



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 211 596.6**
(22) Anmeldetag: **12.07.2018**
(43) Offenlegungstag: **16.01.2020**

(51) Int Cl.: **G02B 5/08 (2006.01)**
G02B 1/14 (2015.01)
G02B 1/12 (2006.01)
G02B 17/00 (2006.01)
G02B 13/14 (2006.01)
G03F 7/20 (2006.01)

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

(72) Erfinder:
Käs, Matthias, 73431 Aalen, DE; Bezold, Steffen, 90408 Nürnberg, DE; Manger, Matthias, 73432 Aalen, DE; Petri, Christoph, 73447 Oberkochen, DE; Alexeev, Pavel, 73430 Aalen, DE; Pauls, Walter, 73460 Hüttlingen, DE

(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	10 2009 055 119	A1
DE	10 2011 084 117	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

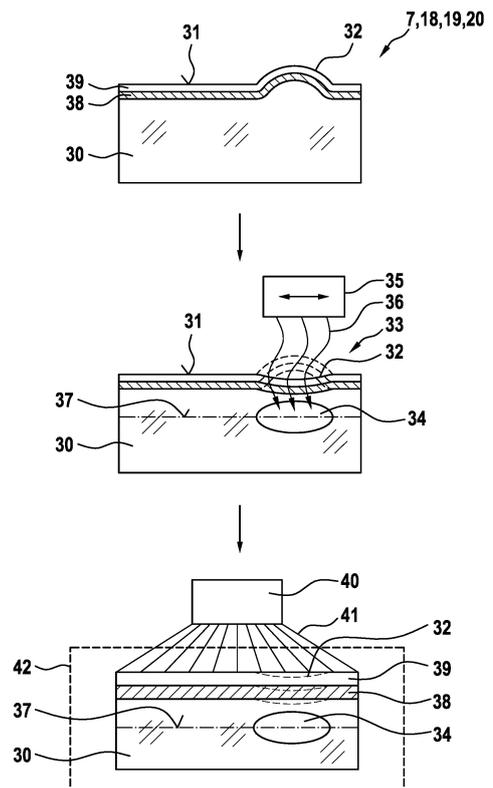
(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung eines reflektierenden optischen Elementes einer Projektionsbelichtungsanlage und reflektierendes optisches Element für eine Projektionsbelichtungsanlage, Projektionsobjektiv und Projektionsbelichtungsanlage**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines reflektierenden optischen Elementes für eine Projektionsbelichtungsanlage (1), welches ein Substrat (30) mit einer Substratoberfläche (31), eine Schutzschicht (38) und ein Schichtteilsystem (39) geeignet für den EUV Wellenlängenbereich umfasst, mit den folgenden Verfahrensschritten:

- Vermessen der Substratoberfläche (31)
- Bestrahlen des Substrats (30) mit Hilfe von Elektronen (36)
- Tempern des Substrats (30)

Weiterhin betrifft die Erfindung ein reflektives optisches Element für den EUV-Wellenlängenbereich.

Weiterhin betrifft die Erfindung ein Projektionsobjektiv (1) mit einem Spiegel (18, 19, 20) als reflektives optisches Element und eine Projektionsbelichtungsanlage (1) mit einem Projektionsobjektiv.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines reflektierenden optischen Elementes einer Projektionsbelichtungsanlage und ein reflektierendes optisches Element für eine Projektionsbelichtungsanlage. Darüber hinaus bezieht sich die Erfindung auf ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie mit einem solchen Element und auf eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem solchen Projektionsobjektiv.

[0002] Projektionsbelichtungsanlagen für die Mikrolithographie für den EUV-Wellenlängenbereich von 5-20 nm sind darauf angewiesen, dass die zur Abbildung einer Maske in eine Bildebene genutzten reflektiven optischen Elemente eine hohe Genauigkeit ihrer Oberflächenform aufweisen. Ebenso sollten Masken als reflektive optische Elemente für den EUV-Wellenlängenbereich eine hohe Genauigkeit ihrer Oberflächenform aufweisen, da ihr Ersatz sich in nicht unerheblicher Weise in den Betriebskosten einer Projektionsbelichtungsanlage niederschlägt.

[0003] Methoden zur Korrektur der Oberflächenform von optischen Elementen sind insbesondere aus US 6 844 272 B2, US 6 849 859 B2, DE 102 39 859 A1, US 6 821 682 B1, US 2004 0061868 A1, US 2003 0006214 A1, US 2003 00081722 A1, US 6 898 011 B2, US 7 083 290 B2, US 7 189 655 B2, US 2003 0058986 A1, DE 10 2007 051 291 A1, EP 1 521 155 A2 und US 4 298 247 bekannt.

[0004] Einige der in den genannten Schriften aufgeführten Korrekturmethode basieren darauf, das Substratmaterial von optischen Elementen durch Bestrahlung lokal zu verdichten. Hierdurch wird eine Veränderung der Oberflächenform des optischen Elements in der Nähe der bestrahlten Bereiche erzielt. Andere Methoden basieren auf einem direkten Oberflächenabtrag des optischen Elements. Wiederum andere der genannten Methoden nutzen die thermische oder elektrische Verformbarkeit von Materialien, um den optischen Elementen räumlich ausgedehnte Oberflächenformänderungen aufzuprägen.

[0005] Die DE 10 2011084117 A1 und die WO 2011/020655 A1 offenbaren Methoden, um das reflektierende optische Element zusätzlich zur Korrektur der Oberflächenform vor einer langfristigen Verdichtung (nachfolgend als „Kompaktierung“ bezeichnet) in der Größenordnung von einigen Vol.-% bzw. Alterung des Substratmaterials aufgrund von EUV-Strahlung zu schützen. Dazu wird die Oberfläche des reflektierenden optischen Elementes homogen mit Strahlung verdichtet und/oder mit einer Schutzschicht beschichtet. Beide Verfahren verhindern das Eindringen der EUV-Strahlung in das Substratmaterial. Dadurch können langfristig unzulässige Oberflächenverformungen durch Kompaktierung des Materials durch die EUV-Strahlung verhindert werden.

[0006] Als Ursache der Kompaktierung bzw. Alterung von Substratmaterialien, wie zum Beispiel Zerodur® von der Schott AG oder ULE® von Corning Inc. mit einem Anteil von mehr als 40 Vol.-% SiO₂, wird angenommen, dass bei den hohen Herstelltemperaturen des Substratmaterials ein thermodynamischer Ungleichgewichtszustand eingefroren wird, welcher bei EUV Bestrahlung in einen thermodynamischen Grundzustand übergeht. Passend zu dieser Hypothese lassen sich Beschichtungen aus SiO₂ herstellen, die keine solche Kompaktierung zeigen, da bei entsprechend gewählter Beschichtungsmethode diese Schichten bei wesentlich niedrigeren Temperaturen als das Substratmaterial hergestellt werden.

[0007] Nachteilig an allen genannten Methoden zur gezielten lokalen und homogenen Kompaktierung des Materials zur Korrektur der Oberflächenform des Substrates und zum Schutz von langfristigen Veränderungen durch Kompaktierung ist, dass diese den Rückgang der Kompaktierung über die Zeit und die dadurch verursachten Änderungen der Oberflächenform nicht berücksichtigen. Dieser Rückgang der Kompaktierung, der im Folgenden auch als Dekompaktierung bezeichnet wird, beruht vermutlich auf einer Relaxation der durch die Bestrahlung im Material erzeugten Defektzustände.

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren und ein reflektierendes optisches Element bereitzustellen, welches die oben beschriebenen Nachteile des Standes der Technik löst. Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, ein Projektionsobjektiv und eine Projektionsbelichtungsanlage mit einem verbesserten optischen Element anzugeben.

[0009] Diese Aufgabe wird gelöst durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs 1. Die Unteransprüche betreffen vorteilhafte Weiterbildungen und Varianten der Erfindung.

[0010] Ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Herstellung eines reflektierenden optischen Elementes für eine Projektionsbelichtungsanlage, umfassend ein Substrat mit einer Substratoberfläche, einer Schutzschicht und einem Schichtteilsystem geeignet für den EUV Wellenlängenbereich, umfasst folgende Verfahrensschritte:

- a) Vermessen der Substratoberfläche
- b) Bestrahlen des Substrats mit Hilfe von Elektronen
- c) Tempern des Substrats

[0011] Das reflektierende optische Element kann beispielsweise ein Spiegel oder eine Maske sein. Die Beschichtung des Substrats kann mindestens ein auf die Reflexion von EUV-Strahlung, also Strahlung mit einer Wellenlänge von 13nm oder 7nm, optimiertes Schichtteilsystem umfassen. Diese Reflexionsschicht kann eine periodische Abfolge von mindestens einer Periode an Einzelschichten umfassen, wobei die Periode zwei Einzelschichten mit unterschiedlichem Brechungsindex im EUV-Wellenlängenbereich umfassen kann. Es sind aber auch aperiodische Schichten oder Beschichtungen, die lediglich eine Schicht umfassen, möglich.

[0012] Optional kann zwischen Substrat und Reflexionsschicht eine Schutzschicht aufgebracht werden. Diese Schutzschicht verhindert, dass das Material darunter durch die EUV-Nutzstrahlung, also die in der Anlage zur Belichtung verwendete Strahlung, weiter kompaktiert. Die Schichtanordnung der Schutzschicht kann dabei mindestens eine Dicke von größer 20 nm, insbesondere größer 50 nm umfassen, so dass die Transmission an EUV-Strahlung durch die Schichtanordnung hindurch weniger als 10%, insbesondere weniger als 2% beträgt. Das Schichtteilsystem kann mindestens eine Schicht umfassen, die gebildet ist oder als Verbindung zusammengesetzt ist aus einem Material der Gruppe: Nickel, Kohlenstoff, Bor-Karbid, Kobalt, Beryllium, Silizium, Silizium-Oxide. Diese Materialien weisen einerseits einen ausreichend hohen Absorptionskoeffizienten für EUV-Strahlung auf und verändern sich andererseits unter EUV-Strahlung nicht. Die Schichtanordnung des mindestens einen Schutzschichtteilsystems kann beispielweise auch aus einer periodischen Abfolge von mindestens zwei Perioden an Einzelschichten bestehen, wobei die Perioden zwei Einzelschichten aus unterschiedlichen Materialien umfassen können, und wobei die Materialien der beiden die Perioden bildenden Einzelschichten entweder Nickel und Silizium oder Kobalt und Beryllium sein können. Durch solche Schichtstapel lässt sich das Kristallwachstum der absorbierenden Metalle unterbinden und somit insgesamt eine geringere Rauheit der Schichten für die eigentliche Reflexionsbeschichtung bereitstellen, als dies bei reinen Metallschutzschichten mit entsprechender Dicke möglich ist.

[0013] Durch die Vermessung der Substratoberfläche wird die genaue Oberflächenform des Substrats ermittelt, die normalerweise eine Abweichung von dem Sollwert aufweist. Die Differenz der gemessenen Oberflächenform zu der Sollflächenform des Substrats ergibt die zu korrigierende Abweichung der Substratoberfläche. Durch eine lokale Bestrahlung des Substrats kompaktiert das Substrat in einem Bereich zwischen 1µm und 100µm, bevorzugt zwischen 1µm und 30 µm unterhalb der Oberfläche und zieht sich zusammen, was zu einer Deformation an der Oberfläche führt, wodurch die Substratoberfläche korrigiert werden kann. Die Kompaktierung ist insbesondere abhängig von der Energie und der Dosis der zur Bestrahlung verwendeten Elektronen bzw. der von dem Material aufgenommenen Dosis. Die Werte für die Energie und Dosis der Elektronen können beispielsweise in einem Bereich von 5 keV bis 80 keV und 0,1 J/mm² bis 4000 J/mm² liegen.

[0014] Die Bestrahlung kann auch dazu verwendet werden, einen Schutz des Substrats vor einer fortschreitenden Kompaktierung während der Lebensdauer durch EUV-Bestrahlung zu erzeugen. Dazu kann die Substratoberfläche vollständig mit Dosen, die im Bereich von bis zu 4000 J/mm² liegen können, bestrahlt werden. Dies führt zu einer Sättigung der Kompaktierung, also einem Zustand, in dem die Kompaktierung des Substrats bei einer weiteren Bestrahlung des Substrats nicht mehr oder nur noch vernachlässigbar zunimmt. Dieser kompaktierte Bereich bildet eine Schutzschicht, die das übrige Substrat vor einer Kompaktierung durch EUV-Strahlung schützt.

[0015] Die Bereiche des Substratmaterials zur Korrektur der Oberflächenformabweichung und zur Schutzverdichtung nahe der Substratoberfläche können mittels der unterschiedlichen Eindringtiefe von Elektronenstrahlen voneinander getrennt werden. Dabei kann die Energie zur Oberflächenkorrektur größer als die zur Erzeugung der Schutzschicht sein. Bei der Bestrahlung zur Oberflächenformkorrektur mittels Elektronen genügt in der Regel eine Dosis von bis zu 2500 J/mm², um eine ausreichende Oberflächenformkorrektur vorzunehmen.

[0016] Der abschließende Tempersschritt führt zu einem teilweisen Rückgang der in den Verfahrensschritten vorher eingebrachten Kompaktierung des Substratmaterials, also zu einer Dekompaktierung. Die Dekompaktierung ist ein Effekt, der bei der Nutzung des Substrats in einer Projektionsbelichtungsanlage, wie beispielsweise eine EUV-Projektionsbelichtungsanlage, über die Zeit auftritt und so zu einer nicht vernachlässigbaren

Veränderung der Substratoberfläche führen kann. Das Tempern beschleunigt den Prozess der Dekompaktierung, wodurch die über die Lebensdauer des Substrats verbleibende Veränderung durch Dekompaktierung vorteilhaft auf einen vernachlässigbaren Wert reduziert werden kann.

[0017] In einer vorteilhaften Variante der Erfindung können die beim Tempern des Substrats verwendeten Temperaturen in einem Bereich zwischen 22°C und 400°C liegen. Bei Tempern in einem Ofen können die Werte in einem Bereich von 22°C bis maximal 60°C liegen. Wird die kompaktierte Schicht mittels Laser getempert, können die Werte bevorzugt zwischen 150°C und maximal 400°C liegen. Dabei gilt: Je höher die Temperatur, desto schneller kann das Material dekompaktiert werden, wodurch die Prozesszeiten vorteilhaft minimiert werden können.

[0018] Die Auswahl der Temperaturen ist von dem Grad der Kompaktierung und der Geometrie des Substrats abhängig. Die obere Grenze der zum Tempern verwendeten Temperatur ist durch die Temperatur gegeben, bei der sich das für das Substrat verwendete Material irreversibel verändert beziehungsweise seine Form verliert. Die für das Substrat verwendeten Materialien können beispielweise SiSic, Zerodur® von Schott AG, oder ULE® von Corning Inc. oder Quarzglas oder jede andere Art von Glas sein.

[0019] In einer weiteren vorteilhaften Variante der Erfindung kann beim Tempern des Substrats die Temperatur über eine Dauer von 1h bis 1000h gehalten werden.

[0020] Die beim Tempern erreichte Dekompaktierung ist von der verwendeten Temperatur, dem Grad der Kompaktierung vor dem Tempern, der Geometrie des Substrats und der Haltedauer der Temperatur abhängig. Generell gilt, je geringer die Veränderung der Substratoberfläche, also der Grad der Kompaktierung des Substrats vor dem Tempern, desto kürzer die Dauer des Tempervorgangs und umgekehrt.

[0021] In einer weiteren vorteilhaften Variante der Erfindung kann beim Tempern des Substrats die Temperatur über die Zeit variiert werden.

[0022] Die Temperatur kann über die Zeit variiert werden, um beispielsweise eine maximale Dekompaktierung und/oder eine Reduzierung der Haltezeit bei gleicher Dekompaktierung erreichen zu können.

[0023] In einer weiteren vorteilhaften Variante der Erfindung kann das Substrat beim Tempern homogen erhitzt werden.

[0024] Die homogene Erwärmung des gesamten Substrats zum Tempern hat den Vorteil, dass das Substrat sehr gleichmäßig temperiert wird und dadurch beim Tempern keine zusätzlichen Spannungen durch Temperaturgradienten in das Material eingebracht werden. Die zum Tempern notwendige Temperatur kann beispielsweise durch Bestrahlen mit einem Laser in das Substrat eingebracht werden. Durch eine geeignete Einstellung der Energie und Eindringtiefe des Lasers und/oder der Anbringung einer Wärmesenke zur Beeinflussung des Wärmeflusses im Material kann das Substrat homogen erwärmt werden. Alternativ kann das Substrat beispielsweise auch in einem Ofen auf eine bestimmte Temperatur erhitzt werden und nach einer Haltezeit wieder abgekühlt werden, wie dies vom Tempern von Werkstücken aus Metall bekannt ist. Dieser Prozess hat den Vorteil, dass er bekannt ist und vorhandene Vorrichtungen verwenden kann. Zudem ist der Prozess einfach, was sich positiv auf die Herstellkosten auswirkt.

[0025] In einer weiteren vorteilhaften Variante der Erfindung kann das Substrat beim Tempern lokal erhitzt werden.

[0026] Je nach Geometrie des Substrates und der vorgenommenen Kompaktierungen zur Korrektur der Oberflächenform des Substrats kann es vorteilhaft sein, das Substrat nicht homogen zu erwärmen, sondern die zum Tempern des Substrats notwendige Temperatur durch lokale Erhitzung des Substrats zu erreichen. Die lokale Erhitzung kann durch Strahlung auf die Substratoberfläche erreicht werden, wie beispielsweise durch einen Laser oder eine Lampe. Die Wellenlänge der Strahlung sollte bevorzugt in einem Bereich liegen, in dem die Reflexionsbeschichtung eine hohe Transmission und das Substrat einen hohen Absorptionsgrad besitzen. Vorteil der lokalen Erwärmung ist es, dass höhere Temperaturen an den kompaktierten Bereichen des Substrats eingestellt werden können. Die reflektierenden optischen Elemente können beispielsweise bereits bei der finalen Herstellung der Substratoberfläche in einer Halterung montiert sein, die nur relativ geringen Temperaturen bis beispielsweise maximal 60°C ausgesetzt werden darf. Durch die lokale Erwärmung und ergänzende Maßnahmen zur lokalen Abführung der Wärme kann die Temperatur im Substrat lokal beispielsweise bis zu 400°C erreichen, ohne dass die temperaturempfindlichen Bereich des reflektierenden optischen Elementes

ihre kritische Temperatur erreichen. Dadurch können die Haltezeiten vorteilhafterweise reduziert und damit die Herstellkosten minimiert werden.

[0027] In einer weiteren vorteilhaften Variante der Erfindung kann die Temperatur durch Bestrahlung mit einem Laser mit einer Wellenlänge von 2,6µm bis 2,8 µm, insbesondere mit einer Wellenlänge von 2,755µm in das Substrat eingebracht werden.

[0028] Das verwendete Substratmaterial hat einen Anteil von 40-Vol % SiO₂, wobei die in das SiO₂ Netzwerk eingebauten OH-Gruppen bei einer Wellenlänge von 2,755 µm eine Resonanz besitzen. Durch die Anregung der Resonanz ist die Absorption bei dieser Wellenlänge besonders hoch, wodurch der Temperaturanstieg im Substrat schneller verläuft und/oder eine höhere Temperatur im Substrat erreicht werden kann als bei anderen Wellenlängen.

[0029] In einer weiteren vorteilhaften Variante der Erfindung kann die Änderung des Substrats durch das Tempern bei der Bestrahlung des Substrats im Verfahrensschritt b) berücksichtigt werden.

[0030] Versuche haben gezeigt, dass die Veränderung des Substrats bei der Dekompaktierung größtenteils homogen über das Material stattfindet und nur ein kleiner vernachlässigbarer Anteil der Veränderung inhomogen ist. Der Vorteil dieses Effektes ist es, dass dadurch mit Hilfe von Versuchen, geeigneten Berechnungsmodellen und FEM-Modellen des Substrats eine sehr genaue Vorhersage der Dekompaktierung möglich ist. Die Kompaktierung des Materials ist ebenfalls gut vorhersagbar, so dass vorteilhafterweise die Dekompaktierung durch das Tempern bereits bei der Kompaktierung des Substrats berücksichtigt werden kann, beispielsweise durch einen Vorhalt. Damit ist eine Vorhersage der Geometrie der Substratoberfläche nach dem Tempern in der geforderten Genauigkeit möglich und umsetzbar.

[0031] Das weiter oben beschriebene Verfahren kann auch zur Korrektur eines bereits hergestellten reflektierenden optischen Elementes angewendet werden. Nach der Vermessung der Substratoberfläche inklusive der bereits aufgetragenen Beschichtungen kann das Substrat mit einer Energie zwischen 5 und 80 keV bei Dosen zwischen 0,1 J/mm² und 2500 J/mm² bestrahlt werden, um lokale Deformationen der Substratoberfläche zu korrigieren. Das auf die Bestrahlung folgende Tempern kann identisch mit den weiter oben beschriebenen Verfahren durchgeführt werden. Auch die Vorhersage der Kompaktierung und Dekompaktierung des Substrates durch die Bestrahlung und das Tempern ist ebenso wie bei der Herstellung des reflektierenden optischen Elementes möglich. Folglich kann die Reduzierung der Korrektur der Substratoberfläche durch Dekompaktierung bei der Bestrahlung, also der Kompaktierung des Substrats, vorgehalten werden, um eine vorteilhafte minimale Abweichung der Substratoberfläche vom Sollwert der Oberfläche zu erreichen.

[0032] Die Erfindung schließt weiterhin ein reflektives optisches Element für den EUV-Wellenlängenbereich mit einer auf der Oberfläche eines Substrats aufgetragenen Schichtanordnung ein, wobei die Schichtanordnung mindestens ein Schichtteilsystem umfasst. Das Substrat weist in einem an die Schichtanordnung angrenzenden Oberflächenbereich bis zu einem Abstand von 5 µm von der Oberfläche eine mittlere Dichte auf, welche um mehr als 0,1 Vol.-% höher ist als die mittlere Dichte des Substrats in einem Abstand von 1 mm von der Oberfläche. Weiterhin weist das Substrat wenigstens entlang einer gedachten Fläche mit einem festen Abstand zwischen 1 µm und 100 µm, bevorzugt zwischen 1 µm und 30 µm von der Oberfläche eine Variation der Dichte von mehr als 0,1 Vol.-% auf. Die zeitliche Veränderung der Dichte, welche um mehr als 0,1 Vol.-% höher ist als die mittlere Dichte des Substrats in einem Abstand von 1mm von der Oberfläche beträgt dabei in den ersten -7 Jahren nach der Herstellung des optischen Elements weniger als 20%.

[0033] Die Formstabilität des Substrats hat direkten Einfluss auf die Substratoberfläche und damit auf die Abbildungsqualität des optischen Elementes. Die Deformationen der Substratoberfläche durch Erwärmung des reflektierenden optischen Elementes im Betrieb können durch Kühlung oder geeignete Manipulatoren kompensiert werden. Die Veränderung der Substratoberfläche durch Langzeiteffekte, die beispielsweise durch eine Veränderung des Substrats über die Zeit durch Dekompaktierung hervorgerufen werden können, ist ebenfalls über Manipulatoren kompensierbar. Die Größenordnung der Veränderungen der Substratoberfläche kann aber in einem Bereich liegen, der den limitierten Verfahrensweg der Manipulatoren überschreiten kann, insbesondere in Kombination mit den durch die Erwärmung im Betrieb hervorgerufenen Deformationen. Durch das langzeitstabile Substrat kann dieser Anteil vorteilhaft auf einen akzeptablen Wert minimiert werden.

[0034] Weiterhin schließt die Erfindung ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie mit einem Spiegel als reflektives optisches Element nach der weiter oben beschriebenen Ausführungsform und/ oder mit einem

Spiegel als reflektives optisches Element, der nach einem der weiter oben beschriebenen Verfahren hergestellt wurde ein.

[0035] Projektionsobjektive für die Mikrolithographie sind hohen Belastungen durch die Nutzstrahlung, deren Wellenlänge bevorzugt 13,5nm beträgt, und Strahlung anderer Wellenlängen ausgesetzt, wodurch diese während des Betriebes erwärmt werden. Durch die Verwendung einer der weiter oben beschriebenen Spiegel kann die Veränderung der Spiegeloberfläche über die Zeit durch Dekompaktierung des Materials vorteilhaft minimiert werden.

[0036] Weiterhin schließt die Erfindung eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem Projektionsobjektiv nach der weiter oben beschriebenen Ausführungsform ein.

[0037] Projektionsbelichtungsanlagen werden rund um die Uhr betrieben und jede Störung wirkt sich auf die Arbeitsleistung der Projektionsbelichtungsanlage aus. Durch die Verwendung von langzeitstabilen Projektionsoptiken können die Wartungszeiten der Projektionsbelichtungsanlage vorteilhaft reduziert werden.

[0038] Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele und Varianten der Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert. Es zeigen

Fig. 1 den prinzipiellen Aufbau einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage, in welcher die Erfindung verwirklicht sein kann,

Fig. 2 a-c eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Herstellung eines erfindungsgemäßen optischen Elements und

Fig. 3 a-c eine schematische Darstellung einer Oberflächenform eines erfindungsgemäßen Elementes über den Prozess.

[0039] **Fig. 1** zeigt exemplarisch den prinzipiellen Aufbau einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage **1** für die Mikrolithographie, in welcher die Erfindung Anwendung finden kann. Ein Beleuchtungssystem der Projektionsbelichtungsanlage **1** weist neben einer Lichtquelle **3** eine Beleuchtungsoptik **4** zur Beleuchtung eines Objektfeldes **5** in einer Objektebene **6** auf. Eine durch die Lichtquelle **3** erzeugte EUV-Strahlung **14** als optische Nutzstrahlung wird mittels eines in der Lichtquelle **3** integrierten Kollektors derart ausgerichtet, dass sie im Bereich einer Zwischenfokusebene **15** einen Zwischenfokus durchläuft, bevor sie auf einen Feldfacettenspiegel **2** trifft. Nach dem Feldfacettenspiegel **2** wird die EUV-Strahlung **14** von einem Pupillenfacettenspiegel **16** reflektiert. Unter Zuhilfenahme des Pupillenfacettenspiegels **16** und einer optischen Baugruppe **17** mit Spiegeln **18**, **19** und **20** werden Feldfacetten des Feldfacettenspiegels **2** in das Objektfeld **5** abgebildet.

[0040] Beleuchtet wird ein im Objektfeld **5** angeordnetes Reticle **7**, das von einem schematisch dargestellten Reticlehalter **8** gehalten wird. Eine lediglich schematisch dargestellte Projektionsoptik **9** dient zur Abbildung des Objektfeldes **5** in ein Bildfeld **10** in eine Bildebene **11**. Abgebildet wird eine Struktur auf dem Reticle **7** auf eine lichtempfindliche Schicht eines im Bereich des Bildfeldes **10** in der Bildebene **11** angeordneten Wafers **12**, der von einem ebenfalls ausschnittsweise dargestellten Waferhalter **13** gehalten wird. Die Lichtquelle **3** kann Nutzstrahlung insbesondere in einem Wellenlängenbereich zwischen 5 nm und 30 nm emittieren.

[0041] Die Erfindung kann ebenso in einer DUV-Anlage verwendet werden, die nicht dargestellt ist. Eine DUV-Anlage ist prinzipiell wie die oben beschriebene EUV-Anlage **1** aufgebaut, wobei in einer DUV-Anlage Spiegel und Linsen als optische Elemente verwendet werden können und die Lichtquelle einer DUV-Anlage eine Nutzstrahlung in einem Wellenlängenbereich von 100 nm bis 300 nm emittiert.

[0042] **Fig. 2** zeigt schematisch die Verfahrensschritte a) bis c) zur Herstellung eines erfindungsgemäßen reflektiven optischen Elements, wie zum Beispiel eines erfindungsgemäßen Spiegels **18**, **19**, **20** oder eines erfindungsgemäßen Reticles **7** aus **Fig. 1**. In Verfahrensschritt a) wird ein Spiegel **18**, **19**, **20** bzw. ein Reticle **7** bereitgestellt, welcher bzw. welches ein Substrat **30** mit einem Schichtteilsystem **39**, welches für die Reflexion im EUV Wellenlängenbereich geeignet ist, und eine Schutzschicht **38** umfasst. Das Schichtteilsystem **39** kann aus einer periodischen Abfolge von mindestens einer Periode an Einzelschichten bestehen, wobei die Periode zwei Einzelschichten mit unterschiedlichem Brechungsindex im EUV-Wellenlängenbereich umfasst. Das Schichtteilsystem **39** kann auch aus nur einer Schicht bestehen oder ein Schichtsystem mit aperiodischer Abfolgen von Schichten umfassen. Die unter der Reflexionsschicht **39** angeordnete Schutzschicht **38** soll das Eindringen von EUV-Strahlung in das Substrat **30** verhindern. Die Oberflächenform **31** des Spiegels **18**, **19**, **20** bzw. des Reticles **7** wird mittels eines Interferometers vermessen. Die Vermessung mittels des Interferometers ist der Übersichtlichkeit wegen in **Fig. 2** nicht dargestellt. Dabei wird in Verfahrensschritt a) festgestellt,

dass der Spiegel **18, 19, 20** bzw. das Reticle **7** eine unerwünschte Oberflächenformabweichung **32** von der gewünschten Soll-Oberflächenform aufweist.

[0043] In Verfahrensschritt b) wird diese Oberflächenformabweichung **32** mittels einer Bestrahlung **33** durch die dadurch hervorgerufene Kompaktierung des Substratbereichs **34** korrigiert. Die Bestrahlung **33** wird durch Elektronen **36** einer Elektronenstrahlquelle **35** bereitgestellt. Hierbei kommt insbesondere eine Elektronenbestrahlung **33** mit Elektronen **36** einer Energie zwischen 5 und 80 keV bei Dosen zwischen 0,1 J/mm² und 2500 J/mm² und/oder eine Photonenbestrahlung mit Hilfe eines Puls lasers mit Wellenlängen zwischen 0,3 und 3 µm, Repetitionsraten zwischen 1 Hz und 100 MHz und Pulsenergien zwischen 0,01 µJ und 10 mJ in Frage. Durch die Kompaktierung des Substratbereichs **34** resultiert entlang einer gedachten Fläche **37** mit einem festen Abstand zur Oberfläche, welche durch den verdichteten Substratbereich **34** verläuft, eine Variation der Dichte des Substratmaterials von mehr als 0,1 Vol.-%. Dabei wird unter der Variation der Dichte die Differenz zwischen dem maximalen Wert der Dichte und dem minimalen Wert der Dichte entlang dieser gedachten Fläche **37** konstanten Abstandes verstanden. Bei einer homogenen Bestrahlung **33** des Substratbereichs **34** bedeutet diese Vorschrift, dass der Substratbereich **34** eine um mehr als 0,1 Vol.-% höhere Dichte aufweist als ein benachbarter unbestrahlter Bereich mit gleichem Abstand zur Oberfläche. Die Korrektur der Oberflächenform wird überkorrigiert, um Effekte im weiteren Verfahren vorzuhalten und somit nach dem letzten Verfahrensschritt c) die gewünschte Oberflächenform zu erreichen. Weitere Details werden bei Verfahrensschritt c) und unter **Fig. 3** beschrieben.

[0044] Zuletzt wird das Substrat **30** im Verfahrensschritt c) getempert. Das Tempern wird durch Erwärmen des Substrats **30** auf eine bestimmte Temperatur und Halten der Temperatur über einen bestimmten Zeitraum erreicht. Die Erwärmung des Substrats **30** kann durch Laserlicht **41** einer Laserquelle **40** erfolgen, welches die Substratoberfläche **31** vollständig oder auch nur teilweise bestrahlt. Durch das Tempern des Substrates **30** wird die Kompaktierung teilweise wieder rückgängig gemacht, d.h. die Oberflächenformabweichung **32** verändert sich gegenüber dem Zustand unmittelbar nach dem Verfahrensschritt b) wieder in entgegengesetzte Richtung. Wie unter Verfahrensschritt b) erwähnt, kann diese Dekompaktierung bereits bei der Kompaktierung zur Korrektur der Substratoberfläche **31** vorgehalten werden, so dass durch den letzten Verfahrensschritt c) des Temperns die Soll-Oberflächenform erreicht wird. Alternativ kann die Erwärmung des Substrats **30** auch in einem Ofen **42** erfolgen, wie es aus Verfahren zum Tempern von Metallen bekannt ist. Das Substrat **30** wird dabei mit allen bereits montierten Anbauteilen in den Ofen **42** gelegt. Am Ofen **42** kann dann eine vorbestimmte Temperatur-Zeit-Kurve eingestellt werden, die zu dem gewünschten Ergebnis einer Oberflächenform, die der Soll-Oberflächenform entspricht, führt.

[0045] Das durch die Verfahrensschritte a) bis c) der **Fig. 2** hergestellte reflektive optische Element kann anschließend als EUV Spiegel **18, 19, 20** oder als EUV Reticle **7** in einer Projektionsbelichtungsanlage eingesetzt werden.

[0046] In den **Fig. 3 a-c** sind schematische mittels einer Interferometermessung erstellte Bilder der Substratoberfläche **31** beziehungsweise eine durch Berechnungen erstellte Differenz von zwei mittels Interferometermessungen erstellten Bildern einer Substratoberfläche **31** dargestellt. Die Linien in den **Fig. 3a** bis **Fig. 3c** sind als Höhenlinien zu verstehen, wobei durchgezogene Linien eine Erhebung aus der Zeichenebene heraus und die gestrichelten Linien eine Vertiefung in die Zeichenebene hinein darstellen.

[0047] **Fig. 3a** zeigt dabei die Substratoberfläche **31** nach einer langen Bestrahlungsdauer durch EUV-Nutzstrahlung, die beispielsweise 4000h beträgt. Die **Fig. 3b** zeigt die Substratoberfläche **31** desselben Substrats **30** nach dem Verfahrensschritt b). Bildet man rechnerisch die Differenz der beiden Messungen, so umfasst diese einen homogenen Anteil und einen inhomogenen Anteil. Der homogene Anteil der Differenz ist so viel größer als der inhomogene Anteil, dass der inhomogene Anteil für eine mögliche Vorhersage der Oberflächenform nach dem weiter oben beschriebenen Verfahren nicht relevant ist. Daraus leitet sich eine einfache Rechenregel wie folgt ab:

$$\text{Oberflächenform}_{c)} = \text{KF} \times \text{Oberflächenform}_{b)} + \text{inhomogene Differenz}$$

[0048] Wobei

- die Oberflächenform_{c)} für die nach dem Verfahrensschritt c), also dem Tempern, erreichte finale Oberflächenform des Substrats **30**,
- KF eine von dem Substratmaterial, der Geometrie des Substrats **30** und der Größe der Oberflächenkorrektur abhängiger Faktor,
- Oberflächenform_{b)} die Oberflächenform nach dem Verfahrensschritt b) und
- inhomogene Differenz für einen schlecht vorhersagbaren Restfehler steht.

[0049] Auf Basis von Versuchen, bei denen das Substratmaterial **30** durch Bestrahlung **33** wie in Verfahrensschritt b) weiter oben beschrieben und danach durch Tempern nach dem weiter oben beschriebenen Verfahrensschritt c) behandelt wurden, können Modelle über das Verhalten des Materials bei Kompaktierung durch Bestrahlung **33** und Dekompaktierung durch Tempern erstellt werden. Diese Modelle können durch Unterstützung von FEM-Modellen zur Ermittlung des Faktors KF verwendet werden. Dabei können die FEM-Modelle die durch Kompaktierung entstehenden Spannungen, unter Berücksichtigung der Geometrie des Substrats **30**, in Änderungen der Substratoberfläche **31** übersetzen. Damit kann bereits im Verfahrensschritt b) die im Verfahrensschritt c) entstehende Dekompaktierung und deren Auswirkung auf die Oberflächenformabweichung **32** vorgehalten werden. Das Verfahren kann zur Herstellung eines reflektierenden optischen Elementes **7, 18, 19, 20** mit maximaler Langzeitstabilität für die Verwendung in einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage verwendet werden. Darüber hinaus kann das Verfahren auch zur Korrektur von bereits fertig hergestellten reflektierenden optischen Elementen angewendet werden.

Bezugszeichenliste

- | | |
|-----------|---------------------------------|
| 1 | Projektionsbelichtungsanlage |
| 2 | Facettenspiegel |
| 3 | Lichtquelle |
| 4 | Beleuchtungsoptik |
| 5 | Objektfeld |
| 6 | Objektebene |
| 7 | Reticle |
| 8 | Reticlehalter |
| 9 | Projektionsoptik |
| 10 | Bildfeld |
| 11 | Bildebene |
| 12 | Wafer |
| 13 | Waferhalter |
| 14 | EUV-Strahlung |
| 15 | Zwischenfeldfokusebene |
| 16 | Pupillenfacettenspiegel |
| 17 | Baugruppe |
| 18 | Spiegel |
| 19 | Spiegel |
| 20 | Spiegel |
| 30 | Substrat |
| 31 | Substratoberfläche |
| 32 | Oberflächenformabweichung |
| 33 | Bestrahlung |
| 34 | (kompaktierter) Substratbereich |

- 35** Elektronenquelle
- 36** Elektronen(bestrahlung)
- 37** (gedachte) Fläche
- 38** Schutzschicht
- 39** Reflexionsschicht
- 40** Laserquelle
- 41** Laserlicht
- 42** Ofen

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- US 6844272 B2 [0003]
- US 6849859 B2 [0003]
- DE 10239859 A1 [0003]
- US 6821682 B1 [0003]
- US 20040061868 A1 [0003]
- US 20030006214 A1 [0003]
- US 200300081722 A1 [0003]
- US 6898011 B2 [0003]
- US 7083290 B2 [0003]
- US 7189655 B2 [0003]
- US 20030058986 A1 [0003]
- DE 102007051291 A1 [0003]
- EP 1521155 A2 [0003]
- US 4298247 [0003]
- DE 102011084117 A1 [0005]
- WO 2011/020655 A1 [0005]

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines reflektierenden optischen Elementes für eine Projektionsbelichtungsanlage (1), welches ein Substrat (30) mit einer Substratoberfläche (31), eine Schutzschicht (38) und ein Schichtteilsystem (39) geeignet für den EUV Wellenlängenbereich umfasst, mit den folgenden Verfahrensschritten:

- a) Vermessen der Substratoberfläche (31)
- b) Bestrahlen des Substrats (30) mit Hilfe von Elektronen (36)
- c) Tempern des Substrats (30)

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Tempern des Substrats (30) Temperaturen zwischen 22°C und 400°C verwendet werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Tempern des Substrats (30) die Temperatur über eine Dauer von 1h bis 1000h gehalten wird.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Tempern des Substrats (30) die Temperatur über die Zeit variiert.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Substrat (30) beim Tempern homogen erhitzt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Substrat (30) beim Tempern lokal erhitzt wird.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Temperatur durch Bestrahlung (41) mit einem Laser (40) mit einer Wellenlänge von 2,6µm bis 2,8 µm, insbesondere mit einer Wellenlänge von 2,755µm in das Substrat (30) eingebracht wird.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Änderung des Substrats (30) durch das Tempern bei der Bestrahlung (33) des Substrats (30) im Verfahrensschritt b) berücksichtigt wird.

9. Reflektives optisches Element für den EUV-Wellenlängenbereich mit einer auf der Oberfläche eines Substrats (30) aufgebrachten Schichtanordnung (39),

- wobei die Schichtanordnung mindestens ein Schichtteilsystem umfasst, - und wobei das Substrat (30) in einem an die Schichtanordnung angrenzenden Oberflächenbereich bis zu einem Abstand von 5 µm von der Oberfläche eine mittlere Dichte aufweist, welche um mehr als 0,1 Vol.-% höher ist als die mittlere Dichte des Substrats (30) in einem Abstand von 1 mm von der Oberfläche

- und wobei das Substrat (30) wenigstens entlang einer gedachten Fläche (37) mit einem festen Abstand zwischen 1 µm und 100 µm, bevorzugt zwischen 1 µm und 30 µm von der Oberfläche eine Variation der Dichte von mehr als 0,1 Vol.-% aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zeitliche Veränderung der Dichte, welche um mehr als 0,1 Vol.-% höher ist als die mittlere Dichte des Substrats (30) in einem Abstand von 1mm von der Oberfläche in den ersten 7 Jahren nach der Herstellung des optischen Elements weniger als 20% beträgt.

10. Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie umfassend einen Spiegel (18, 19, 20) als reflektives optisches Element nach Anspruch 9 und/oder einen Spiegel (18, 19, 20) als reflektives optisches Element, der nach einem Verfahren der Ansprüche 1 bis 8 hergestellt ist.

11. Projektionsbelichtungsanlage (1) für die Mikrolithographie umfassend ein Projektionsobjektiv nach Anspruch 10.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

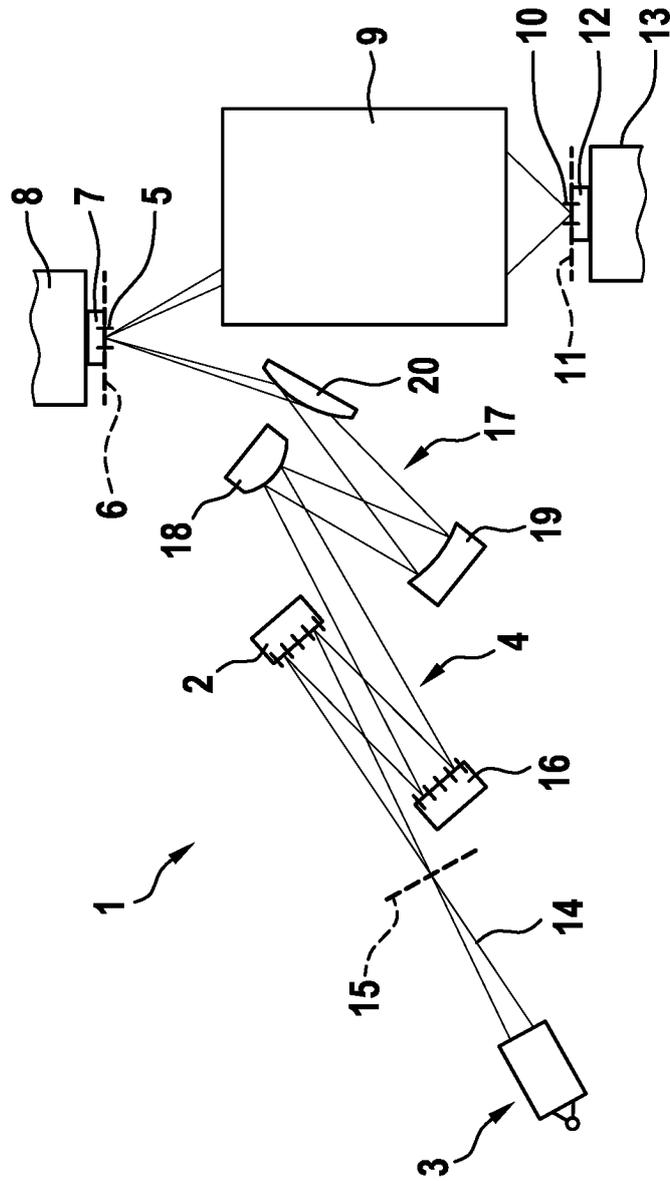


Fig. 2

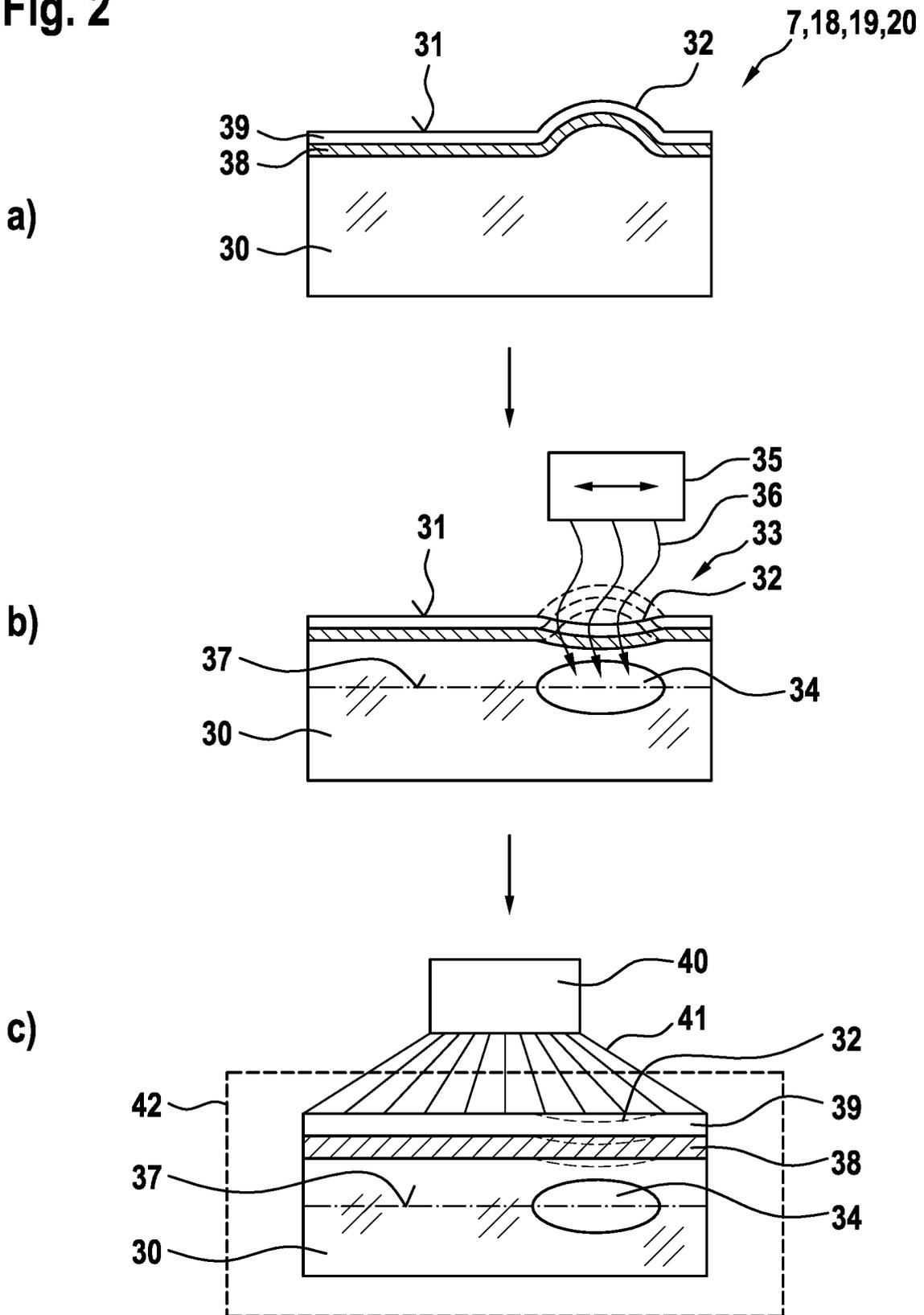
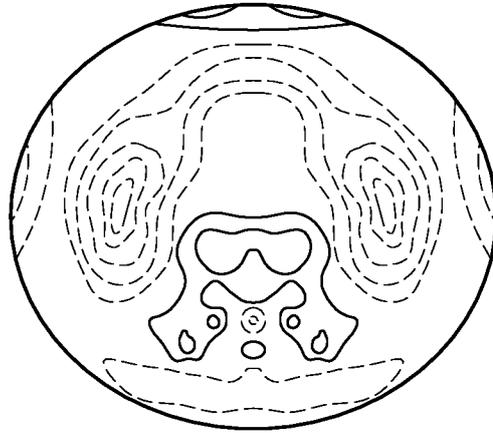
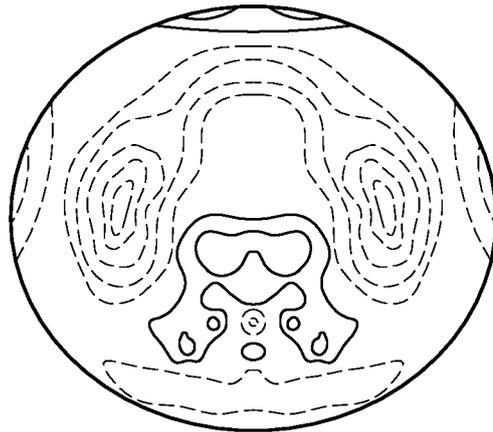


Fig. 3

a)



b)



c)

