

(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
24. Dezember 2020 (24.12.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/254086 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01N 25/16 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2020/064886

(22) Internationales Anmeldedatum:
28. Mai 2020 (28.05.2020)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2019 116 356.0
17. Juni 2019 (17.06.2019) DE

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

(72) Erfinder: OCHSE, Andreas; Alfred-Delp-Weg 6/1,
89520 Heidenheim (DE). GERHARD, Michael; Toggen-
burgerstrasse 15, 73432 Aalen (DE). STERR, Uwe; Bill-
rothstr. 26, 38116 Braunschweig (DE). LEGERO, Tho-
mas; Dießelhorststr. 19, 38116 Braunschweig (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,
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,

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING A TEMPERATURE-DEPENDENT CHANGE IN LENGTH OF A SAMPLE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM BESTIMMEN EINER TEMPERATURABHÄNGIGEN LÄNGENÄNDERUNG EINER
PROBE

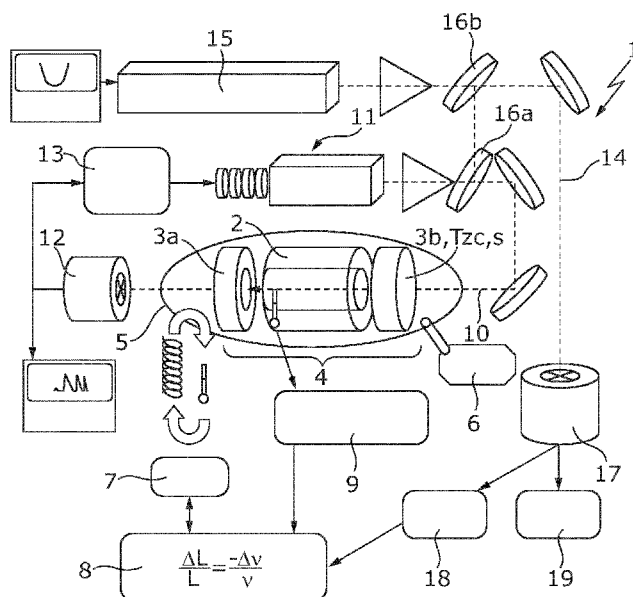


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a method for determining a temperature-dependent change in length ($\Delta L/L$) of a sample (2), which forms a spacer introduced between two mirrors (3a, b) of a Fabry-Perot cavity (4), comprising: determining the temperature-dependent change in length ($\Delta L/L$) of the sample (2) on the basis of a change ($\Delta v/v$) in a resonant frequency of the Fabry-Perot cavity (4) when changing a temperature, in particular in incremental fashion, of the Fabry-Perot cavity (4). The temperature of the Fabry-Perot cavity (4) is initially lowered from a maximum temperature to a minimum temperature of a specified temperature interval and the temperature of the Fabry-Perot cavity is subsequently increased from the minimum temperature to the maximum temperature of the temperature interval, or vice versa.

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.

- (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).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii)

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen einer temperaturabhängigen Längenänderung ($\Delta L / L$) einer Probe (2), die einen zwischen zwei Spiegel (3a, b) einer Fabry-Perot-Kavität (4) eingebrachten Abstandhalter bildet, umfassend: Bestimmen der temperaturabhängigen Längenänderung ($\Delta L / L$) der Probe (2) anhand einer Veränderung ($\Delta v / v$) einer Resonanz-Frequenz der Fabry-Perot-Kavität (4) beim insbesondere schrittweisen Verändern einer Temperatur der Fabry-Perot-Kavität (4). Die Temperatur der Fabry-Perot-Kavität (4) wird zunächst von einer maximalen Temperatur auf eine minimale Temperatur eines vorgegebenen Temperatur- Intervalls abgesenkt und nachfolgend wird Temperatur der Fabry-Perot-Kavität von der minimalen Temperatur auf die maximale Temperatur des Temperatur- Intervalls erhöht, oder umgekehrt.

- 5 Verfahren zum Bestimmen einer temperaturabhängigen Längenänderung einer Probe

Bezugnahme auf verwandte Anmeldungen

- 10 Diese Anmeldung beansprucht die Priorität der deutschen Patentanmeldung DE 10 2019 116 356.0 vom 17.06.2019, deren gesamter Offenbarungsgehalt durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird.

Hintergrund der Erfindung

- 15 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen einer temperaturabhängigen (relativen) Längenänderung einer Probe, die einen zwischen zwei Spiegel einer Fabry-Perot-Kavität eingebrachten Abstandshalter in einem Fabry-Perot-Interferometer bildet, umfassend: Bestimmen der
- 20 temperaturabhängigen Längenänderung der Probe anhand einer Veränderung der Resonanz-Frequenz der Fabry-Perot-Kavität beim insbesondere schrittweisen Verändern einer (Umgebungs-)Temperatur der Fabry-Perot-Kavität.
- 25 Ein solches Verfahren ist aus dem Artikel „Tuning the thermal expansion properties of optical reference cavities with fused silica mirrors“, T. Legero et al., J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 27, No. 5, 2010 bekannt geworden, welcher durch Bezugnahme in seiner Gesamtheit zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird. Dort wird ein Abstandshalter aus einem „Low-Thermal-Expansion“(LTE-)
- 30 Material verwendet, das bei einer Temperatur von ca. 20°C eine Nulldurchgangs-Temperatur aufweist (z.B. Zerodur® oder ULE®). Bei dem

Abstandshalter bzw. bei der zu vermessenden Probe handelt es sich um einen Hohlzylinder, der mit Hilfe von zwei angesprengten Spiegeln zu einer Fabry-Perot-Kavität geformt wird. Zur Reduzierung des thermischen Rauschens wird vorgeschlagen, als Material für die Spiegel der Fabry-Perot-Kavität an Stelle
5 eines LTE-Materials synthetisches Quarzglas zu verwenden.

Zur Bestimmung der temperaturabhängigen (relativen) Längenänderung wird die Frequenz eines He-Ne-Lasers bei 633 nm durch eine Lock-In-Technik auf die (Resonanz-)Frequenz einer TEM₀₀-Mode der Kavität stabilisiert und mit der
10 Frequenz eines Iod-stabilisierten He-Ne-Lasers verglichen. Die relative Veränderung der Resonanz-Frequenz der Kavität entspricht der relativen Längenänderung des Proben-Materials der Kavität bei der Veränderung der Umgebungs-Temperatur und kann hochgenau bestimmt werden. Für die Bestimmung der temperaturabhängigen Längenänderung wird die Umgebungs-
15 Temperatur der Kavität alle 24 Stunden in Temperatur-Schritten von 2 K geändert. Nach 24 Stunden ist die Kavität im thermischen Gleichgewicht und die relative Längenänderung und die Umgebungs-Temperatur der Kavität werden als Daten-Punkte gespeichert.

20 Ein solches Verfahren zum Bestimmen der temperaturabhängigen Längenänderung in einem vergleichsweise großen Temperatur-Intervall mit einer Mehrzahl von Temperatur-Schritten ist langwierig. Auch ist für bestimmte Anwendungen eine Bestimmung der relativen Längenänderung bzw. des thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Probe mit einer Messgenauigkeit
25 von 0,1 ppB / K oder mehr erforderlich. Eine solche Messgenauigkeit kann durch das oben beschriebene Verfahren nicht ohne weiteres erreicht werden.

Aufgabe der Erfindung

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Bestimmen einer temperaturabhängigen Längenänderung einer Probe bereitzustellen, welches hinsichtlich der Genauigkeit und/oder der Messdauer optimiert ist.

5 Gegenstand der Erfindung

Diese Aufgabe wird gemäß einem ersten Aspekt gelöst durch ein Verfahren der eingangs genannten Art, bei dem die Temperatur der Fabry-Perot-Kavität zunächst von einer maximalen Temperatur auf eine minimale Temperatur eines
10 vorgegebenen Temperatur-Intervalls abgesenkt und nachfolgend die Temperatur der Fabry-Perot-Kavität von der minimalen Temperatur auf die maximale Temperatur des Temperatur-Intervalls erhöht wird, oder umgekehrt.

Beim (schrittweisen) Absenken und beim schrittweisen Erhöhen der Temperatur
15 werden typischerweise dieselben Temperatur-Werte eingestellt, d.h. in der Regel wird dieselbe Temperatur beim Absenken und beim Ansteigen eingestellt, so dass für jede Temperatur, bei der die temperaturabhängige Längenänderung bestimmt wird, jeweils zwei Messwerte für die temperaturabhängige Längenänderung gemessen werden, einmal bei fallender
20 und einmal bei steigender Temperatur.

Nicht jeder eingestellte Temperatur-Wert in dem Temperatur-Intervall wird notwendigerweise zur Bestimmung der temperaturabhängigen Längenänderung verwendet. Für den Fall, dass sich bei einem bestimmten Temperatur-Wert für
25 die temperaturabhängige Längenänderung eine zu große Abweichung von der bei anderen Temperatur-Werten bestimmten temperaturabhängigen Längenänderung ergibt, kann der jeweils zugehörige Messwert als fehlerhaft verworfen werden. Dies gilt insbesondere auch für die Messwerte an den Rändern des vorgegebenen Temperatur-Intervalls, d.h. für die minimale und für
30 die maximale Temperatur.

Durch den symmetrischen, absteigenden und ansteigenden Temperaturverlauf kann eine nicht ausreichende Thermalisierung der Kavität kompensiert werden, so dass bei einer jeweils eingestellten Temperatur nicht abgewartet werden muss, bis sich das thermische Gleichgewicht der Fabry-Perot-Kavität einstellt.

5 Die nicht ausreichende Thermalisierung wird hierbei typischerweise dadurch ausgeglichen, dass aus dem absteigenden und aus dem ansteigenden Temperaturverlauf ein Mittelwert gebildet wird (s.u.). Auch ein unterschiedlicher Endzustand der Probe, der sich ggf. bei absteigender und bei ansteigender Temperatur einstellt, kann auf diese Weise kompensiert werden.

10

Bevorzugt beginnt das Verändern der Temperatur der Fabry-Perot-Kavität bei einer maximalen Temperatur des vorgegebenen Temperatur-Intervalls. Der Beginn der Messung bei der maximalen Temperatur des vorgegebenen bzw. interessierenden Temperatur-Intervalls ermöglicht eine Relaxierung der mechanischen Spannung des Materials der Probe bzw. der Fabry-Perot-Kavität. Eine solche mechanische Spannung kann beispielsweise beim Ansprengen der Spiegel an den die Probe bildenden Abstandshalter entstehen.

15

Bei einer Weiterbildung wird bei einer jeweils eingestellten Temperatur der Fabry-Perot-Kavität ein Mittelwert aus der temperaturabhängigen Längenänderung beim Absenken und beim Erhöhen der Umgebungstemperatur gebildet. In diesem Fall werden die Temperaturen, bei denen die Bestimmung der temperaturabhängigen Längenänderung erfolgt, beim Absenken und beim Erhöhen der Temperatur gleich gewählt. Beim Absenken der Temperatur und beim Erhöhen der Temperatur wird bei derselben Temperatur jeweils ein Messwert bzw. ein Daten-Punkt der relativen Längenänderung gespeichert, aus denen der Mittelwert der relativen Längenänderung berechnet bzw. gebildet werden kann. Im Sinne dieser Anmeldung wird unter der Bildung des Mittelwerts auch verstanden, dass beim Bestimmen eines temperaturabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha(T)$ des Materials der Probe die beiden bei

20

25

30

derselben Temperatur aufgenommenen Messwerte der temperaturabhängigen Längenänderung für die Anpassung, z.B. durch einen Least-Square-Fit, an eine vorgegebene Formel der temperaturabhängigen Längenänderung $\alpha(T)$ verwendet werden. In diesem Fall wird der Mittelwert nicht rechnerisch
5 bestimmt, sondern bei dem Fit automatisch gebildet.

Bei einer weiteren Variante wird die Fabry-Perot-Kavität auf einer jeweiligen beim Verändern eingestellten Temperatur für eine Zeitdauer zwischen 2 Stunden und 12 Stunden, bevorzugt zwischen 2 Stunden und 6 Stunden,
10 gehalten. Wie in dem oben zitierten Artikel beschrieben ist, ist es in der Regel erforderlich, die Temperatur der Fabry-Perot-Kavität über eine Zeitdauer von ca. 24 Stunden konstant zu halten, um das thermische Gleichgewicht herzustellen. Durch den absteigenden und ansteigenden Temperaturverlauf (s.o.) kann die Temperier-Dauer verringert werden, d.h. es ist nicht erforderlich
15 abzuwarten, bis das thermische Gleichgewicht erreicht ist.

Bei einer Variante erfolgt das schrittweise Verändern der Umgebungs-Temperatur in Temperatur-Schritten zwischen 3 K und 5 K. Der Abstand der Messpunkte, an denen die temperaturabhängige Längenänderung bestimmt
20 wird, liegt idealerweise im dem angegebenen Wertebereich zwischen ca. 3°C und 5° C.

Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung, der insbesondere mit dem weiter oben beschriebenen Aspekt der Erfindung kombiniert werden kann, wird die
25 Temperatur der Fabry-Perot-Kavität mit einer Rate von mindestens 5 K / h kontinuierlich verändert, d.h. abgesenkt oder erhöht. In diesem Fall erfolgt typischerweise keine schrittweise Veränderung der Temperatur bzw. die Temperatur-Schritte liegen in der Größenordnung von weniger als ca. 1 K. Auf diese Weise kann eine besonders schnelle Messung erfolgen. Insbesondere
30 kann in diesem Fall auf die Messung bei abfallenden und ansteigenden

Temperaturen verzichtet werden, wie sie weiter oben im Zusammenhang mit dem ersten Aspekt der Erfindung beschrieben ist.

Bei einer solchen schnellen Vermessung der Probe weist diese in der Regel
5 keine einheitliche, homogene Temperaturverteilung auf, vielmehr stellt sich eine ortsabhängig sowie zeitlich variierende Temperaturverteilung in der Probe ein. Die inhomogene Temperaturverteilung kann bei der Bestimmung der temperaturabhängigen Längenänderung z.B. mit Hilfe eines oder ggf. mehrerer Korrekturfaktoren berücksichtigt werden.

10 Beispielsweise kann durch eine Modellierung des zeitlichen Temperaturverlaufs innerhalb der Fabry-Perot-Kavität und unter der Annahme eines Modells des temperaturabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha(T)$ des Materials der Probe (beispielsweise wie weiter unten beschrieben) die
15 temperaturabhängige Längenänderung berechnet werden. Der Ausdehnungskoeffizient $\alpha(T)$, genauer gesagt dessen Modell bzw. dessen Modell-Parameter, werden so angepasst, dass die berechneten Werte mit den beobachteten Werten übereinstimmen.

20 Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung, der insbesondere mit den oben beschriebenen Aspekten kombiniert werden kann, wird der Umgebungsdruck in einer Vakuum-Kammer der Fabry-Perot-Kavität auf weniger als 5×10^{-4} mbar eingestellt. Zur möglichst schnellen Einstellung einer homogenen Temperaturverteilung innerhalb der Fabry-Perot-Kavität ist einerseits der
25 Umgebungsdruck in der Kavität möglichst hoch zu wählen, andererseits sollte er so niedrig gewählt werden, dass Druckschwankungen nicht zu einer Veränderung der optischen Länge des Abstandes der beiden Spiegel der Fabry-Perot-Kavität führen. Ein Umgebungsdruck von weniger als 5×10^{-4} mbar hat sich als günstig herausgestellt.

Bei dem Abstandshalter handelt es sich typischerweise um einen hohlzylindrischen Körper. Die teilreflektierenden (End-)Spiegel, genauer gesagt die der Probe zugewandten Spiegel-Oberflächen, weisen in der Regel zumindest im Bereich des Hohlraums des Abstandshalters, d.h. in einem radial
5 innen liegenden Bereich, eine konkave Krümmung mit in der Regel konstantem Krümmungsradius auf. Bei dem Material der Probe handelt es sich typischerweise um ein LTE-Material, z.B. um Zerodur® oder um ULE®, d.h. um ein Material, das bei mindestens einem Temperatur-Wert eine so genannte
10 Nulldurchgangs-Temperatur aufweist, bei welcher der thermische Ausdehnungskoeffizient des Proben-Materials Null ist bzw. einen Nulldurchgang aufweist.

Bei einer weiteren Variante weist das Material der Probe (mindestens) eine Nulldurchgangs-Temperatur auf, wobei die maximale Temperatur des
15 Temperatur-Intervalls um mindestens 10 K, bevorzugt mindestens 20 K über der der Nulldurchgangs-Temperatur liegt und wobei die minimale Temperatur des Temperatur-Intervalls um mindestens 10 K, bevorzugt um mindestens 20 K unter der Nulldurchgangs-Temperatur liegt. Für die Genauigkeit bei der Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten anhand der
20 temperaturabhängigen Längenänderung hat es sich als günstig erwiesen, das Temperatur-Intervall bei der Vermessung vergleichsweise groß zu wählen, wobei die Nulldurchgangs-Temperatur des Proben-Materials, deren Wert in der Regel bereits vor der Vermessung näherungsweise bekannt ist, ungefähr in der Mitte des Temperatur-Intervalls liegen sollte. Bei der Nulldurchgangs-
25 Temperatur weist der Verlauf der temperaturabhängigen Längenänderung ein Minimum auf.

Bei einer weiteren Variante wird anhand der temperaturabhängigen Längenänderung ein temperaturabhängiger thermischer
30 Ausdehnungskoeffizient des Proben-Materials bestimmt. Zu diesem Zweck wird typischerweise ein Least-Square-Fit der Messwerte der temperaturabhängigen

Längenänderung an eine vorgegebene Formel für die temperaturabhängige Längenänderung, beispielsweise an die Gleichung (3) aus dem eingangs zitierten Artikel, vorgenommen. Der thermische Ausdehnungskoeffizient stellt die Ableitung der relativen Längenänderung nach der Temperatur dar.

5

Bei einer weiteren Variante wird der temperaturabhängige thermische Ausdehnungskoeffizient $\alpha(T)$ des Proben-Materials durch folgende Formel angenähert:

10
$$\alpha(T) = a (T - T_0) + b (T - T_0)^2, \quad (1)$$

wobei T_0 eine Nulldurchgangs-Temperatur des Materials der Probe bezeichnet und wobei a und b zwei Konstanten darstellen, die durch den Least-Square-Fit an die Messwerte der relativen Längenänderung bestimmt werden (vgl. auch
15 Gleichung (2) in dem oben zitierten Artikel). Der erste Fit-Parameter a (linearer Temperatur-Koeffizient) kann beispielsweise von den LTE-Materialherstellern für die Material-Entwicklung und von den LTE-Materialnutzern für die Entscheidung über die Art der Nutzung verwendet werden, während der zweite Fit-Parameter b (quadratischer Temperatur-Koeffizient) als Plausibilitäts-Check
20 für die Messung verwendet werden kann.

Sowohl die Messkurve der relativen Längenänderung als auch die Gleichungen (2) und (3) aus dem oben zitierten Artikel können insbesondere für die Vermessung bzw. Qualifizierung von Proben aus LTE-Material eingesetzt
25 werden, die zur Verwendung in Lithographie-Objektiven oder zur Materialentwicklung vorgesehen sind. Sowohl die jeweilige Messkurve als auch die Gleichungen (2) bzw. (3) können zur Simulation des thermischen Verhaltens einer EUV-Lithographieanlage, genauer gesagt eines EUV-Steppers, verwendet werden. Anhand der Messkurve der temperaturabhängigen Längenänderung
30 kann auch die Material-Hysterese von Glaskeramiken, z.B. von Zerodur®, bestimmt werden, wie dies beispielsweise in dem Artikel „Surface figure

changes due to thermal cycling hysteresis“, S. F. Jacobs et al., Applied Optics, Vol. 26, No. 20, Oktober 1987, beschrieben ist, welcher durch Bezugnahme in seiner Gesamtheit zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird.

5 Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung, der insbesondere mit den weiter oben beschriebenen Aspekten kombiniert werden kann, sind das Material der Probe und das Material der Spiegel aus zwei unterschiedlichen Chargen desselben Materials gebildet, die sich in ihrer Nulldurchgangs-Temperatur unterscheiden. Die Probe in Form des Abstandshalters wird aus dem zu untersuchenden
10 Material gebildet. Die teildurchlässigen Spiegel bestehen in der Regel aus dem gleichen Material wie die Probe, z.B. aus ULE® oder aus Zerodur®, stammen in der Regel jedoch aus einer unterschiedlichen Charge, da diese in der Regel für die Vermessung mehrerer Proben verwendet werden, so dass nicht für jede Probe Spiegel mit passender Nulldurchgangs-Temperatur vorhanden sind. Aus
15 den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Probe und Spiegel resultiert ein Unterschied in der radialen Ausdehnung der Probe und der Spiegel, der aufgrund der konkaven Krümmung der Spiegel-Oberflächen und aufgrund der starren Verbindung zwischen den Spiegeln und der Probe zu einer Ausdehnung bzw. (relativen) Verschiebung in axialer Richtung führt.

20

Bei einer Weiterbildung umfasst das Verfahren: Bereitstellen einer Mehrzahl von Paaren von Spiegeln mit unterschiedlichen Nulldurchgangs-Temperaturen, wobei die Nulldurchgangs-Temperaturen von jeweils zwei der Paare sich um maximal 4 K voneinander unterscheiden, sowie Auswählen eines Paares aus
25 der Mehrzahl von Paaren von Spiegeln anhand einer zu erwartenden Nulldurchgangs-Temperatur der Probe.

30

Um Proben mit unterschiedlichen Nulldurchgangs-Temperaturen vermessen zu können, wird für das Messverfahren ein Satz von Spiegelpaaren bereitgestellt, bei denen jedes Paar eine unterschiedliche Nulldurchgangs-Temperatur aufweist. In der Mehrzahl von Paaren von Spiegeln existieren jeweils zwei

Paare, deren Nulldurchgangs-Temperaturen nicht weiter als 4 K auseinander liegen. Da die Nulldurchgangs-Temperatur der Probe zumindest näherungsweise bekannt ist, kann ein Paar von Spiegeln für die Durchführung der Messung ausgewählt werden, dessen Nulldurchgangs-Temperatur sich um maximal 2 K von der Nulldurchgangs-Temperatur der Probe unterscheidet, d.h. welches möglichst genau mit der Nulldurchgangs-Temperatur der Probe übereinstimmt. Auf diese Weise kann die Größe der Verschiebung in axialer Richtung und damit der Fehler bei der Messung der relativen Längenänderung – bei gegebenen Spiegel-Eigenschaften, z.B. hinsichtlich Geometrie und Elastizitäts-Eigenschaften – auf z.B. 0.5 ppb begrenzt werden.

Bei einer Weiterbildung dieser Variante wird für die Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Materials der Probe ein Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Nulldurchgangs-Temperaturen der Probe und mindestens eines (gekrümmten) Spiegels berechnet. Der von der Temperatur und von den thermischen Ausdehnungskoeffizienten unabhängige Korrekturfaktor stellt einen Proportionalitätsfaktor zwischen der radialen Ausdehnung der Spiegel und der axialen Verschiebung der Spiegel aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bzw. der unterschiedlichen Nulldurchgangs-Temperaturen dar und kann wie in dem eingangs zitierten Artikel definiert und durch Finite-Element-Methoden anhand der Geometrie der Kavität berechnet werden. Mit Hilfe des Korrekturfaktors kann effektiver thermischer Ausdehnungskoeffizient der Fabry-Perot-Kavität berechnet werden, der die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Probe und der Spiegel berücksichtigt, vgl. dort Gleichung (1).

Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung, der insbesondere mit den weiter oben beschriebenen Aspekten kombiniert werden kann, wird die Fabry-Perot-Kavität bei der Veränderung der Umgebungstemperatur thermisch isoliert und/oder spannungsfrei gelagert. Durch die thermische Isolation kann ein

Wärmeübertrag auf die Probe durch Strahlung verhindert werden. Auch sollte die Probe bzw. die Fabry-Perot-Kavität während der Vermessung möglichst frei von mechanischen Spannungen gelagert werden.

5 Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung, der insbesondere mit den weiter oben beschriebenen Aspekten kombiniert werden kann, erfolgt das starre Verbinden der Probe mit den Spiegeln durch Ansprengen an fettfreien Oberflächen. Wie weiter oben beschrieben wurde, ist es für die Vermessung von Proben für die EUV-Lithographie in der Regel erforderlich, bei der Bestimmung des
10 thermischen Ausdehnungskoeffizienten eine relative Genauigkeit von weniger als 0.5 ppb zu erreichen. Zu diesem Zweck ist es typischerweise notwendig, dass keine organischen Stoffe zwischen der Probe und den Spiegeln vorhanden sind, die bei einer Veränderung der Temperatur ihre Eigenschaften verändern. Beispielsweise kann bereits die Umwandlung von zwei Monolagen
15 Kohlenwasserstoff zu einer Monolage Kohlenwasserstoff ausreichend sein, um das Messergebnis zu verfälschen. Daher ist es erforderlich, dass die Oberflächen an den Stirnseiten der hohlzylindrischen Probe und die Oberflächen der Spiegel, die beim Ansprengen miteinander verbunden werden, absolut fettfrei sind.

20

Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung, der insbesondere mit den weiter oben beschriebenen Aspekten kombiniert werden kann, wird in die Fabry-Perot-Kavität ein Laserstrahl eingestrahlt, der von einer durchstimbaren Laserquelle in Form eines Diodenlasers, insbesondere von einem Diodenlaser mit externem
25 Resonator, erzeugt wird. Der externe Resonator dient als frequenz- bzw. wellenlängenselektives Element und ermöglicht die Durchstimmung der Wellenlänge bzw. der Frequenz des Diodenlasers.

Die Verwendung eines durchstimbaren Diodenlasers hat sich gegenüber der
30 Verwendung eines durchstimbaren He-Ne-Lasers, wie er beispielsweise in dem Artikel „Use of optical frequency standards for measurements of

dimensional stability“, F. Riehle, Meas. Sci. Technol. 9 (1988), Seiten 1042-1048, beschrieben ist, als günstig erwiesen. Auch bei der Verwendung eines durchstimmbaren Diodenlasers wird die Veränderung der Resonanz-Frequenz der Fabry-Perot-Kavität anhand einer Schwebungs-Frequenz gegenüber der Frequenz eines Iod-stabilisierten He-Ne-Lasers gemessen.

Alternativ kann die Veränderung der Resonanz-Frequenz anhand einer Offset-Frequenz eines akusto-optischen Modulators des Fabry-Perot-Interferometers gemessen werden, wie dies in dem Artikel von F. Riehle beschrieben ist. Eine weitere Möglichkeit zur Messung der Veränderung der Resonanz-Frequenz einer Fabry-Perot-Kavität ist in dem Artikel „Dimensional Stability of Fused Silica, Invar, and Several Ultra-low Thermal Expansion Materials“, J. W. Berthold III et al, Metrologica, 13, 9-16 (1977) beschrieben. Dort wird ein Modulator zum Erzeugen von durchstimmbaren Seitenbändern eines stabilisierten Lasers verwendet. Die durchstimmbaren Seitenbänder ermöglichen es, die Resonanz-Frequenz der Fabry-Perot-Kavität zu verfolgen.

Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung, der insbesondere mit einem der weiter oben beschriebenen Aspekte kombiniert werden kann, weist eine die Fabry-Perot-Kavität enthaltende Vakuum-Kammer einen Infrarot-Sperrfilter auf oder verwendet zusätzlich zu den Ein- und Austrittsfenstern Infrarotsperrfilter, um den Ein- und Austritt von Infrarotstrahlung zu behindern und auf diese Weise eine homogenere Temperaturverteilung innerhalb des Probenraumes bzw. der Vakuum-Kammer und somit in der Fabry-Perot-Kavität herbeizuführen. Der Infrarot-Sperrfilter kann ein Ein- und Austrittsfenster der Vakuum-Kammer bilden oder der Infrarot-Sperrfilter kann zusätzlich zu den Ein- und Austrittsfenstern der Vakuum-Kammer im Strahlengang des Laserstrahls angeordnet sein.

Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung, der insbesondere mit mindestens einem der oben beschriebenen Aspekte kombiniert werden kann, ist die Fabry-

Perot-Kavität in einem Fabry-Perot-Interferometer angeordnet, das mit Hilfe einer oder mehrerer Kameras justiert wird. Bei diesem Aspekt der Erfindung kann die Einkopplung des Laserstrahls in die Fabry-Perot-Kavität und/oder es können die Positionen von Sensoren zur Messung der Intensität der

5 Laserstrahlen mit Hilfe einer oder mehrerer Kameras justiert wird/werden. Statt der direkten Betrachtung der Laserstrahlung bzw. von reflektierter oder gestreuter Laserstrahlung mit dem Auge hat die Verwendung von Kameras und Monitoren den Vorteil, dass die Intensität der Laserstrahlung gegebenenfalls verstärkt werden kann und die Wellenlänge der Laserstrahlung in einem besser
10 erkennbaren Wellenlängenbereich umgesetzt werden kann. Außerdem kann mit Hilfe der Kameras eine reproduzierbare Justage des Fabry-Perot-Interferometers, insbesondere der Fabry-Perot-Kavität, unter Einhaltung von Arbeitssicherheitsrichtlinien gewährleistet werden.

15 Bei einem weiteren Aspekt der Erfindung, der insbesondere mit einem der vorhergehenden Aspekte kombiniert werden kann, wird der durch die Fabry-Perot-Kavität transmittierte Laserstrahl bei der Justage des Fabry-Perot-Interferometers und/oder beim Bestimmen der temperaturabhängigen Längenänderung mit dem Fabry-Perot-Interferometer mit einer Kamera
20 beobachtet. Auf diese Weise kann die Art, Form und Qualität der von der Fabry-Perot-Kavität transmittierten TEM_{XY} -Lasermode, insbesondere der TEM_{00} -Mode, beurteilt werden. Auch kann die gewünschte TEM_{XY} -Lasermode der Fabry-Perot-Kavität reproduzierbar eingestellt werden.

25 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
30 verwirklicht sein.

Zeichnung

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

5

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Fabry-Perot-Interferometers zur Bestimmung einer temperaturabhängigen Längenänderung einer Probe, sowie

10

Fig. 2 eine schematische Darstellung der relativen Längenänderung der Probe in einem vorgegebenen Temperatur-Intervall.

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

15

Fig. 1 zeigt schematisch einen Messaufbau eines Fabry-Perot-Interferometers 1 zum Bestimmen einer temperaturabhängigen relativen Längenänderung $\Delta L / L$ einer Probe 2, die einen Abstandshalter zwischen zwei teildurchlässigen (End-)Spiegeln 3a,b einer Fabry-Perot-Kavität 4 bildet. Die Probe 2 ist als Hohlzylinder ausgebildet und an ihren beiden Stirnseiten mit den beiden
20 Spiegeln 3a,b durch Ansprengen starr verbunden. Das Ansprengen erfolgt an den zwei der Probe 2 zugewandten Oberflächen der Spiegel 3a,b, die ebenso wie die Stirnseiten der hohlzylindrischen Probe 2 vollständig fettfrei sind.

25

Die Spiegel 3a,b weisen jeweils einen reflektierenden Oberflächenbereich auf, welcher der Probe 2 zugewandt ist. Dieser radial innen liegende Oberflächenbereich ist konkav gekrümmt oder plan und bildet mit dem gegenüber angesprengten reflektierenden Oberflächenbereich einen Resonator. Bei gleichen Krümmungen der Spiegel 3a,b weisen deren
30 reflektierende Oberflächenbereiche einen Krümmungsradius zwischen der halben Länge des Resonators und unendlich auf. Der radial innen liegende, im

gezeigten Beispiel konkav gekrümmte Oberflächenbereich der Oberflächen der Spiegel 3a,b geht in einen radial außen liegenden, planen Oberflächenbereich über, an dem die Stirnseite der Probe 2 angesprengt wird. Die beiden Spiegel 3a,b sind in Fig. 1 lediglich zur Vereinfachung der Darstellung von der hohlzylindrischen Probe 2 beabstandet dargestellt.

Die Fabry-Perot-Kavität 4 ist in einer Vakuum-Kammer 5 angeordnet, die während der Vermessung mittels eines Vakuum-Pumpstands 6 evakuiert wird. Zur Durchführung der Messung wird ein Umgebungsdruck in der Vakuum-Kammer 5 eingestellt, der bei weniger als 5×10^{-4} mbar liegt. Die Vakuum-Kammer 5 weist zusätzlich zum Ein- und/oder Austrittsfenster der Vakuum-Kammer 5 oder anstelle eines Ein- und/oder Austrittsfensters der Vakuum-Kammer 5 einen oder ggf. mehrere Infrarot-Sperrfilter auf. Die Fabry-Perot-Kavität 4 ist thermisch isoliert und spannungsfrei in der Vakuum-Kammer 5 gelagert. Die Temperatur T der Fabry-Perot-Kavität 4 bzw. die Umgebungstemperatur T der Fabry-Perot-Kavität 4 wird mit Hilfe einer Temperiereinrichtung 7 eingestellt, die sowohl eine Erhöhung der Temperatur T auch eine Reduzierung der Temperatur T (Kryo-Bad) in der Vakuum-Kammer 5 bewirken kann. Eine Soll-Temperatur in der Fabry-Perot-Kavität 4 wird einem Thermostaten der Temperiereinrichtung 7 von einer Steuerungseinrichtung 8 vorgegeben, bei der es sich beispielsweise um einen Mess-Computer (PC) handeln kann. Die Ist-Temperatur T der Probe 2 in der Vakuum-Kammer 4 wird mittels eines Messwert-Aufnehmers (Datalogger) 9 bestimmt, der mit einem Temperatur-Sensor in der Vakuum-Kammer 4 in signaltechnischer Verbindung steht.

Für die Bestimmung der temperaturabhängigen Längenänderung $\Delta L / L$ der Probe 2 wird in die Fabry-Perot-Kavität 4 ein Laserstrahl 10 eingestrahlt, der von einer durchstimbaren Laserquelle 11 in Form eines Diodenlasers mit externem Resonator erzeugt wird. Der externe Resonator dient zur Durchstimmung, d.h. zur Veränderung, der Frequenz ν des Laserstrahls 10 und

ist in Fig. 1 in Form eines Piezo-Stellglieds dargestellt. Die Intensität bzw. die Leistung des Laserstrahls 10, der die Fabry-Perot-Kavität 4 durchlaufen hat, wird von einer Photodiode 12 gemessen. Das Messergebnis wird einem Regelkreis 13 zugeführt, der die von der Photodiode 12 gemessene Intensität maximiert, indem der Regelkreis 13 auf den durchstimbaren Diodenlaser 11 einwirkt (Lock-In-Prinzip). Die Frequenz ν des Diodenlasers 11 wird auf diese Weise der Resonanz-Frequenz ν der Fabry-Perot-Kavität 4 nachgeführt und entspricht dieser. Im gezeigten Beispiel wird die TEM₀₀-Lasermode (stehende Welle) in der Fabry-Perot-Kavität 4 angeregt.

Die Frequenz ν des Diodenlasers 11 wird in dem Fabry-Perot-Interferometer 1 mit der Frequenz eines Laserstrahls 14 eines Iod-stabilisierten He-Ne-Lasers 15 verglichen, genauer gesagt wird eine Schwebungsfrequenz $\Delta\nu / \nu$ zu dem stabilisierten He-Ne-Laser 15 gemessen. Zu diesem Zweck wird ein Anteil des Laserstrahls 10 des Diodenlasers 11 über einen ersten Strahlteiler 16a aus dessen Strahlengang ausgekoppelt und über einen zweiten Strahlteiler 16b in den Strahlengang des Laserstrahls 14 des He-Ne-Lasers 15 eingekoppelt. Die überlagerten Laserstrahlen 10, 14 treffen auf eine Hochfrequenz-Fotodiode 17, die mit einem Frequenz-Zähler 18 in signaltechnischer Verbindung steht, um die Schwebungsfrequenz $\Delta\nu / \nu$ zu messen. Ein Spektrum-Analysator 19 dient zur Überwachung der Messung.

Die Schwebungsfrequenz bzw. die relative Veränderung $\Delta\nu / \nu$ der Resonanz-Frequenz ν der Fabry-Perot-Kavität 4 wird der Steuerungseinrichtung 8 zugeführt. Die relative Veränderung $\Delta\nu / \nu$ entspricht bis auf das Vorzeichen der relativen Längenänderung $\Delta L / L$ des Materials der Probe 2 in der Kavität 4 bei einer Veränderung der Temperatur T und kann hochgenau bestimmt werden. Sowohl die Temperatur T der Kavität 4 als auch die Schwebungsfrequenz $\Delta\nu / \nu$ und die Zeit werden von der Steuerungseinrichtung 8 aufgezeichnet, die auch als Zeitgeber dient. Im gezeigten Beispiel wird willkürlich eine Länge L der

Probe 2 definiert, von der aus die relative Längenänderung $\Delta L / L$ bestimmt wird.

Das in Fig. 1 gezeigte Fabry-Perot-Interferometer 1 kann vor dem Beginn der Messung mit Hilfe einer Kamera, die den durch die Kavität 2 transmittierten Laserstrahl 10 beobachtet, justiert werden und/oder während der Messung überwacht werden, um sicherzustellen, dass eine gewünschte TEM_{XY} -Lasermode in der Kavität 4 reproduzierbar eingestellt wird. Die Einstellung der TEM_{XY} -Mode erfolgt durch die Veränderung der Einkopplung des Laserstrahls 10 mit Hilfe von Spiegeln und/oder Linsen. Die Einkopplung des Laserstrahls 10 in die Fabry-Perot-Kavität 4 und/oder die Positionen der beiden Fotodioden 12, 17 zur Messung der Intensität des Laserstrahls 10 des Diodenlasers 11 bzw. des Laserstrahls 14 des He-Ne-Lasers 15 können ebenfalls mit Hilfe von einer oder von mehreren Kameras überwacht bzw. justiert werden.

Das Fabry-Perot-Interferometer 1 weist zusätzlich zu den weiter oben beschriebenen Bauelementen noch weitere Bauelemente auf, die für die vorliegende Anwendung eine eher untergeordnete Rolle spielen. Beispielsweise ist vor den jeweiligen Laserquellen 11, 15 jeweils ein optischer Isolator zum Schutz vor rückreflektierter Strahlung angeordnet. Für die Überwachung der jeweiligen Laserquellen 11, 15 weist das Fabry-Perot-Interferometer 1 jeweils ein Oszilloskop auf.

Mit Hilfe des in Fig. 1 dargestellten Fabry-Perot-Interferometers 1 wird eine in **Fig. 2** dargestellte Messkurve der relativen Längenänderung $\Delta L / L$ in Abhängigkeit von der Proben-Temperatur T aufgenommen. Für die Messung wird zunächst ein Mess-Temperatur-Intervall T_I vorgegeben, das bei dem in Fig. 2 gezeigten Beispiel zwischen einer minimalen Temperatur T_{MIN} von $7,5^\circ\text{C}$ und einer maximalen Temperatur T_{MAX} von $27,5^\circ\text{C}$ liegt. Die Messung, d.h. das Verändern der Temperatur T der Fabry-Perot-Kavität 4, beginnt bei der maximalen Temperatur T_{MAX} des (Mess-)Temperatur-Intervalls T_I , d.h. der erste

Messwert der temperaturabhängigen Längenänderung $\Delta L / L$ wird bei der maximalen Temperatur T_{MAX} gemessen. Der Beginn der Messung bei der maximalen Temperatur T_{MAX} ist vorteilhaft, da sich Spannungen in dem Material der Probe 2 bzw. in den Spiegeln 3a,b abbauen, die z.B. aufgrund des

5 Ansprengens auftreten können.

Bei der Messung wird die Temperatur T der Kavität 4 schrittweise verändert, und zwar jeweils in Temperatur-Schritten von 2 K. Hierbei wird die Temperatur T der Fabry-Perot-Kavität 4 zunächst von der maximalen Temperatur T_{MAX} in

10 zehn Temperatur-Schritten ΔT auf eine minimale Temperatur T_{MIN} des vorgegebenen Temperatur-Intervalls T_I abgesenkt und nachfolgend wird die Temperatur T der Fabry-Perot-Kavität 4 von der minimalen Temperatur T_{MIN} wieder in zehn Temperatur-Schritten ΔT auf die maximale Temperatur T_{MAX} des Temperatur-Intervalls T_I erhöht.

Die Kavität 4 wird bei einer jeweils eingestellten Temperatur T innerhalb des Temperatur-Intervalls T_I über eine Zeitdauer zwischen ca. 2 Stunden und ca. 12 Stunden gehalten und erst danach wird von dem Messwert-Aufnehmer 9 bzw. von der Steuerungseinrichtung 8 der Messwert für die temperaturabhängige

20 Längenänderung $\Delta L / L$ gespeichert. Aus den beiden Messwerten, die bei derselben eingestellten Temperatur T beim Absenken und beim Erhöhen der Temperatur T aufgezeichnet werden, wird ein Mittelwert berechnet, welcher den in Fig. 2 dargestellten Messpunkten der temperaturabhängigen Längenänderung $\Delta L / L$ entspricht.

Da bei der maximalen Temperatur T_{MAX} und bei der minimalen Temperatur T_{MIN} jeweils nur ein Messwert aufgenommen wird, wird im gezeigten Beispiel die dort bestimmte temperaturabhängige Längenänderung $\Delta L / L$ nicht für die Auswertung herangezogen. Es versteht sich aber, dass die bei der maximalen

30 bzw. minimalen Temperatur T_{MAX} , T_{MIN} bestimmten Messwerte nicht zwingend verworfen werden müssen.

Bei dem Material der Probe 2 handelt es sich um ein so genanntes LTE-Material, im gezeigten Beispiel um ULE®, das bei einer Nulldurchgangstemperatur $T_{ZC,P}$, die im gezeigten Beispiel bei 17,5°C liegt, eine minimale relative Längenausdehnung $\Delta L / L$ aufweist. Die maximale Temperatur T_{MAX} des Temperatur-Intervalls T_I liegt um 10 K über der der Nulldurchgangstemperatur $T_{ZC,P}$ des Materials der Probe 2. Die minimale Temperatur T_{MIN} des Temperatur-Intervalls T_I liegt um 10 K unter der Nulldurchgangstemperatur $T_{ZC,P}$ der Probe 2.

In Fig. 2 ebenfalls dargestellt ist eine Kurve, welche einen Least-Square-Fit der Messwerte der temperaturabhängigen Längenänderung $\Delta L / L$ darstellt. Die Formel, die für den Least-Square-Fit verwendet wird, kann beispielsweise der Gleichung (3) aus dem oben zitierten Artikel von T. Legero entsprechen. Der thermische Ausdehnungskoeffizient $\alpha(T)$ stellt die Ableitung der relativen Längenänderung $\Delta L / L$ nach der Temperatur T dar. Im gezeigten Beispiel wird der temperaturabhängige thermische Ausdehnungskoeffizient $\alpha(T)$ in der Nähe der Nulldurchgangstemperatur $T_{ZC,P}$ der Probe 2 durch folgende Formel angenähert:

$$\alpha(T) = a (T - T_{ZC,P}) + b (T - T_{ZC,P})^2.$$

Die Werte a und b stellen den (konstanten) linearen Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten und den (konstanten) quadratischen Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten dar, die durch den Least-Square-Fit an die Messwerte der relativen Längenänderung $\Delta L / L$ von der Steuerungseinrichtung 8 bestimmt werden (vgl. auch Gleichung (2) in dem Artikel von T. Legero).

Es ist nicht erforderlich, vor dem Least-Square-Fit den Mittelwert aus den beiden Messwerten zu berechnen, die bei derselben eingestellten Temperatur T

aufgezeichnet wurden, wie dies weiter oben beschrieben ist. Vielmehr können beide Messwerte, die bei derselben Temperatur T aufgezeichnet wurden, für den Least-Square-Fit verwendet werden. In diesem Fall wird der Mittelwert aus den beiden Messwerten bei derselben Temperatur T automatisch durch den Least-Square-Fit gebildet.

Bei dem in Fig. 2 gezeigten Beispiel wird die Temperatur T der Fabry-Perot-Kavität 4 schrittweise mit vergleichsweise großen Temperatur-Schritten zwischen 3 K und 5 K verändert. Alternativ ist es möglich, die Temperatur der Fabry-Perot-Kavität 4 kontinuierlich mit einer Rate von mindestens 5 K / h zu verändern. In diesem Fall wird in Kauf genommen, dass sich in der Fabry-Perot-Kavität 4 eine inhomogene Temperatur-Verteilung einstellt, deren zeitlicher Verlauf durch ein Modell beschrieben werden kann. Unter der Annahme eines Modells des temperaturabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha(T)$ des Materials der Probe, beispielsweise wie in obiger Formel beschrieben, kann die temperaturabhängige Längenänderung $\Delta L / L$ berechnet werden. Der Ausdehnungskoeffizient $\alpha(T)$, genauer gesagt dessen Modell bzw. dessen Modell-Parameter (in obiger Formel: a bzw. b), werden in diesem Fall so angepasst, dass die berechneten Werte der Längenänderung $\Delta L / L$ mit den beobachteten Werten übereinstimmen.

Sowohl die Spiegel 3a,b als auch die Probe 2 sind im gezeigten Beispiel aus demselben Material (ULE®) gebildet, stammen allerdings aus unterschiedlichen Chargen, d.h. aus unterschiedlichen Herstellungsprozessen. Daher sind die thermischen Eigenschaften des Materials der Probe 2 und des Materials der Spiegel 3a,b nicht exakt gleich, sondern unterscheiden sich geringfügig. Dies gilt sowohl für den jeweiligen thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_s(T)$, $\alpha_P(T)$ als auch für die jeweilige Nulldurchgangs-Temperatur $T_{ZC,s}$ der Spiegel 3a,b, die sich von der Nulldurchgangs-Temperatur $T_{ZC,P}$ der Probe 2 im gezeigten Beispiel um maximal 2 Kelvin unterscheidet.

Eine solche maximale Differenz von 2 K zwischen der Nulldurchgangs-Temperatur $T_{ZC,P}$ der Probe 2 und der Nulldurchgangs-Temperatur $T_{ZC,S}$ der beiden Spiegel 3a,b kann dadurch erreicht werden, dass eine Mehrzahl von Paaren von Spiegeln 3a,b mit unterschiedlichen Nulldurchgangs-Temperaturen $T_{ZC,S}$ bereitgestellt bzw. bevorratet wird. Im gezeigten Beispiel sind vier Paare von Spiegeln 3a,b vorhanden, die eine jeweilige Nulldurchgangs-Temperatur $T_{ZC,S}$ von 10°C, 14°C, 18°C und 22°C aufweisen. Die Nulldurchgangs-Temperaturen $T_{ZC,S}$ von jeweils zwei hinsichtlich ihrer Nulldurchgangs-Temperatur $T_{ZC,S}$ benachbarten Paaren von Spiegeln 3a,b unterscheiden sich somit um jeweils 4 K. Anhand der zu erwartenden Nulldurchgangs-Temperatur $T_{ZC,P}$ der Probe 2, die im gezeigten Beispiel bei ca. 17°C liegt, wird das Paar von Spiegeln 3a,b mit der am wenigsten weit beabstandeten Nulldurchgangs-Temperatur $T_{ZC,S}$ von 18°C für die Messung ausgewählt und in der Fabry-Perot-Kavität 4 zur Vermessung der Probe 2 verwendet.

Die unterschiedlichen Nulldurchgangs-Temperaturen $T_{ZC,P}$, $T_{ZC,S}$ der Probe 2 und der Spiegel 3a,b bzw. die daraus resultierenden unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_P(T)$, $\alpha_S(T)$ führen zu einem Unterschied in der radialen Ausdehnung der Probe 2 im Vergleich zu den Spiegeln 3a,b, d.h. zu einer radialen Verspannung, die aufgrund der konkaven Krümmung der Spiegel-Oberflächen und aufgrund der starren Verbindung zwischen den Spiegeln 3a,b und der Probe 2 zu einer Ausdehnung bzw. (relativen) Verschiebung in axialer Richtung führt.

Wie in dem Artikel von T. Legero beschrieben ist, kann diese Krümmung durch einen von der Temperatur und von den thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_P(T)$, $\alpha_S(T)$ unabhängigen Korrekturfaktor δ berücksichtigt werden (vgl. dort Gleichung (1)), der es ermöglicht, einen effektiven thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_{eff}(T)$ der Kavität 4 zu definieren. Der Korrekturfaktor δ hängt nur von der Geometrie bzw. der Dimensionierung der

Kavität 4 und den (mechanischen) Materialeigenschaften der Probe 2 und der Spiegel 3a,b ab und kann durch Finite-Element-Methoden berechnet werden.

Das weiter oben beschriebene Verfahren zum Bestimmen der

- 5 temperaturabhängigen Längenänderung $\Delta L / L$ ist nicht auf das in Fig. 1 gezeigte Fabry-Perot-Interferometer 1 beschränkt, vielmehr kann die Bestimmung der Längenänderung $\Delta L / L$ auch mit einem auf andere Weise ausgebildeten Fabry-Perot-Interferometer durchgeführt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen einer temperaturabhängigen Längenänderung ($\Delta L / L$) einer Probe (2), die einen zwischen zwei Spiegel (3a,b) einer Fabry-Perot-Kavität (4) eingebrachten Abstandshalter in einem Fabry-Perot-Interferometer (1) bildet, umfassend:
Bestimmen der temperaturabhängigen Längenänderung ($\Delta L / L$) der Probe (2) anhand einer Veränderung ($\Delta v / v$) einer Resonanz-Frequenz der Fabry-Perot-Kavität (4) beim insbesondere schrittweisen Verändern einer Temperatur (T) der Fabry-Perot-Kavität (4),
dadurch gekennzeichnet,
dass die Temperatur (T) der Fabry-Perot-Kavität (4) zunächst von einer maximalen Temperatur (T_{MAX}) auf eine minimale Temperatur (T_{MIN}) eines vorgegebenen Temperatur-Intervalls (T_I) abgesenkt und nachfolgend die Temperatur (T) der Fabry-Perot-Kavität (4) von der minimalen Temperatur (T_{MIN}) auf die maximale Temperatur (T_{MAX}) des Temperatur-Intervalls (T_I) erhöht wird, oder umgekehrt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Verändern der Temperatur (T) der Fabry-Perot-Kavität (4) bei der maximalen Temperatur (T_{MAX}) des vorgegebenen Temperatur-Intervalls (T_I) beginnt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem für eine jeweilige Temperatur (T) innerhalb des Temperatur-Intervalls (T_I) ein Mittelwert aus der temperaturabhängigen Längenänderung ($\Delta L / L$) beim Absenken und beim Erhöhen der Temperatur (T) der Fabry-Perot-Kavität (4) gebildet wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Fabry-Perot-Kavität (4) bei einer jeweiligen beim Verändern eingestellten Temperatur (T) über eine Zeitdauer zwischen 2 Stunden und 12 Stunden gehalten wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das schrittweise Verändern der Temperatur (T) in Temperatur-Schritten (ΔT) zwischen 3 K und 5 K erfolgt.
6. Verfahren nach einem dem Oberbegriff von Anspruch 1, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Temperatur (T) der Fabry-Perot-Kavität (4) mit einer Rate von mindestens 5 K / h kontinuierlich verändert wird.
7. Verfahren nach dem Oberbegriff von Anspruch 1, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in einer Vakuum-Kammer (5) der Fabry-Perot-Kavität (4) ein Umgebungsdruck von weniger als 5×10^{-4} mbar eingestellt wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Material der Probe (2) eine Nulldurchgangs-Temperatur ($T_{ZC,P}$) aufweist, wobei die maximale Temperatur (T_{MAX}) des Temperatur-Intervalls (T_i) um mindestens 10 K, bevorzugt mindestens 20 K über der der Nulldurchgangs-Temperatur ($T_{ZC,P}$) liegt und wobei die minimale Temperatur (T_{MIN}) des Temperatur-Intervalls (T_i) um mindestens 10 K, bevorzugt um mindestens 20 K unter der Nulldurchgangs-Temperatur ($T_{ZC,P}$) liegt.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem anhand der temperaturabhängigen Längenänderung ($\Delta L / L$) ein temperaturabhängiger thermischer Ausdehnungskoeffizient ($\alpha(T)$) des Materials der Probe (2) bestimmt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem der temperaturabhängige thermische Ausdehnungskoeffizient $\alpha(T)$ des Materials der Probe (2) durch folgende Formel angenähert wird:

$$\alpha(T) = a (T - T_{ZC,P}) + b (T - T_{ZC,P})^2,$$

wobei $T_{ZC,P}$ eine Nulldurchgangs-Temperatur des Materials der Probe (2) bezeichnet und a, b jeweils eine Konstante bezeichnen.

11. Verfahren nach dem Oberbegriff von Anspruch 1, insbesondere einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Material der Probe (2) und das Material der Spiegel (3a,b) aus zwei unterschiedlichen Chargen desselben Materials gebildet sind, die sich in ihren Nulldurchgangs-Temperaturen ($T_{ZC,P}$, $T_{ZC,S}$) unterscheiden.
12. Verfahren nach Anspruch 11, weiter umfassend:
Bereitstellen einer Mehrzahl von Paaren von Spiegeln (3a,b) mit unterschiedlichen Nulldurchgangs-Temperaturen ($T_{ZC,S}$), wobei die Nulldurchgangs-Temperaturen ($T_{ZC,S}$) von jeweils zwei der Paare sich um maximal 4 K voneinander unterscheiden, sowie
Auswählen eines Paares aus der Mehrzahl von Paaren von Spiegeln (3a,b) anhand einer zu erwartenden Nulldurchgangs-Temperatur ($T_{ZC,P}$) der Probe (2).
13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, bei dem zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha(T)$ des Materials der Probe (2) ein Korrekturfaktor (δ) zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Nulldurchgangstemperaturen ($T_{ZC,P}$, $T_{ZC,S}$) der Probe (2) und des mindestens einen Spiegels (3a,b) berechnet wird.
14. Verfahren nach dem Oberbegriff von Anspruch 1, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Fabry-Perot-Kavität (4) bei der Veränderung der Temperatur (T) thermisch isoliert und spannungsfrei gelagert wird.

15. Verfahren nach dem Oberbegriff von Anspruch 1, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das starre Verbinden der Probe (2) mit den Spiegeln (3a,b) durch Ansprengen an fettfreien Oberflächen erfolgt.
16. Verfahren nach dem Oberbegriff von Anspruch 1, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in die Fabry-Perot-Kavität (4) ein Laserstrahl (10) eingekoppelt wird, der von einer durchstimmbaren Laserquelle in Form eines Diodenlasers, insbesondere von einem Diodenlaser (11) mit externem Resonator, erzeugt wird.
17. Verfahren nach dem Oberbegriff von Anspruch 1, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine die Fabry-Perot-Kavität (4) enthaltende Vakuum-Kammer (5) einen Infrarot-Sperrfilter aufweist.
18. Verfahren nach dem Oberbegriff von Anspruch 1, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Einkopplung des Laserstrahls (10) in die Fabry-Perot-Kavität (4) und/oder die Positionen von Sensoren (12, 17) zur Messung der Intensität von Laserstrahlen (10, 14) des Fabry-Perot-Interferometers (1) mit Hilfe einer oder mehrerer Kameras justiert wird/werden.
19. Verfahren nach dem Oberbegriff von Anspruch 1, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein durch die Fabry-Perot-Kavität (4) transmittierter Laserstrahl (10) bei der Justage des Fabry-Perot-Interferometers (1) und/oder beim Bestimmen der temperaturabhängigen Längenänderung ($\Delta L / L$) mit dem Fabry-Perot-Interferometer (1) mit einer Kamera beobachtet wird.

1 / 1

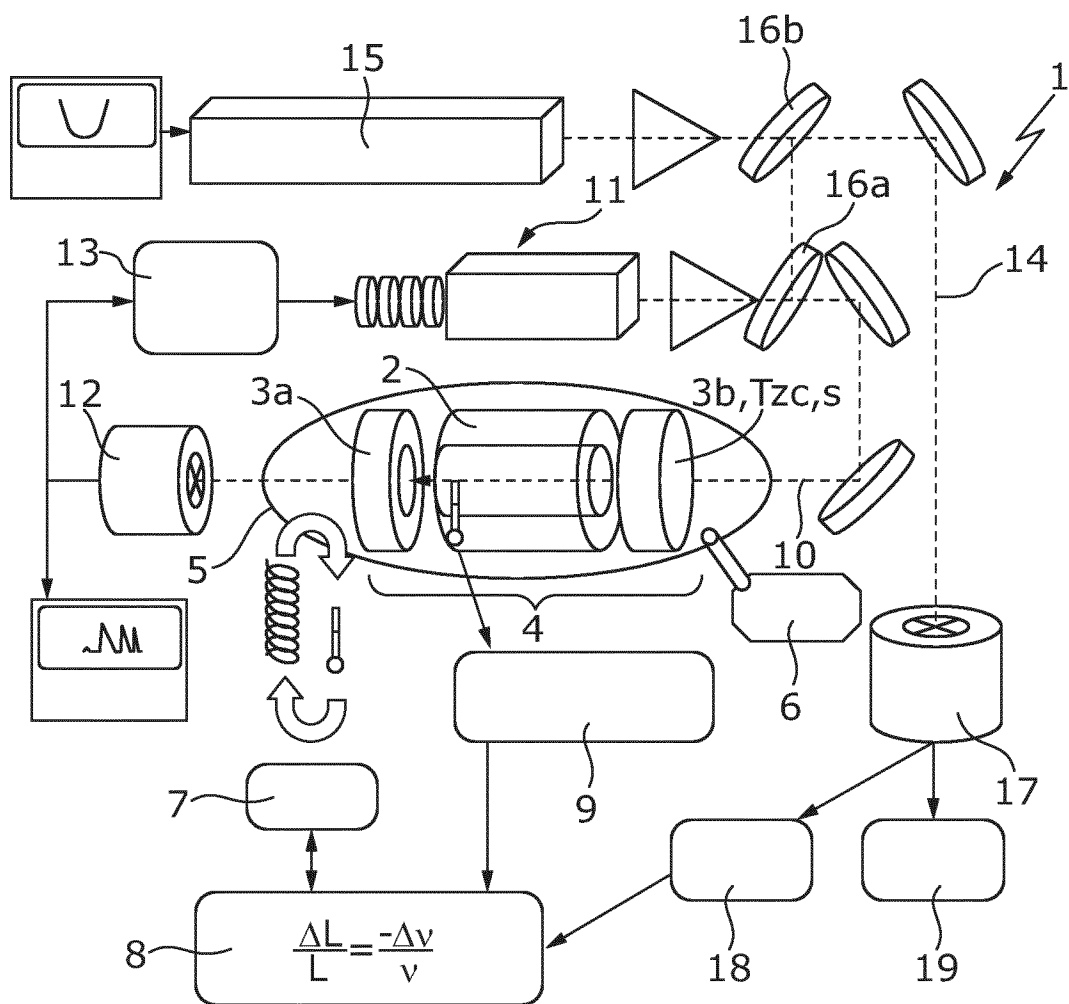


Fig. 1

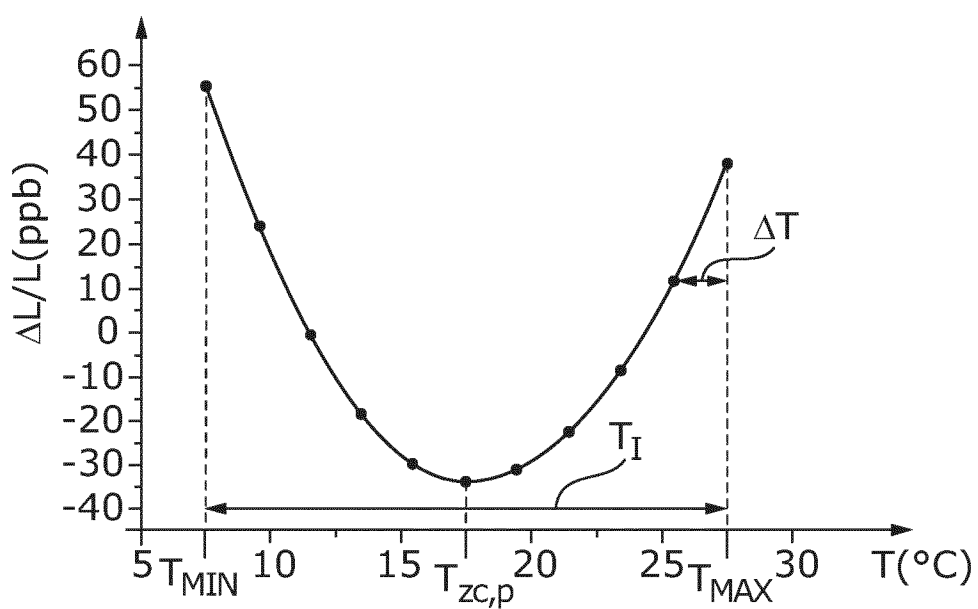


Fig. 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2020/064886

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01N 25/16 (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) G01N 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.
Y	JEWELL J M ET AL. "INTERFEROMETRIC METHOD FOR CONCURRENT MEASUREMENT OF THERMO-OPTIC AND THERMAL EXPANSION COEFFICIENTS" <i>APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US</i> , Vol. 30, No. 25, September 1991 (1991-09), pages 3656-3660 DOI: 10.1364/AO.30.003656 ISSN: 0003-6935, XP000226900 page 3656, right-hand column, paragraph 2 - page 3657, right-hand column, paragraph 8 page 3658, left-hand column, paragraph 2 - paragraph 4 page 3658, right-hand column, paragraph 2 - paragraph 3 figures 1,3,5	1-19
Y	ZHU CHEN ET AL. "A Miniaturized Optical Fiber Tip High-Temperature Sensor Based on Concave-Shaped Fabry-Perot Cavity" <i>IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US</i> , Vol. 31, No. 1, 01 January 2019 (2019-01-01), pages 35-38, [retrieved on 2018-12-19] DOI: 10.1109/LPT.2018.2881721 ISSN: 1041-1135, XP011701665 page 37, right-hand column, paragraph 1 - page 38, left-hand column, paragraph 1 figures 4,5	1-19
☒ 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 21 September 2020		Date of mailing of the international search report 30 September 2020
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Baranski, Jörg Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2020/064886

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	STEVEN R. PATTERSON. "Dimensional stability of superinvar" <i>ADVANCES IN RESIST TECHNOLOGY AND PROCESSING XVI</i> , US, Vol. 1335, November 1990 (1990-11), pages 53-59 DOI: 10.1117/12.22880 ISSN: 0277-786X, ISBN: 978-1-5106-3857-0. XP055729646 figure 2	1-19
A	HAN YOUNG RYU ET AL. "A Fiber Ring Laser Dilatometer for Measuring Thermal Expansion Coefficient of Ultralow Expansion Material" <i>IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ,</i> US, Vol. 19, No. 24, 15 December 2007 (2007-12-15), pages 1943-1945 DOI: 10.1109/LPT.2006.889036 ISSN: 1041-1135, XP011197979 the whole document	1-19
Y	THOMAS LEGERO ET AL. "Tuning the Thermal Expansion Properties of Optical Reference Cavities with Fused Silica Mirrors" <i>ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL</i> <i>UNIVERSITY ITHACA, NY 14853</i> , 10 February 2010 (2010-02-10), DOI: 10.1364/JOSAB.27.000914 XP080391329 cited in the application the whole document	1-19
Y	J W BERTHOLD ET AL. "Dimensional Stability of Fused Silica, Invar, and Several Ultra-low Thermal Expansion Materials" <i>METROLOGIA</i> , GB, Vol. 13, No. 1, 1977, pages 9-16 DOI: 10.1088/0026-1394/13/1/004 ISSN: 0026-1394, XP055730053 cited in the application the whole document	1-19

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G01N25/16
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01N

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.
Y	JEWELL J M ET AL: "INTERFEROMETRIC METHOD FOR CONCURRENT MEASUREMENT OF THERMO-OPTIC AND THERMAL EXPANSION COEFFICIENTS", APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, Bd. 30, Nr. 25, September 1991 (1991-09), Seiten 3656-3660, XP000226900, ISSN: 0003-6935, DOI: 10.1364/AO.30.003656 Seite 3656, rechte Spalte, Absatz 2 - Seite 3657, rechte Spalte, Absatz 8 Seite 3658, linke Spalte, Absatz 2 - Absatz 4 Seite 3658, rechte Spalte, Absatz 2 - Absatz 3 Abbildungen 1,3,5 ----- -/-	1-19



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

21. September 2020

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

30/09/2020

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

Baranski, Jörg

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	ZHU CHEN ET AL: "A Miniaturized Optical Fiber Tip High-Temperature Sensor Based on Concave-Shaped Fabry-Perot Cavity", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, Bd. 31, Nr. 1, 1. Januar 2019 (2019-01-01), Seiten 35-38, XP011701665, ISSN: 1041-1135, DOI: 10.1109/LPT.2018.2881721 [gefunden am 2018-12-19] Seite 37, rechte Spalte, Absatz 1 - Seite 38, linke Spalte, Absatz 1 Abbildungen 4,5 -----	1-19
A	STEVEN R. PATTERSON: "Dimensional stability of superinvar", ADVANCES IN RESIST TECHNOLOGY AND PROCESSING XVI, Bd. 1335, November 1990 (1990-11), Seiten 53-59, XP055729646, US ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.22880 ISBN: 978-1-5106-3857-0 Abbildung 2 -----	1-19
A	HAN YOUNG RYU ET AL: "A Fiber Ring Laser Dilatometer for Measuring Thermal Expansion Coefficient of Ultralow Expansion Material", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, Bd. 19, Nr. 24, 15. Dezember 2007 (2007-12-15), Seiten 1943-1945, XP011197979, ISSN: 1041-1135, DOI: 10.1109/LPT.2006.889036 das ganze Dokument -----	1-19
Y	THOMAS LEGERO ET AL: "Tuning the Thermal Expansion Properties of Optical Reference Cavities with Fused Silica Mirrors", ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 10. Februar 2010 (2010-02-10), XP080391329, DOI: 10.1364/JOSAB.27.000914 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument ----- -/--	1-19

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	J W BERTHOLD ET AL: "Dimensional Stability of Fused Silica, Invar, and Several Ultra-low Thermal Expansion Materials", METROLOGIA, Bd. 13, Nr. 1, 1977, Seiten 9-16, XP055730053, GB ISSN: 0026-1394, DOI: 10.1088/0026-1394/13/1/004 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument -----	1-19