
Optische Sonde und Verfahren zur ihrer Herstellung

5

Gebiet der Erfindung

Die vorliegende Erfindung liegt auf dem Gebiet der optischen Kopplung zwischen optischen Komponenten und betrifft eine optische Sonde, die zur optischen Kopplung an mindestens
10 eine mikrooptische Komponente eingerichtet ist, und ein Verfahren zur ihrer Herstellung. Die optische Sonde kann insbesondere Anwendung finden bei Herstellung, Kalibrierung und Erprobung von mikrooptischen Komponenten, insbesondere in Nachrichtentechnik, Sensorik, medizinische Sensorik und Diagnostik; eine Anwendung der optischen Sonde in anderen Bereichen ist jedoch möglich.

15

Stand der Technik

Aus dem Stand der Technik sind optischen Sonden, die zur optischen Kopplung an mindestens eine mikrooptische Komponente eingerichtet sind, und Verfahren zur ihrer Herstellung
20 bekannt. Bei automatisierten Tests von mikrooptischen Komponenten, die einzeln, assembliert oder als Array in einem Wafer vorliegen können, erfolgt häufig eine optische Kopplung eines Sondenkopfs an mindestens eine mikrooptische Komponente, um so Aussagen über eine Funktionalität der mindestens einen mikrooptischen Komponente treffen zu können. Hierbei muss oftmals die optische Kopplung einer Vielzahl von optischen Koppelstellen mit
25 einem einzigen Sondenkopf oder zwei gesonderten Testköpfen erfolgen. Die optischen Koppelstellen können dabei innerhalb einer mikrooptischen Komponente oder über eine Vielzahl von mikrooptischen Komponente verteilt sein. Die mikrooptischen Komponenten sind oftmals Teil eines Wafers und sind häufig noch nicht vereinzelt, da eine Messung von mikrooptischen Komponenten, die Teil eines Wafers sind, effizienter, schneller und kostengünstiger durchführbar ist. Eine optische Facette ist daher oftmals nur durch eine Tiefätzung zugäng-
30 gänglich, welche eine typische Tiefe im Bereich von 25 μm bis 100 μm und eine Breite von typischerweise 50 μm bis 500 μm aufweist. Für die optische Kopplung sind daher oftmals mikrooptische Elemente, die Umlenkspiegel aufweisen, erforderlich, da anderenfalls die optischen Koppelstellen geometrisch nicht zugänglich sind.

35

M Trappen, M Blaicher, PI Dietrich, T Hoose, Y Xu, MR Billah, W Freude, C Koos, *3D-printed optics for wafer-scale probing*, 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), 2018, beschreibt gedruckte 3D-Mikrooptiken aus einer Kombinationen aus Umlenkspiegeln und Linsen, welche für eine Messung innerhalb von Tiefätzungen geeignet sind. Die gezeigten Strukturen können jedoch leicht durch unbeabsichtigt vorhandene Strukturen auf einem Wafer oder durch eine falsche Bedienung beschädigt werden.

Li et al., *Ultrathin monolithic 3D printed optical coherence tomography endoscopy for pre-clinical and clinical use*, Light: Science & Applications (2020) 9:124, beschreibt eine Vorrichtung, mittels welcher endoskopische Messungen in organischem Gewebe für medizinische Zwecke durchgeführt werden können. Ein 3D-gedruckter Spiegel rotiert dabei innerhalb einer Glaskanüle mit 457 μm Durchmesser. Die Vorrichtung erzeugt einen Modenfelddurchmesser mit einer Halbwertsbreite von 12,4 μm , das entspricht einen Modenfelddurchmesser von 21,8 μm bei $1/e^2$ Intensität. Weiterhin ist die Kanüle in Z-Richtung mindestens 1 mm ausgedehnt, dass sie nicht in einen oftmals weniger als 100 μm tiefen Ätzgraben passt. Weiterhin ist der Durchmesser der Kanüle mit 457 μm so groß, dass er nicht in einen Ätzgraben mit einer Breite von typischerweise 50 μm bis 250 μm passt. Diese Abmessungen lassen sich hier auch nicht wesentlich verringern, da die Glaskanüle eine endliche Wandstärke benötigt und gleichzeitig eine Einzelfaser mit einem Durchmesser von 125 μm aufnehmen muss. Weiterhin ist es für industrielle Herstellungsprozesse nicht akzeptabel, Fasern in Kanülen einzuführen, da hierbei mikrooptische Komponenten leicht beschädigt wird. Weiterhin ist Lithographie auf einer Einzelfaser sehr komplex.

US 7,183,759 B1 offenbart einen Sondenkopf für eine optische Kopplung mittels Gitterkopplern zu mikrooptischen Komponenten auf einer Oberfläche eines Wafers. Gitterkoppler sind jedoch dafür bekannt, eine optische Leistungsfähigkeit von mikrooptischen Komponenten zu verringern, da sie während deren Betrieb unerwünscht Licht auskoppeln können. Der darin offenbarte kapazitive Sensor ist jedoch nicht in der Lage kleine, typischerweise 1 μm bis 500 μm große Objekte nachzuweisen. Zudem ist der kapazitive Sensor schwer und teuer, und eine Ausrichtung des kapazitiven Sensors in Bezug auf eine Sonde ist komplex.

US 2022/0163583A1 offenbart eine optische Sonde, die zur optischen Kopplung an mindestens eine mikrooptische Komponente eingerichtet ist, wobei die optische Sonde einen Sondenkopf und mindestens ein mikrooptisches Element umfasst, das eine mechanische Verbindung mit dem Sondenkopf aufweist, das sowohl dazu eingerichtet ist, eine optische Kopplung an die mindestens eine mikrooptische Komponente herzustellen als auch ein Sensorsignal zu erzeugen, das eine Positionierung des Sondenkopfs relativ zu einem Objekt anzeigt.

DE 10 2017 221 952 B3 offenbart ein mikro-optomechanisches System und ein Verfahren zu seiner Herstellung. Das mikro-optomechanische System umfasst- mindestens ein optisches Subsystem, welches zu einer Abstrahlung mindestens eines optischen Aktorsignals und zu einem Empfang mindestens eines optischen Sensorsignals eingerichtet ist; und- mindestens eine optomechanische Struktur, welche mittels eines direktschreibenden Mikrostrukturierungsverfahrens in direktem Kontakt mit dem optischen Subsystem herstellbar ist, wobei das optische Subsystem mindestens ein optisches Aktorelement und mindestens ein optisches Sensorelement umfasst, wobei das optische Aktorsignal in Wechselwirkung mit dem optischen Aktorelement zu einer Änderung eines mechanischen Zustands der optomechanischen Struktur eingerichtet ist, und wobei das optische Sensorsignal in Wechselwirkung mit dem optischen Sensorelement zu einer Erfassung der Änderung des mechanischen Zustands der optomechanischen Struktur oder einer damit in Beziehung stehenden Größe eingerichtet ist.

15

DE 602 03 037 T2 und EP 1 329 752 A1 offenbaren ein Endstück für einen optischen Wellenleiter. In einer besonderen Ausführungsart kann eine Anordnung verwendet werden, die einen Sensor zum Erkennen einer deutlichen Ausrichtung zwischen Lichtwellenleiter und optischem Pfad enthält.

20

Aufgabe der Erfindung

Ausgehend hiervon, besteht die Aufgabe der vorliegenden Erfindung darin, eine optische Sonde und ein Verfahren ihrer zur Herstellung der optischen Sonde bereitzustellen, welche die aufgeführten Nachteile und Einschränkungen des Standes der Technik zumindest teilweise überwinden.

Wie oben erwähnt, ist es beim Koppeln des mindestens einen Sondenkopfs mit den optischen Koppelstellen oftmals erforderlich, den mindestens einen Sondenkopf innerhalb der Tiefätzung zu bewegen, in die Tiefätzung oder aus der Tiefätzung zu führen und außerhalb der Tiefätzung zu bewegen. Hierbei sollte ein Kontakt oder eine Kollision der mikrooptischen Elemente mit einem Objekt, insbesondere mindestens einer Wand der Tiefätzung oder mindestens einer anderen Komponente, darunter ein Teil des Wafers oder unbeabsichtigt auf dem Wafer vorhandener Dreck, Ätزرückstände oder Resistreste, vermieden werden. Insbesondere sollte hierbei auch ein Nachweis einer Bewegung des mindestens einen Sondenkopfs in zumindest einem Teilbereich oberhalb des Wafers möglich sein, da dieser Bereich kritisch für eine Kollision ist. Hierbei sollte insbesondere sichergestellt werden, dass

30

35

- eine Beschädigung der mikrooptischen Elemente durch falsche Programmierung der Bewegung oder falscher manueller Bewegung des mindestens einen Sondenkopfs, die zu einer Kollision führen kann, unterbleibt. Insbesondere sollte möglichst verlässlich sichergestellt werden, dass der mindestens eine Sondenkopf und die mikrooptischen Elemente sich in ihrer
- 5 Leistungsfähigkeit während einer Messung nicht in einer für die Messung relevanten Art und Weise verändern. Weiterhin sollten typischerweise möglichst gleichzeitig eine Vielzahl von, bevorzugt mindestens 1000, Messungen an einer Vielzahl von, bevorzugt mindestens 1000, optischen Koppelstellen an einer Vielzahl von, bevorzugt mindestens 1000, mikrooptischen Komponenten durchgeführt werden.
- 10 Weiterhin sollte es möglich sein, die mikrooptischen Elemente bis auf wenige Mikrometer, insbesondere 1 μm bis 100 μm , an mindestens eine mikrooptische Komponente oder eine ihrer optischen Koppelstellen anzunähern, ohne dass hierbei ein Kontakt oder eine Kollision der mindestens einen mikrooptischen Komponente mit der mindestens einen optischen Koppelstelle oder der optischen Facette erfolgen kann.
- 15 Weiterhin sollte es möglich sein, mittels der optischen Sonde 1 μm bis 500 μm große Objekte nachzuweisen und das mindestens eine mikrooptische Element vor einer Kollision mit dem Wafer zu schützen. Hierbei wäre es wünschenswert, wenn die optische Sonde eine
- 20 Nachweisgenauigkeit von besser als 100 μm , bevorzugt besser als 50 μm , ganz besonders bevorzugt besser als 10 μm , erreichen könnte.
- Weiterhin sollte es möglich sein, dass das mindestens eine mikrooptische Element Licht effizient und reproduzierbar zwischen dem Sondenkopf und der mindestens einen mikrooptischen Komponente koppeln könnte. Hierbei wäre es wünschenswert, wenn das mindestens
- 25 eine mikrooptische Element insbesondere bei einer Wellenlänge von 250 nm bis 4000 nm, bevorzugt bei 1250 nm bis 1650 nm, einen Fokus mit einem Modenfelddurchmesser der zweifachen Wellenlänge (z.B. 3 μm bei 1500 nm) oder weniger erzeugen könnte.
- 30 Weiterhin sollen Strukturen, die eine optische Funktionalität aufweisen, nicht in Kontakt mit dem Wafer oder einer optischen Komponente treten, da sie ansonsten leicht beschädigt werden können oder Unklarheiten über einen Zustand der Strukturen mit optischer Funktionalität auftreten können.
- 35 Es soll weiterhin möglich sein, die optische Sonde in Bezug auf die mikrooptische Komponente in mindestens einer Dimension, bevorzugt in drei Raumdimensionen, ganz besonders

bevorzugt in allen sechs translatorischen Freiheitsgraden, auszurichten. Dabei soll eine Ausrichtgenauigkeit bevorzugt von 50 µm, besonders bevorzugt 25 µm, insbesondere von 10 µm, erreicht werden können.

- 5 Die optische Sonde soll möglichst leicht sein, insbesondere um eine schnelle Messroutine zu ermöglichen. Die optische Sonde soll in einem automatisierbaren und reproduzierbaren Herstellungsverfahren herstellbar sein.

Offenbarung der Erfindung

10

Diese Aufgabe wird durch eine optische Sonde und ein Verfahren zur ihrer Herstellung mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen, welche einzeln oder in beliebiger Kombination realisierbar sind, sind in der nachfolgenden Beschreibung und in den abhängigen Ansprüchen dargestellt.

15

In einem ersten Aspekt betrifft die vorliegende Erfindung eine optische Sonde, die zur optischen Kopplung an mindestens eine mikrooptische Komponente eingerichtet ist. Die vorliegende optische Sonde umfasst mindestens:

- einen Sondenkopf;
- 20 – mindestens ein mikrooptisches Element, das eine mechanische Verbindung mit dem Sondenkopf aufweist, und das dazu eingerichtet ist, eine optische Kopplung an die mindestens eine mikrooptische Komponente herzustellen; und
- mindestens eine von dem mindestens einen mikrooptischen Element gesonderte Sensorstruktur, die dazu eingerichtet ist, ein Sensorsignal zu erzeugen, das eine
- 25 Positionierung des Sondenkopfs relativ zu einem Objekt anzeigt.

Der Begriff „optisch“ bezieht sich hierbei auf eine Wellenlänge im elektromagnetischen Spektrum, das einen Wellenlängenbereich von 1 nm bis 1000 µm umfasst, d.h. sowohl den sichtbaren Spektralbereich von 380 nm bis 760 nm, den hieran angrenzenden ultravioletten

30 Spektralbereich von 1 nm bis unterhalb von 380 nm, als auch den ebenfalls angrenzenden infraroten Spektralbereich oberhalb von 760 nm bis 1000 µm; vorzugsweise von 250 nm bis 5 µm; besonders bevorzugt von 350 nm bis 4 µm; insbesondere von 530 nm bis 1650 nm.

Der Begriff der „optischen Sonde“ bezeichnet hierbei eine Einrichtung, die zur optischen

35 Kopplung an mindestens eine optische Komponente, vorzugsweise an mindestens eine mikrooptische Komponente, eingerichtet ist. Hierbei bezeichnet der Begriff der „optischen Kopplung“ eine Übertragung einer optischen Wellenlänge, die auch als „Licht“ bezeichnet wird, zwischen zwei optische Komponente. Bei Verwendung der vorliegenden optischen

Sonde kann Licht vom Sondenkopf zu der mindestens einen mikrooptischen Komponente und/oder als auch von der mindestens einen mikrooptischen Komponente zu dem Sondenkopf übertragen werden, wobei die Übertragung des Lichts vom Sondenkopf zu der mindestens einen mikrooptischen Komponente oder von der mindestens einen mikrooptischen Komponente zu dem Sondenkopf zeitlich nacheinander oder gleichzeitig erfolgen kann.

Der Begriff der „mikrooptischen Komponente“ bezeichnet hierbei ein mikrooptisches Element, das während seiner bestimmungsgemäßen Anwendung Licht prozessiert, insbesondere leitet, erzeugt, empfängt, verändert, reflektiert, verstärkt und/oder interferiert. Typischerweise handelt es sich bei der mikrooptischen Komponente um ein optisches Element, das zu untersuchen ist, d.h. das zu erforschende oder zu kontrollierende Eigenschaften hat, das getestet wird oder temporär betrieben werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Erfindung kann ein als photonischer integrierter Schaltkreis (engl. *Photonic Integrated Circuit*, kurz *PIC*), der insbesondere auf einem Wafer angeordnet sein kann, bevorzugt als mikrooptische Komponente dienen.

In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung kann die mikrooptischen Komponente mindestens einen Lichtwellenleiter aufweisen. Der Begriff des „Lichtwellenleiters“ bezeichnet hierbei eine mikrooptische Struktur, die dazu eingerichtet ist, Licht transversal zu seiner Ausbreitungsrichtung einzuschränken, vorzugsweise derart, dass transversal zur Ausbreitungsrichtung für jede Polarisationsrichtung nur eine einzige transversale Mode ausgeprägt werden kann. In weiteren, besonders bevorzugten Ausgestaltungen kann die mikrooptische Komponente mindestens einen Laser, mindestens einen Modulator, mindestens einen Detektor oder mindestens einen optischen Verstärker umfassen, der insbesondere Teil eines photonischer integrierter Schaltkreis sein kann. Eine Verwendung einer anderen mikrooptischen Komponente ist jedoch möglich.

Wie bereits erwähnt, umfasst die vorliegende optische Sonde mindestens ein mikrooptisches Element, das dazu eingerichtet ist, die erfindungsgemäß gewünschte optische Kopplung an die mindestens eine mikrooptische Komponente herzustellen. Der Begriff des „mikrooptischen Elements“ bezeichnet hierin eine optische Komponente, die dazu eingerichtet ist, eine Übertragung von Licht von dem Sondenkopf zu der mindestens einen mikrooptischen Komponente oder von der mindestens einen mikrooptischen Komponente zu dem Sondenkopf zeitlich nacheinander oder gleichzeitig zu ermöglichen. Hierin bezeichnet der Begriff „mikrooptisch“ eine Struktur, die einer Ausdehnung von höchstens 1 mm, bevorzugt von höchstens 500 µm, besonders bevorzugt von höchstens 250 µm in alle drei Raumrichtungen aufweist.

- Wie weiterhin bereits erwähnt, weist das mindestens eine mikrooptische Element eine mechanische Verbindung mit einem Sondenkopf auf. Der Begriff des „Sondenkopfs“ bezeichnet hierbei einen Teil der optischen Sonde, der dazu eingerichtet ist, das mindestens eine mikrooptische Element anzusteuern, zu bewegen und eine Antwort von dem mindestens einen mikrooptischen Element aufzunehmen. Hierzu kann der Sondenkopf über eine Vielzahl von mechanischen, elektrischen oder optischen Komponenten verfügen. In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung kann der Sondenkopf mindestens ein Aktorelement aufweisen, das bevorzugt derart eingerichtet ist, dass der Sondenkopf und damit das mit dem Sondenkopf mechanisch verbundene mindestens eine mikrooptische Element in mindestens drei Freiheitsgraden, insbesondere in mindestens einem rotatorischen Freiheitsgraden und in mindestens zwei translatorischen Freiheitsgraden, bewegbar ist. Weitere Funktionen des Sondenkopfs sind jedoch denkbar. In einer besonderen Ausgestaltung kann die optische Sonde mindestens einen weiteren Sondenkopf umfassen, der gleichzeitig mit dem Sondenkopf zu der mindestens einen mikrooptischen Komponente gekoppelt wird. Dadurch kann insbesondere eine Erhöhung einer Kopplungseffizienz bei einer gleichzeitigen Übertragung von Licht von dem Sondenkopf zu der mindestens einen mikrooptischen Komponente und von der mindestens einen mikrooptischen Komponente zu dem weiteren Sondenkopf erfolgen. Andere Anwendungen sind jedoch denkbar.
- In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung kann der Sondenkopf mindestens eine optische Faser oder ein Array aus optischen Fasern umfassen. Der Begriff der „optischen Faser“ bezeichnet hierbei eine vorzugsweise aus Glas hergestellte längliche Struktur, welche einen Faserkern aufweist, der einen höheren Brechungsindex als der den Faserkern umgebenden Teil der Faser aufweist, wodurch sich Licht in dem Faserkern, vorzugsweise einmodig, führen lässt. Diese mindestens eine optische Faser kann bevorzugt ein- oder multimodig sein. Zusätzlich kann der Sondenkopf mindestens eine weitere optische oder optoelektronische Komponente aufweisen, insbesondere ausgewählt aus einem Laser, Photodetektor, Spiegel, optischen Linse, photonisch integrierten Schaltkreis, Spotsize-Konverter, Element zum Ionenaustausch wie z.B. ioNext, oder Wellenleiterbauelement, das vorzugsweise mittels eines laminierten Verfahrens oder durch Laserbearbeitung erzeugt wurde. Eine Verwendung einer anderen optischen oder optoelektronischen Komponente ist jedoch denkbar.

- Wie weiterhin bereits erwähnt, umfasst die vorliegende optische Sonde mindestens eine von dem mindestens einen mikrooptischen Element gesonderte Sensorstruktur, die dazu eingerichtet ist, ein Sensorsignal zu erzeugen, das eine Positionierung des Sondenkopfs relativ zu einem Objekt anzeigt. Wie unten näher erläutert, kann die mindestens eine Sensorstruktur in einer besonders bevorzugten Ausgestaltung mittels eines direktschreibenden Verfahrens her-

- gestellt werden. Der Begriff „gesondert“ betont den Umstand, dass es sich bei der mindestens eine Sensorstruktur und dem mindestens einen mikrooptischen Element weder um dasselbe Element noch um ein einstückig ausgeformtes Element handelt, sondern vielmehr um mindestens zwei voneinander verschiedene Elemente. Dies ist unabhängig davon, ob das
- 5 mindestens eine mikrooptische Element und die mindestens eine Sensorstruktur einzeln oder gemeinsam, insbesondere mittels eines direktanschreibenden Verfahrens, hergestellt werden und ob hierzu sowohl das mindestens eine mikrooptische Element als auch die mindestens eine Sensorstruktur mindestens ein fotohärtendes Material umfassen.
- 10 In einer besonderen Ausgestaltung kann die optische Sonde mindestens zwei Sondenköpfe aufweisen, wobei jeder Sondenkopf mindestens ein mikrooptisches Element und mindestens eine davon gesonderte Sensorstruktur aufweisen. Für Einzelheiten wird auf die untenstehenden Ausführungsbeispiele verwiesen.
- 15 Mittels der mindestens einen Sensorstruktur kann die optische Sonde insbesondere dazu eingerichtet sein, einen Kontakt oder eine Kollision des mindestens einen mikrooptischen Elements mit einem Objekt zu vermeiden. Hierbei bezeichnen die Begriffe „Kontakt“ oder „Kollision“ eine unbeabsichtigte Berührung des mindestens einen mikrooptischen Elements mit einem Objekt. Weiterhin bezeichnet der Begriff des „Objekts“ ein Gegenstand oder einen Teil, insbesondere eine Struktur oder eine Fläche, des Gegenstands, der das mindestens
- 20 eine mikrooptische Element umgibt und sich innerhalb einer Reichweite des Sondenkopfs, insbesondere innerhalb einer Reichweite des mindestens einen, von dem Sondenkopf umfassten Aktorelements, befindet. Bei dem Objekt kann es sich insbesondere um eine Verdreckung, einen nicht geätzten Rest einer Tiefätzung, Lackreste, ein Ende eines Ätzgrabens, Reste von elektrischen Kontakten, einen Teilbereich der mindestens einen mikrooptischen
- 25 Komponente, insbesondere eine Oberfläche, eine Seitenwand, eine Facette oder eine Kante der mindestens einen mikrooptischen Komponente, oder einen Teilbereich eines Wafers handeln, auf dem die mindestens eine mikrooptische Komponente angeordnet ist. Hierbei bezeichnet der Begriff der „Facette“ bezeichnet eine Fläche, die von Licht durchdrungen wird und/oder innerhalb einer Koppelstelle liegt und/oder einen Winkel von weniger als 80° zu einer solchen Fläche aufweist. Weitere Arten von Objekten, mit denen ein Kontakt oder eine Kollision des mindestens einen mikrooptischen Elements vermieden werden soll, sind denkbar.
- 30
- 35 In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung kann das Sensorsignal als Funktion eines Abstandes des Sondenkopfs zu dem Objekt erzeugt werden. Hierbei kann eine berührungslose optische Abstandsmessung, bevorzugt eine Laufzeitmessung oder eine interferometrische

Messung, verwendet werden. Alternativ oder zusätzlich kann das Sensorsignal durch Verbiegen eines Teils des Sondenkopfs erzeugt werden, wobei das Sensorsignal bevorzugt mittels eines Kraftsensors gemessen werden kann. Hierbei kann bevorzugt eine Sensitivität von 10 mN, besonders bevorzugt von 1 mN, insbesondere von 100 nN erzielt werden. In einer besonderen Ausgestaltung kann die Sensorstruktur zusätzlich dazu eingerichtet sein, ein weiteres Sensorsignal zu erzeugen, das eine Positionierung des Sondenkopfs relativ zu der mindestens einen mikrooptischen Komponente anzeigt. Hierzu kann die mindestens eine Sensorstruktur als Näherungssensor, der dazu eingerichtet ist, einen Abstand zu dem mindestens einen mikrooptischen Element oder einem Teilbereich davon zu messen, ausgestaltet sein. In einer besonderen Ausgestaltung kann dadurch ein Kalibrationssignal erzeugt werden, indem sich der Sondenkopf solange dem mindestens einen mikrooptischen Element nähert, bis die mindestens eine Sensorstruktur ein Sensorsignal anzeigt.

Alternativ oder zusätzlich kann das Sensorsignal einen Kontakt des mindestens einen mikrooptischen Elements mit dem Objekt anzeigen. Hierbei kann durch einen Kontakt der mindestens einen Sensorstruktur mit dem Objekt ein Verbiegen eines Teils des Sondenkopfs bewirkt werden. Weiter alternativ oder zusätzlich kann das Sensorsignal dazu eingerichtet sein, eine Bewegung des Sondenkopfs anzuhalten oder umzukehren und anschließend in eine von dem Objekt beabstandete Position zu überführen, insbesondere um eine Beschädigung des mindestens einen mikrooptischen Elements oder eines Teilbereichs davon zu vermeiden. In einer besonderen Ausgestaltung kann eine Deformation der mindestens einen Sensorstruktur erfolgen und hierdurch direkt und/oder mittels eines Kraftsensors ein Sensorsignal erzeugt werden, welches dazu eingesetzt werden kann, um einen Kontakt oder eine Kollision des mindestens einen mikrooptischen Elements mit einem Objekt zu verhindern.

Die mindestens eine Sensorstruktur kann insbesondere ausgewählt sein aus einem optomechanischen Element, einem optischen Element oder einem mechanischen Element. Während sich der Begriff des „mechanischen Element“ auf eine Komponente bezieht, die auf mechanische Weise funktioniert, und der Begriff des „optischen Elements“ eine Komponente bezeichnet, die auf optische Weise funktioniert, zeigt der Begriff „optomechanisch“ an, dass zur Funktionsfähigkeit sowohl ein mechanischer als auch ein optischer Aspekt erforderlich ist. In einer bevorzugten Ausgestaltung kann die mindestens eine Sensorstruktur als optomechanisches Element basierend auf der Offenbarung der DE 10 2017 221 952 B3 ausgeführt sein. Hierdurch lässt sich eine Genauigkeit der Positionierung von 0,1 nm bis 10 nm, insbesondere von 0,5 nm bis 5 nm, erzielen.

Die mindestens eine Sensorstruktur kann vorzugsweise eine geringe Masse aufweisen, damit der Sondenkopf mit höherer Beschleunigung bewegbar ist, insbesondere um auf diese Weise

eine möglichst hohe Dynamik des Nachweises der Bewegung des Sondenkopfs zu ermöglichen. In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung kann die mindestens eine Sensorstruktur eine Masse von höchstens 1 mg, bevorzugt von höchstens 1 µg, besonders bevorzugt von höchstens 100 ng, aufweisen.

5

Die mindestens eine Sensorstruktur kann insbesondere sehr klein sein, wodurch der Sondenkopf eine geringe Größe aufweisen kann und sich dadurch weitere Anwendungen ergeben können. Bevorzugt kann die mindestens eine Sensorstruktur eine Größe von höchstens 300 µm, besonders bevorzugt von höchstens 200 µm, insbesondere von höchstens 100 µm aufweisen.

10

In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung kann die mindestens eine Sensorstruktur sehr präzise zum Sondenkopf und oder dem mindestens einen mikrooptischen Element ausgerichtet sein, insbesondere da diese in einem Arbeitsschritt hergestellt wurden. Die Ausrichtgenauigkeit kann bevorzugt 10 µm, besonders bevorzugt 5 µm, insbesondere 1 µm betragen.

15

Die mindestens eine Sensorstruktur kann besonders bevorzugt dazu eingerichtet sein, um eine möglichst hohe Genauigkeit der Positionierung der mindestens einen Sensorstruktur in Bezug auf das Objekt zu erzielen. In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung kann die Genauigkeit der Positionierung der mindestens einen Sensorstruktur in Bezug auf das Objekt höchstens 500 µm, besonders bevorzugt höchstens 20 µm, insbesondere höchstens 1 µm, betragen.

20

In einer bevorzugten Ausgestaltung kann das mindestens einen mikrooptische Element sowohl mindestens eine reflektierende Fläche als auch mindestens eine refraktive Fläche, insbesondere eine Linse, aufweisen. In dieser Ausgestaltung kann das mindestens einen mikrooptische Element bevorzugt einen Modenfelddurchmesser erzeugen, der von einem doppelten Wert bis zu einem zehnfachen Wert der verwendeten Wellenlänge annehmen kann, wobei für die Wellenlänge ein Wert von 350 nm bis einschl. 4 µm gewählt werden kann. Der Begriff des „Modenfelddurchmessers“ bezeichnet bei einer annähernd gaußförmigen Intensitätsverteilung einen Durchmesser einer von einer Linie gleicher Intensität bei $1/e^2$ (etwa 13,5 %) der maximalen Intensität der Lichtverteilung an einer optischen Koppelstelle erzeugten Kreises oder Halbachsen der entsprechenden Ellipse bei einem elliptischen Modenfeldes. Bevorzugt kann der Modenfelddurchmesser an einer Strahltaile festgelegt werden; hierfür kann bevorzugt eine Ebene entlang einer Ausbreitungsrichtung eines Strahls, in dem die Wellenfronten im wesentlichen eben sind und der Modenfelddurchmesser minimal ist, verwendet werden. Bei nicht-gaußförmigen Modenfeldern wird der Modenfelddurchmesser

25

30

35

durch das Moment zweiter Ordnung, insbesondere der Standardabweichung, der Intensitätsverteilung festgelegt. Hierzu wird das Vierfache des Momentums zweiter Ordnung verwendet, was bei gaußförmigen Modenfeldern dem $1/e^2$ -Durchmesser entspricht.

- 5 In einem weiteren Aspekt betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Herstellung einer optischen Sonde, insbesondere der oben oder unten näher beschriebenen optischen Sonde, die zur optischen Kopplung an mindestens eine mikrooptische Komponente eingerichtet ist. Das vorliegende Verfahren umfasst die folgenden Schritte, welche vorzugsweise in der angegebenen Reihenfolge, beginnend mit Schritt a) und endend mit Schritt c), durchgeführt werden, wobei ein oder mehrere, insbesondere aufeinanderfolgende Schritte, auch
- 10 zumindest teilweise gleichzeitig ausgeführt werden können:
- a) Bereitstellen eines Sondenkopfs;
 - b) Bereitstellen mindestens eines mikrooptischen Elements, das eine mechanische Verbindung mit dem Sondenkopf aufweist, und das dazu eingerichtet ist, eine optische
 - 15 Kopplung an die mindestens eine mikrooptische Komponente herzustellen; und
 - c) Erzeugen mindestens einer von dem mindestens einen mikrooptischen Element gesonderten Sensorstruktur, die dazu eingerichtet ist, ein Sensorsignal zu erzeugen, das eine Positionierung des Sondenkopfs relativ zu einem Objekt anzeigt.
- 20 In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung kann ein direktschreibendes optisches Lithographieverfahren zum Erzeugen der mindestens einen Sensorstruktur gemäß Schritt c) verwendet werden. Zusätzlich kann auch das mindestens eine mikrooptische Element gemäß Schritt b) ebenfalls mittels des direktschreibenden Verfahrens hergestellt werden. Besonders bevorzugt ist es hierbei, wenn sowohl das mindestens eine mikrooptische Element als auch
- 25 die mindestens eine Sensorstruktur gemeinsam mittels des direktschreibenden Verfahrens hergestellt werden, besonders bevorzugt in einem Arbeitsschritt. Der Begriff „in einem Arbeitsschritt“ bedeutet insbesondere, dass die betreffenden Komponenten sich in einem Koordinatensystem oder einer numerischen Translation, Rotation oder affinen Abbildung zueinander befinden oder unmittelbar nacheinander hergestellt werden. Durch die gemeinsame
- 30 Herstellung sowohl des mindestens einen mikrooptischen Elements als auch der mindestens einen Sensorstruktur in einen einzigen Herstellungsschritt sind das mindestens eine mikrooptische Element und die mindestens eine Sensorstruktur sehr genau sowohl zu dem Sondenkopf als auch zueinander ausgerichtet. Hierbei kann eine Genauigkeit der Ausrichtung von mindestens 1 μm , bevorzugt von 100 nm erreicht werden.
- 35 Erfindungsgemäß umfassen die mindestens eine Sensorstruktur und/oder das mindestens eine mikrooptische Element ein fotohärtendes Material, insbesondere ein Acrylat, vorzugs-

weise die mindestens eine Sensorstruktur. In einer bevorzugten Ausgestaltung können hierbei sowohl das mindestens eine mikrooptische Element als auch die mindestens eine Sensorstruktur in einem Verfahrensschritt *in-situ* an der Facette mittels eines direktschreibenden Lithographieverfahren hergestellt werden. Dazu kann bevorzugt ein flüssiges Acrylat polymerisiert werden, wozu bevorzugt eine Zwei- oder Mehrphotonenpolymerisation verwendet werden kann.

In einer besonderen Ausgestaltung kann der Sondenkopf relativ zu einem Objektiv, insbesondere einem Lithographie-Objektiv, fixiert werden. Das Objektiv ermöglicht einen Nachweis mindestens einer optischen Koppelstelle, insbesondere indem Licht aus der mindestens einen optischen Koppelstelle in das Objektiv oder aus dem Objektiv in die mindestens eine optische Koppelstelle gekoppelt wird, innerhalb des Sondenkopfs reflektiert und wieder in das Objektiv gekoppelt wird. Alternativ oder zusätzlich kann mindestens ein Marker, der relativ zu der mindestens einen optischen Koppelstelle ausgerichtet ist, oder mindestens ein mikrooptisches Element, oder ein optisch sichtbares Merkmal der mindestens einen optischen Koppelstelle, oder ein optisch sichtbares Merkmal des Sondenkopfs oder eine weitere optische Koppelstelle des Sondenkopfs nachgewiesen werden. Anschließend kann die mindestens eine Sensorstruktur mittels eines direktschreibenden Verfahrens hergestellt werden. Hierzu kann ein additives Lithographieverfahren oder ein subtraktives Lithographieverfahren verwendet werden. Gleichzeitig hierzu oder hieran anschließend kann das mindestens eine mikrooptische Element hergestellt werden.

In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung kann eine Polymerisation eines Mehrphotonenprozesses dazu verwendet werden, um die mindestens eine Sensorstruktur in Kontakt mit dem Sondenkopf herzustellen. Hierzu wird zunächst der Sondenkopf relativ zu einem Objektiv lokalisiert. Der Begriff des „Lokalisierens“ bezeichnet eine Feststellung der Lage einer Komponente relativ zu einer weiteren Komponente im Raum. Hierzu lassen sich bevorzugt kamerabasierte, konfokale oder Fluoreszenzmikroskopische Verfahren verwenden. Ein sich in Kontakt mit dem Sondenkopf befindliches lichthärtendes Material, das flüssig oder gelförmig oder fest sein kann, wird mittels eines Lasers, der vorzugsweise kurze Pulse von 50 fs bis 1000 fs erzeugen kann, ausgehärtet. Der Laser kann hierzu in das lichthärtende Material, bevorzugt mittels eines Immersionsobjektivs, fokussiert werden. Der Fokuspunkt kann hieran anschließend relativ zu dem Sondenkopf auf einer vorprogrammierten Trajektorie derart bewegt werden, dass die mindestens eine Sensorstruktur aushärtet. Hierbei handelt es sich bevorzugt um eine Polymerisation eines Acrylat-basierten Photoresists. Der Begriff „lichthärtend“ bedeutet hierbei, dass mittels Bestrahlung durch Licht eine Erhöhung einer Viskosität oder Härte eines Materials auftritt, wobei insbesondere ein Material, das flüssig oder gelförmig oder fest sein kann, fest wird.

Für weitere Einzelheiten in Bezug auf das vorliegende Verfahren wird auf die Beschreibung der optischen Sonde verwiesen.

- 5 Die vorliegende Erfindung kann insbesondere bei der Herstellung und Erprobung von mikrooptischen Komponenten für die Nachrichtentechnik, Sensorik, medizinische Sensorik und Diagnostik verwendet werden. Andere Anwendungen sind jedoch denkbar.

Vorteile der Erfindung

10

- Die vorliegende Erfindung weist eine Reihe von Vorteilen gegenüber den aus dem Stand der Technik bekannten optischen Sonden zur optischen Kopplung an mindestens eine mikrooptische Komponente auf. Insbesondere kann im Falle, dass sich der mindestens eine Sondenkopf innerhalb oder außerhalb einer Tiefätzung bewegt, in die Tiefätzung oder aus der Tiefätzung geführt wird, ein Kontakt oder eine Kollision der mikrooptischen Elemente mit einem Objekt, insbesondere mindestens einer Wand der Tiefätzung oder mindestens einer anderen Komponente, darunter ein Teil des Wafers oder unbeabsichtigt auf dem Wafer vorhandener Dreck, Ätzrückstände oder Resistreste, vermieden werden. Insbesondere ist hierbei auch ein Nachweis einer Bewegung des mindestens einen Sondenkopfs in zumindest einem Teilbereich oberhalb des Wafers möglich. Hierbei ist insbesondere sichergestellt, dass eine Beschädigung der mikrooptischen Elemente durch falsche Programmierung der Bewegung oder falscher manueller Bewegung des mindestens einen Sondenkopfs, die zu einer Kollision führen kann, unterbleibt. Insbesondere ist verlässlich sichergestellt, dass der mindestens eine Sondenkopf und die mikrooptischen Elemente sich in ihrer Leistungsfähigkeit während einer Messung nicht in einer für die Messung relevanten Art und Weise verändern. Weiterhin können gleichzeitig eine Vielzahl von, bevorzugt mindestens 1000, Messungen an einer Vielzahl von, bevorzugt mindestens 1000, optischen Koppelstellen an einer Vielzahl von, bevorzugt mindestens 1000, mikrooptischen Komponenten durchgeführt werden.

- 30 Weiterhin können sich die mikrooptischen Elemente bis auf wenige Mikrometer, insbesondere 5 μm bis 100 μm , an mindestens eine mikrooptische Komponente oder eine ihrer optischen Koppelstellen annähern, ohne dass hierbei ein Kontakt oder eine Kollision der mindestens einen mikrooptischen Komponente mit der mindestens einen optischen Koppelstelle oder der optischen Facette erfolgen kann. Weiterhin können mittels der optischen Sonde 1 μm bis 500 μm große Objekte nachgewiesen und das mindestens eine mikrooptische Element vor einer Kollision mit dem Wafer geschützt werden. Hierbei kann die optische Sonde eine Nachweisgenauigkeit von besser als 50 μm , bevorzugt besser als 10 μm , insbesondere besser als 1 μm , erreichen. Weiterhin kann die optische Kopplung durch die optische Facette
- 35

erfolgen. Somit kann das mindestens eine mikrooptische Element Licht effizient und reproduzierbar zwischen dem Sondenkopf und der mindestens einen mikrooptischen Komponente koppeln, wobei das mindestens eine mikrooptische Element insbesondere bei einer Wellenlänge von 1250 nm bis 1650 nm einen Fokus mit einem Modenfelddurchmesser von 3 μ m oder weniger erzeugen kann. Im allgemeinen kann das mikrooptische Element einen Modenfelddurchmesser bis zur verwendeten Wellenlänge erreichen, dies gilt auch bei Wellenlängen außerhalb des genannten Bereichs von 1250 nm bis 1650 nm.

Hierin werden die Begriffe "haben", "aufweisen", "umfassen" oder "einschließen" oder beliebige grammatikalische Abweichungen davon in nicht-ausschließlicher Weise verwendet. Dementsprechend können sich diese Begriffe sowohl auf Situationen beziehen, in welchen, neben den durch diese Begriffe eingeführten Merkmalen, keine weiteren Merkmale vorhanden sind, oder auf Situationen, in welchen ein oder mehrere weitere Merkmale vorhanden sind. Beispielsweise kann sich der Ausdruck "A hat B", "A weist B auf", "A umfasst B" oder "A schließt B ein" sowohl auf die Situation beziehen, in welcher, abgesehen von B, kein weiteres Element in A vorhanden ist (d.h. auf eine Situation, in welcher A ausschließlich aus B besteht), als auch auf die Situation, in welcher, zusätzlich zu B, ein oder mehrere weitere Elemente in A vorhanden sind, beispielsweise Element C, Elemente C und D oder sogar weitere Elemente.

Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass die Begriffe „mindestens ein“ und „ein oder mehrere“ sowie grammatikalische Abwandlungen dieser Begriffe, wenn diese in Zusammenhang mit einem oder mehreren Elementen oder Merkmalen verwendet werden und ausdrücken sollen, dass das Element oder Merkmal einfach oder mehrfach vorgesehen sein kann, in der Regel lediglich einmalig verwendet werden, beispielsweise bei der erstmaligen Einführung des Merkmals oder Elementes. Bei einer nachfolgenden erneuten Erwähnung des Merkmals oder Elementes wird der entsprechende Begriff „mindestens ein“ oder „ein oder mehrere“ in der Regel nicht mehr verwendet, ohne Einschränkung der Möglichkeit, dass das Merkmal oder Element einfach oder mehrfach vorgesehen sein kann.

Weiterhin werden hierin die Begriffe „bevorzugt“, „vorzugsweise“, „insbesondere“, „beispielsweise“ oder ähnliche Begriffe in Verbindung mit optionalen Merkmalen verwendet, ohne dass alternative Ausführungsformen hierdurch beschränkt werden. So sind Merkmale, welche durch diese Begriffe eingeleitet werden, optionale Merkmale, und es ist nicht beabsichtigt, durch diese Merkmale den Schutzzumfang der Ansprüche und insbesondere der unabhängigen Ansprüche einzuschränken. So kann die Erfindung, wie der Fachmann erkennen wird, auch unter Verwendung anderer Ausgestaltungen durchgeführt werden. In ähnlicher Weise werden Merkmale, welche durch „in einer Ausführungsform der Erfindung“ oder

durch „in einem Ausführungsbeispiel der Erfindung“ eingeleitet werden, als optionale Merkmale verstanden, ohne dass hierdurch alternative Ausgestaltungen oder der Schutzzumfang der unabhängigen Ansprüche eingeschränkt werden soll. Weiterhin sollen durch diese einleitenden Ausdrücke sämtliche Möglichkeiten, die hierdurch eingeleiteten Merkmale mit anderen Merkmalen zu kombinieren, seien es optionale oder nicht-optionale Merkmale, unangetastet bleiben.

Kurze Beschreibung der Figuren

Weitere Einzelheiten und Merkmale der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines bevorzugten Ausführungsbeispiels, insbesondere in Verbindung mit den abhängigen Ansprüchen. Hierbei können die jeweiligen Merkmale für sich alleine oder zu mehreren in Kombination miteinander verwirklicht sein. Die Erfindung ist nicht auf die Ausführungsbeispiele beschränkt. Die Ausführungsbeispiele sind schematisch in den nachfolgenden Figuren dargestellt. Hierbei bezeichnen gleiche Bezugsziffern in den Figuren gleiche oder funktionsgleiche Elemente bzw. hinsichtlich ihrer Funktionen einander entsprechende Elemente. Im Einzelnen zeigen:

Figuren 1 und 2: jeweils einen Schnitt durch eine Ausführungsform einer optischen Sonde vor (Figur 1) und nach (Figur 2) einem Kontakt mit einem Objekt;
 Figuren 3 bis 7: jeweils eine Draufsicht auf eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde;
 Figur 8: Schnitt durch eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde;
 Figur 9: Draufsicht auf das Faserarray gemäß Figur 8;
 Figur 10: schematische Darstellung einer weiteren Ausführungsform der optischen Sonde, eingerichtet zum Koppeln zu einem Gitterkoppler;
 Figuren 11 und 12: jeweils einen Schnitt durch eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde;
 Figur 13: schematische Darstellung eines Verfahrens zur Herstellung einer optischen Sonde;
 Figuren 14 bis 16: jeweils eine Sicht auf eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde;
 Figur 17: schematisch ein Verfahren zu einem Nachweis eines Sensorsignals;
 Figur 18: eine beispielhafte Messung einer Rückkopplungseffizienz;
 Figur 19 und 20 eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde; und
 Figur 21 weitere Ausführungsformen der Sensorstruktur.

Beschreibung der Ausführungsbeispiele

Figur 1 zeigt einen Schnitt durch eine Ausführungsform einer optischen Sonde 1, die zur optischen Kopplung an eine mikrooptische Komponente 50 eingerichtet ist. Hierdurch kann mindestens ein Element 56 der mikrooptischen Komponente 50 einem Test unterzogen werden. Die optische Sonde 1 umfasst einen Sondenkopf 10, der in der vorliegenden Ausführungsform als optische Faser 12 ausgeführt ist. Wie schematisch dargestellt, handelt es sich hierbei um eine Einmodenfaser, die einen Faserkern 13 umfasst. Die optische Faser 12 ist, direkt oder mittels einer geeigneten Einrichtung, mit einem Kraftsensor 27 verbunden.

Die in Figur 1 beispielhaft dargestellte optische Sonde 1 umfasst weiterhin ein mikrooptisches Element 20, das sich auf dem Sondenkopf 10 befindet und dadurch mechanisch mit dem Sondenkopf 10 in Verbindung steht. Das mikrooptische Element 20 ist hierbei als Kombination aus einer reflektierenden Fläche 23 und einer refraktiven Fläche 24, hier als Linse, ausgeführt, welche dazu dienen, eine optische Kopplung zwischen einer optischen Koppelstelle 14 des Sondenkopfs 10 und der mikrooptischen Komponente 50 herzustellen. In der Ausführungsform gemäß Figur 1 ist die Linse dazu eingerichtet, Modenfelder an der Koppelstelle 51 an der mikrooptischen Komponente 50 zu erzeugen.

Die in Figur 1 beispielhaft dargestellte optische Sonde 1 umfasst weiterhin eine von dem mikrooptischen Element 20 gesonderte Sensorstruktur 21, die dazu eingerichtet ist, ein Sensorsignal zu erzeugen, das eine Positionierung des Sondenkopfs 10 relativ zu einem Objekt 100 anzeigt. Die Sonde kann (nicht dargestellt) auch mehrere mikrooptische Elemente 20 und/oder mehrere Sensorstrukturen 21 aufweisen. Die Sensorstruktur 21, die sich auf dem als optische Faser 12 ausgeführten Sondenkopf 10 befindet, ist hier als Schutzstruktur 26 ausgeführt, die dazu eingerichtet ist, sowohl den Sondenkopf 10 als auch das mikrooptische Element 20 vor Kontakt und Kollision zu schützen. Die Sensorstruktur 21 umgibt das mikrooptische Element 20 derart, dass sie einen Kontakt mit dem Objekt 100 verhindert, während sie gleichzeitig das mikrooptische Element 20 nicht daran hindert, in eine Tiefätzung 55 einzudringen und die optische Kopplung zwischen der optischen Koppelstelle 14 des Sondenkopfs 10 und der optischen Koppelstelle 51 der mikrooptischen Komponente 50 herzustellen. Bei einem Kontakt der als Schutzstruktur 26 ausgeführten Sensorstruktur 21 mit dem Objekt 100 kann der Kraftsensor 27 ein Sensorsignal 40 erzeugen, das dazu dienen kann, eine Bewegung des Sondenkopfs 10 anzuhalten oder umzukehren und anschließend den Sondenkopf 10 in eine von dem Objekt 100 beabstandete Position zu überführen. In einer bevorzugten Ausführung kann die Sensorstruktur 21 Verstärkungen 15 aufweisen, die dazu eingerichtet sein können, eine Kontaktfläche zwischen der Sensorstruktur 21 und einer Facette 103 zu vergrößern und somit eine absolute Adhäsion zwischen der Sensorstruktur 21 und dem Objekt 100 zu erhöhen.

In der Ausführung gemäß Figur 1 ist die mikrooptische Komponente 50 Teil eines Wafers 60, wobei die optische Koppelstelle 51 durch Ausführen der Tiefätzung 55 freigelegt wurde. Darüber hinaus können weitere optische Komponenten 61 können Teil des Wafers 60, insbesondere Teil der mikrooptischen Komponente 50, sein. Die Tiefätzung 55 kann typischerweise eine Breite 201 von 50 μm bis einschl. 500 μm und eine Tiefe 202 von 3 μm bis einschl. 200 μm aufweisen.

Figur 2 zeigt einen weiteren Schnitt durch die optische Sonde 1 gemäß Figur 1, nachdem ein Kontakt oder eine Kollision der Sensorstruktur 21 mit dem Objekt 100 auftrat. Mittels einer hierdurch erzeugten Kollisionskraft erfolgte eine Deformation 36 der Sensorstruktur 21 und die Sensorstruktur 21 wurde aus ihrer Ruhelage 37 ausgelenkt, wodurch eine Kraft als das Sensorsignal 40 auf den Sondenkopf 10 wirkt, die sich mittels des Kraftsensors 27 nachweisen lässt. Alternativ oder zusätzlich kann sich der Sondenkopf 10, eine Halterung, in welcher der Sondenkopf 10 fixiert ist oder der Kraftsensor 27 verbiegen. Mittels einer Auswertung der gemessenen Kraft kann die Bewegung des Sondenkopfs 10 gestoppt werden.

Figur 3 zeigt eine schematische Draufsicht auf eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, nachdem der Sondenkopf 10 in die Tiefätzung 55 eingeführt wurde und an der optischen Koppelstelle 51 mit der mikrooptischen Komponente 50 gekoppelt wurde. Im Anschluss hieran ist vorgesehen, dass der Sondenkopf 10 auch an weitere optische Koppelstellen 52, 53 der mikrooptischen Komponente 50 gekoppelt und in Richtung 62 weiterbewegt werden soll. Für den Fall, dass hierbei ein Kontakt der Sensorstruktur 21 mit dem Objekt 100 auftritt, kann der Kontakt mittels des Kraftsensors 27 nachgewiesen werden und ein Anhalten der Bewegung des Sondenkopfs 10 verursachen. Alternativ oder zusätzlich (nicht dargestellt) kann ein Kontakt der Sensorstruktur 21 mit dem Objekt 100 mittels einer Messung eines elektrischen Widerstands zwischen und der mikrooptischen Komponente 50 erfolgen, wobei die Sensorstruktur 21 in dieser Ausführung vorzugsweise über eine metallische Beschichtung verfügen, um eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit aufzuweisen. Weiter alternativ oder zusätzlich (nicht dargestellt) lässt sich ein Kontakt der Sensorstruktur 21 mit dem Objekt 100 mittels einer Vibrationsmessung oder durch Beobachtung mittels einer Kamera nachweisen.

Figur 4 zeigt eine schematische Draufsicht auf eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, bei welcher das mikrooptischen Element 20 zusätzliche Ausrichtstrukturen 22 aufweist, welche sich in einer bekannten Lage im Raum in Bezug auf den Sondenkopf 10 und die Sensorstruktur 21 befinden. Die Ausrichtstrukturen 22 können dazu eingerichtet sein, werden um den Sondenkopf 10 in Bezug auf die mikrooptische Komponente 50 auszurich-

ten. Hierzu können insbesondere die Ausrichtstrukturen 22 mit einer ersten Kamera nachgewiesen werden, während Marker auf der mikrooptische Komponente 50 mit einer zweiten Kamera nachgewiesen werden können. Sind die beiden Kameras in Bezug auf Ihre Position zueinander kalibriert, kann der Sondenkopf 10 mittels der Ausrichtstrukturen 22 in Bezug auf die mikrooptische Komponente 50 ausgerichtet werden.

Figur 4 zeigt eine bevorzugte Ausführungsform der Sensorstruktur 21, in welcher Licht aus einem optischen Wellenleiter 25 zwischen optischen Fasern 63, 64 optisch gekoppelt werden kann. Tritt der einmodig oder bevorzugt mehrmodig ausgeführte optische Wellenleiter 25 in Kontakt mit einem Objekt, ändert sich eine Menge an gekoppelten Licht zwischen den optischen Fasern 63, 64, wobei die Änderung als das Sensorsignal 40 verwendet werden kann, um einen Kontakt des mikrooptischen Elements 20 mit dem Objekt zu vermeiden. Alternativ kann eine Rückkopplung, verursacht durch einen Kontakt in der der optischen Faser 63, 64, gemessen werden. In einer weiteren Ausführungsform (nicht dargestellt) kann eine Polarisation des Lichts, welches zwischen den optischen Fasern 63, 64 optisch gekoppelt ist, gemessen werden und als das Sensorsignal 40 verwendet werden. Da durch eine Verbiegung des optischen Wellenleiters 25 Doppelbrechung entsteht, kann bei einem Kontakt des optischen Wellenleiters 25 mit einem Objekt ein hochsensitives Sensorsignal erzeugt werden. In einer weiteren Ausführungsform (nicht dargestellt) kann der optische Wellenleiter 25 statt mit der Faser 64 auch mit einer Stelle ausreichend hoher Reflektivität, insbesondere Luft, wodurch eine Reflektivität von 3 % bis 4 % verursacht werden können, verbunden sein. In dieser Ausführungsform, kann eine Rückreflexion eines Signals innerhalb des optischen Wellenleiters 25 als das Sensorsignal 40 für den Kontakt des optischen Wellenleiters 25 mit einem Objekt verwendet werden.

Figur 5 zeigt eine schematische Draufsicht auf eine weitere Ausführungsform der Sensorstruktur 21, die als Schutzstruktur 26 ausgebildet ist, um das mikrooptische Element 20 vor einem Kontakt mit einem Objekt schützt, hierbei jedoch nicht die Möglichkeit ausschließt, das mikrooptische Element 20 in die Tiefätzung 55 einzuführen, innerhalb der Tiefätzung 55 zu bewegen und eine optische Kopplung an die mikrooptische Komponente 50 herzustellen. Optional können die optischen Fasern 12, der Faserkern 13 und/oder die optische Koppelstelle 14 mit Sensorstrukturen 21 in Form von Linsen oder Kombinationen aus Linsen und Spiegeln (nicht gezeigt) bestückt sein, um berührungslos an mindestens einer, bevorzugt mindestens zwei Stellen den Abstand zu einem Objekt 100 zu messen.

Figur 6 zeigt eine schematische Draufsicht auf eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, in welcher eine Sensorstruktur 21, 35 dazu eingerichtet ist, mindestens ein optisches Sensorsignal 28, 29, 30, 31 zu erzeugen und nachzuweisen, um auf diese Weise das

hier nicht dargestellte Objekt 100 aufzuspüren oder eine Ausrichtung des Sondenkopfs 10 zu dem Objekt 100 zu ermöglichen. In dieser Ausführung ist die Sensorstruktur 21, 35 dazu eingerichtet, das Sensorsignal 28 zu erzeugen, welches das Objekt 100 in einem Akzeptanzkonus 32 nachzuweisen vermag. Der Akzeptanzkonus 32 kann bei Festlegung der Sensorstruktur 21, 35 festgelegt werden und einen Halbraum oberhalb der Facette 103 aufspannen. Dies kann bevorzugt dadurch erfolgen, dass optische Linsen mit hoher numerischer Apertur (NA), insbesondere oberhalb von $NA = 1,5$, in Kombination mit der reflektierenden Fläche 23 mit totaler interner Reflexion verwendet werden. In einer weiteren, in Figur 6 ebenfalls schematisch dargestellten Ausführung kann eine Sensorstruktur 21, 34 Sensorsignale 30, 33 empfangen und/oder aussenden.

Figur 7 zeigt eine Anwendung der in Figur 6 dargestellten Ausführung der optischen Sonde 1 bei der optischen Kopplung an der optischen Koppelstelle 51 in der Tiefätzung 55. Hierbei kann das Sensorsignal 31 dazu verwendet werden, um einen Abstand des Sondenkopfs 10 zu einer Bodenfläche 57 der Tiefätzung 55 zu regeln, wobei das Sensorsignal 28 dazu dient, das Objekt 100 (nicht dargestellt) nachzuweisen und so möglichst einen Kontakt des mikrooptischen Elements 20 mit dem Objekt 100 zu vermeiden. Das Objekt 100 kann hierbei eine unbeabsichtigt nicht tiefgeätzte Struktur sein oder sie erheblich kleiner sein als in Figur 1 dargestellt.

Figur 8 zeigt einen Schnitt durch eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, in welcher das mikrooptische Element 20 die refraktive Fläche 24, hier als Linse ausgeführt, umfasst, die auf der optischen Faser 12 eines Faserarrays 11 fixiert ist. Hierbei handelt es sich um eine so genannte „lensed fiber“, welche typischerweise zu einer Kontaktierung der mikrooptischen Komponente 50 an der optischen Koppelstelle 51 verwendet wird. Durch die als Schutzstruktur 26 ausgeführte Sensorstruktur 21 kann eine Beschädigung des mikrooptischen Elements 20, beispielsweise aufgrund einer versehentlichen Kollision zwischen dem mikrooptischen Element 20 und der Facette 103, verhindert werden. Hierbei kann während eines Kopplungsvorgangs ein Bereich um das mikrooptische Element 20 und die optische Koppelstelle 51 mittels eines Mikroskops beobachtet werden, um auf diese Weise einen Kontakt zwischen der Sensorstruktur 21 und der Facette 103 aufgrund eines Verbiegens des Sondenkopfs 10, des Faserarrays 11 oder der der Sensorstruktur 21 nachzuweisen. Die Ausführungsform kann auch für das Koppeln zu einem Gitterkoppler (nicht dargestellt) verwendet werden, wobei der Faserkern 13 in einem Winkel, bevorzugt von 5° bis 20° , zu einer Normalen eines Wafers positioniert wird.

Figur 9 zeigt eine Draufsicht auf das von dem Sondenkopf 10 umfasste Faserarray 11 aus Figur 8 entlang einer Fläche 200 in Figur 8. Hieraus ist insbesondere ersichtlich, dass die als

Schutzstruktur 26 ausgeführte Sensorstruktur 21 eine Funktionalität der von dem mikrooptischen Element 20 umfassten refraktiven Fläche 24 nicht beeinträchtigen kann.

Figur 10 zeigt einen Schnitt durch eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, die zur Kopplung zu einem Gitterkoppler 54 eingerichtet ist. Der Gitterkoppler 54 ist hierbei von einem Wellenleiter umfasst, welcher von der mikrooptischen Komponente 50 umfasst ist, welcher bevorzugt von einem Wafer 60 umfasst ist. Um eine Kollision der optischen Sonde 1 mit dem Wafer 60 zu verhindern, kann das Faserarray 11 bevorzugt mit einer Fase 104 ausgestattet sein. Die Fase 104 ist hierbei bevorzugt 400 μm , besonders bevorzugt 250 μm , insbesondere 60 μm , von dem Faserkern 13 entfernt.

Figur 11 zeigt einen Schnitt durch eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, in welcher die mikrooptische Komponente 50 über zwei sich gegenüberliegende Koppelstellen 51, 52 verfügt, die an die beiden unabhängig voneinander beweglichen Sondenköpfe 10, 16 gekoppelt wird. Hierdurch kann eine gesonderte Optimierung einer Kopplungseffizienz des Sondenkopfs 10 zu der mikrooptischen Komponente 50 und der mikrooptischen Komponente 50 zu dem Sondenkopf 16 erfolgen, so dass für beide optische Kopplungen jeweils ein Optimum an Kopplungseffizienz erreicht werden kann. Diese Ausführungsform kann insbesondere dazu verwendet werden, um das Element 56 der mikrooptischen Komponente 50 zu testen, wobei das Element 56 als optischer Halbleiterverstärker (engl. *semiconductor optical amplifier*, *SOA*) ausgeführt sein kann; die Verwendung eines anderen Elements ist jedoch denkbar, insbesondere DFB-Laser mit zwei Ausgangsfacetten oder andere Komponenten mit mindestens zwei gegenüberliegenden Koppelstellen.

Figur 12 zeigt einen Schnitt durch eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, in welcher die Sensorstruktur 21 als Kragbalken 38, der sich bei Kontakt mit dem Objekt 100 verbiegt, ausgeführt ist. Die Verbiegung des Kragbalken 38 kann durch eine Sensorstruktur 39, die sich auf einer weiteren optischen Faser 17 befindet, nachgewiesen werden. Dazu kann sich insbesondere eine stehende Welle zwischen der Sensorstruktur 39 und dem Kragbalken 38 ausbilden, verursacht durch eine Reflexion an der Sensorstruktur 39 und dem Kragbalken 38. Hierdurch kann sich in Abhängigkeit von einer Größe der Verbiegung des Kragbalken 38 die Menge an Licht, die von der weiteren optischen Faser 17 bereitgestellt wird und in die weitere optische Faser 17 zurück gekoppelt wird, verändern. Hierfür kann bevorzugt eine Wellenlänge verwendet werden, bei welcher die Veränderung des in die weitere optische Faser 17 zurück gekoppelten Lichtes möglichst sensitiv auf Verbiegung des Kragbalken 38 reagiert. Alternativ oder zusätzlich kann der Kragbalken 38 mittels eines weiteren Signals zum Schwingen angeregt werden und eine Änderung der Schwingungsamplitude des Kragbalken 38 mittels der Sensorstruktur 39 gemessen werden, wenn sich der

Kragbalken 38 an das Objekt 100 annähert. Damit lassen sich Kräfte unterhalb von 100 nN messtechnisch erfassen. Dieses Vorgehen ist aus der Rasterkraftmikroskopie als „dynamic mode“ bekannt.

- 5 Figur 13 zeigt schematisch ein Ausführungsbeispiel eines Verfahrens zur Herstellung der optischen Sonde 1, die zur optischen Kopplung an eine mikrooptische Komponente (nicht dargestellt) eingerichtet ist. Mittels eines Lithographie-Objektivs 300 wird der Sondenkopf 10 lokalisiert. Hierzu kann insbesondere kann eine optische Facette des Faserarrays 11 oder die optische Koppelstelle 14 nachgewiesen werden. Das Lithographie-Objektiv 300 fokussiert einen Lichtstrahl, vorzugsweise ausgewählt aus einem UV-Strahl oder einem Laserstrahl, insbesondere einem fs-Laserstrahl, an einem Fokuspunkt 301. Bei dem vorliegenden direktanschreibenden Verfahren findet an dem Fokuspunkt 310 eine durch den Lichtstrahl verursachte Aushärtung eines aushärtbaren Materials 302 statt. Durch räumliche Bewegung des Fokuspunktes 301 kann eine vorgesehene Sensorstruktur 303 erzeugt und strukturiert werden. Die Darstellung gemäß Figur 13 zeigt weiterhin einen Teil 304 der bereits hergestellten Sensorstruktur 21 bereits ausgehärtet. In einer besonders bevorzugten Ausführung können sowohl die Sensorstruktur 21 als auch das mikrooptische Element 20 gemeinsam mittels des direktanschreibenden Verfahrens hergestellt werden; eine Herstellung des mikrooptischen Elements 20 nach oder bevorzugt vor der Herstellung der Sensorstruktur 21 ist jedoch möglich.

20

- Figur 14a zeigt eine schematische Draufsicht auf eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, in welcher das Faserarray 11 mit einer Fase 104 versehen ist, sodass das Faserarray 11 in einem Winkel zur Oberfläche des Wafers 60 positioniert werden kann, welche sich von 90° unterscheidet. Besonders bevorzugt ist hierbei ein Winkel von 5° gemäß der Darstellung in Figur 14a; aber auch Winkel von 1° bis einschließlich 45° können bevorzugt eingestellt werden.

- Figur 14b zeigt eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, in welcher sich eine optische Faser bevorzugt im selben Sondenkopf 10 wie in Figur 14a befindet. Die Darstellung gemäß Figur 14b stellt ein Schnittbild durch eine Schnittebene dar, welche sich in oder vor der in Figur 14 dargestellten Zeichnungsebene befindet. Bevorzugt werden mehrere Sensoren 21 verwendet, die dazu eingerichtet sind, um auftretende Verkipnungen nachzuweisen. Eine weitere Möglichkeit, auftretende Verkipnungen nachzuweisen, besteht in einer Verkipfung des Sondenkopfs 10 relativ zum Wafer 60, so dass das am Wafer 60 reflektierte Sensorsignal 31 maximal wird. Durch den Winkel ist es möglich, einen Markerstruktur 401 mit einer Top-View Kamera, d.h. eine Kamera, die dazu eingerichtet ist, auf die Oberfläche des Wafers 60 zu blicken, nachzuweisen. Diese Ausführung kann die Ausrichtung des Sondenkopfs 10 zu dem Wafer 60 vereinfachen. Durch die Verkipfung wird vorzugsweise eine

30

35

zur Lichtausbreitungsrichtung nicht-senkrechte, refraktive Fläche 24 verwendet, so dass das Sensorsignal 31 senkrecht auf den Boden der Tiefätzung 55 auftrifft. Diese Ausführung hat den Vorteil, dass Reflexionen an der refraktive Fläche 24 nicht in den Faserkern 13 zurück einkoppeln können. Dadurch werden Störsignale aufgrund einer Interferenz zwischen an dem Wafer 60 und an der refraktive Fläche 24 reflektiertem Licht vermieden.

Figur 15 zeigt eine schematische Draufsicht auf eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, in welcher eine weitere optische Faser dazu eingerichtet ist, einen Abstand zum Wafer 60 an zwei Positionen, welche die Sensorstrukturen 520, 522 umfassen, nachzuweisen, wodurch Sensorsignale 521, 523 erzeugt werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Verkippung von des Sondenkopfs 10 zum Wafer 60 nachzuweisen und zu korrigieren. Hierzu werden bevorzugt 2D-Faserarrays verwendet, besonders bevorzugt mit zwei Fasereihen in einer Richtung und mehr Fasern, insbesondere 8 oder 64, in eine weitere Richtung, welche in die dargestellte Zeichnungsebene in Figur 15 zeigt. In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform (nicht dargestellt) kann anstelle der Sensorstruktur 520 das mikrooptische Element 20 verwendet werden.

Figur 16 zeigt eine schematische Draufsicht auf eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, in welcher sich eine Facette 530 in einem Winkel 550 abweichend von 90° zu der Facette 530 befindet. Dadurch können Rückreflexionen an dem Sondenkopf 10, insbesondere an dem Sensorsignal 521 und der refraktive Fläche 24, unterdrückt werden. Dadurch lassen sich Interferenzen von an dem Wafer 60 und an der refraktive Fläche 24 und/oder an der Facette 530 reflektierten Anteilen des Sensorsignals 521 vermeiden. Hierdurch bilden sich keine optische Kavitäten aus, so dass keine periodischen Oszillationen bei dem Nachweis des Sensorsignals 521 in Abhängigkeit vom Abstand des Sondenkopfs 10 zu dem Wafer 60 zu beobachten sind.

Figur 17 zeigt schematisch ein Verfahren zu einem Nachweis eines Sensorsignals 28, 29, 30, 31, 521, 522. Hierzu wird zu einem Detektor propagierendes Licht 503 von einer Lichtquelle 501 durch einen Zirkulator oder Splitter 504 durch die optische Faser 17 und die Sensorstruktur 21 auf die Oberfläche der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, gelenkt. Dort wird das Sensorsignal 28, 29, 30, 31, 521, 522 reflektiert und wieder in die optische Faser 17 eingekoppelt. Durch den Zirkulator oder Splitter 504 wird das Sensorsignal 28, 29, 30, 31, 521, 522 zu einem Detektor gelenkt. Befindet sich die mikrooptische Komponente 50, insbesondere der Wafer 60, genau in einer Strahltille der Abbildung von Licht aus dem Faserkern 13 auf die Oberfläche der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, durch die Sensorstruktur 21, so dass weine Länge 511 einer Frei-

strahlstrecke des Sensorsignals in Mikrometern genau dem Abstand 512 höchster Rückeinkopplung entspricht, ist die Rückreflexion maximal. Dadurch kann der Abstand der Sensorstruktur 21 und/oder des Sensorkopfs 10 zur mikrooptische Komponente 50, insbesondere zum Wafer 60, gemessen werden, da dieser Punkt der besten Koppelung bekannt ist oder vorher kalibriert wurde.

Figur 18 zeigt eine beispielhafte Messung einer Rückkopplungseffizienz, d.h. eines Verhältnisses 510 der Leistung des zum Detektor propagierenden Lichts 503 und des vom Detektor kommenden Lichts 504, als Funktion der Länge 511 der Freistrahlstrecke des Sensorsignals in Mikrometern. Befindet sich die mikrooptische Komponente 50, insbesondere der Wafer 60, genau dem Abstand 512 höchster Rückeinkopplung, so ist diese Rückkopplung maximal, was als Kalibrationspunkt für den Abstand der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, zum Sondenkopf 10 genutzt werden kann. In Figur 18 zeigt die durchgestrichene Linie Simulationsdaten, die Punkte messtechnisch erfasste Werte. Für diese Messungen wurde die Ausführungsform der optischen Sonde 1 gemäß Figur 15 verwendet. Durch Interferenzen zwischen Licht, welches an der Facette des Sondenkopfs 103 und an der mikrooptische Komponente 50, insbesondere dem Wafer 60, reflektiert wurde, kann eine Oszillation auftreten, die eine vertikale, mit Länge 511 der Freistrahlstrecke des Sensorsignals periodische Streuung der Messpunkte bewirkt. Diese Streuung kann durch eine Ausführungsform der optischen Sonde 1 gemäß Figur 16 vermieden werden. Alternativ kann Interferenz durch Verwendung einer breitbandigen Lichtquelle vermieden werden. Weiterhin kann die Lichtquelle 501 als durchstimmbarer Laser, z.B. als „External Cavity Laser (ECL)“ oder als „Swept-Source“ Laser ausgeführt sein. Wird für einen festen Abstand 511, wie in Figur 21c dargestellt, eine Periode 620, insbesondere eine Oszillationsperiode als Funktion der Wellenlänge, gemessen, so kann hiermit auch ein Wert für den Abstand 511 bestimmt werden. Der Abstand 510 wird hierbei unter Verwendung der Periode 620 bestimmt, wobei eine kleinere Periode auf einen größeren Abstand hindeutet und wobei der Abstand 510 umgekehrt proportional zu 620 ist. Der so bestimmte Abstand kann als Kalibrationssignal für den Sensor verwendet werden. In einer bevorzugten Ausführung kann das Maximum des Verhältnisses 510 für eine Ausrichtung des Sondenkopfs 10 zu der mikrooptische Komponente 50, insbesondere dem Wafer 60, verwendet werden.

Figur 19 zeigt eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, in welcher die Sensorstruktur 21 zwei Teile 520, 520b umfasst. Die Teile 520, 520b der Sensorstruktur 21 sind so ausgeführt, dass die Einkopplung des vom Detektor kommenden Lichts 504 in der optische Faser 17 maximal ist, wenn die Oberfläche der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, sich in dem Abstand 512 höchster Rückeinkopplung befindet. Befindet sich die Oberfläche der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60,

jedoch in einer Position 560, die vom Abstand 512 höchster Rückeinkopplung abweicht, ist das Sensorsignal reduziert. Diese Ausführung hat gegenüber der Ausführungsform aus Figur 17 den Vorteil, dass sie bei gleichzeitig hohem Arbeitsabstand sensitiver sein kann und dass weniger Einschränkungen durch Interferenzen zwischen Teilen des Sondenkopfs 10 und der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, auftreten können.

Figur 20 zeigt eine weitere Ausführungsform der optischen Sonde 1, in welcher kürzere Arbeitsabstände und ein flacherer Winkel des Sensorsignals 521 in Bezug auf die Oberfläche der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, bevorzugt mehr als 45° zum Lot zu der Oberfläche der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, auftreten, so dass die Teile 520, 520b der Sensorstruktur 21 auch durch reflektierende Oberflächen ausgeführt werden können.

Weiterhin kann in Bezug auf die Oberfläche der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, p- und s-polarisiertes Licht verwendet werden und der Unterschied von p- zu s-polarisiertem Licht analysiert werden. Vorzugsweise kann das Verhältnis der Reflexion von p- und s polarisiertem Licht bei einem Winkel von 45° zum Lot zur Oberfläche der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, analysiert werden. Unter der Annahme, dass die Oberfläche der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, ein Oxid ist, verändert sich das Verhältnis aus S- und p-polarisiertem Licht um mehr als 1% bei einer Winkeländerung von 1° . Weiterhin kann durch die Analyse des Verhältnisses von p- und s-polarisiertem Licht auf die Materialeigenschaften der mikrooptische Komponente 50, insbesondere des Wafers 60, geschlossen werden, wobei insbesondere zwischen Metall, Oxid, unterschiedlichen Oxidschichten und Halbleitern, bevorzugt Silizium, unterschieden werden kann. Hierbei kann der Faserkern 13 vorzugsweise als polarisationserhaltender Strahlteiler ausgeführt sein. Weiterhin kann der Sondenkopf 10 bevorzugt polarisationssensitive Strahlteiler aufweisen.

Figur 21a zeigt eine weitere Ausführungsform der Sensorstruktur 21. Um eine hohe Positionsauflösung zu erzielen, kann auch eine Interferenz zwischen der mikrooptische Komponente 50 und einem Teil des Sondenkopfs 10 genutzt werden. Vorzugsweise tritt die Interferenz zwischen einer Oberfläche der mikrooptischen Komponente 50 und einer Grenzfläche an oder innerhalb der Sensorstruktur 21 auf. In diesem Fall interferieren ein an einer Facette reflektierter Lichtanteil 610 und ein an der mikrooptische Komponente 50 reflektierter Lichtanteil, Vorzugsweise ist die Sensorstruktur 21 derart ausgeführt, dass die Lichtintensität der beiden Lichtanteile 601, 602 genau gleich groß ist, so dass es zu einer großen Modulation bei einer Veränderung des Abstands des Sondenkopfs 10 zur mikrooptischen Komponente 50 kommt.

Figur 21b zeigt eine weitere Ausführungsform der Sensorstruktur 21, in welcher eine Kavität 610 eine Reflexion in Form eines Lichtanteils 603 hervorruft, der vorzugsweise auf die Reflexion des Lichtanteils 602 angepasst ist, sodass deren Intensitäten genau gleich groß sind.

- 5 Die Kavität 610 kann vorzugsweise eine Fläche aufweisen, die senkrecht zu der Lichtpropagationsrichtung ist, und eine weitere Fläche, die mindestens 5° hierzu verkippt ist. Anstelle der Kavität 610 kann auch eine diffraktive Struktur (nicht dargestellt) verwendet werden.

- Fig. 21c zeigt, dass durch die Interferenz von Lichtintensitäten, die an der mikrooptischen Komponente 50 und einer innerhalb des Sondenkopfs 10 reflektiert werden, eine mit dem Abstand des Sondenkopfs 10 zur mikrooptischen Komponente 50 periodisch oszillierende Lichtintensität auftritt, welche sich bevorzugt mittels der Ausführungsform gemäß Figur 17 nachweisen lässt. Diese Oszillation hat eine Periode von etwa der halben Lichtwellenlänge des Sensorsignals 28. Diese Oszillation kann einer Intensitätskurve gemäß Figur 18 überlagert sein, und kann hierbei auch nur einen Bruchteil von weniger als 5% der in Figur 18 dargestellten Intensitätsverteilung betragen. Ob die Oszillation gemäß Figur 21c sichtbar ist oder nicht, kann durch die optische Kohärenzlänge des Sensorsignals 28 und die Ausführung der Sensorstruktur 21 eingestellt werden, wobei für maximale Oszillation die Reflexionen der Lichtanteile 602, 603 genau gleich groß sind. Eine Periode 620 kann durch die Wellenlänge des Sensorsignals 28 eingestellt werden. Die Periode 620 entspricht hierbei einem Abstand zwischen benachbarten Maxima und damit etwa der Hälfte der verwendeten Wellenlänge, z.B. 775 nm bei einer verwendeten Wellenlänge von 1550 nm. Bei einer Veränderung der Wellenlänge des Sensorsignals 28 kommt es zu einer periodischen Änderung einer Lichtleistung 615. Die Periode der Oszillation der Lichtleistung 615 ist abhängig von einem Abstand der Reflexionsflächen, welche die Lichtanteile 601, 602, 603 hervorgerufen. Durch diese
- 10
15
20
25

- In einer bevorzugten Ausführung kann das Signal gemäß Figur 21c dafür genutzt werden, mechanische Vibrationen, welche den Abstand des Sondenkopfs 10 zur mikrooptischen Komponente 50 verändern können, nachzuweisen. Auch andere Sensorsignale, insbesondere gemäß Figur 18, können hierfür genutzt werden. Die Messung kann gemäß Figur 7 auch in mehreren Raumrichtungen durchgeführt werden. Diese Vibrationen können durch einen schnellen Aktuator 700 mit hoher Regelungsbandbreite in mindestens einer Raumrichtung, bevorzugt in mehrere Raumrichtungen, kompensiert werden, so dass nunmehr der Abstand und/oder die Ausrichtung des Sondenkopfs 10 zur mikrooptischen Komponente 50 konstant bleibt. Bevorzugt hat der Aktuator 700 eine Bandbreite von mindestens 100 Hz, besonders bevorzugt von mindestens 1000 Hz, insbesondere von mindestens 20 kHz. Insbesondere
- 30
35

können durch schnelle Bewegungen der optischen Sonde 1 verursachte Vibrationen kompensiert werden, welche vor allem dann auftreten können, wenn sich die optische Sonde 1 an Messpositionen für verschiedene mikrooptische Komponenten 50, etwa innerhalb eines Wafers 60, bewegt. Damit wird es möglich, eine Wartezeit zwischen Messungen an verschiedenen mikrooptischen Komponenten 50 zu verringern. Durch eine aktive Vibrationsregelung wird es auch möglich, Messgeräte mit geringerer Vibrationsisolation zu nutzen, die bevorzugt für ein rein elektrisches Testen von elektrischen Komponenten verwendet werden. Hierdurch lassen sich elektrische Tester mit optischen Testfunktionalitäten nachrüsten. Vibrationen können auch die Positionierung des Sondenkopfs 10 zur mikrooptischen Komponente 50 in anderen Dimensionen als dem Abstand verändern, beispielsweise kann es zu einer Vibration in der Ebene der mikrooptischen Komponente 50 kommen. Die Sensorstruktur 21 kann diese Vibrationen nicht notwendigerweise nachweisen. Um diese Vibrationen nachzuweisen, lässt sich eine optische Sonde 1 gemäß Figur 6 verwenden. In einer weiteren bevorzugten Ausführung (nicht dargestellt), kann die Sensorstruktur Bewegungen von mikro-elektro-mechanischen Systemen (MEMS), insbesondere eine Funktionalität von MEMS-Aktuatoren auf Wafer-Ebene, nachweisen.

Bezugszeichenliste

1	optische Sonde
10	Sondenkopf
11	Faserarray
12	optische Faser
13	Faserkern
14	optische Koppelstelle
15	Verstärkung
16	weiterer Sondenkopf
17	weitere optische Faser
18	Projektionslinie einer Facette
19	von der Projektionslinie der Facette aufgespanntes Volumen
20	mikrooptisches Element
21	Sensorstruktur
22	Ausrichtstruktur
23	reflektierende Fläche
24	refraktive Fläche
25	optischer Wellenleiter
26	Schutzstruktur
27	Kraftsensor
28	Sensorsignal zum Nachweis eines Objekts

29	Sensorsignal zum Nachweis einer Seitenwand
30	Sensorsignal zum Nachweis weiterer Strukturen
31	Sensorsignal zum Nachweis einer Bodenfläche einer Tiefätzung
32	Akzeptanzkonus
33	Sensorsignal zum Nachweis weiterer Strukturen in anderer Richtung
34	Sensorstruktur
35	Sensorstruktur
36	deformierte Schutzstruktur
37	Ruhelage der Schutzstruktur
38	Kragbalken (engl. <i>Cantilever</i>)
39	Sensorstruktur
40	Sensorsignal
41	Propagationsrichtung des Sensorsignals
50	mikrooptische Komponente
51, 52, 53	optische Koppelstelle der mikrooptischen Komponente
54	Gitterkoppler
55	Tiefätzung in einem Wafer
56	Element der mikrooptischen Komponente
57	Bodenfläche der Tiefätzung
58	Wellenleiter in der mikrooptischen Komponente
60	Wafer
61	weitere Komponente als Teil des Wafers
62	Bewegungsrichtung des Sondenkopfs
63	optische Faser
64	weitere optische Faser
100	Objekt
101	Seitenwand einer Tiefätzung
102	Facette der mikrooptischen Komponente
103	Facette des Sondenkopfs
104	Fase
200	Projektionsfläche
201	Breite einer Tiefätzung
202	Tiefe einer Tiefätzung
210	Senkrechte zur Oberfläche der mikrooptischen Komponente
211	Optische Achse des Sondenkopfs
212	Verkipfung des Sondenkopfs in Bezug auf die der mikrooptische Komponente
300	Lithographie-Objektiv

301	Fokus des Lithographie-Objektivs
302	lichthärtendes Material
303	vorgesehene Sensorstruktur
304	bereits hergestellter Teil der Sensorstruktur
401	Markerstruktur
501	Lichtquelle
502	Detektor
503	Licht zum Detektor propagierend
504	Licht vom Detektor kommend
505	Zirkulator oder Splitter
510	Normalisiertes Verhältnis aus der Menge an vom Detektor kommenden Lichts geteilt durch die Menge des zum Detektor propagierenden Lichts in Prozent
511	Länge einer Freistrahlstrecke eines Sensorsignals in Mikrometern
512	Abstand höchster Rückeinkopplung
517	weitere optische Faser
520, 520b	Teil der Sensorstruktur
521	Sensorsignal
522	weitere Sensorstruktur
523	Sensorsignal
530	Facette, die in einem Winkel zum Faserkern geschliffen wurde, der von 90° wesentlich, insbesondere mehr als 1°, abweicht
550	Winkel zwischen Faserkern und Facette
560	Position, die vom Abstand höchster Rückeinkopplung abweicht
601	an Facette reflektierter Lichtanteil
602	an mikrooptischer Komponente reflektierter Lichtanteil
603	an Kavität reflektierter Lichtanteil
610	Kavität
615	Lichtleistung
620	Periode
621	linearer Bereich für Messungen von Vibrationen
700	Aktuator

Patentansprüche

1. Optische Sonde (1), die zur optischen Kopplung an mindestens eine mikrooptische Komponente (50) eingerichtet ist, wobei die optische Sonde (1) umfasst:
 - 5 – einen Sondenkopf (10);
 - mindestens ein mikrooptisches Element (20), das eine mechanische Verbindung mit dem Sondenkopf (10) aufweist, und das dazu eingerichtet ist, eine optische Kopplung an die mindestens eine mikrooptische Komponente (50) herzustellen; und
 - 10 – mindestens eine von dem mindestens einen mikrooptischen Element (20) gesonderte Sensorstruktur (21), die dazu eingerichtet ist, ein Sensorsignal (40) zu erzeugen, das eine Positionierung des Sondenkopfs (10) relativ zu einem Objekt (100) anzeigtwobei das mindestens einen mikrooptischen Element (20) und/oder die mindestens eine
15 Sensorstruktur (21) mindestens ein fotohärtendes Material umfassen.
2. Optische Sonde (1) nach dem vorangehenden Anspruch, wobei die mindestens eine Sensorstruktur (21) ein optomechanisches Element, ein optisches Element oder ein mechanisches Element umfasst.
20
3. Optische Sonde (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die mindestens eine Sensorstruktur (21) eine Masse von höchstens 1 mg aufweist.
4. Optische Sonde (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei eine Genauigkeit
25 der Positionierung der mindestens einen Sensorstruktur (21) in Bezug auf das Objekt (100) höchstens 500 µm beträgt.
5. Optische Sonde (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die mindestens eine Sensorstruktur (21) dazu eingerichtet ist,
 - 30 – das Sensorsignal (40) als Funktion eines Abstandes des Sondenkopfs (10) zu dem Objekt (100) zu erzeugen;
 - einen Kontakt des mindestens einen mikrooptischen Elements (20) mit dem Objekt (100) anzuzeigen und/oder
 - eine Bewegung des Sondenkopfs (10) oder eines Teilbereichs davon anzuhalten
35 oder umzukehren und anschließend in eine von dem Objekt (100) beabstandete Position zu überführen.

- 5 6. Optische Sonde (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die mindestens eine Sensorstruktur (21) weiterhin dazu eingerichtet ist, ein weiteres Sensorsignal zu erzeugen, das eine Positionierung des Sondenkopfs (10) relativ zu der mindestens einen mikrooptischen Komponente (50) anzeigt.
7. Optische Sonde (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die mindestens eine Sensorstruktur (21) das mindestens eine fotohärtende Material umfasst.
- 10 8. Optische Sonde (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das mindestens einen mikrooptische Element (20) mindestens eine reflektierende Fläche (23) und mindestens eine refraktive Fläche (24) aufweist.
- 15 9. Optische Sonde (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der Sondenkopf (10) mindestens eine optische Faser (12) umfasst.
- 20 10. Optische Sonde (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Sensorstruktur (21) dazu eingerichtet ist, eine Vibrationsbewegung zwischen der mindestens einen mikrooptischen Komponente (50) und der optischen Sonde (1) nachzuweisen.
11. Optische Sonde (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche, umfassend mindestens einen weiteren Sondenkopf (16), der gleichzeitig mit dem Sondenkopf (10) zu der mindestens einen mikrooptischen Komponente (50) gekoppelt wird.
- 25 12. Verfahren zur Herstellung einer optischen Sonde (1), die zur optischen Kopplung an mindestens eine mikrooptische Komponente (50) eingerichtet ist, wobei das Verfahren (400) die folgenden Schritte umfasst:
- 30 a) Bereitstellen eines Sondenkopfs (10);
- b) Bereitstellen mindestens eines mikrooptischen Elements (20), das eine mechanische Verbindung mit dem Sondenkopf (10) aufweist, und das dazu eingerichtet ist, eine optische Kopplung an die mindestens eine mikrooptische Komponente (50) herzustellen; und
- 35 c) Erzeugen mindestens einer von dem mindestens einen mikrooptischen Element (20) gesonderten Sensorstruktur (21), die dazu eingerichtet ist, ein Sensorsignal (40) zu erzeugen, das eine Positionierung des Sondenkopfs (10) relativ zu einem Objekt (100) anzeigt,
- wobei das mindestens einen mikrooptische Element (20) und/oder die mindestens eine Sensorstruktur (21) mindestens ein fotohärtendes Material umfassen.

13. Verfahren nach dem vorangehenden Anspruch, wobei die mindestens eine Sensorstruktur (21) mittels eines direktschreibenden Verfahrens hergestellt wird.
- 5 14. Verfahren nach dem vorangehenden Anspruch, wobei das mindestens eine mikrooptische Element (20) ebenfalls mittels des direktschreibenden Verfahrens hergestellt wird.
15. Verfahren nach einem der vorangehenden Verfahrensansprüche, wobei das mindestens eine mikrooptische Element (20) und die mindestens eine Sensorstruktur (21) gemeinsam
10 mittels des direktschreibenden Verfahrens hergestellt werden.