

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
19. Dezember 2024 (19.12.2024)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/256578 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

C03C 17/06 (2006.01) C03C 23/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2024/066443

(22) Internationales Anmeldedatum:
13. Juni 2024 (13.06.2024)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2023 205 640.2
16. Juni 2023 (16.06.2023) DE

(71) Anmelder: **CARL ZEISS SMT GMBH** [DE/DE]; Ru-
dolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder: **KAES, Matthias**; Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447
Oberkochen (DE). **LINK, Stefan**; Rudolf-Eber-Strasse 2,

73447 Oberkochen (DE). **ALEXEEV, Pavel**; Rudolf-Eber-
Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(74) Anwalt: **COHAUSZ & FLORACK PATENT- UND
RECHTSANWÄLTE PARTNERSCHAFTSGESEL-
LSCHAFT MBB, SVENJA SCHWANDT**; Bleichstraße
14, 40211 Düsseldorf (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ,
DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH,
GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO,
JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR,
LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY,
MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST,
SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,
VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: LIFETIME STABILIZATION OF COATED OPTICAL SYSTEMS BY MEANS OF ELECTRON BEAM HEATING

(54) Bezeichnung: LEBENSDAUERSTABILISIERUNG BESCHICHTETER OPTIKEN MITTELS
ELEKTRONENSTRAHLHEIZEN

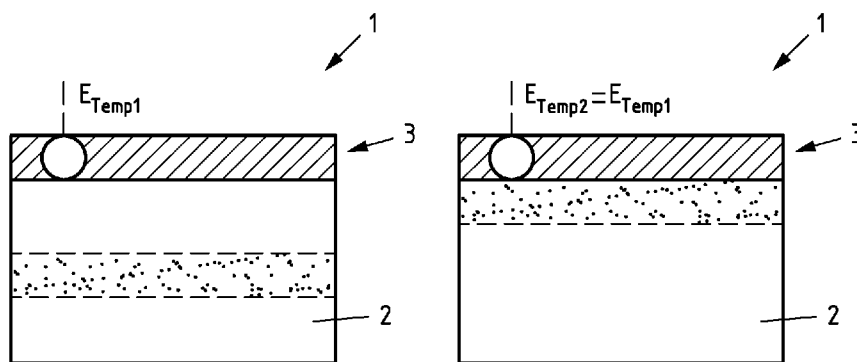


Fig.4b

(57) Abstract: The invention relates to a method for stabilizing an optical element, the method comprising: providing an optical element having a substrate and a coating, and subjecting the optical element to heat treatment. The problem of providing a method and an optical element which overcome the disadvantages of the prior art is solved by virtue of the heat treatment of the optical element comprising irradiating the coating of the optical element with electrons. Furthermore, the invention relates to an optical element, to a microlithographic projection lens comprising such an optical element, and to a microlithographic projection exposure apparatus comprising such a projection lens, and also to a device for electron irradiation.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Stabilisierung eines optischen Elements, das Verfahren umfassend: Bereitstellen eines optischen Elements mit einem Substrat und einer Beschichtung, und Tempern des optischen Elements. Die Aufgabe, ein Verfahren und ein optisches Element bereitzustellen, welches die Nachteile des Stands der Technik lösen, wird dadurch gelöst, dass das Tempern des optischen Elements ein Bestrahlen der Beschichtung des optischen Elements mit Elektronen umfasst. Darüber hinaus bezieht sich die Erfindung auf ein optisches Element, auf ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie mit einem solchen optischen Element und auf eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem solchen Projektionsobjektiv sowie auf eine Vorrichtung zur Elektronenbestrahlung.

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

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

Lebensdauerstabilisierung beschichteter Optiken mittels Elektronenstrahlheizen

Technisches Gebiet

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Stabilisierung eines optischen Elements, das
5 Verfahren umfassend: Bereitstellen eines optischen Elements mit einem Substrat und
einer Beschichtung, und Tempern des optischen Elements. Darüber hinaus bezieht
sich die Erfindung auf ein optisches Element für eine Projektionsbelichtungsanlage,
auf ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie mit einem solchen optischen
Element und auf eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit
10 einem solchen Projektionsobjektiv sowie auf eine Vorrichtung zur
Elektronenbestrahlung.

Der Gegenstand der deutschen Patentanmeldung 102023205640.2 wird hiermit
durch Bezugnahme (incorporation by reference) aufgenommen.

15

Hintergrund

Projektionsbelichtungsanlagen für die Mikrolithographie sind darauf angewiesen,
dass die zur Abbildung einer Maske in eine Bildebene genutzten optischen Elemente
eine hohe Genauigkeit aufweisen. Ebenso hohe Anforderungen werden an die
20 Oberflächenform der Masken selber gestellt. Die optischen Elemente sind während
des Betriebs der Anlagen jedoch hohen Temperaturbelastungen ausgesetzt, die
unerwünschte Veränderungen in dem Substrat und der Beschichtung der optischen
Elemente hervorrufen und zu unerwünschten Abbildungseigenschaften führen
können.

25

Um unerwünschten Veränderungen der optischen Elemente aufgrund von
Temperaturbelastungen während des Betriebs vorzubeugen, wurde versucht, die
optischen Elemente durch eine vorgelagerte Temperung zu stabilisieren. Aufgrund

der Beschränkungen der zulässigen Temperatur können die optischen Elemente jedoch in einem gewöhnlichen Temperofen nicht auf eine für die komplette Stabilisierung von Lebensdauereffekten notwendige Temperatur gebracht werden. Stattdessen bedarf es beispielsweise komplexer Temperprozesse, die eine Kühlung
5 der Anbauteile ermöglichen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren und ein optisches Element bereitzustellen, welche die oben beschriebenen Nachteile des Stands der Technik lösen. Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, ein Projektionsobjektiv und eine
10 Projektionsbelichtungsanlage mit einem verbesserten optischen Element sowie eine vorteilhafte Vorrichtung zur Elektronenbestrahlung anzugeben.

Beschreibung der Erfindung

Gemäß einem ersten Aspekt wird die Aufgabe für ein Verfahren zur Stabilisierung
15 eines optischen Elements, das Verfahren umfassend: Bereitstellen eines optischen Elements mit einem Substrat und einer Beschichtung, und Tempern des optischen Elements, dadurch gelöst, dass das Tempern des optischen Elements ein Bestrahlen der Beschichtung des optischen Elements mit Elektronen umfasst.

20 Das Verfahren umfasst ein Bereitstellen eines optischen Elements. Bei dem optischen Element kann es sich um ein reflektierendes optisches Element, beispielsweise einen Spiegel oder eine Maske, handeln. Denkbar ist auch, dass es sich bei dem optischen Element um eine Linse, ein Prisma, ein Hologramm und/oder eine Streuscheibe handelt. Das optische Element umfasst ein Substrat und eine Beschichtung. Das
25 Substrat kann beispielsweise SiSiC, Zerodur® von Schott AG, ULE® von Corning Inc., Quarzglas und/oder jede andere Art von Glas umfassen. Die Beschichtung kann eine oder mehrere Schichten umfassen. Bevorzugt ist die Beschichtung elektrisch leitfähig. Insbesondere handelt es sich um eine metallische Beschichtung. Bei der Beschichtung kann es sich um eine Beschichtung handeln, welche für den EUV-Wellenlängenbereich
30 geeignet ist. Beispielsweise kann es sich um eine MoSi-Beschichtung handeln.

Die Beschichtung kann mindestens ein Schichtteilsystem umfassen. Das Schichtteilsystem kann mindestens eine Schicht umfassen, die gebildet ist oder als Verbindung zusammengesetzt ist aus mindestens 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 zumindest im Wesentlichen nicht. Die Schichtanordnung des mindestens einen Schichtteilsystems kann beispielweise eine periodische Abfolge von mindestens zwei Perioden an Einzelschichten umfassen. Die Perioden können Einzelschichten aus unterschiedlichen Materialien umfassen. Die Materialien der die Perioden bildenden Einzelschichten können beispielsweise Nickel und Silizium oder Kobalt und Beryllium sein.

Bevorzugt kann die Beschichtung eine Reflexionsschicht umfassen. Die Reflexionsschicht kann mindestens ein auf die Reflexion von EUV-Strahlung, insbesondere Strahlung mit einer Wellenlänge von 13 nm oder 7 nm, optimiertes Schichtteilsystem umfassen. Die Reflexionsschicht kann eine periodische Abfolge von mindestens einer Periode an Einzelschichten umfassen. Die Periode kann Einzelschichten mit unterschiedlichen Brechungsindices z. B. im EUV-Wellenlängenbereich umfassen. Es sind aber auch aperiodische Schichten oder eine Reflexionsschicht, die lediglich eine Schicht umfasst, denkbar.

Optional kann zwischen dem Substrat und der Reflexionsschicht eine Schutzschicht aufgebracht werden. Die Schutzschicht soll verhindern, dass das Substrat z. B. durch EUV-Nutzstrahlung, also die in einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage verwendete Strahlung, 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 Verfahren umfasst ein Tempern des optischen Elements. Unter einem Tempern kann eine Wärmebehandlung verstanden werden, bei der die Beschichtung des optischen Elements erhitzt wird. Insbesondere umfasst das Verfahren ein Tempern der Beschichtung des optischen Elements. Die Beschichtung des optischen Elements kann beispielsweise zumindest teilweise gleichmäßig erhitzt werden. Durch ein Tempern der Beschichtung des optischen Elements kann die Beschichtung des optischen Elements gegenüber Lebensdauereffekten stabilisiert werden.

Insbesondere kann die Beschichtung hierdurch gegenüber Wärmeeintrag für die spätere Anwendung stabilisiert werden. Das Tempern kann beispielsweise

vorgelagert während des Herstellungsprozesses des optischen Elements erfolgen.

Unerwünschte Veränderungen der Beschichtung, beispielsweise der Schichtspannung, können so vorteilhaft vermieden werden. Zudem kann das Substrat zumindest teilweise getempert werden. Insbesondere werden zumindest oberflächennahe Bereiche des Substrats getempert. Hiermit können beispielsweise Bereiche gemeint sein, die bis zu 5500 nm, bevorzugt bis zu 3400 nm, besonders bevorzugt bis zu 1700 nm, unterhalb der Oberfläche des optischen Elements liegen.

Das Tempern des optischen Elements umfasst ein Bestrahlen der Beschichtung des optischen Elements mit Elektronen. Das Einbringen der Energie der Elektronen erfolgt dabei lokal in der Beschichtung, insbesondere in zumindest einer Schicht. Es wurde erkannt, dass das optische Element, insbesondere die Beschichtung des optischen Elements, mittels Elektronenbestrahlung vorteilhaft beheizt werden kann.

Das Tempern erfolgt insbesondere dadurch, dass durch das Bestrahlen die Energie der Elektronen in der Beschichtung des optischen Elements deponiert wird. Beim Bestrahlen der Beschichtung mit Elektronen kann die Energie der Elektronen über eine Stoßkaskade in Wärme umgewandelt werden. Die Beschichtung kann somit durch das Bestrahlen mit Elektronen gezielt erhitzt und dadurch vorgealtert werden.

Der Wärmeeintrag kann wiederum zu Relaxationsprozessen führen, die die

Beschichtung des optischen Elements für spätere Anwendungen des optischen

Elements gegenüber Wärmeeintrag stabilisieren. Das Bestrahlen der Beschichtung des optischen Elements erfolgt insbesondere derart, dass zumindest die Beschichtung

stabilisiert wird. Die Zuordnung von Prozessparametern zu einer gewünschten Stabilisierungswirkung kann gemäß einer geeigneten Kalibration erfolgen.

Das Bestrahlen mit Elektronen erfolgt im Vakuum, insbesondere im Hochvakuum.

- 5 Hierzu kann das optische Element in eine Vakuumkammer einer Vakuumanlage eingebracht werden. Die Vakuumanlage kann eine Elektronenstrahlquelle, insbesondere eine Elektronenkanone, enthalten, die einen Elektronenstrahl erzeugt. Unter einer Elektronenkanone kann eine elektrische Anordnung zur Erzeugung von Elektronenstrahlen bezeichnet werden. Die Elektronenkanone stellt einen
- 10 gebündelten und gerichteten Elektronenstrahl zur Verfügung. Der Elektronenstrahl kann beispielsweise einen Durchmesser von 0,1 mm bis 20 mm betragen.

Mit Hilfe des Elektronenstrahls kann die Oberfläche der Beschichtung des optischen Elements gerastert werden. Die Rasterung erfolgt vorzugsweise mehrfach,

- 15 beispielsweise zwei bis 10.000 Mal. Die wiederholte thermische Belastung durch eine mehrfache Rasterung führt zur Stabilisierung von Lebensdauereffekten. Die Rasterung kann beispielsweise punktweise erfolgen. Das zu bestrahlende Feld kann in diskrete Punkte eingeteilt werden. Der Elektronenstrahl kann auf mindestens einen diskreten Punkt auf der Oberfläche gerichtet werden und auf diesem Punkt für eine bestimmte
- 20 Zeit verweilen. Beispielsweise beträgt die Verweildauer Δt des Elektronenstrahls 10 ns bis 10 ms. In diesem Zeitintervall kann sich punktuell eine lokale Temperaturspitze an dem diskreten Punkt ergeben. Die Temperatur kann durch den Wärmeeintrag schlagartig hochschnellen. Sobald der Strahl am nächsten Punkt ist, sinkt die Temperatur wieder ab. Durch die Elektronenstrahlung lässt sich das optische
- 25 Element, insbesondere die Beschichtung, lokal auf viel höhere Temperaturen heizen als beispielsweise mit einem Temperofen. Aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit der Relaxationen lassen sich die Temperaturspitzen für eine Stabilisierung nutzen. Neben den Temperaturspitzen kann sich mit der Zeit auch ein Nettoanstieg der Temperatur ΔT der Beschichtung des optischen Elements ergeben.

Es können zudem weitere Teile des optischen Elements, insbesondere des Substrats des optischen Elements, durch ein Bestrahlen der Beschichtung des optischen Elements mit Elektronen beeinflusst, insbesondere stabilisiert, werden. Durch die in der Beschichtung erzeugte Wärme kann beispielsweise auch das Substrat des optischen Elements zumindest teilweise erwärmt werden. Insbesondere oberflächennahe Teile des Substrats können durch ein Bestrahlen der Beschichtung mit Elektronen ebenfalls erwärmt werden. Die Wärme kann auf weitere Teile des optischen Elements übergehen. Hierdurch können diese Teile des optischen Elements ebenfalls stabilisiert werden. Durch ein Bestrahlen der Beschichtung des optischen Elements mit Elektronen können so auch Teile des optischen Elements, die über die Beschichtung hinausgehen, ebenfalls vorteilhaft gegenüber Lebensdauereffekten stabilisiert werden.

Insbesondere können in das Substrat eingebrachte Kompaktierungen zumindest teilweise stabilisiert werden. Das Tempern kann beispielsweise zu einem teilweisen Rückgang einer zuvor in das Substrat eingebrachten Kompaktierung führen, also zu einer Dekompaktierung. Die Dekompaktierung ist ein Effekt, der bei der Nutzung des Substrats in einer Projektionsbelichtungsanlage, wie beispielsweise einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage, über die Zeit auftritt und so zu einer nicht vernachlässigbaren Veränderung der Oberfläche des optischen Elements 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.

Mit dem Verfahren lassen sich somit optische Elemente beispielsweise während der Herstellung oder auch nachträglich gezielt optimieren. Es hat sich gezeigt, dass optische Elemente mit dem vorliegenden Verfahren, insbesondere gegenüber Lebensdauereffekten, vorteilhaft stabilisiert werden können. Das Verfahren erlaubt einen zielgerichteten Wärmeeintrag, welcher lokale Relaxationsprozesse nach sich zieht. Indem die Beschichtung des optischen Elements mit Elektronen bestrahlt wird, kann die Beschichtung des optischen Elements und optional oberflächennahe

Bereiche des Substrats gezielt getempert werden. Dabei wird insbesondere ein unerwünschtes Aufheizen von temperatursensiblen, beispielsweise geklebten Anbauteilen vermieden. Thermisch-induzierte Kompaktierungsphänomene des Substratmaterials eines optischen Elements während der Verwendung können durch
5 die Stabilisierung nach dem vorliegenden Verfahren vermieden werden.

Gegenüber einem Tempern basierend auf alternativen Energiequellen wie beispielsweise Laserstrahlung bietet das Tempern mittels Elektronenbestrahlung zudem unter anderem den Vorteil, dass die Elektronenabsorption weitgehend
10 unabhängig von den optischen Eigenschaften des optischen Elements ist. Das Verfahren ist also insbesondere für unterschiedliche metallische Beschichtungen ohne erhöhten Anpassungsaufwand einsetzbar.

Darüber hinaus sind die zurückgestreuten Elektronen weitgehend ungerichtet.
15 Insbesondere durch die Beschichtung des optischen Elements können die auf diese auftreffenden Elektronen zurückgestreut werden. Dass die zurückgestreuten Elektronen weitgehend ungerichtet sind, hat den Vorteil, dass es keine Reflexzonen in der Vakuumkammer gibt, die gekühlt werden müssen. Im Gegensatz hierzu ist insbesondere Laserstrahlung gerichtet und kann einen gekühlten Absorber
20 erforderlich machen.

Gemäß einer ersten vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird die Elektronenenergie E_{Temp} zum Tempern abhängig von der Dicke der Beschichtung des optischen Elements gewählt. Beispielsweise beträgt die Dicke der Beschichtung bis zu
25 500 nm, bevorzugt bis zu 450 nm, besonders bevorzugt bis zu 400 nm. Insbesondere wird die Elektronenenergie E_{Temp} zum Tempern abhängig von der Dicke mindestens einer Schicht der Beschichtung des optischen Elements gewählt. Die Beschichtung kann somit vorteilhaft lokal erhitzt werden. Es wurde erkannt, dass die Eindringtiefe der Elektronen durch die Elektronenenergie beeinflusst wird. Es gilt, je größer die
30 Elektronenenergie, desto tiefer die Eindringtiefe der Elektronen. Das Bremsvermögen nimmt dabei in erster Näherung antiproportional zur Elektronenenergie ab. Die

meiste Energie wird am Ende der Trajektorie deponiert, wo die Elektronen auf null abgebremst worden sind. Auf diese Weise kann eine gezielte lokale Wärmeeinbringung gewährleistet werden. Die Heiztiefe kann über die Elektronenenergie eingestellt werden. Die Elektronenenergie E_{Temp} kann

- 5 beispielsweise derart gewählt werden, dass die Energie lokal in der Beschichtung, insbesondere mindestens einer Schicht, eingebracht wird. Die Elektronenenergie E_{Temp} kann an verschiedene Beschichtungen angepasst werden. Bevorzugt wird die Elektronenenergie E_{Temp} derart gewählt, dass die Elektronenenergie E_{Temp} zumindest im Wesentlichen vollständig in der Beschichtung des optischen Elements absorbiert
- 10 wird. Die Elektronenenergie E_{Temp} wird beispielsweise derart gewählt, dass die Energie ausschließlich in der Beschichtung, insbesondere mindestens einer Schicht, absorbiert wird. Ein Eindringen von Elektronen in darunterliegende Schichten bzw. in das Substrat des optischen Elements soll vorzugsweise vermieden werden, um unerwünschte Effekte wie beispielsweise unerwünschte Kompaktierungen zu
- 15 vermeiden. Zum Tempern wird daher bevorzugt eine niedrige Elektronenenergie E_{Temp} gewählt.

Insbesondere wird die Beschleunigungsspannung U_{Temp} zum Tempern abhängig von der Dicke der Beschichtung des optischen Elements, insbesondere mindestens einer

20 Schicht, gewählt. Die Elektronenenergie E_{Temp} ist insbesondere abhängig von der Spannung zur Beschleunigung der Elektronen, der Beschleunigungsspannung U_{Temp} . Mit Hilfe der Beschleunigungsspannung U_{Temp} kann die Elektronenenergie E_{Temp} und so insbesondere die Eindringtiefe der Elektronen in beeinflusst werden.

- 25 Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens beträgt die Beschleunigungsspannung U_{Temp} zum Tempern 1 bis 30 keV, bevorzugt 1 bis 10 keV, weiter bevorzugt 11 bis 15 keV, weiter bevorzugt 16 bis 20 keV, weiter bevorzugt 21 bis 30 keV. Bevorzugt beträgt die Beschleunigungsspannung U_{Temp} weniger als 30 keV. Mit entsprechend niedrigen Beschleunigungsspannungen kann gezielt Energie in der
- 30 Beschichtung des optischen Elements deponiert werden. Insbesondere kann Energie lokal in mindestens eine Deckschicht des optischen Elements eingebracht werden. So

kann beispielsweise je nach Dicke der mindestens einen Schicht, welche stabilisiert werden soll, eine Beschleunigungsspannung U_{Temp} im Bereich 1 bis 30 keV gewählt werden. Die Beschleunigungsspannung U_{Temp} kann beispielsweise 5 keV betragen. Die Beschleunigungsspannung U_{Temp} kann je nach Schichtsystem berechnet werden.

5

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens beträgt die Stromstärke I_{Temp} zum Tempern 0,1 bis 5 mA. Mit einer Beschleunigungsspannung U_{Temp} im Bereich 1 bis 20 keV und einer Stromstärke I_{Temp} im Bereich 0,1 bis 5 mA können Leistungen im Bereich von 0,1 bis 100 W erzeugt werden. Bevorzugt beträgt die Stromstärke I_{Temp} zum Tempern 0,5 bis 5 mA, besonders bevorzugt mehr als 0,5 mA. Während die Eindringtiefe der Elektronen insbesondere über die Beschleunigungsspannung U_{Temp} eingestellt wird, kann die Leistung zusätzlich über die Stromstärke I_{Temp} angepasst werden. Hierdurch kann wiederum Einfluss auf die Temperatur genommen werden. Eine höhere Stromstärke I_{Temp} kann beispielsweise gewählt werden, um eine höhere Leistung und damit höhere Temperaturen zu erreichen. So kann beispielsweise die Dauer der Bestrahlung verkürzt werden.

10

15

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens beträgt die Temperatur beim Tempern ≥ 60 °C. Die Temperatur von ≥ 60 °C kann durch das Bestrahlen der Beschichtung mit Elektronen lokal in der Beschichtung und optional oberflächennahen Bereichen des Substrats erreicht werden. Beispielsweise beträgt die Temperatur 60 °C. Es sind jedoch auch deutlich höhere Temperaturen denkbar. Die Temperatur ist damit im Vergleich z. B. zur Lagerung über eine längere Zeit bei Raumtemperatur überproportional hoch, wodurch eine Stabilisierung gewährleistet werden kann. Während des Temperns können an Grenzflächen Temperaturgefälle entstehen, wodurch die Beschichtung überproportional geheizt und Lebensdauereffekte der Beschichtung sowie oberflächennaher Bereiche zumindest nahezu komplett stabilisiert werden können.

20

25

30

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens umfasst das Verfahren weiter: zumindest teilweises Kompaktieren des Substrats des optischen

Elements, wobei das Kompaktieren ein Bestrahlen des optischen Elements mit Elektronen umfasst. Das Verfahren kann somit ein Kompaktieren eines Substrats eines optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung sowie ein Tempern des optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung umfassen. Durch die unabhängigen Elektronenbestrahlungen kann die Flexibilität der Bearbeitung erhöht werden. Das Substrat kann durch die Bestrahlung mit Elektronen lokal kompaktiert werden. Dabei kann das Substratmaterial durch die Bestrahlung lokal langfristig verdichtet werden. Hierdurch kann eine Veränderung, insbesondere eine Korrektur, der Oberflächenform des optischen Elements in der Nähe der bestrahlten Bereiche erzielt werden. So können durch Vorprozesse, insbesondere Beschichtungen, hinterlassene Oberflächenfehler ausgeglichen werden. Mit Hilfe der Bestrahlung der Beschichtung des optischen Elements kann die Kompaktierung, insbesondere eine Kompaktierung in oberflächennahen Bereichen des Substrats, vorzugsweise stabilisiert werden.

Bevorzugt ist die für das Kompaktieren verwendete Elektronenenergie E_{Komp} größer ist als die für das Tempern verwendete Elektronenenergie E_{Temp} . Damit kann eine tiefere Eindringtiefe erreicht werden. Insbesondere kann so die Elektronenenergie E_{Komp} in das Substrat unterhalb der Beschichtung des optischen Elements deponiert werden, um lokal eine Kompaktierung zu erreichen. Die Wirkzonen für die Korrektur und die Temperung sind somit unterschiedlich.

Die Beschleunigungsspannung U_{Komp} zum Kompaktieren beträgt bevorzugt mehr als 30 keV, insbesondere bevorzugt 31 bis 40 keV, weiter insbesondere bevorzugt 41 bis 50 keV, weiter insbesondere bevorzugt 51 bis 60 keV, weiter insbesondere bevorzugt 61 bis 70 keV, weiter insbesondere bevorzugt 71 bis 80 keV, weiter insbesondere bevorzugt 81 bis 90 keV, weiter insbesondere bevorzugt 91 bis 100 keV. Das Kompaktieren erfolgt bevorzugt in einem Bereich zwischen 1 μm und 100 μm , insbesondere bevorzugt zwischen 1 μm und 10 μm , weiter insbesondere bevorzugt zwischen 11 μm und 20 μm , weiter insbesondere bevorzugt zwischen 21 μm und 30 μm , weiter insbesondere bevorzugt zwischen 31 μm und 40 μm , weiter insbesondere bevorzugt zwischen 41 μm und 50 μm , weiter insbesondere bevorzugt zwischen 51

μm und $60\ \mu\text{m}$, weiter insbesondere bevorzugt zwischen $61\ \mu\text{m}$ und $70\ \mu\text{m}$, weiter insbesondere bevorzugt zwischen $71\ \mu\text{m}$ und $80\ \mu\text{m}$, weiter insbesondere bevorzugt zwischen $81\ \mu\text{m}$ und $90\ \mu\text{m}$, weiter insbesondere bevorzugt zwischen $91\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ unterhalb der Beschichtung des optischen Elements.

5

Das Kompaktieren des Substrats des optischen Elements erfolgt bevorzugt vor dem Tempern des optischen Elements oder im Wesentlichen simultan hierzu.

Insbesondere erfolgt das Bestrahlen des Substrats des optischen Elements vor dem Bestrahlen der Beschichtung des optischen Elements oder im Wesentlichen simultan

10 hierzu. So lassen sich vorteilhaft sowohl die Beschichtung als auch die eingebrachte Kompaktierung stabilisieren. Zudem lässt sich das Tempern in-situ durchführen. Das Kompaktieren und Tempern können parallel oder nacheinander in-situ durchgeführt werden. Dabei können die Beschleunigungsspannungen U_{Komp} und U_{Temp} der jeweiligen Prozesse aufeinander abgestimmt werden. Während das Tempern an der
15 Oberfläche in der Beschichtung des optischen Elements stattfindet, wird die Kompaktierung bei in einer darunter liegenden Schicht in dem Substrat erzeugt. Die beiden Prozesse werden so aufeinander abgestimmt, dass das Heizen effizient ist und das Kompaktieren nicht negativ von dem Tempern beeinflusst wird. Dazu wird die Beschleunigungsspannung U_{Komp} zum Kompaktieren vorzugsweise etwas größer als
20 die Beschleunigungsspannung U_{Temp} zum Tempern gewählt. So wird die eingebrachte Kompaktierung möglichst effizient geheizt. Der exakte Wert der Beschleunigungsspannungen kann abhängig von der Dicke der Beschichtung gewählt werden.

25 Wird das Kompaktieren des Substrats vor dem Tempern des optischen Elements durchgeführt, können die Kompaktierung und die Stabilisierung des optischen Elements vorteilhaft mit der gleichen Elektronenkanone durchgeführt werden. Die Elektronenkanone kann beispielsweise zunächst mit einer Beschleunigungsspannung U_{Komp} zum Kompaktieren und anschließend mit einer Beschleunigungsspannung U_{Temp}
30 zum Tempern betrieben werden.

Das Kompaktieren des Substrats und das Tempern des optischen Elements können auch im Wesentlichen simultan erfolgen. Im Wesentlichen simultan meint insbesondere ein zumindest im Wesentlichen gleichzeitiges Kompaktieren des Substrats und Tempern des optischen Elements. Unter einem im Wesentlichen simultanen Kompaktieren des Substrats und Temperns des optischen Elements wird insbesondere verstanden, dass das Kompaktieren des Substrats und das Tempern des optischen Elements parallel erfolgen können. Hierzu können beispielsweise unterschiedliche Elektronenkanonen verwendet werden. Die Elektronenkanonen können mit unterschiedlichen Beschleunigungsspannungen U_{Komp} zum Kompaktieren und U_{Temp} zum Tempern betrieben werden. Die Elektronenkanonen können in einer Anlage zur Elektronenbestrahlung vorgesehen sein. So kann auf eine für einen nachgelagerten Temperprozess zusätzliche Maschine, beispielsweise einen Temperofen, verzichtet werden. Das Verfahren ermöglicht so eine signifikante Einsparung von Produktionszeit und Fläche. Zudem lassen sich die Schichten durch die Elektronenstrahlung gezielt auf viel höhere Temperaturen heizen als mit einem Ofen. Es können Temperaturen von $\geq 60^\circ\text{C}$, insbesondere mehr als 60°C , erreicht werden.

Denkbar ist auch, dass an dem optischen Element, insbesondere der Beschichtung des optischen Elements, ein Gegenfeld, insbesondere ein dynamisches Gegenfeld, angelegt wird. So kann das optische Element sowohl zum Kompaktieren als auch zum Tempern mit der gleichen, höheren Elektronenenergie E_{Komp} bestrahlt werden, wobei durch das Gegenfeld die Elektronen für das Bestrahlen der Beschichtung gezielt abgebremst werden können. Dadurch kann ebenfalls ein Tempern der Beschichtung erzielt werden, wobei keine Änderung der Spannungsquelle der Elektronenstrahlung erforderlich ist.

Gemäß einer zweiten Lehre wird die oben genannte Aufgabe für ein optisches Element, insbesondere ein reflektives optisches Element, dadurch gelöst, dass das optische Element mit einem Verfahren gemäß dem ersten Aspekt stabilisiert wurde. Lebensdauerereffekte des optischen Elements, insbesondere der Beschichtung des

optischen Elements, sind durch ein Temperrn stabilisiert worden. Das optische Element ist insbesondere für die Verwendung in einer Projektionsbelichtungsanlage geeignet. Beispielsweise handelt es sich bei dem optischen Element um einen beschichteten Spiegel. Die Beschichtung des Substrats des Spiegels kann mindestens
5 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
10 aperiodische Schichten oder Beschichtungen, die lediglich eine Schicht umfassen, möglich.

Gemäß einer dritten Lehre wird die oben genannte Aufgabe für ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie dadurch gelöst, dass das
15 Projektionsobjektiv ein optisches Element gemäß dem zweiten Aspekt umfasst. Projektionsobjektive für die Mikrolithographie sind hohen Belastungen durch die Nutzstrahlung, deren Wellenlänge bevorzugt 13,5 nm beträgt, und Strahlung anderer Wellenlängen ausgesetzt, wodurch diese während des Betriebes erwärmt werden. Durch die Verwendung eines optischen Elements gemäß dem zweiten Aspekt, welches
20 also mit einem Verfahren gemäß dem ersten Aspekt stabilisiert wurde, kann eine Veränderung der Oberfläche über die Zeit, z. B. durch Dekompaktierung des Materials, vorteilhaft minimiert werden.

Gemäß einer vierten Lehre wird die oben genannte Aufgabe für eine
25 Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie dadurch gelöst, dass die Projektionsbelichtungsanlage ein Projektionsobjektiv gemäß dem dritten Aspekt umfasst. Eine Projektionsbelichtungsanlage kann zur Erzeugung eines Bilds eines in einer Objektebene angeordneten Objekts in einer Bildebene mit einer Projektionslicht emittierenden Lichtquelle vorgesehen sein. Bei der Projektionsbelichtungsanlage
30 gemäß dem vierten Aspekt handelt es sich um eine Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie. Projektionsbelichtungsanlagen für die Mikrolithographie

dienen zur Herstellung von mikrostrukturierten oder nanostrukturierten Bauteilen der Mikroelektronik oder Mikrosystemtechnik. Mit Hilfe von Projektionsbelichtungsanlagen werden Strukturen, die auf einer Fotomaske ausgebildet sind, in verkleinernder Weise auf Wafer oder dergleichen abgebildet, um
5 über mikrolithographische Prozesse die entsprechenden Strukturen auf dem Wafer zu erzeugen. Insbesondere kann es sich bei einer Projektionsbelichtungsanlage um eine EUV-Projektionsbelichtungsanlage oder eine DUV-Projektionsbelichtungsanlage handeln. Aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung und Verkleinerung der Strukturbreiten werden Projektionsbelichtungsanlagen mit Arbeitslicht mit immer
10 kleineren Wellenlängen betrieben, beispielsweise mit Wellenlängen im Bereich des extrem ultravioletten Lichts (EUV-Licht).

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

Gemäß einer fünften Lehre wird die oben genannte Aufgabe für eine Vorrichtung zur Elektronenbestrahlung umfassend eine Vakuumanlage mit einer Vakuumkammer,
20 wobei die Vakuumanlage eine Elektronenstrahlquelle, insbesondere eine Elektronenkanone, zur Erzeugung eines Elektronenstrahls enthält, dadurch gelöst, dass die Vorrichtung eingerichtet ist, an dem optischen Element, insbesondere der Beschichtung des optischen Elements, ein Gegenfeld, insbesondere ein dynamisches Gegenfeld, zu erzeugen. Hierdurch kann insbesondere das optische Element sowohl
25 zum Kompaktieren als auch zum Tempern mit der gleichen Elektronenenergie bestrahlt werden, wobei durch das Gegenfeld die Elektronen für das Bestrahlen der Beschichtung gezielt abgebremst werden.

Die vorliegende Offenbarung umfasst auch den Gegenstand der folgenden Klauseln:
30

1. Verfahren zur Stabilisierung eines optischen Elements, das Verfahren umfassend:
 - Bereitstellen eines optischen Elements mit einem Substrat und einer Beschichtung, und
 - 5 - Tempern des optischen Elements,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Tempern des optischen Elements ein Bestrahlen der Beschichtung des optischen Elements mit Elektronen umfasst.
- 10 2. Verfahren nach Klausel 1,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Elektronenergie E_{Temp} , insbesondere die Beschleunigungsspannung U_{Temp} , zum Tempern abhängig von der Dicke der Beschichtung, insbesondere mindestens einer Schicht der Beschichtung, des optischen Elements gewählt
15 wird.
3. Verfahren nach Klausel 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Beschleunigungsspannung U_{Temp} zum Tempern 1 bis 30 keV, bevorzugt 1
20 bis 10 keV, weiter bevorzugt 11 bis 15 keV, weiter bevorzugt 16 bis 20 keV, weiter bevorzugt 21 bis 30 keV beträgt.
4. Verfahren nach einer der Klauseln 1 bis 3,
dadurch gekennzeichnet, dass
25 die Stromstärke I_{Temp} zum Tempern 0,1 bis 25 mA, insbesondere 0,1 bis 5 mA, weiter insbesondere 5,1 bis 10 mA, weiter insbesondere 10,1 bis 15 mA, weiter insbesondere 15,1 bis 20 mA, weiter insbesondere 20,1 bis 25 mA beträgt.
5. Verfahren nach einer der Klauseln 1 bis 4,
30 **dadurch gekennzeichnet, dass**
die Temperatur beim Tempern $> 60^{\circ}\text{C}$ beträgt.

6. Verfahren nach einer der Klauseln 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Verfahren weiter umfasst:
- 5 - zumindest teilweises Kompaktieren des Substrats des optischen Elements,
wobei das Kompaktieren ein Bestrahlen des optischen Elements mit
Elektronen umfasst
7. Verfahren nach Klausel 6,
10 **dadurch gekennzeichnet, dass**
die für das Kompaktieren verwendete Elektronenenergie E_{Komp} größer ist als
die für das Tempern verwendete Elektronenenergie E_{Temp} .
8. Verfahren nach Klausel 6 oder 7,
15 **dadurch gekennzeichnet, dass**
die Beschleunigungsspannung U_{Komp} zum Kompaktieren mehr als 30 keV,
insbesondere bevorzugt 31 bis 40 keV, weiter insbesondere bevorzugt 41 bis
50 keV, weiter insbesondere bevorzugt 51 bis 60 keV, weiter insbesondere
bevorzugt 61 bis 70 keV, weiter insbesondere bevorzugt 71 bis 80 keV, weiter
20 insbesondere bevorzugt 81 bis 90 keV, weiter insbesondere bevorzugt 91 bis
100 keV beträgt.
9. Verfahren nach einer der Klauseln 6 bis 8,
dadurch gekennzeichnet, dass
25 das Kompaktieren des Substrats des optischen Elements vor dem Tempern der
Beschichtung des optischen Elements oder im Wesentlichen simultan hierzu
erfolgt.
10. Optisches Element, insbesondere reflektives optisches Element, stabilisiert
30 nach einem Verfahren gemäß einer der Klauseln 1 bis 9.

11. Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie umfassend ein optisches Element nach Klausel 10.

12. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie umfassend ein
5 Projektionsobjektiv nach Klausel 11.

Weitere Ausgestaltungen und Vorteile der Erfindung werden in der folgenden detaillierten Beschreibung einiger beispielhafter Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung in Verbindung mit der Zeichnung erläutert.

10

Kurzbeschreibung der Zeichnung

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele und Varianten der Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert. Die Aspekte der Offenbarung können am besten aus der folgenden detaillierten Beschreibung in Verbindung mit den beigefügten Figuren
15 verstanden werden. Die Figuren sind schematisch und vereinfacht, sie zeigen nur Details, um das Verständnis der Ansprüche zu verbessern, während andere Details weggelassen werden. Für identische oder korrespondierende Teile werden durchgängig die gleichen Bezugsziffern verwendet. Die einzelnen Merkmale jedes Aspekts können jeweils mit beliebigen oder allen Merkmalen der anderen Aspekte
20 kombiniert werden. Diese und andere Aspekte, Merkmale und/oder technische Wirkungen sind aus den nachstehend beschriebenen Abbildungen ersichtlich und werden durch diese verdeutlicht:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Ausführungsform einer
25 Projektionsbelichtungsanlage gemäß dem vierten Aspekt,

Fig. 2 ein Diagramm der Variation der maximalen Eindringtiefe von
Elektronen in eine MoSi-Beschichtung eines optischen Elements
abhängig von der Elektronenenergie,

30

- Fig. 3a-c Simulationen der Trajektorien von Elektronen, die durch eine Ausführungsform eines Verfahrens gemäß dem ersten Aspekt in ein optisches Element eingebracht wurden,
- 5 Fig. 4a-b schematische Darstellungen von Ausführungsformen eines Verfahrens gemäß dem ersten Aspekt zur Stabilisierung eines optischen Elements,
- Fig. 5a-b zeigt ein Bestrahlungsfeld für die Durchführung einer Ausführungsform eines Verfahrens gemäß dem ersten Aspekt zur Stabilisierung eines optischen Elements sowie eine Temperaturentwicklung für diskrete Punkte des Bestrahlungsfelds, und
- 10 Fig. 6 eine schematische Darstellung einer Anlage zur Elektronenbestrahlung für die Durchführung einer Ausführungsform eines Verfahrens gemäß dem ersten Aspekt zur Stabilisierung eines optischen Elements.
- 15

Detaillierte Beschreibung der Zeichnung

- Fig. 1 zeigt exemplarisch den prinzipiellen Aufbau einer Projektionsbelichtungsanlage 10 für die Mikrolithographie, in welcher die Erfindung Anwendung finden kann. Ein Beleuchtungssystem der Projektionsbelichtungsanlage 10 weist neben einer Lichtquelle 12 eine Beleuchtungsoptik 13 zur Beleuchtung eines Objektfeldes 14 in einer Objektebene 15 auf. Eine durch die Lichtquelle 12 erzeugte EUV-Strahlung 23 als optische Nutzstrahlung wird mittels eines in der Lichtquelle 12 integrierten Kollektors derart ausgerichtet, dass sie im Bereich einer Zwischenfokusebene 24 einen Zwischenfokus durchläuft, bevor sie auf einen Feldfacettenspiegel 11 trifft. Nach dem Feldfacettenspiegel 11 wird die EUV-Strahlung 23 von einem Pupillenfacettenspiegel 25 reflektiert. Unter Zuhilfenahme des Pupillenfacettenspiegels 25 und einer optischen Baugruppe 26 mit Spiegeln 26a, 26b und 26c werden Feldfacetten des Feldfacettenspiegels 11 in das Objektfeld 14
- 20
- 25
- 30
- abgebildet.

Beleuchtet wird ein im Objektfeld 14 angeordnetes Retikel 16, das von einem schematisch dargestellten Retikelhalter 17 gehalten wird. Eine lediglich schematisch dargestellte Projektionsoptik 18 dient zur Abbildung des Objektfeldes 14 in ein Bildfeld 19 in eine Bildebene 20. Abgebildet wird eine Struktur auf dem Retikel 16 auf eine lichtempfindliche Schicht eines im Bereich des Bildfeldes 19 in der Bildebene 20 angeordneten Wafers 21, der von einem ebenfalls ausschnittsweise dargestellten Waferhalter 22 gehalten wird. Die Lichtquelle 12 kann Nutzstrahlung insbesondere in einem Wellenlängenbereich zwischen 5 nm und 30 nm emittieren.

Die Erfindung kann ebenso in einer DUV-Projektionsanlage verwendet werden, die nicht dargestellt ist. Eine DUV-Anlage ist prinzipiell wie die oben beschriebene EUV-Projektionsanlage 10 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.

Fig. 2 zeigt die Variation der maximalen Eindringtiefe von Elektronen in einem Schichtsystem einer MoSi-Beschichtung eines optischen Elements für verschiedene Elektronenenergien. Es wurde erkannt, dass bei einer Bestrahlung eines optischen Elements mit Elektronen die Eindringtiefe der Elektronen durch die Elektronenenergie beeinflusst wird. So kann beispielsweise die Heiztiefe über die Elektronenenergie eingestellt werden. Dabei gilt, je größer die Elektronenenergie, desto tiefer die Eindringtiefe der Elektronen. Dadurch lässt sich gezielt die Beschichtung des optischen Elements bestrahlen, indem die Elektronenenergie z. B. an die Dicke der Beschichtung angepasst wird. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die Elektronenenergie E_{Temp} zum Tempern zumindest im Wesentlichen vollständig in der Beschichtung des optischen Elements deponiert und die Beschichtung somit lokal getempert wird. Für ein Kompaktieren des Substrats des optischen Elements kann dagegen eine höhere Elektronenenergie E_{Komp} gewählt werden, um das Substrat gezielt lokal zu kompaktieren.

In den Fig. 3a bis 3c sind Trajektorien simulierter Elektronenstrahlen gezeigt. Die hellen Linien repräsentieren dabei die simulierten Trajektorien der eindringenden Elektronen. Die durch dunkle Linien dargestellten Trajektorien repräsentieren Elektronen, die das Material im Streuprozess wieder verlassen. Auf der rechten Seite der Abbildungen sind die jeweiligen Materialtiefen angegeben. Fig. 3a zeigt eine Simulation der Trajektorien bei einer Elektronenenergie von 5 keV. Bei einer Elektronenenergie von 5 keV gelangen die Elektronen nicht in das Substrat des optischen Elements, welches unterhalb der untersten gestrichelten Linie beginnt. Fig. 3b und 3c zeigen analog die Trajektorien für Elektronenenergien von 15 keV bzw. 55 keV. In Fig. 3b dringen die Elektronen auch in oberflächennahe Bereiche des unterhalb der Beschichtung angeordneten Substrats des optischen Elements ein. Die Elektronen erreichen hierbei Eindringtiefen von etwa bis zu etwa 5500 nm unterhalb der Oberfläche des optischen Elements. Bei einer Elektronenenergie von 55 keV dringen die Elektronen deutlich tiefer in das Substrat ein, wie es in Fig. 3c gezeigt ist.

Fig. 4a und 4b zeigen ein Kompaktieren eines Substrats eines optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung sowie ein anschließendes Tempern des optischen Elements mittels Elektronenbestrahlung. In Fig. 4a ist eine Bestrahlung eines optischen Elements 1 mit einer Elektronenenergie E_{Komp1} (links) zum Kompaktieren des Substrats 2 des optischen Elements 1 dargestellt. Im Anschluss an das Kompaktieren wird die Beschichtung 3 des optischen Elements 1 bestrahlt, um diese zu tempern, wie in Fig. 4b (links) gezeigt. Durch das Tempern lassen sich sowohl die Beschichtung 3 als auch die eingebrachte Kompaktierung stabilisieren.

Reicht die in der Tiefe durch das Tempern eingebrachte Wärme nicht aus, ist es durch Anpassung der Bearbeitungsparameter beim Kompaktieren, insbesondere der Elektronenenergie E_{Komp2} und damit der Tiefe der Kompaktierungszone, möglich, die effektive Temperung von Beschichtung 3 und Kompaktierung des optischen Elements 1 zu ermöglichen. Die Eindringtiefe der Elektronen ist abhängig von der Elektronenenergie. Die Elektronenenergie E_{Komp2} kann niedriger als die Elektronenenergie E_{Komp1} gewählt werden, wodurch die Elektronen weniger tief in das

Substrat 2 eindringen, um dort das Substratmaterial zu kompaktieren, wie in Fig. 4a (rechts) gezeigt. Die Elektronenenergie E_{Temp1} beim Tempern in Fig. 4b (rechts) wird nicht verändert, da sie auf das Schichtsystem 3 des optischen Elements 1 angepasst ist.

5

In Fig. 5a ist die Einteilung eines Bestrahlungsfelds zur Bestrahlung der Beschichtung eines optischen Elements in diskrete Punkte i,j gezeigt. Mit Hilfe eines Elektronenstrahls kann die Oberfläche der Beschichtung des optischen Elements gerastert werden. Die Rasterung erfolgt vorzugsweise mehrfach, beispielsweise zwei bis 10.000 Mal. Der Elektronenstrahl kann auf mindestens einen diskreten Punkt i,j auf der Oberfläche gerichtet werden und auf diesem Punkt für eine bestimmte Zeit verweilen. Beispielsweise beträgt die Verweildauer Δt des Elektronenstrahls 10 ns bis 10 ms. In diesem Zeitintervall kann sich punktuell eine lokale Temperaturspitze an dem diskreten Punkt ergeben, wie aus Fig. 5b hervorgeht. Die Temperatur kann durch den Wärmeeintrag schlagartig hochschnellen. Fig. 5b skizziert die Temperaturentwicklung in jedem Punkt i,j ; $i,j+1$; etc. Verweilt der Elektronenstrahl an einem Punkt schnellt die Temperatur T durch Wärmeeintrag schlagartig hoch und sinkt wieder ab, sobald der Strahl am nächsten Punkt ist. Neben den Temperaturspitzen ergibt sich mit der Zeit auch ein Nettoanstieg von Temperatur ΔT im Gesamtspiegel. Aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit der Relaxationen lassen sich die Temperaturspitzen für eine Stabilisierung nutzen.

Fig. 6 zeigt eine Anlage zur Elektronenbestrahlung mit zwei Elektronenkanonen A, B. Die Elektronenkanone A dient zur Kompaktierung des Substrats 2, während mit Hilfe der Elektronenkanone B die Beschichtung 3 des optischen Elements 1 bestrahlt wird. Das Kompaktieren des Substrats 2 und das Tempern des optischen Elements 1 erfolgen im Wesentlichen simultan. Die Elektronenkanonen A, B werden hierzu mit unterschiedlichen Beschleunigungsspannungen U_{Komp} zum Kompaktieren des Substrats 2 und U_{Temp} zum Tempern des optischen Elements 1 betrieben. Die Elektronenkanone A wird mit einer Beschleunigungsspannung U_{Komp} von 60 keV betrieben, während die Elektronenkanone B mit einer Beschleunigungsspannung

30

U_{Temp} von 10 keV betrieben wird. Die Stromstärke I_{Komp} zum Kompaktieren beträgt 0,1 mA, wodurch eine Leistung P_{Komp} von 6 W erreicht wird. Die Stromstärke I_{Temp} zum Tempern beträgt 2 mA, wodurch eine Leistung P_{Komp} von 20 W erreicht wird. Auf diese Weise können in der Beschichtung 3 des optischen Elements 1 Temperaturen von ≥ 60 °C und damit eine Stabilisierung der Beschichtung 3 sowie oberflächennaher Bereiche des Substrats 2 erreicht werden.

P a t e n t a n s p r ü c h e

1. Verfahren zur Stabilisierung eines optischen Elements (1), das Verfahren umfassend:
- 5 - Bereitstellen eines optischen Elements (1) mit einem Substrat (2) und einer Beschichtung (3), und
- Tempern des optischen Elements (1),
 dadurch gekennzeichnet, dass
 das Tempern des optischen Elements (1) ein Bestrahlen der Beschichtung (3) des optischen Elements (1) mit Elektronen umfasst,
- 10 wobei das Verfahren weiter umfasst:
- zumindest teilweises Kompaktieren des Substrats (2) des optischen Elements (1), wobei das Kompaktieren ein Bestrahlen des optischen Elements (1) mit Elektronen umfasst,
- wobei das Kompaktieren des Substrats (2) des optischen Elements (1) vor dem
- 15 Tempern der Beschichtung (3) des optischen Elements (1) oder im Wesentlichen simultan hierzu erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
 dadurch gekennzeichnet, dass
- 20 die Elektronenenergie E_{Temp} , insbesondere die Beschleunigungsspannung U_{Temp} , zum Tempern abhängig von der Dicke der Beschichtung (3), insbesondere mindestens einer Schicht der Beschichtung (3), des optischen Elements (1) gewählt wird.
- 25 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
 dadurch gekennzeichnet, dass

die Beschleunigungsspannung U_{Temp} zum Tempern 1 bis 30 keV, bevorzugt 1 bis 10 keV, weiter bevorzugt 11 bis 15 keV, weiter bevorzugt 16 bis 20 keV, weiter bevorzugt 21 bis 30 keV beträgt.

- 5 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die Stromstärke I_{Temp} zum Tempern 0,1 bis 25 mA, insbesondere 0,1 bis 5 mA,
 weiter insbesondere 5,1 bis 10 mA, weiter insbesondere 10,1 bis 15 mA, weiter
 insbesondere 15,1 bis 20 mA, weiter insbesondere 20,1 bis 25 mA beträgt.
- 10 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die Temperatur beim Tempern $> 60^{\circ}\text{C}$ beträgt.
- 15 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die für das Kompaktieren verwendete Elektronenenergie E_{Komp} größer ist als die
 für das Tempern verwendete Elektronenenergie E_{Temp} .
- 20 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die Beschleunigungsspannung U_{Komp} zum Kompaktieren mehr als 30 keV,
 insbesondere bevorzugt 31 bis 40 keV, weiter insbesondere bevorzugt 41 bis
 50 keV, weiter insbesondere bevorzugt 51 bis 60 keV, weiter insbesondere
25 bevorzugt 61 bis 70 keV, weiter insbesondere bevorzugt 71 bis 80 keV, weiter
 insbesondere bevorzugt 81 bis 90 keV, weiter insbesondere bevorzugt 91 bis
 100 keV beträgt.
- 30 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
 dadurch gekennzeichnet, dass

an dem optischen Element (1), insbesondere der Beschichtung (3) des optischen Elements (1), ein Gegenfeld, insbesondere ein dynamisches Gegenfeld, angelegt wird.

- 5 9. Verfahren nach Anspruch 8,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 das optische Element (1) sowohl zum Kompaktieren als auch zum Tempern mit
 der gleichen Elektronenenergie bestrahlt wird, wobei durch das Gegenfeld die
 Elektronen für das Bestrahlen der Beschichtung (3) gezielt abgebremst werden.
- 10
10. Optisches Element (1), insbesondere reflektives optisches Element, stabilisiert
 nach einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9.
11. Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie umfassend ein optisches Element
15 nach Anspruch 10.
12. Projektionsbelichtungsanlage (10) für die Mikrolithographie umfassend ein
 Projektionsobjektiv nach Anspruch 11.
- 20 13. Vorrichtung zur Elektronenbestrahlung, insbesondere zur Durchführung eines
 Verfahrens nach Anspruch 8 oder 9, die Vorrichtung umfassend: eine
 Vakuumanlage mit einer Vakuumkammer, wobei die Vakuumanlage mindestens
 eine Elektronenstrahlquelle, insbesondere eine Elektronenkanone, zur
 Erzeugung eines Elektronenstrahls enthält,
- 25 **dadurch gekennzeichnet, dass**
 die Vorrichtung eingerichtet ist, an dem optischen Element (1), insbesondere der
 Beschichtung (3) des optischen Elements (1), ein Gegenfeld, insbesondere ein
 dynamisches Gegenfeld, zu erzeugen.

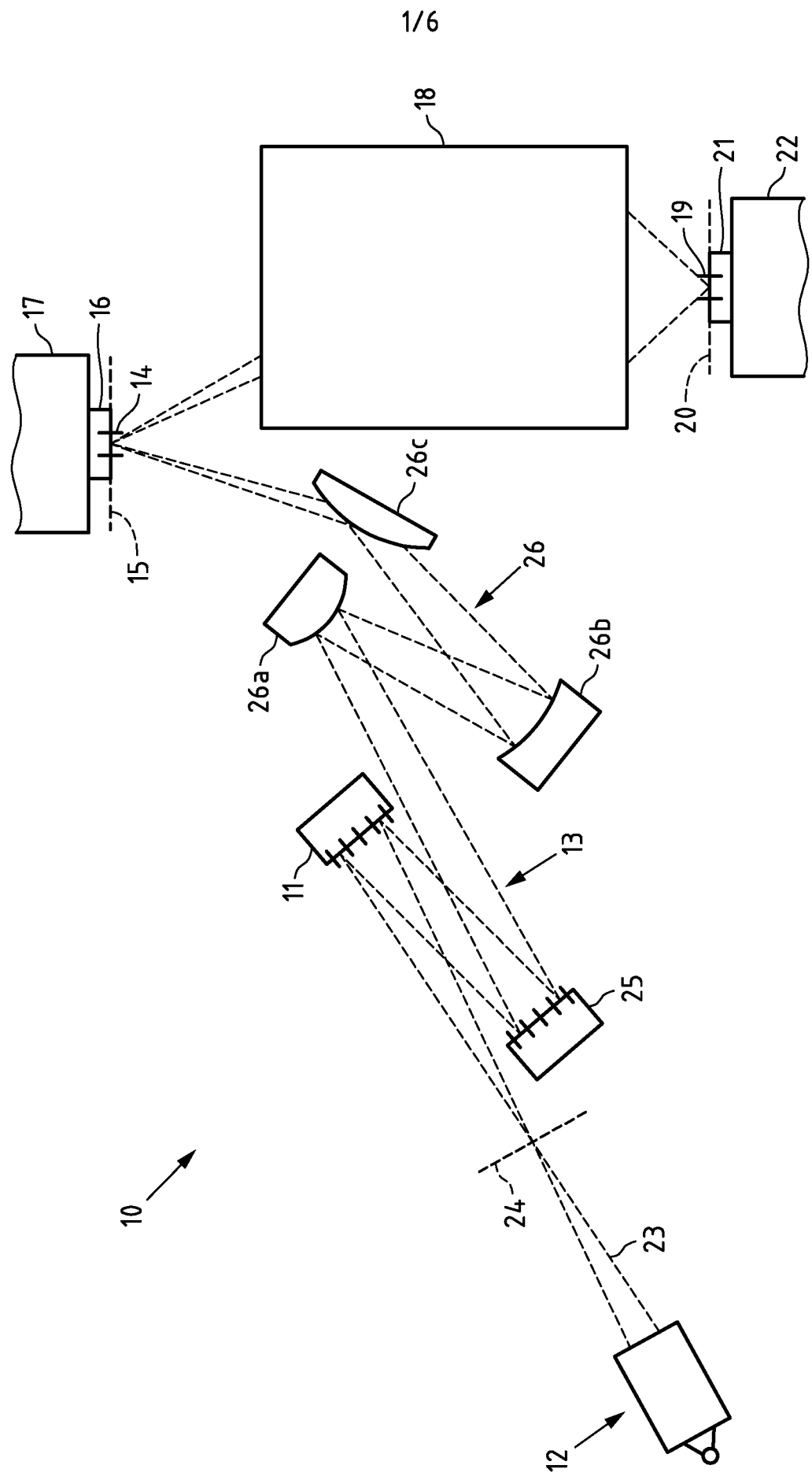


Fig.1

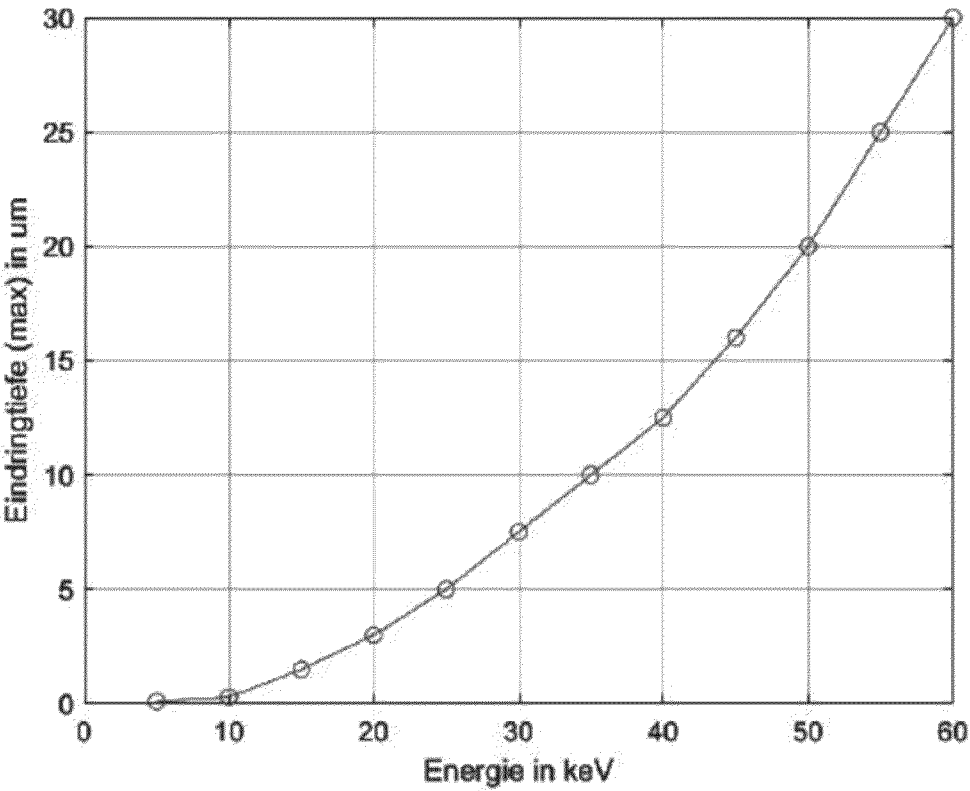


Fig.2

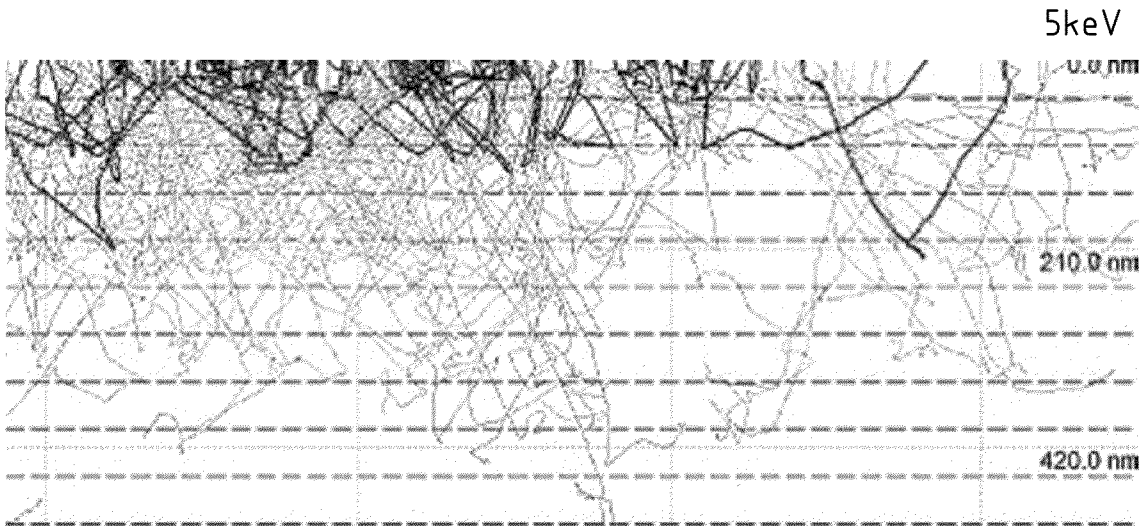


Fig.3a

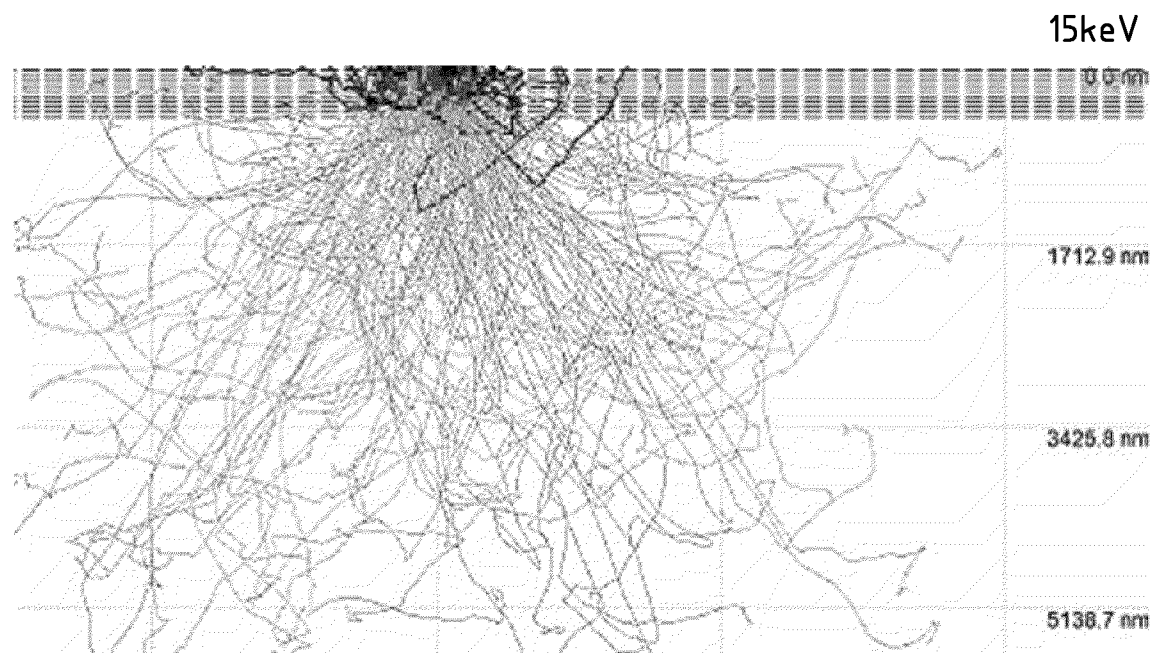


Fig.3b

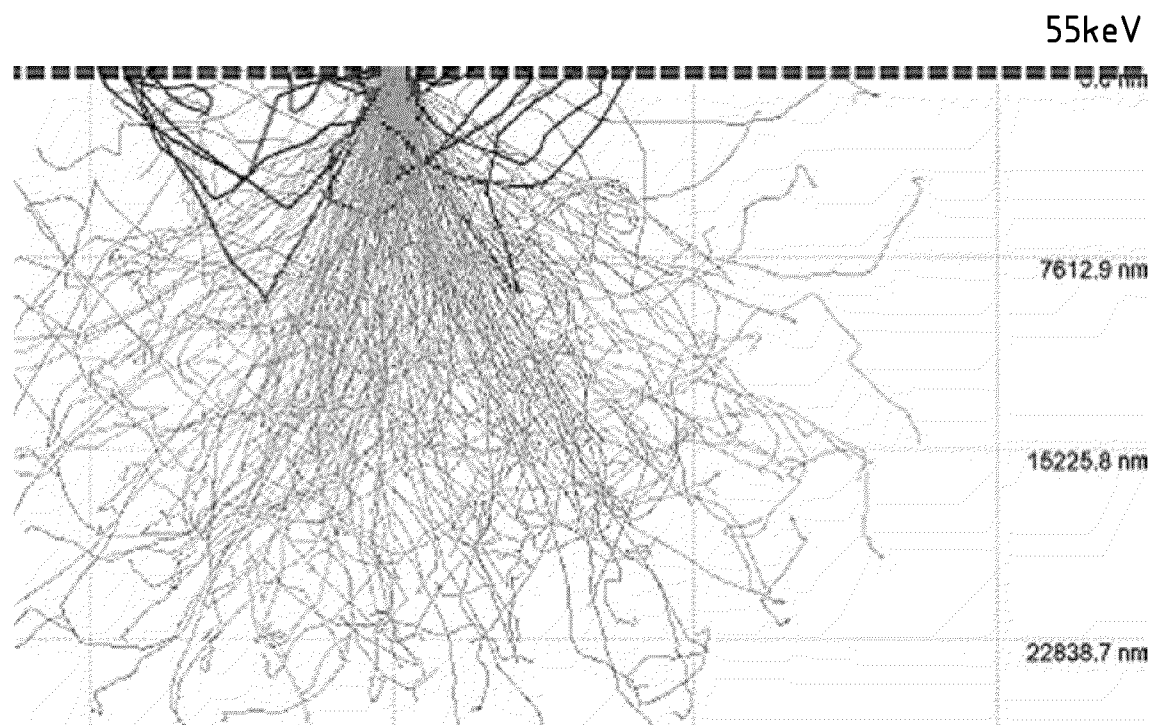


Fig.3c

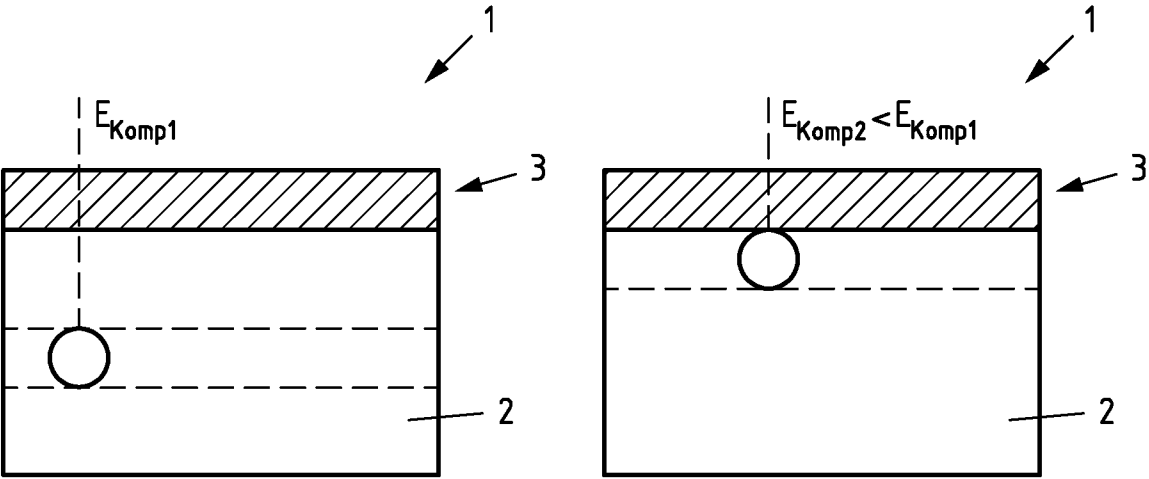


Fig.4a

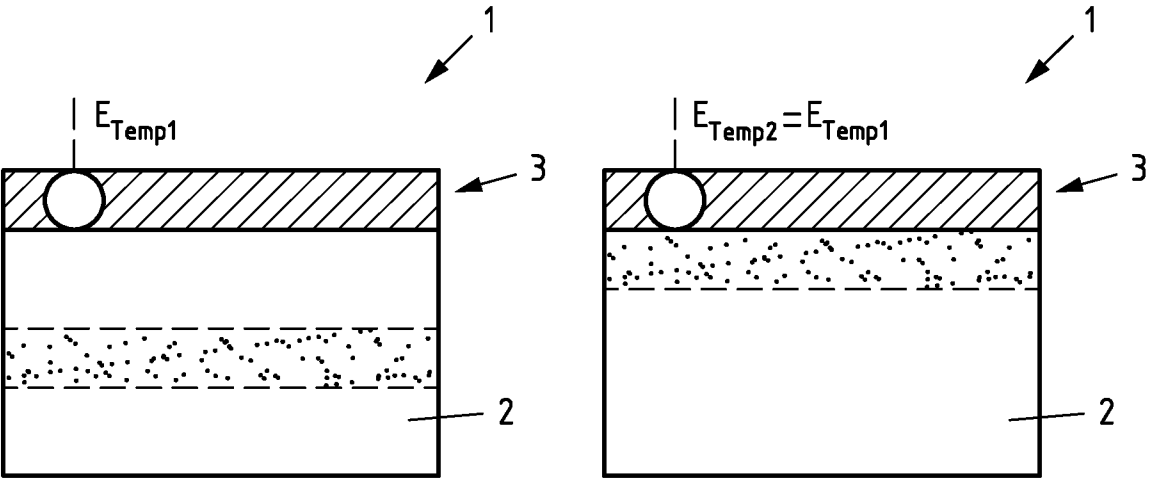


Fig.4b

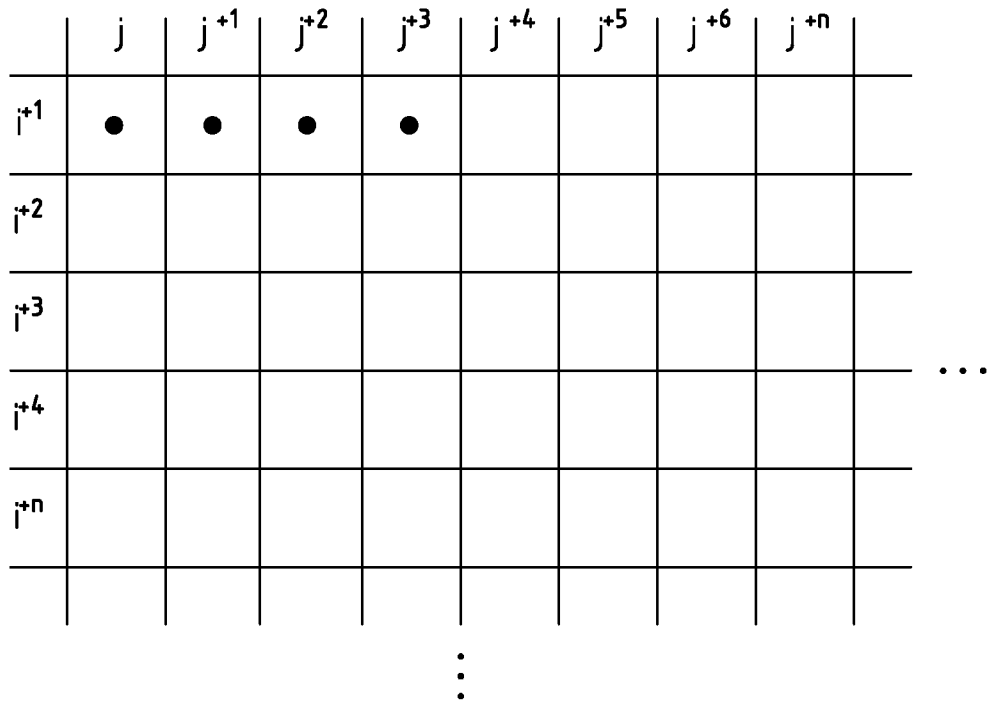


Fig.5a

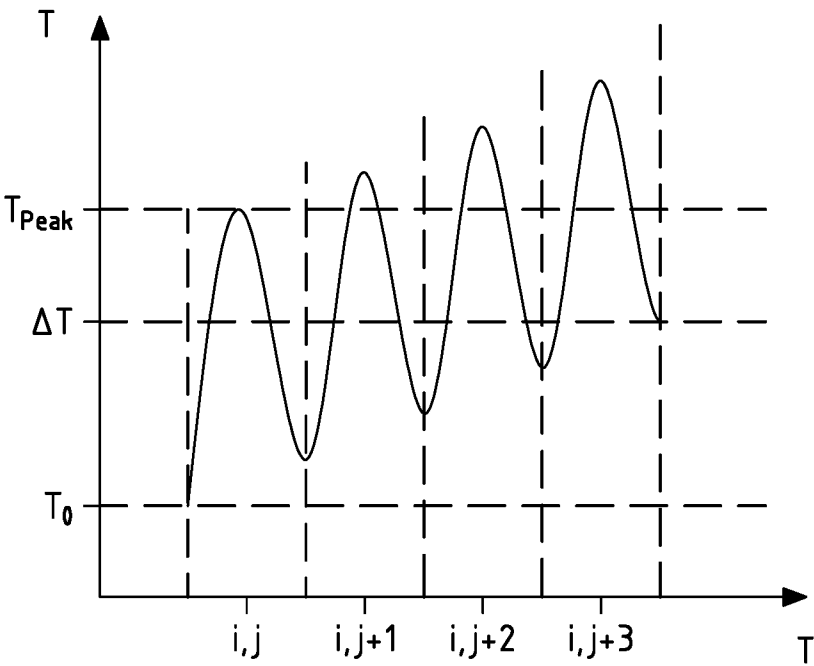


Fig.5b

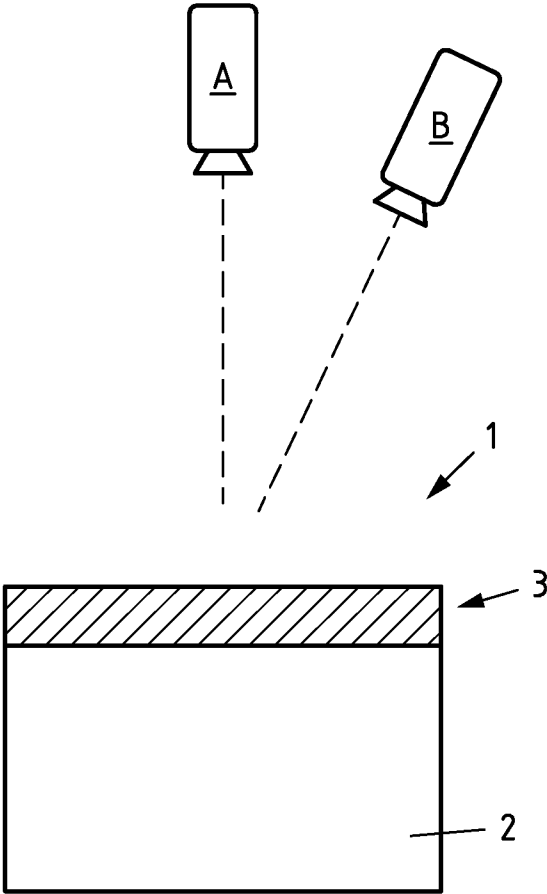


Fig.6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/066443

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER*C03C 17/06*(2006.01)i; *C03C 23/00*(2006.01)i

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C03C

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

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

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2021157244 A1 (KAES MATTHIAS [DE] ET AL) 27 May 2021 (2021-05-27) paragraphs [0006] - [0008], [0011] - [0036], [0050] - [0052]; figures 2A - 2C	1-12
X	EP 2412686 A2 (CORNING INC [US]) 01 February 2012 (2012-02-01) paragraphs [0011] - [0014], [0022]; claims 1-10	10-12
X	DE 102014225197 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 26 November 2015 (2015-11-26) paragraphs [0005] - [0009], [0071]; figure 7	13
A	DE 102020205788 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 11 November 2021 (2021-11-11) paragraphs [0007], [0023], [0033]; figures 5,6	1-13
A	DE 102011084117 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 11 April 2013 (2013-04-11) paragraphs [0018] - [0020], [0033], [0037]; figures 3A-3C	1-13

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

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

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

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

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

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

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

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

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

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

28 September 2024

Date of mailing of the international search report

15 October 2024

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands (Kingdom of the)

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Lecerf, Nicolas

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2024/066443

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2021157244	A1	27 May 2021	CN	112585537	A	30 March 2021
				DE	102018211596	A1	16 January 2020
				KR	20210030348	A	17 March 2021
				TW	202013085	A	01 April 2020
				US	2021157244	A1	27 May 2021
				WO	2020011788	A1	16 January 2020
EP	2412686	A2	01 February 2012	EP	2412686	A2	01 February 2012
				JP	5804824	B2	04 November 2015
				JP	2012033934	A	16 February 2012
				US	2012026473	A1	02 February 2012
				US	2014199494	A1	17 July 2014
DE	102014225197	A1	26 November 2015	NONE			
DE	102020205788	A1	11 November 2021	DE	102020205788	A1	11 November 2021
				EP	4147093	A1	15 March 2023
				JP	2023524792	A	13 June 2023
				KR	20230009414	A	17 January 2023
				US	2023253129	A1	10 August 2023
				WO	2021224353	A1	11 November 2021
DE	102011084117	A1	11 April 2013	CN	103858055	A	11 June 2014
				DE	102011084117	A1	11 April 2013
				EP	2764407	A1	13 August 2014
				JP	2014532309	A	04 December 2014
				KR	20140084012	A	04 July 2014
				US	2014307308	A1	16 October 2014
				WO	2013050199	A1	11 April 2013

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. C03C17/06 C03C23/00 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) C03C		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2021/157244 A1 (KAES MATTHIAS [DE] ET AL) 27. Mai 2021 (2021-05-27) Absätze [0006] - [0008], [0011] - [0036], [0050] - [0052]; Abbildungen 2A - 2C -----	1 - 12
X	EP 2 412 686 A2 (CORNING INC [US]) 1. Februar 2012 (2012-02-01) Absätze [0011] - [0014], [0022]; Ansprüche 1-10 -----	10 - 12
X	DE 10 2014 225197 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 26. November 2015 (2015-11-26) Absätze [0005] - [0009], [0071]; Abbildung 7 ----- - / - -	13
☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 28. September 2024		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 15/10/2024
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Lecerf, Nicolas

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DE 10 2020 205788 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 11. November 2021 (2021-11-11) Absätze [0007], [0023], [0033]; Abbildungen 5,6 -----	1 - 13
A	DE 10 2011 084117 A1 (ZEISS CARL SMT GMBH [DE]) 11. April 2013 (2013-04-11) Absätze [0018] - [0020], [0033], [0037]; Abbildungen 3A-3C -----	1 - 13

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2024/066443

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2021157244 A1	27-05-2021	CN 112585537 A	30-03-2021
		DE 102018211596 A1	16-01-2020
		KR 20210030348 A	17-03-2021
		TW 202013085 A	01-04-2020
		US 2021157244 A1	27-05-2021
		WO 2020011788 A1	16-01-2020
EP 2412686 A2	01-02-2012	EP 2412686 A2	01-02-2012
		JP 5804824 B2	04-11-2015
		JP 2012033934 A	16-02-2012
		US 2012026473 A1	02-02-2012
		US 2014199494 A1	17-07-2014
DE 102014225197 A1	26-11-2015	KEINE	
DE 102020205788 A1	11-11-2021	DE 102020205788 A1	11-11-2021
		EP 4147093 A1	15-03-2023
		JP 2023524792 A	13-06-2023
		KR 20230009414 A	17-01-2023
		US 2023253129 A1	10-08-2023
		WO 2021224353 A1	11-11-2021
DE 102011084117 A1	11-04-2013	CN 103858055 A	11-06-2014
		DE 102011084117 A1	11-04-2013
		EP 2764407 A1	13-08-2014
		JP 2014532309 A	04-12-2014
		KR 20140084012 A	04-07-2014
		US 2014307308 A1	16-10-2014
		WO 2013050199 A1	11-04-2013