



(10) **DE 10 2012 018 635 A1** 2014.03.27

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2012 018 635.5**

(22) Anmeldetag: **21.09.2012**

(43) Offenlegungstag: **27.03.2014**

(51) Int Cl.: **G03F 7/20 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**BIAS - Bremer Institut für angewandte
Strahltechnik GmbH, 28359, Bremen, DE;
Universität Bremen, 28359, Bremen, DE**

(74) Vertreter:

**ZACCO Dr. Peters und Partner, 28195, Bremen,
DE**

(72) Erfinder:

**Prof. Dr.-Ing. Lang, Walter, 28357, Bremen, DE;
Kropp, Miron, 10435, Berlin, DE; Bütters, Mike,
28213, Bremen, DE; Schröder, Martin, Dr., 28213,
Bremen, DE; Ralf, Bergmann, 28359, Bremen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**US 6 455 233 B1
US 7 023 530 B1
US 2002 / 0 122 255 A1
US 2009 / 0 047 485 A1
US 2010 / 0 027 956 A1**

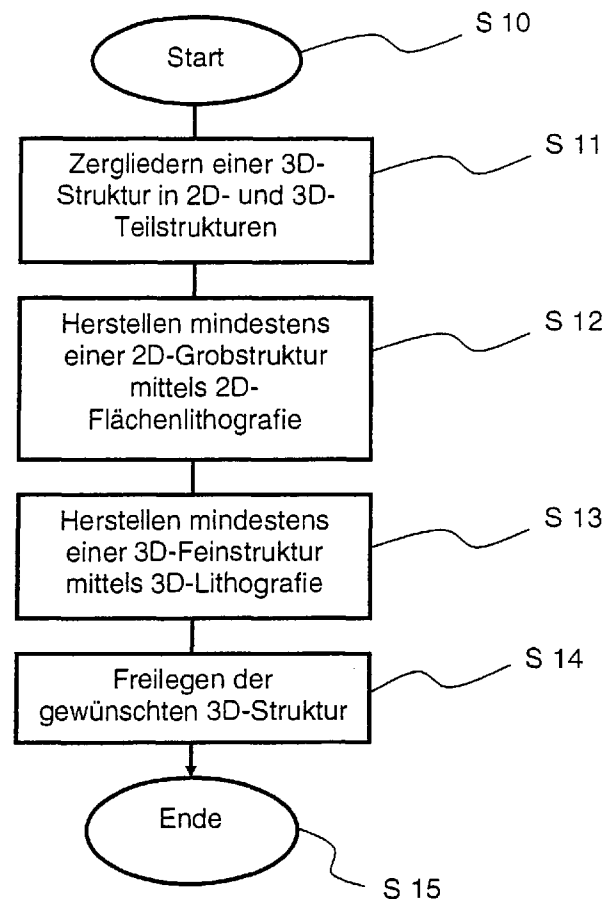
**Tormen, m. et al.: "Three-dimensional
micro- and nanostructuring by combination of
nanoimprint and x-ray lithography", J. Vac. Sci.
Technol. B 22(2), pp.766-770 (2004)**

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Herstellen einer 3D-Struktur**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen einer 3D-Struktur mittels einer Lithografie, bei dem mindestens eine Feinstruktur (20) der 3D-Struktur mittels einer 3D-Lithografie in ein lithografieempfindliches Material (11, 16, 25, 27) eingebracht wird. Um eine großflächige und hochauflösende 3D-Struktur mittels Lithografie in einer für die Massenfertigung geeigneten Zeit herzustellen, ist das Verfahren dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine Grobstruktur (15, 29, 30) der 3D-Struktur mittels einer 2D-Flächenlithografie in das lithografieempfindliche Material (11, 16, 25, 27) eingebracht wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen einer 3D-Struktur mittels einer Lithografie, bei dem mindestens eine Feinstruktur der 3D-Struktur mittels einer 3D-Lithografie in ein lithografieempfindliches Material eingebracht wird.

[0002] Ein derartiges Verfahren ist aus der DE 100 06 081 A1 bekannt. Hierbei wird ein dreidimensionales Laserlithografieverfahren als 3D-Lithografie genutzt, mit dem dreidimensionale Strukturen in eine Fotolackschicht eingebracht werden können.

[0003] Lithografische Verfahren werden insbesondere im Bereich der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik beispielsweise zur Herstellung von integrierten Schaltungen genutzt. Bei den bekannten 3D-Lithografien, insbesondere der 3D-Laserlithografie, ist von Vorteil, dass 3D-Strukturen mit einem hohen Auflösungsvermögen, insbesondere von 100 nm, herstellbar sind. Nachteilig ist jedoch, dass die Herstellung von 3D-Strukturen mit großen Volumen und/oder Flächen zeitaufwendig und kostenintensiv ist. Im Bereich der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik werden beispielsweise Flächen mit einem Durchmesser von bis zu 12 Zoll zur Herstellung von integrierten Schaltungen verarbeitet. Daher sind die bekannten 3D-Lithografieverfahren zum Herstellen von 3D-Strukturen aufgrund des zu großen Zeitaufwandes für die Massenfertigung bislang eher ungeeignet.

[0004] Daher werden für die Massenfertigung zumeist 2D-Flächenlithografieverfahren verwendet. Bei den 2D-Flächenlithografieverfahren, insbesondere der UV-Lithografie, handelt es sich im Wesentlichen um Planartechnologien, mit der sich im Wesentlichen oder ausschließlich zweidimensionale Strukturen erzeugen lassen. Hierbei ist jedoch von Vorteil, dass diese zweidimensionalen Strukturen mit einer hohen Genauigkeit auf einer großen Fläche, insbesondere mit einem Durchmesser von bis zu 12 Zoll, herstellbar sind. Insbesondere ist mittels einer Fotomaske eine zweidimensionale Struktur in kurzer Zeit, vorzugsweise in einem einzigen Arbeitsschritt, auf ein lithografieempfindliches Material übertragbar. Nachteilig ist hierbei jedoch, dass lediglich zweidimensionale Strukturen erzeugbar sind.

[0005] Im Rahmen der vorliegenden Erfindung ist unter einer zweidimensionalen Struktur, die mittels einer 2D-Flächenlithografie hergestellt wird, vorzugsweise eine Struktur zu verstehen, bei der das Material eine erste Materialebene und eine von der ersten Materialebene abweichende, insbesondere zur ersten Materialebene parallel verlaufende, zweite Materialebene aufweist. Zusätzlich können weitere Materialebenen vorgesehen sein. Vorzugsweise bilden die erste Materialebene, die zweite Materialebene und/oder die weiteren Materialebenen eine Oberflä-

che und/oder eine Oberflächenstrukturierung eines lithografieempfindlichen Materials. Demnach kann die 2D-Struktur als eine Oberflächenstruktur ausgebildet sein. Insbesondere ist eine zweidimensionale Struktur durch einen, insbesondere diskreten, Materialsprung von der ersten Materialebene zu der zweiten Materialebene und/oder zu den weiteren Materialebenen definiert. Somit kann sich eine zweidimensionale Struktur in einem Material ergeben, bei dem in der ersten Materialebene mindestens eine Nut angeordnet ist, wobei der Nutgrund der Nut die zweite Materialebene bestimmt. Alternativ kann sich eine zweidimensionale Struktur in einem Material ergeben, bei dem sich ausgehend von der ersten Materialebene mindestens ein Materialsteg, insbesondere rechtwinklig zur ersten Materialebene, erstreckt, wobei eine Stirnfläche des Materialstegs die zweite Materialebene bestimmt. Darüber hinaus kann eine zweidimensionale Struktur als eine, insbesondere wellenförmige, Oberflächenstrukturierung, ausgebildet sein. Vorzugsweise ist unter einer zweidimensionalen Struktur eine Struktur zu verstehen, die mittels einer Fotomaske herstellbar ist.

[0006] Im Gegensatz hierzu ist im Rahmen der vorliegenden Erfindung unter einer 3D-Struktur, die mittels mindestens eines Lithografieverfahrens hergestellt wird, eine Struktur in einem Material zu verstehen, bei der sich die Struktur in einer frei wählbaren Konfiguration innerhalb des Materials und/oder über frei wählbare Materialebenen erstrecken kann. Vorzugsweise ist eine 3D-Struktur durch einen kontinuierlichen, frei wählbaren Verlauf innerhalb des Materials definiert. Insbesondere ist eine 3D-Struktur unterhalb einer Oberfläche eines lithografieempfindlichen Materials in das lithografieempfindliche Material einbringbar. Eine 3D-Struktur kann mindestens eine Hinterschneidung aufweisen. Insbesondere ist das Auflösungsvermögen der 3D-Struktur kleiner als 1 μm , vorzugsweise kleiner als 150 nm, 100 nm oder 50 nm.

[0007] Es ist das der Erfindung zugrunde liegende Problem, ein Verfahren der eingangs genannten Art anzugeben, so dass eine großflächige und möglichst hochauflösende 3D-Struktur mittels Lithografie in einer für die Massenfertigung geeigneten Zeit auf effektive Weise herstellbar ist.

[0008] Das der Erfindung zugrunde liegende Problem wird mittels eines Verfahrens der eingangs genannten Art gelöst, wobei mindestens eine Grobstruktur der 3D-Struktur mittels einer 2D-Flächenlithografie in das lithografieempfindliche Material eingebracht wird.

[0009] Hierbei ist von Vorteil, dass die Vorzüge einer 2D-Flächenlithografie mit den Vorzügen einer 3D-Lithografie auf einfache und effektive Weise miteinander kombiniert werden. Die herzustellende 3D-Struktur wird hierzu insbesondere in Teilstrukturen unter-

teilt. Vorzugsweise stellt eine erste Teilstruktur die mindestens eine Grobstruktur dar. Diese, insbesondere zweidimensionale, Grobstruktur lässt sich mittels der 2D-Flächenlithografie auf einfache, effektive und zeitsparende Weise realisieren. Eine, insbesondere zweite, Teilstruktur stellt die mindestens eine Feinstruktur dar. Diese, insbesondere dreidimensionale, Feinstruktur ist mittels der 3D-Lithografie realisierbar. Insbesondere sind die Grobstruktur und die Feinstruktur unabhängig voneinander herstellbar. Hierdurch wird eine größere Flexibilität hinsichtlich einer Anpassung, Veränderung und/oder Ergänzung des gesamten Verfahrens erreicht. Die gewünschte 3D-Struktur ergibt sich aus einer Zusammensetzung der Grobstruktur und der Feinstruktur.

[0010] Vorzugsweise wird zunächst die Grobstruktur und anschließend die Feinstruktur realisiert. Alternativ kann aber auch zunächst die Feinstruktur und anschließend die Grobstruktur hergestellt werden. Vorzugsweise wird die zunächst hergestellte Grobstruktur und/oder Feinstruktur aufgrund der nachfolgend hergestellten Feinstruktur und/oder Grobstruktur verändert. Die gewünschte 3D-Struktur ergibt sich erst aufgrund der Kombination der Grobstruktur mit der Feinstruktur. Unter dem Herstellen einer Grobstruktur und Feinstruktur kann ein Einbringen und/oder Schreiben der Grobstruktur und/oder Feinstruktur in das lithografieempfindliche Material oder ein Aushärten oder Freilegen der Grobstruktur und/oder Feinstruktur verstanden werden. Vorzugsweise ist die Grobstruktur als eine Oberflächenstruktur ausgebildet.

[0011] Die gewünschte 3D-Struktur wird somit mittels mindestens einer 2D-Flächenlithografie und mindestens einer 3D-Lithografie hergestellt. Vorzugsweise sind mehrere 2D-Flächenlithografieverfahren und/oder mehrere 3D-Lithografieverfahren vorgesehen.

[0012] Im Rahmen der vorliegenden Erfindung steht die Abkürzung 3D für dreidimensional und die Abkürzung 2D für zweidimensional. Unter einem lithografieempfindlichen Material ist ein Material zu verstehen, das für das jeweilige Lithografieverfahren geeignet ist, wobei bei Anwendung des Lithografieverfahrens mindestens eine chemische und/oder physikalische Eigenschaft des lithografieempfindlichen Materials veränderbar ist. Aufgrund dieser Veränderung sind die mittels des Lithografieverfahrens festgelegten bzw. geschriebenen Strukturen, insbesondere Grobstrukturen und/oder Feinstrukturen, aufgrund einer Entwicklung frei legbar.

[0013] Nach einer weiteren Ausführungsform ist die Grobstruktur von einem Substrat und/oder sind mehrere Grobstrukturen voneinander aufgrund mindestens eines Trennbereiches in dem lithografieempfindlichen Material beabstandet. Vorzugsweise umfasst das lithografieempfindliche Material einen Bereich für

die mindestens eine Grobstruktur und einen weiteren Bereich als Trennbereich. Ein Trennbereich und/oder mindestens ein Teilbereich des Trennbereiches kann für die Herstellung einer Grobstruktur mittels der 2D-Flächenlithografie nicht nutzbar sein, da beispielsweise die Intensität einer Bestrahlung nicht ausreicht, um die für die Herstellung der Struktur erforderliche chemische und/oder physikalische Modifikation in dem lithografieempfindlichen Material herbeizuführen. Insbesondere wird mindestens eine Feinstruktur in mindestens einen Trennbereich in das lithografieempfindliche Material eingebracht. Vorzugsweise wird mittels der 3D-Lithografie eine Feinstruktur in mindestens einen Teilbereich des Trennbereiches eingebracht, der für die 2D-Flächenlithografie und die Herstellung einer Grobstruktur unzugänglich ist.

[0014] Vorzugsweise wird die Feinstruktur mit mindestens einer Grobstruktur verbunden. Hierdurch lässt sich die gewünschte 3D-Struktur und/oder eine gewünschte technische Funktionalität, insbesondere eine integrierte Schaltung, realisieren. Insbesondere werden aufgrund der Feinstruktur in dem Trennbereich die Grobstruktur mit dem Substrat und/oder mindestens zwei Grobstrukturen miteinander verbunden. Somit ergibt sich die gewünschte 3D-Struktur erst aufgrund der Kombination, der Verbindung und/oder des Zusammenwirkens der Grobstruktur und der Feinstruktur.

[0015] Gemäß einer Weiterbildung werden der Schritt der 2D-Flächenlithografie und der Schritt der 3D-Lithografie in beliebiger Reihenfolge, insbesondere mehrfach und/oder iterativ, nacheinander oder gleichzeitig durchgeführt. Hierdurch wird die Herstellung frei wählbarer 3D-Strukturen realisierbar. Vorzugsweise wird zunächst die 2D-Flächenlithografie zum Herstellen der mindestens einen Grobstruktur und nachfolgend die 3D-Lithografie zum Herstellen der mindestens einen Feinstruktur durchgeführt. Mit der 2D-Flächenlithografie wird die mindestens eine Grobstruktur auf einfache, schnelle und kostengünstige Weise hergestellt. Hiernach erfolgt die aufwendigere 3D-Lithografie lediglich an den Stellen, insbesondere innerhalb des lithografieempfindlichen Materials und/oder innerhalb der Grobstruktur, an denen dies notwendig ist, um aus der Kombination der mindestens einen Grobstruktur mit der mindestens einen Feinstruktur die gewünschte 3D-Struktur zu erhalten.

[0016] Vorzugsweise ist die 3D-Lithografie als eine Lichtstrahlithografie, insbesondere eine Laserlithografie, Elektronenstrahlithografie, IR-, UV- und/oder EUV-Lithografie, und/oder eine Teilchenstrahlithografie, insbesondere eine Elektronenstrahl- und/oder Ionenstrahlithografie, ausgebildet. Des Weiteren kann die 3D-Lithografie als eine holografisches Lithografieverfahren ausgebildet sein, wobei vorzugsweise mehrere Stellen innerhalb des lithografieempfindlichen Materials gleichzeitig belichtet und/

oder fokussiert werden. Hierbei steht IR für Infrarot, UV für Ultraviolett und EUV für Extremes Ultraviolett, insbesondere mit einer Wellenlänge von 13,5 nm. Insbesondere ist unter einer 3D-Lithografie ein Lithografieverfahren zu verstehen, mit dem eine 3D-Struktur herstellbar ist. Vorzugsweise ist die 3D-Lithografie derart ausgebildet, dass die Feinstruktur in das lithografieempfindliche Material mittels eines in einem Fokus fokussierten Strahls hergestellt wird. Hierdurch lässt sich innerhalb des lithografieempfindlichen Materials an einer frei wählbaren Stelle eine in Form und Gestalt frei wählbare Feinstruktur herstellen bzw. schreiben. Somit ist der Fokus, insbesondere in Abhängigkeit von der gewünschten lithografischen 3D-Struktur, an einer frei wählbaren Stelle innerhalb des lithografischen Materials einbringbar.

[0017] Nach einer weiteren Ausführungsform wird als 2D-Flächenlithografie eine Maskenlithografie und/oder eine optische Lithografie, insbesondere eine UV-Maskenlithografie und/oder UV-Lithografie, eingesetzt. Des Weiteren kann eine Elektronenstrahlithografie, Röntgenstrahlithografie, Graustufen-Lithografie, holografische Lithografie und/oder eine Ionenstrahlithografie als eine 2D-Flächenlithografie zum Herstellen einer, insbesondere zweidimensionalen, Grobstruktur verwendet werden. Insbesondere ist unter einer 2D-Flächenlithografie ein Verfahren zu verstehen, mit dem eine 2D-Struktur und/oder Oberflächenstruktur herstellbar ist. Vorzugsweise wird eine, insbesondere strukturierte, Fotomaske zum Herstellen der Grobstruktur eingesetzt. Mittels einer solchen Fotomaske ist eine durch die Struktur der Fotomaske vorgegebene zweidimensionale Struktur auf ein lithografieempfindliches Material zum Herstellen der Grobstruktur übertragbar. Vorzugsweise ist die Fotomaske als eine Quarzglasmaske ausgebildet.

[0018] Vorzugsweise erfolgt die 2D-Flächenlithografie und die 3D-Lithografie in demselben lithografieempfindlichen Material. Dies setzt voraus, dass das lithografieempfindliche Material sowohl für die eingesetzte 2D-Flächenlithografie als auch die 3D-Lithografie geeignet ist. In diesem Fall ist ein Austauschen des lithografieempfindlichen Materials zwischen der 2D-Flächenlithografie und der 3D-Lithografie vermeidbar, wodurch mindestens ein Arbeitsschritt vermieden wird und eine schnellere und kostengünstigere Herstellung der 3D-Struktur realisierbar ist. Dies setzt jedoch voraus, dass das lithografieempfindliche Material sowohl für die eingesetzte 2D-Flächenlithografie als auch die 3D-Lithografie geeignet ist. Vorzugsweise ist das lithografieempfindliche Material als ein, insbesondere bezüglich der 2D-Flächenlithografie und/oder 3D Lithografie empfindlicher, Fotolack, insbesondere als ein Positiv- oder Negativfotolack, ausgebildet. Insbesondere ist das lithografieempfindliche Material als ein Polymer, ein Epoxidharz, SU-8, Ormocere, Polydimethylsiloxan (PDMS) und/oder ein chalkogenides Glas ausgebildet.

[0019] Gemäß einer Weiterbildung wird eine Entwicklung durchgeführt, wobei aufgrund der Entwicklung die mittels der durchgeführten 2D-Flächenlithografie und/oder 3D Lithografie hergestellte Grobstruktur und/oder Feinstruktur ausgehärtet und/oder frei gelegt wird. Die Entwicklung kann während und/oder gleichzeitig mit dem Durchführen der 2D-Flächenlithografie und/oder 3D-Lithografie erfolgen. Insbesondere erfolgt die Entwicklung nach dem Schritt der durchgeführten 2D-Flächenlithografie und/oder 3D-Lithografie und vor dem Schritt der nachfolgenden 3D-Lithografie und/oder 2D-Flächenlithografie. Vorzugsweise erfolgt die Entwicklung nach einer 2D-Flächenlithografie und/oder 3D-Lithografie mittels einer Entwicklerflüssigkeit, insbesondere aufgrund eines Eintauchens des lithografieempfindlichen Materials in die Entwicklerflüssigkeit. Insbesondere erfolgt bei der Entwicklung ein Herauslösen der unbelichteten Bereiche bei Negativfotolacken bzw. der belichteten Bereiche bei Positivlacken durch ein geeignetes Lösungsmittel bzw. eine geeignete Entwicklerflüssigkeit.

[0020] Vorzugsweise wird zwischen dem Schritt der durchgeführten 2D-Flächenlithografie und/oder 3D-Lithografie und vor dem Schritt der nachfolgenden 3D-Lithografie und/oder 2D-Flächenlithografie eine neue Schicht eines lithografieempfindlichen Materials auf das Substrat, die bereits hergestellte Grobstruktur, die bereits hergestellte Feinstruktur und/oder das bereits vorhandene lithografieempfindliche Material aufgebracht. Das lithografieempfindliche Material der neuen Schicht für die nachfolgende 3D-Lithografie und/oder 2D-Flächenlithografie kann das gleiche lithografieempfindliche Material wie bei der zuvor durchgeführten 2D-Flächenlithografie und/oder 3D-Lithografie sein. Insbesondere wird durch das Auftragen der neuen Schicht auf eine bereits vorhandene lithografieempfindliche Materialschicht die Herstellung von Feinstrukturen und/oder Grobstrukturen über, auf, seitlich neben und/oder unter bereits hergestellten Grobstrukturen und/oder Feinstrukturen ermöglicht.

[0021] Nach einer weiteren Ausführungsform wird nach der 2D-Flächenlithografie und/oder der 3D-Lithografie ein Ätzverfahren, insbesondere ein nasschemisches, reaktives Ionenätzverfahren und/oder Trockenätzverfahren, durchgeführt. Vorzugsweise wird die Grobstruktur und/oder die Feinstruktur mittels des Ätzverfahrens in das Substrat und/oder ein, insbesondere auf dem Substrat aufgebrachtes, Strukturmaterial, insbesondere Siliziumdioxid, eingebracht. Insbesondere ist die gewünschte 3D-Struktur in das Substrat und/oder das Strukturmaterial einbringbar. Hierdurch lassen sich 3D-Strukturen in ein vom lithografieempfindlichen Material unabhängiges und/oder abweichendes Material einbringen.

[0022] Gemäß einer Weiterbildung wird die hergestellte Grobstruktur und/oder Feinstruktur, insbesondere nach dem Freilegen aufgrund einer Entwicklung und/oder in einer festen Verbindung mit dem Substrat, als eine Negativmaske eingesetzt. Vorzugsweise ist eine derartige Negativmaske und/oder Negativform im Rahmen einer Imprintlithografie und/oder Nanoprägelithografie verwendbar. Insbesondere wird die Negativmaske zum plastischen Abformen einer Negativstruktur und/oder Negativform in eine Schicht eines, insbesondere lithografieempfindlichen, Materials eingebracht. Somit wird zunächst eine Negativform der gewünschten Grobstruktur und/oder Feinstruktur hergestellt. Erst aufgrund einer plastischen Abformung der Negativform in einem geeigneten Material wird die Positivform der gewünschte Grobstruktur und/oder Feinstruktur erreicht. Hierbei ist von Vorteil, dass die Negativmaske mehrfach verwendbar ist, wodurch die Herstellung der 3D-Struktur zeitsparend und kostengünstiger realisierbar ist. Vorzugsweise wird nach dem Entfernen der Negativmaske in der zurückbleibenden Positivform und/oder Positivstruktur des lithografieempfindlichen Materials mindestens eine Grobstruktur und/oder eine Feinstruktur mittels einer 2D-Flächenlithografie und/oder einer 3D-Lithografie hergestellt.

[0023] Vorzugsweise wird eine lithografieempfindliche Materialschicht verwendet, wobei die Schichtdicke einer Schicht des lithografieempfindlichen Materials größer ist als eine maximale Eindringtiefe der Grobstruktur, die mittels der 2D-Flächenlithografie herstellbar ist. Insbesondere ist die maximale Eindringtiefe der Grobstruktur von der Intensität der Bestrahlung, insbesondere einer Flächenbestrahlung, abhängig. Die Intensität der Bestrahlung und/oder die, insbesondere maximale, Eindringtiefe kann mittels einer Steuerung steuerbar sein. Vorzugsweise wird in einem Trennbereich zwischen der Grobstruktur und dem Substrat die Feinstruktur mittels der 3D-Lithografie eingebracht. Insbesondere verbleibt aufgrund der maximalen Eindringtiefe für die Grobstruktur, die geringer ist als die Dicke der Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material, zwischen dem Substrat und der Grobstruktur ein Trennbereich aus dem lithografieempfindlichen Material. In diesen Trennbereich kann eine Feinstruktur, insbesondere zum Verbinden der Grobstruktur mit dem Substrat, und/oder eine zweite Grobstruktur einbringbar sein. Hierdurch sind beispielsweise integrierte Schaltungen mit einer größeren Schaltungsdicke und/oder Schaltungsdichte als bei der ausschließlichen Verwendung einer 2D-Flächenlithografie realisierbar.

[0024] Nach einer weiteren Ausführungsform wird ein transparentes Substrat verwendet, das mindestens auf einer Seite eine Schicht des lithografieempfindlichen Materials aufweist. Vorzugsweise wird die 2D-Flächenlithografie und/oder die 3D-Lithografie mindestens einmal durch das transparente Substrat

hindurch durchgeführt. Insbesondere ist das Substrat für die von der 3D-Lithografie und/oder 2D-Flächenlithografie verwendete elektromagnetische Strahlung transparent. Mindestens einmal kann die 2D-Flächenlithografie und/oder die 3D-Lithografie ausgehend von der dem transparenten Substrat abgewandten Seite des lithografieempfindlichen Materials durchgeführt wird. Somit kann eine Lithografieeinrichtung für die 2D-Flächenlithografie und/oder die 3D-Lithografie mindestens einmal dem transparenten Substrat und/oder mindestens einmal dem lithografieempfindlichen Material zugewandt sein. Insbesondere ist hierdurch das Einbringen von Grobstrukturen in das lithografieempfindliche Material auf zwei voneinander abgewandten Seiten des lithografieempfindlichen Materials realisierbar.

[0025] Gemäß einer Weiterbildung wird mindestens ein Ausrichtmarker zum Ausrichten einer Positioniereinrichtung, insbesondere für das Substrat und/oder eine Lithografieeinrichtung, verwendet. Insbesondere bei einem Wechsel zwischen zwei voneinander abweichenden Lithografieverfahren, vorzugsweise zwischen einer 2D-Flächenlithografie und einer 3D-Lithografie, muss die Lage der bereits hergestellten, geschriebenen und/oder belichteten Grobstrukturen und/oder Feinstrukturen detektiert werden. Vorzugsweise wird anhand des Ausrichtmarkers eine Verkipfung und/oder Verzehrung des Substrats, des lithografieempfindlichen Materials und/oder der bereits hergestellten bzw. geschriebenen Grobstrukturen und/oder Feinstrukturen detektiert. Eine detektierte Verkipfung und/oder Verzehrung kann mittels einer, insbesondere softwaregestützten, Steuerung für die Positioniereinrichtung ausgeglichen werden. Vorzugsweise sind mindestens zwei, insbesondere zweidimensional ausgebildete, Ausrichtmarker vorgesehen. Alternativ oder zusätzlich kann ein einzelner Ausrichtmarker eine dreidimensionale räumliche Struktur aufweisen, die ein Erfassen einer Verkipfung und/oder Verzehrung ermöglicht. Vorzugsweise weist das Substrat den Ausrichtmarker auf und/oder der Ausrichtmarker wird mittels der zuerst durchgeführten 2D-Flächenlithografie oder 3D-Lithografie hergestellt. Insbesondere kann der Ausrichtmarker als eine im Zusammenhang mit der 3D-Struktur technisch und/oder funktional verwendbare Teilstruktur ausgebildet sein.

[0026] Von besonderem Vorteil ist eine Vorrichtung zum Herstellen einer 3D-Struktur, insbesondere nach dem erfindungsgemäßen Verfahren, die eine 3D-Lithografieeinrichtung zum Einbringen mindestens einer Feinstruktur der 3D-Struktur mittels einer 3D-Flächenlithografie in ein lithografisches Material aufweist, und die eine 2D-Flächenlithografieeinrichtung zum Einbringen mindestens einer Grobstruktur der 3D-Struktur mittels einer 2D-Flächenlithografie in das lithografieempfindliche Material hat. Demnach sind in einer einzigen Vorrichtung eine 2D-Flächenlithogra-

fieeinrichtung und eine 3D-Lithografieeinrichtung gemeinsam angeordnet. Dies ermöglicht einen schnelleren und zeitsparenden Wechsel zwischen den verschiedenen Lithografieverfahren, wodurch die Herstellung der 3D-Struktur effizienter realisierbar ist. Alternativ oder zusätzlich ist hierdurch eine gleichzeitige Verwendung der 2D-Flächenlithografieeinrichtung und der 3D-Lithografieeinrichtung vereinfacht, Vorzugsweise ist die 2D-Flächenlithografieeinrichtung auf einer ersten Seite des Substrates und/oder des lithografieempfindlichen Materials zugeordnet. Die 3D-Lithografieeinrichtung kann einer von der ersten Seite abgewandten zweiten Seite des Substrates und/oder des lithografieempfindlichen Materials zugeordnet sein. Alternativ können die 2D-Lithografieeinrichtung und die 3D-Lithografieeinrichtung der gleichen Seite des Substrates und/oder des lithografieempfindlichen Materials zugeordnet sein.

[0027] Gemäß einer Weiterbildung weist die Vorrichtung eine Positioniereinrichtung zum Positionieren und/oder Ausrichten des Substrats, der 2D-Flächenlithografieeinrichtung und/oder der 3D-Lithografieeinrichtung, insbesondere bei einem Wechsel von der Verwendung der 2D-Flächenlithografieeinrichtung zu der 3D-Lithografieeinrichtung und/oder von der 3D-Lithografieeinrichtung zu der 2D-Flächenlithografieeinrichtung, auf. Die Positioniereinrichtung wirkt mit mindestens einem Ausrichtmarker zusammen, um die Lage des Substrates bzw. bereits hergestellter Strukturen in Bezug auf die Lage der 2D-Flächenlithografieeinrichtung und/oder 3D-Lithografieeinrichtung zu erfassen und/oder ändern zu können. Hierbei dient die Positioniereinrichtung insbesondere zum Kompensieren einer Verkippung bzw. Verzerrung.

[0028] Des Weiteren ist von besonderem Vorteil ein Substrat mit einer nach dem erfindungsgemäßen Verfahren und/oder der erfindungsgemäßen Vorrichtung hergestellten 3D-Struktur, wobei die 3D-Struktur mindestens eine mittels einer 2D-Flächenlithografie hergestellte Grobstruktur und mindestens eine mittels einer 3D-Lithografie hergestellte Feinstruktur aufweist, wobei sich die 3D-Struktur aus der zweidimensionalen Grobstruktur und der dreidimensionalen Feinstruktur zusammensetzt. Ein derartiges Substrat ist beispielsweise für die Realisierung integrierter Schaltungen in der Halbleiter- und/oder Mikrosystemtechnik geeignet. Hierbei sind 3D-Strukturen auf besonders kostengünstige und effiziente Weise herstellbar.

[0029] Nachfolgend wird die Erfindung anhand der Figuren näher erläutert. Es zeigen:

[0030] Fig. 1a und Fig. 1b schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines ersten erfindungsgemäßen Verfahrens,

[0031] Fig. 2a bis Fig. 2c schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines zweiten erfindungsgemäßen Verfahrens,

[0032] Fig. 3a bis Fig. 3d schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines dritten erfindungsgemäßen Verfahrens,

[0033] Fig. 4a bis Fig. 4d schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines vierten erfindungsgemäßen Verfahrens,

[0034] Fig. 5a und Fig. 5b schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines fünften erfindungsgemäßen Verfahrens,

[0035] Fig. 6a bis Fig. 6c schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines sechsten erfindungsgemäßen Verfahrens,

[0036] Fig. 7 einen schematisch dargestellten Verfahrensablauf eines weiteren erfindungsgemäßen Verfahrens, und

[0037] Fig. 8 eine schematische Seitendarstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung.

[0038] Fig. 1a und Fig. 1b zeigen schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines ersten erfindungsgemäßen Verfahrens. Hierbei wird gemäß Fig. 1a zunächst ein Substrat **10** bereitgestellt. Sodann wird auf einer Fläche, hier auf einer Oberseite, des Substrats **10** ein lithografieempfindliches Material **11** aufgebracht. Bei dem hier gezeigten Ausführungsbeispiel wird als lithografieempfindliches Material **11** ein Fotolack verwendet.

[0039] In einem nachfolgenden Schritt wird eine Fotomaske **12** auf die von dem Substrat **10** abgewandte Seite des lithografieempfindlichen Materials **11** angeordnet bzw. aufgelegt. Die Fotomaske **12** ist strukturiert und weist bei diesem Ausführungsbeispiel Spalten **13** auf. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist die Fotomaske **12** als eine Quarzglasmaske ausgebildet.

[0040] In einem folgenden Schritt wird die Fotomaske **12** mit einer Flächenbestrahlung **14** flächendeckend belichtet. Hierbei tritt die Flächenbestrahlung **14** durch die Spalten **13** der Fotomaske **12** hindurch. Bei diesem Ausführungsbeispiel durchdringt die Flächenbestrahlung **14** das lithografieempfindliche Material **11** bis zum Substrat **10**. Aufgrund der Flächenbestrahlung **14** wird das lithografieempfindliche Material **11** in dem aufgrund der Spalten **13** beleuchteten Bereich chemisch und/oder physikalisch verändert. Die beleuchteten und von der Flächenbestrahlung **14** durchdrungenen Bereiche in dem lithografieempfindlichen Material **11** bilden zweidimensionale Grobstrukturen **15**.

[0041] Somit wird gemäß diesem Ausführungsbeispiel zunächst eine 2D-Flächenlithografie durchgeführt, wobei es sich hier beispielhaft um eine UV-Maskenlithografie handelt, bei der eine UV-Bestrahlung als Flächenbestrahlung **14** eingesetzt wird.

[0042] Gemäß **Fig. 1b** wird nach der 2D-Flächenlithografie die Fotomaske **12** entfernt. Anschließend erfolgt eine 3D-Lithografie. Für die 3D-Lithografie wird gemäß diesem Ausführungsbeispiel dasselbe lithografieempfindliche Material **11** eingesetzt, wie für die 2D-Flächenlithografie. Dies setzt voraus, dass das lithografieempfindliche Material **11** sowohl für die eingesetzte 2D-Flächenlithografie als auch die 3D-Lithografie geeignet ist.

[0043] Darüber hinaus wird bei diesem Ausführungsbeispiel die Schichtdicke des lithografieempfindlichen Materials erhöht, indem nach dem Entfernen der Fotomaske **12** eine weitere Schicht des verwendeten lithografieempfindlichen Materials **11** auf das bereits vorhandene lithografieempfindliche Material **11** aufgebracht wird. Hierdurch ist mit der nachfolgenden 3D-Lithografie eine Feinstruktur **20** in einem von dem Substrat **20** abgewandten und einem freien Ende einer Grobstruktur **15** zugewandten Bereich herstellbar. Alternativ kann jedoch auch auf das Aufbringen der weiteren Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material **11** verzichtet werden.

[0044] Bei dem nachfolgenden Schritt der 3D-Lithografie wird gemäß **Fig. 1b** ein Lithografiestrah **17** in das lithografieempfindliche Material **11** eingebracht. Bei diesem Ausführungsbeispiel handelt es sich bei dem Lithografiestrah **17** um einen Laserstrahl zum Realisieren einer Zwei-Photonen-Laserlithografie. Hierbei wird ein Laserstrahl **17** in einem Fokus **18** innerhalb des lithografieempfindlichen Materials **11** fokussiert. Bei der hier eingesetzten Zwei-Photonen-Laserlithografie werden Laserimpulse mit einer Ein-Photonen-Energie unterhalb der Absorptionsschwelle des lithografieempfindlichen Materials **11** verwendet. Somit ist das lithografieempfindliche Material **11** für das verwendete Laserlicht transparent. Aufgrund der Fokussierung des Laserstrahls **17** im Fokus **18** werden im Fokus **18** jedoch Mehrphotonen-Absorptionsprozesse, zumeist Zwei-Photonen-Absorptionen, wahrscheinlich. Daher erfolgt im Bereich des Fokus **18** eine chemische und/oder physikalische Modifikation des lithografieempfindlichen Materials **11**.

[0045] Der Fokus **18** wird abhängig von der gewünschten 3D-Struktur bzw. Feinstruktur **20** in einer frei wählbaren Tiefe innerhalb des lithografieempfindlichen Materials **11** und in einen Trennbereich **19** zwischen, seitlich neben, über und/oder unter den Grobstrukturen **15** eingebracht. Mittels der 3D-Lithografie werden somit dreidimensionale Feinstrukturen **20** gebildet.

[0046] Bei dem hier gezeigten Ausführungsbeispiel wird hiernach eine in den Figuren nicht näher dargestellte Entwicklung durchgeführt, bei der die Grobstrukturen **15** und/oder Feinstrukturen **20** ausgehärtet werden und der nicht beleuchtete bzw. nicht chemisch und/oder physikalisch modifizierte Bereich des lithografieempfindlichen Materials **11** entfernt wird. Die Grobstrukturen **15** und die Feinstrukturen **20** bilden zusammen die gewünschte 3D-Struktur.

[0047] Alternativ zu dem vorstehend genannten Ausführungsbeispiel kann die Reihenfolge der 2D-Flächenlithografie und der 3D-Lithografie auch vertauscht sein, so dass zunächst die 3D-Lithografie und anschließend die 2D-Flächenlithografie durchgeführt werden. Darüber hinaus können die Schritte der 2D-Flächenlithografie und/oder der 3D-Lithografie mehrfach, insbesondere abwechselnd, hintereinander durchgeführt werden.

[0048] **Fig. 2a** bis **Fig. 2c** zeigen schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines zweiten erfindungsgemäßen Verfahrens. Dieses zweite erfindungsgemäße Verfahren entspricht weitgehend dem ersten erfindungsgemäßen Verfahren. Insoweit wird auch auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen.

[0049] Demnach erfolgt gemäß **Fig. 2a** eine 2D-Flächenlithografie zum Realisieren der Grobstrukturen **15**. Nach dem anschließenden Entfernen der Fotomaske **12** erfolgt eine hier nicht näher dargestellte erste Entwicklung, bei der der beleuchtete Bereich gemäß der Grobstrukturen **15** ausgehärtet wird und der nicht beleuchtete Bereich des lithografieempfindlichen Materials **11** entfernt wird.

[0050] Hierdurch ergibt sich gemäß **Fig. 2b** ein Substrat **10** mit zweidimensionalen Grobstrukturen **15**.

[0051] Anschließend wird ein weiteres lithografieempfindliches Material **16** auf das Substrat **10** und die Grobstrukturen **15** bedeckend aufgetragen, wie dies in **Fig. 2c** ersichtlich ist. Die lithografieempfindlichen Materialien **11** und **16** unterscheiden sich dahingehend, dass das Material **11** hinsichtlich der eingesetzten 2D-Flächenlithografie und das Material **16** hinsichtlich der im Folgenden eingesetzten 3D-Lithografie empfindlich bzw. geeignet ist.

[0052] Alternativ kann nach der Entwicklung der Grobstrukturen **15** erneut ein lithografieempfindliches Material **11** aufgebracht werden, sofern das lithografieempfindliche Material **11** sowohl für die eingesetzte 2D-Flächenlithografie als auch die 3D-Lithografie geeignet ist.

[0053] Hiernach erfolgt eine zweite Entwicklung, bei der die gewünschte 3D-Struktur frei gelegt wird, die aus den Grobstrukturen **15** und den Feinstrukturen **20** ausgebildet ist.

[0054] Fig. 3a bis Fig. 3d zeigen schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines dritten erfindungsgemäßen Verfahrens. Gleiche Merkmale wie zuvor tragen die gleichen Bezugszeichen. Insoweit wird auch auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen.

[0055] Wie gemäß den zuvor beschriebenen Verfahren wird nach Fig. 3a zunächst eine 2D-Flächenlithografie zur Herstellung von Grobstrukturen 15 durchgeführt. Allerdings ist bei diesem Ausführungsbeispiel zwischen dem Substrat 10 und der Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material 11 eine weitere Schicht aus einem Strukturmaterial 21 angeordnet. Bei diesem Ausführungsbeispiel handelt es sich bei dem Strukturmaterial 21 um Siliziumdioxid (SiO_2). Des Weiteren wird bei diesem Beispiel zunächst das Strukturmaterial 21 mittels einer chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) auf das Substrat 10 aufgebracht. Anschließend wird die Schicht mit dem lithografieempfindlichen Material 11 auf das Strukturmaterial 21 aufgebracht. Danach wird die Fotomaske 12 auf dem lithografieempfindlichen Material angeordnet. Bei der 2D-Flächenlithografie durchdringt der Lithografiestrahl 14 das lithografieempfindliche Material 11 bis zum Strukturmaterial 21.

[0056] Nach dem anschließenden Entfernen der Fotomaske 12 wird eine Entwicklung durchgeführt, um die Grobstrukturen 15 auf dem Strukturmaterial 21 frei zu legen. Hiernach folgt ein erstes Ätzverfahren, wodurch die Grobstrukturen 15 auf die Schicht des Strukturmaterials 21 übertragen werden, wie dies in Fig. 3b zu erkennen ist. Bei diesem Ausführungsbeispiel werden die Grobstrukturen 15 durch ein Trockenätzverfahren, hier beispielhaft ein reaktives Ionenätzen, auf das Strukturmaterial 21 übertragen.

[0057] Nach dem Entfernen der Grobstrukturen 15, die aus dem lithografieempfindlichen Material 11 erzeugt wurden, verbleiben nur noch die Grobstrukturen 15 im Bereich des Strukturmaterials 21. Gemäß Fig. 3c wird hiernach ein weiteres lithografieempfindliches Material 16 auf das Substrat 10 und die Grobstrukturen 15 aus dem Strukturmaterial 21 bedeckend aufgetragen. Die lithografieempfindlichen Materialien 11 und 16 unterscheiden sich dahingehend, dass das Material 11 hinsichtlich der eingesetzten 2D-Flächenlithografie und das Material 16 hinsichtlich der im Folgenden eingesetzten 3D-Lithografie empfindlich ist.

[0058] Alternativ kann nach der Entwicklung der Grobstrukturen 15 erneut ein lithografieempfindliches Material 11 aufgebracht werden, sofern das lithografieempfindliche Material 11 sowohl für die eingesetzte 2D-Flächenlithografie als auch die 3D-Lithografie geeignet ist.

[0059] Anschließend wird gemäß Fig. 3c eine 3D-Lithografie durchgeführt, wobei mittels des Lithografie-

strahls 17 eine 3D-Maskenstruktur 22 auf der Oberfläche des Substrats 10 und der Oberfläche der Grobstrukturen 15 geschrieben wird.

[0060] Hiernach erfolgt eine hier nicht näher dargestellte zweite Entwicklung, bei der die 3D Maskenstruktur 22 frei gelegt wird. Anschließend wird ein zweites Ätzverfahren durchgeführt, wodurch die gewünschten Feinstrukturen 20 in Verbindung mit den Grobstrukturen 15 erzeugt werden, um die sich aus den Grobstrukturen 15 und den Feinstrukturen 20 ergebende 3D-Struktur zu erhalten, wie dies in Fig. 3d gezeigt ist.

[0061] Fig. 4a bis Fig. 4d zeigen schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines vierten erfindungsgemäßen Verfahrens. Gleiche Merkmale wie zuvor tragen die gleichen Bezugszeichen. Insoweit wird auch auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen.

[0062] Gemäß Fig. 4a wird wie bei dem zuvor beschriebenen Verfahren zunächst eine 2D-Flächenlithografie durchgeführt, um Grobstrukturen 23 herzustellen. Zwischen dem Substrat 10 und der Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material 11 ist eine weitere Schicht aus einem Strukturmaterial 21 angeordnet, bei dem es sich hier beispielhaft um Siliziumdioxid (SiO_2) handelt. Bei der 2D-Flächenlithografie durchdringt die Flächenbestrahlung 14 das lithografieempfindliche Material 11 bis zum Strukturmaterial 21.

[0063] Nach dem anschließenden Entfernen der Fotomaske 12 wird eine Entwicklung durchgeführt, um die Grobstrukturen 23 auf dem Substratmaterial 21 frei zu legen. Hiernach folgt ein Ätzverfahren, wodurch die Grobstrukturen 23 auf die Schicht des Strukturmaterials 21 übertragen werden, wie dies in Fig. 4b zu erkennen ist. Bei diesem Ausführungsbeispiel werden die Grobstrukturen 23 durch ein Trockenätzverfahren, hier beispielhaft ein reaktives Ionenätzen, auf das Strukturmaterial 21 übertragen.

[0064] Nach dem Entfernen der Grobstrukturen 23, die aus dem lithografieempfindlichen Material 11 erzeugt wurden, verbleiben nur noch die Grobstrukturen 23 im Bereich des Strukturmaterials 21. Bei diesem Ausführungsbeispiel bilden die Grobstrukturen 23 aus dem Strukturmaterial 21 auf dem Substrat 10 eine Negativmaske 26 für die im Folgenden herzustellenden Grobstrukturen 15.

[0065] Hierzu wird gemäß Fig. 4c ein weiteres Substrat 24 bereit gestellt, auf dem ein lithografieempfindliches Material 25 aufgebracht wird. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist das lithografieempfindliche Material 25 als ein Polymer ausgebildet. Darüber hinaus ist das lithografieempfindliche Material 25 bei diesem Beispiel als ein positiver Fotolack ausgebildet. Aufgrund einer plastischen Abformung, hier beispielhaft

aufgrund eines Imprint-Verfahrens, der Negativmaske **26** in das lithografieempfindliche Material **25** werden die gewünschten Grobstrukturen **15** hergestellt.

[0066] Sodann wird gemäß **Fig. 4d** eine 3D-Lithografie durchgeführt, wobei mittels des Lithografiestrahls **17** die Feinstrukturen **20** in dem lithografieempfindlichen Material **25** der Grobstrukturen **15** eingebracht werden.

[0067] Es folgt eine hier nicht näher dargestellte Entwicklung, bei der die gewünschten Feinstrukturen **20** in Verbindung mit den Grobstrukturen **15** frei gelegt werden, um die sich aus den Grobstrukturen **15** und den Feinstrukturen **20** ergebende 3D-Struktur zu erhalten.

[0068] **Fig. 5a** und **Fig. 5b** zeigen schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines fünften erfindungsgemäßen Verfahrens. Dieses Verfahren entspricht weitgehend dem in den **Fig. 1a** bis **Fig. 1b** gezeigten Verfahren. Insoweit wird auch auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen.

[0069] Im Unterschied dazu ist hier jedoch eine Schicht aus einem lithografieempfindlichen Material **27** auf dem Substrat **10** aufgebracht. Bei diesem Ausführungsbeispiel wird die Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material **27** mit einer Dicke aufgetragen, so dass die Intensität der Flächenbestrahlung **14** nicht ausreicht, um die gesamte Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material **27** zu durchdringen. Hierdurch werden im Bereich der Spalten **13** der Fotomaske **12** Grobstrukturen **15** ausgebildet, die die Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material lediglich teilweise durchdringen. Hierbei erstrecken sich die Grobstrukturen **15** von der von dem Substrat **10** abgewandten Oberfläche des lithografieempfindlichen Materials **27** in Richtung des Substrats **10**. Zwischen den Grobstrukturen **15** und dem Substrat **10** verbleibt ein Trennbereich **19** aus dem lithografieempfindlichen Material **27**, wodurch eine Verbindung zwischen den Grobstrukturen **15** und dem Substrat **10** verhindert ist.

[0070] Alternativ kann die Eindringtiefe der Grobstrukturen **15** in das lithografieempfindliche Material **27** aufgrund einer hier nicht näher dargestellten Steuerung der Dosis und/oder der Intensität der Flächenbestrahlung **14**, hier beispielhaft der UV-Bestrahlung, gesteuert werden.

[0071] Hiernach erfolgt gemäß **Fig. 5b** eine 3D-Lithografie, bei der der Fokus **18** abhängig von der gewünschten 3D-Struktur in einer frei wählbaren Tiefe innerhalb des lithografieempfindlichen Materials **27** und in den Trennbereich **19** zwischen, seitlich neben, über und/oder unter den Grobstrukturen **15** eingebracht wird, um die gewünschten Feinstrukturen **20** zu schreiben. Hierbei ermöglicht die 3D-Lithografie

die Realisierung einer Strukturierung in einem Trennbereich **19** zwischen einer Grobstruktur **15** und dem Substrat **10**. Beispielsweise ist erst aufgrund der 3D-Lithografie eine Verbindung zwischen der Grobstruktur **15** und dem Substrat **10** mittels einer Feinstruktur **20** herstellbar.

[0072] Anschließend wird eine hier nicht näher dargestellte Entwicklung durchgeführt, bei der die Grobstrukturen **15** und Feinstrukturen **20** ausgehärtet und frei gelegt werden und der nicht beleuchtete bzw. nicht chemisch und/oder physikalisch modifizierte Bereich des lithografieempfindlichen Materials **27** entfernt wird. Die Grobstrukturen **15** und die Feinstrukturen **20** bilden zusammen die gewünschte 3D-Struktur.

[0073] **Fig. 6a** bis **Fig. 6c** zeigen schematisch dargestellte Verfahrensschritte eines sechsten erfindungsgemäßen Verfahrens. Gleiche Merkmale wie zuvor tragen die gleichen Bezugszeichen. Insoweit wird auch auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen.

[0074] Gemäß **Fig. 6a** erfolgt zunächst eine 2D-Flächenlithografie. Hierbei wird ein transparentes Substrat **28** eingesetzt, auf dem die Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material **27** aufgebracht ist.

[0075] Nach diesem Ausführungsbeispiel wird die Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material **27** mit einer Dicke aufgetragen, so dass die Intensität der Flächenbestrahlung **14** nicht ausreicht, um die gesamte Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material **27** zu durchdringen. Hierdurch werden im Bereich der Spalten **13** einer ersten Fotomaske **31** erste Grobstrukturen **29** ausgebildet, die die Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material **27** lediglich teilweise durchdringen. Hierbei sind die ersten Grobstrukturen **29** auf einer von dem transparenten Substrat **28** abgewandten Seite angeordnet. Zwischen den ersten Grobstrukturen **29** und dem transparenten Substrat **28** verbleibt bei diesem Ausführungsbeispiel ein Trennbereich **19** aus dem lithografieempfindlichen Material **27**, wodurch eine Verbindung zwischen den Grobstrukturen **15** und dem Substrat **10** verhindert ist. Hiernach wird die erste Fotomaske **31**, die auf einer von dem transparenten Substrat **28** abgewandten Seite der Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material **27** angeordnet ist, entfernt.

[0076] Sodann wird gemäß **Fig. 6b** eine zweite Fotomaske **32** auf einer von der Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material **27** abgewandten Seite des transparenten Substrats aufgebracht. Anschließend erfolgt eine weitere 2D-Flächenlithografie, bei der der Lithografiestrahl **14** nach dem Passieren der Spalten **13** der zweiten Fotomaske **32** das transparente Substrat **28** durchdringt und mindestens teils-

weise in das lithografieempfindliche Material **27** eindringt. Hierdurch werden zweite Grobstrukturen **30** gebildet. Alternativ können die ersten Grobstrukturen **29** und die zweiten Grobstrukturen **30** gleichzeitig hergestellt werden.

[0077] Die zweiten Grobstrukturen **30** durchdringen das lithografieempfindliche Material **27** ebenfalls lediglich teilweise, wobei die zweiten Grobstrukturen **30** auf einer dem transparenten Substrat **28** zugewandten Seite angeordnet sind. Bei diesem Ausführungsbeispiel verbleibt zwischen den ersten Grobstrukturen **29** und den zweiten Grobstrukturen **30** ein Trennbereich **19** aus dem lithografieempfindlichen Material **27**, wodurch eine Verbindung zwischen den ersten und zweiten Grobstrukturen **29, 30** verhindert ist.

[0078] Alternativ und/oder zusätzlich kann die Eindringtiefe der ersten Grobstrukturen **29** und/oder der zweiten Grobstrukturen **30** in das lithografieempfindliche Material **27** aufgrund einer Steuerung der Dosis und/oder der Intensität der Flächenbestrahlung **14**, hier beispielhaft der UV-Bestrahlung, gesteuert werden.

[0079] Hiernach erfolgt nach **Fig. 6c** eine 3D-Lithografie, bei der der Fokus **18** abhängig von der gewünschten 3D-Struktur in einer frei wählbaren Tiefe innerhalb des lithografieempfindlichen Materials **27** und in den Trennbereich **19** zwischen, seitlich neben, über und/oder unter den ersten und zweiten Grobstrukturen **29, 30** eingebracht wird, um die gewünschten Feinstrukturen **20** zu schreiben. Hierbei ermöglicht die 3D-Lithografie die Realisierung einer Strukturierung in einem Trennbereich **19** zwischen der einer ersten Grobstruktur **29** und einer zweiten Grobstruktur **30**. Hierdurch ist eine Verbindung zwischen den ersten und zweiten Grobstrukturen und dem transparenten Substrat **28** herstellbar.

[0080] Anschließend wird eine hier nicht näher dargestellte Entwicklung durchgeführt, bei der die ersten und zweiten Grobstrukturen **29, 30** sowie die Feinstrukturen **20** frei gelegt werden und der nicht beleuchtete bzw. nicht chemisch und/oder physikalisch modifizierte Bereich des lithografieempfindlichen Materials **27** entfernt wird. Die ersten und zweiten Grobstrukturen **29, 30** bilden zusammen mit den Feinstrukturen **20** die gewünschte 3D-Struktur.

[0081] **Fig. 7** zeigt einen schematisch dargestellten Verfahrensablauf eines weiteren erfindungsgemäßen Verfahrens. Hierbei umfasst dieses weitere Verfahren die zuvor beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren. Insoweit wird auch auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen.

[0082] Nach dem Start des Verfahrens in Schritt S10 wird einem vorbereitenden Schritt S11 die gewünschte 3D-Struktur in Teilstrukturen zergliedert. Diese

Zergliederung kann mittels eines softwaregestützten Rechners erfolgen. Hierbei wird die 3D-Struktur als eine 3D-Gesamtstruktur aufgefasst, die einerseits in mindestens eine 2D-Teilstruktur bzw. zweidimensionale Grobstruktur und andererseits in mindestens eine 3D-Teilstruktur bzw. dreidimensionale Feinstruktur zergliedert wird.

[0083] Sodann erfolgt gemäß Schritt S12 die Herstellung der mindestens einen 2D-Grobstruktur mittels einer 2D-Flächenlithografie. Anschließend wird gemäß Schritt S13 mindestens eine 3D-Feinstruktur mittels einer 3D-Lithografie durchgeführt. Alternativ kann die Reihenfolge der Schritte S12 und S13 vertauscht sein, so dass zunächst die 3D-Feinstruktur und anschließend die 2D-Grobstruktur hergestellt wird. Schließlich wird die gewünschte, sich aus der 2D-Feinstruktur und der 3D-Grobstruktur ergebende, 3D-Gesamtstruktur gemäß Schritt S14 frei gelegt, um das Verfahren anschließend gemäß Schritt S15 zu beenden.

[0084] Bei sämtlichen zuvor beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren erfolgt nach der Durchführung der ersten Lithografie zur Herstellung der Grobstrukturen **15, 29, 30** oder der Feinstrukturen **20** eine Detektierung der bereits belichteten Bereiche und/oder der bereits hergestellten Grobstrukturen **15, 23, 29, 30** oder Feinstrukturen **20**. Die hinreichende Detektierung und Erfassung der bereits hergestellten Grobstrukturen **15, 23, 29, 30** oder Feinstrukturen **20** ist notwendig, um bei der jeweils nachfolgenden Lithografie die für die Herstellung der gewünschten 3D-Struktur noch fehlenden Feinstrukturen **20** oder Grobstrukturen **15, 23, 29, 30** an den vorgesehenen Stellen herzustellen.

[0085] Für die Detektierung wird ein hier nicht näher dargestellter Ausrichtmarker verwendet. Der Ausrichtmarker dient zum Detektieren der bereits hergestellten Grobstrukturen **15, 23, 29, 30** oder Feinstrukturen **20** sowie zum Feststellen einer möglichen Verkipfung und/oder Verzerrung des Substrats **10, 28** und der diesem zugeordneten Grobstrukturen **15, 23, 29, 30** oder Feinstrukturen **20**. Mittels des Ausrichtmarkers wird eine ebenfalls nicht näher dargestellte Positioniereinrichtung ausgerichtet. Bei den hier gezeigten Ausführungsbeispielen wird der Lithografiestrahlführung **14** mittels einer softwaregestützten Steuerung einer Lithografiestrahlführung, hier einer Laserstrahlführung, ausgerichtet bzw. positioniert und eine etwaige Verkipfung und/oder Verzerrung kompensiert.

[0086] In Ergänzung zu den zuvor beschriebenen Ausführungsformen ist es auch denkbar, dass Verfahrensschritte der einzelnen Ausführungsformen in frei wählbarer Art miteinander kombiniert und/oder mehrfach nacheinander ausgeübt werden können. Des Weiteren ist eine Kombination mit weiteren be-

kannten Lithografieverfahren, wie beispielsweise der e/i-Beam-Lithografie und/oder einem Imprint-Verfahren möglich, Ergänzend kann eine Galvanik, ein Lift-off-Verfahren und/oder eine Nanodeposition durchgeführt werden.

[0087] Sofern nicht anders angegeben werden in den beschriebenen Ausführungsformen negative Fotolacke als lithografieempfindliche Materialien **11**, **16**, **25**, **27** verwendet. Bei diesen Negativlacken wird mindestens eine chemische und/oder physikalische Eigenschaft des Fotolacks derart verändert, dass die beleuchteten Bereiche bei einer Entwicklung freigelegt werden. Alternativ oder ergänzend kann ein positiver Fotolack als lithografieempfindliches Material **11**, **16**, **25** und/oder **27** verwendet werden. Bei derartigen Positivlacken wird mindestens eine chemische und/oder physikalische Eigenschaft des Fotolacks derart verändert, dass die nicht beleuchteten Bereiche aufgrund einer Entwicklung frei gelegt werden.

[0088] Fig. 8 zeigt eine schematische Seitendarstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung **33**. Die Vorrichtung **33** ist geeignet sämtliche vorstehend beschriebenen Verfahren durchzuführen. Insoweit wird auch auf die vorangegangene Beschreibung verwiesen.

[0089] Die Vorrichtung **33** weist eine Lithografieeinrichtung **35** auf. Die Lithografieeinrichtung **35** umfasst eine 2D-Flächenlithografieeinrichtung **36** und eine 3D Lithografieeinrichtung **37**. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist mittels der 2D-Flächenlithografieeinrichtung **36** ein UV-Maskenlithografieverfahren und mittels der 3D-Lithografieeinrichtung ein Laserlithografieverfahren durchführbar. Weiter umfasst die Vorrichtung **33** eine Positioniereinrichtung **38**, die eine in sämtlichen Raumrichtungen frei wählbare Änderung der Lage und Neigung des Substrates **10** bzw. des Substrattisches **34** in Bezug zu der Lithografieeinrichtung **35** ermöglicht. Hierzu ist die Lithografieeinrichtung **35** mit hier nicht näher dargestellten Erfassungsmitteln ausgestattet, die die Lage und/oder Position von Ausrichtmarkern **39**, **40** erfassen. Bei diesem Ausführungsbeispiel sind die Ausrichtmarker **39**, **40** in die Schicht eines lithografieempfindlichen Materials **11** eingebracht. Alternativ können die Ausrichtmarker **39**, **40** einem Substrat **10** und/oder einem Substrattisch **34** zugeordnet sein. Hier ist auf dem Substrattisch **34** das Substrat **10** angeordnet, wobei auf dem Substrat **10** die Schicht aus dem lithografieempfindlichen Material **11** angeordnet ist.

[0090] Bei diesem Ausführungsbeispiel weist die Vorrichtung **33** eine Steuerung **41** auf, die die erfasste Lage der Ausrichtmarker **39**, **40** in Bezug zur Lage der Lithografieeinrichtung **35** und des Substrates **10** bzw. dem Substrattisch **34** auswertet und gegebenenfalls die Positioniereinrichtung **38** anweist, die

Lage des Substrates **10** bzw. des Substrattisches **34** zu verändern. Hierzu ist die Steuerung **41** mittels einer Leitung **42** mit den Erfassungsmitteln der Lithografieeinrichtung **35** und mittels einer Leitung **43** mit der Positioniereinrichtung **38** verbunden.

[0091] Alternativ zu der hier dargestellten Ausführungsform der Lithografieeinrichtung **35** kann diese derart ausgebildet sein, dass die 2D-Flächenlithografieeinrichtung **36** einer ersten Seite des Substrates **10** bzw. des lithografieempfindlichen Materials **11** zugewandt und die 3D-Lithografieeinrichtung **37** einer von der ersten Seite abgewandten zweiten Seite des Substrates **10** bzw. des lithografieempfindlichen Materials **11** zugewandt ist. Vorzugsweise ist in diesem Fall der Substrattisch **34** für die 2D-Flächenlithografie und/oder die 3D-Lithografie transparent ausgebildet, so dass zwei Lithografieverfahren von zwei Seiten des lithografieempfindlichen Materials **11** gleichzeitig durchführbar sind.

Bezugszeichenliste

10	Substrat
11	Lithografieempfindliches Material
12	Fotomaske
13	Spalte
14	Flächenbestrahlung
15	Grobstruktur
16	Lithografieempfindliches Material
17	Lithografiestrahle
18	Fokus
19	Trennbereich
20	Feinstruktur
21	Strukturmaterial
22	3D-Maskenstruktur
23	Grobstruktur
24	Weiteres Substrat
25	Lithografieempfindliches Material
26	Negativmaske
27	Lithografieempfindliches Material
28	Transparentes Substrat
29	Erste Grobstruktur
30	Zweite Grobstruktur
31	Erste Fotomaske
32	Zweite Fotomaske
33	Vorrichtung
34	Substrattisch
35	Lithografieeinrichtung
36	2D-Flächenlithografieeinrichtung
37	3D-Lithografieeinrichtung
38	Positioniereinrichtung
39	Ausrichtmarker
40	Ausrichtmarker
41	Steuerung
42	Leitung
43	Leitung
S10	Start
S11	Zergliedern einer 3D-Struktur

- S12** Herstellen einer 2D-Grobstruktur
- S13** Herstellen einer 3D-Feinstruktur
- S14** Freilegen der 3D-Struktur
- S15** Ende

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 10006081 A1 [0002]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen einer 3D-Struktur mittels einer Lithografie, bei dem mindestens eine Feinstruktur (20) der 3D-Struktur mittels einer 3D-Lithografie in ein lithografieempfindliches Material (11, 16, 25, 27) eingebracht wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens eine Grobstruktur (15, 29, 30) der 3D-Struktur mittels einer 2D-Flächenlithografie in das lithografieempfindliche Material (11, 16, 25, 27) eingebracht wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Grobstruktur (15, 29, 30) von einem Substrat (10, 24, 28) und/oder mehrere Grobstrukturen (15, 29, 30) voneinander aufgrund mindestens eines Trennbereiches (19) in dem lithografieempfindlichen Material (11, 16, 25, 27) beabstandet sind, wobei vorzugsweise mindestens eine Feinstruktur (20) in mindestens einen Trennbereich (19) in das lithografieempfindliche Material (11, 16, 25, 27) eingebracht wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Feinstruktur (20) mit mindestens einer Grobstruktur (15, 29, 30) verbunden wird, wobei vorzugsweise aufgrund der Feinstruktur (20) in dem Trennbereich (19) die Grobstruktur (15, 29, 30) mit dem Substrat (10, 24, 28) und/oder mindestens zwei Grobstrukturen (15, 29, 30) miteinander verbunden werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Schritt der 2D-Flächenlithografie und der Schritt der 3D-Lithografie in beliebiger Reihenfolge, insbesondere mehrfach und/oder iterativ, nacheinander oder gleichzeitig durchgeführt werden, wobei vorzugsweise zunächst die 2D-Flächenlithografie zum Herstellen der mindestens einen Grobstruktur (15, 29, 30) und nachfolgend die 3D-Lithografie zum Herstellen der mindestens einen Feinstruktur (20) durchgeführt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als 3D-Lithografie eine Lichtstrahlithografie, insbesondere eine Laserlithografie, Elektronenstrahlithografie, IR-, UV- und/oder EUV-Lithografie, und/oder eine Teilchenstrahlithografie, insbesondere eine Elektronenstrahl- und/oder Ionenstrahlithografie, eingesetzt wird, wobei vorzugsweise die Feinstruktur (20) in das lithografieempfindliche Material (11, 16, 25, 27) mittels eines in einem Fokus (18) fokussierten Strahls (17) hergestellt wird, wobei der Fokus (18), insbesondere in Abhängigkeit von der gewünschten 3D-Struktur, an einer frei wählbaren Stelle innerhalb des lithografischen Materials (11, 16, 25, 27) eingebracht wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als 2D-Flä-

chenlithografie eine Maskenlithografie und/oder eine optische Lithografie, insbesondere eine UV-Maskenlithografie und/oder UV-Lithografie, eingesetzt wird, wobei vorzugsweise eine Fotomaske (12) verwendet wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die 2D-Flächenlithografie und die 3D-Lithografie mittels des selben lithografieempfindlichen Materials (11, 16, 25, 27) erfolgt, wobei vorzugsweise das lithografieempfindliche Material (11, 16, 25, 27) als ein, insbesondere bezüglich der 2D-Flächenlithografie und/oder 3D-Lithografie empfindlicher, Fotolack, insbesondere als ein Positiv- oder Negativfotolack, ausgebildet ist.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass nach dem Schritt der durchgeführten 2D-Flächenlithografie und/oder 3D-Lithografie und vor dem Schritt der nachfolgenden 3D-Lithografie und/oder 2D-Flächenlithografie eine Entwicklung durchgeführt wird, wobei aufgrund der Entwicklung die mittels der durchgeführten 2D-Flächenlithografie und/oder 3D-Lithografie hergestellte Grobstruktur (15, 29, 30) und/oder Feinstruktur (20) frei gelegt wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen dem Schritt der durchgeführten 2D-Flächenlithografie und/oder 3D-Lithografie und vor dem Schritt der nachfolgenden 3D-Lithografie und/oder 2D-Flächenlithografie eine neue Schicht eines lithografieempfindlichen Materials (11, 16, 25, 27) auf das Substrat (10, 24, 28), die bereits hergestellte Grobstruktur (15, 29, 30), die bereits hergestellte Feinstruktur (20) und/oder das bereits vorhandene lithografieempfindliche Material (11, 16, 25, 27) aufgebracht wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass nach der 2D-Flächenlithografie und/oder der 3D-Lithografie ein Ätzverfahren, insbesondere ein nasschemisches, reaktives Ionenätzverfahren und/oder Trockenätzverfahren, durchgeführt wird, wobei vorzugsweise die Grobstruktur (15, 29, 30) und/oder die Feinstruktur (20) mittels des Ätzverfahrens in das Substrat (10, 24, 28) und/oder ein, insbesondere auf dem Substrat (10, 24, 28) aufgebrachtes, Strukturmaterial (21), insbesondere Siliziumdioxid, eingebracht wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die hergestellte Grobstruktur (15, 29, 30) und/oder Feinstruktur (20), insbesondere nach dem Freilegen aufgrund einer Entwicklung und/oder in einer festen Verbindung mit dem Substrat (10, 24, 28), als eine Negativmaske (26) eingesetzt wird, wobei vorzugsweise die Negativmaske (26) zum plastischen Abformen einer Negativstruktur in eine Schicht eines, insbesondere litho-

grafieempfindlichen, Materials (11, 16, 25, 27) eingebracht wird, und vorzugsweise nach dem Entfernen der Negativmaske (26) in der zurückbleibenden Positivstruktur des lithografieempfindlichen Materials (11, 16, 25, 27) mindestens eine Grobstruktur (15, 29, 30) und/oder eine Feinstruktur (20) mittels einer 2D-Flächenlithografie und/oder einer 3D-Lithografie hergestellt wird.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine lithografieempfindliche Materialschicht (11, 16, 25, 27) verwendet wird, wobei die Schichtdicke einer Schicht des lithografieempfindlichen Materials (11, 16, 25, 27) größer ist als eine maximale Eindringtiefe der Grobstruktur (15, 29, 30), die mittels der 2D-Flächenlithografie hergestellt wird, wobei vorzugsweise in einem Trennbereich (19) zwischen der Grobstruktur (15, 29, 30) und dem Substrat (10, 24, 28) die Feinstruktur (20) mittels der 3D-Lithografie eingebracht wird.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein transparentes Substrat (28) verwendet wird, das mindestens auf einer Seite eine Schicht des lithografieempfindlichen Materials (11, 16, 25, 27) aufweist, wobei vorzugsweise die 2D-Flächenlithografie und/oder die 3D-Lithografie mindestens einmal durch das transparente Substrat (28) hindurch und mindestens einmal ausgehend von der dem transparenten Substrat (28) abgewandten Seite des lithografieempfindlichen Materials (11, 16, 25, 27) durchgeführt wird.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens ein Ausrichtmarker zum Ausrichten einer Positioniereinrichtung, insbesondere für das Substrat (10, 24, 28) und/oder eine Lithografieeinrichtung, verwendet wird, wobei vorzugsweise das Substrat (10, 24, 28) den Ausrichtmarker aufweist und/oder der Ausrichtmarker, insbesondere als eine im Zusammenhang mit der 3D-Struktur technisch und/oder funktional verwendbare Teilstruktur, mittels der zuerst durchgeführten 2D-Flächenlithografie oder 3D-Lithografie hergestellt wird.

15. Vorrichtung zum Herstellen einer 3D-Struktur, insbesondere nach einem Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine 3D-Lithografieeinrichtung (37) zum Einbringen mindestens einer Feinstruktur (20) der 3D-Struktur mittels einer 3D-Flächenlithografie in ein lithografisches Material (11, 16, 25, 27) vorgesehen ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine 2D-Flächenlithografieeinrichtung (36) zum Einbringen mindestens einer Grobstruktur (15, 29, 30) der 3D-Struktur mittels einer 2D-Flächenlithografie in das lithografieempfindliche Material (11, 16, 25, 27) vorgesehen ist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Positioniereinrichtung (38) zum Positionieren und/oder Ausrichten des Substrats (10, 24, 28), der 2D-Flächenlithografieeinrichtung (36) und/oder der 3D-Lithografieeinrichtung (37), insbesondere bei einem Wechsel von der Verwendung der 2D-Flächenlithografieeinrichtung (36) zu der 3D-Lithografieeinrichtung (37) und/oder von der 3D-Lithografieeinrichtung (37) zu der 2D-Flächenlithografieeinrichtung (36), vorgesehen ist.

17. Substrat mit einer nach dem Verfahren gemäß einem Ansprüche 1 bis 14 und/oder der Vorrichtung nach einem der Ansprüche 15 oder 16 lithografisch hergestellten 3D-Struktur, wobei die 3D-Struktur mindestens eine mittels einer 2D-Flächenlithografie hergestellte Grobstruktur (15, 29, 30) und mindestens eine mittels einer 3D-Lithografie hergestellte Feinstruktur (20) aufweist, wobei sich die 3D-Struktur aus der zweidimensionalen Grobstruktur (15, 29, 30) und der dreidimensionalen Feinstruktur (20) zusammensetzt.

Es folgen 10 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

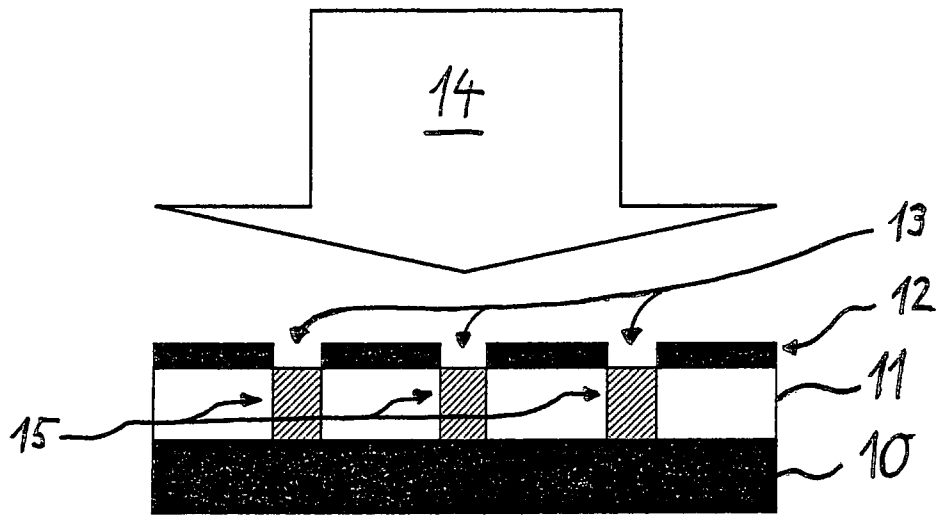


Fig. 1a

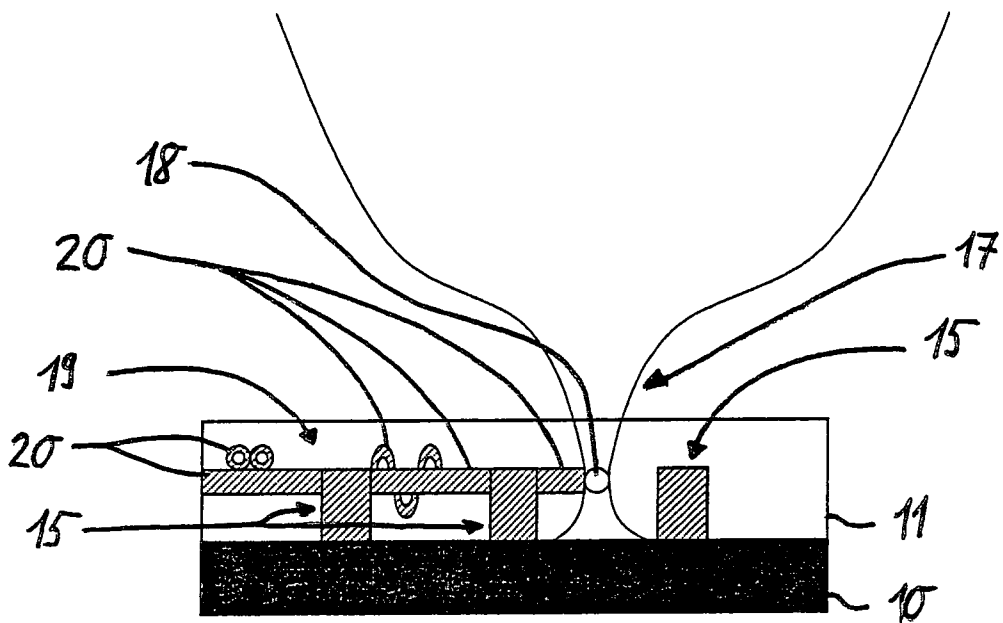


Fig. 1b

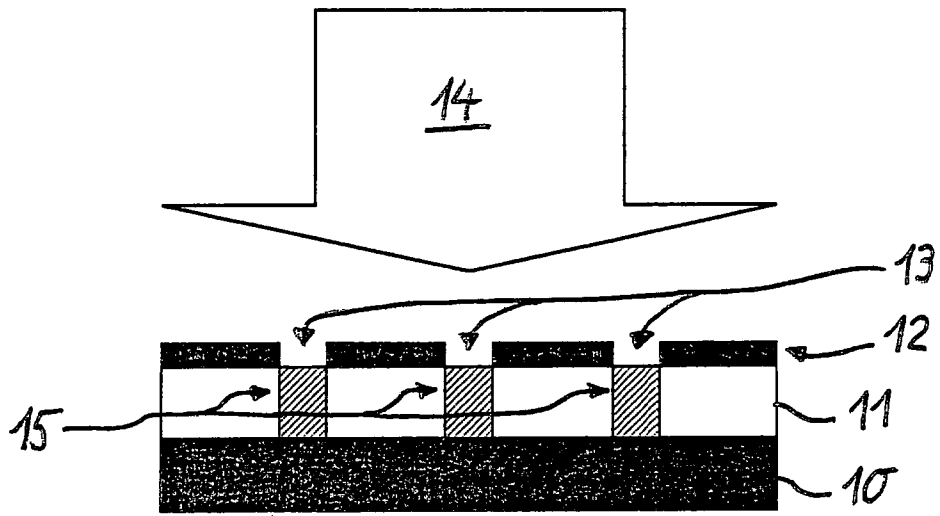


Fig. 2a

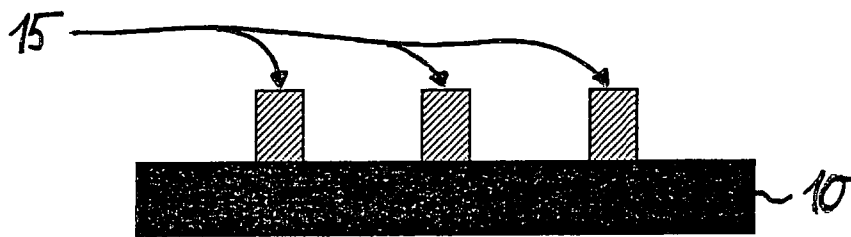


Fig. 2b

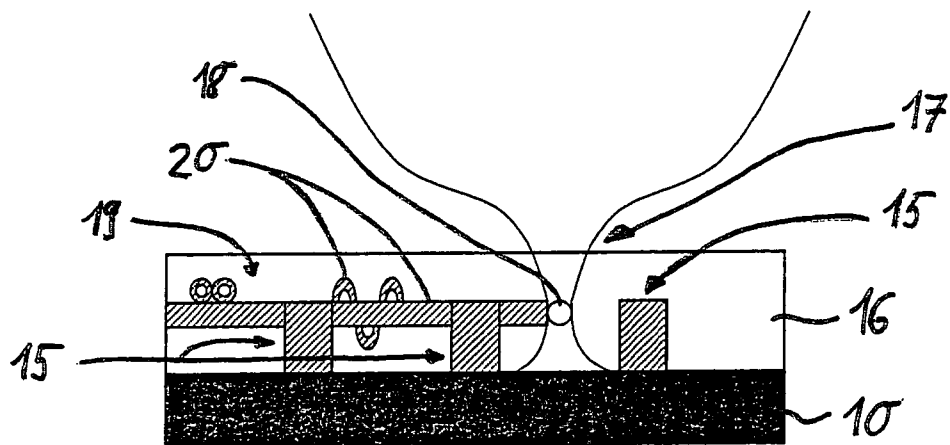


Fig. 2c

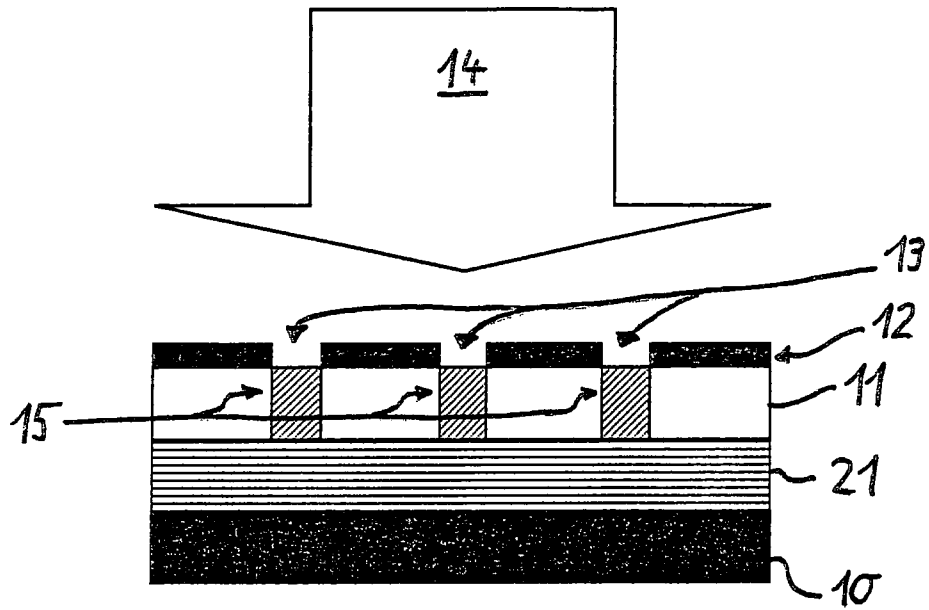


Fig. 3a

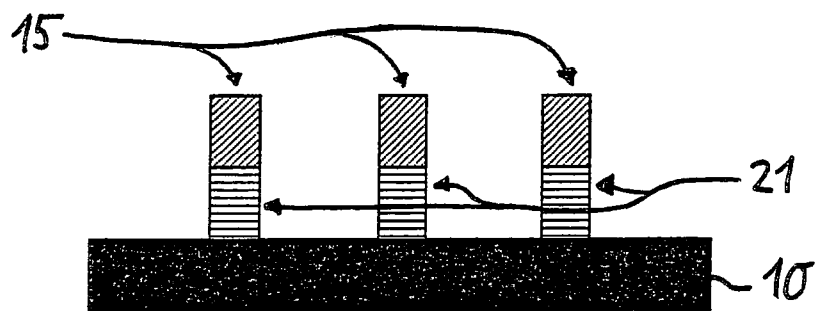


Fig. 3b

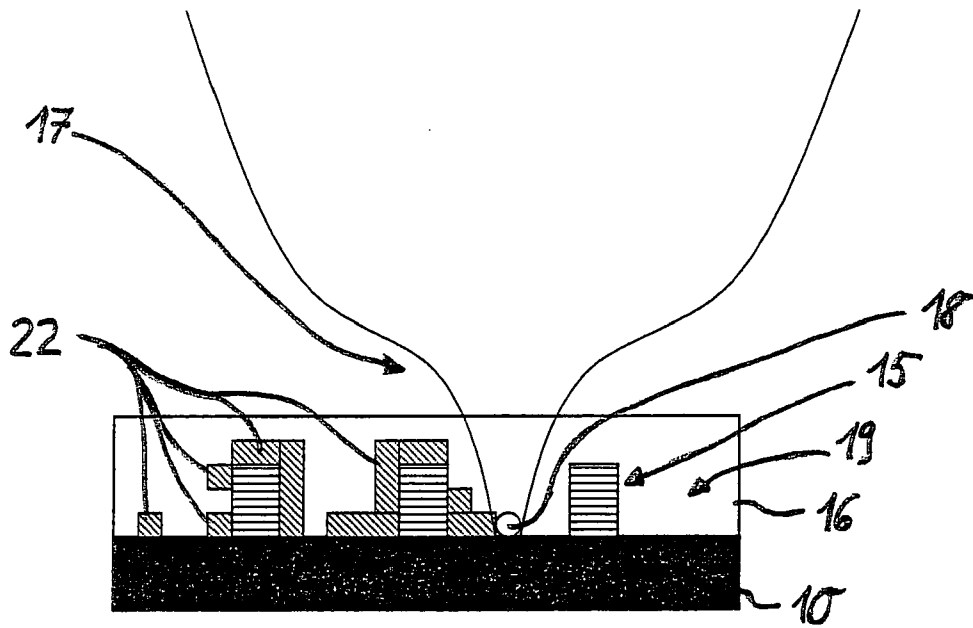


Fig. 3c

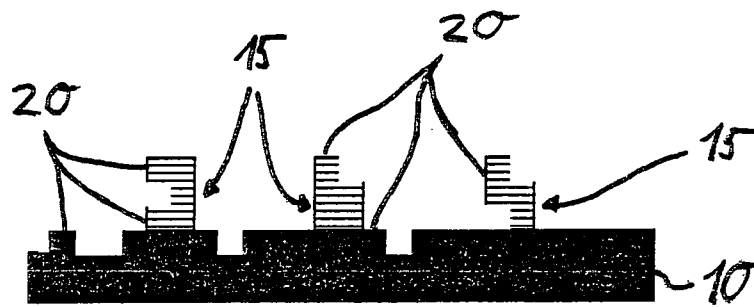


Fig. 3d

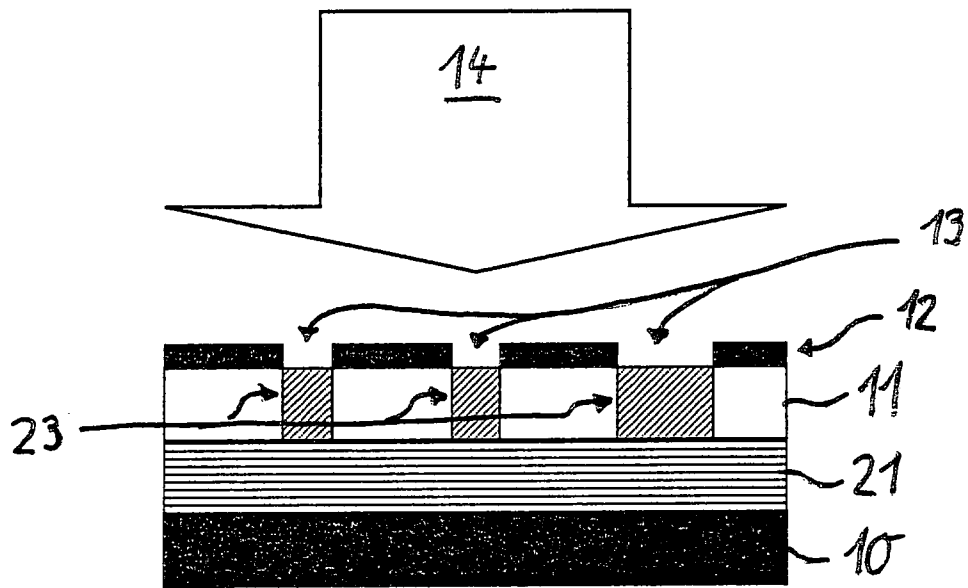


Fig. 4a

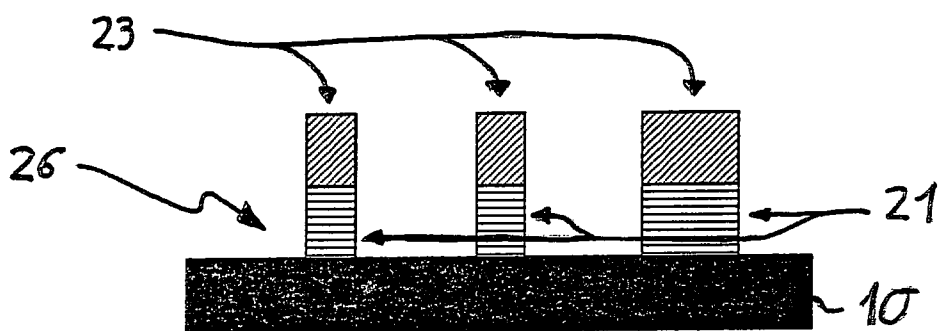


Fig. 4b

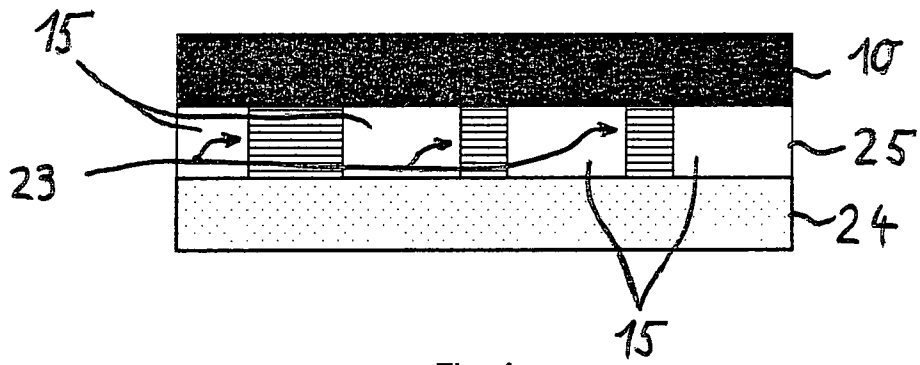


Fig. 4c

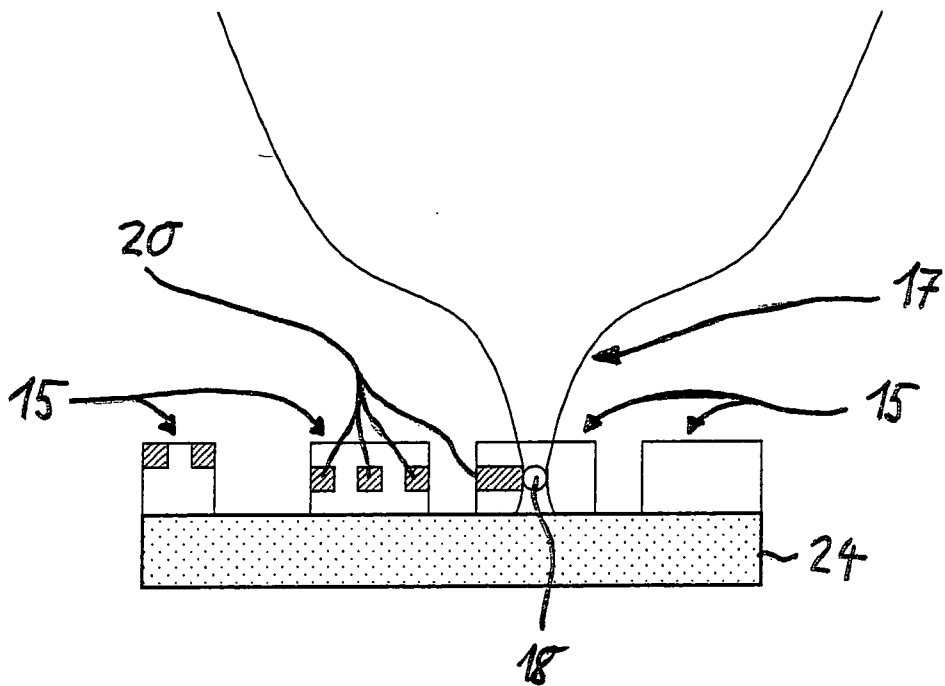


Fig. 4d

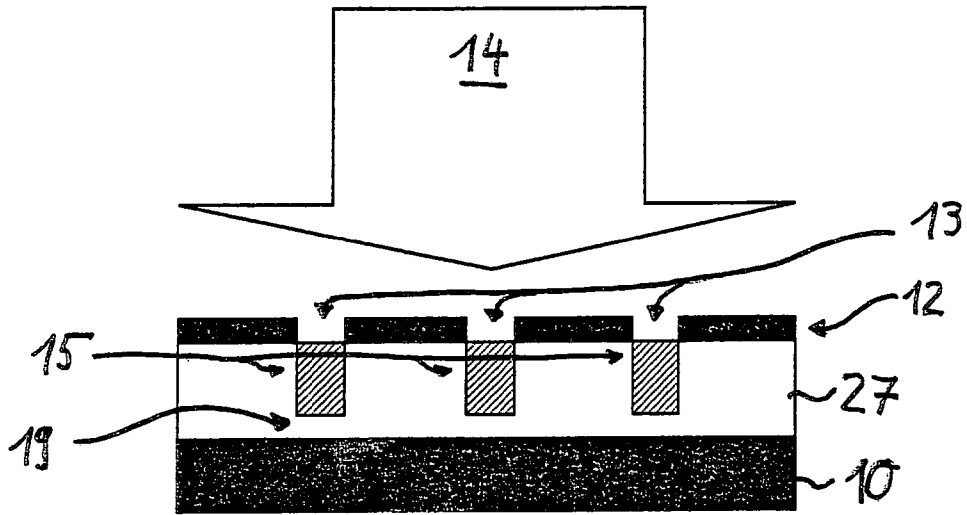


Fig. 5a

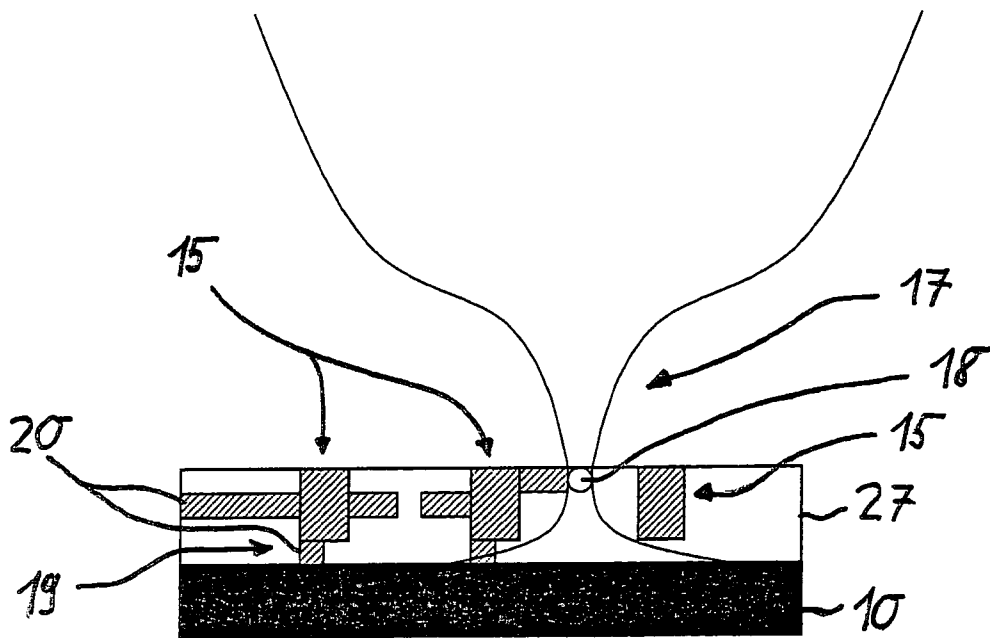


Fig. 5b

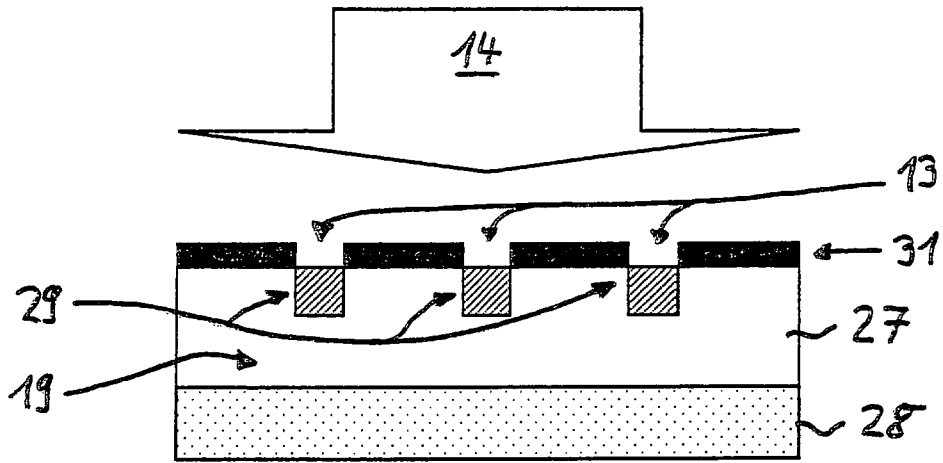


Fig. 6a

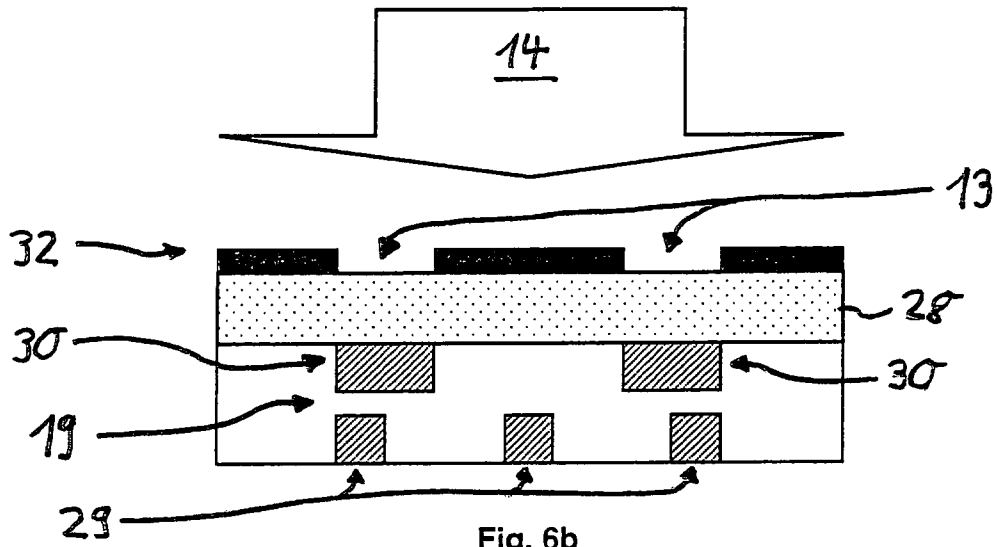


Fig. 6b

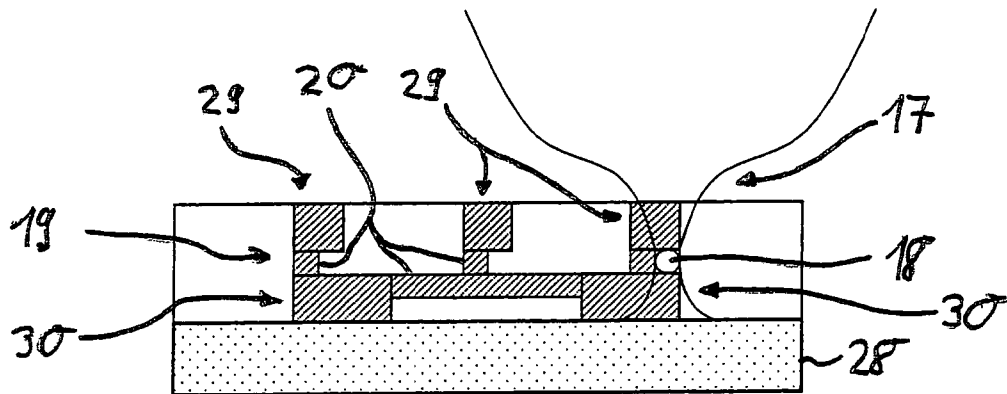


Fig. 6c

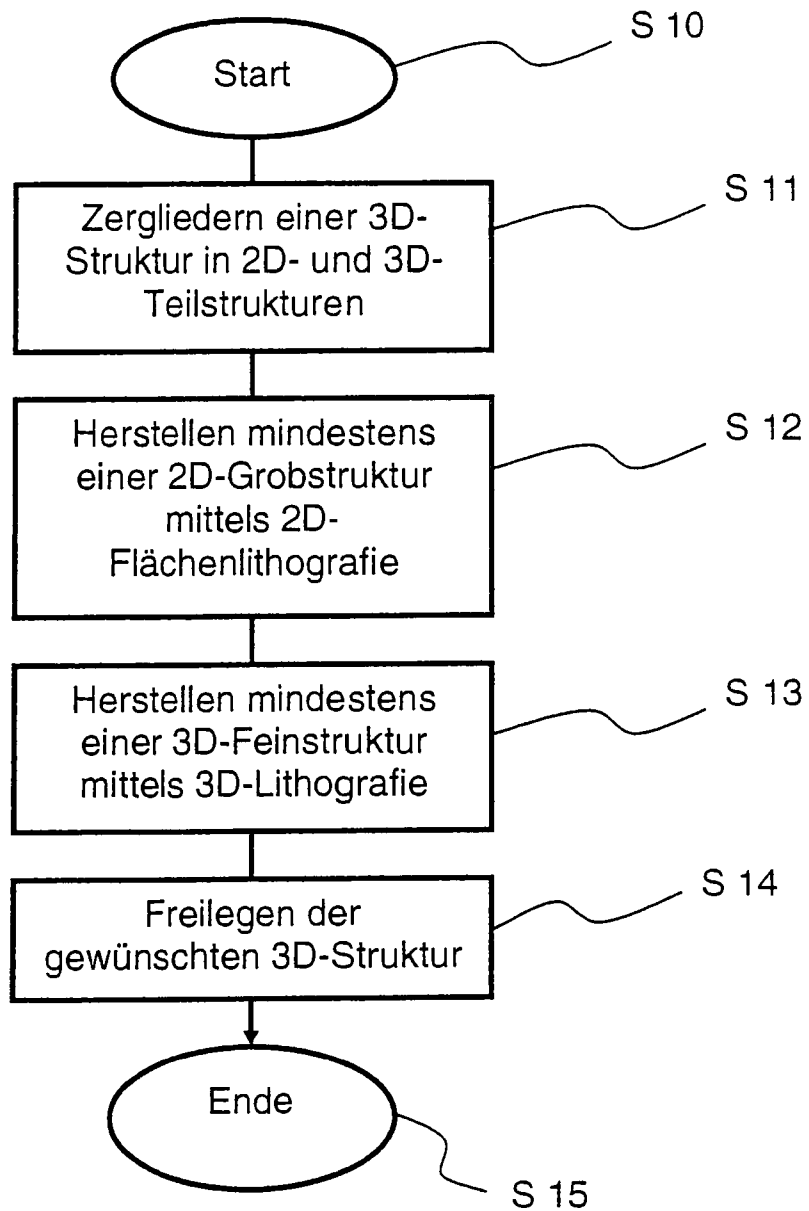


Fig. 7

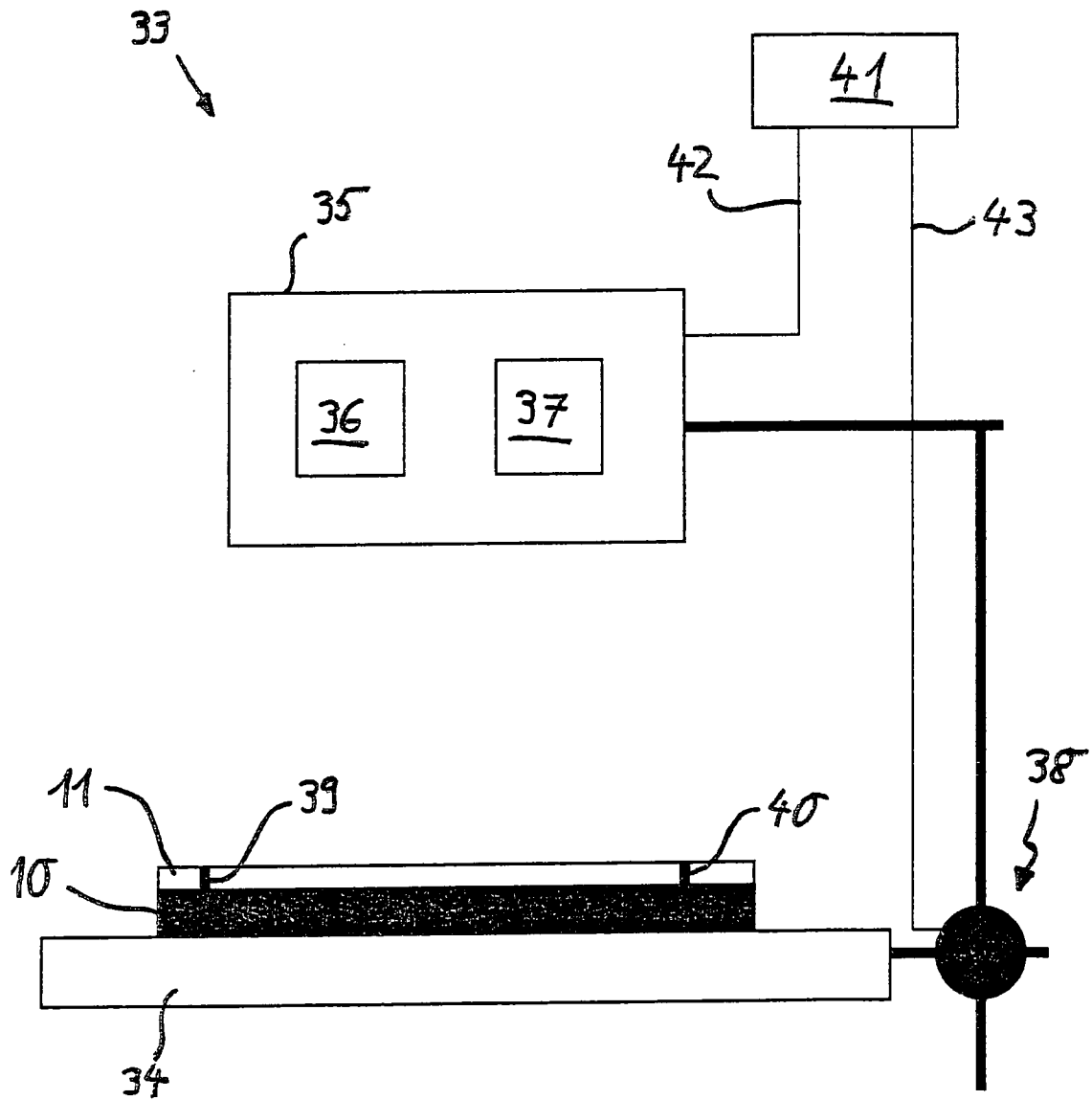


Fig. 8