



(10) **DE 10 2015 116 846 A1** 2017.04.06

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2015 116 846.4**

(22) Anmeldetag: **05.10.2015**

(43) Offenlegungstag: **06.04.2017**

(51) Int Cl.: **C03B 33/02 (2006.01)**

**B23K 26/53 (2014.01)**

**H01L 21/78 (2006.01)**

**H01L 21/301 (2006.01)**

**C03B 33/06 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**SCHOTT AG, 55122 Mainz, DE**

(74) Vertreter:

**Blumbach Zinngrebe Patent- und Rechtsanwälte,  
65187 Wiesbaden, DE**

(72) Erfinder:

**Ortner, Andreas, 55435 Gau-Algesheim, DE;  
Wagner, Fabian, 55118 Mainz, DE; Seidl, Albrecht,  
Dr., 63843 Niedernberg, DE; Lentes, Frank-  
Thomas, Dr., 55411 Bingen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

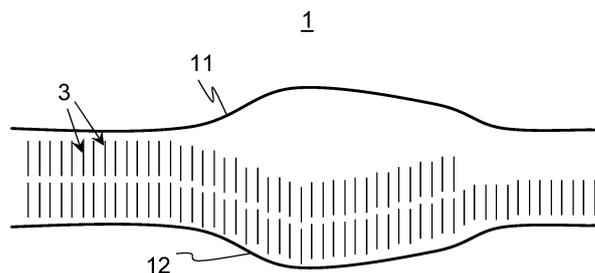
DE	103 17 826	B4
DE	103 25 942	B4
DE	10 2006 017 400	B4
DE	10 2012 110 971	A1
EP	2 044 387	B1
EP	2 781 296	A1
WO	2012/ 006 736	A2
WO	2014/ 111 385	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Filamentieren eines Werkstückes mit einer von der Sollkontur abweichenden Form sowie durch Filamentation erzeugtes Werkstück**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Filamentierung eines dielektrischen Werkstückes, wobei das Werkstück eine Dicke zwischen 0,5 und 20 mm aufweist und weiterhin diese Dicke räumlich variiert und/oder mindestens eine der das Werkstück begrenzenden Grenzflächen mindestens eine Krümmung mit einem Krümmungsradius zwischen 0,1  $\mu\text{m}$  bis 10 m aufweist, sowie weiterhin ein dielektrisches Werkstück mit speziell ausgebildeter Kante.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Filamentieren, insbesondere zum Schneiden, eines dielektrischen Werkstücks, bei welchem die Form von einer vorgegebenen Sollkontur abweicht, sowie ein dielektrisches Werkstück mit speziell ausgebildeter Kante.

**[0002]** Verfahren zum Trennen von dielektrischen Werkstücken, beispielsweise von Wafern, durch Einwirkung von Laserstrahlung gehören bereits seit vielen Jahren zum Stand der Technik. In den letzten Jahren hat sich die Technik der Filamentation entwickelt, bei der ein Laser, welcher über eine Wellenlänge im Transparenzbereich des zu trennenden Werkstücks verfügt, auf das Werkstück einwirkt. Die Einwirkung des Lasers erfolgt mittels gepulster, ultrakurzer Laserstrahlung, wobei der Puls sowohl als einzelner Puls als auch im sogenannten Burst-Modus, d.h. in Form diskreter Pakete, erfolgen kann. Auf diese Weise können beispielsweise in dielektrischen Werkstücken wie Glas sogenannte Filamente erzeugt werden. Als Filament wird eine längliche Struktur im Werkstück bezeichnet, wobei sich im Bereich dieser Struktur die Beschaffenheit des Werkstücks verändert hat. Beispielsweise kommt es im Bereich des Filaments zur Ausbildung von Mikrorissen und/oder Strukturänderungen, beispielsweise in Form von Kristallisation oder der Bildung neuer Phasen. Die solcherart ausgebildeten Fehlstellen im Werkstück sind entlang einer vorbestimmten Schädigungslinie angeordnet und wirken so als Ausgangspunkte für eine spätere Trennung des Werkstücks entlang dieser Linie. Ein solches Verfahren ist beispielhaft in der DE 10 2012 110 971 A1 beschrieben. Weiterhin sind in der internationalen Patentanmeldung WO 2014/111385 A1 ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zum laserbasierten Bearbeiten von flächigen Substraten offenbart. Hierbei wird ein Substrat, beispielsweise ein Wafer oder ein Glaselement, entlang mehrerer Schnittlinien getrennt, wobei im Werkstück ein Linienfokus erzeugt wird und es zu einer induzierten Absorption kommt, durch die im Material des Substrats eine Rissbildung induziert wird. Dabei liegt das Filament vom Startpunkt der Filamentbildung bis zu mindestens einer Oberfläche des Werkstücks als durchgehende Struktur, d.h. ununterbrochen, vor.

**[0003]** Die EP 2 781 296 A1 beschreibt weiterhin ein zweistufiges Verfahren, bei dem zunächst mittels eines Lasers Filamente, d.h. Schädigungszonen, entlang einer zuvor festgelegten Verlaufslinie induziert werden und in einem weiteren Schritt ein Materialabtrags- und/oder Verformungsschritt durchgeführt wird, beispielsweise mittels eines CO<sub>2</sub>-Lasers, so dass entlang der Verlaufslinie das Werkstück getrennt werden kann.

**[0004]** Die internationale Patentanmeldung WO 2012/006736 A2 beschreibt ein Verfahren zur Prozessierung eines transparenten Substrats zur Vorbereitung eines Trennschrittes. Hierbei werden mittels eines Lasers Filamente im Innern des Substrates erzeugt, wobei auch die Ausbildung von grabenartigen Vertiefungen an mindestens einer Oberfläche des Substrates möglich ist. Die Filamente bilden sich dabei in Abhängigkeit von der genauen Einstellung der Laserparameter aufgrund einer Selbstfokussierung des Laserstrahls im Innern des Substrates, wobei auch die Ausbildung mehrerer Filamente hintereinander im Substrat möglich ist. Entlang der so erzeugten Defektlinie erfolgt in einem weiteren Schritt das Trennen des Substrats.

**[0005]** Die aufgeführten Verfahren stoßen allerdings dann an ihre Grenzen, wenn Werkstücke getrennt werden sollen, welche nicht eben bzw. flächig ausgebildet sind, beispielsweise in Form einer Scheibe oder eines Bandes, welches von im Rahmen von üblichen fertigungstechnischen Toleranzen planparallelen Oberflächen begrenzt wird.

**[0006]** So ist beispielsweise seit langem das Problem von verwölbten Scheiben, beispielsweise Glas-scheiben, bekannt. Weiterhin weisen solche Scheiben oft auch eine gewisse Welligkeit oder allgemein eine Dickenvariation über ihren Verlauf hin auf, so dass allgemein eine Abweichung von der ebenen Form vorliegt. Da die Positionierung der Filamente relativ zu den Oberflächen bestimmend ist für eine gute Reproduzierbarkeit der induzierten Schädigung, um so ein möglichst fehler- und verlustfreies Trennen zu ermöglichen, kommt es bei solchen Werkstücken, welche nicht optimal ausgebildet sind, zu vermehrtem Ausfall. Weiterhin ist mit den vorbekannten Verfahren eine Filamentierung bzw. Trennung von Werkstücken, welche eine stärker von der flächigen, ebenen Form abweichende Form oder eine besonders große Dicke aufweisen, überhaupt nicht durchführbar.

**[0007]** Somit besteht ein Bedarf an einem Verfahren zur Filamentierung bzw. Trennung von Werkstücken, welche eine von der flächigen Form abweichende, beispielsweise eine keilförmige, Form und/oder eine große Dicke aufweisen oder beispielsweise durch Grenzflächen, welche Krümmungen aufweisen, gekennzeichnet sind.

**[0008]** Die Erfindung hat zur Aufgabe, ein Verfahren bereitzustellen, bei dem ein Werkstück einer großen Dicke und einer von der flächigen Form abweichenden Ausbildung getrennt werden kann, sowie ein solcherart hergestelltes Werkstück, insbesondere mit verfahrensgemäß speziell ausgebildeter Kante.

**[0009]** Die Erfindung wird überraschend einfach gelöst durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1 sowie durch ein Werkstück gemäß Anspruch 17. Bevorzugt

te Ausführungsformen sind den jeweiligen Unteransprüchen zu entnehmen.

**[0010]** Das erfindungsgemäße Verfahren zur Filamentierung eines dielektrischen Werkstücks, welches vorzugsweise eine Dicke zwischen 0,5 und 20 mm und weiterhin diese Dicke räumlich variiert und/oder mindestens eine der das Werkstück begrenzenden Grenzflächen (11) und (12) mindestens eine Krümmung mit einem Krümmungsradius zwischen 0,1 µm und 10 m aufweist, umfasst mindestens die folgenden Schritte:

a) Zunächst wird ein dielektrisches Werkstück bereitgestellt. Das dielektrische Werkstück der vorliegenden Erfindung kann beispielsweise ein Wafer oder ein Glaselement sein, wobei es eine von der Scheiben- oder Bandform abweichende räumliche Ausbildung hat. Das Werkstück der vorliegenden Erfindung kann beispielhaft als Keil vorliegen. Allerdings ist es auch möglich, dass das Werkstück als verwölbte Scheibe vorliegt oder durch eine sogenannte Feinwelligkeit gekennzeichnet ist. Im Allgemeinen ist es also möglich, dass die Abweichungen von der Scheiben- oder Bandform relativ schwach ausgeprägt sind. Es ist allerdings auch möglich, dass das Werkstück in Form eines dreidimensionalen Formkörpers, beispielsweise als Hohlkörper in Form einer Ampulle, ausgebildet ist.

b) Im zweiten Schritt erfolgt die Festlegung der Verlaufslinie der Filamente enthaltenden Zone im Werkstück, d.h. also die Festlegung der späteren Werkstückkante.

c) Anschließend wird im dritten Schritt eine Laserbearbeitungsvorrichtung bereitgestellt, wobei der Laser als Kurzpuls- oder als Ultrakurzpuls-Laser ausgestaltet ist und eine Laserstrahlung ausstrahlt, welche eine Wellenlänge aufweist, die im Transparenzbereich des Werkstücks liegt. Weiterhin verfügt die Laserbearbeitungsvorrichtung auch über eine Strahlformungseinrichtung zur Strahlformung, insbesondere zur Fokussierung der Laserstrahlung.

d) Weiterhin wird im vierten Schritt eine Vorrichtung bereitgestellt, welche zur Bestimmung der Dicke des Werkstücks und/oder zur Bestimmung von dessen Oberflächenkontur(en) und/oder zur Bestimmung von Streuzentren im Werkstück verfügt. Weiterhin dient diese Vorrichtung der Kontrolle des Abstandes zwischen Laserbearbeitungskopf und der diesem zugewandten Oberfläche des Werkstücks.

e) Vorzugsweise erfolgt im fünften Schritt schließlich die Bestimmung der Oberflächenkontur des Werkstücks durch optische, beispielsweise konfokale Messung.

f) Im sechsten Schritt wird Laserstrahlung auf das Werkstück in Form eines Laserpulses oder in Form von Bursts dergestalt einwirken gelassen, dass der Laserpuls ein Filament im Werkstück er-

zeugt. Als Filament wird im Rahmen der vorliegenden Erfindung eine durch die Laserstrahlung induzierte Struktur erzeugt, welche lediglich einen sehr geringen Durchmesser im Bereich weniger Mikrometer, aber eine Länge im Millimeterbereich aufweist. Diese Struktur ist dadurch gekennzeichnet, dass in diesem Bereich die ursprüngliche Beschaffenheit des Werkstücks verändert ist. Beispielsweise kann es zur Bildung neuer Phasen mit im Vergleich zum ursprünglichen Werkstück erhöhter Dichte gekommen sein. Auch eine (Um) Kristallisation zumindest in Teilen des Filaments ist möglich. Weiterhin sind im Bereich des Filaments typischerweise Risse, insbesondere Mikrorisse ausgebildet. Das Filament stellt damit allgemein eine Struktur im Werkstück dar, die eine Schwächung desselben bedeutet, so dass entlang der Verlaufslinie der Filamente eine Trennung des Werkstückes erfolgen kann. Bevorzugt sind die Filamente als Hohlräume ausgebildet.

g) Im siebten Schritt erfolgt schließlich die Bewegung der Laserstrahlung relativ zum Werkstück entsprechend des im zweiten Schritt bzw. Schritt b) festgelegten Verlaufs.

h) Weiterhin werden die die Schritte f) und g) wiederholt, so dass in der Filamentzone Filamente mit definiertem Start- und Endpunkt, bevorzugt Hohlräume, erzeugt werden.

Im erfindungsgemäßen Verfahren erfolgt die räumliche Positionierung des Startpunktes des Filaments im Werkstück und/oder relativ zu den es begrenzenden Oberflächen in Abhängigkeit von der in Schritt e) erfolgten Bestimmung der Oberflächenkontur des Werkstücks.

**[0011]** Als Laser kommen insbesondere sogenannte Kurzpuls-Laser in Betracht. Für die Erzeugung langer Filamente ist ein Betrieb eines solchen Ultrakurzpuls-Laser im sogenannten Burst-Modus besonders vorteilhaft. Dabei wird der Laserpuls nicht als Einzelpuls abgegeben, sondern ist aus mehreren kurz hintereinander abgegebenen Pulsen, den sogenannten Bursts, gebildet.

**[0012]** Eine geeignete Laserquelle gemäß der vorliegenden Erfindung ist ein Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 Nanometern. Die Laserquelle arbeitet insbesondere mit einer Repetitionsrate, welche zwischen 10 kHz und 120 kHz, bevorzugt zwischen 30 kHz und 110 kHz und ganz besonders bevorzugt zwischen 35 kHz und 105 kHz liegt. Die Scangeschwindigkeit kann vorzugsweise so gewählt werden, dass abhängig von der Repetitionsrate der Abstand benachbarter filamentförmiger Schädigungen im Bereich von 4 Mikrometern bis 10 Mikrometern liegt.

**[0013]** Dabei liegt die geeignete Pulsdauer eines Laserpulses in einem Bereich von weniger als 100 Piko-

sekunden, bevorzugt bei weniger als 10 Pikosekunden. Die Pulsdauer kann auch bei weniger als 1 Pikosekunde liegen. Die typische Leistung der Laserquelle liegt dabei besonders günstig in einem Bereich von 40 bis 100 Watt. Um die filamentförmigen Schädigungen zu erzielen, wird gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung eine Pulsenergie im Burst von mehr als 200 Mikrojoule eingesetzt, ferner vorteilhaft eine gesamte Burstenergie von mehr als 500 Mikrojoule.

**[0014]** Im Falle eines Betriebs des Ultrakurzpuls-Lasers im Burst-Modus ist die Repetitionsrate die Wiederholrate der Abgabe von Bursts. Die Pulsdauer ist im Wesentlichen unabhängig davon, ob ein Laser im Einzelpulsbetrieb oder im Burst-Mode betrieben wird. Die Pulse innerhalb eines Bursts weisen typischerweise eine ähnliche Pulslänge auf, wie ein Puls im Einzelpulsbetrieb.

**[0015]** Weiterhin ist es möglich, durch Frequenzverdopplung oder -verdreifachung energiereiche ultrakurze Pulse in verschiedenen Wellenlängenbereich wie z.B. Infrarot (1064 nm), VIS (532 nm) oder UV (355 nm) zu erhalten, so dass eine der wesentlichen Bedingungen für die Filamentation, nämlich das Vorliegen eines für die verwendete Laserstrahlung transparenten Mediums, nicht nur für ein im optischen Bereich des Spektrums transparentes Medium wie beispielsweise Glas, sondern auch für ein im Infraroten transparentes Medium wie beispielsweise Silizium erfüllt ist. Der Prozess der mehrstufigen Filamentation ist mithin also auch als Trennvorbereitung für Siliziumwafer anwendbar.

**[0016]** Die Bestimmung der Oberflächenkontur des Werkstücks kann beispielsweise in Form einer transversierenden Messung, d.h. einer Messung, bei der der Messkopf über die Oberfläche des Werkstücks bewegt wird, erfolgen. Dabei wird die Position der beiden Oberflächen des Werkstücks in Bezug auf einen vorgegebenen Referenzpunkt für die Fokussieroptik durch Messung der maximalen, an jedem Messort vorhandenen, Streuintensität ermittelt. Mit einem solchen Verfahren lässt sich die reale Form der Oberflächen des sprödbrechenden Materials in Form von Punktwolken ermitteln. Die realen lokalen Krümmungen der Oberfläche können über Interpolationen der Werkstückoberflächen mit anschließender Differentiation beschrieben werden. Die Variation des Abstandes zwischen Messkopf und Werkstückoberfläche(n) stellen Formabweichungen von der Idealform eines ebenen Werkstücks mit planparallel zueinander ausgerichteten Oberflächen dar und werden mit dieser Methode erfasst. Aus den ermittelten Profildaten lassen sich durch Differentiation auch lokale Krümmungen der Oberfläche ermitteln, so dass ein Modell der Werkstückoberflächen erhalten werden kann. Das Vorgehen bei der konfokalen Abstandsmessung ist beispielhaft in der

DE 10325942 B4, der DE 10317826 B4 sowie der DE 10 2006 017 400 B4 beschrieben. Die Darstellung der industriellen Anwendungsmöglichkeiten der konfokalen Sensortechnik in der Glasherstellung findet sich in der EP 2 044 387 B1.

**[0017]** Alternativ können zur Konturerfassung neben der konfokalen Abstandsmessung allerdings auch andere Methoden herangezogen werden, wie beispielsweise die Lasertriangulation, Lichtschnittverfahren oder auch flächige interferometrische Verfahren auf Glas.

**[0018]** Für den Prozess der Filamentation wird auf das Flächenmodell der Werkstückoberfläche zurückgegriffen und über eine geeignete Fokussieroptik, beispielsweise ein motorisch betriebenes Teleskop oder eine motorisch verfahrbare Fokussierlinse, die Lage des Fokuspunktes variiert und somit der Startpunkt der Filamentation in Richtung der Glasdicke bzw. die Lage der erzeugten Filamentstruktur in Richtung der Glasdicke angepasst. Bei lokalen Krümmungen der Werkstückoberfläche kann durch geeignete Maßnahmen im fokussierenden Strahlengang der Einfallswinkel des Laserstrahls auf das Werkstück korrigiert werden. Bei gegebenem Material sowie Laser- und Optikparametern ist die Ausprägung der Filamentstruktur reproduzierbar definiert, so dass nicht nur die Position des Startpunktes der Filaments, sondern auch seine Lage in Richtung der Glasdicke definiert einstellbar ist. Insbesondere sind die Entfernungen der Endpunkte der Filamentstruktur einstellbar.

**[0019]** Sofern die Dicke des Werkstücks so groß ist, dass die Erzeugung eines einzigen, für die spätere Trennung des Werkstücks hinreichend lang ausgebildeten Filamentes in einem einzigen Laserbehandlungsschritt nicht möglich ist, werden gemäß einer Ausführungsform der Erfindung Filamente in unterschiedlichen Höhenschnitten des Werkstücks erzeugt. Dabei liegen diese übereinander erzeugten Filamente in Richtung der einfallenden Laserstrahlung exakt übereinander, d.h. ihre räumliche Positionierung unterscheidet sich lediglich hinsichtlich ihrer Höhe im Werkstück, aber nicht in lateraler Richtung.

**[0020]** In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung werden die Filamente, welche näher an der der Vorrichtung zur Erzeugung von Laserstrahlung abgewandten Oberfläche des Werkstückes liegen, zuerst erzeugt. Dabei ist die Vorgehensweise von „unten“ nach „oben“ im Werkstück notwendig, um einerseits die Fokussierbarkeit des Laserstrahls sowie andererseits die Detektierbarkeit der inneren Schädigung zu gewährleisten. Ein bereits erzeugtes Filament, also eine innere Schädigung in Form einer Materialumwandlung, beeinträchtigt nämlich die Fokussierbarkeit des Laserstrahls „hinter“ dem Filament, also an der vom Laser abgewandten Seite; ebenso kann auch das optische Messinstrument nur den Beginn

des Filaments detektieren, aber nicht durch das Filament hindurch.

**[0021]** Bevorzugt ist der Startpunkt des zuerst erzeugten Filaments der Endpunkt des später erzeugten Elements, so dass als Ergebnis ein möglichst durchgehendes, langes Filament erhalten wird.

**[0022]** In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sind die Filamente so ausgestaltet, dass sie die gesamte Dicke des Werkstückes durchdringen.

**[0023]** In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung sind die Filamente als röhrenartige Hohlräume ausgebildet. Dabei sind die Hohlräume dadurch gekennzeichnet, dass ihre Länge größer ist als ihr Durchmesser, wobei die Bereiche des dielektrischen Materials, welche die Filamente umgeben, zumindest in Teilbereichen eine größere Dichte aufweisen als die Bereiche, welche sich außerhalb der Filamentzone befinden.

**[0024]** In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung erfolgt eine nichtlinear-optische Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Werkstück mit der Folge, dass eine vollständige Plasmabildung und/oder Plasmaexplosion im Werkstück erfolgt, so dass nach erfolgter Plasmabildung im Werkstück ein Hohlraum vorliegt.

**[0025]** In einer Ausführungsform der Erfindung ist die Fokussier- bzw. Strahlformungseinrichtung dergestalt eingestellt, dass während des Laserpulses die Laserstrahlung in Form eines Linienfokus fokussiert wird, wobei der Linienfokus gekennzeichnet ist durch einen Kanal hoher Lichtintensität, welche eine Länge von 10 mm oder weniger sowie einen Durchmesser von 10 µm oder weniger aufweist.

**[0026]** Die Strahlformungs- bzw. Fokussiereinrichtung umfasst gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung eine Sammellinse, vorzugsweise mit erhöhter sphärischer Aberration, und/oder ein Axicon und/oder ein optisches Gitter, bestehend aus kreisförmigen konzentrischen Linien, und/oder ein diffraktives optisches Element und/oder ein computergeneriertes Hologramm.

**[0027]** Weiterhin kann gemäß noch einer weiteren Ausführungsform der Erfindung der Laserstrahl von einem Roboter mit Hilfe von optischen Fasern und/oder Spiegelkombinationen so geführt werden, dass unter Beachtung der in Schritt e) ermittelten Oberflächenkontur des Werkstücks mit einem Winkel zwischen 75 und 105°, bevorzugt mit einem Winkel von 90° auf die der Laserstrahlung zugewandten Oberfläche zugeführt wird.

**[0028]** In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung wird nach der Bestimmung der Oberflächenkontur des Werkstücks ein Flächenmodell desselben erstellt.

**[0029]** In Abhängigkeit dieses Modells erfolgt in einer weiteren Ausführungsform der Erfindung eine computergestützte Ansteuerung der Filamentstartpunkte entlang der Trennlinie im Werkstück.

**[0030]** Nach Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Filamentierung eines dielektrischen Werkstücks liegt das Werkstück durch die durch Filamente gebildete Trennlinie in unterschiedliche Gebiete aufgeteilt vor. Das Werkstück ist somit nicht getrennt, sondern lediglich an den durch die Filamente gebildeten Trennlinien geschwächt.

**[0031]** Dabei ist es gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung möglich, dass zwischen den einzelnen Filamenten kleinste Risse entstehen oder bewusst herbeigeführt werden, beispielsweise durch einen nachfolgenden Trenn- oder Cleaving-Schnitt.

**[0032]** Dabei wird durch induzierte thermomechanische Spannungen ein Riss entlang der Vorschädigungslinie geführt. Dies kann beispielsweise durch die Bestrahlung mit einem Infrarotlaser, wie z.B. einem CO<sub>2</sub>-Laser (mit oder ohne nachfolgender Kühlung), erfolgen.

**[0033]** War die Trennlinie linear oder bogenförmig angelegt, kann das Werkstück nun getrennt werden. Sofern allerdings die durch die Filamente gebildete Vorschädigungslinie als geschlossene Linie vorliegt, erfolgt gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung als weiterer Schritt ein Auslösen.

**[0034]** Ein solches Auslösen kann beispielhaft durch das Einbringen von Spannungen in das Werkstück erzeugt werden. Bevorzugt erfolgt das Einbringen von Spannungen dabei durch selektives Erwärmen dergestalt, dass lediglich ein durch eine Vorschädigungslinie definierter Teilbereich erwärmt wird, ein anderer jedoch auf einer niedrigeren Temperatur belassen wird, so dass zwischen diesen Bereichen eine mechanische Spannung dergestalt erzeugt wird, dass das Auslösen entlang der Trennlinie erfolgt.

**[0035]** Das dielektrische Werkstück der vorliegenden Erfindung ist bevorzugt als Glas oder Glaskeramik ausgebildet. Bevorzugt liegt das Glas als Alumin- oder Borsilikatglas vor.

**[0036]** Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren wird ein dielektrisches Werkstück erhalten, welches vorzugsweise eine Dicke zwischen mindestens 0,5 mm sowie höchstens 20 mm aufweist und bei welchem weiterhin diese Dicke räumlich variiert und/oder mindestens eine der das Werkstück begrenzenden

Grenzflächen und mindestens eine Krümmung mit einem Krümmungsradius zwischen  $0,1 \mu\text{m}$  und  $10 \text{ m}$  aufweist, wobei weiterhin mindestens eine Kante des Werkstücks eine Rauigkeit RMS von  $1$  bis  $5 \mu\text{m}$  aufweist, wobei diese Rauigkeit bestimmt ist durch eine Rauigkeitsmessung mit einem Rasterkraftmikroskop und/oder einem Weißlichtinterferometer, und wobei in diesem Bereich das Material des Werkstücks sich hinsichtlich seiner Eigenschaften zumindest teilweise vom übrigen Bereich des Werkstücks unterscheidet, beispielsweise hinsichtlich des Phasengehalts, des Brechungsindex und/oder der Dichte.

**[0037]** Die Erfindung wird nachfolgend anhand bevorzugter Ausführungsformen und unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen detaillierter beschrieben.

**[0038]** Es zeigen

**[0039]** Fig. 1 einen schematischen Schnitt durch ein Werkstück mit Filamenten in unterschiedlichen Höhen des Werkstücks,

**[0040]** Fig. 2 eine schematische Darstellung des konfokalen Messprinzips zur Ermittlung der Oberflächenkontur eines Werkstücks mit nicht planparallelen Oberflächen,

**[0041]** Fig. 3 eine schematische Aufsicht auf ein Werkstück, in welches eine Filamentzone eingebracht wurde, sowie

**[0042]** Fig. 4 eine schematische Aufsicht auf ein mit dem erfindungsgemäßen Verfahren entlang einer Filamentzone getrenntes Werkstück.

**[0043]** Fig. 1 zeigt in schematischer und nicht maßstabgetreuer Ansicht einen Schnitt durch ein dielektrisches Werkstück **1**. Das Werkstück **1** weist eine Abweichung von einer ideal planen Form dergestalt auf, dass die beiden es begrenzenden Oberflächen **11** und **12** nicht ideal parallel zueinander ausgebildet sind, sondern es vielmehr zu einem unregelmäßigen Anstieg der Dicke des Werkstücks **1** kommt. Weiterhin zeigt die Abbildung verschiedene Filamente **3**, welche zur besseren Übersichtlichkeit nicht alle bezeichnet sind. Die Dicke des Werkstücks **1**, welches von nicht planparallel zu einander angeordneten Oberflächen **11** und **12** begrenzt ist, variiert also über den Verlauf des Werkstücks **1**; weiterhin weisen die Oberflächen **11** und **12** Krümmungen auf. Das Werkstück der vorliegenden Erfindung ist im Allgemeinen so ausgebildet, dass die laterale Ausdehnung der es begrenzenden Oberflächen mindestens eine Größenordnung größer ist als seine Dicke.

**[0044]** Allgemein, ohne Beschränkung auf das abgebildete Beispiel, kann das Werkstück **1** so ausgebil-

det sein, dass es durch mindestens eines der folgenden Merkmale gekennzeichnet ist:

- Die Oberflächen **11** und **12** des Werkstücks **1** sind nicht planparallel zueinander ausgebildet, vielmehr kommt es zu einer Variation der Dicke des Werkstücks über dessen laterale Ausdehnung hinweg. Beispielsweise kann das Werkstück **1** vorliegen als eine Scheibe, bei der an einer Oberfläche, beispielsweise der Oberfläche **1**, bewusst eine Struktur eingebracht worden ist, um Reflexionseigenschaften des Werkstücks **1** zu optimieren, also beispielsweise eine pyramidenartige Struktur. Weiterhin kann das Werkstück **1** aber auch in Form eines einfachen Keils vorliegen, oder
- mindestens eine der Oberflächen **11** und **12** weist eine Krümmung auf, wobei die Krümmung gekennzeichnet ist durch einen Radius, welcher im Bereich von  $0,1 \mu\text{m}$  bis  $10 \text{ m}$  liegt. D.h. es kann sich bei der Abweichung des Werkstücks **1** von einer idealen Scheibenform auch um einer sehr kleinen Abweichung handeln, welche beispielsweise bei einer Scheibe mit einer Verwölbung (warp) oder einer sogenannten Waviness oder Feinwelligkeit vorliegt.

**[0045]** Die Dicke des Werkstücks **1** liegt im Bereich von mindestens  $0,5 \text{ mm}$  bis höchstens  $20 \text{ mm}$ . Bei solchen Dicken ist es im Allgemeinen nicht möglich, mit lediglich einem Filament **3** über die Dicke des Werkstücks eine ausreichende Vorschädigung in dasselbe einzubringen, die für eine spätere saubere Trennung ausreichend ist. Vielmehr müssen bei solch dicken Werkstücken mehrere Filamente **3** nacheinander in unterschiedlichen Höhenbereichen des Werkstücks erzeugt werden. Im vorliegenden Beispiel ist zunächst eine untere Reihe Filamente **3** erzeugt worden, wobei diese näher an der dem Laser abgewandten Oberfläche **12** des Werkstücks **1** angeordnet sind. In einem zweiten Schritt werden sodann weitere Filamente **3** in einem höheren Bereich des Werkstücks **1** erzeugt, wobei diese Filamente **3** räumlich genau über den zuerst erzeugten Filamenten **3** liegen.

**[0046]** Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung des konfokalen Messprinzips zur Ermittlung der Oberflächenkontur eines Werkstücks, welches Oberflächen **11**, **12** aufweist, die nicht planparallel ausgebildet sind, wobei die Abweichung von der Planarität im hier abgebildeten Werkstück **1** allerdings nur sehr gering ausgeprägt ist. Dieses Messprinzip ist beispielsweise auch in der internationalen Patentanmeldung WO 2008/ 009472 A1 beschrieben und wird wie folgt erläutert:

Der Messkopf **5** umfasst eine polychromatische Lichtquelle **51**, welche beispielsweise als Halogenlampe ausgebildet sein kann. Für einen möglichst punktförmigen Fokus des Lichts passiert das Licht der Lichtquelle **51** zunächst einen Blende **52** und trifft

im folgenden auf eine hochdispersive Optik **54**, welche das Licht fokussiert, wobei verschiedene Wellenlängen mit unterschiedlichen Brennweiten fokussiert werden.

**[0047]** Beispielhaft dargestellt sind die Lichtkegel für Licht der drei unterschiedlichen Wellenlängen  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ . Hierbei wird das Licht mit der Wellenlänge  $\lambda_1$  bereits vor dem Werkstück **1** fokussiert. Der Fokus des Lichts mit der Wellenlänge  $\lambda_2$  liegt auf der Oberfläche des Werkstücks **11**, welches dem Messkopf sowie dem Laser zugewandt ist; der Fokus des Lichts mit der Wellenlänge  $\lambda_3$  auf der Oberfläche **12** des Werkstücks **1**. Das Licht der Wellenlängen  $\lambda_2$  und  $\lambda_3$  wird dabei teilweise an den Oberflächen **11** und **12** zurück in die Optik **54** reflektiert und über einen halbdurchlässigen Spiegel **53** auf die Eintrittsblende eines Spektrometers **55** fokussiert und im Spektrometer analysiert. Licht mit Wellenlängen zwischen  $\lambda_2$  und  $\lambda_3$  wird dagegen nur in geringem Maße in die Optik zurückreflektiert. Ein beispielhaftes Spektrum **56** zeigt die beiden Maxima **57** und **58**, welche den beiden Wellenlängen  $\lambda_2$  und  $\lambda_3$  entsprechen.

**[0048]** Der Abstand  $\Delta\lambda$  zwischen diesen beiden Maxima ist ein Maß für die Dicke des Werkstücks. Liegt die Referenzfläche im Messbereich des konfokalen Sensors und die gebogene Oberfläche auf ihr, so zeigen sich je nach Materialeigenschaft der Referenzfläche auf drei Peaks und der Warp des Werkstücks kann als maximale Höhendifferenz zwischen den Punkten auf der Oberfläche des Werkstücks **1** und deren der Referenzfläche bestimmt werden.

**[0049]** Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung eines zu trennenden Werkstücks **1**. Die Filamente **3** (nicht bezeichnet) finden sich in der Filamentzone **2**. Die Filamentzone **2** bezeichnet den Verlauf der Linie, entlang welcher die Filamente angeordnet sind. Rings um diese Filamentzone befindet sich ein Bereich **14**, welcher durch die Erzeugung der Filamente **3** sich hinsichtlich seiner Eigenschaften zumindest teilweise von den übrigen Bereichen **13** des Werkstücks **1**, welche von der Bildung der Filamente **3** nicht beeinträchtigt bzw. verändert wurden, unterscheidet. Beispielsweise kann innerhalb des Bereichs **14** der Brechungsindex des Materials gegenüber den Bereichen **13** verändert sein, oder es ist zumindest teilweise zu einer Änderung der Dichte oder des Phaseninhalts gekommen.

**[0050]** Entlang der Filamentzone **2** kann das Werkstück **1** unter Bildung zweier neuer Werkstücke getrennt werden.

**[0051]** In Fig. 3 handelt es sich bei der dargestellten Kontur beispielhaft um ein Rechteck. Allerdings sind die Ecken dabei in der Regel nicht als ideal scharfe Ecken ausgebildet, sondern weisen endliche Ra-

dien auf, welche beispielsweise im Millimeterbereich liegen können.

**[0052]** Weiterhin sind allgemein, ohne Beschränkung auf das dargestellte Beispiel, auch runde oder ellipsenförmige Innenkonturen möglich sowie eckige Formen, welche abgerundete Ecken aufweisen.

**[0053]** Nicht dargestellt, aber weiterhin ebenfalls möglich ist die Ausbildung einfacher gerader oder auch gebogener Linien, entlang welcher ein Werkstück in zwei Teile getrennt werden kann.

**[0054]** Fig. 4 zeigt in schematischer, nicht maßstabgetreuer Abbildung ein solches, aus einem Werkstück **1** entstandenes neues Werkstück **4**. Dieses Werkstück **4** weist eine Kante **41** auf, welche entlang der Filamentzone **2** des ursprünglichen Werkstücks **1** entstanden ist. Entsprechend ist die Kante **41** dadurch gekennzeichnet, dass in diesem Bereich das Material des Werkstücks **4** sich hinsichtlich seiner Eigenschaften zumindest teilweise vom übrigen Bereich **42** des Werkstücks **4** unterscheidet, beispielsweise hinsichtlich des Phasengehalts, des Brechungsindex und/oder der Dichte.

#### Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Werkstück
<b>11</b>	dem Laser zugewandte Oberfläche des Werkstücks
<b>12</b>	dem Laser abgewandte Oberfläche des Werkstücks
<b>13</b>	Bereich des Werkstücks außerhalb der Filamentzone
<b>14</b>	Bereich des Werkstücks innerhalb der Filamentzone
<b>2</b>	Filamentzone
<b>3</b>	Filament
<b>4</b>	durch Filamentation entstandenes Werkstück
<b>41</b>	durch Filamentation entstandene Kante
<b>42</b>	außerhalb des Kantenbereichs liegender Bereich des Werkstücks
<b>5</b>	Messkopf
<b>51</b>	polychromatische Lichtquelle
<b>52</b>	Blende
<b>53</b>	halbdurchlässiger Spiegel
<b>54</b>	hoch dispersive Optik
<b>55</b>	Spektrometer
<b>56</b>	Spektrum
<b>57, 58</b>	Maximum

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

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

**Zitierte Patentliteratur**

- DE 102012110971 A1 [0002]
- WO 2014/111385 A1 [0002]
- EP 2781296 A1 [0003]
- WO 2012/006736 A2 [0004]
- DE 10325942 B4 [0016]
- DE 10317826 B4 [0016]
- DE 102006017400 B4 [0016]
- EP 2044387 B1 [0016]
- WO 2008/009472 A1 [0046]

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Filamentierung eines dielektrischen Werkstücks (1), wobei das Werkstück vorzugsweise eine Dicke zwischen 0,5 und 20 mm aufweist und weiterhin diese Dicke räumlich variiert und/oder mindestens eine der das Werkstück begrenzenden Grenzflächen (11) und (12) mindestens eine Krümmung mit einem Krümmungsradius zwischen 0,1 µm bis 10 m aufweist, wobei das Verfahren mindestens die folgenden Schritte umfasst:

- a) Bereitstellen des dielektrischen Werkstücks (1),
- b) Festlegen der Verlaufslinie der Filamentzone (2) im Werkstück (1),
- c) Bereitstellen einer Laserbearbeitungsvorrichtung, wobei der Laser als Kurzpuls- oder Ultrakurzpuls-Laser ausgestaltet ist und eine Laserstrahlung mit einer Wellenlänge im Transparenzbereich des Werkstücks (1) ausstrahlt und weiterhin über eine Strahlformungseinrichtung zur Strahlformung, insbesondere zur Fokussierung der Laserstrahlung, verfügt,
- d) Bereitstellen einer Vorrichtung zur Bestimmung von Dicke und/oder Oberflächenkontur des Werkstücks (1) und/oder von Streuzentren im Werkstück (1) sowie zur Kontrolle des Abstandes zwischen Laserbearbeitungskopf und der diesem zugewandten Oberfläche (11) des Werkstücks (1),
- e) vorzugsweise Bestimmen der Oberflächenkontur des Werkstücks (1) durch optische Messung,
- f) Einwirkenlassen von Laserstrahlung auf das Werkstück (1) in Form eines Laserpulses als Einzelpuls oder in Form von Bursts dergestalt, dass der Laserpuls ein Filament (3) im Werkstück (1) erzeugt,
- g) Bewegen der Laserstrahlung relativ zum Werkstück (1) vorzugsweise entsprechend dem in Schritt b) festgelegten Verlauf, sowie
- h) Wiederholen der Schritte f) und g), so dass in der Filamentzone (2) Filamente (3) mit definiertem Start- und Endpunkt, bevorzugt Hohlräume, erzeugt werden, wobei die Lage und die Ausrichtung des Filamentstartpunkts hinsichtlich der Oberflächen (11) und (12) des Werkstücks (1) in Abhängigkeit des Bestimmens der Oberflächenkontur des Werkstücks (1) in Schritt e) erfolgt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Bestimmen der Oberflächenkontur durch konfokale optische Messung oder durch Lasertriangulation, Lichtschnittverfahren oder auch flächige interferometrische Verfahren erfolgt.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei in der Filamentzone (2) Filamente (3) in unterschiedlichen Höhenschnitten des Werkstücks (1) dergestalt erzeugt werden, dass die Filamente (3) in Richtung der einfallenden Laserstrahlung übereinander liegen.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Filamente (3), welche näher an der der Vorrichtung zur Erzeugung der Laserstrahlung abgewandten Oberfläche (12) des Werkstücks (1) liegen, zuerst erzeugt werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 oder 4, wobei der Startpunkt des zuerst erzeugten Filaments (3) der Endpunkt des später erzeugten Filaments (3) ist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Filamente (3) dergestalt ausgebildet sind, dass sie von der einen Oberfläche (11) bis zur gegenüberliegenden Oberfläche (12) des Werkstücks (1) reichen bzw. durchstoßen und somit eine Oberfläche mit Löchern erzeugen.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Filamente (3) als röhrenartige Hohlräume dergestalt ausgebildet sind, dass ihre Länge größer ist als ihr Durchmesser, und die Bereiche (14) des dielektrischen Materials innerhalb der Filamentzone (2), welche die Filamente (3) umgeben, zumindest teilweise eine größere Dichte aufweisen als die Bereiche (13), welche sich außerhalb der Filamentzone (2) befinden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei eine nichtlinear-optische Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Werkstück (1) dergestalt erfolgt, dass eine vollständige Plasmabildung und/oder Plasmaexplosion im Werkstück (1) erfolgt, so dass nach erfolgter Plasmabildung im Werkstück (1) ein Hohlraum vorliegt.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die Fokussiereinrichtung dergestalt eingestellt ist, dass während des Laserpulses die Laserstrahlung in Form eines Linienfokus fokussiert wird, wobei der Linienfokus gekennzeichnet ist durch einen Kanal hoher Lichtintensität, welcher eine Länge von 10 mm oder weniger sowie einen Durchmesser von 10 µm oder weniger aufweist.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Strahlformungseinrichtung eine Sammellinse und/oder ein Axicon und/oder ein diffraktives optisches Element und/oder ein optisches Gitter, bestehend aus kreisförmigen konzentrischen Linien, und/oder ein computergeneriertes Hologramm umfasst.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei der Laserstrahl von einem Roboter mit Hilfe von optischen Fasern und/oder Spiegelkombinationen so geführt wird, dass unter Beachtung der in Schritt e) ermittelten Oberflächenkontur des Werkstücks (1) mit einem Winkel zwischen 75 und 105°, bevorzugt mit einem Winkel von 90° auf die der La-

serstrahlung zugewandten Oberfläche (**11**) zugeführt wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei anhand der Bestimmung der Oberflächenkontur des Werkstücks (**1**) ein Flächenmodell des Werkstücks erhalten wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei nach Abschluss der Filamentation das Werkstück (**1**) als entlang der Filamentzone (**2**) geschwächtes Werkstück (**1**) vorliegt.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei ein Trenn- oder Cleaving-Schritt zur Erzeugung kleinster Risse zwischen den einzelnen Filamenten durchgeführt wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14, wobei der Trennschritt die Induktion thermomechanischer Spannungen entlang der Vorschädigungslinie zur Erzeugung eines Risses, bevorzugt durch Bestrahlung mit einem Infrarotlaser, bevorzugt ein CO<sub>2</sub>-Laser, beinhaltet.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei das Werkstück als Glas, bevorzugt als ein Aluminosilikat- oder Borsilikatglas, oder als Glaskeramik vorliegt.

17. Dielektrisches Werkstück (**4**) mit einer Dicke zwischen 0,5 und 20 mm, bei welchem diese Dicke räumlich variiert und/oder mindestens eine der das Werkstück begrenzenden Grenzflächen (**11**) und (**12**) mindestens eine Krümmung mit einem Krümmungsradius zwischen 0,1 µm bis 10 m aufweist, wobei mindestens eine Kante (**41**) des Werkstücks (**1**) eine Rauigkeit RMS von 1 bis 5 µm aufweist, bestimmt mittels Rauigkeitsmessung mit einem Rastertkraftmikroskop und/oder einem Weißlichtinterferometer, und wobei das Material des Werkstücks (**4**) an der Kante (**41**) sich hinsichtlich seiner Eigenschaften zumindest teilweise vom übrigen Bereich (**42**) des Werkstücks (**4**) unterscheidet, beispielsweise hinsichtlich des Phasengehalts, des Brechungsindex und/oder der Dichte.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

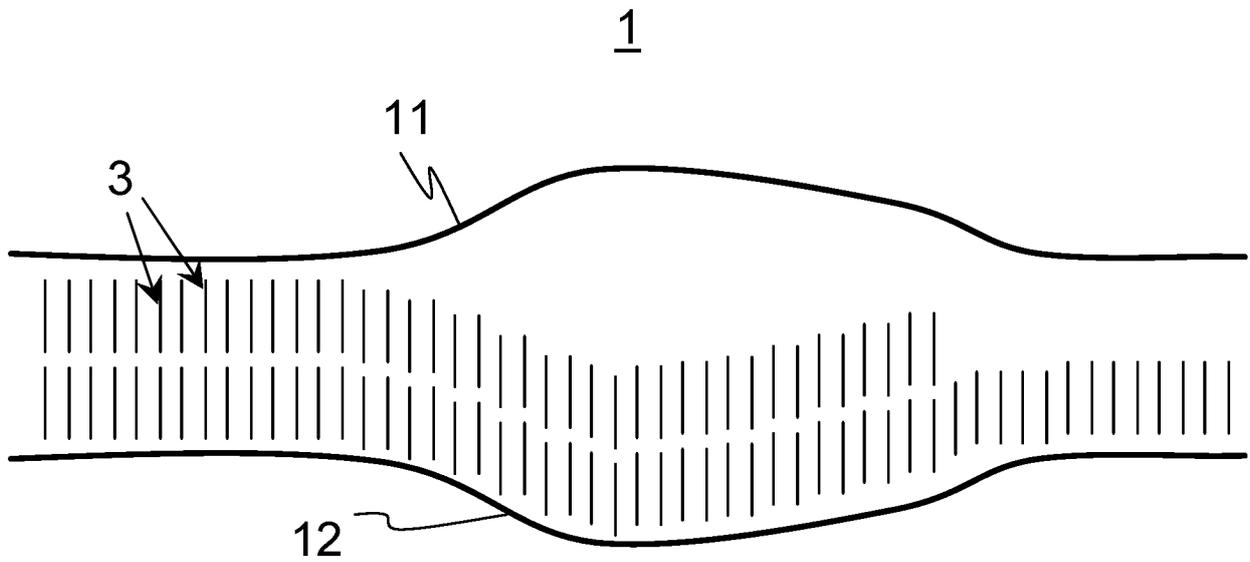


Fig. 1

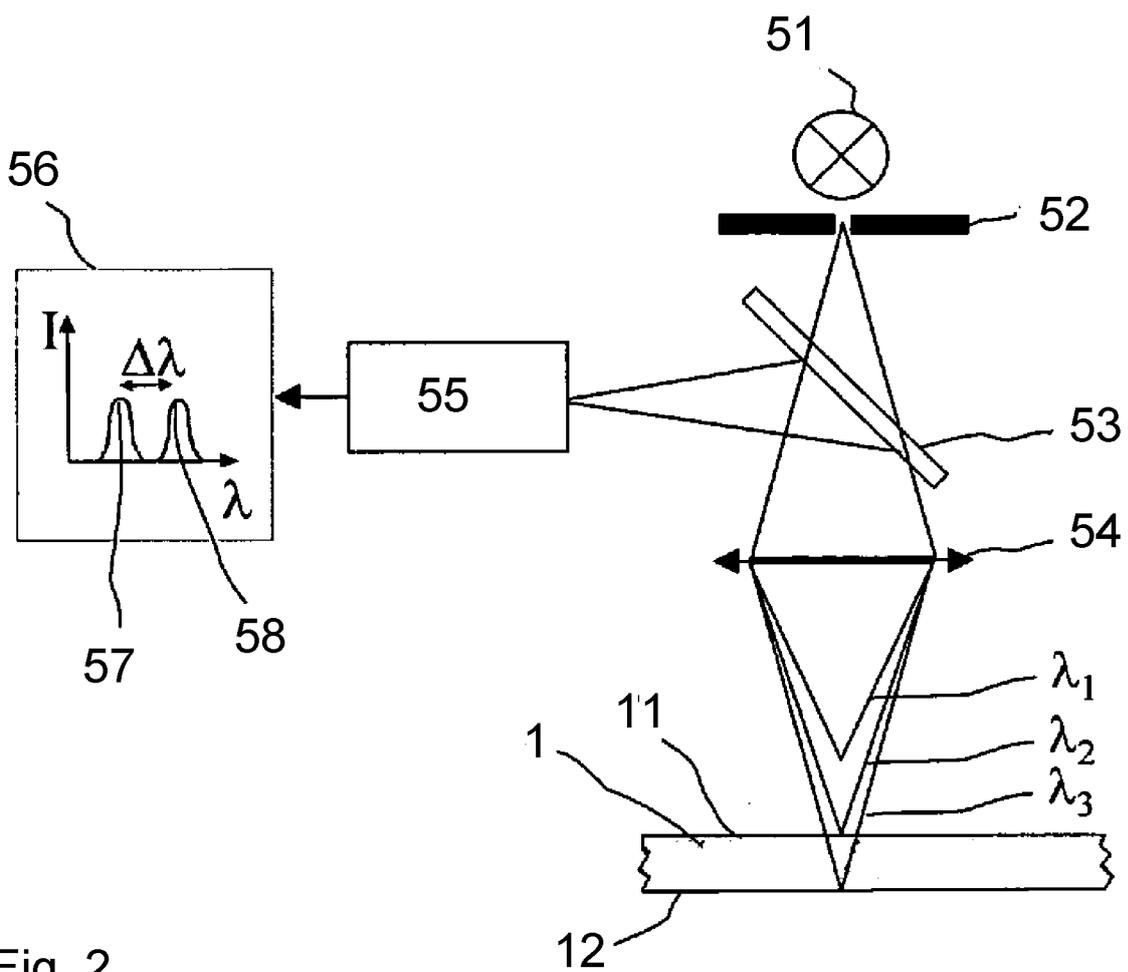


Fig. 2

