



(10) **DE 10 2013 204 427 A1** 2014.09.18

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2013 204 427.5**

(22) Anmeldetag: **14.03.2013**

(43) Offenlegungstag: **18.09.2014**

(51) Int Cl.: **G02B 7/192** (2006.01)

**G02B 7/185** (2006.01)

**G02B 7/00** (2006.01)

**G02B 5/08** (2006.01)

**G02B 1/00** (2006.01)

**G03F 7/20** (2006.01)

**G02B 26/08** (2006.01)

**G05D 23/00** (2006.01)

(71) Anmelder:

**Carl Zeiss SMT GmbH, 73447 Oberkochen, DE**

(72) Erfinder:

**Hauf, Markus, 89075 Ulm, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**DE 10 2009 039 400 A1**

**DE 10 2011 005 778 A1**

**DE 10 2011 005 840 A1**

**DE 10 2011 081 259 A1**

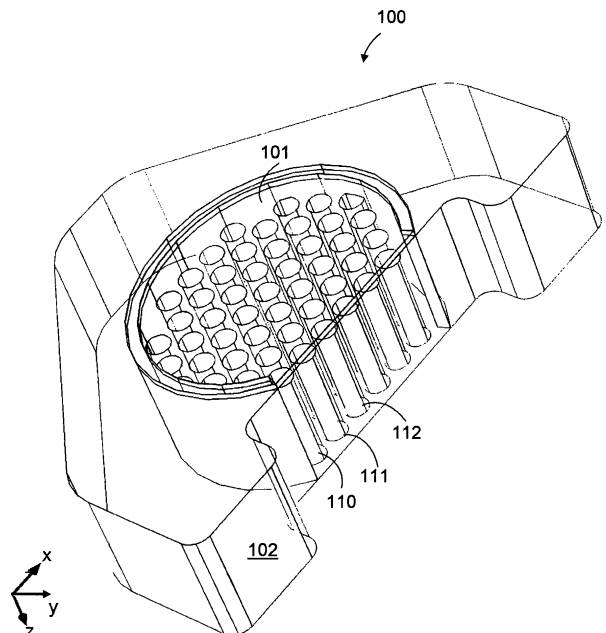
**WO 2009/ 046 955 A2**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Anordnung zur thermischen Aktuierung eines Spiegels, insbesondere in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur thermischen Aktuierung eines Spiegels, insbesondere in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, wobei der Spiegel ein Spiegelsubstrat (102, 202) und eine optische Wirkfläche (101, 201) sowie wenigstens einen sich von einer nicht der optischen Wirkfläche entsprechenden Oberfläche des Spiegels (100) aus in Richtung dieser Wirkfläche (101, 201) erstreckenden Zugangskanal (110, 111, 112, 210) aufweist, wobei in den wenigstens einen Zugangskanal (110, 111, 112, 210) ein Kühlelement (120, 220) mit variabel einstellbarer Kühlleistung hineinragt, und wobei wenigstens eine Wärmequelle zur Einkopplung von variabel einstellbarer Heizleistung in einen an die optische Wirkfläche angrenzenden Bereich des Spiegelsubstrats (102, 202) vorgesehen ist.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur thermischen Aktuierung eines Spiegels, insbesondere in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage.

**[0002]** Mikrolithographie wird zur Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente, wie beispielsweise integrierter Schaltkreise oder LCD's, angewendet. Der Mikrolithographieprozess wird in einer sogenannten Projektionsbelichtungsanlage durchgeführt, welche eine Beleuchtungseinrichtung und ein Projektionsobjektiv aufweist. Das Bild einer mittels der Beleuchtungseinrichtung beleuchteten Maske (= Retikel) wird hierbei mittels des Projektionsobjektivs auf ein mit einer lichtempfindlichen Schicht (Photoresist) beschichtetes und in der Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnetes Substrat (z. B. ein Siliziumwafer) projiziert, um die Maskenstruktur auf die lichtempfindliche Beschichtung des Substrats zu übertragen.

**[0003]** In für den EUV-Bereich ausgelegten Projektionsobjektiven, d. h. bei Wellenlängen von z. B. etwa 13 nm oder etwa 7 nm, werden mangels Verfügbarkeit geeigneter lichtdurchlässiger refraktiver Materialien Spiegel als optische Komponenten für den Abbildungsprozess verwendet. Ein in der Praxis auftretendes Problem ist, dass die EUV-Spiegel insbesondere infolge Absorption der von der EUV-Lichtquelle emittierten Strahlung eine Erwärmung und eine damit einhergehende thermische Ausdehnung bzw. Deformation erfahren, welche wiederum eine Beeinträchtigung der Abbildungseigenschaften des optischen Systems zur Folge haben kann. Dabei kann aufgrund der Verwendung spezieller Beleuchtungseinstellungen (wie z. B. Dipol- oder Quadrupolsettings) im Lithographieprozess und aufgrund der durch das Retikel verursachten Beugungsordnungen der durch die EUV-Strahlung bewirkte Wärmeeintrag über den optisch wirksamen Querschnitt pupillennaher Spiegel variieren, so dass ein inhomogener Wärmeeintrag in den Spiegel stattfindet.

**[0004]** Um diese Effekte gegebenenfalls kompensieren zu können, aber auch zur gezielten Veränderung der optischen Eigenschaften eines Spiegels z. B. zur Kompensation von im System auftretenden Aberrationen ist es bekannt, die Spiegeldeformation im Wege einer thermischen Aktuierung zu steuern. Ansätze zur Spiegeltemperaturmessung und/oder Aktuierung eines Spiegels oder zu dessen gezielter Deformierung sind z. B. aus WO 2010/018753 A1, US 2004/0051984 A1, WO 2008/034636 A2, DE 10 2009 024 118 A1, WO 2009/046955 A2 und WO 2012/041744 A1 bekannt.

**[0005]** Ein bei der thermischen Aktuierung bzw. Deformation eines Spiegels in der Praxis auftretendes Problem ist, dass einerseits zur Einbringung von Deformationen in das Spiegelsubstratmaterial im Wege der thermischen Expansion oder Kontraktion prinzipiell eine ausreichende Sensitivität des Spiegelsubstratmaterials gegenüber thermischen Lasten vorhanden sein muss, andererseits jedoch Sensitivitäten gegenüber den im „normalen“ Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage auftretenden optischen Lasten und den damit einhergehenden Temperatureffekten unerwünscht sind. Mit anderen Worten ergibt sich ohne weitere Maßnahmen bei Auslegung des Spiegels im Sinne einer zunehmenden Empfindlichkeit auf zum Zwecke der Deformationserzeugung eingebrachte thermische Lasten im Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage infolge der unvermeidlichen optischen Lasten durch die eingesetzte (z. B. EUV-) Strahlung ein zunehmendes Auftreten von thermisch bedingten Aberrationen.

**[0006]** Vor dem obigen Hintergrund ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Anordnung zur thermischen Aktuierung eines Spiegels in einem optischen System bereitzustellen, welche eine effiziente thermische Aktuierung bei zugleich geringer Sensitivität gegenüber den im normalen Betrieb auftretenden optischen Lasten ermöglicht.

**[0007]** Diese Aufgabe wird durch die Anordnung gemäß den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1 gelöst.

**[0008]** Gemäß einem Aspekt der Erfindung betrifft die Erfindung eine Anordnung zur thermischen Aktuierung eines Spiegels in einem optischen System, insbesondere in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, wobei der Spiegel ein Spiegelsubstrat und eine optische Wirkfläche sowie wenigstens einen sich von einer nicht der optischen Wirkfläche entsprechenden Oberfläche des Spiegels aus in Richtung dieser Wirkfläche erstreckenden Zugangskanal aufweist,

- wobei in den wenigstens einen Zugangskanal ein Kühlelement mit variabel einstellbarer Kühlleistung hineinragt, und
- wobei wenigstens eine Wärmequelle zur Einkopplung von variabel einstellbarer Heizleistung in einen an die optische Wirkfläche angrenzenden Bereich des Spiegelsubstrats vorgesehen ist.

**[0009]** Der Erfindung liegt insbesondere das Konzept zugrunde, durch Einsatz von hinsichtlich ihrer Kühlleistung variablen Kühlelementen in Kombination mit einer hinsichtlich ihrer Heizleistung variabel einstellbaren Wärmequelle zwei regelungstechnisch unabhängig voneinander einstellbare Freiheitsgrade bei der thermischen Aktuierung bereitzustellen. Hierdurch wird die Möglichkeit geschaffen, ein sich über den Spiegel bzw. das Spiegelsubstrat ausbildendes

Temperaturprofil derart einzustellen, dass zum einen der in unmittelbarer Nähe der optischen Wirkfläche bzw. der dort vorhandenen reflektierenden Beschichtung befindliche Spiegelsubstratbereich, welcher im Betrieb des optischen Systems bzw. der Projektionsbelichtungsanlage aufgrund der auf die optischen Wirkfläche auftreffenden elektromagnetischen (z. B. EUV-)Strahlung unvermeidbaren optischen Lasten ausgesetzt ist, nur eine vergleichsweise geringe oder sogar gänzlich zu vernachlässigende thermische Sensitivität aufweist, indem nämlich in diesem der optischen Wirkfläche nahen Bereich die sogenannte Nulldurchgangstemperatur (= „Zero-Crossing-Temperatur“) eingestellt wird. Bei dieser Zero-Crossing-Temperatur weist der thermische Ausdehnungskoeffizient in seiner Temperaturabhängigkeit einen Nulldurchgang auf, in dessen Umgebung keine oder nur eine vernachlässigbare thermische Ausdehnung des Spiegelsubstratmaterials erfolgt.

**[0010]** Zum anderen kann aufgrund der o. g. Bereitstellung von zwei regelungstechnisch unabhängig voneinander einstellbaren Parametern bzw. Freiheitsgraden in einem von der optischen Wirkfläche weiter entfernten Bereich des Spiegelsubstratmaterials eine gänzlich andere Temperatur (als in Nähe der optischen Wirkfläche) eingestellt werden, bei welcher sich für das betreffende Material eine vergleichsweise größere Sensitivität gegenüber thermischen Lasten ergibt, wie sie für eine gezielte thermische Aktuierung bzw. Deformation erwünscht ist.

**[0011]** Insbesondere kann beispielsweise bei Zunahme der im Betrieb des optischen Systems auftretenden optischen Lasten und zum Zwecke der Aufrechterhaltung der Zero-Crossing-Temperatur in unmittelbarer Nähe der optischen Wirkfläche des Spiegels die Heizleistung der Wärmequelle – bei unveränderter Kühlleistung des Kühlelements – reduziert werden, mit der Folge, dass die Wärmebilanz in unmittelbarer Nähe der optischen Wirkfläche beibehalten wird, wohingegen in dem von der optischen Wirkfläche entfernten Bereich, welcher sich auf einer Temperatur deutlich unterhalb der Zero-Crossing-Temperatur befindet, infolge des in diesem entfernten Bereich größeren und nicht mehr vernachlässigbaren linearen Expansionskoeffizienten eine effiziente thermische Aktuierung bzw. Deformation erfolgen kann.

**[0012]** Im Ergebnis kann durch geeignete Kombination aus Heizleistung der Wärmequelle einerseits mit der ebenfalls variablen einstellbaren Kühlleistung des Kühlelements andererseits jederzeit die Temperatur in dem von der optischen Wirkfläche entfernten Bereich gezielt manipuliert werden, während die Temperatur in unmittelbarer Nähe der optischen Wirkfläche im wesentlichen konstant (nämlich vorzugsweise bei der obengenannten Zero-Crossing-Temperatur) gehalten wird. In Folge der so in dem von

der optischen Wirkfläche entfernten Bereich gegebenen Empfindlichkeit gegenüber Temperaturänderungen lassen sich dort Spiegeldeformationen generieren, wobei zugleich der Spiegel im Bereich der optischen Wirkfläche weiterhin unempfindlich gegenüber den im Betrieb des optischen Systems aufgrund der auftreffenden elektromagnetischen Strahlung unvermeidlichen optischen Lasten bleibt.

**[0013]** Gemäß einer Ausführungsform weist die Anordnung eine Mehrzahl von Zugangskanälen auf. Dabei kann insbesondere jedem dieser Zugangskanäle jeweils ein Kühlelement zugeordnet sein, wobei vorzugsweise die Kühlelemente in ihrer Kühlleistung unabhängig voneinander einstellbar sind.

**[0014]** Gemäß einer Ausführungsform weist das wenigstens eine Kühlelement eine rohrförmige Geometrie auf.

**[0015]** Gemäß einer Ausführungsform weist die Wärmequelle wenigstens einen Heizstrahler zur Einkopplung von Heizstrahlung in den wenigstens einen Zugangskanal auf. Des Weiteren kann jedem der Zugangskanäle jeweils ein Heizstrahler zugeordnet sein, wobei vorzugsweise die Heizstrahler in ihrer Heizleistung unabhängig voneinander einstellbar sind. Ferner kann der wenigstens eine Heizstrahler in dem der optischen Wirkfläche zugewandten Endabschnitt des Zugangskanals angeordnet sein. Die Erfindung ist jedoch hierauf nicht beschränkt, so dass in weiteren Ausführungsformen der Heizstrahler z. B. auch im Bereich der Spiegerrückseite angeordnet sein kann, um die Heizstrahlung über Reflexion entlang des Zugangskanals (vorzugsweise mit sogenanntem „streifenden Einfall“, „grazing incidence“) einzukoppeln.

**[0016]** Die Heizstrahlung kann z. B. eine Wellenlänge von wenigstens 2.5  $\mu\text{m}$ , insbesondere wenigstens 5  $\mu\text{m}$ , aufweisen.

**[0017]** In weiteren Ausführungsformen kann die Wärmequelle auch wenigstens einen Heizdraht oder wenigstens eine wärmedissipierende Leiterbahn (z. B. in Form einer strukturierten elektrisch leitenden Schicht) aufweisen, welcher bzw. welche zwischen Spiegelsubstrat und reflektierender Beschichtung des Spiegels angeordnet ist.

**[0018]** Gemäß einer Ausführungsform erstreckt sich der Zugangskanal von der der optischen Wirkfläche entgegengesetzten Oberfläche des Spiegels aus in Richtung der optischen Wirkfläche.

**[0019]** Gemäß einer Ausführungsform weist der Spiegel einen ersten Spiegelsubstratbereich aus einem ersten Spiegelsubstratmaterial und einen zweiten Spiegelsubstratbereich aus einem von dem ersten Spiegelsubstratmaterial verschiedenen zweiten

Spiegelsubstratmaterial auf, wobei der zweite Spiegelsubstratbereich von der optischen Wirkfläche des Spiegels weiter entfernt ist als der erste Spiegelsubstratbereich. Dabei weist vorzugsweise das erste Spiegelsubstratmaterial bei einer vorgegebenen Temperatur einen betragsmäßig geringeren linearen Expansionskoeffizienten auf als das zweite Spiegelsubstratmaterial.

**[0020]** Infolge dieser Ausgestaltung ergibt sich die beschriebene, zum Zwecke der gezielten Deformation erwünschte größere Sensitivität des Spiegelsubstratmaterials in dem von der optischen Wirkfläche weiter entfernten Bereich nicht allein aufgrund des sich innerhalb des Spiegelsubstratmaterials ausbildenden Temperaturgradienten, sondern auch infolge des Übergangs zwischen unterschiedlichen Spiegelsubstratmaterialien, was insbesondere dann von Vorteil ist, wenn der sich im Spiegelsubstrat ausbildende Temperaturgradient allein zur Erzielung der zur Deformation erwünschten Sensitivität gegenüber thermischen Lasten bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Zero-Crossing-Temperatur an der optischen Wirkfläche noch nicht ausreicht.

**[0021]** Gemäß einer Ausführungsform ist das erste Spiegelsubstratmaterial ein Material mit ultraniedriger thermischer Expansion „Ultra-Low-Expansion-Material“, z. B. ein unter der Bezeichnung ULE™ von der Firma Corning Inc. vertriebenes Titanium-Silicatglas. Ferner kann das zweite Spiegelsubstratmaterial z. B. amorphes oder kristallines Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) sein.

**[0022]** Gemäß einer Ausführungsform weist der Spiegel eine reflektierende Beschichtung auf, wobei zwischen dem Spiegelsubstrat und der reflektierenden Beschichtung eine absorbierende Schicht zur Absorption von in den Zugangskanal eingekoppelter Heizstrahlung angeordnet ist.

**[0023]** Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur thermischen Aktuierung eines Spiegels, insbesondere in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, wobei der Spiegel ein Spiegelsubstrat, eine optische Wirkfläche und wenigstens einen sich von einer nicht der optischen Wirkfläche entsprechenden Oberfläche des Spiegels aus in Richtung dieser Wirkfläche erstreckenden Zugangskanal sowie ein in den Zugangskanal hineinragendes Kühlelement mit variabel einstellbarer Kühlleistung aufweist,

- wobei über wenigstens eine Wärmequelle Heizleistung in einen an die optische Wirkfläche angrenzenden Bereich des Spiegelsubstrats eingekoppelt wird, und
- wobei durch Variation dieser Heizleistung der Wärmequelle und/oder der Kühlleistung des Kühlelementes ein definiertes Deformationsprofil des Spiegels erzeugt wird;
- wobei die Variation der Heizleistung der Wärmequelle und/oder der Kühlleistung des Kühlelemen-

tes derart erfolgt, dass die Temperatur des Spiegels im Bereich der optischen Wirkfläche bis auf  $\pm 3$  Kelvin (K) auf einem konstanten Wert gehalten wird.

**[0024]** Dieser konstante Wert entspricht vorzugsweise der Zero-Crossing-Temperatur des Spiegelsubstratmaterials in dem betreffenden Bereich. Gemäß einer Ausführungsform liegt der konstante Wert z. B. im Bereich von  $22^\circ\text{C}$  bis  $55^\circ\text{C}$ , insbesondere im Bereich von  $22^\circ\text{C}$  bis  $40^\circ\text{C}$ .

**[0025]** Gemäß einer Ausführungsform kann die Variation der Heizleistung der Wärmequelle derart erfolgen, dass ein im Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage durch optische Lasten verursachter Wärmeeintrag in die optische Wirkfläche wenigstens teilweise kompensiert wird. Auf diese Weise kann die Temperatur der optischen Wirkfläche auch bei variablen optischen Lasten konstant gehalten werden.

**[0026]** Zu weiteren bevorzugten Ausgestaltungen oder Vorteilen des Verfahrens wird auf die vorstehenden Ausführungen in Verbindung mit der erfindungsgemäßen Anordnung Bezug genommen.

**[0027]** Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind der Beschreibung sowie den Unteransprüchen zu entnehmen.

**[0028]** Die Erfindung wird nachstehend anhand von in den beigefügten Abbildungen dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert.

**[0029]** Es zeigen:

**[0030]** Fig. 1–Fig. 2 schematische Darstellungen zur Erläuterung des Aufbaus einer erfindungsgemäßen Anordnung zur thermischen Aktuierung eines Spiegels in einer ersten Ausführungsform der Erfindung;

**[0031]** Fig. 3 ein Diagramm, in welchem die Temperaturabhängigkeit des linearen Expansionskoeffizienten für unterschiedliche Spiegelsubstratmaterialien aufgetragen ist;

**[0032]** Fig. 4a–b schematische Darstellungen zur Erläuterung des Aufbaus einer erfindungsgemäßen Anordnung zur thermischen Aktuierung eines Spiegels in einer weiteren Ausführungsform der Erfindung;

**[0033]** Fig. 5a–b schematische Darstellungen weiterer Ausführungsformen der Erfindung; und

**[0034]** Fig. 6 eine schematische Darstellung eines Projektionsobjektivs einer für den Betrieb im EUV ausgelegten mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, in welcher die Erfindung beispielsweise realisierbar ist.

**[0035]** Im Weiteren wird zunächst unter Bezugnahme auf **Fig. 1** und **Fig. 2a–b** eine Anordnung zur thermischen Aktuierung eines Spiegels anhand einer ersten Ausführungsform der Erfindung erläutert.

**[0036]** Gemäß der perspektivischen schematischen Darstellung von **Fig. 1** weist ein Spiegel **100** eine Mehrzahl von Zugangskanälen **110, 111, 112, ...** auf, welche sich von der Spiegelrückseite (d. h. der zur optischen Wirkfläche **101** entgegengesetzten Seite des Spiegels **100**) durch das mit „**102**“ bezeichnete Spiegelsubstrat hindurch bis in die Nähe der optischen Wirkfläche **101** erstrecken, wobei die Zugangskanäle **110, 111, 112, ...** gemäß **Fig. 1** in einer matrixartigen Anordnung vorliegen. In **Fig. 2a–b** ist nur ein Zugangskanal **110** im Schnitt dargestellt, wobei der Spiegel **100** in den übrigen Zugangskanälen **111, 112, ...** in analoger Weise ausgestaltet ist. Auf der optischen Wirkfläche **101** des Spiegels **100** bzw. des Spiegelsubstrats **102** befindet sich eine (nicht dargestellte) reflektierende Beschichtung.

**[0037]** **Fig. 1** und **Fig. 2** stellen ebenso wie die weiteren Abbildungen jeweils schematische, nicht maßstabgetreue Abbildungen dar, wobei lediglich beispielhafte Abmessungen des Zugangskanals **110** (ohne dass die Erfindung hierauf beschränkt wäre) einen Durchmesser der jeweiligen Bohrungen im Bereich von 5 bis 30 mm sowie einen Abstand der jeweiligen Stirnflächen **110a** von der optischen Wirkfläche **101** im Bereich von ebenfalls 5 bis 30 mm umfassen können. Typische Dicken des Spiegels **100** selbst können (ebenfalls lediglich beispielhaft und ohne Einschränkung der Erfindung) z. B. im Bereich von etwa 50 bis 120 mm liegen.

**[0038]** Wie am besten aus **Fig. 2a** ersichtlich ist, erstreckt sich in den Zugangskanal **110** ein Kühlelement **120** von im Ausführungsbeispiel rohrförmiger Geometrie, wobei dieses Kühlelement **120** (durch Anschluss an einen nicht gezeigten regelbaren Kühler) in seiner Kühlleistung variabel einstellbar ist. Wie ebenfalls in **Fig. 2a–b** angedeutet, weist die Anordnung ferner eine Wärmequelle in Form eines Heizstrahlers **130** auf, welcher im Ausführungsbeispiel in dem dem Bereich der optischen Wirkfläche **101** zugewandten Endabschnitt des Zugangskanals **110** angeordnet ist und welcher eine ebenfalls variabel einstellbare Heizleistung aufweist. In weiteren Ausführungsformen kann der Heizstrahler **130** auch in einem anderen Bereich des Zugangskanals **110**, insbesondere auch im Bereich der Spiegelrückseite angeordnet sein, um in diesem Falle die Heizstrahlung über den Zugangskanal **110** bzw. Reflexion an den Seitenwänden des Zugangskanals **110**, vorzugsweise unter hinreichend flachen Reflexionswinkeln mit sogenanntem „streifenden Einfall“ (= „grazing incidence“) einzukoppeln. Des Weiteren kann die Wärmequelle, wie im Weiteren noch näher erläutert, auch in Form wenigstens eines Heizdrahtes ausgestaltet sein.

**[0039]** Die – unter erneuter Bezugnahme auf **Fig. 1** und **Fig. 2a, b** – über den Heizstrahler **130** abgestrahlte und in das Spiegelsubstratmaterial eingekoppelte elektromagnetische Strahlung kann beispielsweise eine Wellenlänge von wenigstens 2.5 µm, weiter insbesondere eine Wellenlänge von wenigstens von 5 µm, aufweisen, wie sie etwa über einen sogenannten Niedertemperaturstrahler mit Temperaturen bis zu 400°C, insbesondere im Bereich bis zu 200°C, realisiert werden kann. In weiteren Ausführungsbeispielen kann auch ein Hochtemperaturstrahler wie z. B. eine Glühwendel (mit einer Betriebstemperatur von typischerweise bis zu 3000°C) verwendet werden.

**[0040]** Durch die in **Fig. 2a–b** gewählte Anordnung von Kühlelement **120** einerseits und Wärmequelle bzw. Heizstrahler **130** andererseits wird insbesondere erreicht, dass ein Wärmeübertrag von dem Spiegelsubstratmaterial auf das (z. B. auf eine Temperatur von  $T = -20^{\circ}\text{C}$  eingestellte) Kühlelement **120** im Wesentlichen entlang der gesamten Oberfläche des Zugangskanals **110** erfolgt, wohingegen die Einkopplung von Heizstrahlung (z. B. Infrarotstrahlung) über den Heizstrahler **130** in das Spiegelsubstratmaterial im Wesentlichen nur in dem die Stirnfläche **110a** enthaltenden Endabschnitt des Zugangskanals **110** erfolgt. Durch den kombinierten Einsatz von Kühlelement **120** einerseits und Heizstrahler **130** andererseits kann (z. B. bei zunehmender optischer Last im Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage auftretenden elektromagnetischen (EW-)Strahlung) die Temperatur des Spiegelsubstratmaterials im Bereich der optischen Wirkfläche **101** konstant auf einem Wert gehalten werden, welcher im Wesentlichen der Zero-Crossing-Temperatur des betreffenden Spiegelsubstratmaterials entspricht. Hingegen kann unabhängig von der im Bereich der optischen Wirkfläche **101** aufrechterhaltenden Wärmebilanz in einem hiervon entfernten Bereich (nämlich in dem in **Fig. 2a–b** „unteren“ Bereich) des Spiegelsubstratmaterials eine von der Zero-Crossing-Temperatur abweichende Temperatur eingestellt werden, welche eine hinreichende Sensitivität des Spiegelsubstratmaterials gegenüber thermischen Lasten und somit eine gezielte thermische Aktuierung bzw. Deformation des Spiegels **100** ermöglicht.

**[0041]** Lediglich beispielhaft (und ohne dass die Erfindung hierauf beschränkt wäre) kann die im Bereich der optischen Wirkfläche **101** eingestellte Temperatur 30°C betragen und in dem von der optischen Wirkfläche **101** entfernten Bereich –15°C betragen, in welchem Falle sich bereits je nach Spiegelsubstratmaterial eine signifikante Änderung des linearen Expansionskoeffizienten ergibt.

**[0042]** Dabei lassen sich durch Überlagerung aller Basisfunktionen der Kühlelemente **120** gewünschte

Deformationsprofile einstellen. Hierbei handelt sich (wegen der Nähe zum „Zero-Crossing-Punkt“ des linearen Expansionskoeffizienten) um ein nichtlineares Optimierungsproblem, dessen Lösung numerisch mittels iterativer Durchführung folgender Schritte erhalten werden kann:

- a) Generierung eines Lochmusters;
- b) Berechnung der Wirkungsmatrizen für Oberflächentemperatur und Oberflächendeformation für den Temperatur-Arbeitspunkt;
- c) Bestimmung der individuellen Heiz- und Kühlleistungen, so dass sich gemäß linearer Rechnung das gewünschte Deformationsprofil unter der Nebenbedingung, dass die Temperaturverteilung über die optische Wirkfläche nahe der Zero-Crossing-Temperatur gehalten wird, ergibt;
- d) Bestimmung des tatsächlichen Deformationsprofils mittels nichtlinearer Rechnung; und
- e) Änderung des Temperaturprofils zur Korrektur der Deformationsprofil-Abweichung gemäß linearer Rechnung.

**[0043]** In **Fig. 2c–f** ist lediglich beispielhaft für ein Kühlelement bzw. den zugehörigen Zugangskanal das Ergebnis der Berechnung der Wirkungsmatrizen in Form von Konturdiagrammen dargestellt, wobei **Fig. 2c** den Verlauf  $dT/dq_f$ , **Fig. 2d** den Verlauf  $dw/dq_f$ , **Fig. 2e** den Verlauf  $dT/dT_f$  und **Fig. 2f** den Verlauf  $dw/dT_f$  zeigt, wobei mit  $w$  die  $z$ -Deformation (= Deformation in  $z$ -Richtung), mit  $q$  der thermische Fluss und mit  $T$  die Temperatur bezeichnet ist. Die entsprechenden Wirkungsmatrizen (bzw. die resultierenden Temperaturbasisfunktionen und Deformationsbasisfunktionen) lassen sich wie vorstehend beschrieben geeignet kombinieren, um ein geeignetes (möglichst homogenes) Temperaturprofil sowie auch ein gewünschtes Deformationsprofil einzustellen.

**[0044]** Mittels mehrfacher bzw. iterativer Durchführung der Schritte d) und e) wird die erzielte Abweichung im Deformationsprofil vom gewünschten Deformationsprofil kleiner. Dabei sind beispielsweise Deformationen in der Größenordnung von  $\pm 0.5$  nm erreichbar.

**[0045]** **Fig. 3** zeigt ein Diagramm, in welchem der lineare Expansionskoeffizient für unterschiedliche Spiegelsubstratmaterialien in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen ist. Der Nulldurchgang der entsprechenden Kurven entspricht jeweils der Zero-Crossing-Temperatur, welche z. B. für ULE™ bei etwa  $T = 30^\circ\text{C}$  liegt. Befindet sich infolge einer geeignet gewählten Kombination der über den Heizstrahler **130** eingekoppelten Heizleistung und der über das Kühlelement **120** eingestellten Kühlleistung der Bereich des Spiegelsubstrats **102** in Nähe der optischen Wirkfläche **101** auf dieser Zero-Crossing-Temperatur, haben optische Lasten aufgrund der im Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage auf die optische Wirkfläche **101** auftreffenden elektromagneti-

schen Strahlung keine Deformation zur Folge, da der lineare Expansionskoeffizient des Spiegelsubstratmaterials gleich Null ist. Hingegen ergibt sich gemäß **Fig. 3** bei Abweichung von dieser Temperatur eine zunehmende Empfindlichkeit des jeweiligen Spiegelsubstratmaterials auf Temperaturänderungen, die für die vorstehend beschriebene thermische Aktuierung bzw. Deformation des Spiegels **100** genutzt werden kann.

**[0046]** Im Folgenden wird unter Bezugnahme auf **Fig. 4** eine weitere Ausführungsform der Erfindung erläutert, wobei im Vergleich zu **Fig. 2** analoge bzw. im Wesentlichen funktionsgleiche Komponenten mit entsprechenden, um „**100**“ erhöhten Bezugsziffern bezeichnet sind.

**[0047]** Die Ausführungsform gemäß **Fig. 4** unterscheidet sich von derjenigen gemäß **Fig. 2** dadurch, dass das Spiegelsubstrat **202** aus zwei unterschiedlichen Spiegelsubstratmaterialien hergestellt, der Spiegel **200** also als Verbundspiegel („Kompositsspiegel“) ausgebildet ist. Konkret weist das Spiegelsubstrat **202** einen ersten Spiegelsubstratbereich **202a** und einen relativ zu diesem von der optischen Wirkfläche **201** des Spiegels **200** weiter entfernten zweiten Spiegelsubstratbereich **202b** auf, wobei die Spiegelsubstratbereiche **202a**, **202b** aus unterschiedlichen Materialien hergestellt sind. Im konkreten Ausführungsbeispiel handelt es sich bei dem Spiegelsubstratmaterial des ersten Spiegelsubstratbereichs um ULE™ und bei dem Spiegelsubstratmaterial des zweiten Spiegelsubstratbereichs **202b** um Quarzglas ( $\text{SiO}_2$ ). Die Erfindung ist jedoch nicht auf diese Materialien beschränkt, so dass die Spiegelsubstratbereiche **202a**, **202b** in weiteren Ausführungsformen auch aus anderen Spiegelsubstratmaterialien hergestellt sein können, wobei jeweils das Spiegelsubstratmaterial im zweiten Spiegelsubstratbereich **202b** einen bei einer vorgegebenen Temperatur betragsmäßig größeren linearen Expansionskoeffizienten aufweist als das Spiegelsubstratmaterial im ersten Spiegelsubstratbereich.

**[0048]** Infolge dieser Ausgestaltung im Ausführungsbeispiel von **Fig. 4** ergibt sich die zuvor beschriebene, zum Zwecke der gezielten Deformation erwünschte größere Sensitivität des Spiegelsubstratmaterials in dem von der optischen Wirkfläche **201** weiter entfernten Bereich nicht allein aufgrund des sich innerhalb des Spiegelsubstratmaterials ausbildenden Temperaturgradienten, sondern auch infolge des Übergangs zwischen unterschiedlichen Spiegelsubstratmaterialien, so dass die Ausführungsform gemäß **Fig. 4** insbesondere in Situationen geeignet ist, in denen der besagte Temperaturgradient allein zur Erzielung der zur Deformation erwünschten Sensitivität gegenüber thermischen Lasten bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Zero-Crossing-Tempera-

tur an der optischen Wirkfläche noch nicht ausreichend ist.

**[0049]** Fig. 5a und Fig. 5b dienen zur Erläuterung weiterer Ausführungsformen der Erfindung. Gemäß Fig. 5a ist zwischen dem Spiegelsubstrat **102** und der reflektierenden Beschichtung **550** eine absorbierende Schicht **530** zur wenigstens teilweisen Absorption der in den Zugangskanal **110** eingekoppelten Heizstrahlung angeordnet.

**[0050]** Gemäß Fig. 5b ist als Wärmequelle anstelle des in den vorstehend beschriebenen Ausführungsformen vorhandenen Heizstrahlers **130** eine Anordnung **540** aus Heizdrähten vorgesehen, durch welche der Bereich zwischen Spiegelsubstrat **102** und reflektierender Beschichtung **550** direkt mit variabel einstellbarer Heizleistung beheizt werden kann.

**[0051]** Eine erfindungsgemäße Anordnung zur thermischen Aktuierung eines Spiegels kann sowohl in Verbindung mit einem Spiegel in der Beleuchtungseinrichtung als auch in Verbindung mit einem Spiegel im Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage eingesetzt werden.

**[0052]** Fig. 6 zeigt lediglich als Anwendungsbeispiel den Strahlengang eines Projektionsobjektivs **600**, welches in US 2008/0170310 A1 (siehe dort Fig. 2) offenbart ist. Das Projektionsobjektiv **500** ist für den Betrieb im EUV ausgelegt und weist sechs Spiegel M1 bis M6 auf. Dabei können z. B. die jeweils pupilennahen Spiegel M2 und M6 oder auch ein anderer der Spiegel gemäß einer der oben beschriebenen Ausführungsformen thermisch aktulierbar ausgestaltet werden.

**[0053]** Wenn die Erfindung auch anhand spezieller Ausführungsformen beschrieben wurde, erschließen sich für den Fachmann zahlreiche Variationen und alternative Ausführungsformen, z. B. durch Kombination und/oder Austausch von Merkmalen einzelner Ausführungsformen. Dementsprechend versteht es sich für den Fachmann, dass derartige Variationen und alternative Ausführungsformen von der vorliegenden Erfindung mit umfasst sind, und die Reichweite der Erfindung nur im Sinne der beigefügten Patentansprüche und deren Äquivalente beschränkt ist.

**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 2010/018753 A1 [0004]
- US 2004/0051984 A1 [0004]
- WO 2008/034636 A2 [0004]
- DE 102009024118 A1 [0004]
- WO 2009/046955 A2 [0004]
- WO 2012/041744 A1 [0004]
- US 2008/0170310 A1 [0052]

## Patentansprüche

1. Anordnung zur thermischen Aktuierung eines Spiegels in einem optischen System, insbesondere in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, wobei der Spiegel ein Spiegelsubstrat (**102, 202**) und eine optische Wirkfläche (**101, 201**) sowie wenigstens einen sich von einer nicht der optischen Wirkfläche entsprechenden Oberfläche des Spiegels (**100**) aus in Richtung dieser Wirkfläche (**101, 201**) erstreckenden Zugangskanal (**110, 111, 112, 210**) aufweist,

- wobei in den wenigstens einen Zugangskanal (**110, 111, 112, 210**) ein Kühlelement (**120, 220**) mit variabel einstellbarer Kühlleistung hineinragt; und
- wobei wenigstens eine Wärmequelle zur Einkopplung von variabel einstellbarer Heizleistung in einen an die optische Wirkfläche angrenzenden Bereich des Spiegelsubstrats (**102, 202**) vorgesehen ist.

2. Anordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass diese eine Mehrzahl solcher Zugangskanäle (**110, 111, 112, 210**) aufweist.

3. Anordnung nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass jedem dieser Zugangskanäle (**110, 111, 112, 210**) jeweils ein Kühlelement (**120, 220**) zugeordnet ist.

4. Anordnung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kühlelemente (**120, 220**) in ihrer Kühlleistung unabhängig voneinander einstellbar sind.

5. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das wenigstens eine Kühlelement (**120, 220**) eine rohrförmige Geometrie aufweist.

6. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Wärmequelle wenigstens einen Heizstrahler (**130, 230**) zur Einkopplung von Heizstrahlung in den wenigstens einen Zugangskanal (**110, 210**) aufweist.

7. Anordnung nach einem der Ansprüche 2 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass jedem dieser Zugangskanäle (**110, 111, 112, 210**) jeweils ein Heizstrahler (**130, 230**) zugeordnet ist.

8. Anordnung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Heizstrahler (**130, 230**) in ihrer Heizleistung unabhängig voneinander einstellbar sind.

9. Anordnung nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass der wenigstens eine Heizstrahler (**130, 230**) in dem der optischen Wirkfläche (**101, 201**) zugewandten Endabschnitt des Zugangskanals (**110, 111, 112, 210**) angeordnet ist.

10. Anordnung nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Heizstrahlung eine Wellenlänge von wenigstens 2.5  $\mu\text{m}$ , insbesondere wenigstens 5  $\mu\text{m}$ , aufweist.

11. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Spiegel eine reflektierende Beschichtung (**550**) aufweist, wobei die Wärmequelle wenigstens einen Heizdraht (**540**) oder wenigstens eine wärmedissipierende Leiterbahn aufweist, welcher bzw. welche zwischen Spiegelsubstrat (**102**) und reflektierender Beschichtung (**550**) angeordnet ist.

12. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich der Zugangskanal (**110, 111, 112, 210**) von der der optischen Wirkfläche (**101, 201**) entgegengesetzten Oberfläche des Spiegels (**100**) aus in Richtung der optischen Wirkfläche (**101, 201**) erstreckt.

13. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Spiegel einen ersten Spiegelsubstratbereich (**202a**) aus einem ersten Spiegelsubstratmaterial und einen zweiten Spiegelsubstratbereich (**202b**) aus einem von dem ersten Spiegelsubstratmaterial verschiedenen zweiten Spiegelsubstratmaterial aufweist, wobei der zweite Spiegelsubstratbereich (**202b**) von der optischen Wirkfläche (**201**) des Spiegels weiter entfernt ist als der erste Spiegelsubstratbereich (**202a**).

14. Anordnung nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass das erste Spiegelsubstratmaterial bei einer vorgegebenen Temperatur einen betragsmäßig geringeren linearen Expansionskoeffizienten aufweist als das zweite Spiegelsubstratmaterial.

15. Anordnung nach Anspruch 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass das erste Spiegelsubstratmaterial ein „Ultra-Low-Expansion-Material“ (ULE) ist.

16. Anordnung nach einem der Ansprüche 13 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zweite Spiegelsubstratmaterial amorphes oder kristallines Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) ist.

17. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass durch Variation der Heizleistung der Wärmequelle und/oder der Kühlleistung des Kühlelementes (**120, 220**) ein definiertes Deformationsprofil des Spiegels erzeugbar ist.

18. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Spiegel eine reflektierende Beschichtung (**550**) aufweist, wobei zwischen dem Spiegelsubstrat (**102**)

und der reflektierenden Beschichtung (550) eine absorbierende Schicht (530) zur Absorption von in den Zugangskanal (110) eingekoppelter Heizstrahlung angeordnet ist.

19. Optisches System, insbesondere in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, wobei das optische System eine Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche aufweist.

20. Verfahren zur thermischen Aktuierung eines Spiegels in einem optischen System, insbesondere in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, wobei der Spiegel (100) ein Spiegelsubstrat (102, 202), eine optische Wirkfläche (101, 201) und wenigstens einen sich von einer nicht der optischen Wirkfläche (101, 201) entsprechenden Oberfläche des Spiegels (100) aus in Richtung dieser Wirkfläche erstreckenden Zugangskanal (110, 111, 112, 210) sowie ein in den Zugangskanal hineinragendes Kühlelement (120, 220) mit variabel einstellbarer Kühlleistung aufweist,

- wobei über wenigstens eine Wärmequelle Heizleistung in einen an die optische Wirkfläche angrenzenden Bereich des Spiegelsubstrats (102, 202) eingekoppelt wird; und
- wobei durch Variation dieser Heizleistung der Wärmequelle und/oder der Kühlleistung des Kühlelementes (120, 220) ein definiertes Deformationsprofil des Spiegels erzeugt wird;
- wobei die Variation der Heizleistung der Wärmequelle (130, 230, 540) und/oder der Kühlleistung des Kühlelementes (120, 220) derart erfolgt, dass die Temperatur des Spiegels (100) im Bereich der optischen Wirkfläche bis auf  $\pm 3$  K auf einem konstanten Wert gehalten wird.

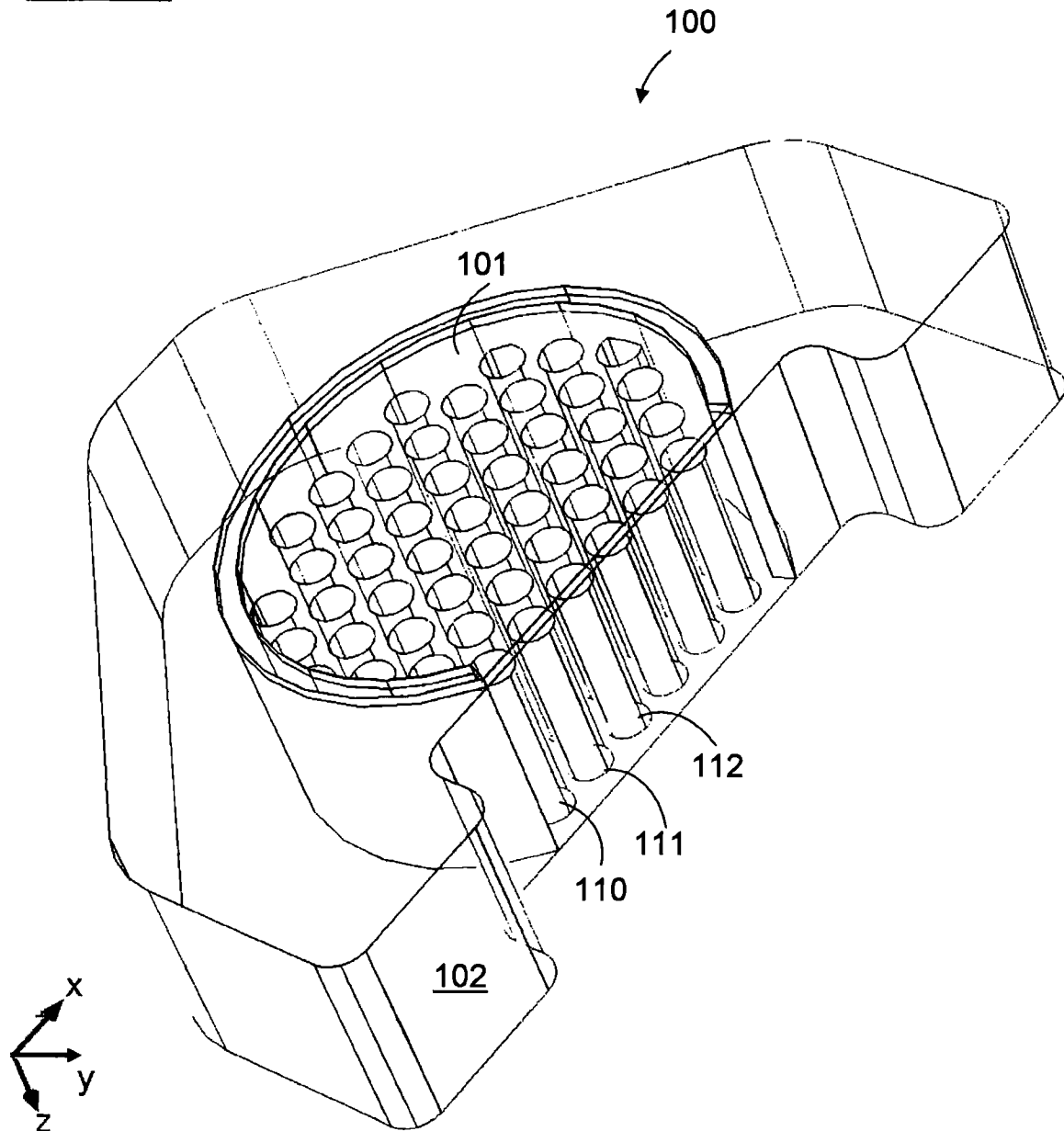
21. Verfahren nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieser konstante Wert der Zero-Crossing-Temperatur des Spiegelsubstratmaterials in dem betreffenden Bereich entspricht.

22. Verfahren nach Anspruch 20 oder 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieser konstante Wert im Bereich von 22°C bis 55°C, insbesondere im Bereich von 22°C bis 40°C liegt.

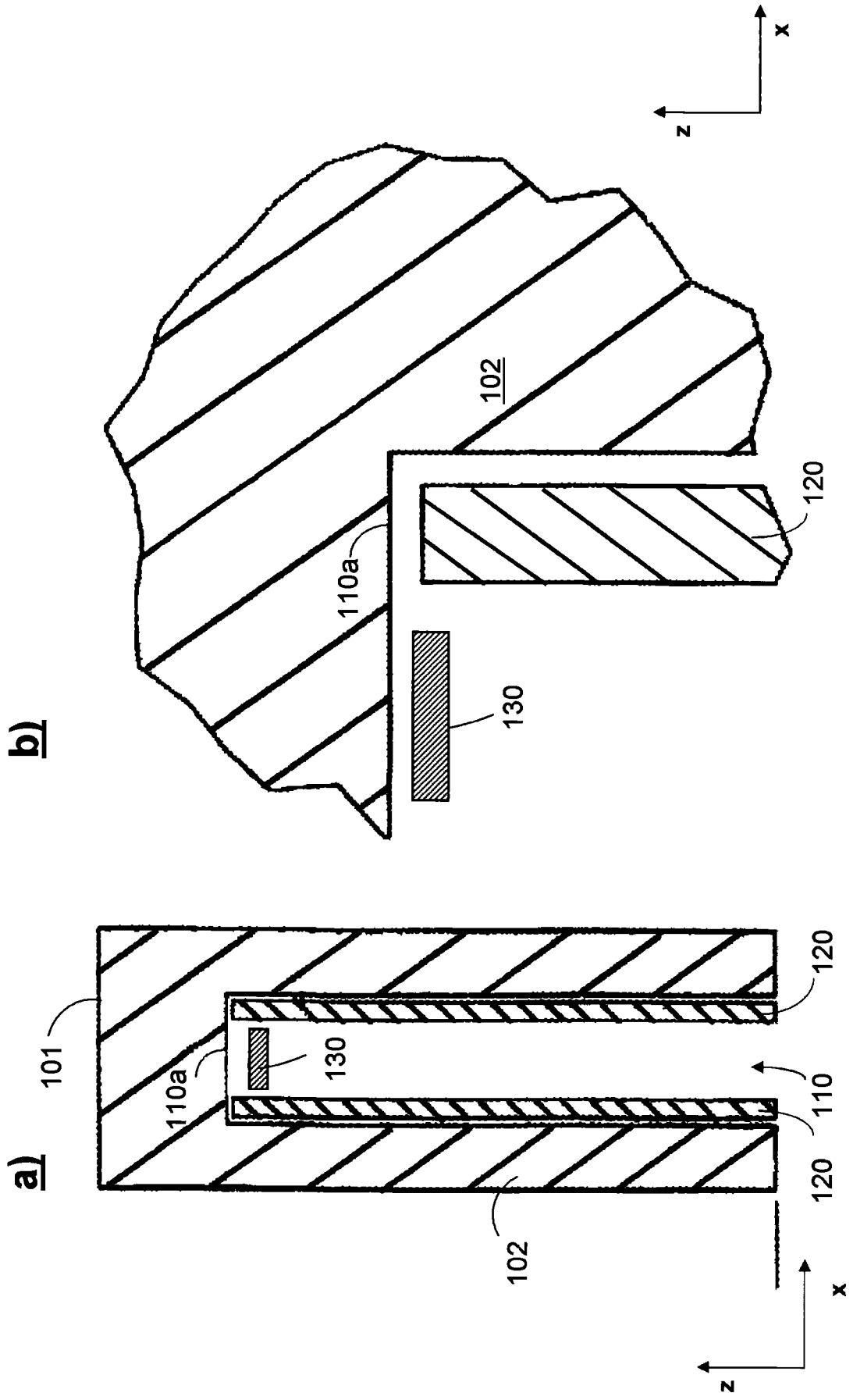
23. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Variation der Heizleistung der Wärmequelle (130, 230, 540) derart erfolgt, dass ein im Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage durch optische Lasten verursachter Wärmeeintrag in die optische Wirkfläche wenigstens teilweise kompensiert wird.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

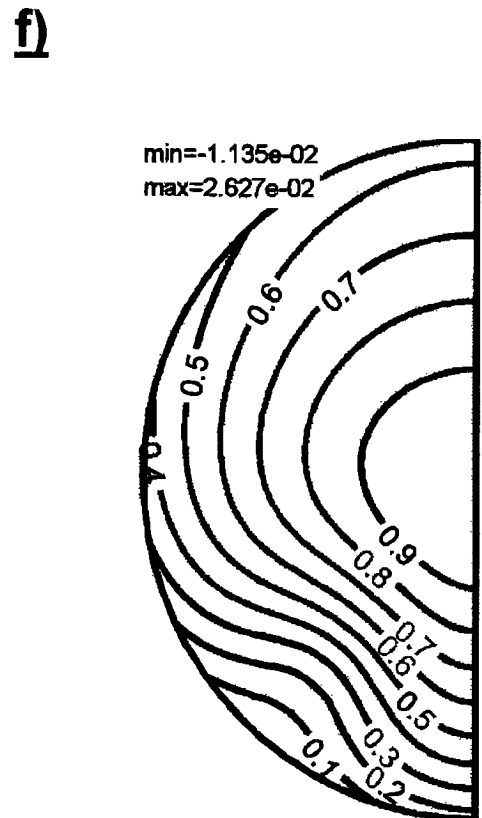
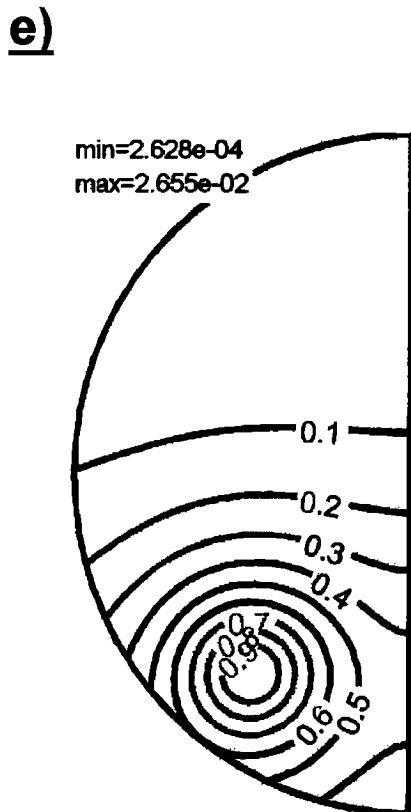
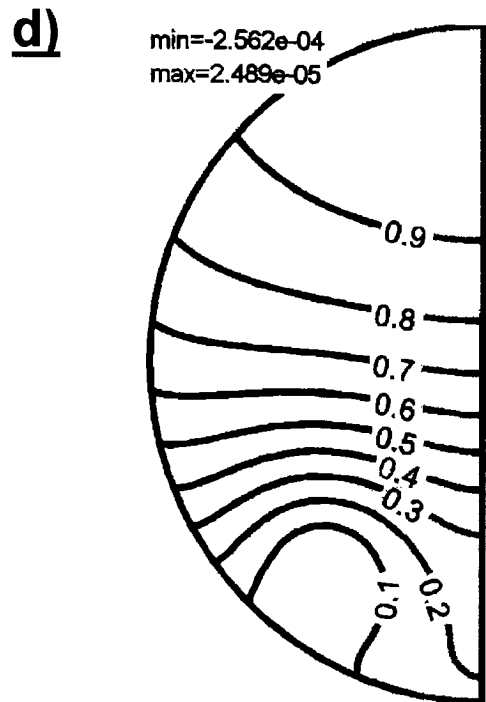
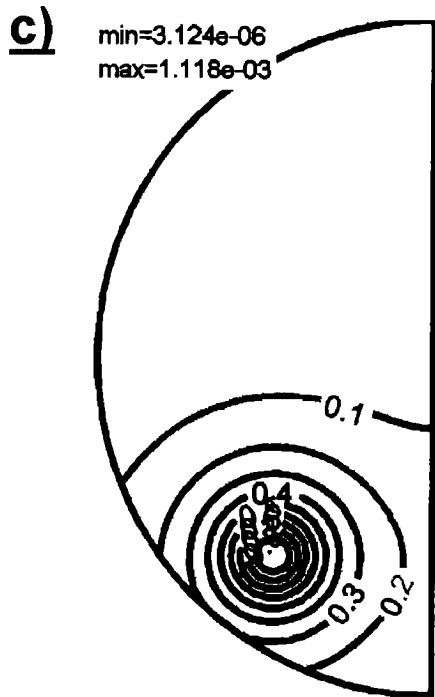
**Fig. 1**



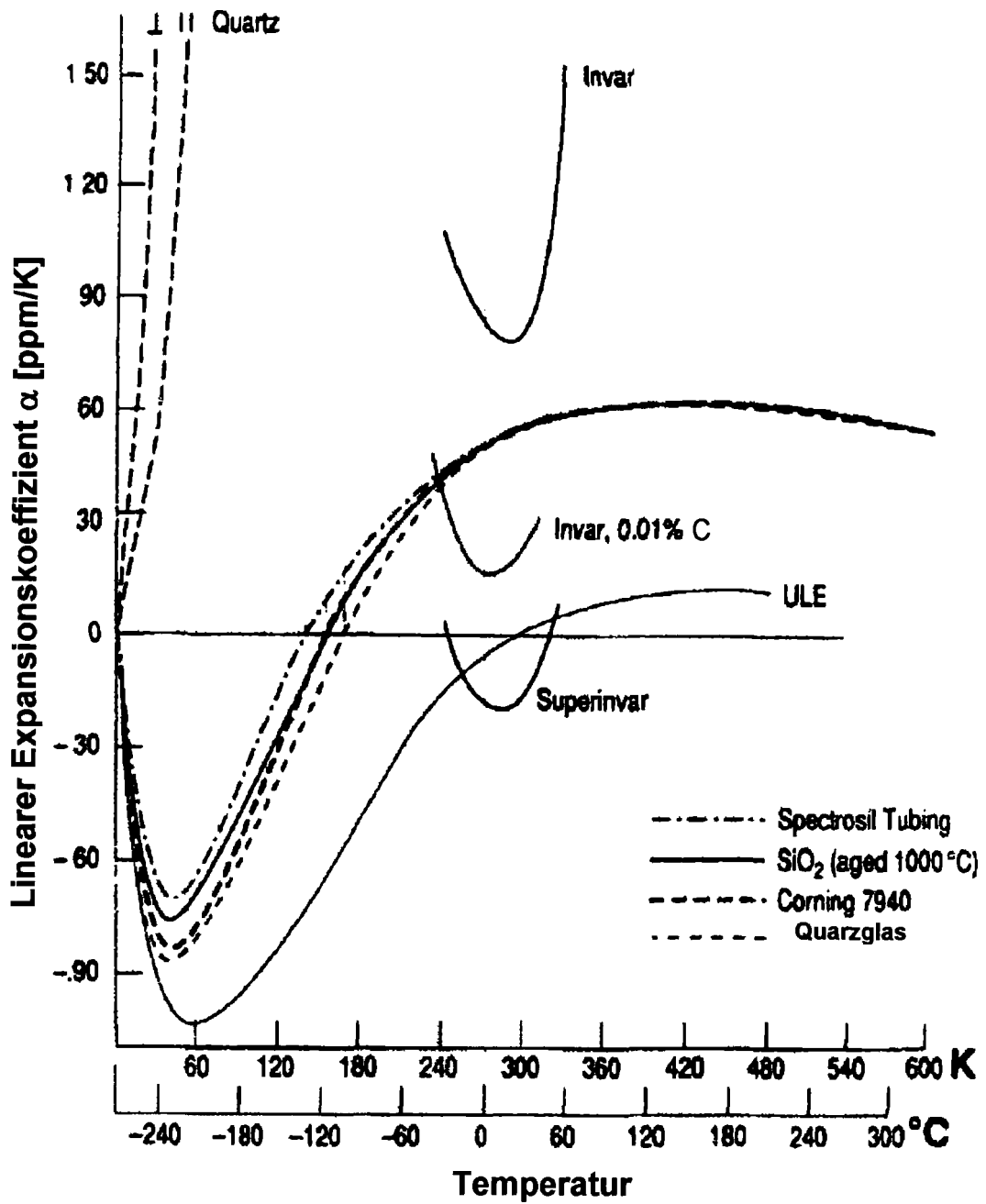
**Fig. 2**



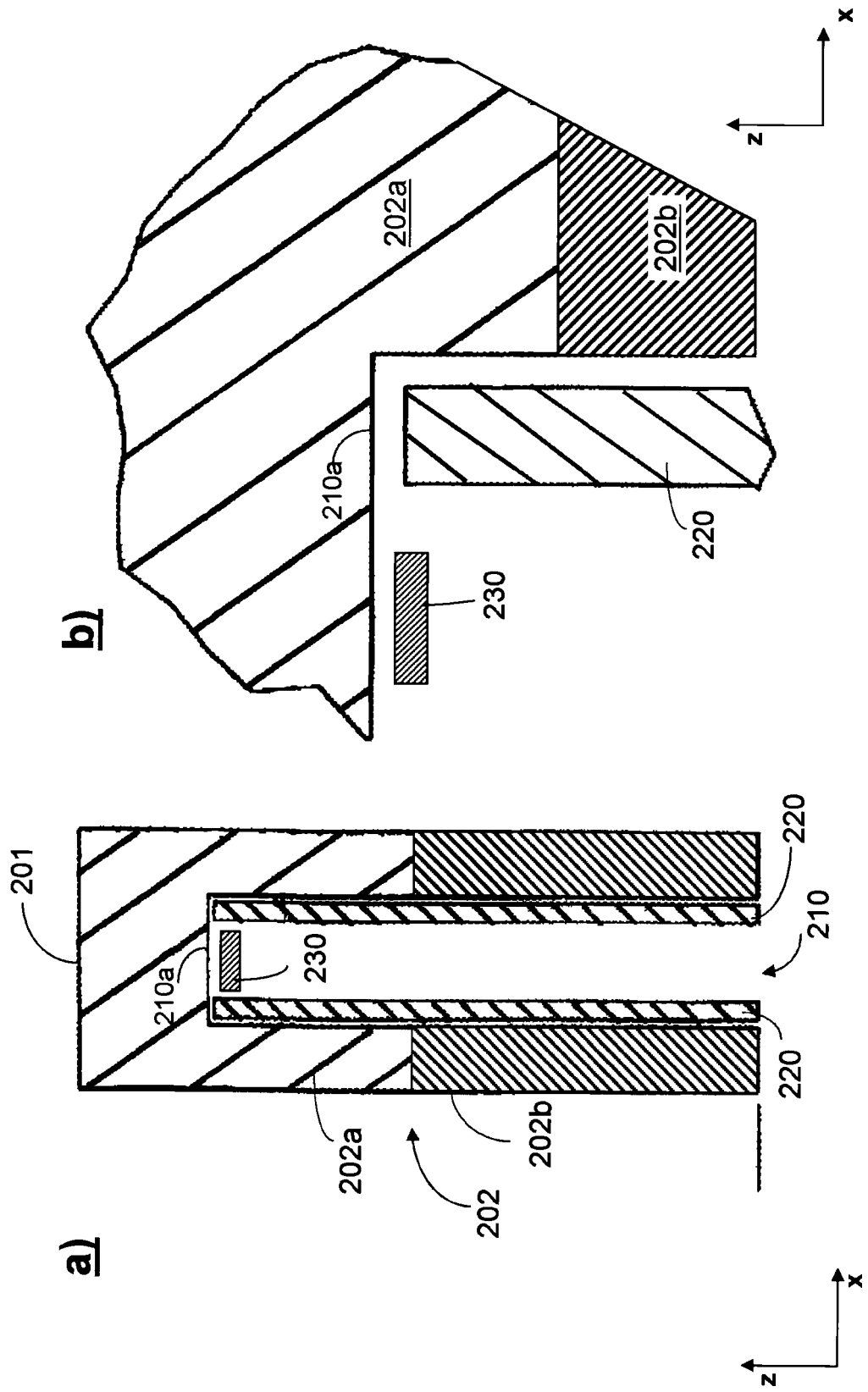
**Fig. 2**



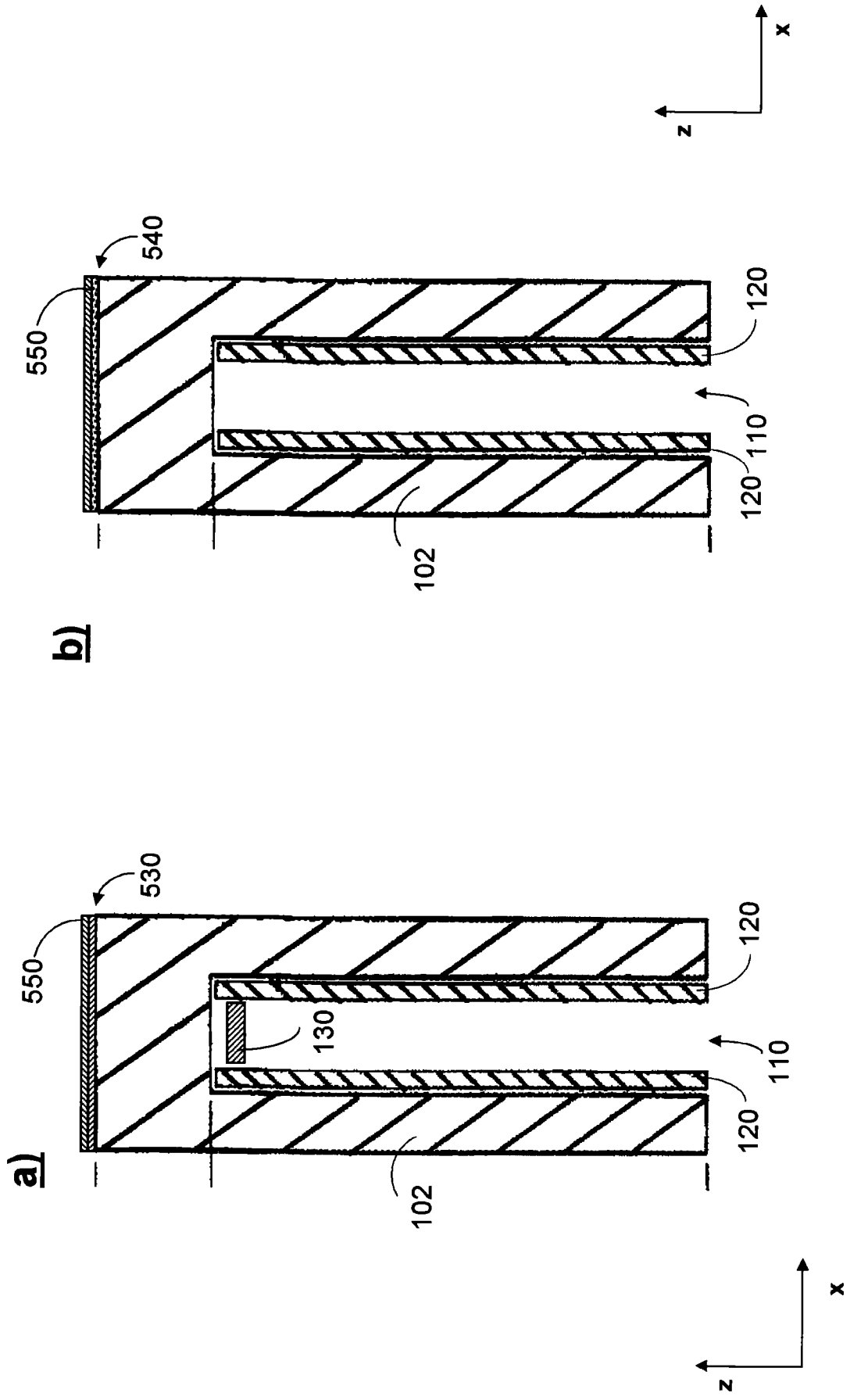
**Fig. 3**



**Fig. 4**



**Fig. 5**



**Fig. 6**

