deshalb nur zu einer geringen Unschärfe der sekundären Lichtquelle **5** in der Ebene **7**.

[0060] **Fig. 3** zeigt ein Dämpfungsglied gemäß der Erfindung in einer dreidimensionalen Darstellung. Das lokale x, y, z Koordinatensystem ist ebenfalls dargestellt. Die Gitterfurchen sind in y -Richtung ausgerichtet, also parallel zur Richtung des auftreffenden Strahls eines Strahlenbündels. Der Gittervektor **308**, der in der tangentialen Ebene zum Gitter situiert ist, steht senkrecht zu den Gitterfurchen und weist deshalb in x -Richtung. Aus der Mehrzahl von Strahlen eines auf dem Gitter auftreffenden Strahlenbündels wird ein repräsentativer Strahl **300**, z.B. der erste oder Hauptstrahl eines Strahlenbündels, dargestellt, der auf die Gitteroberfläche auftrifft. Der Strahl **300** trifft auf das Gitterelement in einem Einfallswinkel α_i relativ zur Normallinie der Oberfläche **302** auf. Der Einfallswinkel α_i ist größer als 70° . Die Normallinie **302** der Oberfläche fällt mit der z -Richtung zusammen. Der auftreffende Strahl **300** und die Normallinie **302** begrenzen die lokale Einfallsebene, die im vorliegenden Fall mit der y - z -Ebene zusammenfällt. Der Strahl des Strahlenbündels, der in die nullte Ordnung abgelenkt wurde, ist mit dem Bezugszeichen **302** versehen, die in die +1. und -1. Ordnung gebeugten Strahlen mit den Bezugszeichen **304** und **306**. Bei Verwendung eines solchen Gitters, in dem der Gittervektor senkrecht zur Einfallsebene steht, liegen die gebeugten Strahlen nicht in der Einfallsebene. Lediglich die nullte Ordnung, die dem reflektierten Strahl entspricht, kommt in der Einfallsebene zu liegen. Die anderen Gitterordnungen werden in die Richtung gegen den Gittervektor und in der Höhe abgelenkt. In diesem Fall spricht man von konischer Gitterbeugung.

[0061] **Fig. 4** zeigt die Form der Beugungseffizienz $\eta(h, \lambda)$ für eine der zwei 1. Gitterordnungen nach der Gleichung (5) über die Wellenlänge λ für vier unterschiedliche Gittertiefen von 135 nm, 210 nm, 340 nm und 500 nm bei einem Einfallswinkel $\alpha_i = 76^\circ$. Binäre Gitter werden angenommen. Folgende Bezugszeichen werden verwendet: für eine Gittertiefe von 135 nm Bezugszeichen **350**, für eine Gittertiefe von 210 nm Bezugszeichen **352**, für eine Gittertiefe von 340 nm Bezugszeichen **354**, für eine Gittertiefe von 500 nm Bezugszeichen **356**. Bei einer geringen Gittertiefe von $h = 210$ nm (Kurve **352**) ist beispielsweise nur ein Beugungsmaximum bei annähernd $\lambda \approx 200$ nm im DUV-Spektralbereich angesiedelt. Wenn beispielsweise eine größere Gittertiefe von $h = 340$ nm (Kurve **354**) gewählt wird, wird die maximale Beugungseffizienz gemäß der Gleichung (5) für die Wellenlängen $\lambda \approx 110$ nm und $\lambda \approx 330$ nm erreicht. Für die Wellenlänge $\lambda \approx 330$ nm und eine Anzahl kürzerer Wellenlängen, z.B. ein Drittel der genannten Wellenlänge bei $\lambda \approx 110$ nm, wird eine maximale Beugungseffizienz von annähernd $\approx 40\%$ in den zwei 1. Gitterordnungen erreicht, d.h. für die genannten Wellenlängen werden annähernd 80% aus der nullten Ordnung herausgebeugt und damit ausgefiltert. Für die Wellenlängen zwischen den idealen Wellenlängen ergibt sich annähernd eine $\sin^2$ -artige Form der Beugungseffizienzen, d.h. für andere Wellenlängen wird die Stärke der in der nullten Ordnung lokalisierten DUV-Strahlung nur gedämpft, oder das Gitter hat überhaupt keine Wirkung, z.B. für die Tiefe $h = 340$ nm bei der Wellenlänge $\lambda \approx 165$ nm. Die Menge und die Wellenlänge der unterdrückten oder übertragenen DUV-Strahlung kann damit nach der Gittertiefe bestimmt werden. Wenn die Quellen ein gleichmäßig verteiltes DUV-Spektrum oder eine unbekannte Spektralverteilung der Strahlung bereitstellen, wird die Gittertiefe h am besten so gewählt, dass über einen bestimmten zu unterdrückenden Spektralbereich ein Maximum für die Beugungseffizienz gemäß der Gleichung (5) oder **Fig. 4**, gemittelt über den Spektralbereich, gewährleistet ist.

[0062] **Fig. 5** zeigt die mittlere Beugungseffizienz η_{mittel} über zwei Spektralbereiche, namentlich für den DUV-Spektralbereich von 130 nm bis 330 nm (Bezugszeichen **360**) und für einen breiteren Wellenlängenbereich von 130 nm bis 600 nm (Bezugszeichen **362**), abhängig von der Gittertiefe bei einem Einfallswinkel von $\alpha_i = 76^\circ$. Die Form der Kurve wird durch Mittelung der Beugungseffizienzen gemäß der Gleichung (5) erreicht, d.h.

$$\eta_{\text{mittel}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta(h, \lambda) P(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} P(\lambda) d\lambda}$$

(6)

wobei $\eta(h, \lambda)$ die Beugungseffizienz gemäß der Gleichung (5) darstellt, h die Gittertiefe, $\lambda_{\min}$ die kürzeste Wellenlänge und $\lambda_{\max}$ die längste Wellenlänge des zu mittelnden Wellenlängenbereichs, und $P(\lambda)$ die Spektralverteilung, die auf das Dämpfungsglied auftrifft. In dem vorliegenden, vereinfachten Beispiel ist $P(\lambda)$ – ohne die Allgemeingültigkeit dieser Ausführungen einzuschränken – konstant auf gleich 1 gesetzt.

[0063] Die Form $\eta(h, \lambda)$ ist in [Fig. 4](#) für vier Beispiele über den betrachteten Spektralbereich dargestellt. Bei einer Prüfung des Spektralbereichs kann die maximale mittlere Beugungseffizienz gemäß der Gleichung (6) der [Fig. 5](#) bei einer Gittertiefe von annähernd 210 nm vorgefunden werden. Die gemittelte Beugungseffizienz ist in diesem Fall $\approx 34\%$. In beiden 1. Gitterordnungen werden 68% der Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 130 nm und 330 nm gebeugt. Ein Maximum von 32% der unerwünschten Strahlung bleibt dann in der nullten Ordnung. Wenn dies mit der Reflektivität von Ruthenium von mindestens 80% für die Nutzwellenlänge von 13,5 nm verglichen wird, ergibt sich eine Übertragung der unerwünschten DUV-Strahlung von $32\% : 80\% \approx 40\%$, d.h. eine relative Unterdrückung von 60% der unerwünschten Strahlung. Für den breiteren Spektralbereich von 130 nm bis 600 nm wird eine ideale Furchentiefe bei annähernd $h \approx 420$ nm vorgefunden. Die mittlere Beugungseffizienz ist dann annähernd $\approx 29\%$, was zu einer Unterdrückung des entsprechenden Spektralbereichs um mehr als annähernd $\approx 47\%$ führt.

[0064] [Fig. 6a](#) zeigt die Anordnung der Gitterfurchen **450** für ein Strahlenbündel, das auf konvergierende Weise auf das Dämpfungsglied gemäß der Erfindung unter einem streifenden Einfall von z.B. $\alpha_i \approx 76^\circ$ auftrifft. Die Gitterfurchen sind immer idealerweise parallel zur lokalen Einfallsebene angeordnet. Wie oben gezeigt, ist die lokale Einfallsebene durch den entsprechenden auftreffenden Strahl des Strahlenbündels und den Normalvektor der Oberfläche begrenzt. Der Normalvektor der Oberfläche steht vertikal zur Gitterebene. Der Brennpunkt des konvergierenden Strahls liegt in diesem Fall rechts vom Gitter. Alle Gitterfurchen **450** zeigen auf diesen Brennpunkt. Für die Funktionalität des Dämpfungsglieds gemäß der Erfindung ist es nicht unbedingt erforderlich, dass das Gitter aus konisch verjüngten Gitterfurchen besteht. Besonders im Fall kleiner Aperturen bis zu $NA \approx 0,2$ kann das Gitter auch aus praktisch parallelen Gitterfurchen bestehen, wie in [Fig. 3](#) dargestellt. Dies ist vom Produktionsstandort aus einfacher. Wie in [Fig. 6b](#) dargestellt, kann das Gitter auch aus Segmenten **460.1**, **460.2** der selben Gitterperiode zusammengesetzt sein.

[0065] [Fig. 7](#) zeigt schematisch die detaillierte Anordnung eines Dämpfungsglieds gemäß der Erfindung in einer x-z-Querschnittsansicht auf der Basis eines Gitterelements. Zunächst wird auf dem Substrat **500** eine Abdeckschicht **502** aufgebracht. Das Substrat **500** kann beispielsweise aus Silikon bestehen. Ein Material **504** wird auf die Abdeckschicht **502** aufgebracht. Das Material wird dann strukturiert, z.B. mittels bekannter Ätztechniken. Die Abdeckschicht **502** dient dem Zweck, den Ätzprozess anzuhalten, so dass sich dieser nicht bis zum Substrat **500** fortsetzt. Zur Steigerung der Reflektivität im EUV-Bereich wird die geätzte Struktur mit einer Beschichtung **506** versehen, die einen großen Anteil der EUV-Strahlung reflektiert. Eine solche Beschichtung kann aus Ruthenium oder einer Mehrschicht, beispielsweise aus Molybdän und Silikon, bestehen. Sowohl die Abdeckschicht wie auch das auf die Abdeckschicht aufgebrachte Material haben den Vorteil, dass sie mit sehr hoher Oberflächenqualität verarbeitet werden können. Zur Gewährleistung einer hohen Reflektivität bei streifendem Einfall von beispielsweise $\alpha_i > 70^\circ$ muss das Gitter eine sehr geringe Rauheit von etwa $rms \sim 0,6$ nm aufweisen. Folgende Methode empfiehlt sich deshalb für die Produktion:

Zuerst wird ein ebenes Substrat **500** mit der Abdeckschicht **502** poliert. Dann wird das Substrat mit einer Schicht **504** belegt. Die Schicht **504** ist eine ätzbare Schicht mit einer bestimmten Dicke. Eine bestimmte Schichtdicke lässt sich mit einer Oberflächenbehandlung erreichen, z.B. mit Läppen. Diese ätzbare Schicht kann mit photolithografischen Techniken strukturiert werden.

[0066] Da sowohl die ätzbare Schicht wie auch das Substrat sehr gut poliert werden können, lässt sich die Rauheit klein halten. Die ätzbare Schicht kann mittels Richtätzens bis zum Substrat entfernt werden, z.B. durch Ionenstrahlätzen der ätzbaren Schicht an den Stellen, die nicht von Widerstands- oder Schutzschichten bedeckt sind. Damit lässt sich ein Gitter mit gut kontrollierter Tiefe der Gitterfurchen herstellen.

[0067] [Fig. 8a](#) zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel eines Projektionsbelichtungssystems mit einem Dämp-

fungsglied gemäß der Erfindung in einer schematischen Darstellung. Das Dämpfungsglied in diesem Ausführungsbeispiel ist an den Spiegeln befestigt, die bei kleinen Einfallswinkeln betätigt werden. In diesem Fall ist das Dämpfungsglied an den Pupillenfacetten **656** des Beleuchtungssystems befestigt. Das Beleuchtungssystem umfasst einen Kollektor **603**, der die Lichtquelle **601** auf ein erstes Bild der Lichtquelle **605** projiziert. Die Strahlenbahn bzw. der Strahlweg zwischen dem Kollektor **603** und dem Bild der Lichtquelle **605** wird über einen ebenen Spiegel **620** geführt, der ein erstes Dämpfungsglied gemäß der Erfindung umfassen kann. Zu diesem Zweck ist in der Ebene des ersten Bildes der Lichtquelle **605** eine Blende **622** angeordnet.

[0068] Das Beleuchtungssystem des Projektionsbelichtungssystems umfasst ferner ein optisches System **650** zur Formung und Ausleuchtung der Feldebene **700** mit einem ringartigen Feld **690.1**. Das optische System **650** umfasst zwei Facettenspiegel **654**, **656** als Mischeinheit für die homogene Ausleuchtung des Felds und eine Projektionslinse **658** mit zwei projizierenden Spiegeln **662**, **664** und einem feldbildenden Spiegel **670** mit streifendem Einfall. Im optischen System sind zusätzliche Blenden **684**, **688.1** und **688.2** zur Unterdrückung von Nebenlicht angeordnet.

[0069] Der erste facettierte Spiegel **654**, der sogenannte Feldfacettenspiegel, produziert eine Mehrzahl von sekundären Lichtquellen in oder nahe dem zweiten facettierten Spiegel **656**, dem sogenannten Pupillenfacettenspiegel. Die folgende Projektionslinse, bestehend aus den Spiegeln **662**, **664** und **670**, projiziert den Pupillenfacettenspiegel in die Austrittspupille des Beleuchtungssystems. Die Austrittspupille des Beleuchtungssystems fällt in diesem Fall mit der Eintrittspupille der (hier nicht dargestellten) Projektionslinse zusammen. Der Einfallswinkel der einzelnen Facetten des ersten Facettenspiegels **654** und des zweiten Facettenspiegels **656** sind so konzipiert, dass die Bilder der einzelnen Feldfacetten des ersten Facettenspiegels einander im wesentlichen in der Feldebene **700** des Beleuchtungssystems überlappen, weshalb eine im wesentlichen homogenisierte Beleuchtung der Strukturmaske ermöglicht wird, die in dieser Feldebene zu liegen kommt. Das Segment des Ringfeldes wird über den feldbildenden Spiegel **670** mit streifendem Einfall gebildet, der bei streifendem Einfall betätigt wird. Wenn sich auf jeder Pupillenfacette ein Gitter gemäß der Erfindung zum Dämpfen unerwünschter Strahlung befindet, werden in der Feldebene **700** neben dem zu beleuchtenden Feld virtuelle Doppelbilder des Felds erzeugt. Die Strahlenbahn bzw. der Strahlweg über eine Pupillenfacette **656.1** ist als Beispiel für diesen Fall dargestellt. Die Pupillenfacette **656.1** projiziert die zugehörige Feldfacette **654.1** in das Feld **690.1**. Die auftreffende Strahlung wird vom Gitter auf der Pupillenfacette **656.1** gebeugt, so dass neben der Feldbeleuchtung **690.1** zwei weitere Feldbeleuchtungen **690.2** und **690.3** gemäß der 1. Gitterordnung produziert werden. Sie werden von den zusätzlichen Blenden **684**, **688.1** und **688.2** so blockiert, dass die zugehörige Strahlung nicht zu einer Belichtung des lichtempfindlichen Substrats in der Fokusebene der (nicht dargestellten) Projektionslinse führen kann.

[0070] In diesem Ausführungsbeispiel sind die Gitter auf den Facettenspiegeln beispielsweise so ausgeführt, dass die Gitterordnungen in der Einfallsebene zu liegen kommen, d.h. der Gittervektor liegt in der Einfallsebene. Um sicher zu stellen, dass die 1. Gitterordnungen **690.2** und **690.3** sich mit dem gewünschten Feld **690.1** nicht überlappen und damit vollkommen getrennt werden können, muss der Beugungswinkel ausreichend groß gewählt werden. Dies kann wie folgt berechnet werden: die Distanz zwischen der Pupillenfacette **656.1** und der zugehörigen Feldfacette **654.1** ist in diesem Fall annähernd 1 m. Die Höhe der Feldfacette in der y-Richtung ist in dieser Ebene annähernd 3 mm. Die Apertur der Strahlung an der Pupillenfacette ist dann 3 mrad. Um die Gitterordnungen vollständig zu trennen, reicht es aus, den Beugungswinkel größer als die Strahlungsapertur an der Stelle der Pupillenfacette **656.1** zu wählen. Der Beugungswinkel ist im vorliegenden Fall folglich > 3 mrad. Wenn beispielsweise ein Einfallswinkel von 4 mrad für Strahlung höher als 130 nm gewählt wird, ergibt sich eine notwendige Gitterperiode von $\approx 32 \mu\text{m}$. Bei einem Einfallswinkel von $\alpha_i \approx 5^\circ$ kann für diesen Fall aus der Gleichung (5) eine ideale Gittertiefe $h \approx 51 \text{ nm}$ bestimmt werden, um die Strahlung der Wellenlängen zwischen 130 nm und 330 nm zu unterdrücken. Wenn das Dämpfungsglied gemäß der Erfindung in den exemplarischen Pupillenfacettenspiegeln **656** in Kombination mit dem Dämpfungsglied auf dem ebenen Spiegel **620** verwendet wird, kann eine andere Tiefe von beispielsweise $h \approx 90 \text{ nm}$ vorteilhaft sein, um die höchstmögliche Dämpfung der unerwünschten Strahlung über das Spektrum 130 nm bis 330 nm zu erreichen.

[0071] In Fig. 8b ist schematisch das Gitter auf dem Pupillenfacettenspiegel **656.1** dargestellt. Die Anordnung ist in diesem Fall vorzugsweise ebenfalls mit einem binären Gitter hergestellt, das schematisch anhand einer Reihe von Gitterfurchen **655** dargestellt ist. Es ist zu beachten, dass das Dämpfungsglied gemäß der Erfindung in ähnlicher Form auch auf den Feldfacetten **654** oder den weiteren Spiegeln des Beleuchtungssystems angewendet werden kann, einschließlich des Kollektors **603**.

[0072] Die Erfindung präsentiert zum ersten Mal ein optisches Dämpfungsglied für die EUV-Lithografie, das insbesondere durch seine hohe Effizienz und die leichte Produzierbarkeit gekennzeichnet ist.

[0073] Einschlägig bewanderte Fachpersonen erkennen aus der vorangehenden Beschreibung, dass der offenbarte Inhalt dieser Patentanmeldung alle möglichen Kombinationen aller Elemente der Ansprüche mit allen Elementen jedes anderen Anspruchs sowie Kombinationen aller Ansprüche untereinander umfasst.

Patentansprüche

1. Beleuchtungssystem für die Mikrolithographie mit einer Nutzwellenlänge < 100 nm mit einer Objektebene und einer Bildebene, das eine Lichtquelle umfasst, die eine Strahlung mit einer Nutzwellenlänge ≤ 100 nm und eine Langwellenstrahlung ≥ 100 nm abgibt, wobei sich die Strahlung in Strahlenbahnen von der Objektebene zur Bildebene ausbreitet,

wobei das Beleuchtungssystem Folgendes umfasst:

- mindestens ein Dämpfungsglied mit mindestens einem Gitterelement (**20**, **620**, **656.1**) mit Gitterfurchen (**450**) mit einer Gittertiefe h ;
- mindestens eine physikalische Blende (**22**, **622**, **684**, **688.1**) in einer Blendenebene (**7**), die dem Dämpfungsglied in der Strahlenbahn von der Objektebene (**2**) zur Bildebene (**100**) nachgelagert ist;
- wobei die physikalische Blende eine Öffnung an einer Stelle einer nullten Gitterordnung mindestens eines Gitterelements besitzt;
- wobei mindestens ein Gitterelement in der Strahlenbahn von der Objektebene (**2**) zur Bildebene (**100**) dermaßen angeordnet ist, dass die nullte Gitterordnung durch die Blende geführt wird und die Langwellenstrahlung zumindest teilweise in andere als die nullte Ordnung gebeugt wird;
- wobei die Gittertiefe h so ausgewählt wird, dass die Langwellenstrahlung bei optimaler Effizienz in andere als die nullte Gitterordnung gebeugt wird; und
- wobei die Öffnung eine solche Größe aufweist und so ausgewählt wird, dass die Langwellenstrahlung einer Wellenlänge größer als 10 mal die Nutzwellenlänge, die zumindest teilweise durch das mindestens eine Gitterelement des Dämpfungsglieds in andere als die nullte Ordnung gebeugt wird, von der Blende im wesentlichen vollkommen blockiert wird.

2. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1, wobei die Beugung der Langwellenstrahlung in andere Gitterordnungen als die nullte Ordnung von der Wellenlänge abhängig ist.

3. Beleuchtungssystem nach Anspruch 2, wobei die Beugung der Langwellenstrahlung in andere als die nullte Ordnung gekennzeichnet ist durch einen Wellenlängenbereich und eine mittlere Beugungseffizienz, die durch die Mittelung der Beugungseffizienzen über den Wellenlängenbereich berechnet wird.

4. Beleuchtungssystem nach Anspruch 3, wobei der Wellenlängenbereich von 130 nm bis 330 nm reicht und die mittlere Beugungseffizienz in einem Bereich zwischen 13% und 34% liegt.

5. Beleuchtungssystem nach Anspruch 3, wobei der Wellenlängenbereich von 130 nm bis 600 nm reicht und die mittlere Beugungseffizienz in einem Bereich zwischen 8% und 29% liegt.

6. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Größe der Öffnung der physischen Blende (**22**, **622**, **684**, **688.1**) so ausgewählt wird, dass auch die Strahlung der Nutzwellenlänge, die von dem mindestens einen Gitterelement des Dämpfungsglieds in andere als die nullte Ordnung gebeugt wird, durch die Blende geht.

7. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Gitterfurchen (**450**) mindestens eine Gitterperiodizität (p) und eine Gitterebene erzeugen, wobei die mindestens eine Gitterperiodizität (p) wesentlich größer ist als die Nutzwellenlänge, wobei die Gitterperiodizität (p) 150 mal, insbesondere 200 mal größer ist als die Nutzwellenlänge.

8. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei das Gitterelement (**20**, **620**, **656.1**) ein Binärgitter ist und die Gitterfurchen vertikal zum Gitter unterschiedliche Höhen ($H(z)$) aufweisen, wobei die Gitterfurchen eine erste Höhe (H_1) und eine zweite Höhe (H_2) aufweisen.

9. Beleuchtungssystem nach Anspruch 8, wobei der Unterschied zwischen der ersten (H_1) und der zweiten Höhe (H_2) die Gittertiefe h definiert, und die Gittertiefe

$$\frac{\lambda_{\min}}{4 \cos \alpha} < h < \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda_{\max}}{2 \cos \alpha} \quad \text{ist,}$$

wobei

h die Gittertiefe ist,

$\lambda_{\min}$ die kürzeste Wellenlänge ist, die vom Dämpfungsglied zu dämpfen ist,

$\lambda_{\max}$ die längste Wellenlänge ist, die vom Dämpfungsglied zu dämpfen ist,

α der Einfallswinkel eines Strahls im Verhältnis zur Normallinie der Oberfläche ist,

n eine Ganzzahl ≥ 0 ist.

10. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Strahlen eines Strahlenbündels auf das Gitterelement in einem Winkel $< 30^\circ$ im Verhältnis zu einer Normallinie einer Oberfläche, die vertikal zu einer Gitterebene steht, auftreffen.

11. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Strahlen auf das Gitterelement in einem Winkel $> 70^\circ$ im Verhältnis zu einer Normallinie einer Oberfläche, die vertikal zu einer Gitterebene des Gitterelements steht, auftreffen.

12. Beleuchtungssystem nach Anspruch 11, wobei die Strahlen und die Normallinie der Oberfläche eine Einfallsebene begrenzen und ein Gittervektor (**308**) vertikal zur Einfallfläche des Gitterelements steht, so dass die Gitterfurchen (**450**) der Gitterebene in einer Richtung parallel zur Richtung der Strahlen (**300**) verlaufen, die auf das Gitterelement auftreffen.

13. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei das Gitterelement eine Mehrzahl einzelner Gitterelemente umfasst (**460.1**, **460.2**, **460.3**, **460.4**, **460.5**, **460.6**, **460.7**, **460.8**).

14. Beleuchtungssystem nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Gitterelemente (**460.1**, **460.2**, **460.3**, **460.4**, **460.5**, **460.6**, **460.7**, **460.8**) Gitterfurchen (**450**) unterschiedlicher Gittertiefe umfassen.

15. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei das Beleuchtungssystem des weiteren einen Kollektor (**3**, **603**) umfasst und das Dämpfungsglied das erste optische Element in der Strahlenbahn von der Lichtquelle (**1**) zur Feldebene (**100**) ist, das der Lichtquelle (**1**) und dem Kollektor (**3**, **603**) nachgelagert ist.

16. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 13 bis 15, wobei das Beleuchtungssystem mindestens zwei Dämpfungsglieder nach einem der Ansprüche 1 bis 8, ein erstes Dämpfungsglied (**620**) und mindestens ein zweites Dämpfungsglied (**656.1**) umfasst.

17. Beleuchtungssystem nach Anspruch 16, wobei die Strahlen eines Strahlbündels, die sich im Beleuchtungssystem von einer Lichtquelle (**1**) zur Feldebene (**100**) ausbreiten, in einem Winkel $> 70^\circ$ zu einer Normallinie der Oberfläche des ersten Dämpfungsglieds (**620**) auf das Dämpfungsglied (**620**) auftreffen und die Strahlen eines Strahlenbündels, das durch das Beleuchtungssystem von einer Lichtquelle (**1**) zur Feldebene (**100**) geht, in einem Winkel $< 20^\circ$ zur Normallinie der Oberfläche des mindestens einen Gitterelements des zweiten Dämpfungsglieds (**656.1**) auf das zweite Dämpfungsglied (**656.1**) auftreffen.

18. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei das Beleuchtungssystem eine Mischeinheit (**50**) mit einem ersten optischen Element mit ersten Facetten (**654**) und einem zweiten optischen Element mit zweiten Facetten (**656**) umfasst und mindestens eine der zwei Facetten (**656**) als Dämpfungsglied (**656.1**) angeordnet ist.

19. Beleuchtungssystem nach Anspruch 18, wobei in der Strahlenbahn von einer Lichtquelle (**1**) zur Feldebene (**100**) dem Dämpfungsglied (**656.1**) weitere Blenden (**684**, **688.1**, **688.2**) nachgelagert sind, wobei die weiteren Blenden eine Öffnung an der Stelle der nullten Gitterordnung des mindestens einen Gitterelements des Dämpfungsglieds aufweisen.

20. Projektionsbelichtungssystem zur Herstellung mikroelektronischer Bauteile mit einem Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 19, Folgendes umfassend:

eine Strukturmaske;

eine Projektionslinse;

ein lichtempfindliches Objekt, wobei die Strukturmaske auf das lichtempfindliche Objekt projiziert wird.

21. Verfahren zur Herstellung mikroelektronischer Bauteile, insbesondere Halbleiterbauteile, mit einem

Projektionsbelichtungssystem nach Anspruch 20.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

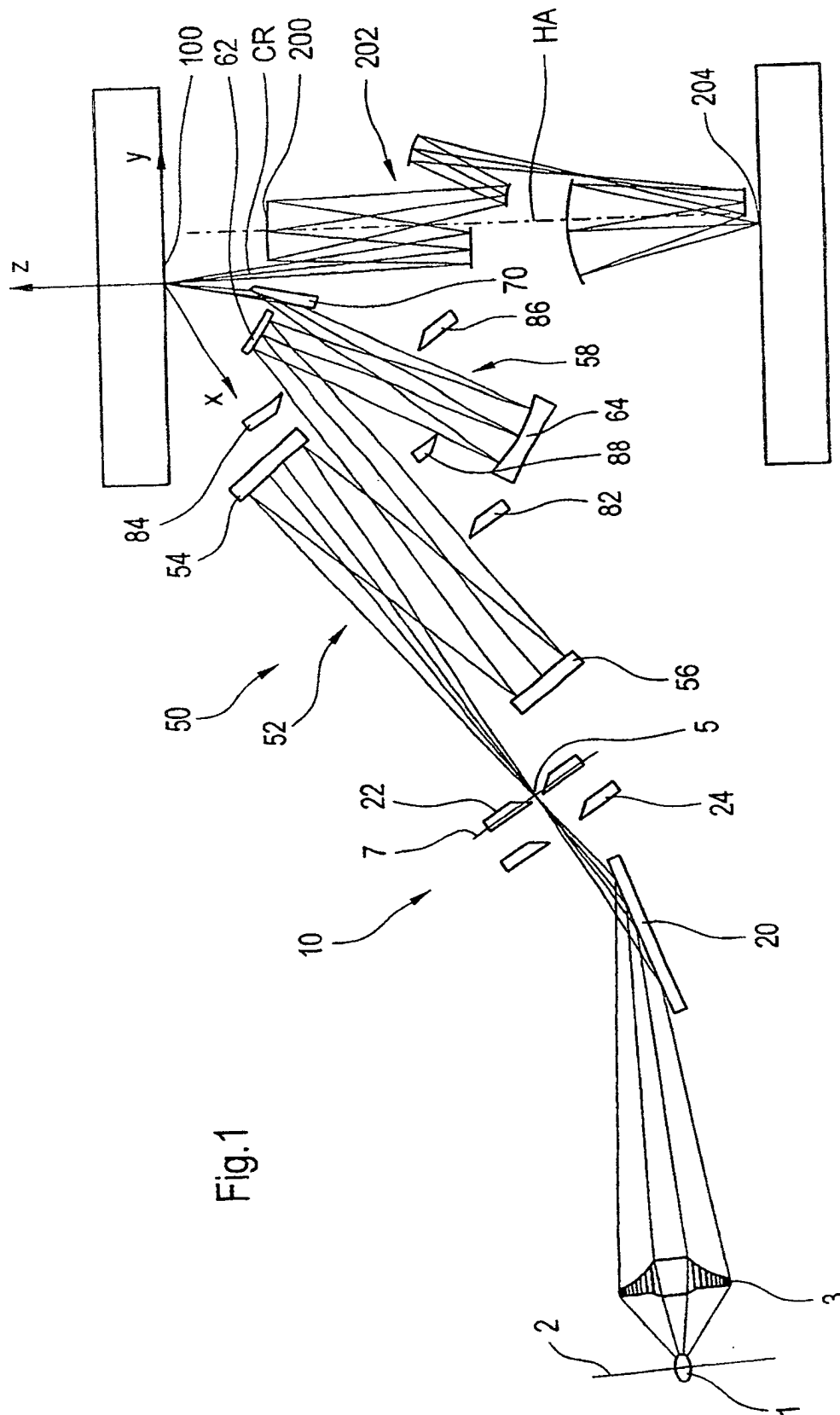
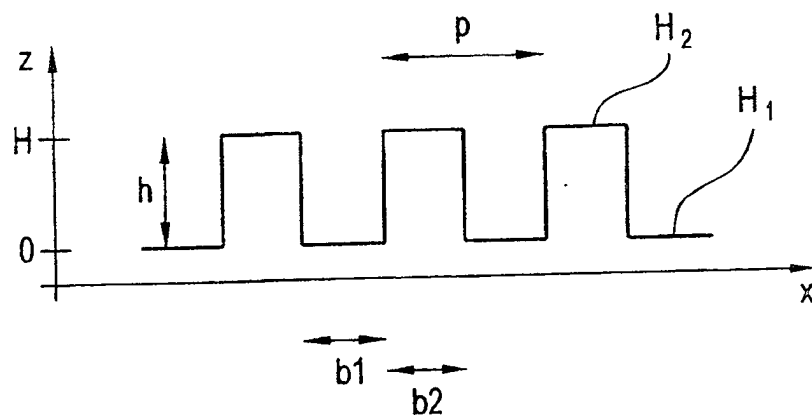


Fig.2



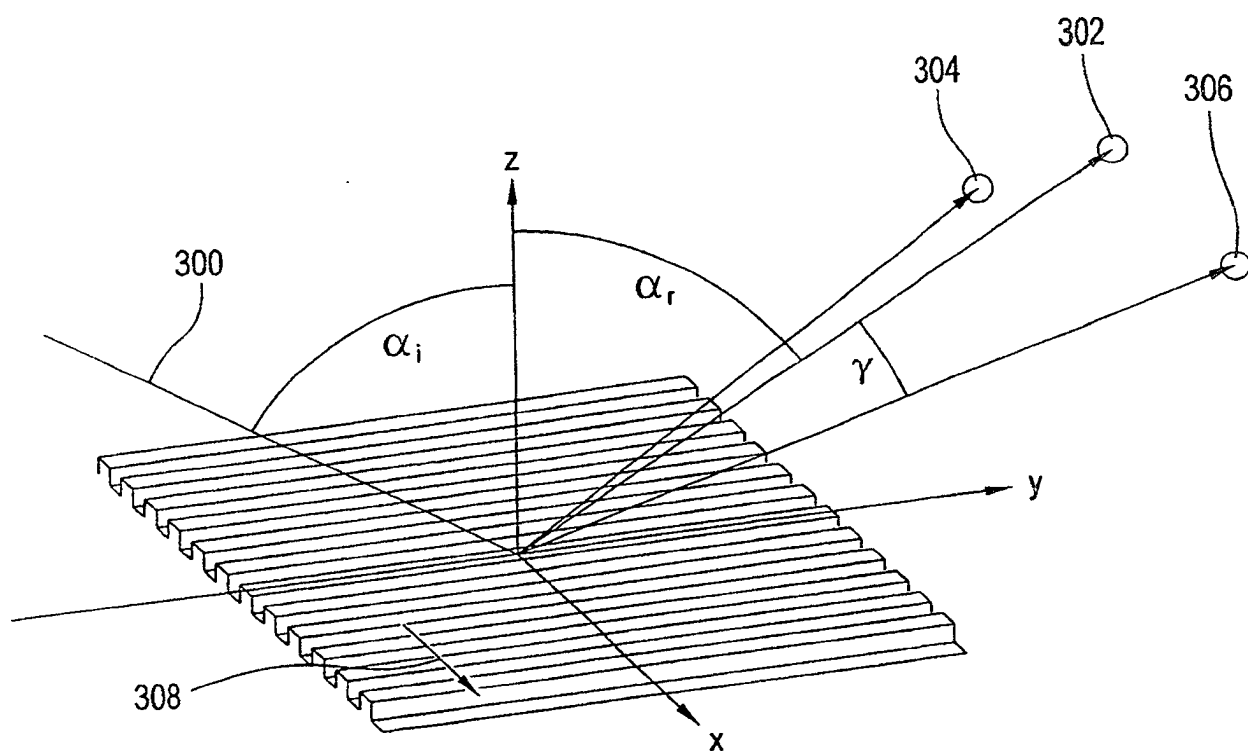


Fig.3

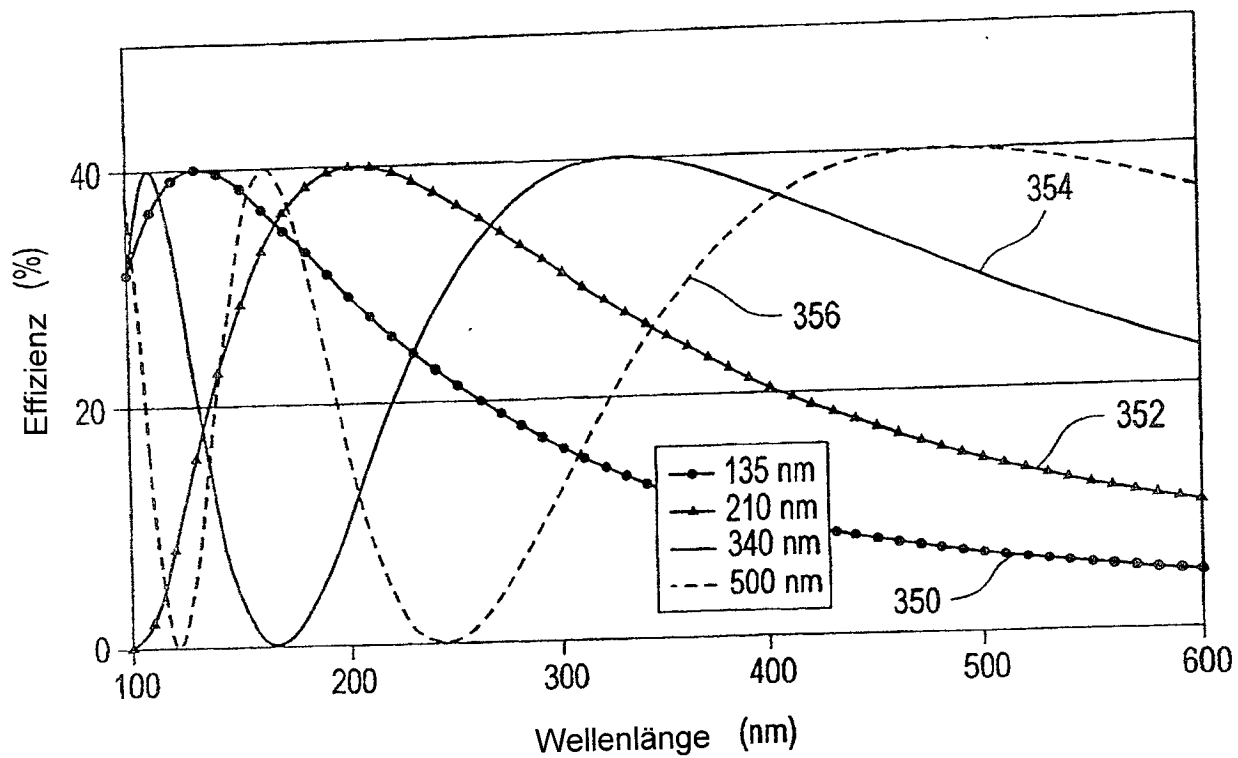


Fig. 4

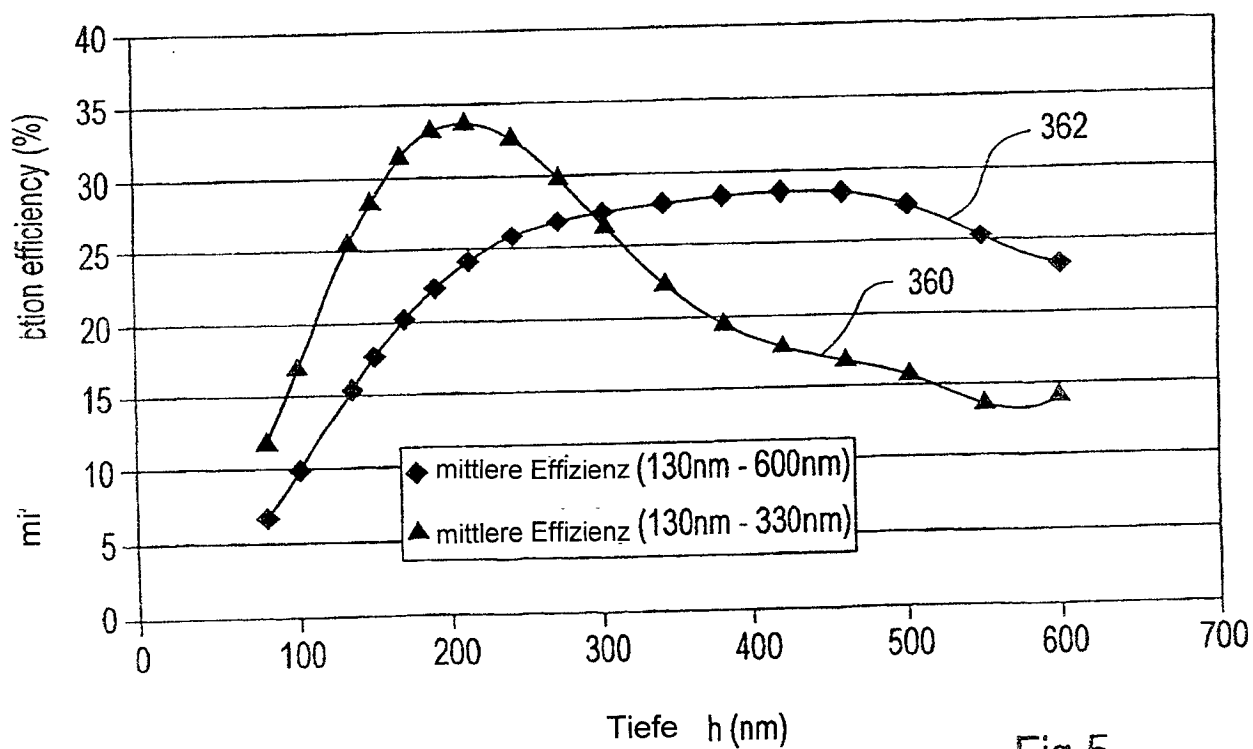


Fig. 5

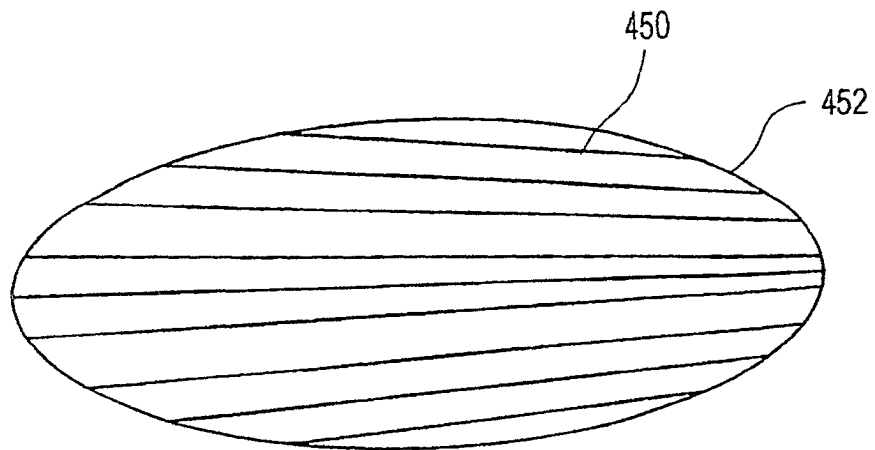


Fig. 6a

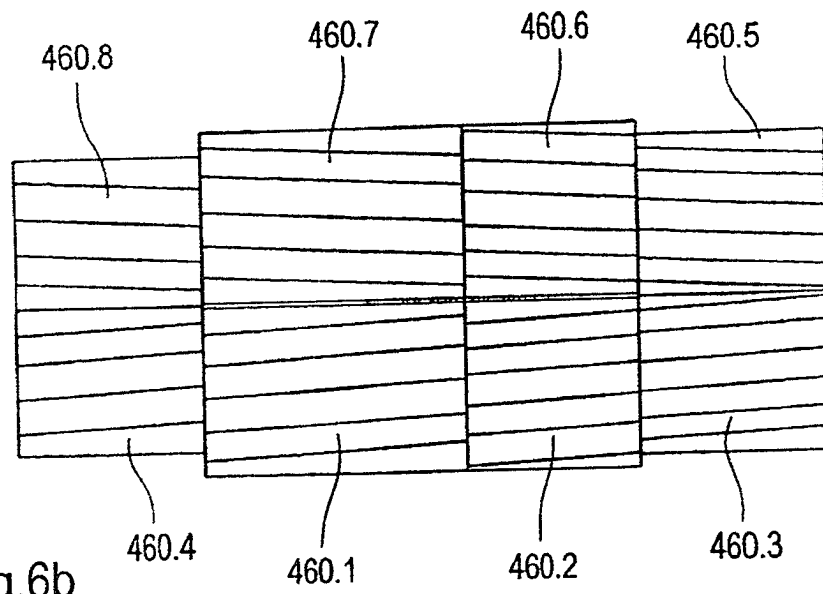


Fig. 6b

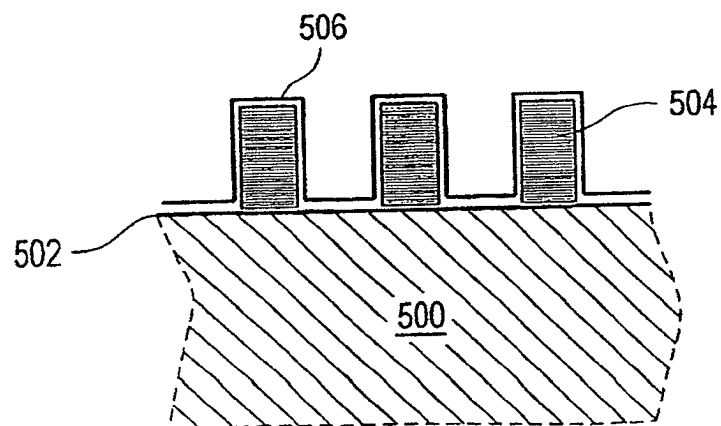


Fig. 7

