

(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
11. Juni 2020 (11.06.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/115112 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
G02B 1/14 (2015.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/083632

(22) Internationales Anmeldedatum:
04. Dezember 2019 (04.12.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2018 221 190.6
07. Dezember 2018 (07.12.2018) DE

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

(72) Erfinder: **PAZIDIS, Alexandra**; Hülbenweg 14, 73457
Essingen-Lautenburg (DE). **NOAH, Martin**; Schubartweg

37, 73447 Oberkochen (DE). **LANGE, Felix**; Alemannen-
weg 4, 89537 Giengen an der Brenz (DE). **SCHAPPER,**
Florian; Alte Stadtgärtnerei 36, 89231 Neu-Ulm (DE).
ZAHLTEN, Claus; Bergheimer Straße 129, 69115 Heidel-
berg (DE). **HÄRTLING, Marcel**; Brandweg 14, 73432 Aa-
len (DE). **SIDORENKO, Aleksey**; Limesstr. 80, 73434 Aa-
len (DE). **VARGAS RUIZ, Salomé**; Schottstrasse 2, 55116
Mainz (DE).

(74) Anwalt: **KOHLER SCHMID MÖBUS PATENT-
ANWÄLTE PARTNERSCHAFTSGESELLSCHAFT
MBB**; Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart (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, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,

(54) Title: METHOD FOR FORMING NANOSTRUCTURES ON A SURFACE AND WAFER INSPECTION SYSTEM

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM BILDEN VON NANOSTRUKTUREN AN EINER OBERFLÄCHE UND WAFER-
INSPEKTIONSSYSTEM

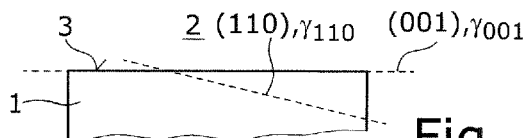


Fig. 1a

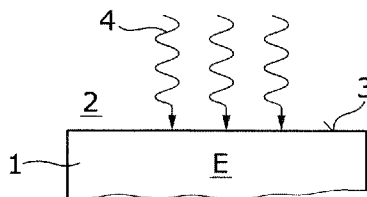


Fig. 1b

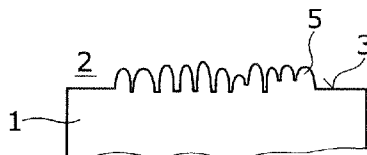


Fig. 1c

(57) Abstract: The invention relates to a method for forming nanostructures (5) on an exposed surface (3) of a crystalline, particularly ionic substrate (1) for transmission of radiation in the FUV/VUV wavelength range, comprising: providing an exposed surface (3) of the substrate (1), which is not oriented along a lattice plane having minimal surface energy, and introducing an energy input (E) into the exposed surface (3) in order to rearrange the exposed surface (3), forming the nanostructures (5), wherein the energy input (E) is generated by irradiating the exposed surface (3) with electromagnetic radiation (4). The invention also relates to an optical element which has a surface (3), on which the nanostructures (5) are formed, and a wafer inspection system.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bilden von Nanostrukturen (5) an einer freiliegenden Oberfläche (3) eines kristallinen, insbesondere ionischen Substrats (1) zur Transmission von Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich, umfas-
send: Bereitstellen einer freiliegenden Oberfläche (3) des Substrats (1), die nicht entlang einer Gitterebene mit minimaler Oberflächen-
energie orientiert ist, sowie Einbringen eines Energieeintrags (E) in die freiliegende Oberfläche (3) zur Umlagerung der freiliegenden



WO 2020/115112 A2



HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, 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:

- ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

Oberfläche (3) unter Bildung der Nanostrukturen (5), wobei der Energieeintrag (E) durch Bestrahlen der freiliegenden Oberfläche (3) mit elektromagnetischer Strahlung (4) erzeugt wird. Die Erfindung betrifft auch ein optisches Element, welches eine Oberfläche (3) aufweist, an der Nanostrukturen (5) gebildet sind, sowie ein Wafer-Inspektionssystem.

Verfahren zum Bilden von Nanostrukturen an einer Oberfläche und Wafer-Inspektionssystem

5

Bezugnahme auf verwandte Anmeldungen

Diese Anmeldung beansprucht die Priorität der deutschen Patentanmeldung DE 10 2018 221 190.6 vom 07.12.2018, deren gesamter Offenbarungsgehalt durch
10 Bezugnahme zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird.

Hintergrund der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bilden von Nanostrukturen an einer
15 Oberfläche eines (ein-)kristallinen, insbesondere ionischen Substrats zur Transmission von Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich. Die Erfindung betrifft auch ein optisches Element, welches ein kristallines, insbesondere ionisches Substrat aufweist, sowie ein Wafer-Inspektionssystem.

20 Generell ist es günstig, in optischen Systemen, beispielsweise in Form von Wafer-Inspektionssystemen, eine möglichst hohe Transmission zu erzeugen. Die Transmission von optischen Systemen wird im Normalfall entweder durch Absorption an einer Grenzfläche zwischen einem optischen Element und der Umgebung oder - bei transmissiven optischen Elementen - durch Reflexion an
25 einer Grenzfläche zwischen dem optischen Element und der Umgebung verringert. Die Reflexion an einer Oberfläche eines transmissiven optischen Elements kann durch das Aufbringen von Interferenzschichten (Antireflex-Beschichtung) oder durch eine Nanostrukturierung der Oberfläche reduziert werden.

30

Die Reduzierung der Reflexion an einer Oberfläche eines transmissiven optischen Elements durch eine (Nano-)Strukturierung bietet den Vorteil, dass

mit einem in der Regel kostengünstigen Verfahren eine sehr dünne Oberflächenschicht bzw. -struktur erzeugt werden kann, die eine Reduzierung der Reflexion auf nahezu Null ermöglicht. Bei optischen Elementen für den FUV-Wellenlängenbereich zwischen ca. 200 nm und ca. 280 nm und/oder für
5 den VUV-Wellenlängenbereich bei Wellenlängen zwischen ca. 100 nm und 200 nm führt eine Nanostrukturierung durch herkömmliche Ätzverfahren jedoch typischerweise zu einer Erhöhung der Absorption, da entweder durch die verwendete Ätzmaske oder durch das verwendete Ätzverfahren (Plasmaätzen oder chemisches Nassätzen) absorbierende Stoffe in die poröse Nanostruktur
10 eingetragen werden. Zudem können durch das Plasma ggf. Fehlstellen im geätzten Material der Oberfläche erzeugt werden. Nachträglich aufgebrachte selbstorganisierende Nanostrukturen oder poröse Strukturen enthalten in der Regel zudem zu viele absorbierende Fremdstoffe, was zu einem Transmissionsverlust und häufig auch zu Problemen mit der Lebensdauer des
15 optischen Elements führt.

Bei der Herstellung von Nanostrukturen für optische Elemente im FUV- und/oder im VUV-Wellenlängenbereich, d.h. bei Wellenlängen zwischen ca. 100 nm und ca. 280 nm, besteht zudem das Problem, dass die für derartige
20 optische Elemente verwendeten Substrat-Materialien in der Regel nur schwer geätzt werden können. Weiterhin werden im Vergleich zu optischen Elementen, die bei Wellenlängen im sichtbaren Wellenlängenbereich eingesetzt werden, Nanostrukturen mit erheblich geringeren Strukturgrößen benötigt, deren Herstellung aufwändiger ist.

25

Bei einem erheblichen Energieeintrag in eine Oberfläche, wie sie bei der Bestrahlung eines kristallinen Materials, insbesondere eines ionischen Kristalls, mit energiereicher Strahlung im FUV- oder VUV-Wellenlängenbereich in einem Wafer-Inspektionssystem auftritt, kann es zu einer Veränderung der Oberfläche,
30 in der Regel zu einer Degradation der Oberfläche, kommen. Eine Oberfläche besitzt gegenüber dem Volumen eines Festkörpers einen energetisch

ungünstigeren Zustand. Zudem können durch die (End-) Bearbeitung bei der Herstellung der Oberfläche (Schleifen, Polieren, ...) Störungen in die Oberfläche eingetragen werden, die besondere Schwachstellen darstellen. Insbesondere tritt dieses Problem bei der Bestrahlung einer nicht perfekten
5 Oberfläche mit energiereicher Strahlung auf, da eine solche Oberfläche eine erhöhte Absorption aufweist, so dass dort ein deutlich größerer Energieeintrag auftritt als im Volumen des Substrats des optischen Elements.

Aufgabe der Erfindung

10

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Bilden von Nanostrukturen an einer Oberfläche bereitzustellen, bei dem die Absorption der Oberfläche möglichst nicht vergrößert wird, sowie ein optisches Element mit einer solchen Oberfläche bereitzustellen. Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, ein
15 Wafer-Inspektionssystem bereitzustellen, bei dem einer Degradation einer Oberfläche eines optischen Elements bei der Bestrahlung entgegengewirkt wird.

Gegenstand der Erfindung

20

Diese Aufgabe wird gemäß einem ersten Aspekt gelöst durch ein Verfahren der eingangs genannten Art, umfassend: Bereitstellen einer freiliegenden Oberfläche des Substrats, die nicht entlang einer Gitterebene mit minimaler Oberflächenenergie orientiert ist, sowie Einbringen eines Energieeintrags in die
25 freiliegende Oberfläche zur Umlagerung der freiliegenden Oberfläche unter Bildung der Nanostrukturen.

Bei diesem Aspekt der Erfindung wird ausgenutzt, dass Oberflächen von (ein-) kristallinen Substraten, insbesondere von ionischen (ein-)kristallinen Substraten
30 bzw. Materialien, bei denen die Netz- bzw. Gitterebenen Dipolcharakter haben, je nach freiliegender Gitterebene große Unterschiede in ihrer

Oberflächenenergie aufweisen. Bei dem Verfahren zum Bilden der Nanostrukturen verläuft die freiliegende Oberfläche des Substrats nicht entlang einer Gitterebene des Kristalls mit minimaler Oberflächenenergie, sondern typischerweise entlang einer anderen Ebene oder weist mehrere von einer Ebene mit minimaler Oberflächenenergie abweichende Ebenen auf, so dass die Oberflächenenergie der freiliegenden Oberfläche(n) größer ist als die minimale Oberflächenenergie.

Wird in eine solche freiliegende Oberfläche Energie eingetragen, die groß genug ist, um eine Aktivierungsenergie zu überwinden, die zur Umlagerung der freiliegenden Oberfläche erforderlich ist, nimmt die freiliegende Oberfläche eine andere Konfiguration mit einer niedrigeren Oberflächenenergie ein. Die Umlagerung von Atomen bzw. von Atomgruppen (von Gruppen, die dem chemischen Molekül einer ionischen Verbindung des Kristalls, z.B. MgF_2 , entsprechen) in den energetisch günstigeren Zustand führt zu einer Aufräuhung und damit zu einer Nanostrukturierung der freiliegenden Oberfläche.

Es ist für die Umlagerung nicht erforderlich, dass die gesamte freiliegende Oberfläche in eine Konfiguration mit einer geringeren Oberflächenenergie übergeht, vielmehr ist bereits die Verringerung des Anteils der freiliegenden Oberfläche, der einen energetisch ungünstigen Zustand aufweist und eine gleichzeitige Vergrößerung des Anteils der freiliegenden Oberfläche, der einen energetisch günstigeren Zustand aufweist, für die Bildung der Nanostrukturen ausreichend.

Die Gitterebene, welche eine minimale Oberflächenenergie aufweist, hängt vom Material des Substrats bzw. des ionischen Kristalls ab. Für den Fall, dass das Substrat bzw. der ionische Kristall aus MgF_2 gebildet ist, weist beispielsweise die (110)-Gitterebene eine minimale Oberflächenenergie auf, d.h. die freiliegende Oberfläche sollte nicht entlang der (110)-Gitterebene verlaufen. Die

Gitterebenen werden in der vorliegenden Anmeldung wie allgemein üblich durch die Miller'schen Indizes beschrieben.

Durch die auf die weiter oben beschriebene Weise gebildeten Nanostrukturen wird die Absorption der Oberfläche nicht bzw. nur geringfügig erhöht, da keine schädlichen Fremdstoffe in Kontakt mit der Oberfläche gebracht werden. Die Reflektivität der nanostrukturierten Oberfläche kann gegenüber der freiliegenden Oberfläche vor dem Energieeintrag jedoch deutlich reduziert werden. Bei der Bildung der Nanostrukturen auf die weiter oben beschriebene Weise wird daher die Transmission des Substrats bzw. eines aus diesem hergestellten transmissiven optischen Elements und aufgrund der geringeren Absorption auch dessen Lebensdauer gegenüber herkömmlichen Verfahren zur Nanostrukturierung deutlich erhöht.

Bevorzugt wird zum Bereitstellen der freiliegenden Oberfläche das Substrat entlang einer Gitterebene geschnitten, die nicht mit der Gitterebene mit minimaler Oberflächenenergie übereinstimmt. Wie weiter oben beschrieben wurde, ergeben sich insbesondere bei ionischen Kristallen je nach freigelegter Gitterebene starke Unterschiede in den Oberflächenenergien. Die Orientierung der Gitterebene, entlang derer der Kristall geschnitten wird, wird in der Regel so gewählt, dass diese eine möglichst hohe Oberflächenenergie aufweist. Wird wie weiter oben beschrieben MgF_2 als Substrat-Material gewählt, kann die freiliegende Oberfläche beispielsweise entlang der (001)-Gitterebene verlaufen, da diese eine vergleichsweise hohe Oberflächenenergie aufweist. Auch die Gitterebene, entlang derer die freiliegende Oberfläche geschnitten werden sollte, hängt vom Substrat-Material ab.

Bei einer Variante wird der Energieeintrag durch Bestrahlen der freiliegenden Oberfläche mit elektromagnetischer Strahlung erzeugt, d.h. die elektromagnetische Strahlung stellt die (Wärme-)Energie für die Umlagerung bereit. Es hat sich gezeigt, dass die Bestrahlung der freiliegenden Oberfläche

mit Strahlung ausreichend großer Intensität (in der Größenordnung von einigen mW/cm^2 oder darüber) ausreichend ist, um die Aktivierungsenergie zu überwinden und eine Umlagerung der freiliegenden Oberfläche zu bewirken.

- 5 Bevorzugt wird die freiliegende Oberfläche mit elektromagnetischer Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich oder im IR-Wellenlängenbereich bestrahlt. Insbesondere bei der Bestrahlung mit Strahlung bei kleinen Wellenlängen von z.B. weniger als 280 nm kann die Energie sehr effizient in die Oberfläche eingetragen werden, d.h. die Umlagerungsrate ist vergleichsweise groß, so
- 10 dass die Umlagerung der Oberfläche bei vergleichsweise kurzen Bestrahlungsdauern ermöglicht wird. Für den Fall, dass Wärmestrahlung im IR-Wellenlängenbereich von mehr als ca. 1000 nm für die Bestrahlung verwendet wird, sollte ein Teilbereich des IR-Wellenlängenbereichs für die Bestrahlung ausgewählt werden, in dem die Absorption des Substrats möglichst groß ist. Auf
- 15 diese Weise weist die IR-Strahlung eine geringe Eindringtiefe in das Substrat auf, so dass die eingebrachte Energie auf die Oberfläche bzw. auf ein oberflächennahes Substrat-Volumen konzentriert bleibt.

- Bei einer weiteren Variante wird der Energieeintrag durch Konduktion und/oder
- 20 durch Konvektion in die freiliegende Oberfläche eingebracht. Ein direkter Wärmeübertrag (Konduktion) durch einen Kontakt der Oberfläche mit einem erwärmten bzw. beheizten Festkörper, der eine ausreichend große Temperatur für die Wärmeübertragung aufweist, oder durch Konvektion, z.B. durch ein an der Oberfläche entlang strömendes Fluid mit ausreichender Temperatur kann
- 25 ein Energieeintrag in die freiliegende Oberfläche erfolgen, der eine Umlagerung der Oberfläche bewirkt.

- Für den Fall, dass die freiliegende Oberfläche zu einem überwiegenden Teil mit Adsorbaten bedeckt ist, ist die Umlagerung jedoch in der Regel gehemmt, d.h.
- 30 die Umlagerungsrate ist gering. Dies liegt u.a. daran, dass Adsorbate einen Teil der in die Oberfläche eingebrachten Energie abführen (Verdunstungskälte). Bei

Adsorbaten, die einen starken Dipol bilden, wie dies z.B. bei Wasser der Fall ist, wird die Oberflächenenergie an der freiliegenden Oberfläche, die selbst einen Dipolcharakter aufweist, stark abgesenkt und somit die treibende Kraft für die Umlagerung reduziert. Es ist daher günstig, beim Einbringen des

5 Energieeintrags die Bedeckung der Oberfläche mit Adsorbaten unter einen kritischen Wert des Bedeckungsgrads abzusenken, der vom Substrat-Material sowie von weiteren Prozessparametern wie Temperatur, Druck, etc. abhängig ist, um eine hohe Umlagerungsrate und somit eine effiziente Nanostrukturierung zu erreichen. Der Bedeckungsgrad der Oberfläche mit Adsorbaten,
10 insbesondere mit Wasser, sollte bei weniger als ca. 50%, bevorzugt bei weniger als ca. 20% liegen.

Bei einer Variante wird der Energieeintrag in die freiliegende Oberfläche in einer Umgebung mit einem Wassergehalt von weniger als 10 ppm (im Volumen),

15 bevorzugt von weniger als 1 ppm (im Volumen), eingebracht. Bei dieser Variante wird das Substrat typischerweise in eine Umgebung bzw. in eine Atmosphäre eingebracht, in welcher (im Wesentlichen) Atmosphärendruck (ca. 1 bar) herrscht. Das Substrat kann beim Einbringen des Energieeintrags z.B. in einer Umgebung angeordnet sein, in die ein Inertgas, z.B. Stickstoff, oder
20 (trockene) Luft eingebracht ist, um Kontaminationen der freiliegenden Oberfläche zu vermeiden. Ein Wasser-Gehalt in der Umgebung des Substrats bzw. der Oberfläche, der unter den oben angegebenen Werten liegt, führt typischerweise zu einer hohen Umlagerungsrate und somit zu einer effizienten Nanostrukturierung. Die Art der umgebenden Atmosphäre kann variieren,
25 sofern diese trocken ist. Zur Vermeidung von Kontaminationen sollte die Umgebung allerdings frei von Stoffen sein, die sich während der Umlagerung in die Nanostrukturen einlagern können wie z.B. Siloxane oder organische Kontaminationen.

30 Bei einer weiteren Variante erfolgt der Energieeintrag in die freiliegende Oberfläche in einer Vakuum-Umgebung mit einem Wasser-Partialdruck von

weniger als 10^{-4} mbar, bevorzugt von weniger als 10^{-5} mbar. In der Vakuum-Umgebung herrscht typischerweise ein Gesamt-Druck von ca. 10^{-3} mbar oder darunter.

5 Bei einer weiteren Variante wird das Einbringen des Energieeintrags so lange durchgeführt, bis die Oberfläche, an der die Nanostrukturen gebildet sind, eine gegenüber der freiliegenden Oberfläche vor dem Einbringen des Energieeintrags um mindestens 0,03 reduzierte Reflektivität für Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich und/oder eine Reflektivität von weniger als 0,02
10 für Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich aufweist. Wie weiter oben beschrieben wurde, hängt die Umlagerungsrate von mehreren Prozessparametern ab. Bei einer ausreichend langen Zeitdauer des Energieeintrags kann die Reflektivität der Oberfläche aber in der Regel deutlich abgesenkt werden.

15 Unter der Reflektivität für Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich wird verstanden, dass die Reflektivität im gesamten Wellenlängenbereich zwischen 100 nm und 280 nm um den oben angegebenen Wert (0,03) reduziert bzw. unter den oben angegebenen Wert (0,02) abgesenkt wird. Für den Fall, dass
20 ein kleinerer Wellenlängenbereich betrachtet wird, der beispielsweise nur den VUV-Wellenlängenbereich zwischen ca. 100 nm und ca. 200 nm umfasst, kann die Reflektivität ggf. noch deutlich stärker abgesenkt werden, beispielsweise um mehr als ca. 0,045 bis 0,05 und auch die absolute Reflektivität der Oberfläche, an der die Nanostrukturen gebildet sind, kann auf weniger als z.B. 0,01
25 abgesenkt werden.

Bei einer weiteren Variante wird das Material des Substrats ausgewählt aus der Gruppe umfassend: MgF_2 , CaF_2 , LiF . Bei beiden Materialien handelt es sich um ionische Kristalle, die eine hohe Transmission für Strahlung im FUV/VUV-
30 Wellenlängenbereich aufweisen, so dass diese als transmissive optische Elemente z.B. in Wafer-Inspektionssystemen verwendet werden können.

Die Erfindung betrifft auch ein optisches Element der eingangs genannten Art, bei dem das Substrat eine Oberfläche mit Nanostrukturen aufweist, die gemäß des weiter oben beschriebenen Verfahrens gebildet sind bzw. gebildet wurden.

5 Das transmissive optische Element kann im einfachsten Fall aus dem weiter oben beschriebenen Substrat bestehen. In diesem Fall weist das Substrat bereits die für das optische Element vorgesehene Geometrie auf.

Gegebenenfalls kann das Substrat aber auch nachbearbeitet werden, um das optische Element herzustellen, beispielsweise indem das Substrat randseitig

10 beschnitten wird, um dieses in eine Fassung einzubringen. Bei der freiliegenden Oberfläche des Substrats bzw. des optischen Elements, welche die Nanostrukturen aufweist, kann es sich um eine plane Oberfläche oder ggf. um eine gekrümmte Oberfläche handeln. Bei dem Material des Substrats des optischen Elements kann es sich beispielsweise um MgF_2 , um CaF_2 oder um
15 LiF handeln.

Bei einer Ausführungsform weist die Oberfläche, welche die Nanostrukturen aufweist, für Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich eine Reflektivität von weniger als 0,02, bevorzugt von weniger als 0,01 auf. Wie weiter oben
20 beschrieben wurde, kann eine entsprechend geringe Reflektivität an der Oberfläche erzeugt werden, wenn die Prozessparameter geeignet gewählt werden bzw. wenn die Zeitdauer des Einbringens des Energieeintrags ausreichend lang ist.

25 Beim Betrieb des optischen Elements sollte darauf geachtet werden, dass die Oberfläche, an der die Nanostrukturen gebildet sind, keine weitere Umlagerung mehr erfährt. Eine solche Umlagerung hätte eine zusätzliche Aufrauhung der Oberfläche zur Folge, die für die Reduzierung der Reflektivität in der Regel nicht notwendig ist und die für die Anlagerung von unerwünschten, z.B.

30 Strahlung absorbierenden Adsorbaten zur Verfügung stehende Oberfläche vergrößern sowie zu unerwünschter Streulichtbildung beitragen würde. Die

Umlagerung kann einerseits dadurch vermieden werden, dass die Oberfläche mit Strahlung bestrahlt wird, deren Intensität an der Oberfläche so gering ist, dass diese keinen für die Umlagerung ausreichenden Energieeintrag erzeugt bzw. die Umlagerung auf sehr langen Zeitskalen erfolgt oder indem die

5 Oberfläche im Betrieb mit Strahlung bei anderen Wellenlängen bestrahlt wird als bei der Bildung der Nanostrukturen. Andererseits kann der Umlagerung entgegengewirkt werden, indem gezielt Adsorbate in die Umgebung des optischen Elements eingebracht werden, welche die eingebrachte Energie schnell wieder abführen (Verdunstungskälte) und welche ggf. zusätzlich einen
10 (starken) Dipol bilden, wodurch die Oberflächenenergie abgesenkt und somit die treibende Kraft für die Umlagerung reduziert werden kann. Auch bei einer Oberfläche, an der keine Nanostrukturen gebildet sind, sollte darauf geachtet werden, dass diese beim Betrieb des optischen Elements keine Umlagerung erfährt.

15

Ein zweiter Aspekt der Erfindung betrifft ein Wafer-Inspektionssystem, umfassend: einen Innenraum, in dem mindestens ein optisches Element zur Transmission von Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich angeordnet ist, das bevorzugt ein kristallines, insbesondere ionisches Substrat umfasst, wobei
20 das optische Element insbesondere wie weiter oben beschrieben ausgebildet sein kann, eine Strahlungsquelle zur Bestrahlung einer Oberfläche des optischen Elements mit Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich, sowie einen Gaseinlass, der zur Zuführung eines bevorzugt polaren Adsorbats, insbesondere von Wasser, in den Innenraum zumindest während der
25 Bestrahlung der Oberfläche ausgebildet bzw. konfiguriert ist. Der Gaseinlass bzw. das Gaseinlasssystem für die Zuführung des Adsorbats in den Innenraum weist typischerweise ein Reservoir auf, in dem das Adsorbat enthalten ist. Bei der Anlagerung des Adsorbats an der Oberfläche handelt es sich um einen reversiblen Prozess.

30

Wie weiter oben beschrieben wurde, erfolgt bei der Bestrahlung der Oberfläche eines transmittierenden optischen Elements mit Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich ein Energieeintrag in die bestrahlte Oberfläche, die zu einer Veränderung der Oberfläche, typischerweise in Form einer

5 unerwünschten Aufrauung der Oberfläche führen kann. Dies ist insbesondere bei optischen Elementen der Fall, die aus den weiter oben beschriebenen Substraten in Form von ionischen Kristallen gebildet sind, da deren Oberflächenenergie stark von der Orientierung der bestrahlten Oberfläche relativ zum Kristall-Gitter abhängig ist. Insbesondere bei derartigen Substraten
10 kann es daher zu einer Umlagerung der Oberfläche des optischen Elements während des Betriebs des Wafer-Inspektionssystems kommen, die zu einer Veränderung der Oberflächenstruktur führt. Anders als bei dem weiter oben beschriebenen Verfahren, bei dem die Umlagerung kontrolliert erfolgt, ist die Aufrauung der Oberfläche während des Betriebs des Wafer-
15 Inspektionssystems nicht erwünscht, da bei der Aufrauung Streulicht gebildet wird bzw. da generell eine größere Oberfläche entsteht, an der sich unerwünschte, z.B. eine absorbierende Wirkung aufweisende Adsorbate anlagern können. Dieses Problem tritt insbesondere bei Wafer-Inspektionssystemen auf, da diese Systeme in der Regel eine hohe
20 Strahlungsintensität benötigen und in dem Innenraum des Wafer-Inspektionssystems, der beispielsweise in einem Gehäuse eines optischen Systems des Wafer-Inspektionssystems gebildet sein kann in der Regel ein Inertgas eingebracht oder ein Vakuum erzeugt wird.

25 Durch die Zuführung eines Adsorbats zu der Oberfläche kann die Degradation der Oberfläche abgemildert werden: Das Adsorbat kann einen Anteil der Wärmeenergie, welche durch die Absorption der Strahlung an der Oberfläche entsteht, aufnehmen und durch Desorption abführen, wobei Verdunstungskälte entsteht, so dass an der Oberfläche weniger Energie für Umlagerungseffekte
30 und andere die Oberfläche schädigende Effekte zur Verfügung steht. Bei dem Adsorbat kann es sich um ein wenig polares Kondensat, beispielsweise um

Ether, handeln. Grundsätzlich sollte das Adsorbat weder giftig noch ätzend sein, um eine einfache Handhabung zu ermöglichen.

5 Für den Fall, dass es sich bei dem Substrat um einen ionischen Kristall handelt, hat sich die Zuführung eines polaren Adsorbats, d.h. eines Adsorbats, welches ein Dipolmoment aufweist, insbesondere die Zuführung von Wasser, als günstig erwiesen: Da die Oberflächen ionischer Kristalle, die eine erhöhte Oberflächenenergie aufweisen, typischerweise einen Dipolcharakter haben, können die Dipole an diesen Oberflächen durch die Anlagerung von Molekülen
10 des Adsorbats gesättigt werden, welche ein Dipolmoment aufweisen. Aufgrund seines großen Dipolmoments bietet sich zu diesem Zweck insbesondere Wasser an.

Die Adsorption von Fluorwasserstoff und von Wasser an Oberflächen von
15 MgF_2 , die eine unterschiedliche Orientierung aufweisen, wird beispielsweise in dem Artikel „The effect of electron correlation on the adsorption of hydrogen fluoride and water on magnesium fluoride surfaces“, E. Kanaki et al., Phys. Chem. Chem. Phys. 2015, 17, 18722-18728 beschrieben. In dem Artikel „Theoretical investigation of MgF_2 surface structure“, B. Paulus et al., HLRN,
20 “zulassung.hlrn.de/kurzbeschreibungen/bec00053.pdf“ wird beschrieben, dass Adsorbate wie z.B. Wasser oder HF auf der Oberfläche von MgF_2 einen Einfluss auf die katalytische Aktivität der Oberfläche haben.

Bei einer Ausführungsform weist das Wafer-Inspektionssystem eine
25 Einstelleinrichtung zur Einstellung eines Gehalts des Adsorbats in dem Innenraum auf. Um mit dem Adsorbat die gewünschte Wirkung zu erzielen, die Degradation der Oberfläche zu verhindern, ist typischerweise eine Mindestkonzentration des Adsorbats in dem Innenraum erforderlich. Die Konzentration des Adsorbats sollte aber auch nicht zu groß gewählt werden,
30 um zu verhindern, dass die Strahlung innerhalb des Gas-Volumens des Innenraums teilweise von dem Adsorbat absorbiert wird und somit die

Transmission des Wafer-Inspektionssystems abnimmt. Die Einstelleinrichtung dient dazu, die Konzentration des Adsorbats in dem Innenraum zumindest während der Bestrahlung in einem vorgegebenen Wertebereich zu halten.

- 5 Die Zuführung des Adsorbats in den Innenraum ist typischerweise nur erforderlich, während die Oberfläche belastet, d.h. bestrahlt, wird. Die Einstelleinrichtung kann daher in den Betriebspausen die Zuführung des Adsorbats verhindern. Die Einstelleinrichtung kann mit einer Dosiereinrichtung in Verbindung stehen, die es ermöglicht, die Menge des über den Gaseinlass in
10 den Innenraum zugeführten Adsorbats einzustellen. Bei der Dosiereinrichtung kann es sich beispielsweise um ein steuerbares Ventil handeln. Die Einstelleinrichtung kann ggf. zur Regelung der Konzentration des Adsorbats in dem Innenraum ausgebildet sein. In diesem Fall ist in dem Wafer-Inspektionssystem mindestens ein Sensor angeordnet, welcher die Ist-
15 Konzentration des Adsorbats in dem Innenraum, insbesondere in der Nähe der Oberfläche, detektiert. Mit Hilfe einer Regeleinrichtung bzw. einem Regler kann der mittels des Sensors gemessene Ist-Wert der Konzentration des Adsorbats auf einen Soll-Wert geregelt werden. Die Konzentration des Adsorbats kann absolut, beispielsweise in Form des Partialdrucks, gemessen werden, oder
20 relativ, d.h. in Bezug auf den Gesamtdruck oder auf das Gesamt-Volumen/die Gesamt-Teilchenzahl in dem Innenraum.

- Bei einer Ausführungsform ist das Wafer-Inspektionssystem zur Zuführung eines Inertgases in den Innenraum ausgebildet, die bevorzugt über denselben
25 Gaseinlass erfolgt wie die Zuführung des Adsorbats, die aber ggf. auch über einen anderen Gaseinlass erfolgen kann. Bei dieser Ausführungsform herrscht in dem Innenraum in der Regel ein vergleichsweise großer Gesamt-Druck, typischerweise in der Nähe von Atmosphärendruck, der im Wesentlichen durch den Partial-Druck des Inertgases bestimmt wird. Bei dem Inertgas kann es sich
30 beispielsweise um Stickstoff oder um ein Edelgas, z.B. um Ar, handeln.

Bei einer Weiterbildung ist in den Innenraum Wasser mit einer Konzentration von mehr als 1 ppm, bevorzugt von mehr als 10 ppm (bezogen auf den Gesamt-Druck) eingebracht. Eine Konzentration von Wasser, die größer ist als die angegebenen Werte ist für Substrate in Form von ionischen Kristallen in der Regel ausreichend, um eine Degradation der Oberfläche durch eine Umlagerung zu verhindern. Bei polaren Adsorbaten, die ein von Wasser abweichendes Dipolmoment aufweisen, sind die oben angegebenen Werte für die untere Grenze der Konzentration ggf. nicht zutreffend, d.h. diese können größer oder kleiner als die oben angegebene Mindest-Konzentration von Wasser sein.

Bei einer weiteren Ausführungsform weist das Wafer-Inspektionssystem mindestens eine Vakuum-Pumpe zur Evakuierung des Innenraums auf. Bei dieser Ausführungsform wird in der Regel in dem Innenraum ein Gesamt-Druck erzeugt, der bei weniger als ca. 10^{-3} mbar liegt. In diesem Beispiel kann dem Innenraum ebenfalls ein Inertgas zugeführt werden, dies ist aber nicht zwingend der Fall.

Bei einer Weiterbildung liegt eine Konzentration bzw. ein Partialdruck von Wasser in dem Innenraum bei mehr als 10^{-5} mbar, bevorzugt bei mehr als 10^{-4} mbar. Bei einem Partialdruck von Wasser, der oberhalb der angegebenen Grenzwerte liegt, kann eine Degradation der Oberfläche eines ionischen Kristalls typischerweise unterdrückt und somit die Lebensdauer des optischen Elements und damit des gesamten Wafer-Inspektionssystems erhöht werden.

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

Zeichnung

Ausführungsbeispiele sind in der schematischen Zeichnung dargestellt und
5 werden in der nachfolgenden Beschreibung erläutert. Es zeigt

- Fig. 1a-c schematische Darstellungen von mehreren Schritten eines
Verfahrens zum Bilden von Nanostrukturen an einer Oberfläche
eines Substrats aus MgF_2 ,
10
- Fig. 2 schematische Darstellungen der Reflektivität der Oberfläche vor
und nach dem Bilden der Nanostrukturen in Abhängigkeit von der
Wellenlänge, sowie
- 15 Fig. 3 eine schematische Darstellung eines Wafer-Inspektionssystems
mit einem Innenraum, dem Wasser als polares Adsorbat zugeführt
wird.

In der folgenden Beschreibung der Zeichnungen werden für gleiche bzw.
20 funktionsgleiche Bauteile identische Bezugszeichen verwendet.

Fig. 1a zeigt ein (ein-)kristallines Substrat **1**, welches eine gegenüber einer
Umgebung **2** freiliegende, plane Oberfläche **3** aufweist. Bei dem Substrat **1**
handelt es sich im gezeigten Beispiel um MgF_2 , welches einen ionischen Kristall
25 bildet. MgF_2 ist zur Transmission von Strahlung bei Wellenlängen im FUV/VUV-
Wellenlängenbereich geeignet, d.h. dieses weist eine vergleichsweise geringe
Absorption für Strahlung in diesem Wellenlängenbereich auf, so dass dieses
Material als Substrat für ein transmissives optisches Element eingesetzt werden
kann. An Stelle von MgF_2 kann auch ein anderes Material verwendet werden,
30 welches eine ausreichende Transmission für Strahlung bei Wellenlängen im
FUV/VUV-Wellenlängenbereich aufweist, beispielsweise CaF_2 .

Bei der in Fig. 1a gezeigten freiliegenden Oberfläche 3 handelt es sich um eine (001)-Gitterebene der nicht bildlich dargestellten Gitter-Struktur des Substrats 1. Um die Oberfläche 3 freizulegen, wurde das Substrat 1 entlang der (001)-Gitterebene geschnitten. Das Freilegen der Oberfläche 3 des Substrats 1 entlang der (001)-Gitterebene kann aber auch durch eine andere Form von (mechanischer) Bearbeitung erfolgen. Die (001)-Gitterebene weist eine Oberflächenenergie γ_{001} auf, die größer ist als die Oberflächenenergie γ_{110} einer (110)-Gitterebene, welche eine minimale Oberflächenenergie aller Gitterebenen des Substrats 1 aufweist, d.h. es gilt $\gamma_{001} > \gamma_{110}$. Die in Fig. 1a dargestellte freiliegende Oberfläche 3 des Substrats 1 weist im FUV/VUV-Wellenlängenbereich zwischen 100 nm und 280 nm eine in **Fig. 2** gestrichelt dargestellte Reflektivität **R** in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ auf, die über den gesamten FUV/VUV-Wellenlängenbereich bei mehr als 0,05 liegt, d.h. mehr als 5% der auf die freiliegende Oberfläche 3 auftreffenden Strahlung wird an dieser reflektiert.

Um die Reflektivität **R** der freiliegenden Oberfläche 3 zu verringern, wird ein Energieeintrag **E** in die freiliegende Oberfläche 3 eingebracht. Bei dem in **Fig. 1b** gezeigten Beispiel wird die freiliegende Oberfläche 3 zu diesem Zweck mit elektromagnetischer Strahlung **4** bestrahlt, bei der es sich um Strahlung 4 im FUV/VUV-Wellenlängenbereich handelt. Die Intensität der Strahlung 4 wird so groß gewählt, dass eine Aktivierungsenergie zur Umlagerung von Atomen bzw. von Atomgruppen der freiliegenden Oberfläche 3 überschritten wird, so dass die freiliegende Oberfläche 3 ihre Konfiguration verändert und sich an dieser Nanostrukturen **5** bilden, d.h. dass die freiliegende Oberfläche 3 aufgeraut wird, wie dies in **Fig. 1c** dargestellt ist. Die Umlagerung wird dadurch begünstigt, dass die Oberflächenenergie γ_{001} der freiliegenden Oberfläche 3 deutlich größer ist als die minimale Oberflächenenergie γ_{110} entlang der (110)-Gitterebene.

Um eine möglichst effiziente Umlagerung der freiliegenden Oberfläche 3 unter Bildung der Nanostrukturen 5 zu erreichen, ist es günstig, wenn die Bedeckung der Oberfläche 3 mit Adsorbaten unter einen kritischen Wert abgesenkt wird.

Dies gilt insbesondere für die Konzentration c_{H_2O} von Wasser in der Umgebung 2 der freiliegenden Oberfläche 3, die bei der Durchführung der Bestrahlung, die im gezeigten Beispiel bei Atmosphärendruck stattfindet, bei weniger als 10 ppm, bevorzugt bei weniger als 1 ppm liegen sollte. Die Gas-Zusammensetzung in der Umgebung 2 der freiliegenden Oberfläche 3 kann unterschiedlich sein, beispielsweise kann die Bestrahlung in trockener Luft oder in einer Inertgas-Umgebung 2 erfolgen, wobei als Inertgas beispielsweise Stickstoff oder ein Edelgas, z.B. Argon, verwendet werden kann.

Alternativ kann die Bestrahlung der freiliegenden Oberfläche 3 in einer Vakuum-Umgebung, typischerweise bei einem Umgebungsdruck von weniger als ca. 10^{-3} mbar durchgeführt werden. In diesem Fall sollte der Partialdruck p_{H_2O} von Wasser in der Umgebung 2 bei weniger als ca. 10^{-4} mbar, bevorzugt bei weniger als 10^{-5} mbar liegen. In der Regel ist die Durchführung der Bestrahlung in einer Inertgas-Atmosphäre vorteilhaft, da dort leichter als in einer Vakuum-Umgebung 2 verhindert werden kann, dass sich bei der Umlagerung kontaminierende Stoffe, z.B. Siloxane oder organische Kontaminationen, in die Nanostrukturen 5 einlagern.

Die Nanostrukturen 5 führen zu einer Aufrauhung der Oberfläche 3, die dazu führt, dass die in Fig. 2 dargestellte Reflektivität R der Oberfläche 3 abnimmt.

Die Nanostrukturen 5 wirken daher in der Art einer Antireflex-Beschichtung der Oberfläche 3. Die Umlagerung der freiliegenden Oberfläche 3 bei der Bestrahlung erfolgt nicht instantan, sondern mit einer Umlagerungsrate bzw. mit einer Umlagerungsgeschwindigkeit, die typischerweise umso größer ist, je geringer die Bedeckung der Oberfläche 3 mit Adsorbaten ist.

Die Bestrahlung der Oberfläche 3 wird typischerweise so lange durchgeführt, bis die Reflektivität R der Oberfläche 3 durch die an dieser gebildeten Nanostrukturen 5 für eine vorgegebene Wellenlänge λ bzw. für einen vorgegebenen Wellenlängenbereich, beispielsweise den FUV/VUV-Wellenlängenbereich zwischen ca. 100 nm und ca. 280 nm, einen vorgegebenen Wert unterschreitet. Bei dem beispielhaft in Fig. 2 mit einer durchgezogenen Linie dargestellten Reflektivitätsverlauf liegt die Reflektivität R der Oberfläche 3, an welcher die Nanostrukturen 5 gebildet sind, über den gesamten FUV/VUV-Wellenlängenbereich bei weniger als 0,02. Für den VUV-Wellenlängenbereich zwischen ca. 100 nm und 200 nm ist die Reflektivität R sogar noch geringer und liegt bei weniger als ca. 0,01.

Wie ebenfalls in Fig. 2 zu erkennen ist, wird durch die Bestrahlung die gestrichelt dargestellte Reflektivität R der in Fig. 1a dargestellten Oberfläche 3 vor der Bestrahlung im Vergleich zur Reflektivität R der in Fig. 1c dargestellten Oberfläche 3 nach der Bestrahlung um einen absoluten Wert von mindestens 0,03 reduziert, und zwar über den gesamten FUV/VUV-Wellenlängenbereich. Für den VUV-Wellenlängenbereich ist die Reduzierung der Reflektivität R sogar noch größer, d.h. in diesem Wellenlängenbereich wird die Reflektivität R um einen absoluten Wert von ca. 0,045 reduziert.

Abweichend von dem in Fig. 1b gezeigten Einbringen des Energieeintrags E in die Oberfläche 3 durch Bestrahlung mit Strahlung 4 im FUV/VUV-Wellenlängenbereich ist es auch möglich, den Energieeintrag E durch eine Bestrahlung mit IR-Strahlung bei Wellenlängen von mehr als ca. 1000 nm vorzunehmen. In diesem Fall ist es günstig, wenn die IR-Strahlung 4 bei Wellenlängen innerhalb eines Wellenlängenbereichs liegt, in dem das Material des Substrats 1 eine hohe Absorption aufweist, so dass die IR-Strahlung 4 eine möglichst geringe Eindringtiefe in das Substrat 1 aufweist und der Energieeintrag E bei der Bestrahlung im Wesentlichen auf die Oberfläche 3 konzentriert ist.

Alternativ zu der in Fig. 1b gezeigten Einbringung des Energieeintrags E bzw. von Wärme in die Oberfläche 3 durch Bestrahlung kann der Energieeintrag E auch durch direkte Wärmeübertragung, d.h. durch Konduktion, erfolgen. In diesem Fall wird die Oberfläche eines erwärmten Festkörpers mit der freiliegenden Oberfläche 3 in Kontakt gebracht, um Wärme in die Oberfläche 3 einzutragen. Der Festkörper sollte eine Temperatur aufweisen, die einerseits ausreichend groß ist, um eine hohe Umlagerungsrate zu bewirken und die andererseits nicht zu groß gewählt werden sollte, um ein Anschmelzen der freiliegenden Oberfläche 3 zu verhindern. An Stelle des Einbringens eines Energieeintrags E durch Konduktion kann der Energieeintrag in die freiliegende Oberfläche 3 auch durch Konvektion erfolgen. Zu diesem Zweck kann beispielsweise ein erwärmtes Fluid an der freiliegenden Oberfläche 3 entlang geströmt werden.

Das in Fig. 1c gezeigte Substrat 1 mit der Oberfläche 3, an der die Nanostrukturen 5 gebildet sind, kann ein transmittierendes optisches Element für Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich bilden. Gegebenenfalls wird an dem Substrat 1 für die Bildung bzw. Herstellung des optischen Elements noch eine Endbearbeitung, z.B. ein randseitiges Beschneiden oder dergleichen vorgenommen. Für den Einsatz des Substrats 1 als optisches Element in einem Wafer-Inspektionssystem, bei dem der Wafer mit vergleichsweise breitbandiger Strahlung bestrahlt wird, wirkt sich günstig aus, dass die Nanostrukturen 5 an der Oberfläche 3 die Reflektivität R des Substrats 1 über einen vergleichsweise großen Wellenlängenbereich reduzieren. Nachfolgend wird beispielhaft anhand von **Fig. 3** ein Ausführungsbeispiel eines Wafer-Inspektionssystems **9** beschrieben.

Das Wafer-Inspektionssystem 9 weist eine Strahlungsquelle **10** auf, deren Strahlung **11** mittels eines optischen Systems **12** auf einen Wafer **15** gelenkt wird. Zu diesem Zweck wird die Strahlung 11 von einem konkaven Spiegel **120**

auf den Wafer 15 reflektiert. Die vom Wafer 15 reflektierte, gebeugte und/oder gebrochene Strahlung wird von einem ebenfalls zu dem optischen System 12 gehörigen weiteren konkaven Spiegel **121** über ein transmissives optisches Element **122** auf einen Detektor **13** zur weiteren Auswertung geleitet. Das
5 transmissive optische Element 122 ist in Fig. 3 schematisch als Planplatte dargestellt, kann aber auch eine andere Geometrie aufweisen. Beispielsweise kann es sich bei dem transmissiven optischen Element 122 um eine Linse handeln, die mindestens eine gekrümmte Oberfläche aufweist. Insbesondere kann auch die Oberfläche **122a**, welche die Eintrittsfläche für die Strahlung 11
10 bildet, eine z.B. konkave oder konvexe Krümmung aufweisen. Auch kann das transmissive optische Element 122 an anderer Stelle als in Fig. 3 dargestellt in dem Wafer-Inspektionssystem 9 angeordnet werden.

Bei der Strahlungsquelle 10 kann es sich beispielsweise um genau eine
15 Strahlungsquelle oder um eine Zusammenstellung von mehreren einzelnen Strahlungsquellen handeln, um ein im Wesentlichen kontinuierliches Strahlungsspektrum zur Verfügung zu stellen. In Abwandlungen kann auch eine oder es können mehrere schmalbandige Strahlungsquellen 10 eingesetzt werden. Bevorzugt liegt die Wellenlänge bzw. das Wellenlängenband der von
20 der Strahlungsquelle 10 erzeugten Strahlung 11 im VUV-Wellenlängenbereich zwischen 100 nm und 200 nm, besonders bevorzugt zwischen 110 nm und 190 nm.

Bei dem in Fig. 3 gezeigten Beispiel weist das optische System 12 des Wafer-
25 Inspektionssystems 9 ein Gehäuse **16** auf, in dem ein Innenraum **17** gebildet ist, in dem die beiden Spiegel 120, 121 sowie das transmissive optische Element 122 angeordnet ist. Eine Oberfläche 122a des transmissiven optischen Elements 122 bildet eine Strahleintrittsfläche für die Strahlung 11 der Strahlungsquelle 10. Um eine möglichst große Transmission des optischen
30 Systems 12 zu gewährleisten, sollte die Oberfläche 122a eine möglichst geringe Reflektivität R aufweisen. Zu diesem Zweck kann die Oberfläche 122a

wie die in Fig. 1c gezeigte Oberfläche 3 ausgebildet sein, d.h. an dieser können Nanostrukturen 5 gebildet sein, welche die Reflektivität R reduzieren, wie dies in Zusammenhang mit Fig. 1a-c beschrieben wurde. Das Vorhandensein von Nanostrukturen 5 an der Oberfläche 122a des transmissiven optischen Elements 122 ist aber nicht zwingend erforderlich. Für die Reduzierung der Reflektivität R kann die Oberfläche 122a alternativ beispielsweise mit einer Interferenzbeschichtung oder dergleichen versehen sein.

Bei der Bestrahlung des transmissiven optischen Elements 122 mit der Strahlung 11 der Strahlungsquelle 10, die typischerweise eine hohe Intensität aufweist, kann insbesondere für den Fall, dass das transmissive optische Element 122 aus einem ionischen Kristall gebildet ist, die weiter oben beschriebene Umlagerung der freiliegenden Oberfläche 122a erfolgen. Dies kann eine Degradation der Oberfläche 122a insbesondere in Form einer Aufrauung der Oberfläche 122a zur Folge haben. Anders als weiter oben beschrieben wurde ist eine solche Aufrauung während des Betriebs des Wafer-Inspektionssystems 9 nicht erwünscht, da die Aufrauung eine Vergrößerung der Oberfläche 122a zur Folge hat, welche die Anlagerung von kontaminierenden Stoffen an der Oberfläche 122a begünstigt. Auch kann die Aufrauung der Oberfläche 122a zu einer Streulichtbildung innerhalb des optischen Systems 12 führen.

Um die (bzw. eine zusätzliche) Umlagerung der Oberfläche 122a zu verhindern, weist das Wafer-Inspektionssystem 9 einen Gaseinlass 18 auf, der zur Zuführung eines Adsorbats in Form von Wasser H_2O in den Innenraum 17 des Gehäuses 16 dient. Im gezeigten Beispiel wird dem Innenraum 17 zusätzlich zu dem Adsorbat in Form von Wasser H_2O auch ein Inertgas in Form von Stickstoff N_2 zugeführt. Die Konzentration CH_2O des Wassers H_2O in dem Innenraum 17 liegt bei mehr als 1 ppm, bevorzugt bei mehr als 10 ppm, um eine möglichst große Bedeckung der Oberfläche 3 mit Wasser H_2O zu erreichen. Bei anderen Ausgestaltungen kann ein anderes, nicht zwingend

polares Adsorbat in den Innenraum 17 eingebracht werden. Auch kann alternativ oder zusätzlich zu Stickstoff N_2 ein anderes Inertgas, beispielsweise ein Edelgas, z.B. Argon, in den Innenraum 17 eingebracht werden.

- 5 Um die Konzentration CH_2O des Wassers H_2O in dem Innenraum 17 einzustellen, weist das Wafer-Inspektionssystem 9 eine Einstelleinrichtung **19** auf, welche auf ein steuerbares Ventil einwirkt, um den Durchfluss von Wasser H_2O durch den Gaseinlass 18 einzustellen bzw. zu steuern. Gegebenenfalls kann ein Sensor in dem Innenraum 17 angeordnet oder mit dem Innenraum 17
10 verbunden sein, um einen Ist-Wert der Wasser-Konzentration CH_2O zu bestimmen und die Wasser-Konzentration CH_2O mit Hilfe der Einstelleinrichtung 19 auf einen Soll-Wert zu regeln.

- Bei einer anderen Ausgestaltung des Wafer-Inspektionssystems 9 kann eine in
15 Fig. 3 gestrichelt dargestellte Vakuum-Pumpe **20** mit dem Innenraum 17 in Verbindung stehen, um diesen zu evakuieren. Mit Hilfe der Vakuum-Pumpe 20 kann in dem Innenraum 17 ein Gesamt-Druck p_G erzeugt werden, der bei ca. 10^{-3} mbar oder darunter liegt. Um in diesem Fall eine ausreichende Bedeckung der Oberfläche 122a des transmissiven optischen Elements 122 zu erzeugen,
20 ist ein Partialdruck p_{H_2O} des Wassers H_2O in dem Innenraum 17 von typischerweise mehr als 10^{-5} mbar, bevorzugt von mehr als 10^{-4} mbar erforderlich.

- Durch die Bedeckung der Oberfläche 122a des transmissiven optischen
25 Elements 122 mit Wasser als Adsorbat zumindest während der Bestrahlung der Oberfläche 122a mit der Strahlung 11 der Strahlungsquelle 10 wird Wärmeenergie E , welche durch die Bestrahlung in die Oberfläche 122a eingebracht wird, durch Desorption des Wassers abgeführt, so dass weniger Energie für Umlagerungseffekte zur Verfügung steht. Für den Fall, dass die
30 Oberfläche 122a an einem Substrat 1 in Form eines ionischen Kristalls gebildet ist, weist diese in der Regel einen Dipolcharakter auf und kann durch ein

Adsorbat, welches ein Dipolmoment aufweist, insbesondere durch Wasser, welches ein großes Dipolmoment besitzt, abgesättigt werden. Auf diese Weise kann eine Aufrauhung der Oberfläche 122a verhindert und somit die Lebensdauer des transmissiven optischen Elements 122 und somit des

5 optischen Systems 12 erhöht werden.

Patentansprüche

1. Wafer-Inspektionssystem (9), umfassend:
einen Innenraum (17), in dem mindestens ein optisches Element (122) zur Transmission von Strahlung (11) im UV/VUV-Wellenlängenbereich angeordnet ist, welches bevorzugt ein kristallines, insbesondere ionisches Substrat (1) aufweist,
eine Strahlungsquelle (10) zur Bestrahlung einer Oberfläche (3) des optischen Elements (122) mit Strahlung (11) im UV/VUV-Wellenlängenbereich, sowie
einen Gaseinlass (18), der zur Zuführung eines bevorzugt polaren Adsorbats, insbesondere von Wasser (H₂O), in den Innenraum (17) zumindest während der Bestrahlung der Oberfläche (3) ausgebildet ist.
2. Wafer-Inspektionssystem nach Anspruch 1, weiter umfassend:
eine Einstelleinrichtung (19) zur Einstellung eines Gehalts (CH₂O, p_{H2O}) des Adsorbats in dem Innenraum (17).
3. Wafer-Inspektionssystem nach Anspruch 1 oder 2, welches zur Zuführung eines Inertgases (N₂) in den Innenraum (17), insbesondere über den Gaseinlass (18), ausgebildet ist.
4. Wafer-Inspektionssystem nach Anspruch 3, bei dem in den Innenraum (17) Wasser (H₂O) mit einer Konzentration (CH₂O) von mehr als 1 ppm, bevorzugt von mehr als 10 ppm eingebracht ist.
5. Wafer-Inspektionssystem nach Anspruch 1 oder 2, welches mindestens eine Vakuum-Pumpe (20) zur Evakuierung des Innenraums (17) aufweist.

6. Wafer-Inspektionssystem nach Anspruch 5, bei dem ein Partialdruck (p_{H_2O}) von Wasser (H_2O) in dem Innenraum (17) bei mehr als 10^{-5} mbar, bevorzugt bei mehr als 10^{-4} mbar liegt.
7. Verfahren zum Bilden von Nanostrukturen (5) an einer freiliegenden Oberfläche (3) eines kristallinen, insbesondere ionischen Substrats (1) zur Transmission von Strahlung (11) im FUV/VUV-Wellenlängenbereich, umfassend:
Bereitstellen einer freiliegenden Oberfläche (3) des Substrats (1), die nicht entlang einer Gitterebene mit minimaler Oberflächenenergie orientiert ist, sowie
Einbringen eines Energieeintrags (E) in die freiliegende Oberfläche (3) zur Umlagerung der freiliegenden Oberfläche (3) unter Bildung der Nanostrukturen (4), wobei der Energieeintrag (E) durch Bestrahlen der freiliegenden Oberfläche (3) mit elektromagnetischer Strahlung (4) erzeugt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem zum Bereitstellen der freiliegenden Oberfläche (3) das Substrat (1) entlang einer Gitterebene geschnitten wird, die nicht mit der Gitterebene mit minimaler Oberflächenenergie übereinstimmt.
9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, bei dem die freiliegende Oberfläche (3) mit elektromagnetischer Strahlung (4) im UV/VUV-Wellenlängenbereich oder im IR-Wellenlängenbereich bestrahlt wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, bei dem der Energieeintrag (E) durch Konduktion und/oder durch Konvektion in die freiliegende Oberfläche (3) eingebracht wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, bei dem der Energieeintrag (E) in die freiliegende Oberfläche (3) in einer Umgebung (2) mit einer Wasser-Konzentration (c_{H_2O}) von weniger als 10 ppm, bevorzugt von weniger als 1 ppm erfolgt.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 11, bei dem der Energieeintrag (E) in die freiliegende Oberfläche (3) in einer Vakuum-Umgebung (2) mit einem Wasser-Partialdruck (p_{H_2O}) von weniger als 10^{-4} mbar, bevorzugt von weniger als 10^{-5} mbar erfolgt.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 12, bei dem das Einbringen des Energieeintrags (E) so lange durchgeführt wird, bis die Oberfläche (3), an der die Nanostrukturen (5) gebildet werden, eine gegenüber der freiliegenden Oberfläche (3) vor dem Einbringen des Energieeintrags (E) um mindestens 0,03 reduzierte Reflektivität (R) für Strahlung (11) im FUV/VUV-Wellenlängenbereich und/oder eine Reflektivität (R) von weniger als 0,02 für Strahlung (11) im FUV/VUV-Wellenlängenbereich aufweist.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 13, bei dem das Material des Substrats (1) ausgewählt wird aus der Gruppe umfassend: MgF_2 , CaF_2 , LiF .
15. Optisches Element (122) zur Transmission von Strahlung (11) im FUV/VUV-Wellenlängenbereich, umfassend:
ein kristallines, insbesondere ionisches Substrat (1),
dadurch gekennzeichnet,
dass das Substrat (1) eine Oberfläche (3) mit Nanostrukturen (5) aufweist,
die gemäß einem Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 14 gebildet sind.

16. Optisches Element nach Anspruch 15, bei dem die Oberfläche (3), welche die Nanostrukturen (5) aufweist, für Strahlung im FUV/VUV-Wellenlängenbereich eine Reflektivität (R) von weniger als 0,02 aufweist.

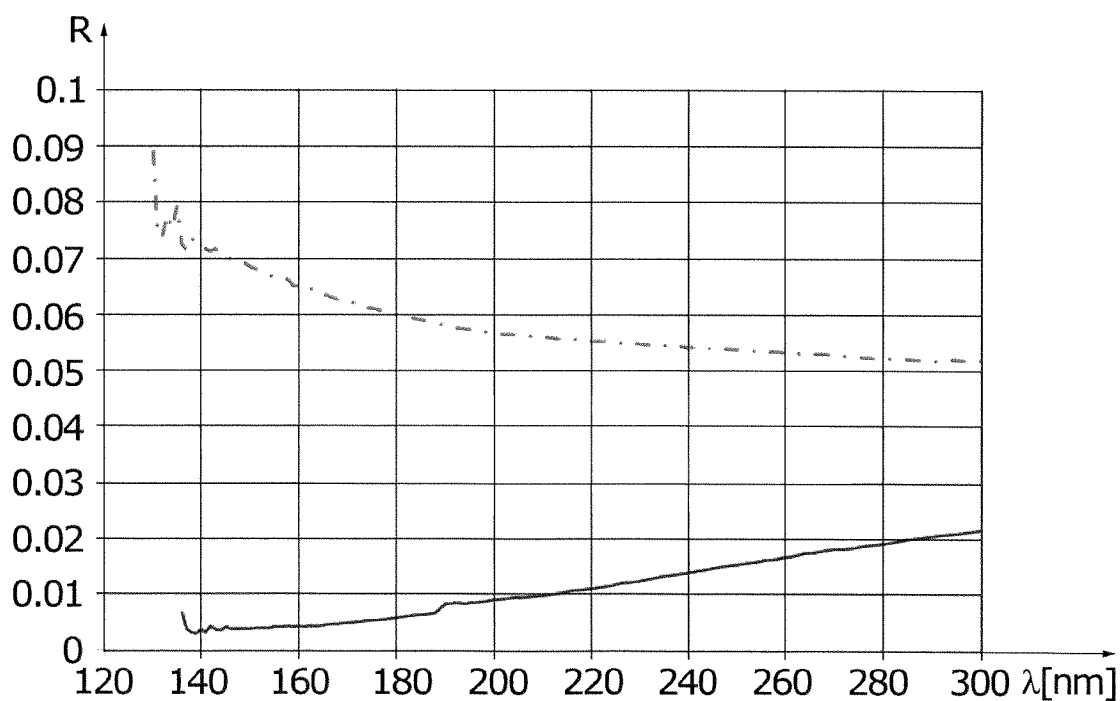
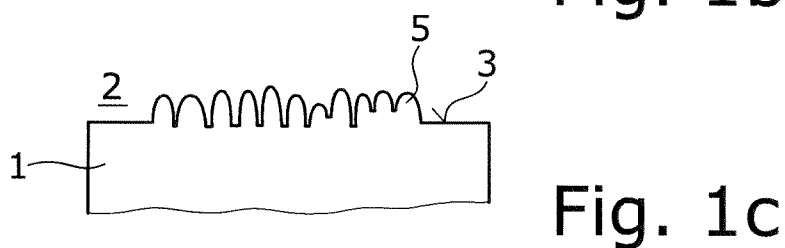
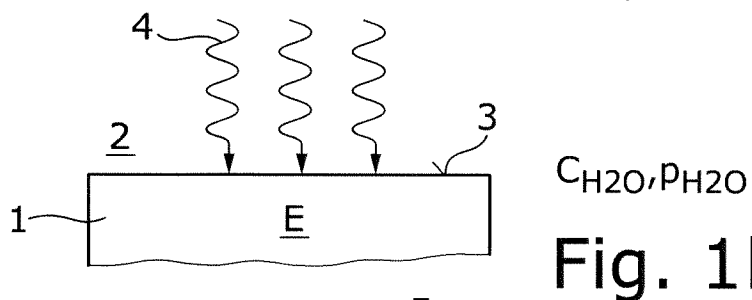
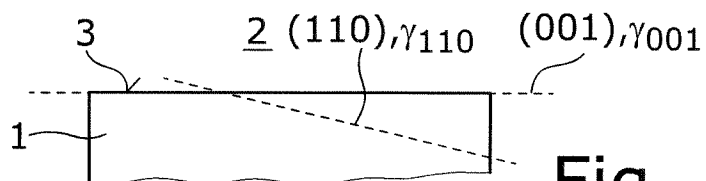


Fig. 2

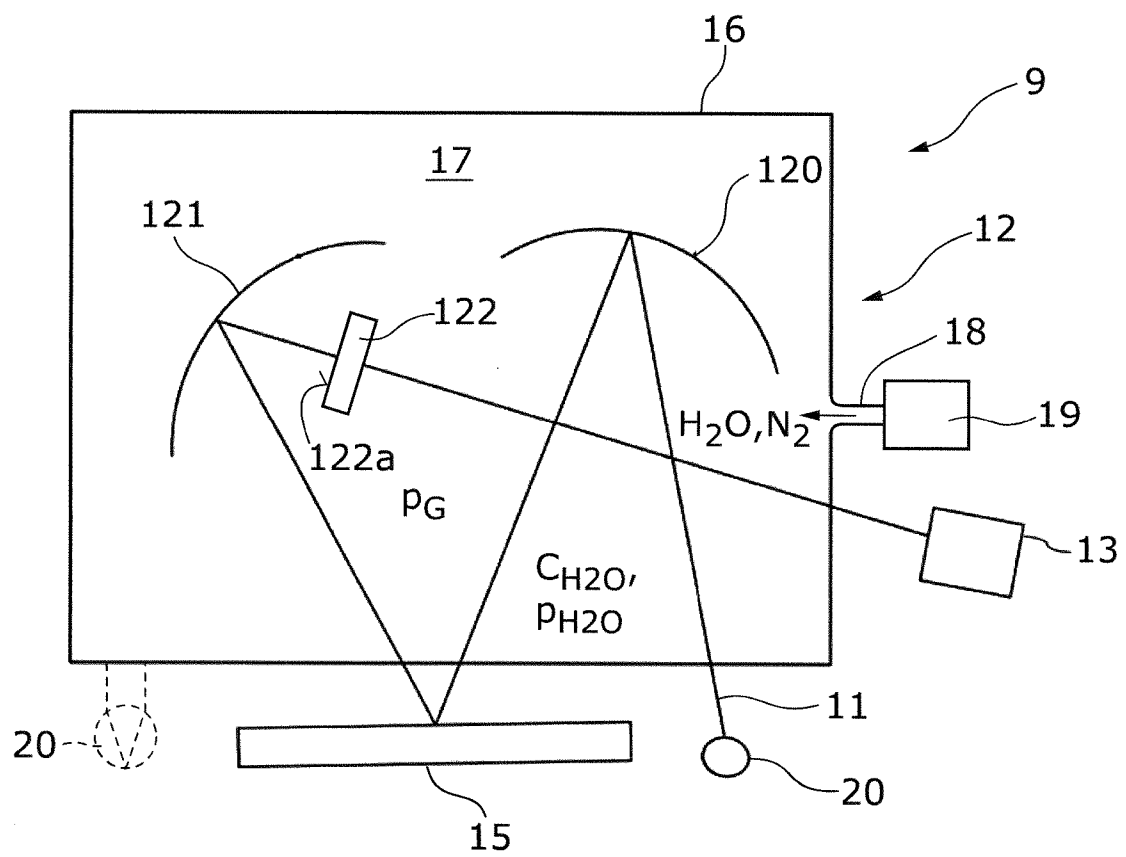


Fig. 3