

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 711 792 A2

(51) Int. Cl.: G01Q 60/24 (2010.01)
G01N 3/56 (2006.01)

Patentanmeldung für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: 01679/15

(22) Anmeldedatum: 18.11.2015

(43) Anmeldung veröffentlicht: 31.05.2017

(71) Anmelder:
Anton Paar TriTec SA, Rue de la Gare 4
2034 Peseux (CH)

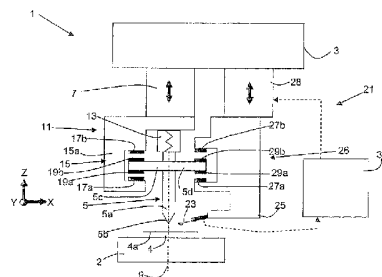
(72) Erfinder:
Bertrand Bellaton, 2000 Neuchâtel (CH)
Richard Consiglio, 2000 Neuchâtel (CH)
Jacques Woïrgard, 86330 La Grimaudière (FR)

(74) Vertreter:
e-Patent S.A., Rue Saint-Honoré, 1 Case postale 2510
2001 Neuchâtel (CH)

(54) Verfahren zur Vermessung eines topographischen Profils und/oder eines topographischen Bildes einer Oberfläche einer Probe.

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Vermessung eines topographischen Profils und/oder eines topographischen Bildes einer Oberfläche einer Probe, umfassend:

- Vorsehen eines Eindringmittels (1) der in EP 2 816 342 beschriebenen Art;
- Vorsehen einer Probe (4) auf dem Probenhalter (2);
- Positionieren des Eindringkörpers (5) ausser Kontakt mit der Probe (4) und in einer konstanten Position relativ zum Antriebskopf (3);
- Positionieren einer topographischen Spitze (23) derart, dass sie die Oberfläche (4a) der Probe (4) erkennt, und Positionieren einer Referenzstruktur (25) mithilfe des Rückkopplungskontrollsystems (31) und eines zweiten Aktors (28) in einem von der topographischen Spitze (23) erkannten vorbestimmten Abstand zur Oberfläche (4a);
- Messen der relativen Position des Eindringkörpers (5) relativ zur Referenzstruktur (25) mittels des Relativpositionssensors (26);
- Verschieben der Probe (4) senkrecht zur Längsachse (9), während die Referenzstruktur (25) im von der topographischen Spitze (23) mittels des Rückkopplungskontrollsystems (31) und des zweiten Aktors (28) erkannten vorbestimmten Abstand zur Oberfläche (4a) der Probe (4), während die relative Position des Eindringkörpers (5) relativ zur Referenzstruktur (25) mittels des Relativpositionssensors (26) gemessen wird;
- Erstellen eines topographischen Profils und/oder eines topographischen Bildes anhand der derart gewonnenen Messungen der relativen Position des Eindringkörpers (5) relativ zur Referenzstruktur (25).



Beschreibung**Fachgebiet**

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft das Gebiet der Materialmessungen. Insbesondere betrifft sie ein Verfahren zur Vornahme einer topographischen Vermessung eines Eindringversuchs mittels eines Eindringmittels, das eine topographische Spitze umfasst.

Stand der Technik

[0002] Die Atomkraftmikroskopie (AKM) und andere Arten der Mikroskopie auf kleinem Massstab zur Vornahme topographischer Vermessungen des Profils von Oberflächen sind hinreichend bekannt, wobei die Messgrößen häufig im Nanometerbereich liegen. Diese Messungen werden häufig in Kombination mit Eindringversuchsgeräten verwendet, um ein Profil der hergestellten Einkerbung zu erstellen und so nützliche Daten über das Restprofil der Einkerbung zu gewinnen. Besonders nützlich ist dies im Falle von Kratzteste, bei denen ein Eindringkörper über eine Probefläche unter konstanter oder variabler Eindringkraft gezogen wird. Im Ergebnis können zweidimensionale Daten über die Resttiefe der Einkerbung erzeugt werden, und durch Abtasten in mehreren parallelen Durchläufen können dreidimensionale Daten über den Versuch erzeugt werden.

[0003] Typischerweise kann eine AKM als anschraubbare Zusatzmodul einer Eindringversuchsvorrichtung vorgesehen sein, die einen grossen Abstand zwischen Eindringkörper und Spitze legt, wodurch weite Verschiebungen der Probe erforderlich werden, um eine topographische Messung vornehmen zu können. Bei mehreren bekannten Eindringversuchsgeräten wird jedoch eine AKM-Spitze (o.a.) mit dem Eindringkörper integriert, was zur Positionierung des Eindringkörpers dient und zur Messung der Eindringtiefe verwendet wird; hierdurch wird der Abstand verkleinert, was eine präzisere Referenzierung der topographischen Messung ermöglicht. Beispielsweise wird in der US 7,568,381 der Einsatz einer AKM-Spitze als Teil eines Referenzsensors beschrieben; dies kommt auch in der EP 2 816 342 vor.

[0004] Typischerweise müssen zur Vornahme einer topographischen Messung mit der AKM-Spitze typische zweckbestimmte AKM-Sensoren in die Vorrichtung integriert werden, um Messungen mit der AKM-Spitze vornehmen zu können, statt nur die Oberfläche der Probe zu erkennen, was eine höhere Komplexität sowie Mehrkosten zur Folge hat.

[0005] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht also darin, ein Verfahren zur Vornahme topographischer Messungen der Oberfläche einer Probe mithilfe einer Eindringvorrichtung vorzuschlagen, bei der keine weiteren Sensoren vorgesehen sein müssen, die nicht ohnehin bereits an der Eindringvorrichtung vorgesehen sind.

Beschreibung der Erfindung

[0006] Gelöst wird diese Aufgabe durch ein Verfahren zur Vermessung eines topographischen Bildes und/oder eines topographischen Profils einer Oberfläche einer Probe nach Anspruch 1. Das Verfahren wird in den nachfolgenden Absätzen beschrieben.

[0007] Erstens ist ein Eindringmittel vorgesehen, das einen Antriepskopf, einen am Antriepskopf mittels (d.h. mittelbar über) eines ersten Aktors, der zur Verschiebung des Eindringkörpers parallel zu einer Längsachse des Eindringkörpers angeordnet ist, montierten Eindringkörper und einen zur Messung einer vom Eindringkörper angewendeten Kraft geeigneten Kraftsensor umfasst. Das Eindringmittel umfasst ferner eine Referenzstruktur, die mittels (d.h. mittelbar über) eines zweiten Aktors, der zur Verschiebung der Referenzstruktur parallel zur Längsachse angeordnet ist, am Antriepskopf montiert ist, eine auf der Referenzstruktur montierte topographische Spitze, die zur Erkennung einer Oberfläche einer Probe, z.B. durch Ermitteln einer vorbestimmten Wechselwirkung zwischen der topographischen Spitze und der Probe (wie nachfolgend näher beschrieben), geeignet ist, und einen Relativpositionssensor, der zur Ermittlung einer relativen Position des Eindringkörpers relativ zur Referenzstruktur geeignet ist. Ein Rückkopplungskontrollsystem ist vorgesehen, das geeignet ist, den zweiten Aktor aufgrund der Erkennung einer Oberfläche einer Probe durch die topographische Spitze zu steuern; ebenfalls vorgesehen ist ein Probenhalter, der zum Halten der dem Eindringkörper und der topographischen Spitze zugewandten Probe angeordnet ist, wobei der Probenhalter derart angeordnet ist, dass er in mindestens einer Richtung senkrecht zur Längsachse verschiebbar ist. Der Probenhalter umfasst typischerweise eine Positionsanzeige, die allgemein bekannt ist.

[0008] Am Probenhalter ist eine Probe vorgesehen, und der Eindringkörper ist derart positioniert, dass er die Probe nicht kontaktiert und sich relativ zum Antriepskopf in einer konstanten Position befindet.

[0009] Anschliessend wird die topographische Spitze derart positioniert, dass sie die Oberfläche der Probe erkennt, und die Referenzstruktur wird damit mithilfe des Rückkopplungskontrollsystems und des zweiten Aktors in einem von der topographischen Spitze erkannten vorbestimmten Abstand zur Oberfläche (d.h. der Teil der Oberfläche, die von der Spitze erkannt wird) positioniert.

[0010] Die relative Position des Eindringkörpers wird dann relativ zur Referenzstruktur mittels des Relativpositionssensors, d.h. durch Messen und Aufzeichnen der relativen Position der Referenzstruktur relativ zum Eindringkörper, gemessen, wobei sich letztere in einer festen vertikalen Lage relativ zum Spindel befindet, und die Probe wird dann senkrecht zur Längsachse unter Wahrung des vorbestimmten Abstandes der Referenzstruktur zur mittels des Rückkopplungskontroll-

systems und des zweiten Aktors von der topographischen Spitze erkannten Oberfläche der Probe verschoben, während die relative Position des Eindringkörpers relativ zur Referenzstruktur mittels des Relativpositionssensors gemessen wird. Die topographische Spitze wird so vom Rückkopplungskontrollsystem und dem Aktor zur konstanten Wechselwirkung mit der Substratoberfläche veranlasst, und dementsprechend folgt die Referenzstruktur der Oberfläche nach oben und nach unten. Die resultierende vertikale Verschiebung der Referenzstruktur relativ zur festen vertikalen Lage des Eindringkörpers wird also vom Relativpositionssensor gemessen, dessen Ausgang dann zur Erstellung eines topographischen Bildes und/oder eines topographischen Profils aufgrund der Messungen der relativen Position des Eindringkörpers relativ zur Referenzstruktur verwendet wird. Der Begriff «topographisches Profil» bezieht sich auf eine Querschnittsansicht entlang einer durch einen Teil einer topographischen Karte der Oberfläche gezogenen Geraden und der Begriff «topographisches Bild» bezieht sich auf eine topographische Karte der Oberfläche. Somit ist das topographische Profil zweidimensional und basiert auf einem einzelnen Durchlauf der topographischen Spitze und das topographische Bild ist dreidimensional und aus mehreren parallelen Durchläufen der topographischen Spitze, d.h. aus mehreren topographischen Bildern, rekonstruiert.

[0011] Vorteilhafterweise wird vor dem Schritt des Positionierens des Eindringkörpers ausser Kontakt mit der Probe mittels des Eindringkörpers ein Eindringversuch vorgenommen. Dieser Eindringversuch kann ein einfacher Eindringversuch oder ein Kratztest sein, bei der die Probe beim Eindringen auf allgemein bekannte Weise senkrecht zur Längsachse des Eindringkörpers verschoben wird.

[0012] Die konstante Position des Eindringkörpers parallel zur Längsachse kann mittels des Kraftsensors geprüft werden, der eine zwischen Eindringkörper und Aktor angeordnete Feder umfassen kann, wobei der Relativverschiebungsdetektor derart angeordnet ist, dass er eine relative Verschiebung zwischen dem Eindringkörper und einer zwischen der Feder und dem ersten Aktor montierten Struktur erkennt, wobei der Relativverschiebungsdetektor einen Differentialkondensator umfasst, der ein an der Struktur vorgesehenes erstes Elektrodenpaar umfasst, wobei jede der Elektroden einer entsprechenden Elektrode eines am Eindringkörper vorgesehenen zweiten Elektrodenpaares zugewandt ist. Eine einfache Möglichkeit zur Feststellung, dass der Eindringkörper keinen Kontakt zur Oberfläche hat und sich in einer konstanten Position befindet, besteht in der Messung einer Nullkraft mittels des Kraftsensors, wobei der erste Aktor in einer festen Position oder einem festen Zustand gehalten wird.

[0013] Vorteilhafterweise umfasst der Relativpositionssensor einen weiteren Differentialkondensator, der ein weiteres erstes Elektrodenpaar umfasst, das an der Referenzstruktur angeordnet ist, wobei jede der Elektroden einer entsprechenden Elektrode eines am Eindringkörper vorgesehenen weiteren zweiten Elektrodenpaares zugewandt ist. Dies kann ohne Rücksicht auf den Charakter des Kraftsensors, d.h. darauf, ob auch bei diesem ein Differentialkondensator eingesetzt wird, der Fall sein.

[0014] Schliesslich betrifft die Erfindung auch ein Produkt, das einen computerlesbaren Datenträger umfasst, sowie ein Computerprogrammprodukt, das von einem Computer ausführbare Befehle auf dem computerlesbaren Datenträger zur Veranlassung eines Eindringmittels der oben definierten Art zur Ausführung des oben definierten Verfahrens umfasst.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0015] Weitere Einzelheiten der Erfindung sind der nachfolgenden Beschreibung unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnung deutlicher zu entnehmen. Es zeigen:

Fig. 1: Ein Eindringmittel, mit dem das erfindungsgemässe Verfahren ausgeführt wird;

Fig. 2: Das Eindringmittel der Fig. 1 bei einem Eindringvorgang;

Fig. 3–6: Das Eindringmittel der Fig. 1 in verschiedenen Phasen der Vornahme einer topographischen Messung eines Kratztests.

Ausführungsformen der Erfindung

[0016] Die vorliegende Erfindung wird unter Bezugnahme auf konkrete Ausführungsformen und auf bestimmte Zeichnungen beschrieben, ist hierauf aber nicht beschränkt, sondern findet ihre Schranken in den beigefügten Patentansprüchen. Die beschriebenen Zeichnungen sind rein schematisch und stellen keine Einschränkung dar. In den Zeichnungen ist die Grösse einiger Elemente u.U. zur Veranschaulichung übertrieben und nicht massstabgerecht gezeichnet. Die Dimensionen und relativen Dimensionen entsprechen nicht unbedingt tatsächlichen praktischen Umsetzungen der Erfindung.

[0017] Ausserdem werden die Begriffe «erstes», «zweites», «drittes» und dgl. in Beschreibung und Patentansprüchen zur Unterscheidung ähnlicher Elemente verwendet und sind nicht unbedingt sequentiell – im Sinne einer zeitlichen oder räumlichen Rangfolge – zu verstehen. Die Begriffe sind unter entsprechenden Umständen gleichbedeutend und die Ausführungsformen der Erfindung können in anderen, vorliegend nicht beschriebenen oder dargestellten, Sequenzen funktionieren.

[0018] Ausserdem werden die Begriffe «oben», «unten», «über», «unter» und dgl. in Beschreibung und Patentansprüchen zur Beschreibung und nicht unbedingt zur Beschreibung relativer Positionen verwendet. Die derart verwendeten Begriffe

sind unter entsprechenden Umständen gleichbedeutend und die vorliegend beschriebenen Ausführungsformen der Erfindung können in anderen, vorliegend nicht beschriebenen oder dargestellten, Orientierungen funktionieren.

[0019] «Umfassen» ist im Sinne der Patentansprüche nicht als Einschränkung auf die danach aufgeführten Mittel auszulegen; weitere Elemente oder Schritte sind dadurch nicht ausgeschlossen. Auszulegen ist der Begriff als Angabe des Vorhandenseins der angegebenen Merkmale, Ganzzahlen, Schritte oder Komponenten, ohne das Vorhandensein oder den Zusatz eines oder mehrerer anderer, nicht ausdrücklich erwähnter Merkmale, Ganzzahlen, Schritte, Komponenten oder Gruppen davon auszuschliessen. Der Umfang des Ausdrucks «Vorrichtung, umfassend die Mittel A und B» ist also nicht auf Vorrichtungen zu beschränken, die ausschliesslich aus den Komponenten A und B bestehen. Vielmehr heisst das, dass die einzigen im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung relevanten Komponenten der Vorrichtung A und B sind.

[0020] Fig. 1 zeigt ein Eindringmittel 1 nach EP 2 816 342, die vollumfänglich als Bestandteil der vorliegenden Anmeldung gilt. Das Eindringmittel umfasst einen Antriebskopf 3, auf dem ein Eindringkörper 5 über einen ersten Aktor 7 montiert ist. Der erste Aktor 7 kann ein piezoelektrischer Aktor oder ein Aktor einer beliebigen anderen zweckmässigen Art, der für die gewünschten Eindringanwendungen ausreichende Kraft anwenden kann.

[0021] Wie gezeigt, umfasst der Eindringkörper 5 eine Eindringstange 5a, die sich entlang einer parallel zur in der Zeichnung gezeigten Z-Achse verlaufenden Längsachse 9 erstreckt und an ihrem distalen Ende in einer Eindring Spitze 5b endet. Diese Spitze kann aus gehärtetem Stahl, Wolfram, Diamant, Korund, Saphir o.a. bestehen, wie allgemein bekannt ist. Im Falle einer Metallspitze kann die Spitze 5b mit der Eindringstange 5a integriert sein. Ausserdem umfasst die Stange 5 einen sich seitlich erstreckenden Flansch 5c, dessen Funktion nachfolgend näher erläutert wird. Ein Probenhalter 2 ist derart eingerichtet, dass er eine der Spitze 5b des Eindringkörpers 5 zugewandte Probe 4 unterstützt, und ist typischerweise motorisiert und geeignet, entlang mindestens drei Achsen X, Y und Z verschoben zu werden, und kann auch um eine oder mehrere dieser Achsen mit genauer Positionserkennung rotieren. Die Position des Probenhalters in mindestens X- und Y-Richtung, und im Idealfall auch in der Z-Richtung, wird von den Sensoren ermittelt, um – wie allgemein bekannt – eine Positionsanzeige zu geben.

[0022] Das proximale Ende der Stange 5a ist über einen Kraftsensor 11 am ersten Aktor 7 angeschlossen. Der Kraftsensor 11 umfasst eine kalibrierte Feder 13 mit einer bekannten Federkonstante k, die derart angeordnet ist, dass sie den Eindringkörper 5 weg vom Aktor zwingt, sowie einen Relativverschiebungsdetektor 15. Der Relativverschiebungsdetektor 15 umfasst eine zwischen der Feder 13 und dem ersten Aktor 7 montierte Struktur, die sich parallel zur Eindringstange 5a erstreckt und mit einem ersten Elektrodenpaar 17a, 17b versehen ist, das einem entsprechenden zweiten Elektrodenpaar 19a, 19b zugewandt ist, das am Flansch 5c des Eindringkörpers 5 angeordnet ist, um einen Differentialkondensator zu bilden, der aus einem ersten Kondensator 17a, 19a und einem zweiten Kondensator 17b, 19b besteht. Wie gezeigt, erstreckt sich der Flansch 5c in Richtung der Struktur 15a in einen zwischen den Elektroden 17a, 17b gebildeten Zwischenraum hinein, um die Elektroden 19a, 19b dazwischen zu positionieren und sich im Wesentlichen senkrecht zur Längsachse 9 zu erstrecken, obwohl auch andere Konfigurationen möglich sind, z.B. die umgekehrte Konstruktion, bei der die Elektroden 19a, 19b jeweils an einem anderen Flansch vorgesehen sind und einander zugewandt sind, wobei die Elektroden 17a, 17b beiderseits eines an der Struktur 15a vorgesehenen, sich in Richtung des Eindringkörpers 5 erstreckenden Vorsprungs angeordnet sind und sich wiederum senkrecht zur Längsachse 9 erstrecken.

[0023] Die Elektroden 17a, 17b, 19a, 19b sind mit geeigneten Mess- und Aufzeichnungsschaltungen (nicht dargestellt) elektrisch verbunden, und die relative Position des Eindringkörpers 5 und der Struktur 15a lässt sich durch Messen des Kapazitätsunterschieds zwischen dem ersten Kondensator 17a, 19a und dem zweiten Kondensator 17b, 19b nach einem beliebigen bekannten Verfahren gemessen werden. Dieses Ergebnis – in Kombination mit der Kenntnis der Federkonstante k der Feder 13 – ermöglicht die Ermittlung der vom Eindringkörper 5 auf die Probe 4 angewendeten Kraft. Dieses Prinzip wird in der EP 1 828 744 ausführlich erläutert, die als Bestandteil der vorliegenden Anmeldung gilt und vorliegend nicht näher erläutert wird.

[0024] Im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung können aber auch Kraftsensoren anderer Arten eingesetzt werden, z.B. eine vom ersten Aktor 7 getrennte oder damit kombinierte unmittelbare piezoelektrische Messung der angewendeten Kraft.

[0025] Zur Messung der Eindringtiefe des Eindringkörpers relativ zur Probe 4 bei einer Tiefenmessung umfasst das Eindringmittel 1 ferner ein Mess-Subsystem 21 zur Messung der Eindringtiefe. Dieses Subsystem 21 umfasst eine topographische Spitze 23, die zur Erkennung der Oberfläche 4a der Probe 4 angeordnet ist. Wie gezeigt, ist die topographische Spitze 23 eine freitragende AKM-Sonde, es sind jedoch auch Sonden anderer für die Rastersondenmikroskopie gebräuchlicher Arten möglich. Selbstverständlich sollte die Form der Spitze klein genug und der gewünschten Messauflösung entsprechend ausgestaltet sein. Unter «Erkennen» der Oberfläche 4a der Probe sind nicht nur auf Kontakt basierende Erkennungen, z.B. solche, die auf der optischen Erkennung einer vorbestimmten Ablenkung der Sonde basieren, sondern auch kontaktfreie Erkennungen, z.B. unter Einsatz einer vibrierenden AKM-Sonde und Erkennung einer von Van der Waals-Wechselwirkungen zwischen den Atomen der Oberfläche 4a der Probe 4 und der Spitze der Sonde verursachten vorbestimmten Amplituden-, Phasen- oder Frequenzänderung, zu verstehen.

[0026] Die topographische Spitze 23 ist an einer Referenzstruktur 25 montiert, die selbst an einem zweiten Aktor 28 montiert ist, der einer ähnlichen Art wie der erste Aktor 7 sein kann und der Verschiebung der Referenzstruktur 25 und damit der topographischen Spitze 23 parallel zur Z-Achse dient. Antriebs- und/oder Messsysteme, die zur Erkennung der

Oberfläche 4a der Probe 4 durch die topographische Spitze 23 (nicht dargestellt) erforderlich sind, können auch an oder in der Referenzstruktur 25 vorgesehen sein. Diese Antriebs- und/oder Messsysteme können z.B. die Spitze vibrieren, deren Schwingungen messen, Bewegungen der Spitze optisch oder (piezo-) elektrisch erkennen, usw. Diese Systeme sind an sich bekannt und bedürfen also keiner näheren Beschreibung; sie können z.B. die Oberfläche durch Ermitteln einer vorbestimmten Ablenkung eines AKM-Freischwingers, einer vorbestimmten Amplituden-, Phasen- oder Frequenzänderung einer vibrierenden AKM-Spitze oder einer auf die Oberfläche angewendeten vorbestimmten Kraft die «erkennen».

[0027] Die Referenzstruktur 25 umfasst ferner einen Relativpositionssensor 26. Im vorliegenden Beispiel umfasst dieser ein erstes Elektrodenpaar 27a, 27b, das in Kombination mit einem an einem weiteren sich seitlich erstreckenden Flansch 5d der Eindringstange 5 vorgesehenen entsprechenden weiteren zweiten Elektrodenpaar 29a, 29b einen weiteren Differentialkondensator bildet; hierbei kann die Eindringstange mit dem Flansch 5c integriert oder davon getrennt sein. Die Elektroden 27a, 27b, 29a, 29b erstrecken sich wiederum im Wesentlichen senkrecht zur Längsachse 9. Diese Kondensatoren 27a, 29a und 27b, 29b sind ähnlich den Kondensatoren 17a, 19a und 17a, 19b konstruiert und alle Ausführungen zu letzteren Kondensatoren finden entsprechende Anwendung auf erstere. So kann die relative Position des Eindringkörpers 5 und der Referenzstruktur 25 auch hier durch Vergleichen des Kapazitätsunterschieds zwischen den Kondensatoren 27a, 29a und 27b, 29b nach einem beliebigen zweckmässigen Verfahren ermittelt werden. Weitere Formen des Relativpositionssensors 26, die zur Messung der relativen Position des Eindringkörpers 5 relativ zur Referenzstruktur 25 angeordnet sind (z.B. optische Systeme), sind auch möglich.

[0028] Ausserdem umfasst das Eindringmittel 1 ein Rückkopplungskontrollsystem 31, das mit der topographischen Spitze 23 und dem zweiten Aktor 28 in Wirkverbindung steht, um den zweiten Aktor 28 derart anzutreiben, dass die Position der Referenzstruktur relativ zur Probe 4 eingestellt wird, wie im Zusammenhang mit der Fig. 2 nachfolgend beschrieben wird.

[0029] Fig. 2 zeigt die Position der verschiedenen Komponenten des Eindringmittels 1 während eines Eindringversuchs. In der Fig. 2 und den nachfolgenden Zeichnungen werden nur die Bezugszeichen wiedergegeben, die im Text erwähnt werden, um die Zeichnungen nicht durcheinanderzubringen, und die vertikalen Verschiebungen sind der Klarheit halber übertrieben dargestellt. Ausserdem entfällt das Rückkopplungskontrollsystem 31 ab der Fig. 3.

[0030] In der Fig. 2 ist die Eindringspitze 5b unter der Einwirkung einer vom ersten Aktor 7 angewendeten, vom Kraftsensor 11 gemessenen Kraft in die Oberfläche 4a der Probe 4 eingedrungen. Vor dem Eindringen wird die Probe jedoch nahe der Spitze 5b des Eindringkörpers 5 und der topographischen Spitze 23 durch Verschieben des Probenhalters 2 und/oder Verschieben des Antriebskopfs 3 und/oder Verschieben des Eindringkörpers 5 und der topographischen Spitze 23 in Z-Richtung jeweils mittels des ersten Aktors 7 und des zweiten Aktors 28 positioniert, und die Referenzstruktur wird dann in einem vorbestimmten Abstand d zur Oberfläche 4a der Probe durch Betätigen des zweiten Aktors 28 positioniert, um die Referenzstruktur 25 in Richtung der Oberfläche 4a der Probe solange zu verschieben, bis deren Oberfläche 4a von der topographischen Spitze erkannt wird. Ist die Oberfläche 4a einmal erkannt worden, hält das Rückkopplungskontrollsystem 31 die Referenzstruktur 25 in einem vorbestimmten Abstand d durch Steuern des zweiten Aktors 28, um ggf. erforderliche Einstellungen nach der Z-Achse vorzunehmen, um die Referenzstruktur 25 in der gewünschten vertikalen Beziehung zur Oberfläche 4a zu halten. Diese Verstellungen sind typischerweise winzig.

[0031] Während das Rückkopplungskontrollsystem 31 die Referenzstruktur in einem konstanten Abstand d hält, wird die Eindringspitze 5b mit der Oberfläche 4a der Probe 4 in Kontakt gebracht und gezwungen, unter einer vom ersten Aktor 7 angewendeten Last in die Oberfläche 4a einzudringen.

[0032] Da die Referenzstruktur 25 einen konstanten Abstand d zur Oberfläche 4a der Probe 4 wahrt, verschiebt sich der Eindringkörper 5 in Richtung der Probe entlang der Z-Achse (d.h. nach unten, wie in der Zeichnung dargestellt) relativ zur Referenzstruktur 25, wie der Fig. 2 deutlich zu entnehmen ist. Dies führt dazu, dass sich die Elektrode 29a der Elektrode 27a nähert und sich die Elektrode 29b von der Elektrode 27b entfernt, wodurch die relative Kapazität der beiden Kondensatoren 27a, 29a und 27b, 29b geändert wird, aus der die Verschiebung des Eindringkörpers 5 relativ zur Referenzstruktur 25 berechnet werden kann. Diese Kondensatoren 27a, 29a; 27b, 29b sind mit geeigneten Verarbeitungs- und Aufzeichnungsschaltungen elektrisch verbunden (nicht dargestellt). Durch die Einbeziehung der Dimensionen der verschiedenen Komponenten in die Rechnung und/oder durch Ermitteln des Kontaktpunktes zwischen der Eindringspitze 5b und der Probe anhand des Ausgangs des Kraftsensors 11 kann die absolute Eindringtiefe der Eindringspitze 5b in die Oberfläche 4a der Probe 4 ermittelt werden.

[0033] Die vom Eindringkörper 5 auf die Probe 4 angewendete Kraft wird vom Kraftsensor 11 kontinuierlich gemessen und kann mit dem der Eindringtiefe der Eindringspitze in die Oberfläche 4a der Probe 4 in Korrelation gebracht werden. Da gemäss der dargestellten Ausführungsform zwischen der Oberfläche 4a der Probe 4 und der Eindringspitze 5a angewendet wird, wird die Feder 13 komprimiert, und die Struktur 15a bewegt sich nach unten (in Richtung der Probe 4) relativ zur Eindringstange 5a, wodurch sich die Elektroden 17b und 19b einander nähern und sich die Elektroden 17a und 19a voneinander entfernen. Anhand der dadurch erzeugten Kapazitätsänderungen kann die relative Verschiebung des Eindringkörpers 5 relativ zur Struktur 15a – und somit die zu einem beliebigen Zeitpunkt angewendete Kraft – ermittelt werden.

[0034] Dieses System kann nicht nur unter einer statischen oder dynamischen Last einen statischen Eindringversuch vornehmen; es können vielmehr durch seitliches Verschieben der Probe 4 beim Eindringen auch Kratzteste – wiederum unter statischen oder dynamischen Eindringlasten – vorgenommen werden.

[0035] Traditionell wird zur Vornahme topographischer Messungen einer vom Eindringkörper 5 hergestellten Einkerbung oder einfach zur Messung eines beliebigen gewünschten Oberflächenprofils neben dem Eindringkörper ein getrenntes topographisches Messmodul (typischerweise ein AKM-Modul) vorgesehen. Dies führt jedoch zu einem erheblichen Abstand zwischen der Messspitze des Messmoduls, was zu grossen Bewegungen der Probe oder des Antriepskopfs führt, um dieses zum Wirken zu bringen und eine Messung vorzunehmen. Hierdurch wird die Präzision der Positionierung der Messspitze auf der Einkerbung eingeschränkt.

[0036] Eine konkrete Lösung dieses Problems bestünde darin, dass eine vollständige Reihe herkömmlicher topographischer Messelemente und -Systeme in Verbindung mit der mit der Referenzstruktur 25 integrierten topographischen Spitze 23 vorgesehen wird. Folglich kann der Eindringkörper 5 nach Herstellen der Einkerbung entzogen werden und die topographische Spitze kann auf herkömmliche Art bedient werden, wobei die zweckbestimmten herkömmlichen Messelemente und -Systeme diese Messung auf herkömmliche Art vornehmen. Diese Lösung wird in der EP 2 816 342 stillschweigend angedeutet.

[0037] Eine derartige Lösung bedarf jedoch der Integration der vorgenannten vollständigen Reihe herkömmlicher Messelemente, was kostenintensiv ist und die Konstruktion des Eindringsystems 1 erheblich verkompliziert.

[0038] Durch das erfindungsgemässe Verfahren wird das Erfordernis dieser herkömmlichen topographischen Messelemente dadurch ausgeräumt, dass die bestehenden im Eindringssystem 1 vorhandenen Sensoren zur Vornahme nicht nur der oben beschriebenen Messung der Eindringtiefe sondern auch der topographischen Messung verwendet werden. Hierbei ist anzumerken, dass das Verfahren auch zur Vornahme einer topographischen Messung einer beliebigen im Wesentlichen ebenen Probe 4 verwendet werden, und zwar gleichgültig, ob diese eingekerbt ist oder nicht.

[0039] Dargestellt wird dieses Verfahren in den Fig. 3–6 im Zusammenhang mit der Vornahme einer topographischen Messung einem mit demselben Eindringssystem 1 bereits durchgeführten Kratztest, gilt jedoch auch gleichermassen für eine beliebige andere Probe 4, für die eine topographische Messung vorzunehmen ist.

[0040] Wie den Fig. 4–6 zu entnehmen ist, sind der Eindringkörper 1 und die Probe 4 vorgesehen. Die Oberfläche 4a der Probe 4 wird der Spur eines bereits vorgenommenen Kratztests folgend gedrückt, wobei die Schnittansicht der Zeichnungen entlang der sich von links nach rechts vertiefenden Mittellinie des Kratztests aufgenommen ist.

[0041] Zunächst wird die Eindringspitze 5b vom Aktor ausser Kontakt mit der Probe 4 positioniert. Die Eindringspitze 5b bleibt während der ganzen Messung ausser Kontakt mit der Oberfläche 4a der Probe 4. Da auf die Spitze 5b keine Kraft wirkt, veranlasst die Feder 13 den Eindringkörper 5 zur Einnahme einer neutralen Position, was durch die Kondensatoren 17a, 19a und 17b, 19b ggf. überprüft werden kann, indem geprüft wird, ob die vom Kraftsensor 11 gemessene Kraft gleich Null ist. Diese Überprüfung kann ggf. über den Verlauf einer topographischen Messung kontinuierlich erfolgen. In seiner einfachsten Form kann der erste Aktor 7 einfach in eine zufällig gewählte Position getrieben und deaktiviert werden, oder er kann in eine extreme Position (z.B. um den Eindringkörper 5 dem Antriepskopf 3 so nahe wie möglich zu bringen oder so weit wie möglich davon zu entfernen) gegen einen (nicht dargestellten) mechanischen Anschlag gebracht werden. Im Falle eines Kraftsensors einer anderen Art, z.B. eines piezoelektrischen Kraftsensors, gelten die Ausführungen zum ersten Aktor 7 gleichermassen. Der Eindringkörper 5 behält also eine konstante vertikale (Z-Achse) Lage relativ zu Antriepskopf 3 und Probe 4 bei und dient als Referenz der Z-Achse.

[0042] Die topographische Spitze 23 wird dann derart positioniert, dass sie die Oberfläche 4a der Probe 4 an einem gewünschten Startpunkt der topographischen Messung erkennt, wie oben im Zusammenhang mit der Vornahme einer Eindringmessung beschrieben. Ein zweckmässiger Startpunkt der Messung grenzt unmittelbar an den Kratztest. Das Steuersystem 31 (zur Vereinfachung der Zeichnungen in den Fig. 3–6 nicht dargestellt) positioniert die Referenzstruktur 25 wieder in einem vorbestimmten Abstand d zur Oberfläche 4a der Probe 4, wie dies von der topographischen Spitze 23 erkannt wird. Die relative Position zwischen dem Eindringkörper 5 und der Referenzstruktur wird dann durch den Relativpositionssensor 26 ermittelt und kann als Datenpunkt zur Vornahme der topographischen Messung verwendet werden.

[0043] Anschliessend wird das Substrat 4 relativ zur topographischen Spitze 23 seitlich, d.h. senkrecht zur Achse Z, durch Verschieben des Probenhaltes 2 relativ zum Antriepskopf 3 oder umgekehrt, verschoben. Im Beispiel der Zeichnungen wird der Probenhalter nach links verschoben, um die topographische Spitze entlang dem Kratztest in der Oberfläche 4a des Substrats nach rechts zu scannen.

[0044] In der Fig. 4 ist die Probe 4 nach links verschoben worden, und die topographische Spitze ist in den in der Oberfläche 4a vorhandene Kratztest hineingesunken. Dies erfolgt dadurch, dass das Rückkopplungskontrollsystem dem zweiten Aktor den Befehl gibt, den vorbestimmten Abstand d zwischen der Referenzstruktur 25 und der Oberfläche 4a der Probe, wie er von der topographischen Spitze 23 erkannt wird, während der Verschiebung der Probe zu wahren. Da sich das Oberflächenprofil vertieft, während sich die Probe 4 nach links bewegt, treibt der Aktor die Referenzstruktur nach unten in Richtung des Substrats an, um der Oberfläche zu folgen. Die Referenzstruktur 25 sinkt also relativ zum Eindringkörper 5 ab, der als Referenz in derselben vertikalen Lage geblieben ist; die Elektroden 27b, 29b haben sich einander genähert und die Elektroden 27a, 29a haben sich voneinander entfernt. Anhand der resultierenden Kapazitätsänderung wird die neue relative Lage der Referenzstruktur 25 relativ zum Eindringkörper 5 ermittelt, der so die topographische Messung durch Vornehmen mehrerer Messungen entlang der Probe erstellt. Da der Eindringkörper 5 nicht nur relativ zum Antriepskopf 1

sondern auch zum Probenhalter in eine unveränderliche vertikale Lage gebracht worden ist, dient er im Grunde genommen als feste vertikale Referenz, gegen die die vertikale Lage der Referenzstruktur 25 über den ganzen Verlauf der topographischen Messung verglichen wird. Die topographische Messung erfolgt also durch Messen vertikaler Bewegungen der Referenzstruktur 25 und der topographischen Spitze 23 relativ zum Eindringkörper 5.

[0045] Während sich die Probe 4 weiterhin nach links verschiebt (Fig. 4 und 5), vertieft sich das Einkerbungsprofil der Oberfläche 4a, und die Referenzstruktur 25 wird weiter nach unten getrieben, um den vorbestimmten Abstand d zu wahren und so der Oberfläche zu folgen. Der Eindringkörper 5 wahrt seine vertikale Lage relativ zum Antriebskopf 3, also rücken die Elektroden 27a, 29b näher aneinander und die Elektroden 27a, 29a gehen weiter auseinander.

[0046] In der Fig. 5 verschiebt sich die Probe 4 weiterhin nach links, und die topographische Spitze 3 hat die in der Oberfläche 4a von dem Kratztest zurückgelassene Vertiefung verlassen. Das Kontrollsystem 31 treibt den zweiten Aktor 28 immer weiter, um den Abstand d zu wahren, und hat die Referenzstruktur nach oben in Richtung des Antriebskopfs 3 getrieben, also haben sich die Elektroden 27b, 29b getrennt und die Elektroden 27a, 29a haben sich einander wieder genähert.

[0047] Durch Messen der Kapazitätsänderungen der Kondensatoren 27a, 28a und 27b, 28b, Berechnen der entsprechenden relativen Verschiebungen zwischen der Referenzstruktur 25 und dem Eindringkörper 5 und Korrelieren dieser relativen Verschiebungen mit den Messungen der Verschiebung der Probe 4 kann das topographische Profil des Kratztests gemessen werden. Durch Verschieben der Probe 4 um eine vorbestimmte Strecke in Y Richtung (in die Seite hinein oder aus der Seite hinaus) und Wiederholen des Vorgangs – wodurch die topographische Spitze 23 in mehreren Durchläufen in einem Rastermuster gescannt wird – können dreidimensionale topographische Profile gemessen und Bilder erstellt werden.

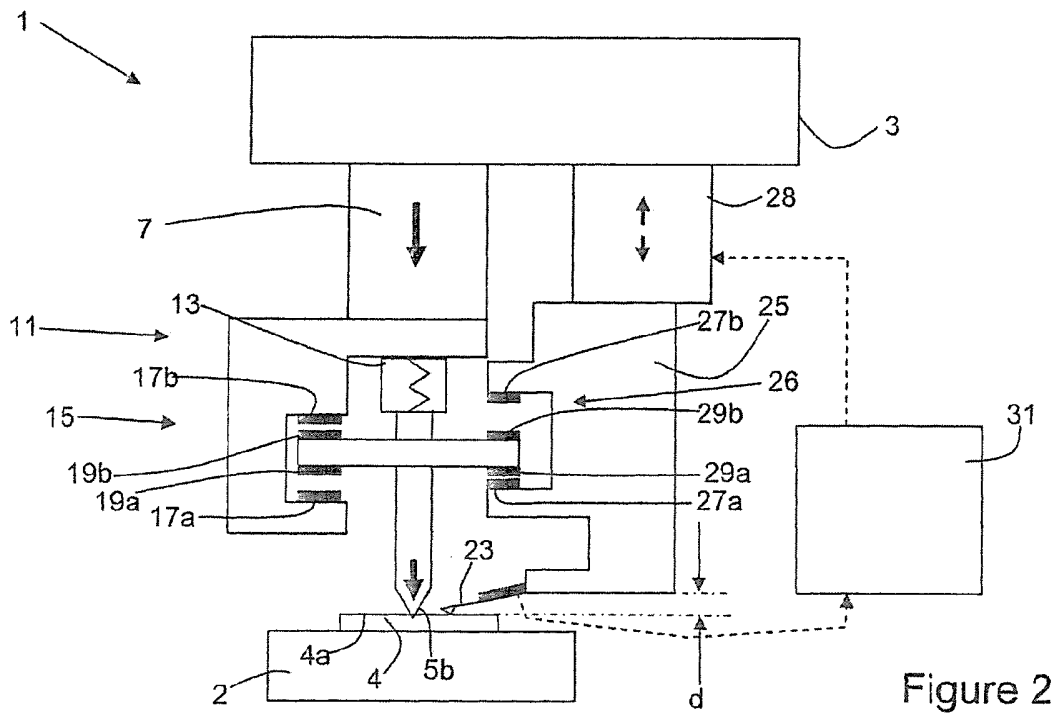
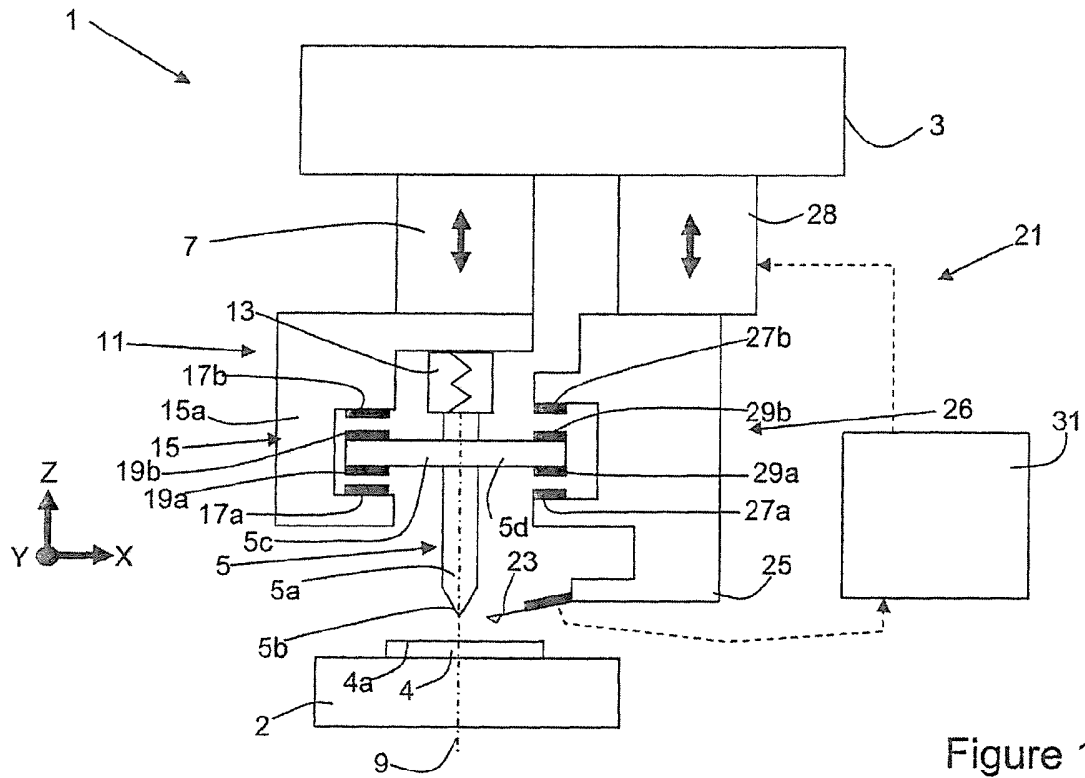
[0048] Das Prinzip des Verfahrens gilt gleichermassen für einen nicht kapazitiven Relativpositionssensor 26 einer beliebigen anderen Art.

[0049] Obwohl dieses Verfahren im Zusammenhang mit einem Kratztest beschrieben worden ist, kann eine beliebige geeignete Oberfläche nach demselben Verfahren vermessen werden. **[0050]** Das vorgenannte Verfahren kann rechnergestützt ausgeführt werden, indem in einem auf einem computerlesbaren Datenträger (CD-ROM, DVD, Festplatte, Flash-Laufwerk, usw.) gespeicherten Computerprogrammprodukt enthaltenen Befehlen gefolgt wird.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Vermessung eines topographischen Bildes und/oder eines topographischen Profils einer Oberfläche einer Probe, umfassend:
 - a) Vorsehen eines Eindringmittels (1), umfassend:
 - einen Antriebskopf (3);
 - einen Eindringkörper (5), der mittels eines ersten Aktors (7), der zur Verschiebung des Eindringkörpers (5) parallel zu einer Längsachse (9) des Eindringkörpers angeordnet ist, am Antriebskopf montiert ist;
 - einen zur Messung einer vom Eindringkörper (5) angewendeten Kraft geeigneten Kraftsensor (11);
 - eine Referenzstruktur (25), die mittels eines zweiten Aktors (28), der zur Verschiebung der Referenzstruktur parallel zur Längsachse (9) angeordnet ist, am Antriebskopf (3) montiert ist;
 - eine an der Referenzstruktur montierte topographische Spitze (23), die zur Erkennung einer Oberfläche (4a) einer Probe (4) geeignet ist;
 - einen Relativpositionssensor (26), der zur Ermittlung einer relativen Position des Eindringkörpers (5) relativ zur Referenzstruktur (25) geeignet ist;
 - ein Rückkopplungskontrollsystem (31), das zur Kontrolle des zweiten Aktors (28) aufgrund der Erkennung der Oberfläche (4a) der Probe (4) durch die topographische Spitze (23),
 - einen Probenhalter (2), der derart angeordnet ist, dass er die dem Eindringkörper (5) und der topographischen Spitze (23) zugewandte Probe (4) hält, wobei der Probenhalter (2) zur Verschiebung in mindestens einer Richtung (X; Y) senkrecht zur Längsachse (9) geeignet ist;
 - b) Vorsehen einer Probe (4) auf dem Probenhalter (2);
 - c) Positionieren des Eindringkörpers (5) ausser Kontakt mit der Probe (4) und in einer konstanten Position relativ zum Antriebskopf (3);

- d) Positionieren der topographischen Spitze (23) derart, dass sie die Oberfläche (4a) der Probe (4) erkennt, und Positionieren der Referenzstruktur (25) mithilfe des Rückkopplungskontrollsystems (31) und des zweiten Aktors (28) in einem von der topographischen Spitze (23) erkannten vorbestimmten Abstand (d) zur Oberfläche (4a);
 - e) Messen der relativen Position des Eindringkörpers (5) relativ zur Referenzstruktur (25) mittels des Relativpositionssensors (26);
 - f) Verschieben der Probe (4) senkrecht zur Längsachse (9) während die Referenzstruktur (25) im von der topographischen Spitze (23) mittels des Rückkopplungskontrollsystems (31) und des zweiten Aktors (28) erkannten vorbestimmten Abstand (d) zur Oberfläche (4a) der Probe (4), während die relative Position des Eindringkörpers (5) relativ zur Referenzstruktur (25) mittels des Relativpositionssensors (26) gemessen wird;
 - g) Erstellen eines topographischen Profils und/oder eines topographischen Bildes anhand der derart gewonnenen Messungen der relativen Position des Eindringkörpers (5) relativ zur Referenzstruktur (25).
2. Verfahren nach Anspruch 1, ferner umfassend den nachfolgenden Schritt vor dem Schritt c):
 - b1) Vornehmen eines Eindringversuchs an der Probe (4) mittels des Eindringkörpers (5).
 3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei es sich beim Eindringversuch um einen Kratztest handelt.
 4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die konstante Position des Eindringkörpers (5) parallel zur Längsachse (9) mittels des Kraftsensors (11) überprüft wird.
 5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der Kraftsensor (11) eine zwischen dem Eindringkörper (5) und dem ersten Aktor (7) angeordnete Feder (13) umfasst, wobei der Relativverschiebungsdetektor (26) derart angeordnet ist, dass er eine relative Verschiebung zwischen dem Eindringkörper (5) und einer zwischen der Feder (13) und dem ersten Aktor (7) montierten Struktur (15a) erkennt, wobei der Relativverschiebungsdetektor (11) einen Differentialkondensator umfasst, der ein an der Struktur vorgesehenes erstes Elektrodenpaar (17a, 17b) umfasst, wobei jede der Elektroden (17a, 17b) einer entsprechenden Elektrode (19a, 19b) eines am Eindringkörper (5) vorgesehenen zweiten Elektrodenpaares zugewandt ist.
 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 und 5, wobei die konstante Position durch Messen einer Nullkraft mittels des Kraftsensors (11) ermittelt wird, während der erste Aktor (7) in einer festen Position gehalten wird.
 7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der Relativpositionssensor (26) einen weiteren Differentialkondensator umfasst, der ein weiteres erstes Elektrodenpaar (27a, 27b) umfasst, das an der Referenzstruktur (25) angeordnet ist, wobei jede der Elektroden (27a, 27b) einer entsprechenden Elektrode eines am Eindringkörper (5) vorgesehenen weiteren zweiten Elektrodenpaares (29a, 29b) zugewandt ist.
 8. Produkt, umfassend einen computerlesbaren Datenträger, sowie ein Computerprogrammprodukt, das von einem Computer ausführbare Befehle auf dem computerlesbaren Datenträger zur Veranlassung eines Eindringmittels (1) zur Ausführung des Verfahrens nach einem der vorstehenden Ansprüche umfasst, wobei das Eindringmittel (1) umfasst:
 - einen Spindelstock (3);
 - einen Eindringkörper (5), der mittels eines ersten Aktors (7), der zur Verschiebung des Eindringkörpers (5) parallel zu einer Längsachse (9) des Eindringkörpers angeordnet ist, am Spindelstock montiert ist;
 - einen zur Messung einer vom Eindringkörper (5) angewendeten Kraft geeigneten Kraftsensor (11);
 - eine Referenzstruktur (25), die mittels eines zweiten Aktors (28), der zur Verschiebung der Referenzstruktur parallel zur Längsachse (9) angeordnet ist, am Antriebskopf (3) montiert ist;
 - eine an der Referenzstruktur montierte topographische Spitze (23), die zur Erkennung einer Oberfläche (4a) einer Probe (4) geeignet ist;
 - einen Relativpositionssensor (26), der zur Ermittlung einer relativen Position des Eindringkörpers (5) relativ zur Referenzstruktur (25) geeignet ist;
 - ein Rückkopplungskontrollsystem (31), das zur Kontrolle des zweiten Aktors (28) aufgrund der Erkennung der Oberfläche (4a) der Probe (4) durch die topographische Spitze (23),
 - einen Probenhalter (2), der derart angeordnet ist, dass er die dem Eindringkörper (5) und der topographischen Spitze (23) zugewandte Probe (4) hält, wobei der Probenhalter (2) zur Verschiebung in mindestens einer Richtung (X; Y) senkrecht zur Längsachse (9) geeignet ist.



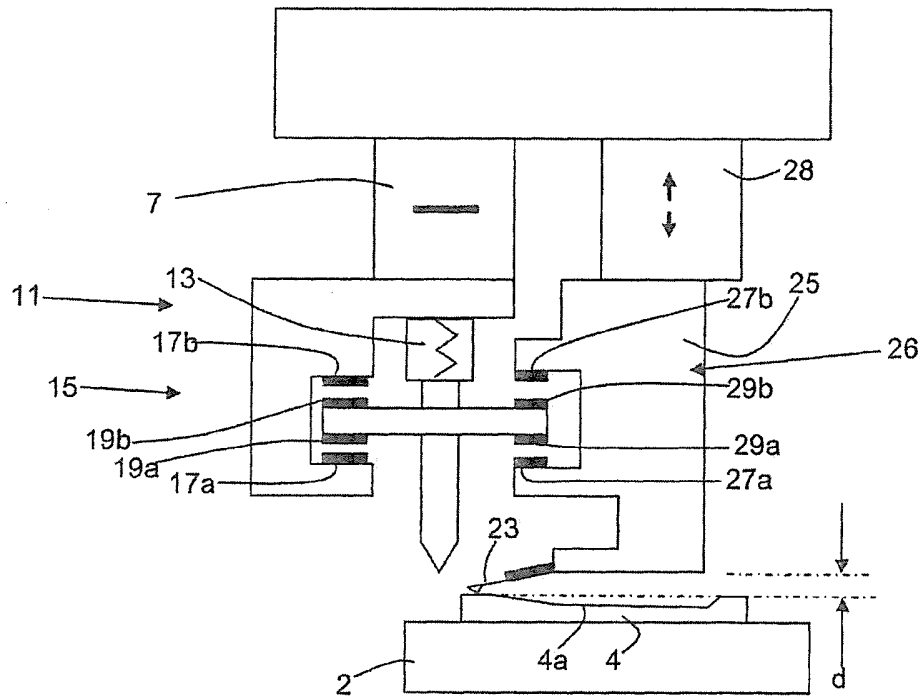


Figure 3

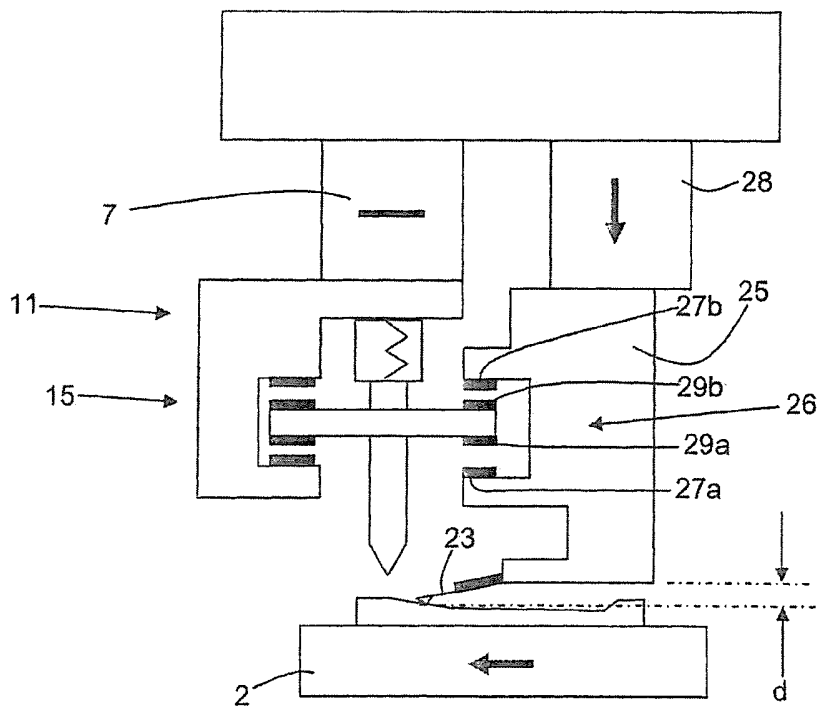


Figure 4

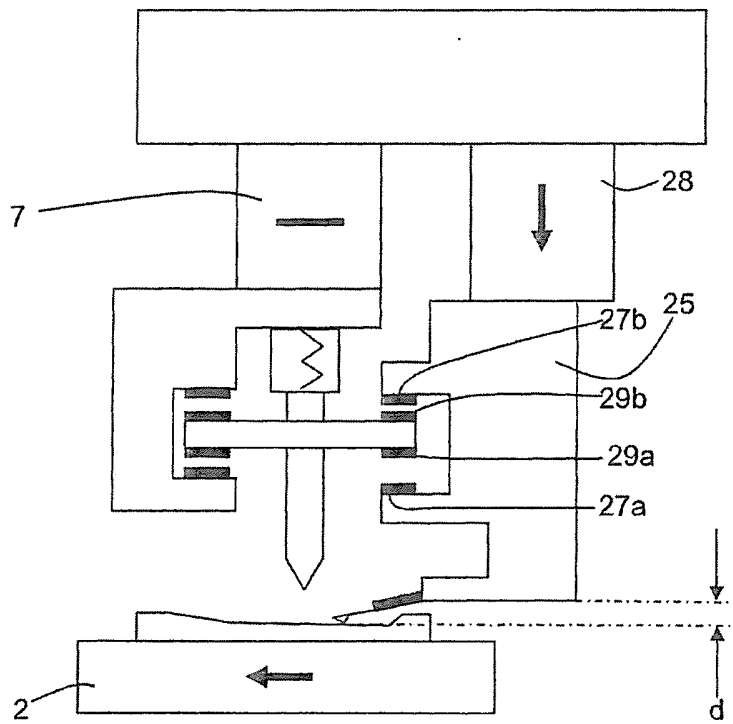


Figure 5

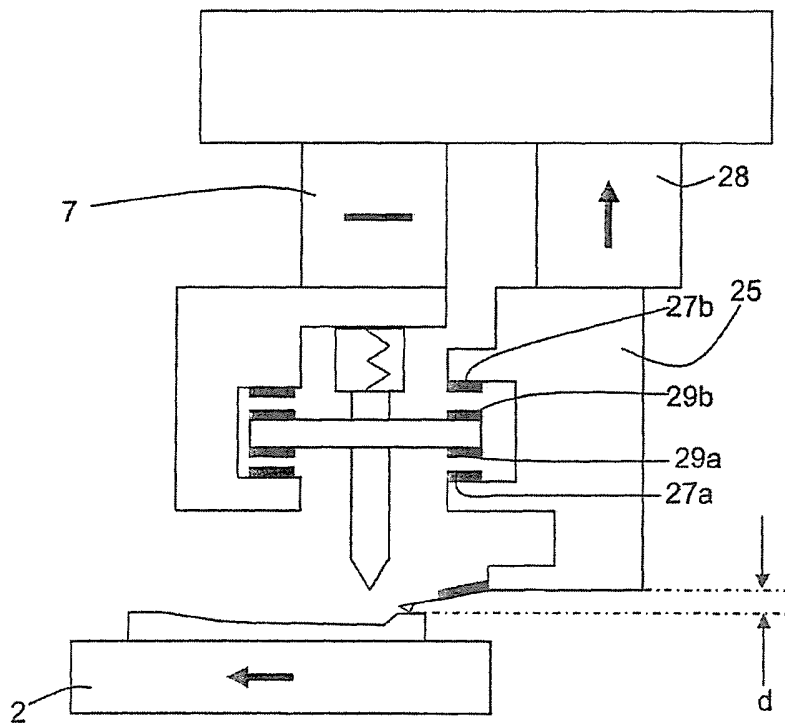


Figure 6