



(10) DE 10 2020 126 414 B3 2021.12.09

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2020 126 414.3**
(22) Anmeldetag: **08.10.2020**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **09.12.2021**

(51) Int Cl.: **G01Q 10/04** (2010.01)
G01Q 60/24 (2010.01)
B81B 7/04 (2006.01)
B81B 7/02 (2006.01)
H02N 1/00 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,
dieses vertreten durch den Präsidenten der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:
**Gramm, Lins & Partner Patent- und
Rechtsanwälte PartGmbH, 38122 Braunschweig,
DE**

(72) Erfinder:
Dai, Gaoliang, Dr., 38116 Braunschweig, DE

(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	60 2005 005 478	T2
US	2009 / 0 189 485	A1
US	2010 / 0 064 395	A1
US	2010 / 0 126 297	A1
EP	1 995 737	A1

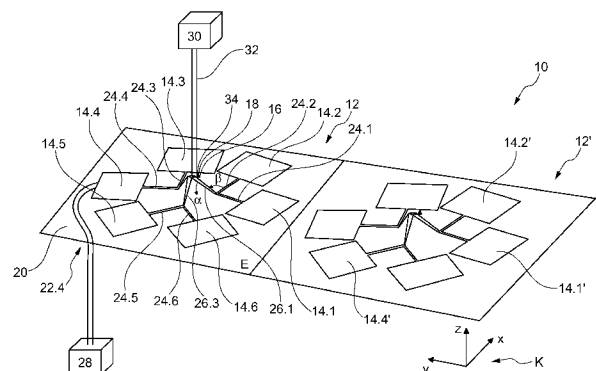
D.M. Brouwer, B.R. Jong, H.M.J.R. Soemers:
"Design and modeling of a six DOFs MEMS-based
precision manipulator", Precision Engineering 34,
pp. 307-319 (2010)

L.K. Barrett et al.: "A Large Range of Motion
3D MEMS Scanner With Five Degrees of
Freedom", Journal of Microelectromechanical
Systems 28, pp. 170-179 (2019)

M.G. Ruppert et al.: "On-Chip Dynamic
Mode Atomic Force Microscopy: A Silicon-
on-Insulator MEMS Approach", Journal of
Microelectromechanical Systems 26, pp. 215-225
(2017)

(54) Bezeichnung: **Rastersondenmikroskop und Rastersondenmikroskopsystem sowie Verfahren zum
Untersuchen einer Prüflingsoberfläche**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Rastersondenmikroskop (12) mit (a) einem ersten Antrieb (14.1), (b) einem zweiten Antrieb (14.2), (c) einem dritten Antrieb (14.3), (d) einem vierten Antrieb (14.4), (e) einem fünften Antrieb (14.5) und (f) einer Sonde (16), die mittels der Antriebe (14) bewegbar ist. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass (g) die Sonde (16) mittels der Antriebe (14) in fünf Freiheitsgraden bewegbar ist und (h) das Rastersondenmikroskop (12) als Mikrosystem ausgebildet ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Rastersondenmikroskop mit Antrieben und einer Sonde, die mittels der Antriebe bewegbar ist.

[0002] Ein derartiges Rastersondenmikroskop kann als Rasterkraftmikroskop ausgebildet sein. Es ist bekannt, Rastersondenmikroskope zur Untersuchung von Oberflächen einzusetzen. Der Vorteil an Rastersondenmikroskopen ist die sehr hohe erreichbare Ortsauflösung. Nachteilig an bekannten Rastersondenmikroskopen ist der vergleichsweise große apparative Aufwand.

[0003] Die EP 1 995 737 A1 beschreibt ein Sondenarray für Rastersondenmikroskope. Das Sondenarray ist aus einzelnen Sondenmodulen aufgebaut, das je eine Federeinrichtung (Cantilever) und/oder einen Aktor und eine Handhabungseinrichtung aufweist und reversibel an einer das Array tragenden Plattform befestigt ist. Das Array ist aus einzelnen Sondenmodulen zusammengesetzt, die einzeln gegen gleiche oder andere Sondenmodule ausgetauscht werden können.

[0004] In dem Fachartikel „Design and modeling of a six DOFs MEMS-based precision manipulator“ von D. M. Brouwer et al in Precision Engineering 34 (2010) 307-319, wird ein Design für einen präzisen MEMS-basierten Manipulator mit sechs Freiheitsgraden vorgestellt. Der Zweck des Manipulators ist die Positionierung einer kleinen Probe ($10\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m} \times 0,2\ \mu\text{m}$) in einem Transmissionselektronenmikroskop. Ein paralleler kinematischer Mechanismus mit schrägen Blattfedern wird verwendet, um die Bewegung von sechs in der Ebene liegenden elektrostatischen Kammantrieben in sechs DOFs am Endeffektor umzusetzen. Die Konstruktion des Manipulators basiert auf den Prinzipien der exakten Zwangskonstruktion, was zu einer hohen Betätigungsnachgiebigkeit kombiniert mit einer relativ hohen Steifigkeit führt. Ein solches System ist in einem Transmissionselektronenmikroskop verwendbar, nicht aber als Rastersondenmikroskop tauglich.

[0005] Der Artikel „A Large Range of Motion scanner with five Degrees of freedom“ von Lawrence K. Barrett et al, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 28, No. 1 Februar 2019, pp. 170-179, beschreibt einen Mixed-Mode-XYZ-Scanner, der in einem einzigen Gießereiprozess hergestellt wurde. Das Gerät hat einen großen Bewegungsbereich in X, Y und Z und kann auch um zwei Achsen rotieren, was es zu einem Scanner mit 5 Freiheitsgraden macht. Die vertikale Betätigung kann sowohl mit thermischen Aktoren erfolgen, die einen größeren Bewegungsbereich haben, als auch mit kapazitiven Aktoren erfolgen. Ein solches Gerät kann in der Rastersondenmikroskopie eingesetzt werden, um die Probe zu positionieren.

[0006] Aus dem Fachbeitrag „On-Chip dynamic Mode Atomic Force Microscopy: A Siliconon-Insulator MEMS Approach“ von M. G. Ruppert et al, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 26, No. 1 Februar 2017, pp. 215-225, ist bekannt, ein mikroelektromechanisches System (MEMS) als MEMS-Rasterkraftmikroskop zu verwenden, das durch einen Silizium-auf-Isolator-MEMS-Fertigungsprozess hergestellt wird. Das MEMS verfügt über integrierte elektrostatische xy-Aktoren und elektrothermische Sensoren sowie eine piezoelektrische AlN-Schicht für Out-of-Plane Aktuatorik und eine integrierte Deflektionsabstastung eines Mikroantilevers. Das Design erlaubt nur eine Bewegung in drei Freiheitsgraden.

[0007] Die DE 60 2005 005 478 T2 beschreibt einen mehrachsigen kapazitiven Wandler, der zwei zueinander bewegbare Teile, die jeweils einen Satz an Kondensatorplatten aufweisen. Der zweite Teil ist relativ zum ersten Teil beweglich. Die Kondensatorplatten unterscheiden sich sichtlich ihrer Größe und sind so ausgebildet, dass der Wandler mehrachsige Messungen ausführen kann.

[0008] Die US 2010/0126297 A1 beschreibt einen Vierachs-Mikroroboter, der Aktuatoren in einer Ebene verwendet, um ein möglichst großes Arbeitsvolumen zu erreichen. Mit den Antrieben werden vier Bewegungsfreiheitsgrade erreicht.

[0009] Die US 2010/0064395 A1 beschreibt ein Rastersondenmikroskop, das eine Platte, die in Richtung der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse beweglich ist, sowie eine mit der Platte gekoppelte SONDENSPIZIE enthält. Mehrere Aktuatoren wirken zusammen, um die SONDENSPIZIE mit drei Bewegungsfreiheitsgraden zu bewegen.

[0010] Aus der US 2009/0189485 A1 ist ein piezoelektrischer Aktor bekannt, mit dem eine Probe in drei Freiheitsgraden positionierbar ist. Durch einen Widerstand, der an einem piezoelektrischen Element angebracht ist, ist eine Positionsmessung durch Dehnung des piezoelektrischen Elements mit hoher Genauigkeit möglich.

[0011] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Rastersondenmikroskop vorzuschlagen.

[0012] Die Erfindung löst das Problem durch ein Rastersondenmikroskop mit den Merkmalen von Anspruch 1.

[0013] Vorteilhaft an einem derartigen Rastersondenmikroskop ist, dass es oft mit photolithografischen Mitteln herstellbar ist. Das wiederum bedeutet, dass eine große Anzahl an Rastersondenmikroskopen simultan herstellbar ist, sodass eine Massenfertigung meist vergleichsweise einfach möglich ist.

[0014] Wird das Rastersondenmikroskop, wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen, aus einem Chip, insbesondere einem Siliziumchip, hergestellt, so kann sich eine Anordnung (die auch als Array bezeichnet werden kann) an Rastersondenmikroskopen ergeben. Es ist dann möglich und bevorzugt, eine (in der Regel ebene) Oberfläche simultan an einer Mehrzahl von Stellen abzurastern. Auf diese Weise kann eine große Anzahl an Messdaten simultan aufgenommen werden. Es ist dann möglich, eine Prüflingsoberfläche des Prüflings, der mittels der Rastersondenmikroskope untersucht wird, gleichzeitig vergleichsweise schnell und mit einer hohen Ortsauflösung zu vermessen.

[0015] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter einem Antrieb insbesondere ein Bauelement des Rastersondenmikroskops verstanden, mittels dem eine Bewegung aufgrund einer externen Energiezufuhr erzeugbar ist. Die Antriebe sind so angeordnet, dass eine Bewegung eines Antriebs zu einer Bewegung der Sonde führt.

[0016] Bei den Antrieben handelt es sich vorzugsweise um Linearantriebe.

[0017] Unter dem Merkmal, dass es sich bei dem Rastersondenmikroskop um ein Mikrosystem handelt, wird insbesondere verstanden, dass ein Hüllquader um die Antriebe und die Sonde eine größte Seitenlänge von 20 mm, insbesondere höchstens 2 mm, vorzugsweise besonders 200 µm und besonders bevorzugt höchstens 20 µm aufweist.

[0018] Günstig ist es, wenn die Antriebe aus Silizium bestehen. Vorzugsweise sind die Antriebe aus einem Siliziumwafer herausgearbeitet, insbesondere herausgeätzt.

[0019] Vorzugsweise besitzt das Rastersondenmikroskop eine Ansteuereinheit, die ausgebildet ist zum automatischen Anlegen einer jeweiligen Spannung an die Antriebe, sodass die Sonde mit einer vorgegebenen Frequenz und/oder in einer vorgegebenen Bewegungsrichtung oszilliert. In anderen Worten wird jeder Antrieb vorzugsweise individuell mit einer Spannung beaufschlagt, sodass eine Bewegung der Sonde in fünf Freiheitsgraden möglich ist. Besonders günstig ist es, wenn das Rastersondenmikroskop einen sechsten Antrieb aufweist und die Sonde mittels der Antriebe in sechs Freiheitsgraden bewegbar ist.

[0020] Günstig ist es, wenn die Antriebe elektrostatische Kammantriebe sind. Diese sind leicht beispielsweise nasschemisch in einem Siliziumwafer zu fertigen. Alternativ können die Antriebe thermische Aktuatoren sein. Ein thermischer Aktuator ist ein Aktuator, der sich beim Beaufschlagen mit einer Spannung lokal so erwärmt, dass die Bewegung durchgeführt wird.

[0021] Vorzugsweise sind die Antriebe zum Messen ihrer Auslenkung ausgebildet. Sind die Antriebe beispielsweise Kammantriebe, wird kann die Auslenkung vorzugsweise kapazitiv gemessen.

[0022] Günstig ist es, wenn die Antriebe in einer gemeinsamen Ebene angeordnet sind. Dies ist besonders einfach zu fertigen, wenn das Gerüst auf einem Wafer hergestellt wird.

[0023] Vorzugsweise hat der erste Antrieb ein erstes Abtriebsteil, das mit einem ersten Übertragungselement zum Übertragen einer Bewegung des ersten Antriebs auf die Sonde gekoppelt ist. Das erste Abtriebsteil ist ein integraler Bestandteil des ersten Antriebs und vorzugsweise einstückig mit den übrigen Komponenten verbunden.

[0024] Das erste Übertragungselement ist gemäß einer bevorzugten Ausführungsform einstückig mit dem Abtriebsteil verbunden. Es ist bevorzugt, wenn das erste Übertragungselement winklig zum ersten Abtriebsteil verläuft. Insbesondere schließen eine Ausgleichsgrade durch das erste Abtriebsteil und eine Ausgleichsgrade durch das Übertragungselement einen Winkel von zumindest 5°, insbesondere zumindest 10°, besonders bevorzugt zumindest 20°, ein. Dieser Winkel ist günstiger Weise kleiner als 90°, insbesondere kleiner als 80°, bevorzugt kleiner als 70°. Günstig ist es, wenn die Übertragungselement aus einem Siliziumwafer unter Verwendung der anisotropen Nassätztechnik, insbesondere der KOH-Ätztechnik, hergestellt wird. In diesem Fall ist die Orientierung der Übertragungselemente nach anisotropen Ätzen entlang der Kristallebenen von Silizium definiert.

[0025] Vorzugsweise besitzt der zweite Antrieb ein zweites Abtriebsteil, das mit einem zweiten Übertragungselement einer Bewegung des zweiten Antriebs auf die Sonde gekoppelt ist. Für den zweiten Antrieb gilt vorzugsweise das oben zum ersten Antrieb Gesagte.

[0026] Besonders günstig ist es, wenn der dritte Antrieb ein drittes Abtriebsteil hat, das mit einem dritten Übertragungselement zum Übertragen einer Bewegung des dritten Antriebs auf die Sonde gekoppelt ist. Vorzugsweise weist auch der dritte Antrieb die oben für den ersten Antrieb beschriebenen vorteilhaften Merkmale auf. Günstig ist, wenn der vierte Antrieb mit dem ersten Übertragungselement zum Übertragen einer Bewegung des vierten Antriebs auf die Sonde gekoppelt ist. In anderen Worten teilen sich der erste Antrieb und der vierte Antrieb das erste Übertragungselement. Auf diese Weise ergibt sich eine einfachere Konstruktion des Rastersondenmikroskops.

[0027] Besonders bevorzugt besitzt der vierte Antrieb ein viertes Abtriebsteil und das erste und das vierte Abtriebsteil sind zum Übertragen einer Bewegung des ersten und des vierten Antriebs auf die Sonde mit dem ersten Übertragungselement verbunden. Das vierte Abtriebsteil verläuft vorzugsweise winklig zum ersten Abtriebsteil. In anderen Worten beträgt ein Winkel zwischen einer Ausgleichsgraden durch das erste Abtriebsteil und einer Ausgleichsgraden durch das vierte Abtriebsteil zumindest 5° , insbesondere zumindest 20° . Der Winkel ist vorzugsweise kleiner als 150° , insbesondere kleiner als 120° . Günstig ist es, wenn das erste Abtriebsteil und das vierte Abtriebsteil an einem Ende zusammenlaufen und an diesem Ende mit dem ersten Übertragungselement verbunden sind.

[0028] Besonders bevorzugt besitzt der fünfte Antrieb ein fünftes Abtriebsteil und das zweite und das fünfte Abtriebsteil sind zum Übertragen einer Bewegung des zweiten und des fünften Antriebs auf die Sonde mit dem zweiten Übertragungselement verbunden. Das fünfte Abtriebsteil verläuft vorzugsweise winklig zum zweiten Abtriebsteil. In anderen Worten beträgt ein Winkel zwischen einer Ausgleichsgraden durch das zweite Abtriebsteil und einer Ausgleichsgraden durch das fünfte Abtriebsteil zumindest 5° , insbesondere zumindest 20° . Der Winkel ist vorzugsweise kleiner als 150° , insbesondere kleiner als 120° . Günstig ist es, wenn das zweite Abtriebsteil und das fünfte Abtriebsteil an einem Ende zusammenlaufen und an diesem Ende mit dem zweiten Übertragungselement verbunden sind.

[0029] Günstig ist es, wenn der sechste Antrieb mit dem dritten Übertragungselement zum Übertragen einer Bewegung des sechsten Antriebs auf die Sonde gekoppelt ist.

[0030] Das erste Abtriebsteil ist vorzugsweise mit dem ersten Übertragungselement einstückig verbunden, vorzugsweise über ein Festkörpergelenk. Unter dem Merkmal, dass zwei Teile einstückig miteinander verbunden sind, wird insbesondere verstanden, dass sie fügestellenfrei miteinander verbunden sind. In diesem Fall sind das erste Abtriebsteil und das erste Übertragungselement vorzugsweise so ausgebildet, dass sie eine Linearbewegung des Antriebs in eine Bewegung der Sonde umsetzen. Dieses Design vermindert die Komplexität des Herstellungsverfahrens.

[0031] Alternativ oder zusätzlich ist das zweite Abtriebsteil mit dem zweiten Übertragungselement über ein Festkörperelement verbunden oder das dritte Abtriebsteil mit dem dritten Übertragungselement über ein Festkörpergelenk verbunden. Unter einem Festkörpergelenk wird ein Bereich einer deutlich geringeren Biegefestigkeit verstanden, sodass eine Bewegung des Abtriebsteils zu einer Konzentration der

Biegung im Festkörpergelenk führt und sich das jeweilige Übertragungselement deutlich weniger biegt als der Bereich des Festkörpergelenks, beispielsweise um höchstens ein Zehntel.

[0032] Das vierte Abtriebsteil ist vorzugsweise mit dem ersten Übertragungselement über ein Festkörpergelenk verbunden. Alternativ oder zusätzlich ist das fünfte Abtriebsteil mit dem zweiten Übertragungselement über ein Festkörperelement verbunden oder das sechste Abtriebsteil mit dem dritten Übertragungselement über ein Festkörpergelenk verbunden.

[0033] Alternativ kann das Abtriebsteil mit dem Übertragungselement nicht über ein Festkörpergelenk, sondern direkt miteinander verbunden werden. In diesem Fall sollen das Abtriebsteil und Übertragungselement nachgiebig sein um die lineare Bewegung von Aktuatoren in die Bewegung der Sonde umzuwandeln.

[0034] Es kann günstig sein, wenn zumindest drei Antriebe in paarweise verschiedenen Ebenen angeordnet sind und die Übertragungselemente des jeweiligen Antriebs in der gleichen Ebene verlaufen wie der Antrieb. Vorzugsweise entsprechen die Ebenen Kristallebenen. In diesem Fall kann durch Ätzen mit von der Kristallorientierung abhängiger Ätzgeschwindigkeit das Rastersondenmikroskop einfacher gefertigt werden.

[0035] Vorzugsweise besitzt die Sonde einen Cantilever. Das Rastersondenmikroskop ist in diesem Fall als Rasterkraftmikroskop ausgebildet. Der Cantilever hat eine Cantileverspitze. Vorzugsweise ist die Ansteuereinheit ausgebildet zum automatischen Anlegen einer Spannung an die Antriebe, sodass die Cantileverspitze in einer vorgegebenen Bewegungsrichtung oszilliert.

[0036] Das Rastersondenmikroskop besitzt vorzugsweise eine Bewegungserfassungsvorrichtung zum Erfassen einer Bewegung der Cantileverspitze in zumindest einem Bewegungsfreiheitsgrad, insbesondere in zumindest zwei Bewegungsfreiheitsgraden. Die Bewegungserfassungsvorrichtung kann beispielsweise zumindest einen piezoelektrischen Sensor aufweisen. Beispielsweise kann ein solcher Sensor unter Verwendung der Implantations- / Diffusionstechnik auf den Siliziumausleger dotiert werden. Alternativ kann es sich bei der Bewegungserfassungsvorrichtung auch um ein Interferometer oder ein Lichtzeiger handeln.

[0037] Erfindungsgemäß ist zudem ein Rastersondenmikroskopsystem mit zwei erfindungsgemäßen Rastersondenmikroskopen. Dieses Rastersondenmikroskopsystem besitzt vorzugsweise eine Verschiebeeinheit, an der die Rastersondenmikroskope

befestigt sind und die ausgebildet ist zum Zustellen zumindest eines Rastersondenmikroskops relativ auf die Probenaufnahme zu, insbesondere zum individuellen Zustellen aller Rastersondenmikroskope relativ zueinander und/oder relativ auf die Probenaufnahme zu. Mit einem derartigen Rastersondenmikroskopsystem ist es der Regel möglich, eine Prüflingsoberfläche des Prüflings in schneller abzurastern als mit bekannten Rastersondenmikroskopsystemen, da die Rastersondenmikroskope an unterschiedlichen Stellen simultan messen können.

[0038] Besonders günstig ist es, wenn das Rastersondenmikroskopsystem drei, vier, fünf oder mehr erfindungsgemäße Rastersondenmikroskope aufweist. In der Regel ist es günstig, wenn das Rastersondenmikroskopsystem höchstens 4096 Rastersondenmikroskope aufweist.

[0039] Das Rastersondenmikroskop besitzt vorzugsweise eine Probenaufnahme. Günstig ist es zudem, wenn das Rastersondenmikroskopsystem eine Probenaufnahme besitzt, bei der es sich um die gleiche Probenaufnahme handeln kann.

[0040] Günstig ist es, wenn das Rastersondenmikroskopsystem eine Verschiebeeinheit aufweist, die ausgebildet ist zum Zustellen zumindest eines der Rastersondenmikroskope relativ auf die Probenaufnahme zu, insbesondere ist die Verschiebeeinheit zum individuellen Zustellen aller Rastersondenmikroskope oder einzelner Rastersondenmikroskope auf die Probenaufnahme zu ausgebildet. Es ist dann möglich, jedes einzelne Rastersondenmikroskop relativ zu Prüflingsoberfläche so zu positionieren, dass eine Messung möglich ist.

[0041] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1 ein erfindungsgemäßes Rastersondenmikroskopsystem mit zwei erfindungsgemäßen Rastersondenmikroskopen,

Fig. 2a eine Detailansicht des ersten Antriebs des Rastersondenmikroskops gemäß **Fig. 1**,

Fig. 2b eine perspektivische Detailansicht des Antriebs gemäß **Fig. 2a**,

Fig. 3 eine perspektivische schematische Ansicht einer weiteren Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Rastersondenmikroskops,

Fig. 4 eine schematische Ansicht des Rastersondenmikroskopsystems und

Fig. 5 ein erfindungsgemäßes Rastersondenmikroskop mit einem piezoresistiven Sensor zum Bestimmen der Lage des Cantileverkopfs.

[0042] **Fig. 1** zeigt ein Rastersondenmikroskopsystem **10** mit einem ersten Rastersondenmikroskop **12** und einem zweiten Rastersondenmikroskop **12'**.

[0043] Das Rastersondenmikroskop **12** besitzt einen ersten Antrieb **14**, einen zweiten Antrieb **14**, einen dritten Antrieb **14**, einen vierten Antrieb **14**, einen fünften Antrieb **14** und einen sechsten Antrieb **14**. Die Antriebe **14.i** ($i = 1, \dots, N$, mit N Anzahl der Antriebe) sind als Kammantriebe ausgebildet.

[0044] Das Rastersondenmikroskop **12** besitzt zudem eine Sonde **16**. Bei der Sonde **16** handelt es sich im vorliegenden Fall um einen Cantilever, der eine Cantileverspitze **18** hat. Mittels der Antriebe **14.i** ist die Sonde **16** in drei Translationsfreiheitsgraden, nämlich entlang einer x-, einer y- und einer z-Achse und in drei Drehfreiheitsgraden, nämlich um die Winkel φ , θ und γ .

[0045] Das Rastersondenmikroskop **12** ist aus einem Wafer **20** herausgearbeitet, bei dem es sich im vorliegenden Fall um einen Siliziumwafer handelt. Jeder Antrieb **14.i** hat einen Anschluss **22.i**, mittels dem mit einer Spannung beaufschlagt werden kann. Der Übersichtlichkeit halber ist lediglich der Anschluss **22** eingezeichnet.

[0046] **Fig. 1** zeigt, dass jeder Antrieb **14.i** ein Abtriebsteil **24.i** hat. An einem dem jeweiligen Antrieb **14.i** abgewandten Ende ist das jeweilige Abtriebsteil **24.i** mit einem Übertragungselement **26.j** verbunden. In der vorliegenden Ausführungsform sind das erste Abtriebsteil **24** und das zweite Abtriebsteil **24** mit dem ersten Übertragungselement **26** verbunden. Das dritte Abtriebsteil **24** und das vierte Abtriebsteil **24** sind mit dem zweiten Übertragungselement **26** verbunden. Das fünfte Abtriebsteil **24** und das sechste Abtriebsteil **24** sind mit dem dritten Übertragungselement **26** verbunden. Die Abtriebsteile **24.i** sind mit dem jeweiligen Übertragungselement **26.j** direkt miteinander verbunden. Die Abtriebsteile **24.i** und Übertragungselement **26.j** sind nachgiebig um die lineare Bewegung von Aktuatoren in die Bewegung der Sonde umzuwandeln.

[0047] Es ist zu erkennen, dass in der vorliegenden Ausführungsform die Antrieb **14.i** in einer Ebene **E** angeordnet sind. Die Übertragungselemente **26.j** bilden einen Neigungswinkel α_j mit einer Ebene **E1**, in der die Antriebe **14.i** angeordnet sind. Vorzugsweise sind alle Neigungswinkel α_j im technischen Sinne gleich groß. Unter dem Merkmal, dass alle Neigungswinkel α_j im technischen Sinne gleich groß sind, wird insbesondere verstanden, dass die die Neigungswinkel α_j im mathematischen Sinne gleich groß sein können, das ist aber nicht notwendig. Beispielsweise können sich die Winkel bis zu 5° voneinander unterscheiden.

[0048] Ein Knickwinkel β_i zwischen dem jeweiligen Abtriebsteil 24.i und dem zugehörigen Übertragungselement 26.j liegt vorzugsweise zwischen 70 und 170°.

[0049] Das Rastersondenmikroskop 12 besitzt eine Ansteuereinheit 28, die ausgebildet ist zum Anlegen einer jeweiligen Spannung U_i an die Antriebe 14.i, wodurch die Sonde 16 in eine vorgegebene Lage $P_{16}(x, y, z, \varphi, \theta, \gamma)$ bezüglich eines Koordinatensystem K bringbar ist. Es ist möglich, dass nur fünf Antriebe 14.i vorhanden sind, um die Sonde 16 in eine vorgegebene Lage $P_{16}(x, y, z, \varphi, \theta)$ zu bringen.

[0050] Es ist zudem möglich, die Sonde 16 in eine Oszillationsbewegung zu versetzen. Das Rastersondenmikroskop 12 weist zudem eine Bewegungserfassungsvorrichtung 30 auf, die im vorliegenden Fall einen Laserstrahl 32 auf die Sonde 16 sendet und die Lage eines Cantileverkopfs 34, an dem die Cantileverspitze 18 ausgebildet ist, interferometrisch bestimmt wird.

[0051] Wie Fig. 5 zeigt, kann die Bewegungserfassungsvorrichtung 30 alternativ oder zusätzlich einen piezoresistiven Sensor 31 aufweisen. In diesem Fall erfasst die Bewegungserfassungsvorrichtung 30, die ein Teil der Ansteuereinheit 28 sein kann, vorzugsweise den elektrischen Widerstand des piezoresistiven Sensors und berechnet daraus die momentane Lage des Cantileverkopfs 34. Ein piezoresistiver Sensor hat den Vorteil, besonders kompakt zu eine. Zudem sind solche Sensoren einfach zu fertigen.

[0052] Fig. 2a zeigt schematisch eine Ansicht des Antriebs 14, der als Kammantrieb ausgebildet ist. Es ist zu erkennen, dass der Kammantrieb Federn 36.k und Kamm-Kondensatoren 38.n aufweist. Diese bewegt das Abtriebsteil 24 beim Beaufschlagen mit einer elektrischen Spannung. Das Abtriebsteil 24 wird von den Federn 36.k gehalten.

[0053] Fig. 2b zeigt eine Detailansicht des Kamm-Kondensators 38.

[0054] Fig. 3 zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Rastersondenmikroskops 12. Bei diesem sind die Antriebe 14.i in die Ebenen E1, E2 und E3 angeordnet. Im vorliegenden Fall erstrecken sich die Ebenen E1, E2 und E3 jeweils entlang der gleichen Kristallebene.

[0055] Fig. 4 zeigt eine schematische Ansicht des Rastersondenmikroskopsystems 10, das eine Verschiebeeinheit 40 besitzt, mittels der das Rastersondenmikroskopsystem 10 in Richtung eines Pfeils P hin- und her bewegt werden kann.

[0056] Das Rastersondenmikroskopsystem 10 besitzt zudem eine Probenaufnahme 42, mittels der

ein Prüfling 44 aufgenommen werden kann, der eine Prüflingsoberfläche 46 hat. Mittels der Verschiebeeinheit 40 kann das Rastersondenmikroskop 12 auf die Probenaufnahme 42 zugestellt werden. Es ist möglich und stellt eine bevorzugte Ausführungsform dar, dass die Verschiebeeinheit 40 Einzelantriebe 48, 48' aufweist, mittels derer das jeweilige Rastersondenmikroskop 12 bzw. 12' unabhängig von dem jeweils anderen Rastersondenmikroskop 12' bzw. 12 auf die Probenaufnahme 42 zugestellt werden kann.

[0057] Wenn, wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform des Rastersondenmikroskopsystems 10 vorgesehen, das Rastersondenmikroskopsystems 10 eine Mehrzahl Rastersondenmikroskopen 12 existiert, ist es günstig, wenn für jedes der Rastersondenmikroskope ein Einzelantrieb existiert. Es ist dann möglich, jedes einzelne Rastersondenmikroskop so zuzustellen, dass die Prüflingsoberfläche 46 simultan von mehreren Rastersondenmikroskopen vermessen werden kann.

[0058] Ein erfindungsgemäßes Verfahren wird dadurch durchgeführt, dass der Prüfling 44 so positioniert wird, dass ein erster Untersuchungsbereich B1 mittels des ersten Rastersondenmikroskops 12 untersuchbar ist und ein zweiter Untersuchungsbereich B2 mittels des zweiten Rastersondenmikroskops 12' untersuchbar ist. Danach werden die Untersuchungsbereiche B1, B2 gleichzeitig untersucht. Die entsprechend aufgenommenen Messdaten werden von der Ansteuereinheit 28 (vgl. Fig. 1) aufgenommen und zu einer der Eigenschaften der Prüflingsoberfläche 46 zusammengeführt. Die Ansteuereinheit 28 kann auch als Ansteuer- und Auswerteeinheit bezeichnet werden.

Bezugszeichenliste

10	Rastersondenmikroskopsystem
12	Rastersondenmikroskop
14	Antrieb
16	Sonde
18	Cantileverspitze
20	Wafer
22	Anschluss
24	Abtriebsteil
26	Übertragungselement
28	Ansteuereinheit
30	Bewegungserfassungsvorrichtung
31	piezoresistiver Sensor
32	Laserstrahl
34	Cantileverkopf

36	Feder
38	Kamm, Kondensator
40	Verschiebeeinheit
42	Probenaufnahme
44	Prüfling
46	Prüflingsoberfläche
48	Einzelantrieb
α	Neigungswinkel
β	Knickwinkel
B	Untersuchungsbereich
E	Ebene
i	Laufindex der Antriebe
j	Laufindex Übertragungselemente
k	Laufindex der Federn
K	Koordinatensystem
n	Laufindex Kamm-Kondensatoren
N	Zahl der Antriebe
P	Pfeil
U_i	Antriebsspannung

Patentansprüche

1. Rastersondenmikroskop (12) mit
 - (a) einem ersten Antrieb (14.1),
 - (b) einem zweiten Antrieb (14.2),
 - (c) einem dritten Antrieb (14.3),
 - (d) einem vierten Antrieb (14.4),
 - (e) einem fünften Antrieb (14.5) und
 - (f) einer Sonde (16), die mittels der Antriebe (14) bewegbar ist,
 - (g) wobei die Sonde (16) mittels der Antriebe (14) in fünf Freiheitsgraden bewegbar ist und
 - (h) wobei das Rastersondenmikroskop (12) als Mikrosystem ausgebildet ist.
2. Rastersondenmikroskop (12) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Antriebe (14)
 - (a) elektrostatische Kammantriebe oder thermische Aktuatoren sind und/oder
 - (b) zum Messen ihrer Auslenkung ausgebildet sind.
3. Rastersondenmikroskop (12) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - (a) der erste Antrieb (14.1) ein erstes Abtriebsteil (24.1) hat, das mit einem ersten Übertragungselement (26.1) zum Übertragen einer Bewegung des ersten Antriebs (14.1) auf die Sonde (16) gekoppelt ist,
 - (b) der dritte Antrieb (14.3) ein drittes Abtriebsteil (24.3) hat, das mit einem zweiten Übertragungsele-

ment (26.2) zum Übertragen einer Bewegung des dritten Antriebs (14.3) auf die Sonde (16) gekoppelt ist, und

(c) der fünfte Antrieb (14.5) ein fünftes Abtriebsteil (24.5) hat, das mit einem dritten Übertragungselement (26.3) zum Übertragen einer Bewegung des fünften Antriebs (14.5) auf die Sonde (16) gekoppelt ist.

4. Rastersondenmikroskop (12) nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass

(a) der zweite Antrieb (14.2) mit dem ersten Übertragungselement (26.1) zum Übertragen einer Bewegung des zweiten Antriebs (14.2) auf die Sonde (16) gekoppelt ist,

(b) der vierte Antrieb (14.4) mit dem zweiten Übertragungselement (26.2) zum Übertragen einer Bewegung des vierten Antriebs (14.4) auf die Sonde (16) gekoppelt ist und/oder

(c) ein sechster Antrieb (14.6) mit dem dritten Übertragungselement (26.3) zum Übertragen einer Bewegung des sechsten Antriebs (14.6) auf die Sonde (16) gekoppelt ist.

5. Rastersondenmikroskop (12) nach einem der Ansprüche 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass

(a) das erste Abtriebsteil (24.1) mit einem ersten Übertragungselement (26.1) einstückig, insbesondere über ein Festkörpergelenk, verbunden ist und/oder

(b) das dritte Abtriebsteil (24.3) mit einem zweiten Übertragungselement (26.2) einstückig, insbesondere über ein Festkörpergelenk, verbunden ist und/oder

(c) das fünfte Abtriebsteil (24.5) mit einem dritten Übertragungselement (26.3) einstückig, insbesondere über ein Festkörpergelenk, verbunden ist.

6. Rastersondenmikroskop (12) nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass

(a) zumindest drei Antriebe (14) in paarweise verschiedenen Ebenen angeordnet sind und

(b) die Übertragungselemente (26) des jeweiligen Antriebs (14) in der gleichen Ebene (E) verlaufen wie der Antrieb (14).

7. Rastersondenmikroskop (12) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

(a) die Sonde (16) ein Cantilever ist und

(b) das Rastersondenmikroskop (12) ein Rasterkraftmikroskop ist.

8. Rastersondenmikroskop (12) nach Anspruch 7, **gekennzeichnet durch** eine Bewegungserfassungsvorrichtung (30) zum Erfassen einer Bewegung der Cantileverspitze (18) in zumindest einem Bewegungsfreiheitsgrad, insbesondere in zumindest zwei Bewegungsfreiheitsgraden.

9. Rastersondenmikroskopsystem (10) mit

- (a) einem Rastersondenmikroskop (12) nach einem der vorstehenden Ansprüche,
- (b) zumindest einem zweiten Rastersondenmikroskop (12') nach einem der vorstehenden Ansprüche,
- (c) einer Verschiebeeinheit (40), an der die Rastersondenmikroskope (12) befestigt sind und die ausgebildet ist zum Verschieben der Rastersondenmikroskope (12) relativ zueinander und/oder relativ zu einem Prüfling (44),
- (d) einer Probenaufnahme (42), wobei
- (e) die Verschiebeeinheit (40) ausgebildet ist zum Zustellen zumindest eines Rastersondenmikroskops (12) relativ auf die Probenaufnahme (42) zu, insbesondere zum individuellen Zustellen aller Rastersondenmikroskope (12, 12').

10. Verfahren zum Untersuchen einer Prüflingsoberfläche (46) eines Prüflings (44), mit den Schritten:

- (i) Positionieren des Prüflings (44) mittels eines Rastersondenmikroskopsystems (10) nach Anspruch 9, sodass
 - (α) ein erster Untersuchungsbereich (B1) der Prüflingsoberfläche (46) mittels des ersten Rastersondenmikroskops (12) untersuchbar ist und
 - (β) ein zweiter Untersuchungsbereich (B2) der Prüflingsoberfläche (46) mittels des zweiten Rastersondenmikroskops (12') untersuchbar ist,
- (ii) gleichzeitig Untersuchen der Untersuchungsbereiche (B1, B2). Pl/be-bro

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

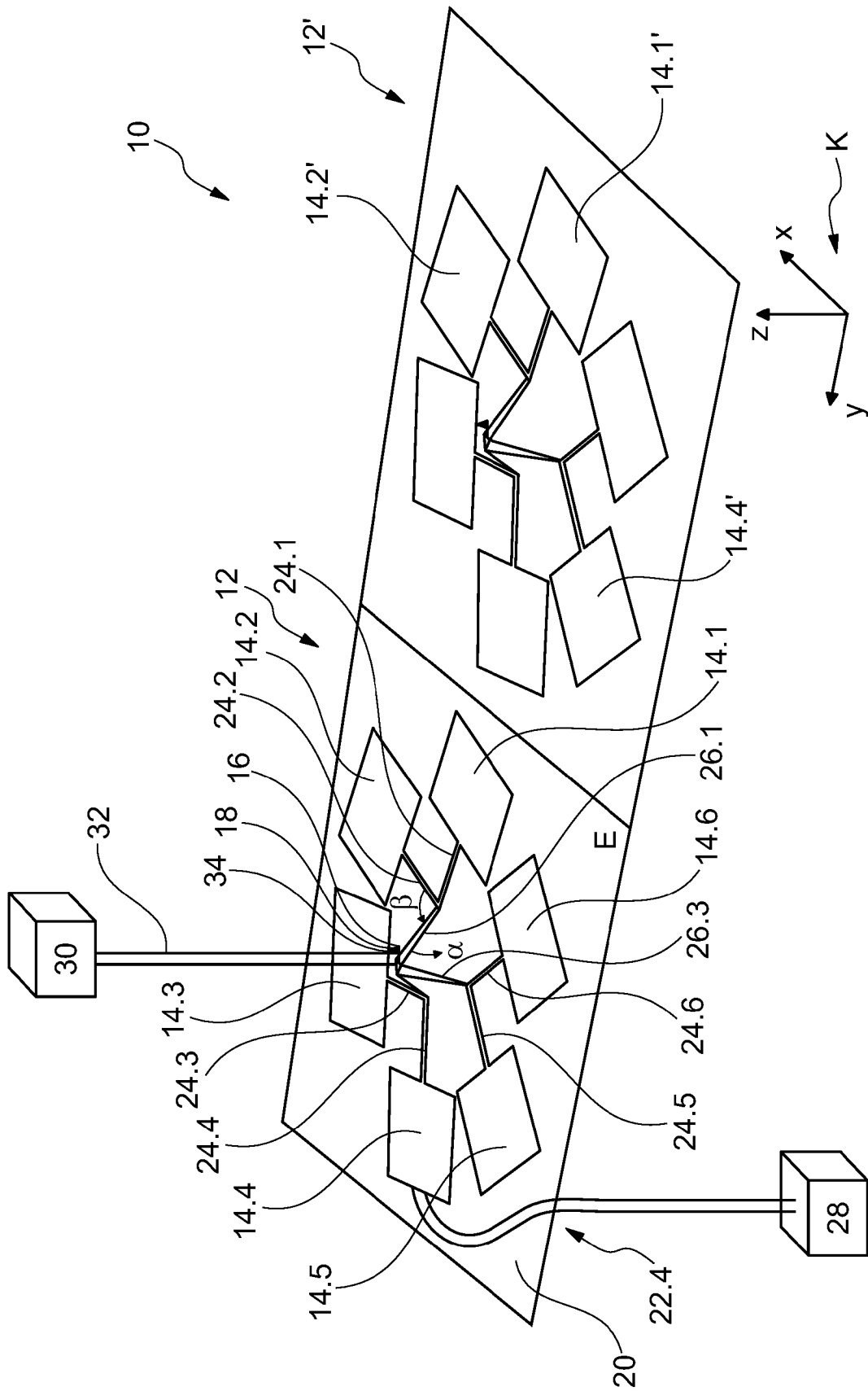


Fig. 1

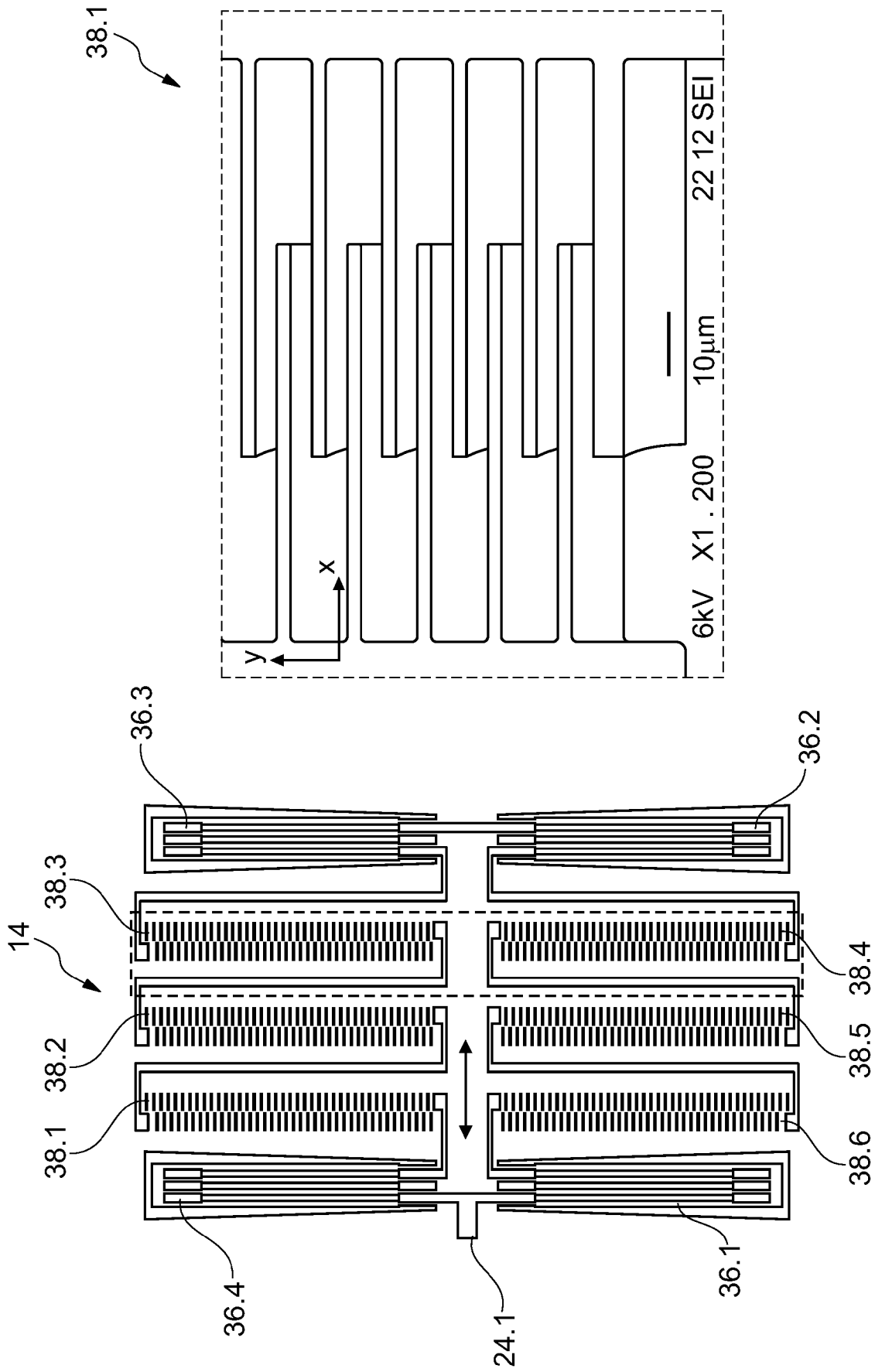


Fig. 2b

Fig. 2a

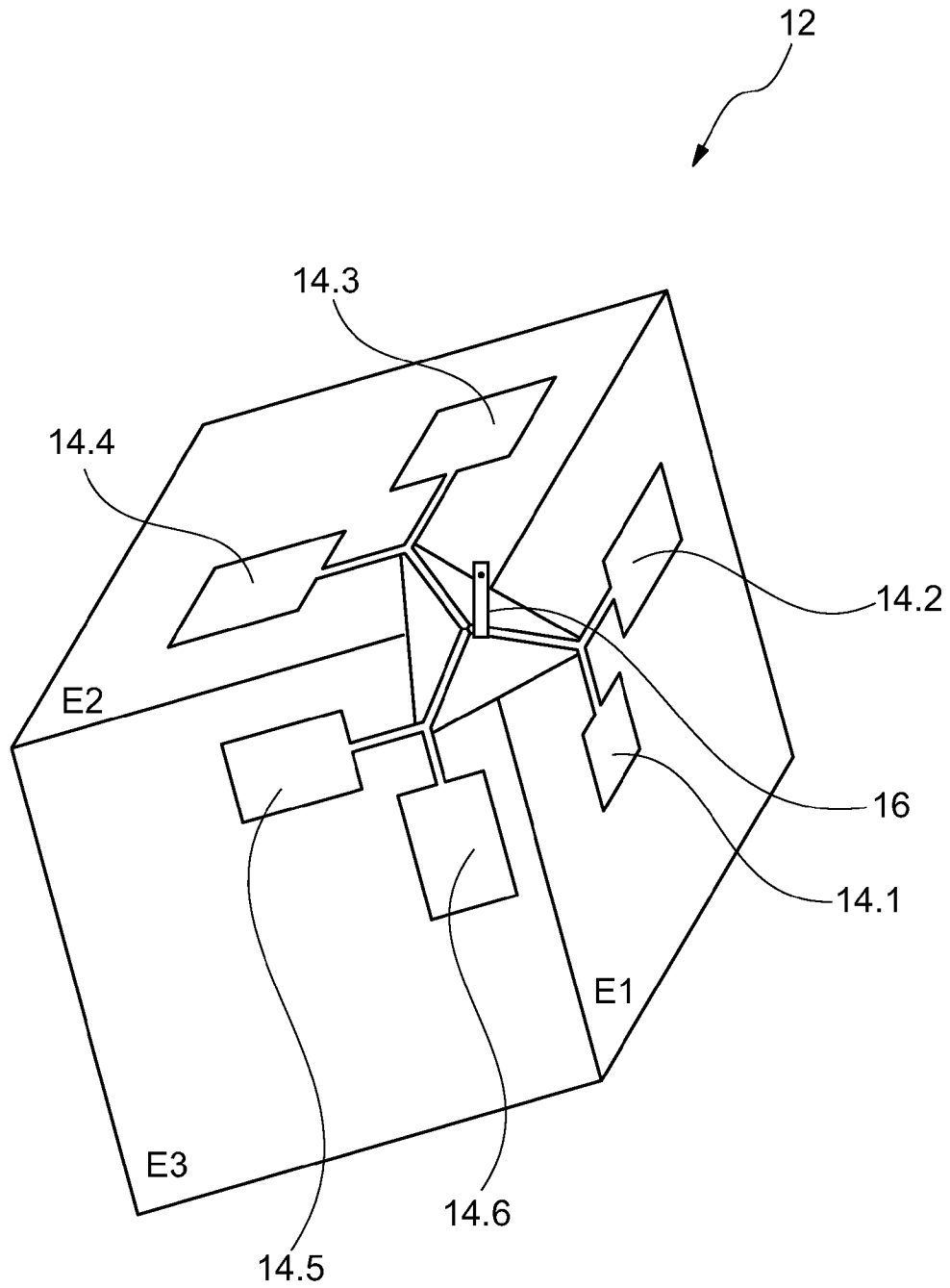


Fig. 3

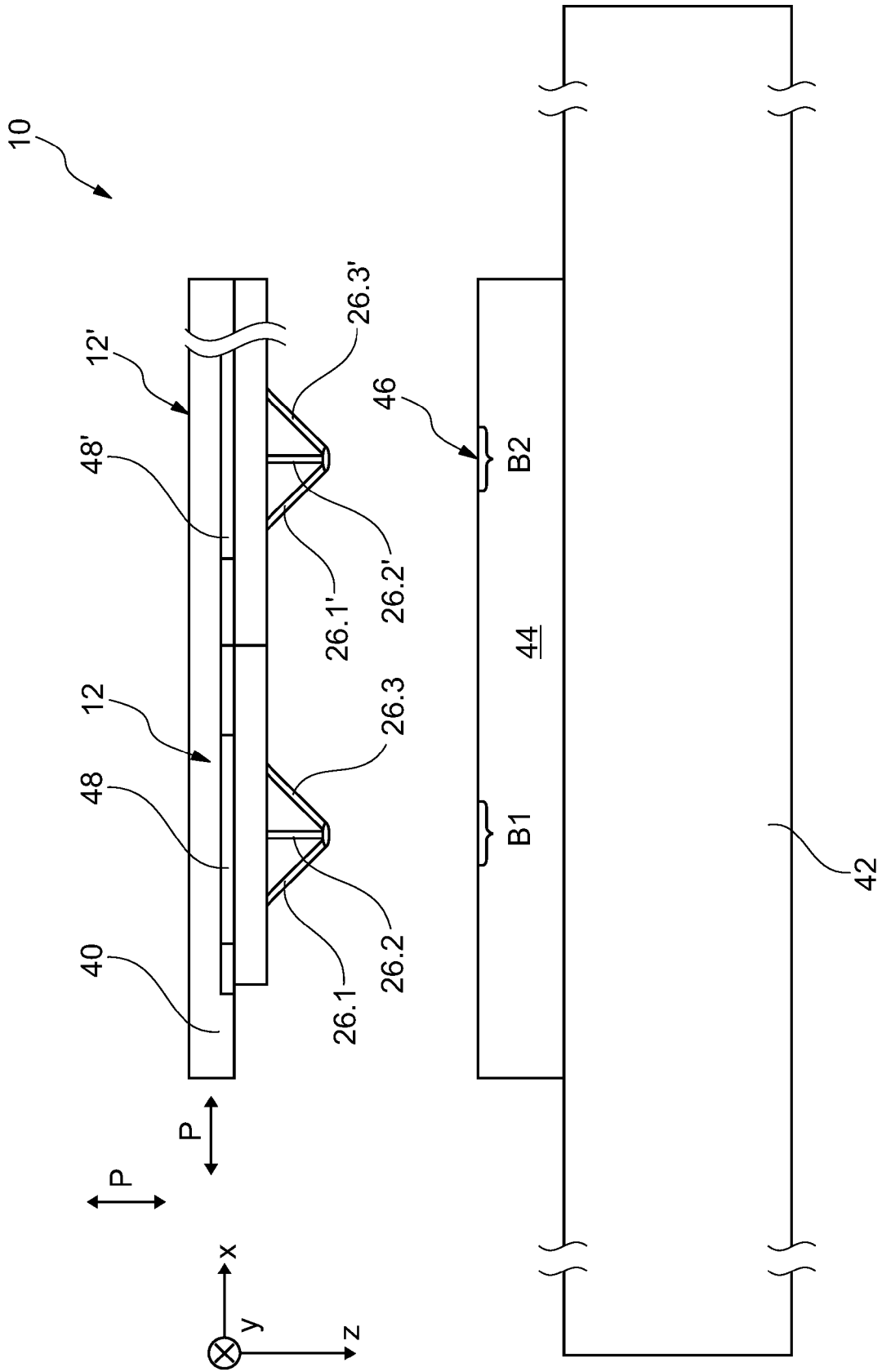


Fig. 4

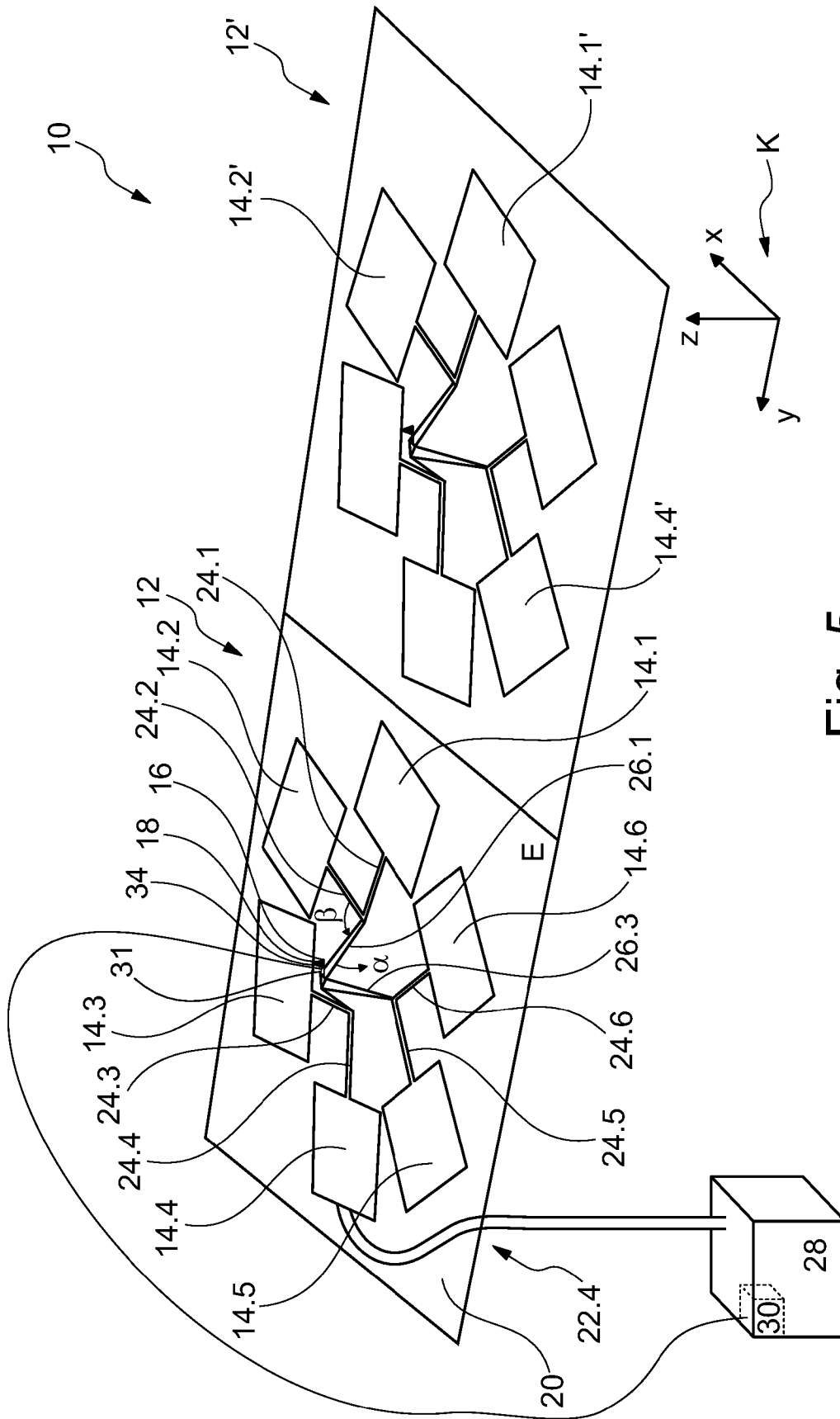


Fig. 5