



(10) **DE 10 2014 225 197 A1** 2015.11.26

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 225 197.4**
(22) Anmeldetag: **09.12.2014**
(43) Offenlegungstag: **26.11.2015**

(51) Int Cl.: **G02B 5/08 (2006.01)**
G03F 7/20 (2006.01)
G02B 1/10 (2006.01)
G02B 26/08 (2006.01)

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

(72) Erfinder:
Gerhard, Michael, 73432 Aalen, DE; Dier, Oliver, 73466 Lauchheim, DE; Gaber, Erwin, 89522 Heidenheim, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

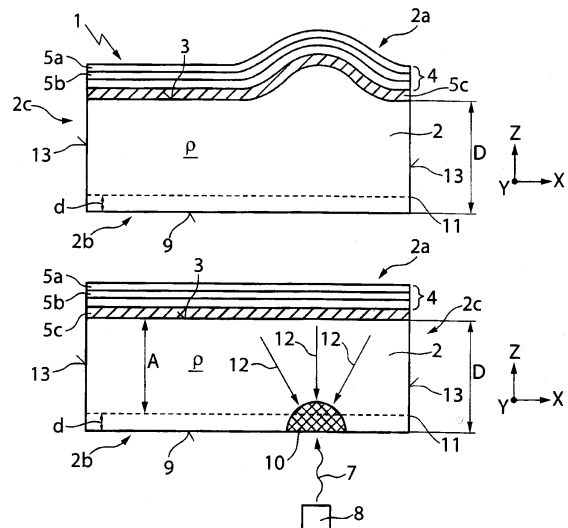
DE 102 39 858 A1
DE 10 2012 212 194 A1
US 2011 / 0 255 065 A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Verändern einer Oberflächenform, reflektives optisches Element, Projektionsobjektiv und EUV-Lithographieanlage**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verändern einer Oberflächenform (6) einer Oberfläche (3) eines Substrats (2) eines reflektiven optischen Elements (1) für den EUV-Wellenlängenbereich, wobei die Oberfläche (3) an einer ersten Seite (2a) des Substrats (2) gebildet ist und wobei auf die Oberfläche (3) eine reflektierende Beschichtung (4) aufgebracht ist, umfassend: Bestrahlen einer nicht an der ersten Seite (2a) des Substrats (2) gebildeten weiteren Oberfläche (9, 13) des Substrats (2) mit Elektronen (7) und/oder mit Strahlung, insbesondere mit Strahlung (15) bei Wellenlängen von mehr als 150 nm, zum Verändern der Oberflächenform der Oberfläche (3) an der ersten Seite (2a) des Substrats (2) durch Kompaktieren des Substrats (2). Die Erfindung betrifft auch ein reflektives optisches Element (1) sowie ein Projektionsobjektiv und eine EUV-Lithographieanlage.



Beschreibung**Aufgabe der Erfindung****Hintergrund der Erfindung**

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verändern einer Oberflächenform einer Oberfläche eines Substrats eines reflektiven optischen Elements für den EUV-Wellenlängenbereich, wobei die Oberfläche an einer ersten Seite des Substrats gebildet ist und auf die Oberfläche eine reflektierende Beschichtung aufgebracht ist, ein reflektives optisches Element für den EUV-Wellenlängenbereich, welches ein Substrat mit einer Oberfläche, die an einer ersten Seite des Substrats gebildet ist, sowie eine auf die Oberfläche aufgebrachte reflektierende Beschichtung aufweist, ein Projektionsobjektiv mit einem solchen reflektiven optischen Element und eine EUV-Lithographieanlage mit einem solchen Projektionsobjektiv.

[0002] Lithographieanlagen, die für den EUV-Wellenlängenbereich zwischen ca. 5 nm und ca. 20 nm ausgelegt sind, benötigen an den reflektiven optischen Elementen, die in einem Projektionsobjektiv zur Abbildung einer Maske in eine Bildebene angeordnet sind, eine hohe Genauigkeit ihrer Oberflächenform. Gleiches gilt für die mit Hilfe eines solchen Projektionsobjektivs abzubildende Maske, die ebenfalls eine hohe Genauigkeit ihrer Oberflächenform aufweisen sollte. Die Oberflächenform eines reflektiven optischen Elements wird typischer Weise durch die Oberflächenform des Substrats vorgegeben, auf das die reflektierende Beschichtung aufgebracht ist, da die reflektierende Beschichtung so dünn ist, dass sie der Oberflächenform des Substrats folgt.

[0003] Methoden zum Verändern bzw. zur Korrektur der Oberflächenform (Asphärisierung) von reflektiven optischen Elementen sind grundsätzlich bekannt, vgl. beispielsweise die in der WO 2013/050199 A1 der Anmelderin zitierten Druckschriften. Eine in der WO 2013/050199 A1 beschriebene Methode zur Korrektur der Oberflächenform basiert darauf, das Substratmaterial eines optischen Elements durch Bestrahlung lokal zu verdichten. Hierdurch wird eine Veränderung der Oberflächenform des optischen Elements in der Nähe der bestrahlten Bereiche erzeugt. Bei dem in der WO 2013/050199 A1 beschriebenen Verfahren erfolgt die Bestrahlung derart, dass das Substrat wenigstens entlang einer gedachten Fläche mit einem festen Abstand zwischen 1 µm und 100 µm von einer Oberfläche, auf welche die reflektierende Beschichtung aufgebracht ist, eine Variation der Dichte von mehr als 1 Vol-% aufweist. Um eine solche Verdichtung unmittelbar unter der Oberfläche zu erreichen, erfolgt die Bestrahlung des Substrats durch die reflektierende Beschichtung hindurch.

[0004] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Verändern einer Oberflächenform einer Oberfläche eines Substrats eines reflektiven optischen Elements, ein reflektives optisches Element, ein Projektionsobjektiv sowie eine EUV-Lithographieanlage bereitzustellen, bei denen unerwünschte Effekte vermieden werden, die bei dem oben beschriebenen Korrekturverfahren auftreten können.

Gegenstand der Erfindung

[0005] Diese Aufgabe wird gemäß einem ersten Aspekt gelöst durch ein Verfahren der eingangs genannten Art, umfassend: Insbesondere lokales Bestrahlen einer nicht an der ersten Seite des Substrats gebildeten weiteren Oberfläche des Substrats mit Elektronen und/oder mit (elektromagnetischer) Strahlung, insbesondere mit Strahlung bei Wellenlängen von mehr als 150 nm, zum Verändern der Oberflächenform der Oberfläche an der ersten Seite des Substrats durch insbesondere lokales Kompaktieren des Substrats.

[0006] Die Erfinder haben herausgefunden, dass bei der Bestrahlung des reflektiven optischen Elements durch die reflektierende Beschichtung hindurch zum Zwecke der Korrektur der Oberflächenform unerwünschte Nebenwirkungen auftreten können, beispielsweise eine lokale Kontamination der reflektierenden Beschichtung, die einen Verlust an Reflektivität des reflektiven optischen Elements zur Folge haben kann. Erfindungsgemäß wird daher vorgeschlagen, die Oberflächenform der Oberfläche an der ersten Seite des Substrats dadurch zu verändern, dass das Substrat an einer weiteren Oberfläche bestrahlt wird, die nicht mit der reflektierenden Beschichtung bedeckt und nicht der EUV-Strahlung ausgesetzt ist, d.h. an einer weiteren Oberfläche des Substrats, die nicht an der ersten Seite des Substrats gebildet ist. Durch die Veränderung der Oberflächenform des Substrats verändert sich auch die Oberflächenform der reflektierenden Beschichtung, da diese eine vergleichsweise geringe Dicke aufweist und daher der Oberflächenform des Substrats folgt.

[0007] Bei der Bestrahlung des Substrats mit Elektronen ist die Eindringtiefe der Elektronen typischer Weise sehr gering, d.h. die Elektronen dringen typischer Weise weniger als ein Millimeter in das Substrat ein. Der kompaktierte Volumenbereich befindet sich daher unmittelbar benachbart zu der mit Elektronen bestrahlten weiteren Oberfläche und kann z.B. eine kegelförmige Eindellung an der weiteren Oberfläche erzeugen, während die Dichte des Substrats in der Nähe der Oberfläche, deren Oberflächenform geändert werden soll, im Wesentlichen unverändert bleibt. Dennoch kann auch in diesem Fall eine Veränderung der Oberflächenform stattfinden, da durch die

Kompaktierung des Substrats auch in einem weit von der ersten Seite des Substrats entfernten Volumenbereich eine mechanische Spannung, typischer Weise Zugspannungen, in dem Substrat erzeugt werden, die dazu führen, dass sich die Oberflächenform der Oberfläche an der ersten Seite des Substrats verändert.

[0008] Bei der Bestrahlung des Substrats mit Strahlung, insbesondere mit Strahlung bei Wellenlängen von mehr als 150 nm, von mehr als 250 nm oder ggf. von mehr als 300 nm kann hingegen abhängig vom Material des Substrats ggf. eine Eindringtiefe erreicht werden, die so groß ist, dass die in das Substrat eingebrachte Strahlung einen zu der Oberfläche an der ersten Seite des Substrats benachbarten Volumenbereich erreicht, so dass die Veränderung der Oberflächenform direkt durch die Kompaktierung eines Volumenbereichs in unmittelbarer Nähe der Oberfläche erfolgt. Bei der Bestrahlung mit Strahlung bei Wellenlängen von mehr als 150 nm kann insbesondere der Umstand ausgenutzt werden, dass die reflektierende Beschichtung für derartige Strahlung in der Regel reflektierend wirkt, so dass die reflektierende Beschichtung nicht von der Strahlung durchdrungen werden kann, wenn diese aus dem Inneren des Substratvolumens auf die Rückseite der reflektierenden Beschichtung auftrifft.

[0009] In jedem Fall ist es erforderlich, dass die Energie sowie die Dosis der Elektronen bzw. die Leistung der (gepulsten) Strahlung im UV-Wellenlängenbereich (zwischen ca. 150 nm und ca. 250 nm) oder darüber, beispielsweise bei Wellenlängen von mehr als 250 nm oder von mehr als 300 nm, die bei einer Strahlungsquelle in Form eines gepulsten Lasers durch die Pulsenergie und die Pulsrate bestimmt wird, so gewählt werden, dass eine (irreversible) Kompaktierung des Substrats erfolgt. Die in der WO 2013/050199 A1 für die Bestrahlung angegebenen Werte können typischer Weise auch für die hier beschriebene Bestrahlung des Substrats verwendet werden, d.h. die Bestrahlung kann z.B. mit Elektronen mit einer Energie zwischen 5 und 80 eV bei Dosen zwischen 0,1 J/mm² und 2500 J/mm² und/oder Bestrahlung mit Hilfe eines gepulsten Lasers mit Repetitionsraten zwischen 1 Hz und 100 MHz und Pulsenergien zwischen 0,01 µJ und 10 mJ erfolgen. Die Wellenlänge der Laserstrahlung kann abweichend von dem in der WO 2013/050199 A1 beschriebenen Wertebereich auch im UV-Wellenlängenbereich, d.h. bei Wellenlängen zwischen ca. 150 nm und ca. 250 nm, z.B. bei 248 nm, liegen.

[0010] Die für die Bestrahlung zu wählende Wellenlänge hängt unter anderem davon ab, welche Art von Deformationen an der Oberfläche korrigiert werden sollen. Eine geringe Eindringtiefe in das Substrat kann vorteilhaft sein, um eine hohe Kompaktierung zu erreichen, welche allerdings typischer Wei-

se eine Korrektur der Oberflächenform nur mit einer vergleichsweise geringen Auflösung ermöglicht. Eine große Eindringtiefe ist typischer Weise vorteilhaft, um eine größere Auflösung zu erreichen, bewirkt aber typischer Weise aufgrund der geringeren Absorption im Material des Substrats eine geringe Kompaktierung im Bereich der Oberfläche, sofern keine weiteren Maßnahmen, z.B. eine Fokussierung der Strahlung (siehe unten), vorgenommen werden.

[0011] Wie weiter oben beschrieben wurde, hängt die Eindringtiefe der Strahlung vom Material des Substrats ab. Handelt es sich bei dem Substrat um Quarzglas (SiO₂), ist das Substrat typischer Weise für UV-Strahlung bei Wellenlängen zwischen 150 nm und 250 nm (und darüber) im Wesentlichen transparent. Mit Titandioxid dotiertes Quarzglas, welches z.B. unter dem Handelsnamen ULE[®] von Corning Inc. angeboten wird, weist typischer Weise erst bei Wellenlängen von mehr als ca. 250 nm bzw. von mehr als ca. 300 nm eine signifikante Transmission auf. Auch bei einem Substrat, welches aus einer Glaskeramik gebildet ist, beispielsweise bei Zerodur[®], welches von der Schott AG angeboten wird, tritt eine signifikante Transmission erst oberhalb von ca. 300 nm oder 400 nm auf. Es versteht sich, dass für alle angegebenen Materialien die Absorption für die für die Bestrahlung verwendete Wellenlänge groß genug sein muss, um eine Kompaktierung zu bewirken.

[0012] Bei einer Variante wird das Substrat an einer weiteren Oberfläche mit Elektronen und/oder mit Strahlung bestrahlt, die an einer der ersten Seite gegenüber liegenden zweiten Seite des Substrats gebildet ist. In diesem Fall wird das reflektierende optische Element von der der reflektierenden Beschichtung gegenüber liegenden Rückseite des Substrats her bestrahlt. Da das Substrat typischer Weise eine Dicke aufweist, die vergleichsweise groß ist und beispielsweise bei ca. 40 mm liegen kann, führt eine lokale Kompaktierung des Substrats z.B. um mehr als 0,1 Vol-%, die in einem lateral eng begrenzten Oberflächenbereich an der Rückseite des Substrats z.B. durch Elektronenstrahlung erfolgt, an der Vorderseite des Substrats, an der die reflektierende Beschichtung aufgebracht ist, zu einer vergleichsweise großflächigen Deformation bzw. Veränderung der Oberflächenform.

[0013] Bei einer weiteren Variante wird das Substrat an einer weiteren Oberfläche mit Elektronen und/oder mit Strahlung bestrahlt, die an einer Seitenfläche des Substrats gebildet ist. Um eine Veränderung der Oberflächenform an der ersten Seite des Substrats, insbesondere in der Nähe des Randes des Substrats, vorzunehmen, kann eine Bestrahlung der Seitenfläche des Substrats erfolgen.

[0014] Bei der Bestrahlung mit Elektronen ist bei beiden Varianten, d.h. sowohl bei der Bestrahlung der

Rückseite des Substrats als auch bei der Bestrahlung der (umlaufenden) Seitenfläche des Substrats typischer Weise der kompaktierte Volumenbereich in dem Substrat auf die Nähe der bestrahlten Oberfläche begrenzt, d.h. es existiert typischer Weise zwischen der ersten Seite des Substrats und dem kompaktierten Volumenbereich ein weiterer, nicht kompaktierter Volumenbereich, in dem eine Zugspannung wirkt, welche die Veränderung der Oberflächenform der Oberfläche an der ersten Seite des Substrats bewirkt.

[0015] Die mit Hilfe der Bestrahlung mit Elektronen erreichbare Auflösung bei der Veränderung der Oberflächenform der Oberfläche an der ersten Seite des Substrats ist aufgrund der indirekten Einwirkung auf die Oberfläche begrenzt und liegt typischer Weise zwischen der feinen Ortsauflösung bei der Korrektur der Oberflächenform durch Ionenbestrahlung („ion beam figuring“, IBF) und der vergleichsweise groben Korrektur der Oberflächenform mit Hilfe von Manipulatoren, z.B. in Form von Haltern oder dergleichen, der eine seitlich aufgebrauchte mechanische Spannung auf das Substrat ausüben.

[0016] Bei einer weiteren Variante wird das Substrat an der weiteren Oberfläche mit fokussierter Strahlung, insbesondere mit auf bzw. unmittelbar benachbart zu der Oberfläche an der ersten Seite des Substrats fokussierter Strahlung bestrahlt. Die Bestrahlung mit fokussierter Strahlung ermöglicht es, die Kompaktierung des Substrats gezielt in einem gewünschten Volumenbereich des Substrats vorzunehmen, bei dem es sich insbesondere um einen zu der Oberfläche benachbarten Volumenbereich handeln kann. Hierbei kann ausgenutzt werden, dass die Energiedichte der Strahlung, die in das Substrat eingebracht wird, im Bereich des Strahlfokus maximal ist und die Kompaktierung des Substrats quadratisch mit der eingebrachten Leistung bzw. Energie ansteigt, so dass die Kompaktierung im Bereich des Strahlfokus deutlich größer ist als in Bereichen im Volumen des Substrats, die zwar von der Strahlung durchdrungen werden, an denen aber die Leistungsdichte kleiner ist. Ist die Strahlung auf bzw. unmittelbar benachbart zu der Oberfläche an der ersten Seite des Substrats fokussiert, lässt sich eine besonders hohe Ortsauflösung bei der Veränderung der Oberflächenform des Substrats erzielen.

[0017] Bei einer weiteren Variante erfolgt das Bestrahlen des reflektierenden optischen Elements mit Elektronen und/oder mit Strahlung während des Betriebs des reflektiven optischen Elements in einer optischen Anordnung, beispielsweise in einer EUV-Lithographieanlage. Die Veränderung der Oberflächenform des Substrats erfolgt hierbei, während die reflektierende Beschichtung der in der optischen Anordnung verwendeten Nutzstrahlung, beispielsweise EUV-Strahlung, ausgesetzt ist. Es versteht sich, dass

alternativ die Kompaktierung des Substrats auch an einem reflektiven optischen Element erfolgen kann, welches nicht in eine optische Anordnung integriert ist bzw. dass das reflektive optische Element für die Veränderung der Oberflächenform aus einer solchen optischen Anordnung ausgebaut und nach dem Bestrahlen erneut in diese eingebaut werden kann.

[0018] Bei einer weiteren Ausführungsform erfolgt das Bestrahlen mit Elektronen und/oder mit Strahlung, bis das Substrat entlang einer (gedachten) Fläche, die in einem konstanten Abstand zwischen 0 μm und 1000 μm von der weiteren Oberfläche angeordnet ist, eine Variation der Dichte von mehr als 0,1 Vol-%, ggf. von mehr als 0,5 Vol-%, insbesondere von mehr als 1,0 Vol-% aufweist. Eine solche Variation der Dichte bewirkt in der Regel eine für Korrekturzwecke ausreichende Veränderung der Oberflächenform an der Oberfläche, auf welche die reflektierende Beschichtung aufgebracht ist.

[0019] Bei einer weiteren Variante umfasst das Verfahren: Vermessen von Wellenfrontaberrationen des reflektiven optischen Elements und/oder Vermessen von Wellenfrontaberrationen eines Projektionsobjektivs, welches das reflektive optische Element enthält, vor dem Bestrahlen mit Elektronen und/oder mit Strahlung, sowie Verändern der Oberflächenform der Oberfläche zum Korrigieren der Wellenfrontaberrationen. Bei dieser Variante wird zunächst das reflektive optische Element oder das Projektionsobjektiv z.B. mit Hilfe eines Interferometers vermessen, um die Wellenfrontaberrationen zu bestimmen. Nachfolgend wird diejenige (lokale) Veränderung der Oberflächenform des Substrats bestimmt, welche es ermöglicht, die gemessenen Wellenfrontaberrationen zu korrigieren. In einem weiteren Schritt wird die Oberflächenform der Oberfläche des Substrats durch die Bestrahlung im Idealfall derart verändert, dass die Wellenfrontaberrationen des reflektiven optischen Elements oder des Projektionsobjektivs vollständig korrigiert werden.

[0020] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein reflektives optisches Element der eingangs genannten Art, welches entlang einer (gedachten) Fläche im Volumen des Substrats, die in einem konstanten Abstand von mehr als 500 μm , insbesondere von mehr als 1000 μm zu der ersten Seite des Substrats verläuft, eine Variation der Dichte von mehr als 0,1 Vol-%, ggf. von mehr als 0,5 Vol-%, insbesondere von mehr als 1 Vol-% aufweist. Die Variation der Dichte wird durch die Bestrahlung mit Elektronen und/oder mit Strahlung erzeugt, welche nicht durch die reflektierende Beschichtung in das Volumen des Substrats eingedrungen ist. Im Gegensatz zu dem in der WO 2013/050199 A1 beschriebenen reflektiven optischen Element wird bei dem vorliegenden reflektiven optischen Element eine lokale Kompaktierung des Substrats (auch) in einem größeren Abstand zu der

Oberfläche des Substrats erreicht. Es versteht sich, dass insbesondere bei der Bestrahlung mit nicht signifikant von dem Material des Substrats absorbierte Strahlung eine Variation der Dichte des Substrats von mehr als 0,1 Vol-% auch entlang einer (gedachten) Fläche im Volumen des Substrats vorliegen kann, die näher an der ersten Seite des Substrats verläuft, beispielsweise in einem konstanten Abstand zwischen 0 μm und 100 μm oder zwischen 100 μm und 500 μm von der ersten Seite des Substrats.

[0021] Unter der Variation der Dichte entlang der gedachten Fläche wird im Sinne dieser Anmeldung die Differenz zwischen der maximalen Dichte und der minimalen Dichte entlang der gedachten Fläche bezogen auf die minimale Dichte entlang der gedachten Fläche verstanden. Wird beispielsweise die Dichte in einem bestrahlten Volumenbereich homogen um mehr als 0,1 Vol-% erhöht als in einem benachbarten unbestrahlten Bereich und liegen beide Bereiche zumindest teilweise auf der gedachten Fläche, so trägt die Variation der Dichte entlang der gedachten Fläche mehr als 0,1 Vol-%. Im Gegensatz dazu weist die Dichte des unbestrahlten Substrats eine hohe Homogenität mit einer Abweichung von der mittleren Dichte des Substrats von typischer Weise deutlich weniger als 0,1 Vol-% im gesamten Volumen des Substrats auf.

[0022] Wie in der WO 2013/050199 A1 beschrieben ist, ist es günstig, wenn zwischen der reflektierenden Beschichtung und dem Substrat eine Schutzschicht oder ein Schutzschichtteilsystem angeordnet werden, um das Substrat vor einer langfristigen Alterung bzw. Verdichtung zu schützen. Für Details hinsichtlich einer solchen Schutzschicht bzw. eines solchen Schutzschichtteilsystems sei auf die WO 2013/050199 A1 verwiesen, welche bezüglich dieses Aspekts durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird.

[0023] Um das Substrat vor Alterung bzw. einer Verdichtung durch Langzeitbestrahlung zu schützen, kann das Substrat alternativ oder zusätzlich auch in einem an die reflektierende Beschichtung angrenzenden Oberflächenbereich (homogen) verdichtet werden, bevor die reflektierende Beschichtung aufgebracht wird. Die Verdichtung bzw. Kompaktierung kann beispielsweise derart erfolgen, dass das Substrat bis zu einem Abstand von 5 μm von der Oberfläche mit der reflektierenden Beschichtung eine mittlere Dichte aufweist, welche um mehr als 0,1 Vol-%, ggf. um mehr als 0,5 Vol-%, insbesondere um mehr als 1,0 Vol-% höher ist als die mittlere Dichte des Substrats in einem Abstand von 1 mm von der Oberfläche.

[0024] Bei einer weiteren Ausführungsform weist das Substrat entlang der Fläche oder entlang einer weiteren Fläche, die in einem konstanten Abstand

zwischen 0 μm und 1000 μm von einer weiteren Oberfläche verläuft, die nicht an der ersten Seite des Substrats gebildet ist, eine Variation der Dichte von mehr als 0,1 Vol-%, ggf. von mehr als 0,5 Vol-%, insbesondere von mehr als 1,0 Vol-% auf. Wie weiter oben beschrieben wurde, kann die Kompaktierung des Substrats insbesondere bei der Bestrahlung mit Elektronen auf einen Volumenbereich begrenzt sein, der an die bestrahlte weitere Oberfläche angrenzt. Sind die erste Seite des Substrats und die weitere, bestrahlte Oberfläche parallel zueinander ausgerichtet, können die weiter oben beschriebene Fläche, die in einem Abstand von mehr als 500 μm , insbesondere von mehr als 1000 μm , zu der ersten Seite des Substrats verläuft, und die Fläche, die in einem konstanten Abstand zwischen 0 μm und 1000 μm von einer weiteren Oberfläche verläuft, zusammenfallen, d.h. es kann sich um ein- und dieselbe (gedachte) Fläche handeln.

[0025] Bei einer Ausführungsform ist die weitere Oberfläche an einer der ersten Seite gegenüber liegenden zweiten Seite des Substrats gebildet. In diesem Fall kann durch die Bestrahlung typischer Weise die lokale Oberflächenform entlang der gesamten Oberfläche verändert werden, auf welche die Beschichtung aufgebracht ist. Bei der Verwendung von Elektronen zur Bestrahlung ist die bei der Veränderung der Oberflächenform erzielbare Ortsauflösung in diesem Fall abhängig von der Dicke des Substrats und nimmt mit zunehmender Dicke des Substrats ab.

[0026] Bei einer weiteren Ausführungsform ist die weitere Oberfläche an einer insbesondere umlaufenden Seitenfläche des Substrats gebildet. In diesem Fall kann eine lokale Veränderung der Oberflächenform in einem umlaufenden Randbereich der Oberfläche abhängig vom Abstand zur Oberfläche, in dem die Bestrahlung vorgenommen wird, mit vergleichsweise hoher Ortsauflösung erfolgen. Die Veränderung der Oberflächenform in der Mitte der Oberfläche des Substrats ist in diesem Fall jedoch nur mit vergleichsweise geringer Ortsauflösung möglich. Es kann daher günstig sein, sowohl in der Nähe der zweiten Seite des Substrats als auch in der Nähe der umlaufenden Seitenfläche durch eine Bestrahlung eine Kompaktierung des Substrats zu erzeugen.

[0027] Bei einer weiteren Ausführungsform ist das Substrat aus einem Material mit mindestens 40 Vol-% SiO_2 -Anteil gebildet. Bei dem Material des Substrats kann es sich um Quarzglas, insbesondere um mit Titan dotiertes Quarzglas, handeln, welches unter dem Handelsnamen ULE[®] von Corning Inc. angeboten wird. Bei dem Material mit mindestens 40 Vol-% SiO_2 -Anteil kann es sich auch um eine Glaskeramik handeln, beispielsweise um Zerodur[®], welches von der Schott AG angeboten wird.

[0028] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie, umfassend: mindestens ein reflektives optisches Element, welches wie weiter oben beschrieben ausgebildet ist. Das reflektive optische Element kann als Korrektur-element zur Korrektur von Wellenfrontaberrationen des Projektionsobjektivs dienen. In diesem Fall wird üblicher Weise das Projektionsobjektiv mit dem darin angeordneten reflektiven optischen Element hinsichtlich der Wellenfrontaberrationen vermessen und das reflektive optische Element wird nachfolgend ausgebaut, um zur Korrektur der Wellenfrontaberrationen die weiter oben beschriebene Bestrahlung durchzuführen. Es versteht sich, dass die Korrektur der Wellenfrontaberrationen nicht zwingend an einem einzigen reflektiven optischen Element erfolgen muss, sondern dass eine Korrektur ggf. auch an zwei oder mehr reflektiven optischen Elementen vorgenommen werden kann.

[0029] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie, umfassend: mindestens ein reflektierendes optisches Element für den EUV-Wellenlängenbereich, welches ein Substrat und eine reflektierende Beschichtung aufweist, die auf eine Oberfläche einer ersten Seite des Substrats aufgebracht ist, sowie eine Bestrahlungseinrichtung, die ausgebildet ist, eine nicht an der ersten Seite des Substrats gebildete weitere Oberfläche des Substrats mit Elektronen und/oder mit Strahlung, insbesondere mit Strahlung bei Wellenlängen von mehr als 150 nm, zu bestrahlen und bei der Bestrahlung das Substrat bevorzugt lokal irreversibel zu kompaktieren.

[0030] Mit Hilfe der Bestrahlungseinrichtung kann eine Veränderung, insbesondere eine Korrektur, der Oberflächenform der Oberfläche des reflektiven optischen Elements im Einbauzustand im Projektionsobjektiv vorgenommen werden, d.h. es ist nicht erforderlich, das reflektive optische Element für die Bestrahlung aus dem Projektionsobjektiv zu entfernen. Da die Bestrahlungseinrichtung nicht auf die Oberfläche einwirkt, an der die reflektierende Beschichtung aufgebracht ist, kann die Bestrahlung und damit die Korrektur der Oberflächenform auch während des Belichtungsbetriebes erfolgen, bei dem das Projektionsobjektiv eine an einer Maske gebildete Struktur auf eine Bildebene abbildet. Typischer Weise erfolgt die Korrektur jedoch nach einer Vermessung, die unmittelbar nach der Fertigstellung bzw. nach dem Zusammenbauen des Projektionsobjektivs durchgeführt wird.

[0031] Bei einer Ausführungsform ist die Bestrahlungseinrichtung zur Bestrahlung einer der ersten Seite gegenüber liegenden zweiten Seite des Substrats ausgebildet. In diesem Fall ist die Bestrahlungseinrichtung typischer Weise an der zweiten Seite, d.h. an der Rückseite des Substrats, angeord-

net. Die Bestrahlungseinrichtung ist typischer Weise von der zweiten Seite des Substrats beabstandet und kann sich insbesondere über die gesamte Oberfläche der zweiten Seite erstrecken, um durch die Bestrahlung eine Veränderung der Oberflächenform an jedem beliebigen Ort an der ersten Seite des Substrats zu ermöglichen.

[0032] Bei einer weiteren Ausführungsform ist die Bestrahlungseinrichtung zur Bestrahlung einer insbesondere umlaufenden Seitenfläche des Substrats ausgebildet. Die Bestrahlungseinrichtung kann in diesem Fall an einer Seite der umlaufenden Seitenfläche positioniert sein, es ist aber auch möglich, dass die Bestrahlungseinrichtung die umlaufende Seitenfläche insbesondere ringförmig umgibt, um das Substrat aus mehreren unterschiedlichen Richtungen seitlich bestrahlen zu können.

[0033] Bei einer weiteren Ausführungsform weist die Bestrahlungseinrichtung mindestens eine Elektronenquelle, bevorzugt eine Mehrzahl von Elektronenquellen in einer rasterförmigen Anordnung, auf. Eine einzelne Elektronenquelle kann grundsätzlich ausreichen, um einen Elektronenstrahl zu erzeugen, der auf unterschiedliche Stellen an der weiteren Oberfläche des Substrats ausgerichtet werden kann. In diesem Fall kann der Elektronenstrahl mittels einer geeigneten Ablenkeinrichtung, die beispielsweise zur Erzeugung eines elektrischen und/oder eines magnetischen Feldes ausgebildet ist, abgelenkt werden, um eine gewünschte Stelle an der weiteren Oberfläche des Substrats zu bestrahlen.

[0034] Eine Bestrahlungseinrichtung mit einer einzelnen Elektronenquelle und einer Ablenkeinrichtung benötigt typischer Weise einen vergleichsweise großen Bauraum. Daher ist es günstig, wenn die Bestrahlungseinrichtung mehrere Elektronenquellen aufweist, die jeweils zur Erzeugung eines Elektronenstrahls ausgebildet sind. Derartige Elektronenquellen können insbesondere in einer rasterförmigen Anordnung (Array) angeordnet sein, um unterschiedliche, in einem Raster angeordnete Orte an der weiteren Oberfläche des Substrats zu bestrahlen. In diesem Fall kann in der Regel auf eine Ablenkeinrichtung verzichtet werden, wodurch der von der Bestrahlungseinrichtung eingenommene Bauraum deutlich reduziert werden kann. Insbesondere kann ein solches Array in unmittelbarer Nähe zum Substrat angeordnet werden.

[0035] Bei einer weiteren Ausführungsform weist die Bestrahlungseinrichtung mindestens eine bevorzugt gepulste Strahlungsquelle, insbesondere eine Laserquelle, auf. Die Strahlung der Strahlungsquelle, beispielsweise eines Lasers, kann ebenfalls mittels einer geeigneten Umlenkeinrichtung, z.B. in Form eines oder mehrerer verkippter Spiegel, auf unterschiedliche Orte an der weiteren Oberfläche des Sub-

strats ausgerichtet werden. Es ist ebenfalls möglich, dass die Bestrahlungseinrichtung eine Mehrzahl von Strahlungsquellen insbesondere in einer rasterförmigen Anordnung (Array) aufweist, um unterschiedliche Orte an der weiteren Oberfläche des Substrats zu bestrahlen. Um den Bauraum gering zu halten, können Strahlungsquellen insbesondere in miniaturisierter Form (als LEDs bzw. als Laserdioden) verwendet werden. Um den Bauraum in dem Projektionsobjektiv möglichst gering zu halten, ist es ggf. auch möglich, dass die Bestrahlungseinrichtung eine Zuführungseinrichtung zur Zuführung der Strahlung in das Projektionsobjektiv aufweist, beispielsweise in Form eines Lichtleitkabels. Die Strahlungsquelle selbst kann in diesem Fall außerhalb des Projektionsobjektivs z.B. integriert in einer EUV-Lithographieanlage angeordnet sein.

[0036] Bei einer Weiterbildung umfasst die Bestrahlungseinrichtung eine Fokussiereinrichtung, beispielsweise in Form von einer oder mehreren Linsen oder Hohlspiegeln, zur Fokussierung der Strahlung der Strahlungsquelle. Wie weiter oben beschrieben wurde, ist es vorteilhaft, die (UV-)Strahlung zu fokussieren, um das Substrat gezielt in einem gewünschten Volumenbereich zu kompaktieren. Die Fokussierung kann insbesondere auf einen Strahlfokus erfolgen, der an der Oberfläche der ersten Seite des Substrats oder in einem unmittelbar zu der Oberfläche an der ersten Seite des Substrats benachbarten Volumenbereich gebildet ist. Durch die Fokussierung lässt sich die Ortsauflösung bei der Kompaktierung und somit die Ortsauflösung bei der Veränderung der Oberflächenform erhöhen.

[0037] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine EUV-Lithographieanlage, umfassend: ein Projektionsobjektiv, welches wie weiter oben beschrieben ausgebildet ist. Die EUV-Lithographieanlage weist zusätzlich zum Projektionsobjektiv eine EUV-Lichtquelle sowie ein Beleuchtungssystem auf, welches zur Beleuchtung einer Objektebene dient, in welcher eine Maske angeordnet ist.

[0038] Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen der Erfindung, anhand der Figuren der Zeichnung, die erfindungswesentliche Einzelheiten zeigen, und aus den Ansprüchen. Die einzelnen Merkmale können je einzeln für sich oder zu mehreren in beliebiger Kombination bei einer Variante der Erfindung verwirklicht sein.

Zeichnungen

[0039] Ausführungsbeispiele sind in den schematischen Zeichnungen dargestellt und werden in der nachfolgenden Beschreibung erläutert. Es zeigt

[0040] Fig. 1a, b schematische Darstellungen eines reflektiven optischen Elements vor und nach einer rückseitigen Bestrahlung mit Elektronen zur Veränderung der Oberflächenform,

[0041] Fig. 2a–c schematische Darstellungen der Oberflächenform des in Fig. 1a gezeigten reflektiven optischen Elements in Form von Höhenlinien (Fig. 2a) sowie von zwei zueinander senkrechten Schnitten (Fig. 2b, c),

[0042] Fig. 3a, b schematische Darstellungen eines reflektiven optischen Elements vor und nach einer seitlichen Bestrahlung mit Elektronen zur Veränderung der Oberflächenform,

[0043] Fig. 4a–c schematische Darstellungen der Oberflächenform des in Fig. 3a gezeigten reflektiven optischen Elements in Form von Höhenlinien (Fig. 4a) sowie von zwei zueinander senkrechten Schnitten (Fig. 4b, c),

[0044] Fig. 5a, b schematische Darstellungen eines reflektiven optischen Elements vor und nach einer rückseitigen Bestrahlung mit Strahlung zur Veränderung der Oberflächenform,

[0045] Fig. 6a–c schematische Darstellungen der Oberflächenform des in Fig. 5a gezeigten reflektiven optischen Elements in Form von Höhenlinien (Fig. 6a) sowie von zwei zueinander senkrechten Schnitten (Fig. 6b, c), und

[0046] Fig. 7 eine schematische Darstellung eines Projektionsobjektivs einer EUV-Lithographieanlage mit einer Bestrahlungseinrichtung zur Bestrahlung eines reflektiven optischen Elements.

[0047] In der folgenden Beschreibung der Zeichnungen werden für gleiche bzw. funktionsgleiche Bauteile identische Bezugszeichen verwendet.

[0048] In Fig. 1a, b ist schematisch ein reflektives optisches Element **1** gezeigt, welches ein Substrat **2** mit einer ersten Seite **2a** und einer der ersten Seite **2a** gegenüber liegenden zweiten Seite **2b** aufweist. An der ersten Seite **2a** des Substrats **2** weist das Substrat **2** eine im gezeigten Beispiel im Wesentlichen plane Oberfläche **3** auf, auf die eine reflektierende Beschichtung **4** aufgebracht ist, die zur Reflexion von Strahlung im EUV-Wellenlängenbereich ausgebildet ist. Die reflektierende Beschichtung **4** weist eine Mehrzahl von Schichtpaaren (beispielsweise ca. 50) mit alternierenden Einzelschichten **5a**, **5b** aus einem Material mit niedrigem und hohem Brechungsindex auf. Ist die reflektierende Beschichtung **4** zur Reflexion von EUV-Strahlung bei einer Wellenlänge im Bereich von 13,5 nm ausgebildet, so bestehen die Einzelschichten **5a**, **5b** üblicherweise aus Molybdän und Silizium. In Abhängigkeit von der verwendeten

Wellenlänge sind andere Materialkombinationen wie z.B. Molybdän und Beryllium, Ruthenium und Beryllium oder Lanthan und Materialien wie Rhodium, Palladium, Silber ebenfalls möglich. Zusätzlich zu den Einzelschichten **5a**, **5b** kann die reflektive Beschichtung **4** auch Zwischenschichten zur Verhinderung von Diffusion sowie eine Deckschicht bzw. ein Deckschichtsystem zur Verhinderung von Oxidation bzw. Korrosion beinhalten.

[0049] Zwischen der Oberfläche **3** des Substrats **2** und der reflektierenden Beschichtung **4** ist im gezeigten Beispiel eine Schutzschicht **5c** aufgebracht, um das Substrat **2** vor auftretender EUV-Strahlung zu schützen. Bei dem Material der Schutzschicht **5c** kann es sich beispielsweise um Nickel, Kohlenstoff, Bor-Karbid, etc. handeln. Alternativ zur Schutzschicht **5c** kann das Substrat **2** in einem an die reflektierende Beschichtung **4** angrenzenden Volumenbereich homogen vorverdichtet bzw. kompaktiert sein, um zu vermeiden, dass durch die auftretende EUV-Strahlung eine lokal unterschiedliche Kompaktierung des Substrats **2** und somit eine Veränderung der Oberflächenform der Oberfläche **3** erfolgt. Beispielsweise kann das Substrat **2** in einem an die Oberfläche **3** angrenzenden Volumenbereich, der sich bis zu einem Abstand von $5\ \mu\text{m}$ von der Oberfläche **3** erstreckt, eine um mehr als $0,1\ \text{Vol-}\%$, ggf. um mehr als $0,5\ \text{Vol-}\%$, insbesondere um mehr als $1\ \text{Vol-}\%$ höhere Dichte aufweisen als die mittlere Dichte in einem konstanten Abstand von z.B. $1\ \text{mm}$ von der Oberfläche **3** des Substrats **2**. Die homogene Verdichtung kann auf einen zur Oberfläche **3** benachbarten Volumenbereich beschränkt werden, da die Eindringtiefe der EUV-Strahlung in das Substrat **2** in der Regel maximal $5\ \mu\text{m}$ beträgt.

[0050] Die Oberfläche **3** des in **Fig. 1a** gezeigten reflektiven optischen Elements **1** weist eine Oberflächenform **6** auf, die in **Fig. 2a** in Form von Höhenlinien dargestellt ist. **Fig. 2b**, **c** zeigen jeweils einen Schnitt in X-Richtung bzw. in Y-Richtung durch die Oberfläche **3** entlang der in **Fig. 2a** dargestellten strichpunktieren Schnittlinien, welche durch den Mittelpunkt **M** der im gezeigten Beispiel kreisförmigen Oberfläche **3** des Substrats **2** verlaufen.

[0051] Wie in **Fig. 1a** sowie in **Fig. 2a–c** zu erkennen ist, weicht die Oberflächenform **6** der Oberfläche **3** in einem Teilbereich von einer Soll-Oberflächenform ab, die im gezeigten Beispiel einer planen Oberfläche **3** entspricht, wie sie in **Fig. 1b** dargestellt ist, d.h. die in **Fig. 2a–c** gezeigte Oberflächenform **6** entspricht der Abweichung von der Soll-Oberflächenform. Es versteht sich, dass die Abweichung von der Soll-Oberflächenform in **Fig. 1a** zur Verdeutlichung übertrieben groß dargestellt ist und in der Realität im Bereich von Nanometern liegt, wie in **Fig. 2b**, **c** zu erkennen ist. Das Substrat **2** selbst bzw. die Oberfläche

3 weist einen Radius **R** auf, der im gezeigten Beispiel bei $100\ \text{mm}$ liegt.

[0052] Um die in **Fig. 1a** gezeigte Oberflächenform **6** so zu verändern bzw. zu korrigieren, dass die in **Fig. 1b** gezeigte plane Soll-Oberflächenform erhalten wird, wird das Substrat **2** bei einem in **Fig. 1b** gezeigten Beispiel an einer weiteren Oberfläche **9**, die an der zweiten Seite **2b** des Substrats (d.h. der Rückseite des reflektiven optischen Elements **1**) gebildet ist, lokal mit hochenergetischen Elektronen **7** bestrahlt, die von einer Bestrahlungseinrichtung in Form einer Elektronenquelle **8** erzeugt werden. Für die Bestrahlung können insbesondere Elektronen **7** verwendet werden, die eine Energie zwischen 5 und $80\ \text{eV}$ bei Dosen zwischen $0,1\ \text{J/mm}^2$ und $2500\ \text{J/mm}^2$ aufweisen.

[0053] Bei der Bestrahlung wird ein zu der bestrahlten Oberfläche **9** benachbarter Volumenbereich **10** des Substrats **2** kompaktiert, dessen Ausdehnung parallel zur bestrahlten Oberfläche **9** vergleichsweise gering ist und dessen Fläche an der bestrahlten Oberfläche **9** ca. $4\ \text{mm}^2$ beträgt. Entlang einer (gedachten) Fläche **11** im Volumen des Substrats **2**, die in einem konstanten Abstand d von $10\ \mu\text{m}$ von der bestrahlten weiteren Oberfläche **9** verläuft, weist das Substrat **2** eine Variation der Dichte ρ von mehr als $0,1\ \text{Vol-}\%$, ggf. von mehr als $0,5\ \text{Vol-}\%$ oder von mehr als $1,0\ \text{Vol-}\%$ auf. Geht man davon aus, dass die Dichte ρ im nicht kompaktierten Volumen des Substrats **2** sowie in dem kompaktierten Volumenbereich **10** jeweils konstant ist, so ist die Dichte ρ in dem kompaktierten Volumenbereich **10** um mehr als $0,1\ \text{Vol-}\%$ ggf. um mehr als $0,5\ \text{Vol-}\%$ bzw. um mehr als $1,0\ \text{Vol-}\%$ größer als im übrigen Volumen des Substrats **2**.

[0054] Da die Eindringtiefe der Elektronen **7** in das Substrat **2** gering ist, erstreckt sich der kompaktierte Volumenbereich **10** nicht so weit in das Substrat **2** hinein, dass dieser die Oberfläche **3** an der ersten Seite des Substrats **2** erreicht. Entsprechend wirkt sich die Kompaktierung des Substrats **2** nicht unmittelbar auf die Oberflächenform **6** der Oberfläche **3** an der ersten Seite **2a** (der Vorderseite) des Substrats **2** aus, da die Dichte ρ des Substrats **2** dort im Wesentlichen konstant bleibt. Wie in **Fig. 1b** zu erkennen ist, führt der verdichtete Volumenbereich **10** aber zur Ausbildung von Zugspannungen **12** in dem Substrat **2**, welche dazu führen, dass die Oberflächenform **6** der beschichteten Oberfläche **3** an der ersten Seite **2a** des Substrats **2** korrigiert wird, so dass diese der planen Soll-Oberflächenform entspricht.

[0055] Wie in **Fig. 1b** ebenfalls zu erkennen ist, führt die Korrektur der Oberflächenform **6** durch das Erzeugen von Zugspannungen **12** dazu, dass der kompaktierte Volumenbereich **10**, der eine vergleichsweise kleine laterale Ausdehnung mit einer Fläche von ca. $4\ \text{mm}^2$ an der bestrahlten Oberfläche **9** auf-

weist, eine Veränderung der Oberflächenform **6** an der Oberfläche **3** an der ersten Seite **2a** des Substrats **2** mit einer vergleichsweise großen lateralen Ausdehnung von ca. 50–60 mm erzeugt (vgl. Fig. 2b, c). Die in Zusammenhang mit Fig. 1a, b beschriebene Methode ermöglicht es somit nur, vergleichsweise großflächige Deformationen an der Oberfläche **3** an der ersten Seite **2a** des Substrats **2** zu korrigieren.

[0056] Die Ortsauflösung bei der Korrektur der Oberflächenform **6** durch die in Fig. 1b gezeigte Bestrahlung hängt insbesondere von der Dicke D des Substrats **2** ab, die bei dem in Fig. 1a, b gezeigten Beispiel bei ca. 40 mm liegt. Die in Fig. 1b gezeigte Fläche **11**, entlang derer das Substrat **2** eine Variation der Dichte ρ von mehr als 0,1 Vol-% bzw. von mehr als 0,5 Vol-% oder ggf. von mehr als 1 Vol-% aufweist, verläuft somit parallel zur (korrigierten) Oberfläche **3** an der ersten Seite **2a** des Substrats **2** in einem konstanten Abstand $A = D - d$ von 39,99 mm. Je geringer die Dicke D des Substrats **2** ist, desto größer ist bei der Bestrahlung mit Elektronen **7** von der zweiten Seite **2b** die Ortsauflösung bei der Korrektur von Deformationen an der Oberfläche **3** des Substrats **2**. Beispielsweise können bei einer Dicke D des Substrats **2** von ca. 20 mm typischer Weise Deformationen an der Oberfläche **3** des Substrats **2** korrigiert werden, die eine laterale Erstreckung von ca. 40 mm aufweisen.

[0057] Fig. 3a, b und Fig. 4a–c zeigen eine weitere Möglichkeit zur Korrektur der Oberflächenform **6** eines Substrats **2** eines reflektiven optischen Elements **1** für den EUV-Wellenlängenbereich. Wie in Fig. 3a zu erkennen ist, weist die Oberfläche **3** an der ersten Seite **2a** des Substrats **2** eine Deformation an einem Randbereich der kreisrunden Oberfläche **3** auf. Zum Verändern bzw. zur Korrektur der Oberflächenform **6** des reflektiven optischen Elements **1** werden im gezeigten Beispiel ebenfalls Elektronen **7** mit Hilfe einer Elektronenquelle **8** auf eine weitere Oberfläche **13** eingestrahlt, welche an einer ringförmig umlaufenden Seitenfläche **2c** (Mantelfläche) des Substrats **2** gebildet ist, welche die erste und zweite Seite **2a**, **2b** des Substrats **2** miteinander verbindet.

[0058] Bei dem in Fig. 3a, b gezeigten reflektiven optischen Element **1** erzeugen die Elektronen **7** einen kompaktierten Volumenbereich **10** in dem Substrat **2**, der sich von der bestrahlten weiteren Oberfläche **13** an der Seitenfläche **2c** des Substrats **2** in das Innere des Substrats **2** erstreckt. Das Substrat **2** weist entlang einer Fläche **11**, die in einem konstanten Abstand d von 500 μm von der weiteren Oberfläche **13** angeordnet ist, eine Variation der Dichte ρ von mehr als 0,1 Vol-% bzw. von mehr als 0,5 Vol-% oder 1,0 Vol-% auf. Das Substrat **1** weist zusätzlich auch entlang einer weiteren Fläche **14**, die in einem konstanten Abstand A von ca. 9 mm zu der (korrigierten) Oberfläche **3** des reflektiven optischen Elements

1 verläuft, eine Variation der Dichte ρ von mehr als 0,1 Vol-% bzw. von mehr als 0,5 Vol-% oder 1,0 Vol-% auf.

[0059] Wie in Fig. 3b zu erkennen ist, ist der verdichtete Volumenbereich **10** von der Oberfläche **3** an der ersten Seite **2a** des Substrats **2** beabstandet, so dass die Kompaktierung nicht direkt zu einer Veränderung der Oberflächenform **6** der Oberfläche **3** führt. Vielmehr erfolgt wie bei dem in Fig. 1a, b gezeigten Beispiel die Korrektur der Oberflächenform **6** indirekt, d.h. indem durch den kompaktierten Volumenbereich **10** eine Zugspannung **12** in dem Substrat **2** erzeugt wird. Aufgrund des geringeren Abstandes zwischen dem kompaktierten Volumenbereich **10** und der Oberfläche **3** ist die Ortsauflösung bei der Korrektur größer als bei dem in Fig. 1a, b gezeigten Beispiel, d.h. es können Deformationen an der Oberfläche **3** korrigiert werden, die eine laterale Auflösung von z.B. ca. 25 mm oder weniger aufweisen, vgl. Fig. 4b, c.

[0060] An Stelle einer Bestrahlung mit Elektronen **7** kann auch eine Bestrahlung des reflektiven optischen Elements **1** mit Strahlung, insbesondere mit Strahlung bei Wellenlängen von mehr als 150 nm, erfolgen, die eine ausreichende Absorption in dem Material des Substrats **2** aufweist, um eine Kompaktierung zu bewirken. Die Strahlung, die beispielsweise eine Wellenlänge von ca. 300 nm aufweisen kann, kann im Volumen des Substrats **2** fokussiert werden, um dort lokal die Energiedichte zu erhöhen und somit die lokale Kompaktierung zu verstärken.

[0061] Beispielsweise kann die in Fig. 4a–c gezeigte deformierte Oberflächenform **6** mit Hilfe von Strahlung korrigiert werden, die an Stelle der Elektronen **7** an der Seitenfläche **2c** auf die weitere Oberfläche **13** des Substrats **2** eingestrahlt wird, wobei die Strahlung beispielsweise eine Energiedichte von 50 mJ/cm^2 aufweisen kann. Bei einem Substrat **2**, welches aus Quarzglas oder ggf. aus mit Titan dotiertem Quarzglas mit einem Silikatglasanteil von mehr als 80 % (ULE®) gebildet ist, führt eine solche Bestrahlung typischer Weise zu einem Schrumpfung des Substrats **2** von 3 ppm.

[0062] Fig. 5a, b zeigen eine weitere Möglichkeit zur Korrektur der Oberflächenform **6** eines reflektiven optischen Elements **1**, bei welcher die Bestrahlung an der zweiten Seite **2b** des Substrats **2** mit Strahlung **15** bei einer Wellenlänge von ca. 300 nm erfolgt, die von einer Strahlungsquelle **16** (z.B. Laserquelle bzw. Laserdiode) erzeugt wird. Die Strahlung **15** der Strahlungsquelle **16** wird mit Hilfe einer Fokussierlinse **17** auf das Substrat **2**, genauer gesagt in einen Strahlfokus fokussiert, der in einem Volumenbereich **10** des Substrats **2** unmittelbar unter der Oberfläche **3** an der ersten Seite **2a** des Substrats **2** gebildet ist. Die Fokussierung bewirkt eine Kompaktierung des Volu-

menbereichs **10**, die sich unmittelbar auf die Oberflächenform **6** der Oberfläche **3** des Substrats **2** auswirkt. Da die Kompaktierung unmittelbar unter der Oberfläche **3** des Substrats **2** erfolgt, weist das Substrat **2** entlang einer Fläche **11**, die in einem konstanten Abstand A von weniger als $500\ \mu\text{m}$, z.B. bei ca. $200\ \mu\text{m}$, zu der ersten Seite **2a** des Substrats **2** verläuft, eine Variation der Dichte ρ von mehr als $0,1\ \text{Vol-\%}$, von mehr als $0,5\ \text{Vol-\%}$ oder ggf. von mehr als $1,0\ \text{Vol-\%}$ auf. Wie insbesondere in **Fig. 6b, c** gezeigt ist, ist die bei einer solchen Korrektur erreichbare Ortsauflösung vergleichsweise groß, d.h. es können Deformationen mit einer lateralen Ausdehnung von weniger als ca. $10\ \text{nm}$ an der Oberfläche **3** korrigiert werden.

[0063] Wie in **Fig. 5b** zu erkennen ist, wird die Strahlung **15** unter einem Winkel zu der zweiten Seite **2b** des Substrats **2** eingestrahlt, da in der Mitte der weiteren Oberfläche **9**, durch welche die Bestrahlung erfolgt, ein Träger **18** zur Halterung des Substrats **2** angeordnet ist. Die in das Substrat **2** von der zweiten Seite **2b** eingestrahlte Strahlung **15** wird an der Rückseite der reflektierenden Beschichtung **4** reflektiert, da diese wie weiter oben beschrieben typischer Weise metallische Materialien (z.B. Mo, etc.) enthält, die von der Strahlung **15** nicht durchdrungen werden. Wird das Substrat **2** anders als weiter oben beschrieben mit Strahlung bei geringeren Wellenlängen bestrahlt, z.B. im UV-Wellenlängenbereich zwischen ca. $150\ \text{nm}$ und ca. $250\ \text{nm}$, ist die Absorption des ULE®-Materials des Substrats **2** typischer Weise so groß, dass die Eindringtiefe der Strahlung **15** im Wesentlichen der Eindringtiefe bei der weiter oben beschriebenen Bestrahlung des Substrats **2** mit Elektronen **7** entspricht.

[0064] Es versteht sich, dass die Geometrie der weiter oben dargestellten reflektiven optischen Elemente **1**, welche ein kreiszylindrisches Substrat **2** mit zwei parallelen Seiten **2a, 2b** aufweisen, nur beispielhaft zu verstehen ist. In der Regel weist zumindest die erste Seite **2a** des reflektiven optischen Elements **1** eine Krümmung, beispielsweise eine sphärische Krümmung, auf. Auch sind ggf. Aussparungen zur Anbringung von Halterungen oder zum Durchtritt für die EUV-Strahlung in dem Substrat **2** des reflektierenden optischen Elements **1** gebildet, d.h. das Substrat **2** weist nicht zwingend eine kreisförmige Geometrie auf.

[0065] Bei den weiter oben beschriebenen Beispielen erfolgt die Korrektur der Oberflächenform **6** typischer Weise, indem vor dem Bestrahlen die Wellenfrontaberrationen des reflektiven optischen Elements **1** beispielsweise mit Hilfe eines interferometrischen Verfahrens vermessen werden. Anhand des Vergleichs der vermessenen Oberflächenform **6** mit einer Soll-Oberflächenform kann die Veränderung der Oberflächenform bestimmt werden, die zum Er-

reichen der Soll-Oberflächenform erforderlich ist. Die lokale Variation bzw. Veränderung der Dichte ρ des Substrats **2**, welche die gewünschte Veränderung der Oberflächenform erzeugt, kann beispielsweise anhand von Simulationsrechnungen bestimmt werden. Die Bestrahlung des Substrats **2** wird derart vorgenommen, dass sich eine lokale Variation der Dichte in dem Substrat **2** einstellt, welche die gewünschte, für die Korrektur benötigte Veränderung der Oberflächenform **6** erzeugt.

[0066] An Stelle der Vermessung und Korrektur von Wellenfrontaberrationen an einem einzelnen reflektiven optischen Element **1** kann an dem reflektiven optischen Element **1** auch eine Korrektur von Wellenfrontaberrationen vorgenommen werden, die in einem Projektionsobjektiv **23** als Ganzes auftreten, welches beispielhaft in **Fig. 7** dargestellt ist und in welches neben weiteren fünf reflektiven optischen Elementen **21** auch ein als Korrektur-element dienendes reflektives optisches Element **1** integriert ist.

[0067] Mit Hilfe des Projektionsobjektivs **23** wird eine strukturtragende Maske **29**, die in einer Objektebene **31** angeordnet ist, auf ein Bild **33** in einer Bildebene **35** abgebildet. In der Bildebene **35** ist eine photosensitive Schicht angeordnet, die sich durch die Belichtung chemisch verändert. Im vorliegenden Beispiel umfasst die Projektionsoptik **23** sechs reflektive optische Elemente **1, 21** mit denen die strukturtragende Maske **29** in die Bildebene **35** abgebildet wird. Ein solches Projektionsobjektiv **23** ist üblicherweise beugungsbegrenzt, so dass die maximal mögliche Auflösung nur dann erreicht werden kann, wenn die Wellenfrontaberrationen des Projektionsobjektivs **23** hinreichend klein sind. Um dies zu erreichen, muss die Oberflächenform **6** der reflektiven optischen Elemente **1, 21** hochpräzise eingestellt sein.

[0068] Bei dem in **Fig. 7** gezeigten Beispiel wird das Projektionsobjektiv **23** mit allen sechs reflektiven optischen Elementen **1, 21** zu diesem Zweck beispielsweise interferometrisch vermessen, um die Wellenfrontaberrationen des Projektionsobjektivs **23** zu bestimmen. Zur Korrektur der Wellenfront kann das als Korrektur-element dienende reflektive optische Element **1** aus dem Projektionsobjektiv **23** ausgebaut und auf die weiter oben beschriebene Weise mit Elektronen **7** und/oder mit Strahlung **15** bestrahlt werden, um eine für die Korrektur der Wellenfront des Projektionsobjektivs **23** geeignete Veränderung der Oberflächenform **6** zu erzeugen. Nach der Korrektur wird das reflektive optische Element **1** wieder in das Projektionsobjektiv **23** eingebaut.

[0069] Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, die Korrektur der Oberflächenform **6** an dem reflektiven optischen Element **1** in-situ vorzunehmen, d.h. in einem in das Projektionsobjektiv **23** eingebauten Zustand. Zu diesem Zweck ist in das in **Fig. 7** gezeigte

Projektionsobjektiv **23** eine Bestrahlungseinrichtung **19** integriert, die in geringem Abstand von der zweiten, der auftreffenden EUV-Strahlung **24** abgewandten Seite **2b** des Substrats **2** des reflektiven optischen Elements **1** angeordnet ist. Auf die Darstellung der reflektierenden Beschichtung an den reflektiven optischen Elementen **1**, **21** wurde bei dem in **Fig. 7** gezeigten Beispiel aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

[0070] Bei dem in **Fig. 7** gezeigten Beispiel weist die Bestrahlungseinrichtung **19** eine Mehrzahl von Elektronenquellen **8** zur Erzeugung von Elektronen **7** bzw. von Elektronenstrahlen auf, um eine an der zweiten Seite **2b** des Substrats **2** gebildete Oberfläche **13** lokal zu bestrahlen. Die Elektronenquellen **8**, die zur Erzeugung der Elektronen **7** beispielsweise Glühdrähte enthalten können, sind in einer rasterförmigen Anordnung (Array) angeordnet, um die zweite Seite **2b** des reflektiven optischen Elements **2** mit einer im Wesentlichen den Abständen zwischen den einzelnen Elektronenquellen **8** entsprechenden Ortsauflösung bestrahlen zu können. Die Elektronenquellen **8** sind an einem gemeinsamen Halter **19a** befestigt, der eine (kurze) Beschleunigungsstrecke enthalten kann, die beispielsweise zwischen einem jeweiligen Glühdraht und einer auf einem anderen elektrischen Potential befindlichen Planplatte gebildet sein kann. Die Beschleunigungsstrecke soll gewährleisten, dass die Elektronen **7** beim Auftreffen auf das Substrat **2** eine ausreichend hohe Energie aufweisen, um das Material des Substrats **2** zu kompaktieren.

[0071] An Stelle des in **Fig. 7** gezeigten Arrays von Elektronenquellen **8** kann ggf. auch eine einzelne Elektronenquelle **8** als Bestrahlungseinrichtung in dem Projektionsobjektiv **23** angeordnet sein. In diesem Fall werden die Elektronen **7** mit Hilfe einer Ablenkeinrichtung, welche beispielsweise ein elektrisches und/oder magnetisches Feld erzeugt, abgelenkt, um eine Bestrahlung an unterschiedlichen Orten der zweiten Seite **2b** des Substrats **2** zu ermöglichen. Der für diesen Zweck benötigte Bauraum ist allerdings größer als bei der in **Fig. 7** gezeigten Bestrahlungseinrichtung **19**. Es versteht sich, dass auch die an der Seitenfläche **2c** des Substrats **2** gebildete weitere Oberfläche **13** mittels einer geeignet positionierten Bestrahlungseinrichtung **19** bestrahlt werden kann.

[0072] Alternativ oder zusätzlich zu einer Bestrahlungseinrichtung **19**, welche mehrere Elektronenquellen **8** aufweist, ist es auch möglich, eine oder mehrere Strahlungsquellen, insbesondere in Form von Laserquellen **16**, z.B. in Form von Laserdioden, die ebenfalls in einer rasterförmigen Anordnung positioniert sein können, in das Projektionsobjektiv **23** zu integrieren oder die von einer oder mehreren Strahlungsquellen erzeugte Strahlung beispielsweise über Lichtleiter in das Projektionsobjektiv **23** zu führen, um

das Substrat **2** an der an der zweiten Seite **2b** gebildeten Oberfläche **9** und/oder an der an der Seitenfläche **2c** gebildeten Oberfläche **13** zu bestrahlen. Die Strahlungsquelle ist in diesem Fall nicht in das Projektionsobjektiv **23** selbst, sondern in eine EUV-Lithographieanlage **20** integriert, welche zusätzlich zu dem Projektionsobjektiv **23** eine (nicht gezeigte) EUV-Strahlungsquelle und ein (nicht gezeigtes) Beleuchtungssystem aufweist, um die Objektebene **31**, in welcher die Maske **29** angeordnet ist, mit EUV-Strahlung zu bestrahlen.

[0073] Zusammenfassend kann durch eine Bestrahlung des Substrats **2**, die nicht durch die reflektierende Beschichtung **4** hindurch erfolgt, eine Schädigung der reflektierenden Beschichtung **4** bei der Korrektur der Oberflächenform **6** vermieden werden: Bei der Durchstrahlung der reflektierenden Beschichtung **4** mit Elektronen **7** kann beispielsweise in der Umgebung des reflektiven optischen Elements **1** Kohlenstoff freigesetzt werden, der z.B. in dort vorhandenen monomolekularen Fettschichten (Kohlenwasserstoff-Schichten) enthalten ist. Der Kohlenstoff lagert sich an der Oberseite der reflektierenden Beschichtung **4** ab und führt zu einer Reduzierung der Reflektivität des reflektiven optischen Elements **1**.

[0074] Sofern Abweichungen der Oberflächenform **6** korrigiert werden müssen, bei denen die Ortsauflösung bei der Bestrahlung nicht ausreicht, können diese insbesondere vor dem Aufbringen der reflektierenden Beschichtung **4** direkt an der ersten Seite **2a** des Substrats **2** korrigiert werden. Die Korrektur kann in diesem Fall beispielsweise durch Ionenstrahlbearbeiten, z.B. mit Argon-Ionen, erfolgen.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- WO 2013/050199 A1 [0003, 0003, 0003, 0009, 0009, 0020, 0022, 0022]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Verändern einer Oberflächenform (6) einer Oberfläche (3) eines Substrats (2) eines reflektiven optischen Elements (1) für den EUV-Wellenlängenbereich, wobei die Oberfläche (3) an einer ersten Seite (2a) des Substrats (2) gebildet ist und wobei auf die Oberfläche (3) eine reflektierende Beschichtung (4) aufgebracht ist, umfassend:

Bestrahlen einer nicht an der ersten Seite (2a) des Substrats (2) gebildeten weiteren Oberfläche (9, 13) des Substrats (2) mit Elektronen (7) und/oder mit Strahlung, insbesondere mit Strahlung (15) bei Wellenlängen von mehr als 150 nm, zum Verändern der Oberflächenform (6) der Oberfläche (3) an der ersten Seite (2a) des Substrats (2) durch Kompaktieren des Substrats (2).

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Substrat (2) an einer weiteren Oberfläche (9, 13) mit Elektronen (7) und/oder mit Strahlung (15) bestrahlt wird, die an einer der ersten Seite (2a) gegenüber liegenden zweiten Seite (2b) des Substrats (2) gebildet ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem das Substrat (2) an einer weiteren Oberfläche (9, 13) mit Elektronen (7) und/oder mit Strahlung (15) bestrahlt wird, die an einer Seitenfläche (2c) des Substrats (2) gebildet ist.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Substrat (2) an der weiteren Oberfläche (9, 13) mit fokussierter Strahlung (15), insbesondere mit auf die Oberfläche (3) an der ersten Seite (2a) des Substrats (2) fokussierter Strahlung (15), bestrahlt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Bestrahlen des reflektierenden optischen Elements (1) mit Elektronen (7) und/oder mit Strahlung (15) während des Betriebs des optischen Elements (1) in einer optischen Anordnung (23) erfolgt.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Bestrahlen mit Elektronen (7) und/oder mit Strahlung (15) erfolgt, bis das Substrat (1) entlang einer Fläche (11), die in einem konstanten Abstand (d) zwischen 0 µm und 1000 µm von der weiteren Oberfläche (9, 13) angeordnet ist, eine Variation der Dichte (ρ) von mehr als 0,1 Vol-% aufweist

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter umfassend:

Vermessen von Wellenfrontaberrationen des reflektiven optischen Elements (1) und/oder Vermessen von Wellenfrontaberrationen eines Projektionsobjektivs (23), welches das reflektive optische Element (1) enthält, vor dem Bestrahlen mit Elektronen (7) und/oder mit Strahlung (15), sowie Verändern der Ober-

flächenform (6) der Oberfläche (3) zum Korrigieren der Wellenfrontaberrationen.

8. Reflektives optisches Element (1) für den EUV-Wellenlängenbereich, umfassend:

ein Substrat (2) mit einer Oberfläche (3), die an einer ersten Seite (2a) des Substrats (2) gebildet ist, sowie eine auf die Oberfläche (3) aufgebrachte reflektierende Beschichtung (4),

dadurch gekennzeichnet,

dass das Substrat (2) entlang einer Fläche (11) im Volumen des Substrats (2), die in einem konstanten Abstand (A) von mehr als 500 µm zu der ersten Seite (2a) des Substrats (2) verläuft, eine Variation der Dichte (ρ) von mehr als 0,1 Vol-% aufweist.

9. Reflektives optisches Element nach Anspruch 8, bei dem das Substrat (2) entlang der Fläche (11) oder entlang einer weiteren Fläche (14), die in einem konstanten Abstand (d) zwischen 0 µm und 1000 µm von einer nicht an der ersten Seite (2a) des Substrats (2) gebildeten weiteren Oberfläche (9, 13) verläuft, eine Variation der Dichte (ρ) von mehr als 0,1 Vol-% aufweist.

10. Reflektives optisches Element nach Anspruch 9, bei dem die weitere Oberfläche (9) an einer der ersten Seite (2a) gegenüber liegenden zweiten Seite (2b) des Substrats (2) gebildet ist.

11. Reflektives optisches Element nach Anspruch 9 oder 10, bei dem die weitere Oberfläche (13) an einer insbesondere umlaufenden Seitenfläche (2c) des Substrats (2) gebildet ist.

12. Reflektives optisches Element nach einem der Ansprüche 8 bis 11, bei dem das Substrat (2) aus einem Material mit mindestens 40 Vol-% SiO₂-Anteil gebildet ist.

13. Projektionsobjektiv (23) für die Mikrolithographie, umfassend:

mindestens ein reflektives optisches Element (1) nach einem der Ansprüche 8 bis 12.

14. Projektionsobjektiv (23) für die Mikrolithographie, umfassend:

mindestens ein reflektives optisches Element (1) für den EUV-Wellenlängenbereich, welches ein Substrat (2) und eine reflektierende Beschichtung (4) aufweist, die auf eine Oberfläche (3) einer ersten Seite (2a) des Substrats (2) aufgebracht ist, sowie eine Bestrahlungseinrichtung (8, 16, 19), die ausgebildet ist, eine nicht an der ersten Seite (2a) des Substrats (2) gebildete Oberfläche (3) des Substrats (2) mit Elektronen (7) und/oder mit Strahlung, insbesondere mit Strahlung (15) bei Wellenlängen von mehr als 150 nm, zu bestrahlen und bei der Bestrahlung das Substrat (2) irreversibel zu kompaktieren.

15. Projektionsobjektiv nach Anspruch 14, bei dem die Bestrahlungseinrichtung (**8**, **16**, **19**) zur Bestrahlung einer der ersten Seite (**2a**) gegenüber liegenden zweiten Seite (**2b**) des Substrats (**2**) ausgebildet ist.

16. Projektionsobjektiv nach Anspruch 14 oder 15, bei dem die Bestrahlungseinrichtung (**8**, **16**, **19**) zur Bestrahlung einer insbesondere umlaufenden Seitenfläche (**2c**) des Substrats (**2**) ausgebildet ist.

17. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 14 bis 16, bei dem die Bestrahlungseinrichtung mindestens eine Elektronenquelle (**8**), bevorzugt eine Mehrzahl von Elektronenquellen (**8**) in einer rasterförmigen Anordnung, aufweist.

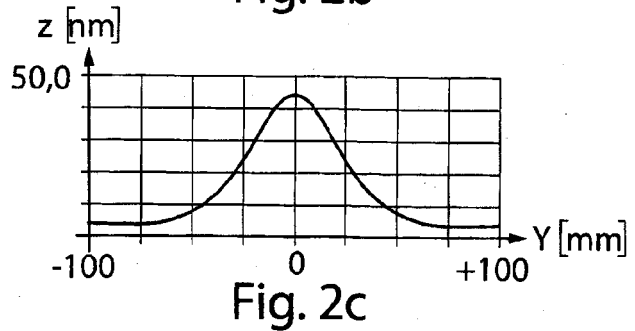
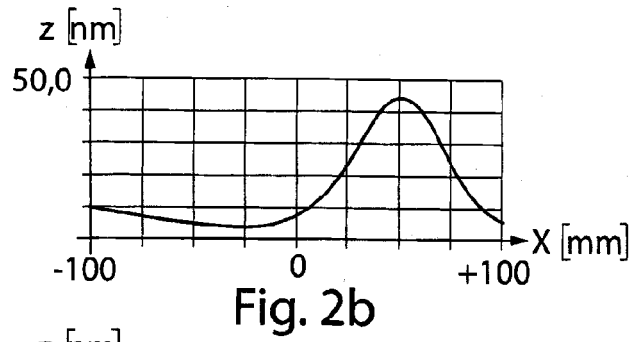
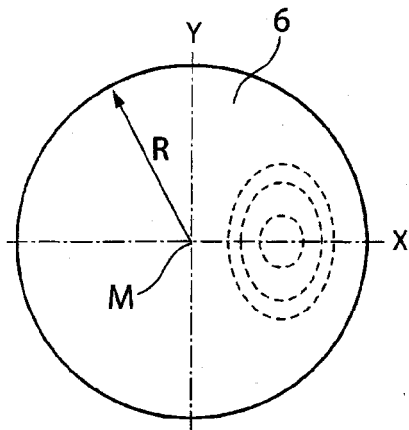
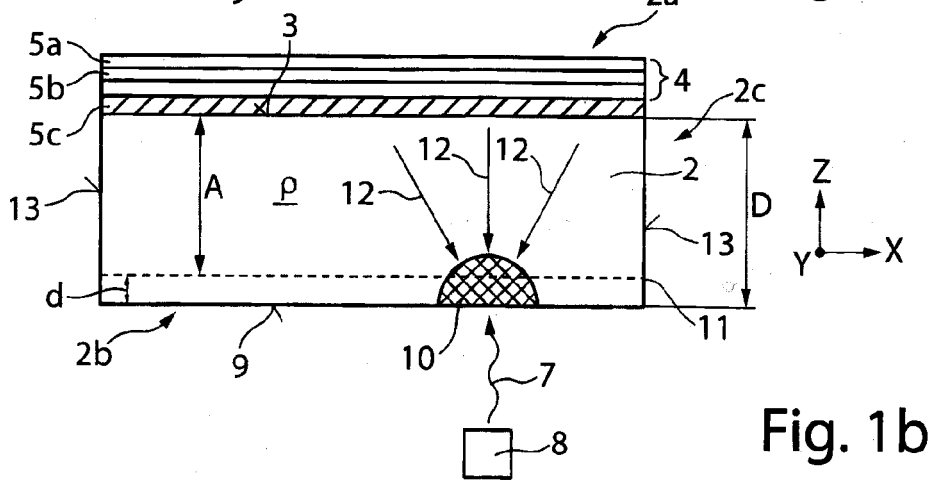
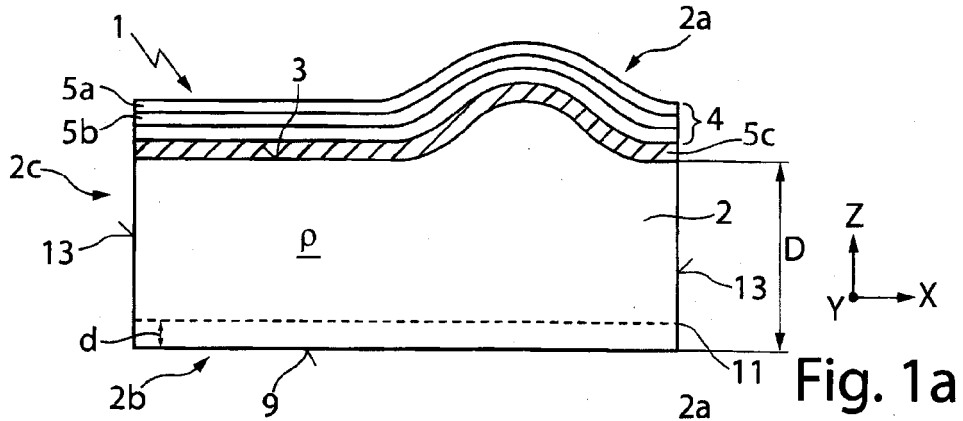
18. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 14 bis 17, bei dem die Bestrahlungseinrichtung mindestens eine bevorzugt gepulste Strahlungsquelle, insbesondere eine Laserquelle (**16**), aufweist.

19. Projektionsobjektiv nach Anspruch 18, weiter umfassend: eine Fokussiereinrichtung (**17**) zur Fokussierung der Strahlung (**15**) der Strahlungsquelle (**16**).

20. EUV-Lithographieanlage (**20**), umfassend: ein Projektionsobjektiv (**23**) nach einem der Ansprüche 13 bis 19.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



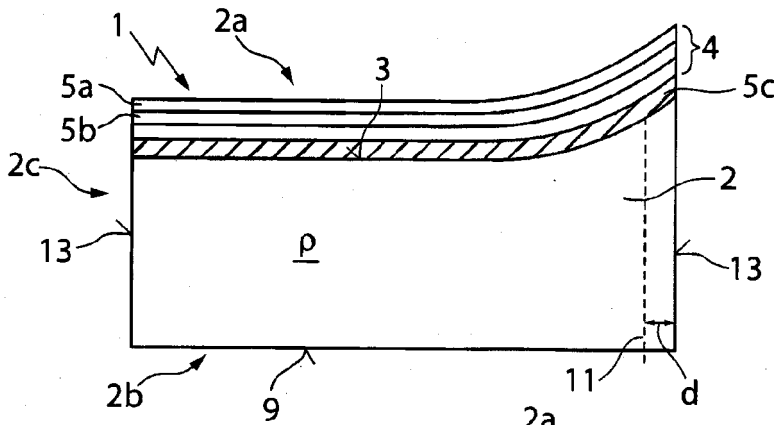


Fig. 3a

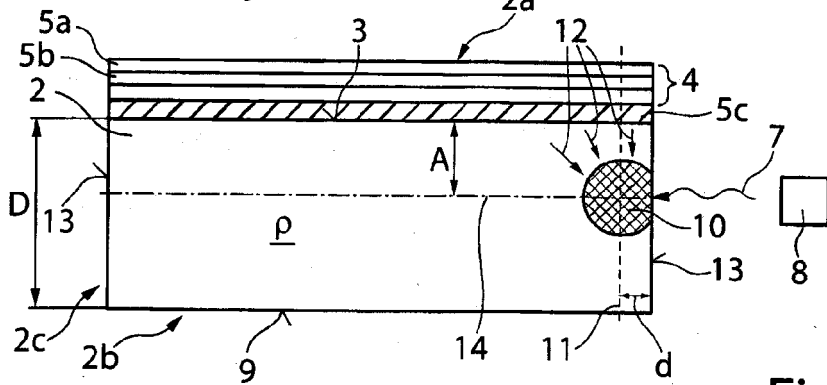


Fig. 3b

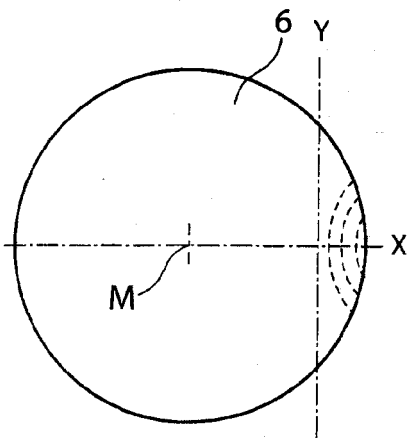


Fig. 4a

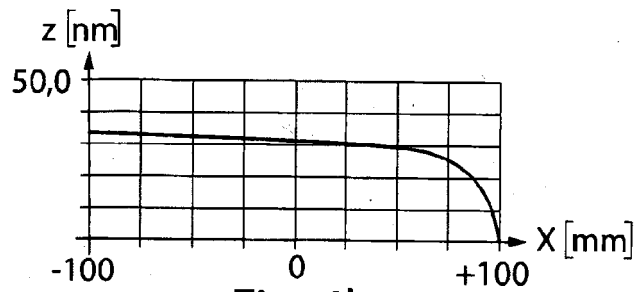


Fig. 4b

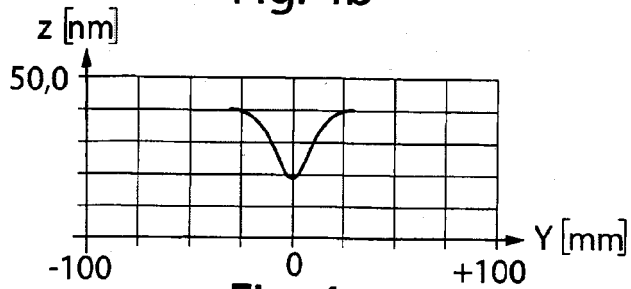
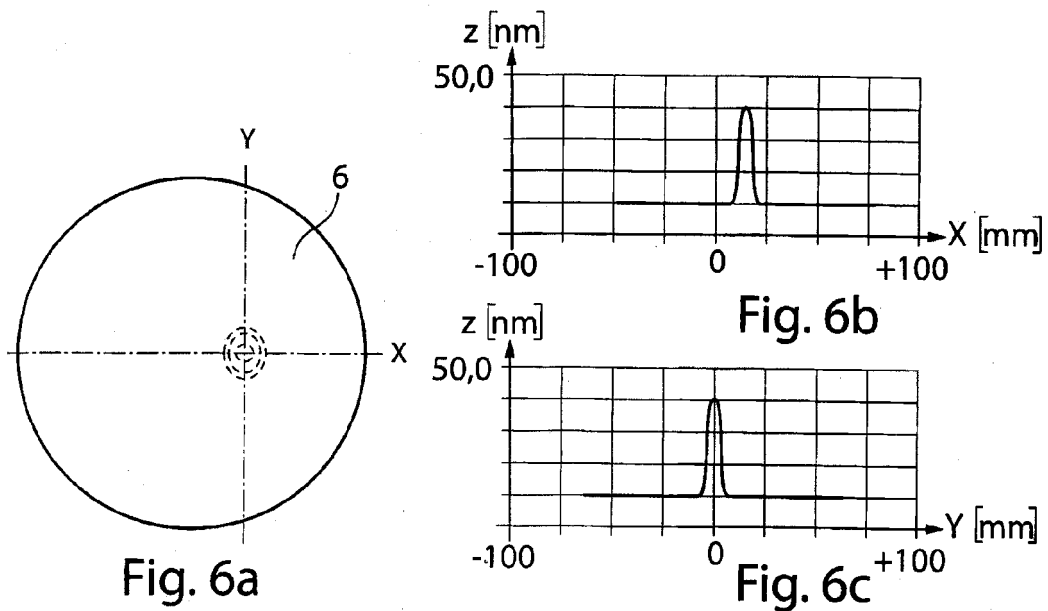
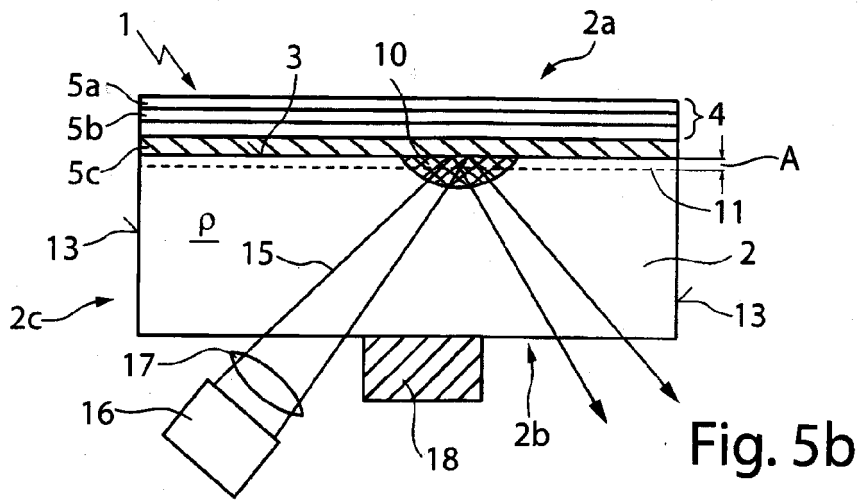
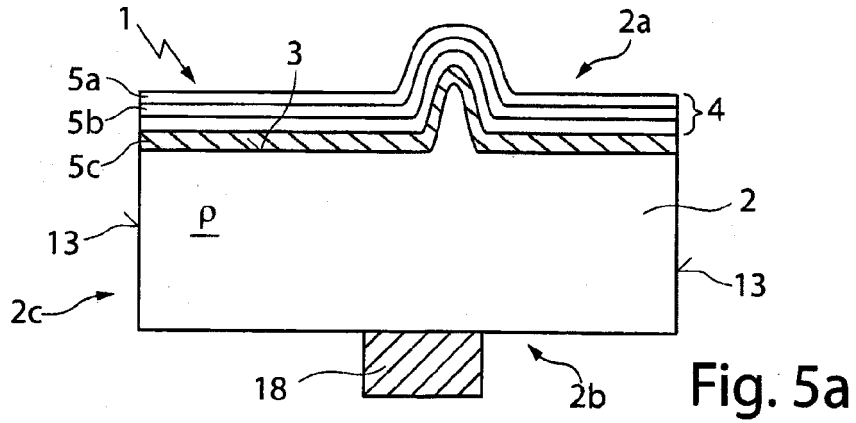


Fig. 4c



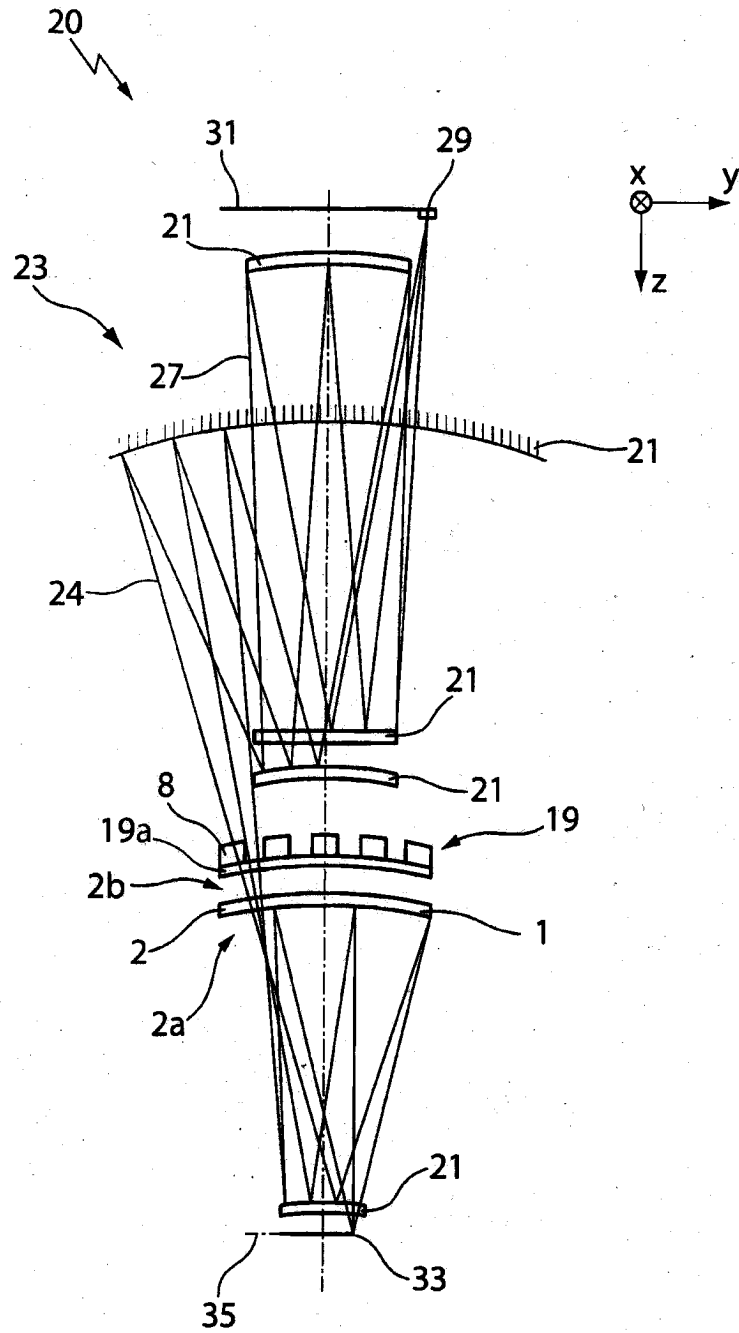


Fig. 7