



(10) **DE 10 2018 105 756 B3** 2019.03.28

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 105 756.3**
(22) Anmeldetag: **13.03.2018**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **28.03.2019**

(51) Int Cl.: **G01Q 70/02 (2010.01)**
G01Q 60/38 (2010.01)
G01Q 60/24 (2010.01)

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 PartGmbB, 38122 Braunschweig, DE

(72) Erfinder:
Dai, Gaoliang, Dr., 38116 Braunschweig, DE;
Thiesler, Jan, 38114 Braunschweig, DE

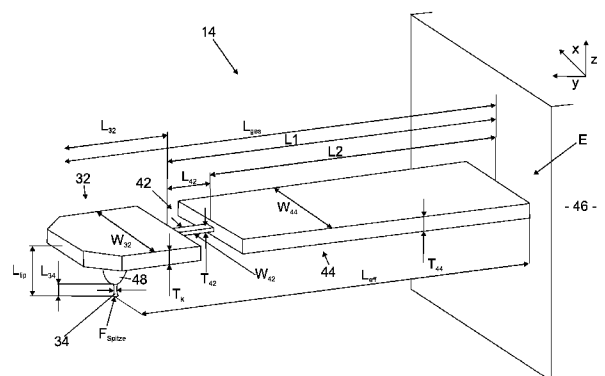
(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	6 223 591	B1
US	7 137 291	B2
US	2008 / 0 087 820	A1
US	2008 / 0 128 385	A1
US	2011 / 0 041 224	A1

A. Beyder, F. Sachs: "Microfabricated torsion levers optimized for low force and high-frequency operation in fluids", Ultramicroscopy 106, pp. 838-846 (2006)

(54) Bezeichnung: **Kantilever für ein Rastersondenmikroskop und Rasterkraftmikroskop**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Kantilever (14) für ein Rastersondenmikroskop, insbesondere ein Rasterkraftmikroskop (10), mit (a) einem Grundkörper (20), der einen Rumpfabschnitt (44), der an einem freien Ende (E) einen Befestigungsabschnitt (46) zum Befestigen am Rastersondenmikroskop hat, und am gegenüberliegenden Ende einen Kopfabschnitt (32) aufweist, und (b) einer Spitze (34) zum Rastern eines Untersuchungsobjekts, die sich vom Kopfabschnitt (32) weg erstreckt. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass (c) der Grundkörper (20) einen Halsabschnitt (42) aufweist, der sich an den Rumpfabschnitt (44) anschließt und an den sich der Kopfabschnitt (32) anschließt und der eine Halsabschnitt-Torsionssteifigkeit hat und dass (d) die Halsabschnitt-Torsionssteifigkeit höchstens einem Zehntel einer Rumpfabschnitt-Torsionssteifigkeit des Rumpfabschnitts (44) entspricht.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Kantilever für ein Rastersondenmikroskop, insbesondere ein Rasterkraftmikroskop, mit (a) einem Grundkörper, der einen Rumpfabschnitt, der an einem freien Ende einen Befestigungsabschnitt zum Befestigen am Rastersondenmikroskop hat, und am anderen Ende einen Kopfabschnitt aufweist und (b) einer Spitze zum Rastern des Untersuchungsobjekts, das sich vom Kopfabschnitt weg erstreckt. Insbesondere handelt es sich bei dem Kantilever um einen Kantilever für ein Rasterkraftmikroskop.

[0002] Derartige Kantilever werden verwendet, um in einem Rastersondenmikroskop, insbesondere einem Rasterkraftmikroskop, in Wechselwirkung mit einer Oberfläche des zu untersuchenden Objekts zu gelangen. Da die Objekte, die technisch hergestellt werden können, in den letzten Jahren beständig kleiner geworden sind, besteht der Wunsch, immer kleiner werdende Strukturen und Kräfte mittels eines Rasterkraftmikroskops zu erfassen. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die Messgenauigkeit bestehender Rasterkraftmikroskope umso kleiner wird, je dünner die Spitze des Kantilevers für die zu vermessenden Strukturen ist. Mit kleiner werdenden Strukturbreiten in der Nanotechnologie ist eine dünne Spitze zu bevorzugen.

[0003] Aus der US 6,223,591 B1 ist ein Kantilever für ein Rastersondenmikroskop bekannt, der eine plattenartige Erweiterung aufweist, sodass eine Torsionsschwingung besonders einfach detektiert werden kann. Eine erleichterte seitliche Auslenkung und isotropes Steifigkeitsverhältnis, wie sie für die Nanometrologie notwendig ist, lässt sich damit nicht erreichen.

[0004] Aus der US 7,137,291 B2 ist ein Rastersondenmikroskop bekannt, dessen Ansteuereinheit ausgebildet ist zum Oszillieren des Kantilevers, sodass dieser in einer resonanten Mode schwingt, wobei Spitzen aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen verwendet werden. Bei einem derartigen Kantilever weicht die Spitze seitlichen Kräften aus, dies führt aber zu einer starken Deformation der Spitze und zu einem geringen detektierbaren Signal.

[0005] Aus der US 2008/0087820 A1 ist ein Kantilever bekannt, der zwei seitliche Einkerbungen aufweist, um die Torsionssteifigkeit herabzusetzen. Zudem wird über eine Regelung sichergestellt, dass die Torsion nicht zu große Werte annimmt.

[0006] Aus der US 2011/0041224 A1 ist ein Kantilever bekannt, der zwischen dem Grundkörper und dem Kopfabschnitt eine klappenförmige Struktur aufweist, die über dünne Stege jeweils mit dem Grundkörper und dem Kopfabschnitt verbunden ist. Das

senkt die Torsionssteifigkeit nur um einen kleinen Betrag, hat aber den Vorteil, dass von der Bewegung dieses Abschnitts auf die Bewegung der Spitze geschlossen werden kann.

[0007] Aus der US 2008/0128385 A1 ist ein Kantilever bekannt, der eine Ausnehmung quer zur Längsrichtung aufweist, sodass die Biegesteifigkeit herabgesetzt ist. Die Ausnehmung führt zudem zu einer geringfügigen Herabsetzung der Torsionssteifigkeit. Ein solcher Kantilever ist für nanostrukturierte Oberflächen nur bedingt geeignet.

[0008] Aus der Veröffentlichung „Microfabricated torsion levers optimized for low force and high-frequency operation in fluids“ von Beyder und Sachs, Ultramicroscopy **106** (2006) 838-846 ist ein Kantilever bekannt, bei dem ein Tastkopf zwischen einer stimmengabelförmigen Struktur hängt.

[0009] Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, Nachteile im Stand der Technik zu vermindern.

[0010] Die Erfindung löst das Problem durch einen gattungsgemäßen Kantilever, bei dem der Grundkörper einen Halsabschnitt aufweist, der sich an den Rumpfabschnitt anschließt und an dem sich der Kopfabschnitt anschließt und der eine Halsabschnitt-Torsionssteifigkeit hat, wobei diese Halsabschnitt-Torsionssteifigkeit höchstens einem Zehntel einer Rumpfabschnitt-Torsionssteifigkeit des Rumpfabschnitts entspricht.

[0011] In anderen Worten besitzt der Grundkörper mit dem Halsabschnitt eine Schwächung, die die Torsionssteifigkeit herabsetzt. Die Spitze kann daher im Vergleich zu bekannten Kantilevern deutlich leichter seitlich ausgelenkt werden.

[0012] Der Erfindung liegt die Erkenntnis zu Grunde, dass es besonders günstig ist, wenn die Spitze in einer Richtung zurückweicht, die möglichst gut der Normalenrichtung auf die Oberfläche des Prüflings am Antastpunkt entspricht. Bei bekannten Kantilevern ist die Torsionssteifigkeit des Kantilevers sehr hoch im Vergleich zur Biegesteifigkeit. Das führt dazu, dass die Spitze in eine von der Normalenrichtung abweichende Richtung gedrückt wird, wenn sie in Normalenrichtungen in Kontakt mit der zu vermessenden Oberfläche kommt. Dies führt zur Fehlinterpretation der gemessenen Kontur. Kommt die Spitze beispielsweise unter einem 45°-Winkel in Kontakt mit der zu untersuchenden Oberfläche, so kann die Spitze seitwärts kaum ausweichen. Kommt die Spitze beispielsweise unter einem 90°-Winkel in Kontakt mit der zu untersuchenden Oberfläche, so kann nur ein sehr geringes Torsionssignal detektiert werden, da die Biegesteifigkeit der weichen Spitze viel kleiner als die Torsionssteifigkeit des Kantilevers ist. Eine Auslenkung findet so maßgeblich im Bereich der

Spitze, durch verbiegen dieser, statt. Dies ist nicht detektierbar und führt zu Messfehlern. Bei dem erfindungsgemäßen Kantilever hingegen ist die Torsionssteifigkeit so klein, dass der Kopfabschnitt sich verdrehen kann und ein ausreichendes Torsionssignal detektiert werden kann. Zudem führt die Position des Halsabschnitts nahe der Spitze zu einem größeren Biegewinkel pro Auslenkung der Spitze. Diese Verbesserungen führen zu größeren Messsignalen und zu einem geringeren Messfehler.

[0013] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Grundkörper derjenige Teil des Kantilevers verstanden, der nicht zur Spitze gehört. In anderen Worten ist der Kantilever zusammengesetzt aus dem Grundkörper und der Spitze. Die Spitze ist derjenige Abschnitt des Kantilevers, dessen freies Ende zum Wechselwirken mit der Oberfläche des Prüflings ausgebildet ist.

[0014] Unter dem Merkmal, dass ein Rumpfabschnitt, ein Kopfabschnitt und der Halsabschnitt existieren, wird insbesondere verstanden, dass zumindest drei unterscheidbare Abschnitte existieren, bei denen das angegebene Kriterium zur Torsionssteifigkeit erfüllt ist. In anderen Worten ist es möglich, nicht aber notwendig, dass die entsprechenden Abschnitte bereits dadurch sichtbar werden, dass sie sich in ihren Querschnitten oder Materialien voneinander unterscheiden.

[0015] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform entspricht die Halsabschnitt-Torsionssteifigkeit höchstens einem Zehntel einer Kopfabschnitt-Torsionssteifigkeit des Kopfes oder Rumpfabschnitt-Torsionssteifigkeit des Rumpfes. In diesem Fall existieren zwei torsionssteife Abschnitte, nämlich der Rumpfabschnitt und der Kopfabschnitt, die von einem torsionsweichen Halsabschnitt miteinander verbunden sind. Insbesondere geht der Rumpfabschnitt direkt in den Halsabschnitt über und der Halsabschnitt geht unmittelbar in den Kopfabschnitt über. Allerdings ist es auch denkbar, dass der Kantilever zwei oder mehr Halsabschnitte aufweist. Maßgeblich ist lediglich, dass die drei genannten Abschnitte, mit Ausnahme des Rumpfabschnitts zumindest einmal existieren. Besonders günstig ist es jedoch, wenn genau ein Kopfabschnitt, genau ein Halsabschnitt und genau ein Rumpfabschnitt existieren.

[0016] Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass sich die Spitze entlang einer z-Richtung vom Kopfabschnitt weg erstreckt und dass sich der Rumpfabschnitt entlang einer y-Richtung erstreckt. Die x-Richtung ergibt sich aus diesen Festlegungen dadurch, dass das entstehende Koordinatensystem ein Rechtssystem ist.

[0017] In diesem Koordinatensystem kann die inverse Steifigkeit des Kantilevers bezüglich einer

Bewegung der Spitze relativ zum Befestigungsabschnitt durch eine Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C} beschrieben werden. Die inverse Steifigkeit der Spitze bezüglich einer Bewegung der Spitze relativ zum Kopf kann durch eine Spitzen-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C}_s beschrieben werden. Die inverse Steifigkeit des Kopfabschnitts bezüglich einer Bewegung des Kopfabschnitts relativ zum Befestigungsabschnitt ist durch eine Kopf-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C}_c beschreibbar.

[0018] Ein erstes Spitzensteifigkeitsverhältnis in Form eines Quotienten aus dem ersten Diagonalelement c_{s11} der Spitzen-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C}_s als Zähler und dem ersten Diagonalelement c_{c11} der Kopf-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C}_c als Nenner beträgt höchstens 50, vorzugsweise höchstens 20. In anderen Worten ist die inverse Steifigkeit des Kopfes bezüglich einer Bewegung relativ zum Befestigungsabschnitt deutlich torsionsweicher als bei herkömmlichen Kantilevern. Das ermöglicht es dem Kopfabschnitt auf eine Kraft an der Spitze mit einer erhöhten Auslenkung zu reagieren, wobei diese Auslenkbewegung nachgewiesen werden kann.

[0019] Vorzugsweise beträgt ein zweiter Spitzensteifigkeitswert in Form eines Quotienten aus dem zweiten Diagonalelement c_{s22} der Spitzen-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C}_s als Zähler und dem zweiten Diagonalelement c_{c22} der Kopf-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C}_c als Nenner höchstens 50, vorzugsweise höchstens 20.

[0020] Günstig ist es, wenn ein erster Quer-Inverssteifigkeitswert I_{11} in Form eines Quotienten aus dem ersten Diagonalelement c_{11} der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C} als Zähler und dem dritten Diagonalelement c_{33} von \mathbf{C} als Nenner höchstens 4 oder zumindest 0,25 beträgt. Alternativ und zusätzlich beträgt ein zweiter Quer-Inverssteifigkeitswert I_{22} in Form des Quotienten aus dem zweiten Diagonalelement c_{22} als Zähler und dem dritten Diagonalelement c_{33} der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C} als Nenner höchstens 4 oder zumindest 0,25. Auf diese Weise ergibt sich eine im Vergleich zu Kantilevern aus dem Stand der Technik hohe Isotropie der Steifigkeiten bei verbesserter Messsensitivität, was die oben diskutierten Vorteile hat.

[0021] Die Nicht-Diagonalelemente der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C} betragen vorzugsweise höchstens das 4-fache des dritten Diagonalelementes c_{33} dieser Matrix. Vorzugsweise sind zumindest zwei, insbesondere vier, vorzugsweise sechs der Nicht-Diagonalelemente gleich null. Günstig ist es, wenn die Nicht-Diagonalelemente der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix \mathbf{C} höchstens das 1-fache des dritten Diagonalelementes c_{33} dieser Matrix betragen. Dies verringert ein Übersprechen.

[0022] Die Masse des Kopfabschnitts und der Spitze sowie die Halsabschnitt-Biegesteifigkeit und Halsabschnitt-Torsionssteifigkeit sind vorzugsweise so gewählt, dass eine erste Eigenfrequenz des Kantilevers zumindest 1000 Hertz beträgt. Ist die erste Eigenfrequenz zu klein, muss die Masse des Kopfabschnitts verringert werden. Alternativ kann die Biegesteifigkeit und/oder die Torsionssteifigkeit erhöht werden, sofern die oben angegebene Forderung an das Verhältnis der Torsions-Steifigkeiten zwischen Halsabschnitt und den übrigen Abschnitten gewahrt bleibt.

[0023] Eine nominelle inverse Steifigkeit liegt vorzugsweise zwischen 100 m/N und 0,01 m/N.

[0024] Vorzugsweise ist die Spitze aufgeweitet. Eine aufgeweitete Spitze ist unter dem Begriff „flared tip“ bekannt. Eine aufgeweitete Spitze bedeutet, dass das freie Ende der Spitze einen größeren Durchmesser hat als beabstandet vom freien Ende. Derartige Tastspitzen sind besonders dann vorteilhaft, wenn auch seitlich angetastet werden soll. In diesem Fall ist die verminderte Torsionssteifigkeit des erfindungsgemäßen Kantilevers besonders vorteilhaft.

[0025] Erfindungsgemäß ist zudem ein Rasterkraftmikroskop mit einer Befestigungsvorrichtung und einem erfindungsgemäßen Kantilever, der an seinem Befestigungsabschnitt mittels der Befestigungsvorrichtung befestigt ist.

[0026] Ein derartiges Rasterkraftmikroskop besitzt vorzugsweise einen ersten Antrieb und einen zweiten Antrieb sowie eine Ansteuereinheit, die ausgebildet ist zum Ansteuern der Antriebe. Vorzugsweise ist die Ansteuereinheit so ausgebildet, dass die Spitze in einer ersten Oszillationsrichtung und einer zweiten Oszillationsrichtung bewegbar ist, wobei die zweite Oszillationsrichtung quer zur ersten Oszillationsrichtung verläuft. Besonders günstig ist es, wenn die Antriebe und die Ansteuereinheit ausgebildet sind zum Bewegen des Kopfabschnitts in einer Dreh-Oszillationsbewegung relativ zum Rumpfabschnitt und/ oder Befestigungsabschnitt. Bevorzugt sind die Antriebe und die Ansteuereinheit so ausgebildet, dass der Halsabschnitt eine Torsionsschwingung ausführt.

[0027] Das Rasterkraftmikroskop umfasst vorzugsweise zudem eine Detektionseinheit zum Erfassen einer zumindest zweidimensionalen, vorzugsweise dreidimensionalen Auslenkung des Kopfabschnitts relativ zum Rumpfabschnitt.

[0028] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1a eine dreidimensionale Ansicht eines erfindungsgemäßen Rasterkraftmikroskops,

Fig. 1b ein Kräfte diagramm zur Erläuterung der Kräfte, die auf die Spitze beim Kontakt mit einer

Oberfläche des zu untersuchenden Objekts wirken,

Fig. 2 eine erste Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Kantilevers, der an einer Befestigungsvorrichtung des Rasterkraftmikroskops gemäß **Fig. 1** befestigt ist,

Fig. 3 in den **Fig. 3a** bis **Fig. 3d** weitere Ausführungsformen erfindungsgemäßer Kantilever und

Fig. 4 in den **Fig. 4a** bis **Fig. 4c** weitere Ausführungsformen erfindungsgemäßer Kantilever und

Fig. 5 in den **Fig. 5a** bis **Fig. 5b** weitere Ausführungsformen erfindungsgemäßer Kantilever.

[0029] **Fig. 1a** zeigt eine schematische Ansicht eines erfindungsgemäßen Rasterkraftmikroskops **10**, das eine schematisch eingezeichnete Befestigungsvorrichtung **12**, mittels der ein Kantilever **14** befestigt ist.

[0030] Das Rasterkraftmikroskop **10** umfasst eine Ansteuereinheit **16**, die mit einem ersten Antrieb **18.1** und einem zweiten Antrieb **18.2** verbunden ist. Im vorliegenden Fall sind die Antriebe **18.1**, **18.2** als Piezoelemente ausgebildet, die mit einem Grundkörper **20** des Kantilevers **14** verbunden sind. Es ist aber auch möglich, dass die Antriebe **18.1**, **18.2** und gegebenenfalls weitere vorhandene Antriebe möglich sind, sowie Antriebe die lediglich in mechanischen Kontakt mit dem Kantilever **14** stehen und nicht, wie im vorliegenden Fall, der eine bevorzugte Ausführungsform darstellt, fest mit dem Kantilever **14** verbunden sind.

[0031] Das Rasterkraftmikroskop **10** besitzt zudem einen Positionsmesser **22**, der eine Lichtquelle **24**, beispielsweise in Form einer Laserdiode, und einem Detektor **26** umfasst. Die Lichtquelle **24** sendet einen Lichtstrahl **28** aus, der, beispielsweise mittels einer Optik **30**, auf einen Kopfabschnitt **32** des Kantilevers **14** gerichtet wird. Bewegt sich eine Spitze **34** des Kantilevers **14**, so bewegt sich der Kopfabschnitt **32** entsprechend. Der Lichtstrahl **28** wird am Kopfabschnitt **32** reflektiert, sodass ein reflektierter Lichtstrahl **28'** entsteht, der auf den Detektor **26** fällt. Aus der Position des reflektierten Lichtstrahls **28'** auf den Detektor **26** kann auf die Position der Spitze **34** in einem vorgegebenen Koordinatensystem geschlossen werden. Weitere Auslesetechniken, beispielsweise interferometrisch, piezoelektrisch oder andere, sind denkbar.

[0032] Die Spitze **34** ist zum Abtasten einer Oberfläche **36** eines Prüflings **38** ausgebildet. Der Prüfling **38** ist auf einem x-y-Tisch **40** angeordnet und kann von diesem zumindest in x- und y-Richtung bewegt werden. Es ist zudem möglich, dass der x-y-Tisch **40** in z-Richtung verfahrbar ist.

[0033] Die Ansteuereinheit **16** ist mit dem Antrieb **18.1**, **18.2** sowie mit dem Detektor **26** verbunden. Die Art der Ansteuerung der Antriebe **18.1**, **18.2** ist aus dem Stand der Technik bekannt und wird daher nicht weiter erläutert.

[0034] **Fig. 1b** zeigt schematisch die Kräfte, die auf die Spitze **34** beim Antasten der Oberfläche **36** wirken. Es ist zu erkennen, dass eine Horizontalkraftkomponente F_H aus der Antastkraft F_{Spitze} entsteht. Diese kann zusammen mit einer in normaler Richtung wirkenden zu einem Stick-Slip-Effekt führen, der die Messergebnisse verfälscht, beispielsweise indem die resultierende Auslenkung $\Delta\vec{s}$ (vgl. Formel 1) nicht in Richtung der Kraftspitze \vec{F} verläuft.

[0035] **Fig. 2** zeigt einen erfindungsgemäßen Kanti-lever mit einem Grundkörper, der neben dem Kopfabschnitt **32** einen Halsabschnitt **42** und einen Rumpfabschnitt **44** hat. Der Rumpfabschnitt besitzt an seinem freien Ende **E**, also an dem Ende, der dem Halsabschnitt **42** gegenüberliegt, einen Befestigungsabschnitt **46**, mit dem er an einem Rasterkraftmikroskop befestigt werden kann. Am Kopfabschnitt **32** ist die Spitze **34** angeordnet, die im vorliegenden Fall auf-geweitet ist. Eine derartige Spitze wird im Englischen als „flared tip“ bezeichnet.

[0036] Wirkt auf die Spitze **34** die Antastkraft F_{Spitze} so kommt es zu einer elastischen Deformation des gesamten Kanti-levers **14**.

[0037] Eine Bewegung der Spitze **34** relativ zum Befestigungsabschnitt des Kanti-levers **14** wird durch die Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix C

$$\Delta\vec{s} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \\ \Delta F_z \end{pmatrix} = C \Delta\vec{F} \tag{Formel 1}$$

beschrieben. Es gilt

$$\Delta\vec{F} = C^{-1} \Delta\vec{s} =: \mathbf{K} \Delta\vec{s}$$

[0038] K ist die Inverse der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix C und heißt Steifigkeitsmatrix.

[0039] Eine Bewegung der Spitze relativ zum Kopfabschnitt **32** wird durch eine Spitzen-Inverssteifigkeitsmatrix C_s

$$C_s = \begin{pmatrix} c_{s,11} & c_{s,12} & c_{s,13} \\ c_{s,21} & c_{s,22} & c_{s,23} \\ c_{s,31} & c_{s,32} & c_{s,33} \end{pmatrix} \tag{Formel 2}$$

beschrieben.

[0040] Eine Bewegung des Kopfabschnitts **32** relativ zum Befestigungsabschnitt **46** wird durch eine Kopf-Inverssteifigkeitsmatrix C_c

$$C_c = \begin{pmatrix} c_{c,11} & c_{c,12} & c_{c,13} \\ c_{c,21} & c_{c,22} & c_{c,23} \\ c_{c,31} & c_{c,32} & c_{c,33} \end{pmatrix} \tag{Formel 3}$$

beschrieben, ($C = C_c + C_s$).

[0041] Eine Masse m_{32} des Kopfes beträgt zwischen $m_{32} = 0,5$ Picogramm bis 100 Mikrogramm. Eine Länge L_{ges} beträgt zwischen 4 Mikrometern und 300 Mikrometern, L_{eff} beträgt zwischen 4 Mikrometern und 300 Mikrometern. Eine Breite w_{44} des Rumpfabschnitts **44** liegt vorzugsweise zwischen 2 Mikrometern und 200 Mikrometern, eine Breite w_{42} des Halsabschnitts **42** beträgt, was eine bevorzugte Ausführungsform darstellt, höchstens ein Zehntel der Breite w_{44} des Rumpfabschnitts und liegt im vorliegenden Fall zwischen 0,03 Mikrometern und 10 Mikrometern.

[0042] Eine Dicke t_{44} des Rumpfabschnitts liegt zwischen 0,01 Mikrometern und 10 Mikrometern, eine Dicke t_{42} des Halses liegt zwischen 0,01 Mikrometern oder 10 Mikrometern.

[0043] Es hat sich herausgestellt, dass eine Halslänge $L_{42} = L_1 - L_2$ 0,1 Mikrometer bis 60 Mikrometer beträgt. Eine Länge L_{32} des Kopfabschnitts beträgt vorzugsweise zumindest das Dreifache der Halslänge L_{42} und liegt im vorliegenden Fall zwischen 2 Mikrometern und 200 Mikrometern. Eine Breite w_{32} des Kopfes beträgt 2 Mikrometer bis 200 Mikrometer, ein mittlerer nomineller Durchmesser der Spitze **34** liegt zwischen 3 Nanometer und 5 Mikrometer. Eine Spitzenlänge L_{34} liegt zwischen 0,01 Mikrometern und 300 Mikrometern. Der Kopfabschnitt **32** kann einen Vorsprung **48** aufweisen, sodass die Spitze **34** an ihrem freien Ende einen Abstand von $L_{\text{tip}} = 0,5$ Mikrometer bis 350 Mikrometer haben kann.

[0044] Beispielsweise ist der Kanti-lever **14** ausgebildet zum Aufnehmen einer Kraft bis 100 Nanonewton, wobei Kräfte im Bereich zwischen 1 und 10 Nanonewton mit einer relativen Genauigkeit von 5 % gemessen werden können.

[0045] Eine Eigenfrequenz des Kanti-levers, d. h. die Frequenz, mit der er in seiner Grundmode schwingt, liegt oberhalb von einem Kilohertz, beispielsweise bei 1,5 Kilohertz.

[0046] Aus der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix C und der Spitzen-Inverssteifigkeitsmatrix C_s sowie der Kopf-Inverssteifigkeitsmatrix C_c ergeben sich die folgenden Kennwerte. Ein erstes Spitzensteifigkeitsver-

hältnis $I_{s11} = c_{s,11} / c_{c,11}$ beträgt $I_{s1} = 5$. Die Quer-Inverstiefigkeitswerte betragen im vorliegenden Fall $I_{11} = 1,2$ und $I_{22} = 1,5$, wobei die $c_{s,11} = c_{s,22}$ ist. Die Nicht-Diagonalelemente c_{12} , c_{13} , c_{21} , c_{31} sind im vorliegenden Fall allesamt kleiner als ein zwanzigstel von c_{33} , wobei c_{23} und c_{32} kleiner als das 0,65-fache des dritten Diagonalelementes c_{33} sind.

[0047] Fig. 3a zeigt eine zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Kantilevers 14, bei dem die Spitze 34 nicht aufgeweitet ist.

[0048] Fig. 3b zeigt eine zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Kantilevers 14, bei dem der Halsabschnitt durch zwei Einschnitte 50.1, 50.2 gebildet wird.

[0049] Fig. 3c zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Kantilevers, bei dem der Halsabschnitt 42 wie in der Ausführungsform gemäß Fig. 3a durch einen dünnen Steg gebildet ist, wobei der Steg bei der Ausführungsform gemäß Fig. 3c bikonkav ausgebildet ist.

[0050] Fig. 3d zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Kantilevers 14 mit mehr als einem Halsabschnitt (42).

[0051] Fig. 4a zeigt eine weitere Ausführungsform, bei der wie in Fig. 3b der Kopfabschnitt 42 durch Einschnitte 50.1, 50.2 definiert ist.

[0052] Fig. 4 zeigt in Fig. 4a einen erfindungsgemäßen Kantilever 14, bei dem Halsabschnitt 42 durch einen Bereich deutlich verminderter Dicken gebildet ist. Einschnitte 50.1, 50.2 bewirken, dass lediglich der Halsabschnitt 42 mit der verminderten Dicke die Verbindung zwischen dem Kopfabschnitt 32 mit dem Rumpfabschnitt 44 bildet.

[0053] Fig. 4b zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Kantilevers 14, bei dem zusätzlich zu dem Halsabschnitt 42.1, wie er für Fig. 4a beschrieben ist, ein zweiter Halsabschnitt 42.2 vorhanden ist.

[0054] Fig. 4c zeigt einen erfindungsgemäßen Kantilever gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung. Dieser besitzt keinen Rumpfabschnitt, die Torsionssteifigkeit ist jedoch deutlich geringer als bei Kantilevern nach dem Stand der Technik.

[0055] Fig. 5a zeigt einen erfindungsgemäßen Kantilever 14 mit einem Halsabschnitt 42, der durch die Ausnehmung 52 im Grundkörper 20 bewirkt wird. Im vorliegenden Fall ist die Ausnehmung 52 mit Streben 54.1, 54.2 versteift.

[0056] Fig. 5b zeigt eine weitere Ansicht eines erfindungsgemäßen Kantilevers 14 mit verminderter Torsionssteifigkeit.

Bezugszeichenliste

10	Rasterkraftmikroskop
12	Befestigungsvorrichtung
14	Kantilever
16	Ansteuereinheit
18	Antrieb
20	Grundkörper
22	Positionsmesser
24	Lichtquelle
26	Detektor
28	Lichtstrahl
30	Optik
32	Kopfabschnitt
34	Spitze
36	Oberfläche
38	Prüfling
40	x-y-Tisch
42	Halsabschnitt
44	Rumpfabschnitt
46	Befestigungsabschnitt
48	Vorsprung
50	Einschnitt
52	Ausnehmung
54	Strebe
F_H	Horizontalkraft
F_{Spitze}	Antastkraft
E	freies Ende
m	Masse
L_{ges}	Länge des Kantilevers
W	Breite
L	Länge
T	Dicke

Patentansprüche

1. Kantilever (14) für ein Rastersondenmikroskop, insbesondere ein Rasterkraftmikroskop (10), mit (a) einem Grundkörper (20), der

- einen Rumpfabschnitt (44), der an einem freien Ende (E) einen Befestigungsabschnitt (46) zum Befestigen am Rastersondenmikroskop hat, und
 - am gegenüberliegenden Ende einen Kopfabschnitt (32) aufweist, und
 (b) einer Spitze (34) zum Rastern eines Untersuchungsobjekts, die sich vom Kopfabschnitt (32) weg erstreckt, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 (c) der Grundkörper (20) einen Halsabschnitt (42) aufweist,
 - der sich an den Rumpfabschnitt (44) anschließt und
 - an den sich der Kopfabschnitt (32) anschließt und
 - der eine Halsabschnitt-Torsionssteifigkeit hat und dass
 (d) die Halsabschnitt-Torsionssteifigkeit höchstens einem Zehntel einer Rumpfabschnitt-Torsionssteifigkeit des Rumpfabschnitts (44) entspricht.

2. Kantilever (14) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Halsabschnitt-Torsionssteifigkeit höchstens einem Zehntel einer Kopfabschnitt-Torsionssteifigkeit des Kopfabschnitts (32), ohne Spitze, entspricht.

3. Kantilever (14) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 (a) sich die Spitze (34) entlang einer z-Richtung vom Kopfabschnitt (32) weg erstreckt und der Rumpfabschnitt (44) entlang einer y-Richtung erstreckt,
 (b) eine inverse Steifigkeit des Kantilevers (14) bezüglich einer Bewegung der Spitze (34) relativ zum Befestigungsabschnitt (46) durch eine Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix (C) beschreibbar ist,
 (c) eine inverse Steifigkeit der Spitze (34) bezüglich einer Bewegung des freien Spitzenendes der Spitze (34) relativ zum Kopfabschnitt (32) durch eine Spitzen-Inverssteifigkeitsmatrix (C_s) beschreibbar ist,
 (d) eine inverse Steifigkeit des Kopfabschnitts (32) bezüglich einer Bewegung des Kopfabschnitts (32) relativ zum Befestigungsabschnitt (46) durch eine Kopf-Inverssteifigkeitsmatrix (C_c) beschreibbar ist und
 (e) ein erstes Spitzensteifigkeitsverhältnis ($I_{s1} = c_{s,11} / c_{c,11}$) in Form eines Quotienten aus dem ersten Diagonalelement ($c_{s,11}$) der Spitzen-Inverssteifigkeitsmatrix (C_s) als Zähler und dem ersten Diagonalelement ($c_{c,11}$) der Kopf-Inverssteifigkeitsmatrix (C_c) als Nenner höchstens 50 beträgt.

4. Kantilever nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein zweites Spitzensteifigkeitsverhältnis ($I_{s2} = c_{s,22} / c_{c,22}$) in Form eines Quotienten aus dem zweiten Diagonalelement ($c_{s,22}$) der Spitzen-Inverssteifigkeitsmatrix (C_s) als Zähler und dem zweiten Diagonalelement ($c_{c,22}$) der Kopf-Inverssteifigkeitsmatrix (C_c) als Nenner höchstens 50 beträgt.

5. Kantilever (14) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 (a) ein erster Quer-Inverssteifigkeitswert (I_{11}) in Form eines Quotienten ($I_{11} = c_{11} / C_{33}$) aus dem ersten Diagonalelement (c_{11}) der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix (C) als Zähler und dem dritten Diagonalelement (c_{33}) der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix (C) als Nenner höchstens 4 und/oder zumindest 0,25 beträgt und/oder
 (b) ein zweiter Quer-Inverssteifigkeitswert (I_{22}) in Form eines Quotienten ($I_{22} = c_{22} / C_{33}$) aus dem zweiten Diagonalelement (c_{22}) der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix (C) als Zähler und dem dritten Diagonalelement (c_{33}) der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix (C) als Nenner höchstens 4 und/oder zumindest 0,25 beträgt.

6. Kantilever (14) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 (a) die Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix (C) Nicht-Diagonalelemente ($c_{12}, c_{13}, c_{21}, c_{31}, c_{23}, c_{32}$) hat, die kleiner als das 4-fache des dritten Diagonalelementes (c_{33}) der Gesamt-Inverssteifigkeitsmatrix (C) sind, insbesondere null, und/oder
 (b) die Spitzen-Inverssteifigkeitsmatrix (C_s) Nicht-Diagonalelemente ($c_{s,12}, c_{s,13}, c_{s,21}, c_{s,31}, c_{s,23}, c_{s,32}$) hat, die höchstens ein Zwanzigstel des Minimums der Diagonalelemente ($c_{s,11}, c_{s,22}, c_{s,33}$) der Spitzen-Inverssteifigkeitsmatrix (C_s) groß, insbesondere null, sind.

7. Rasterkraftmikroskop (10) mit
 (a) einer Befestigungsvorrichtung (12) und
 (b) einem Kantilever (14) nach einem der vorstehenden Ansprüche, der an seinem Befestigungsabschnitt (46) mittels der Befestigungsvorrichtung (12) befestigt ist.

8. Rasterkraftmikroskop (10) nach Anspruch 7, **gekennzeichnet durch**
 (a) einen ersten Antrieb (18.1),
 (b) einen zweiten Antrieb (18.2) und
 (c) eine Ansteuereinheit (16), die so ausgebildet ist, dass die Spitze (34) in einer ersten Oszillationsrichtung und
 einer zweiten Oszillationsrichtung, die quer zur ersten Oszillationsrichtung verläuft, bewegbar ist.

9. Rasterkraftmikroskop (10) nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die eine Ansteuereinheit (16) ausgebildet ist zum Bewegen des Kopfabschnitts in einer Dreh-Oszillationsbewegung relativ zum Rumpfabschnitt (44).

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

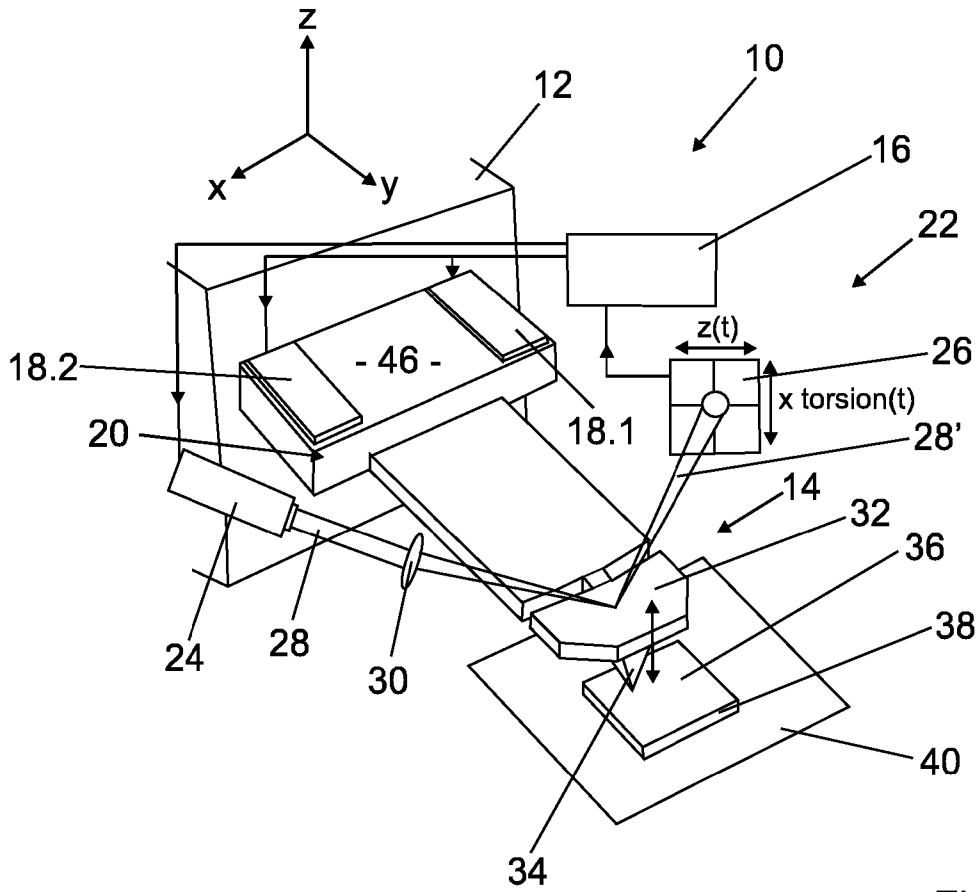


Fig. 1a

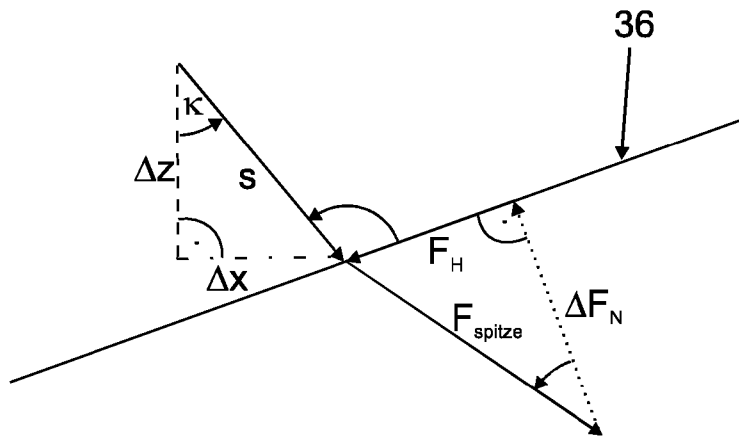
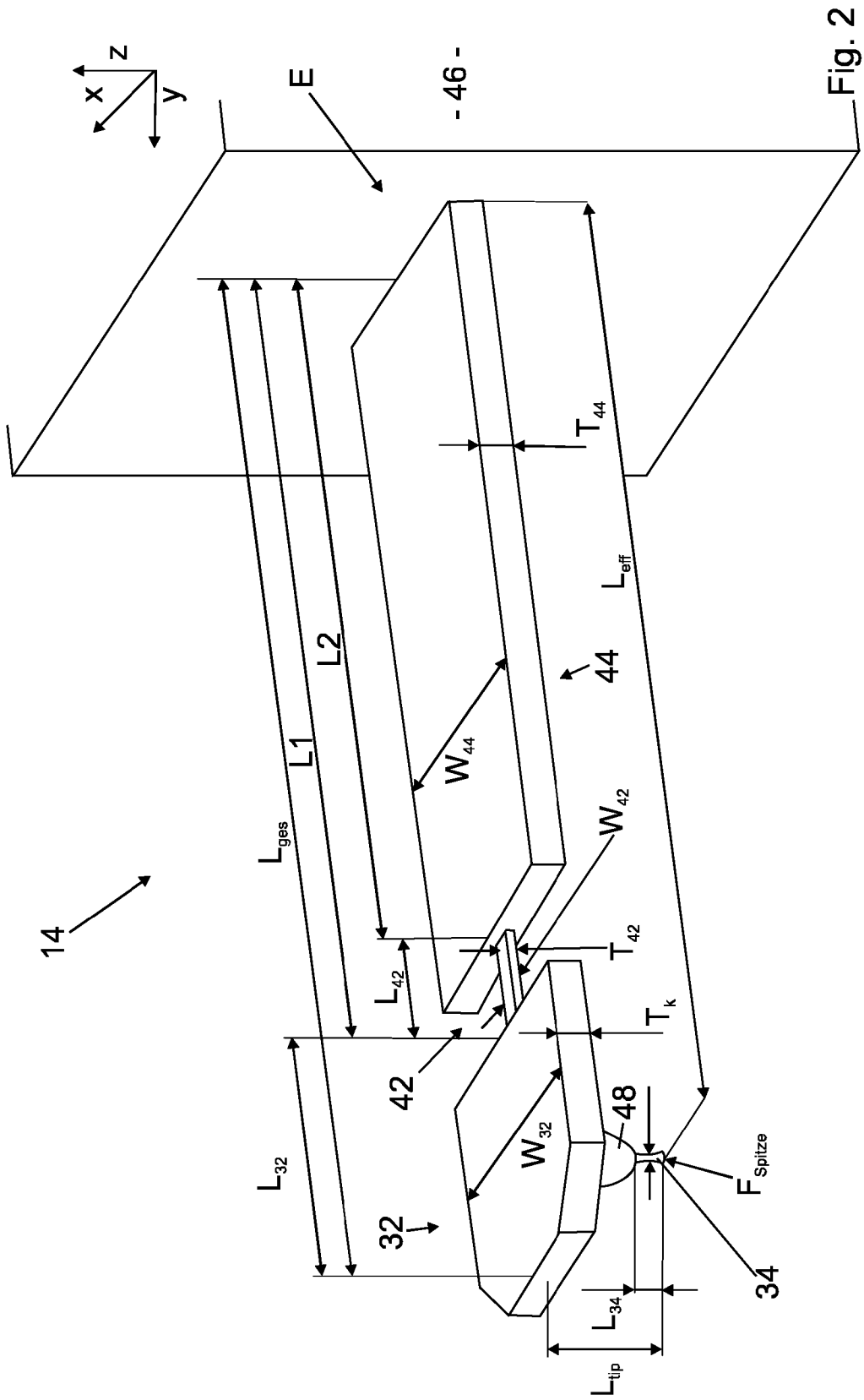


Fig. 1b



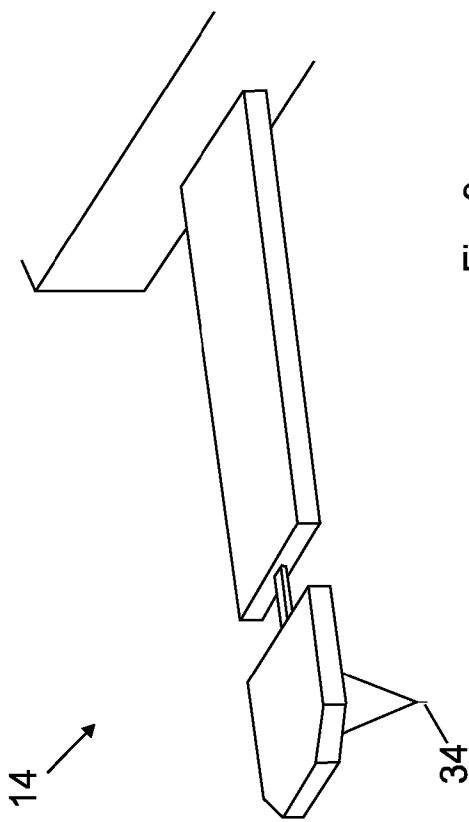


Fig. 3a

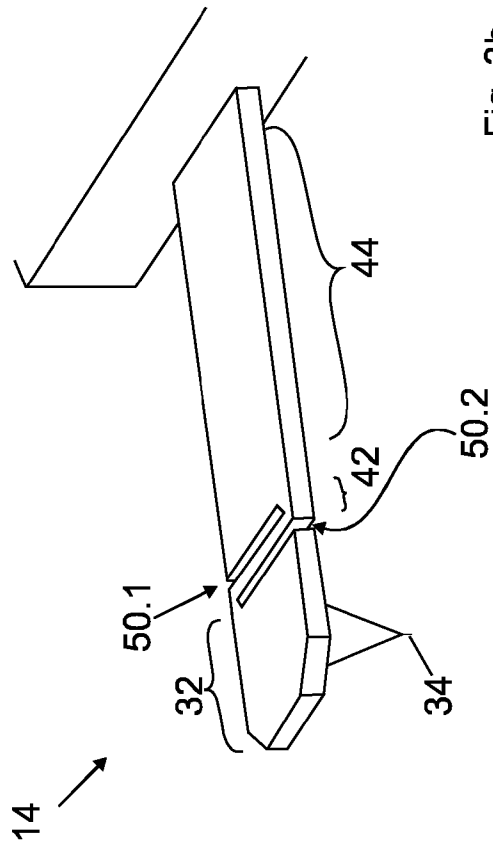


Fig. 3b

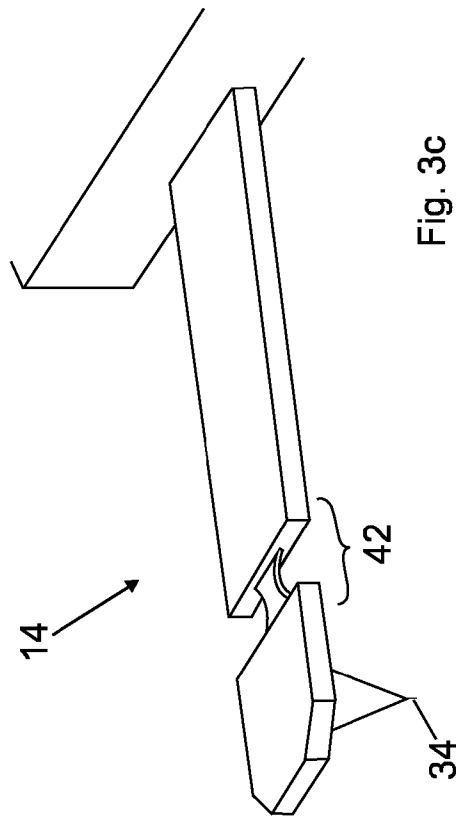


Fig. 3c

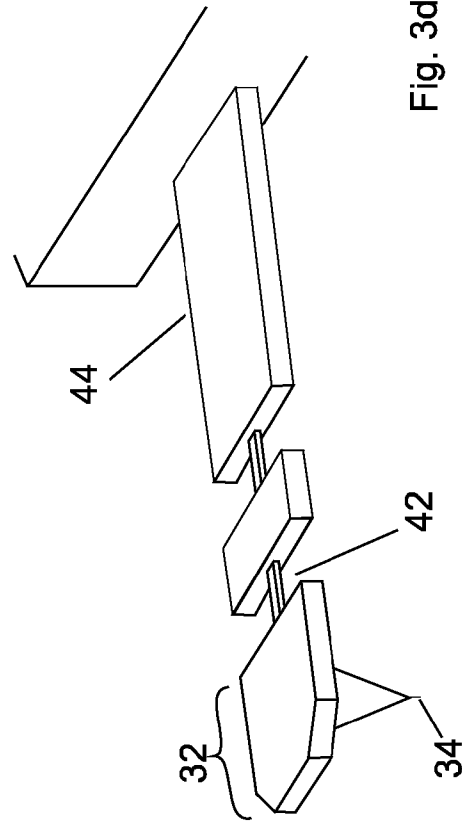


Fig. 3d

Fig. 3

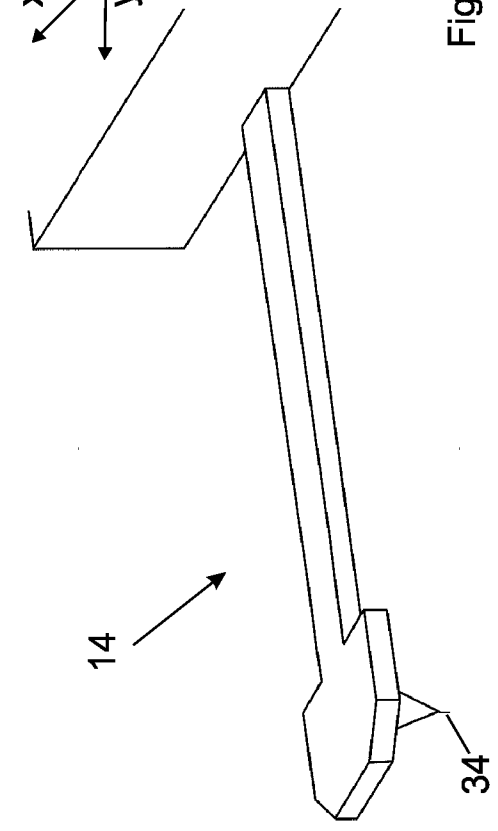
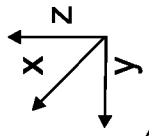


Fig. 4c

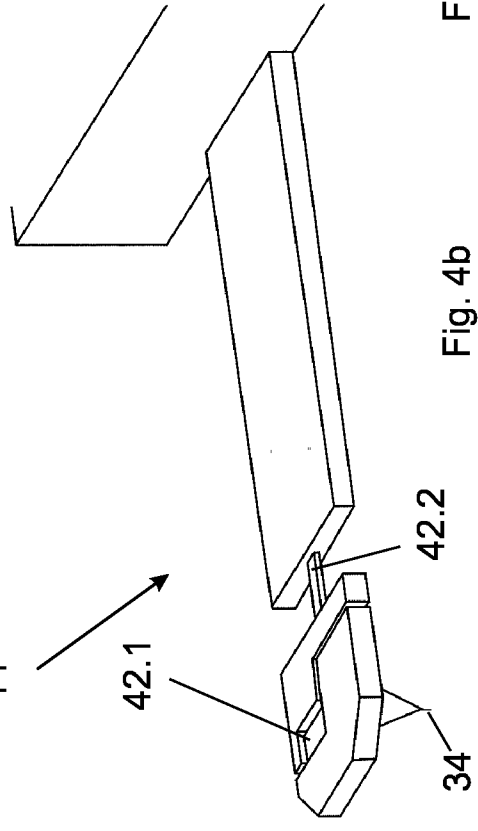


Fig. 4

Fig. 4b

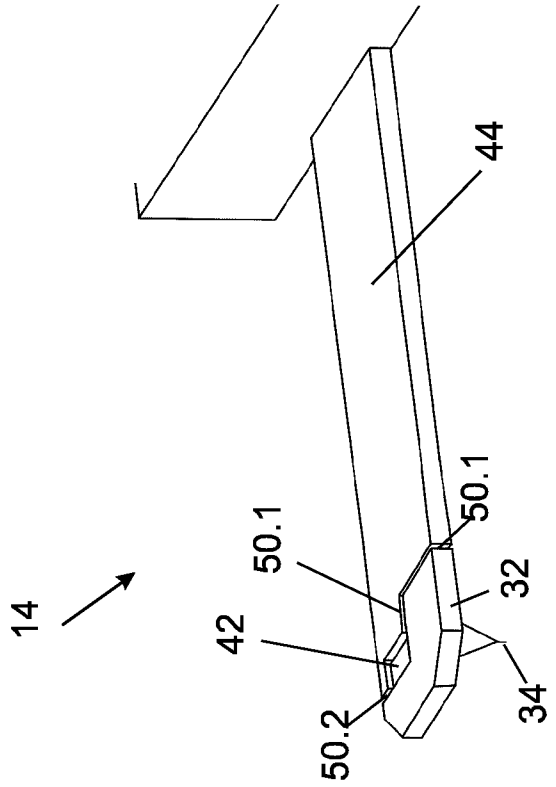


Fig. 4a

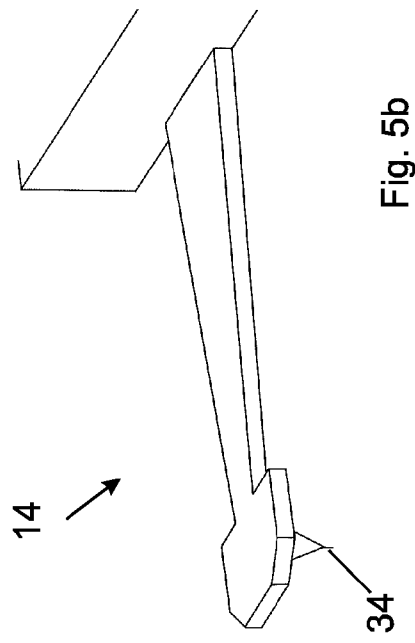
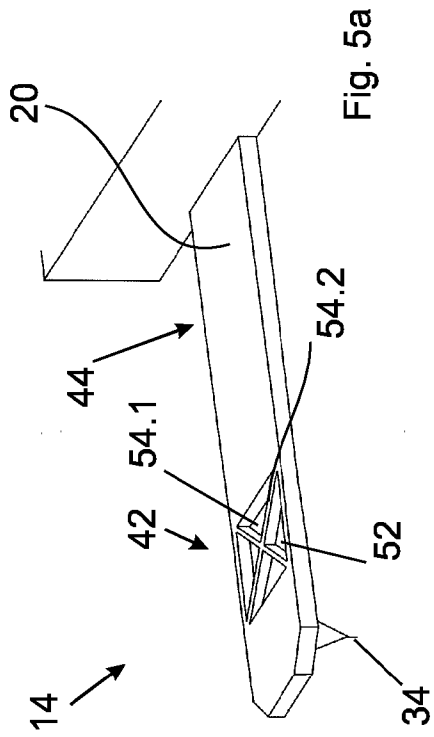


Fig. 5