

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
21. Februar 2002 (21.02.2002)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 02/14787 A1

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G01C 19/56** (71) Anmelder (*für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US*): **EADS DEUTSCHLAND GMBH** [DE/DE]; 81663 München (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP01/09066

(22) Internationales Anmeldedatum:
6. August 2001 (06.08.2001)

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (*nur für US*): **BAUER, Karin** [DE/DE]; Gaugrafenstrasse 5, 82041 Oberhaching (DE). **GLEISSNER, Tanjo** [DE/DE]; Edeltraudstr. 21, 81827 München (DE). **LENTNER, Konrad** [DE/DE]; Isarweg 7B, 85375 Mintraching (DE). **SASSEN, Stefan** [DE/DE]; Baaderstr. 49, 80469 München (DE). **SCHALK, Josef** [DE/DE]; Am Anger 19a, 84051 Altheim (DE). **VOSS, Ralf** [DE/US]; 3847 Normanwood, West Bloomfield, MI 48232 (US).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

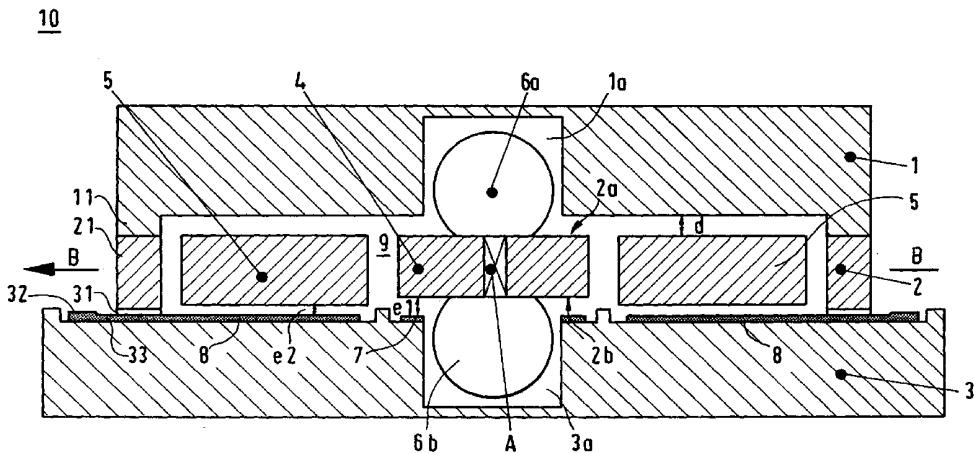
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
100 40 537.1 18. August 2000 (18.08.2000) DE

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: MICROMECHANICAL SPEED SENSOR AND A METHOD FOR THE PRODUCTION THEREOF

(54) Bezeichnung: MIKROMECHANISCHER DREHRATENSOR UND VERFAHREN ZU SEINER HERSTELLUNG





(81) **Bestimmungsstaaten (national):** JP, US.

— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

das erste Schwingelement (4) in eine Schwingung um die erste Drehachse (A). Eine Ausleseeinheit in Form einer Ausleseelektrode (8) erfasst eine Verkippung bzw. Schwingung des zweiten Schwingelements (5) um die zweite Drehachse (B) als Mass für die Drehrate des Sensors. Auf der Oberseite (2a) und der Unterseite (2b) des ersten Schwingelements (4), die eine Wippe bildet, befinden sich zusätzliche Masselemente (6a, 6b), die symmetrisch ausgerichtet sind. Der Sensor ist aus mindestens drei einzeln bearbeiteten Wafern hergestellt, die abschliessend zusammengefügt werden und ein Deckelteil (1), ein Mittelteil (2) und ein Bodenteil (3) bilden.

Mikromechanischer Drehratensensor und Verfahren zu seiner Herstellung

Die vorliegende Erfindung betrifft einen mikromechanischen Drehratensensor gemäß dem Oberbegriff von Patentanspruch 1, sowie ein Verfahren zur Herstellung eines

- 5 mikromechanischen Drehratensensors.

Kardanisch aufgehängte, mikromechanische Drehratensensoren besitzen z.B. zwei schwingfähige Rahmen mit einer zentralen Inertialmasse. Durch einen elektrostatischen Antrieb wird die Masse zu resonanten Schwingungen um eine Anregungsachse gebracht.

- 10 Bei einer Rotation des Sensors um eine Drehachse, die senkrecht zur Anregungsachse gerichtet ist, wirkt die Corioliskraft auf die oszillierende Inertialmasse. Dadurch wird periodisch eine Schwingung um eine Ausleseachse angeregt, die senkrecht zur Anregungsachse und zur Drehachse gerichtet ist. Die Amplitude der so erzeugten Oszillation ist ein direktes Maß für die zu messende Drehrate. Die Auslesung der
15 Amplitude kann z.B. elektrostatisch erfolgen.

Derartige mikromechanische Drehratensensoren können z.B. in der Kraftfahrzeugtechnik, in der Luft und Raumfahrttechnik, sowie bei Explorations- und Produktionsverfahren eingesetzt werden. Beispielsweise können die Drehratensensoren zur

- 20 Fahrzeugstabilisierung, zur Fahrdynamikregelung und für Navigationssysteme oder auch innerhalb von Systemen für autonomes Fahren eingesetzt werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten bestehen in der Flugkörpernavigation und -stabilisierung. Im Bereich der Raumfahrt können mit derartigen Sensoren Plattformen stabilisiert und in ihrer Lage geregelt werden. Navigationssysteme, wie z.B. GPS/INS, werden durch derartige
25 Drehratensensoren ergänzt, insbesondere im Bereich der Avionik. Bei der Exploration von Rohstoffen können z.B. Bohrköpfe mit Drehratensensoren gesteuert werden. Bei modernen Produktionstechnologien werden Drehratensensoren zur Steuerung von Robotern eingesetzt.

- 30 In dem US Patent Nr. 4,598,585 ist ein Drehratensensor mit einer kardanischen Struktur beschrieben, bei der ein Rahmen schwingungsfähig um eine y-Achse gelagert ist. Innerhalb des Rahmens befindet sich ein Element, das schwingungsfähig um eine x-Achse an dem

Rahmen befestigt ist. Auf dem inneren Element ist eine Inertialmasse angeordnet. Antriebselemente dienen dazu, den Rahmen in Schwingungen um die y-Achse zu versetzen. Die Auslenkung des inneren Elements aufgrund der Corioliskraft wird kapazitiv gemessen.

5

Die bekannten mikromechanischen Drehratensensoren haben jedoch den Nachteil, dass die Messgenauigkeit oft unzureichend ist. Auch treten in der Regel sehr große Querempfindlichkeiten auf. Darüberhinaus ist oftmals auch eine große Empfindlichkeit auf Vibrationen festzustellen. Darüberhinaus sind die bekannten Drehratensensoren meist mit hohen Herstellungskosten verbunden.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, einen mikromechanischen Drehratensor zu schaffen und ein Verfahren zu seiner Herstellung anzugeben, der eine hohe Sensorempfindlichkeit und geringe Querempfindlichkeit aufweist. Darüberhinaus soll der Drehratensor robust sein, geringe Empfindlichkeiten gegen mechanische Vibrationen haben und kostengünstig herstellbar sein.

Diese Aufgabe wird gelöst durch den mikromechanischen Drehratensor gemäß Patentanspruch 1 und das Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Drehratensors gemäß Patentanspruch 22. Weitere vorteilhafte Merkmale, Details und Aspekte der Erfindung sind aus den abhängigen Ansprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen ersichtlich.

Der erfindungsgemäße mikromechanische Drehratensor umfaßt ein erstes Schwingelement, das schwenkbar um eine erste Achse gelagert ist, ein zweites Schwingelement, das schwenkbar um eine zweite Achse gelagert ist, die senkrecht zur ersten Achse gerichtet ist, eine Anregungseinheit, um das erste Schwingelement in Schwingungen um die erste Achse zu versetzen und eine Ausleseeinheit zum Erfassen von Schwingungen des zweiten Schwingelements um die zweite Achse, wobei an dem ersten Schwingelement mindestens zwei zusätzliche Massenelemente befestigt sind, die symmetrisch zu einer Ebene ausgerichtet sind, die durch die erste und zweite Achse definiert ist.

Durch die symmetrisch ausgerichteten, zusätzlichen Massenelemente ergibt sich eine deutlich höhere Sensorauflösung und Empfindlichkeit. Dabei können die Zusatzmassen bzw. zusätzlichen Massenelemente extrem groß ausgestaltet sein. Dadurch ergibt sich
5 eine weite Auslagerung der Massenschwerpunkte symmetrisch zur Drehachse, was eine extreme Erhöhung der Sensorempfindlichkeit bewirkt. Der symmetrische Aufbau reduziert die Querempfindlichkeit gegenüber Drehraten ausserhalb der Empfindlichkeitsachse des Sensors und reduziert die Empfindlichkeit gegenüber einer auf den Sensor wirkenden Beschleunigung. Der Sensor ist kostengünstig herstellbar und kann äußerst robust
10 ausgelegt werden.

Vorteilhafterweise liegt der gemeinsame Schwerpunkt der beiden Masseelemente im Schnittpunkt der ersten und zweiten Achse. Dadurch ergibt sich eine maximale Symmetrie.
15

Bevorzugt sind die zusätzlichen Massenelement getrennt von dem ersten und /oder zweiten Schwingelement gefertigt, wobei insbesondere Form, Größe oder auch Material der Massenelemente gezielt ausgewählt sind, um die Parameter des Sensors festzulegen. Durch die freie Wahl von Form, Größe und Material der Zusatzmassen kann die
20 Masseverteilung, die Gesamtmasse und die Verteilung der Trägheitsmomente des Sensors gezielt gewählt werden. Damit ergeben sich zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten, den Sensor im Hinblick auf Auflösung, Querempfindlichkeit, Schockempfindlichkeit, reduziertem Einfluss von Fertigungstoleranzen, oder auch reduzierter Empfindlichkeit gegenüber Vibrationen zu optimieren.

25 Insbesondere können durch die freie Wahl der Materialien für die zusätzlichen Massenelemente Zusatzmassen mit speziellen physikalischen Eigenschaften gebildet werden, die je nach den Anforderungen des Drehratensensors besonders geeignet sind. Weiterhin kann durch spezielle Wahl der Zusatzmassen, das Sensorelement getrimmt
30 werden, ohne dass an den übrigen Strukturen bzw. an der herausgeätzten kardanischen Struktur Veränderungen oder Einwirkungen vorgenommen werden müssen.

Die Zusatzmassen können kostengünstig mit hoher Präzision hergestellt werden.

Besonders bevorzugt werden Kugeln als Massenelemente verwendet, die kostengünstig mit einer sehr geringen Geometrietoleranz von beispielsweise 0,1% hergestellt werden können. Durch die Verwendung von Kugeln ergibt sich damit eine sehr hohe

- 5 Reproduzierbarkeit der Masseverteilung des Drehratensensors. Es können aber auch Quader, Kegel, Pyramiden bzw. Pyramidenstümpfe und Zylinder als Massenelemente verwendet werden, die ebenfalls sehr kostengünstig und mit geringer Geometrietoleranz herstellbar sind. Besonders günstig ist es, die Kegel bzw. Pyramiden mit ihren Spitzen zueinander ausgerichtet anzuordnen. Dadurch sind die Schwerpunkte der einzelnen
- 10 Masseelemente möglichst weit ausgelagert bzw. möglichst weit voneinander entfernt.

Insbesondere haben die zusätzlichen Massenelemente z.B. magnetische Eigenschaften.

Dies bewirkt eine gegenseitige Anziehung der zusätzlichen Massenelemente, so dass sie sich selbst vollständig symmetrisch ausrichten. Weitere Vorteile sind die sich daraus

- 15 ergebende Haftung am Substrat, die Möglichkeit einer Selbstkalibrierung, sowie die Möglichkeit einer magnetischen oder elektromagnetischen Anregung zu Schwingungen.

Bevorzugt sind die zusätzlichen Massenelemente aus einem Material gefertigt, das eine höhere Dichte als das Material des ersten und/oder des zweiten Schwingelements hat.

- 20 Dies führt zu einer günstigeren Verteilung der Massenträgheitsmomente. Dabei können z.B. Metalle, insbesondere Stahl, als Material für die zusätzlichen Massenelemente verwendet werden, wo hingegen für die übrige Sensorstruktur bzw. für das erste und zweite Schwingelement z.B. Silizium verwendet wird. Es besteht also eine freie Materialwahl für die Zusatzmassen, da das Material der Zusatzmassen nicht kompatibel
- 25 mit den Bearbeitungsschritten z.B. für einen Siliziumwafer sein muss, aus dem die Schwingelemente bzw. die schwingfähige Struktur vorteilhafterweise hergestellt wird. Dadurch kann auf sehr kostengünstige Weise eine extreme Erhöhung der Sensorempfindlichkeit erfolgen.

- 30 Beispielsweise ist das erste Schwingelement eine Wippe und das zweite Schwingelement ein Rahmen, wobei die Wippe und der Rahmen eine kardanische, schwingfähige Struktur bilden, die in einer Haltestruktur befestigt ist.

- Vorteilhafterweise ist der Drehratensor aus mindestens drei zusammengefügten Wafern hergestellt, die bevorzugt einzeln bearbeitet sind. Dabei hat der Drehratensor z.B. einen Bodenwafer, einen Mittelteilwafer und einen Deckelwafer. Dadurch ergibt sich
- 5 eine reduzierte Komplexität beim Herstellungsverfahren, sowie die Möglichkeit, die Einzelkomponenten zu testen. Weiterhin wird die Ausbeute erhöht, wodurch sich für die Sensoren reduzierte Kosten ergeben. Weiterhin lassen sich Gruben- und Elektrodenstrukturen, die sich nach dem Zusammenfügen im Inneren des Sensors befinden, frei gestalten. Darüberhinaus besteht eine größere Auswahlmöglichkeit für
- 10 Elektrodenmaterial und für das Material der Zusatzmassen, da das Material mit weniger Herstellungsschritten kompatibel sein muss. Die Verwendung von baugleichen Deckel- und Bodenwafern ist möglich. Dies ermöglicht einen zur Mittelebene vollständig symmetrischen Aufbau.
- 15 Bevorzugt ist das erste und das zweite Schwingelement in dem Mittelteilwafer ausgebildet. Insbesondere ist der Mittelteilwafer auf der Ober- und Unterseite bearbeitbar. Dadurch ist die Symmetrie zur Mittelebene gewährleistet, da die Massen bzw. zusätzlichen Massenelemente symmetrisch angebracht werden können. Durch die Symmetrie wird die Temperaturdrift der Sensoreigenschaften reduziert.
- 20 Vorteilhafterweise ist der Boden- und/oder der Deckelwafer aus alkalihaltigen Glaswafern hergestellt, wie z.B. Borofloat- oder Pyrex-Glas, wovon z.B. mindestens ein Wafer mit einer Elektrodenstruktur versehen ist. Dadurch werden Streu- und Übersprechkapazitäten reduziert, da sich die Elektrodenstruktur auf isolierendem Material befindet. Insbesondere
- 25 ist z.B. der thermische Ausdehnungskoeffizient an das Silizium des Mittelteilwafers angepasst, weshalb die thermischen Verspannungen während der Herstellung gering gehalten werden können und woraus sich eine reduzierte Temperaturempfindlichkeit des Sensors während des Betriebs ergibt. Die Verwendung alkalihaltiger Glaswafers ermöglicht darüberhinaus eine zuverlässige Verbindung mit dem Mittelteilwafer aus Silizium mittels
- 30 einem anodischen Bondverfahren.

- Dadurch, dass die Wafer bzw. der Mittelteilwafer mit dem Bodenwafer und dem Deckelwafer z.B. durch anodisches Bonden verbunden werden, ergibt sich eine zuverlässige Verbindung, die für die Herstellung eine Temperatur von maximal 450°C benötigt. Diese Maximaltemperatur ist niedrig genug, damit geeignet gewählte
- 5 Metallisierungen nicht verändert werden, d.h., es ergibt sich keine Oxidation und auch keine Bildung von Legierungen. Das anodische Bonden erlaubt eine gute Justage der Wafer zueinander, da während des Bondvorgangs keine flüssige Phase auftritt. Die Justagetoleranz des Drehratensensors ist deshalb zumeist geringer als einige µm.
- 10 Vorteilhafterweise befindet sich zwischen dem Mittelteilwafer und dem Bodenwafer bzw. zwischen dem Mittelteilwafer und dem Deckelwafer ein Spaltabstand, der im Verhältnis zur lateralen Elektrodenausdehnung klein ist. Dieser Abstand zwischen aneinandergrenzenden Wafern dient zur elektrostatischen Anregung und/oder zur kapazitiven Auslesung der Aktorik- und/oder Sensorikschwingung der Schwingelemente.
- 15 Das Verhältnis zwischen dem Spaltabstand und der lateralen Elektrodenausdehnung ist z.B. kleiner als 1:20, bevorzugt kleiner als 1:50, und insbesondere bevorzugt kleiner als 1:100 oder sogar 1:1000. Dadurch ergeben sich sehr große Kapazitätswerte, die wiederum hohe elektrische Signale für die Sensorik bzw. große elektrostatische Kräfte für die Aktorik ermöglichen.
- 20 Bevorzugt ist der Spaltabstand für die Aktorikstruktur, die die Anregungsschwingung des ersten Schwingelements ermöglicht, größer als der Spaltabstand für die Sensorikstruktur, die die Ausleseschwingung des zweiten Schwingelements ermöglicht. Dadurch kann die Aktorikschwingung mit einer sehr hohen mechanischen Amplitude erfolgen. Darüberhinaus
- 25 ist die Dämpfung der Schwingung bei größerem Spaltabstand geringer (Squeezed Film Damping), was bei resonanter Anregung zu höherer mechanischer Amplitude führt. Andererseits ergibt sich durch den geringen Spaltabstand bei der Sensorikstruktur eine große Kapazität und damit ein hohes elektrisches Ausgangssignal.
- 30 Vorteilhafterweise ist der Wafer, aus dem die mechanische Struktur bzw. das erste und zweite Schwingelement geätzt wird, aus einkristallinem Silizium gefertigt. Dabei ist die schwingungsfähige Struktur bzw. Gimbalstruktur des Sensors z.B. aus einem vollen Wafer

geätzt, d.h. in Bulk-Technologie hergestellt. Die schwingungsfähige Struktur umfaßt z.B. das erste und zweite Schwingelement und ist bevorzugt aus dem Mittelteilwafer herausstrukturiert. Durch die Verwendung von einkristallinem Silizium ergibt sich eine sehr geringe Materialdämpfung und weiterhin verschwindend geringe Ermüdungs- und

- 5 Alterungserscheinungen. Die Fertigung in Siliziumtechnologie führt zu geringen Fertigungstoleranzen bei gleichzeitig niedrigen Kosten. Darüberhinaus besitzt Silizium eine hohe mechanische Belastbarkeit bei gleichzeitig niedriger Dichte, woraus eine robuste und belastbare mechanische Struktur resultiert.

- 10 Vorteilhafterweise ist das erste und/oder das zweite Schwingelement nicht-rechtwinklig ausgebildet, d.h. die schwingungsfähige Struktur hat eine nichtrechteckige Geometrie bzw. eine symmetrische konvexe Freiform. Die Schwingelemente können z.B. rund ausgestaltet sein oder auch Kanten aufweisen, die in einem Winkel von mehr als 90° aneinandergrenzen. Beispielsweise können die Schwingelemente 8-eckig sein.

- 15 Insbesondere unter Berücksichtigung großer zusätzlicher Inertialmassen, die die Erhöhung der Empfindlichkeit verursachen, ergibt sich z.B. eine Vergrößerung der Kapazitätsflächen bei gleichzeitig höherer Biegesteifigkeit, und damit höhere Eigenfrequenzen des Rahmens bzw. der äußeren schwingfähigen Struktur.

- 20 Damit wird eine hohe Steifigkeit für die Einspannung des Drehbandes des Rahmens bzw. der Torsionsaufhängung erreicht, die mit einer rechteckigen Struktur nicht erzielt werden kann. Die Torsionsfrequenz wird wesentlich durch das Torsions- bzw. Drehband als Aufhängung selbst bestimmt. Man kann somit das Drehband stark verkürzen und eine von
25 der Torsionsfrequenz fast unabhängig einstellbare Z-Mode des Sensors, die senkrecht zur Waferebene gerichtet ist, erreichen.

- 30 Durch die oben beschriebene Geometrie und durch die besondere Anordnung der Zusatzmassen kann bei vorgegebener Fläche der schwingfähigen Struktur eine besonders hohe Empfindlichkeit bei kleiner Bauweise erreicht werden.

Weiterhin kann das Eigenfrequenzspektrum der mechanischen Struktur durch die nicht

-rechteckige Geometrie günstiger gestaltet werden. Es lassen sich nichtrechteckige Geometrien finden, bei denen die Torsionseigenfrequenzen der Wippe bzw. der inneren schwingfähigen Struktur und des Rahmens bzw. der äußeren schwingfähigen Struktur die niedrigsten Eigenmoden der Struktur sind und alle anderen Moden bei deutlich höheren

- 5 Frequenzen zu liegen kommen. Damit kann man den benötigten Frequenzabstand zwischen dem mechanischen Störspektrum, beispielsweise in einer rauen Umgebung, und den Betriebs- und Eigenmoden des Sensors gewährleisten.

Vorteilhafterweise ist die Frequenz der Aktorikschwingung, die durch die Anregungseinheit

- 10 verursacht wird, und/oder die Frequenz der Sensorikschwingung, die durch die Corioliskraft erzeugt wird, die niedrigsten Eigenmoden der schwingungsfähigen Struktur, die durch das erste und das zweite Schwingelement gebildet wird. Dadurch ergibt sich insbesondere eine hohe Robustheit der mechanischen Struktur gegenüber Schockbelastungen und mechanischen Vibrationen.

15

Durch Verwendung mechanischer Dämpfungselemente, beispielsweise mechanischer Tiefpassfilter, beim Aufbau des Sensorelements ist es möglich, das Drehratensignal von höherfrequenten Störsignalen zu trennen. Dabei hat das Drehratensignal beispielsweise eine Bandbreite von 0 bis 100 Hz. Niederfrequente Störsignale, deren Bandbreite vergleichbar ist mit der Bandbreite der Drehrate, können aufgrund der Lage der Eigenfrequenzen der Sensorstruktur nicht oder nur sehr stark unterdrückt das Sensorverhalten beeinflussen. Dabei liegen die Eigenfrequenzen der Sensorstruktur, d.h. die Aktorik- und Sensorikschwingung, bei ca. 10 kHz, während alle anderen Eigenmoden darüberliegen.

25

Insbesondere ist das Flächenverhältnis zwischen dem zweiten Schwingelement und dem ersten Schwingelement größer als 5:1, bevorzugt größer als 10:1. Durch dieses Flächenverhältnis zwischen dem Rahmen, der die äußere Sensorikstruktur bzw. das zweite Schwingelement bildet, und der Wippe, die die innere Aktorikstruktur bzw. das erste 30 Schwingelement bildet, ergibt sich eine weitere Vergrößerung des elektrischen Sensorsignals bei gleichzeitig optimaler mechanischer Auslegung der Sensorstruktur bzw. der Lage der Eigenmoden. Weiterhin erfolgt eine weitgehende Entkopplung der

Eigenfrequenzen von Wippe und Rahmen. Durch dieses Flächenverhältnis und dem damit einhergehenden Verhältnis der Massenträgheitsmomente ist es möglich, die Eigenfrequenz der Wippe im wesentlichen in Abhängigkeit von der Inertialmasse bzw. der

Massenelemente zu bestimmen, und die Eigenfrequenz des Rahmens im wesentlichen in

- 5 Abhängigkeit von der Rahmengeometrie zu bestimmen. Damit kann ein nahezu unabhängiger Frequenzabgleich erreicht werden, d.h. der Sensor kann auf einfache Weise und mit hoher Genauigkeit getrimmt werden.

Bevorzugt hat der mikromechanische Drehratensor eine Metallisierung zur Bildung

- 10 einer Elektrode bzw. Elektrodenstruktur, die mit einer dielektrischen Schicht bedeckt ist. Dadurch erfolgt eine Passivierung, so dass die Metallisierung vor Korrosion geschützt ist. Leckströme zwischen den isolierten Elektroden werden erheblich reduziert. Da die Metallisierung insbesondere nur auf festen, unbewegten Teilen des Sensors sitzt, gibt es kaum Einschränkungen bezüglich der Art und des Verfahrens der Passivierung.

15

Vorteilhafterweise umfaßt der mikromechanische Drehratensor ein oder mehrere Elektroden, die von einer geschlossenen Leiterbahn umgeben sind. Dabei kann die Leiterbahn zum Beispiel eigens kontaktiert werden. Auch die entsprechenden Zuleitungen können von der geschlossenen Leiterbahn umgeben sein. Durch diese Maßnahme wird 20 das elektrische Übersprechen zwischen den Elektroden für die Sensorik und/oder für die Aktorik reduziert. Da die metallisierten Elektroden z.B. nur im Deckel und/oder Bodenwafer sitzen und in diesem Fall nicht auf dem strukturierten Mittelteil, sind die Guardelektroden leicht zu kontaktieren und unterlegen in ihrer Geometrie und Beschaffenheit weniger Randbedingungen, als wenn sie auf dem Mittelteil angebracht 25 werden müssten.

Bevorzugt hat der mikromechanische Drehratensor einen ohmschen Druckkontakt zum Anschluss des Mittelteilwafers an den Bodenwafer bzw. an ein Bondpad des Bodenwafers. Auch kann der Deckelwafer auf diese Weise kontaktiert werden. Auf dem Mittelteilwafer 30 selbst befindet sich bevorzugt keine Metallisierung. Insbesondere besitzt die gesamte Struktur des Mittelteilwafers ein elektrisches Potential.

Dadurch ist es möglich, dass der elektrische Anschluss des Mittelteilwafers über standardisierte Drahtbondpads erfolgt, die beispielsweise eine Größe von 100µm x 100µm aufweisen. Dadurch können sich die gesamten Anschlußpads auf einer Ebene befinden und nebeneinander liegend angeordnet werden. Dies reduziert erheblich den Aufwand

5 beim elektrischen Kontaktieren des Sensorelements mit der zugehörigen Elektronik für Aktorik und Sensorik.

Durch das Fehlen einer Metallisierung auf dem Mittelteilwafer wird der Herstellungsaufwand des Mittelteilwafers deutlich reduziert. Weiterhin zeigt die

10 schwingungsfähige Struktur eine nur sehr geringe Materialdämpfung und weist keine mechanischen Verspannungen auf. Dies trägt noch zusätzlich zu einer reduzierten Temperaturabhängigkeit der Sensoreigenschaften bei.

Der Sensorinnenraum kann hermetisch verschlossen sein, wobei z.B. vergrabene

15 Leiterbahnen zur Kontaktierung der Elektroden im Sensorinnenraum dienen. Durch die Verbindung zwischen den Bondpads und den Elektrodenflächen im Sensorinneren mittels vergrabenen Leiterbahnen kann das Sensorinnere hermetisch verschlossen werden und kann somit weder verschmutzen, noch korrodieren oder durch Feuchtigkeit oder andere Umwelteinflüsse verändert werden.

20 Das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Drehratensensors umfaßt die Schritte: Bereitstellen von mindestens drei Wafern; Strukturieren der einzelnen Wafer, wobei in einem der Wafer eine kardanische, schwingfähige Struktur ausgebildet wird; Ausbilden einer Anregungseinheit zum Anregen einer ersten Schwingung der Struktur; Ausbilden einer Ausleseeinheit zum Erfassen einer zweiten Schwingung der Struktur, die senkrecht zur ersten Schwingung erfolgt; und Zusammenfügen der Wafer, wobei der Wafer mit der schwingfähigen Struktur auf beiden Seiten mit einem weiteren Wafer verbunden wird. Durch dieses Verfahren ist es möglich, extrem große symmetrische Zusatzmassen auf dem schwingfähigen Mittelteil anzuordnen

25 und dadurch eine deutlich höhere Sensorauflösung zu erreichen.

30

Die weiteren Vorteile, die sich aus der Herstellung des Drehratensensors aus mindestens drei einzeln bearbeiteten Wafern ergeben, die abschließend zusammengefügt werden, wurden oben bereits im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Drehratensensor beschrieben.

5

Insbesondere können an der schwingfähigen Struktur zusätzliche Massenelemente symmetrisch zur Achse der ersten und/oder der zweiten Schwingung befestigt werden. Weiterhin kann der Wafer mit der schwingfähigen Struktur auf seiner Ober- und Unterseite bearbeitet werden.

10

Vorteilhafterweise wird die schwingfähige Struktur bzw. Gimbal-Struktur des Sensors aus einem einzigen, vollen Wafer geätzt und die Aufhängung der mechanischen bzw. schwingfähigen Struktur, die das Mittelteil des Sensors bildet, wird in einem einzigen Ätzschritt hergestellt. Dadurch wird eine hohe Fertigungsgenauigkeit der geometrischen Struktur bzw. schwingungsfähigen Struktur erreicht, da z.B. nicht mehrere Masken zueinander justiert werden müssen. Auch ist es möglich, die Strukturierung des Siliziums mit Flanken senkrecht zur Waferebene durchzuführen. Das Mittelteil selbst ist daher mit hoher Genauigkeit oben-unten-symmetrisch. Damit wird eine wesentliche Quelle für den Quadraturfehler bzw. "quadrature error" ausgeschlossen. Es ergibt sich weiterhin eine freie Gestaltbarkeit der lateralen Geometrie, z.B. bei Verwendung der anisotropen Plasmaätztechnik.

20

Vorteilhafterweise wird auf den Bodenwafer der drei Wafer eine Metallisierungsstruktur mittels Dünnschichttechnologie aufgebracht, die z.B. Kondensatorflächen, Zuleitungen und Anschlußpads bildet. Dadurch wird der Herstellungsaufwand reduziert, da die vollständige Metallisierung sich nur auf einem Wafer befindet. Die Dünnschichttechnologie ermöglicht die Herstellung kleiner Strukturen mit reproduzierbaren Dicken, die für einen reproduzierbaren Spaltabstand notwendig sind. Beispielsweise beträgt die Leiterbahnbreite 10µm, die Leiterbahn- und Elektrodendicke 140nm und der Spaltabstand beispielsweise 1,5µm. Der elektrische Anschluß des Sensorelements an die Aktorik- und Sensorikelektronik erfolgt beispielsweise über standardisierte Drahtbondpads. Deren Größe beträgt z.B. 100µm x 100µm.

- Die Anregung des Drehratensensors bzw. des ersten Schwingelements kann auf vielfältige Weise, z.B. elektrostatisch, piezoelektrisch, magnetostriktiv oder auch magnetisch bzw. unter Verwendung von magnetischen Zusatzmassen erfolgen. In diesem Fall ist der
- 5 Drehratensor mit elektrostatischen, piezoelektrischen, magnetostriktiven oder auch magnetischen Elementen bzw. magnetischen Zusatzmassen versehen.
- Zusätzlich kann eine Steuereinrichtung vorgesehen sein, die eine Elektronik zur Regelung und/oder zum Erzwingen der Anregungsschwingung aufweist. Die Elektronik kann durch
- 10 entsprechende Schaltungen so ausgelegt sein, daß das erste Schwingelement in seiner Eisenfrequenz schwingt. Sie kann aber auch so ausgelegt sein, daß die Schwingung des ersten Schwingelements mit einer bestimmten Frequenz, die nicht die Eigenfrequenz sein muß, erzwungen wird. Dies hat den besonderen Vorteil, daß die Ausleseelektronen zur Messung der Schwingung des zweiten Schwingelements nicht die Funktion des Sensors
- 15 beeinträchtigen bzw. die Meßergebnisse verfälschen, selbst wenn sie sehr nahe an den Elektroden zur Anregung des ersten Schwingelements angeordnet sind und/oder eine freie Schwingung des ersten Schwingelements beeinflussen würden.
- Durch Wahl einer geeigneten Elektrodenform der Anregungselektroden wird der Einfluß
- 20 der Ausleseelektronen zur Messung der Schwingung des zweiten Schwingelements weiter minimiert. Beispielsweise können die einzelnen Elektroden eines Paares von Anregungselektroden geteilt sein und durch die Elektronik separat angesteuert werden um den oben genannten Einfluß auszuschalten bzw. zu kompensieren.
- 25 Das Ausleseverfahren kann ebenfalls auf mehrere bekannte Arten realisiert sein und insbesondere z.B. kapazitiv oder auch optisch erfolgen. In diesem Fall ist der Drehratensor mit kapazitäten oder optischen Elementen zur Auslesung der durch die Corioliskraft erzeugten Schwingung des zweiten Schwingelements versehen.
- 30 Im Betrieb sind kontinuierliche Selbsttest- und Selbstkalibrierungsfunktionen möglich.

Nachfolgend wird der erfindungsgemäß Drehratensor gemäß einer bevorzugten Ausführungsform beispielhaft anhand der Figuren beschrieben. Es zeigen:

- Fig. 1 einen Schnitt durch einen mikromechanischen Drehratensor gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung;
- 5 Fig. 2 eine Draufsicht auf das Mittelteil des Drehratensors gemäß der bevorzugten Ausführungsform;
- 10 Fig. 3 eine Draufsicht auf eine Elektrodenstruktur des Drehratensors; und
- Fig. 4 einen Schnitt, der den Randbereich des Sensors mit der Verbindung zwischen Mittelteil und Bodenteil darstellt.
- 15 Figur 1 zeigt einen mikromechanischen Drehratensor 10, der aus einem Deckelteil 1, einem Mittelteil 2 und einem Bodenteil 3 gebildet ist. Diese Teile sind einzeln bearbeitete Wafer, die abschließend zusammengefügt wurden. Das Mittelteil 2 bildet eine schwingfähige Struktur mit einem ersten Schwingelement 4 und mit einem zweiten Schwingelement 5. Das erste Schwingelement 4 bildet eine Wippe und das zweite Schwingelement 5 bildet einen Rahmen, in dem die Wippe schwenkbar um eine erste Drehachse A gelagert ist. Der Rahmen bzw. das zweite Schwingelement 5 ist innerhalb des Sensors schwenkbar um eine zweite Drehachse B gelagert, die in Waferebene senkrecht zur ersten Drehachse A verläuft. Auf der Oberseite 2a und auf der Unterseite 2b des Mittelteils 2 bzw. des ersten Schwingelements 4 befindet sich jeweils ein zusätzliches Masselement 6a, 6b. Die zusätzlichen Masselemente 6a, 6b sind symmetrisch zum Mittelteil 2 bzw. zur Mittelteilebene, die durch die Drehachsen A und B gebildet wird, angeordnet. In der dargestellten, bevorzugten Ausführungsform sind die zusätzlichen Masselemente 6a und 6b symmetrisch zur Drehachse A und symmetrisch zur Drehachse B angeordnet, d.h es liegt Symmetrie zu den beiden Drehachsen A und B und zum Schnittpunkt der beiden Drehachsen A und B vor.
- 20
- 25
- 30

- Elektroden 7 bilden zusammen mit einer nicht dargestellten Steuerung eine Anregungseinheit, um das erste Schwingelement 4 bzw. die Wippe in Schwingungen um die Drehachse A zu versetzen. Weitere Elektroden 8 bilden zusammen mit einer nicht dargestellten Elektronik eine Ausleseeinheit, um die Schwingungen des zweiten
- 5 Schwingelements 5 bzw. des Rahmens um die Drehachse B zu erfassen. Die Anregung und die Auslesung der Schwingungen erfolgt elektrostatisch bzw. kapazitiv. Hierzu hat das Mittelteil 2 ein elektrisches Potential.

Im Deckelteil 1 und im Bodenteil 3 sind Aussparungen 1a bzw. 3a vorgesehen, in die

10 jeweils ein Masselement 6a bzw. 6b hineinragt. Dabei besteht zwischen den Masselementen 6a, 6b und der jeweils angrenzenden Struktur des Deckelteils 1 bzw. Bodenteils 3 ein Spielraum bzw. Abstand, der ein hin- und herschwingen des mit der Wippe verbundenen Masselements 6a, 6b innerhalb der Aussparung 1a bzw. 3a ermöglicht.

15 Zwischen dem Deckelteil 1 und dem Mittelteil 2 befindet sich ein Spaltabstand d und zwischen dem Mittelteil 2 und dem Bodenteil 3 befindet sich ebenfalls ein Spaltabstand e1, e2. Die Spaltabstände d, e1, e2 dienen zur elektrostatischen Anregung bzw. zur kapazitiven Auslesung der Aktorik- und Sensorikschwingung der schwingfähigen Struktur

20 des Mittelteils 2. Die Spaltabstände d, e1, e2 sind im Verhältnis zur lateralen Ausdehnung der Elektrodenstruktur bzw. zur lateralen Ausdehnung der Elektroden 8, die zur Auslesung der Schwingung des Rahmens bzw. zweiten Schwingelements 5 dienen, sehr klein. Das Verhältnis des Spaltabstands d und des Spaltabstands e2 zur lateralen Ausdehnung der Elektrode 8 ist ca. 1:100 oder kleiner. Dadurch ergeben sich sehr hohe Kapazitätswerte

25 für die Sensorik bzw. große elektrostatische Kräfte für die Aktorik.

Der Spaltabstand e1 zwischen dem Bodenteil 3 und dem ersten Schwingelement 4, der das Verkippen bzw. Schwingen des ersten Schwingelements 4 um die Drehachse A ermöglicht, ist größer als der Spaltabstand e2 zwischen dem Bodenteil 3 und dem zweiten

30 Schwingelement bzw. Rahmen 5, der das Verkippen um die Drehachse B ermöglicht. Dadurch wird eine große mechanische Amplitude bei der resonanten Anregung möglich,

während andererseits durch den geringen Spaltabstand bei der Auslesung und die damit verbundene große Kapazität ein hohes elektrisches Ausgangssignal erzielt wird.

Das Deckelteil 1 weist an seinem Rand einen Vorsprung 11 auf, durch den es mit dem
5 Rand 21 des Mittelteils fest verbunden ist. Durch den Vorsprung 11 bzw. den dadurch gebildeten, gegenüber dem zentralen Bereich des Deckelteils erhabenen Rand wird innerhalb des Sensors 10 ein Innenraum 9 gebildet, der den beiden Schwingelementen 4, 5 bzw. der schwingungsfähigen Struktur genügend Raum zum Ausführen der Anregungs- bzw. Ausleseschwingung bietet. Auch das Bodenteil 3 weist an seiner Oberfläche einen
10 hervorstehenden Verbindnungsbereich bzw. Bereich 31 auf, der zur Anbindung des Bodenteils 3 an das Mittelteil 2 dient und dadurch Raum für die Schwingungen bietet.

Das Bodenteil 3, das ein Bodenwafer oder ein Teil eines Bodenwafers sein kann, hat eine größere laterale Ausdehnung als die übrigen Waferteile bzw. Wafer, die das Deckelteil 1 und das Mittelteil 2 bilden. D. h., das Bodenteil 3 hat einen Randbereich, der sich über den Rand des Mittelteils 2 bzw. des Deckelteils 1 hinaus erstreckt. Auf der Oberfläche des Bodenteils 3 bzw. des Wafers im Randbereich sind Kontaktflächen 32 in Form von Anschlußpads vorgesehen, die zur Kontaktierung der Metallisierungen bzw. Elektroden 7, 8 im Innenraum 9 des Sensors dienen. Die Kontaktflächen 32 sind über Leiterbahnen 33 mit den Elektroden 7, 8 verbunden, wobei die Kontaktflächen 32, die Leiterbahnen 33 und die Elektroden 7, 8 in einer Ebene auf der Oberfläche des Bodenteils 3 bzw. unteren Wafers ausgebildet sind. Die Leiterbahnen 33 sind vergrabene Leiterbahnen, d.h. sie sind in dem Wafer integriert bzw. eingearbeitet. Dadurch erfolgt ein hermetischer bzw. vakuumdichter Verschluss des Innenraums 9.

25

Figur 2 zeigt eine Draufsicht auf das Mittelteil 2, das Teil eines Wafers oder auch ein ganzer Wafers sein kann, des Drehratensensors gemäß der bevorzugten Ausführungsform. Das innere Schwingelement 4 bzw. die Wippe ist über zwei gegenüberliegende, schwingungsfähige bzw. torsionsfähige Aufhängungen 41 mit dem äußeren
30 Schwingelement 5 bzw. Rahmen verbunden. Die schwingungsfähige Aufhängung 41 erlaubt ein Verkippen bzw. Schwingen der Wippe um die Achse A, die sich durch die beiden Aufhängungen 41 erstreckt. Der Rahmen bzw. das äußere Schwingelement 5 ist

durch schwingungsfähige bzw. torsionsfähige Aufhängungen 42 mit dem restlichen Teil des Wafers bzw. Mittelteils 2 verbunden, der eine Haltestruktur 21 bildet, die zwischen dem Deckelteil 1 und dem Bodenteil 3 des Wafers fixiert ist. Die schwingungsfähige Aufhängung 42 des Rahmens bzw. zweiten Schwingelements 5 an der Haltestruktur 21

5 erlaubt ein Kippen bzw. Schwingen des Rahmens um die Achse B die sich durch die beiden Aufhängungen 42 erstreckt und senkrecht zur Drehachse A des ersten Schwingelements 4 ausgerichtet ist.

Das obere zusätzliche Masselement 6a ist symmetrisch im Zentrum der aus Wippe und

10 Rahmen gebildeten schwingungsfähigen Struktur befestigt und dabei gleichzeitig im Zentrum der Wippe bzw. des ersten Schwingelements 4 angeordnet. Direkt unterhalb ist das zweite zusätzliche, identisch ausgebildete Massenelement 6b angeordnet (s. Fig. 1).

Die Schwingelemente 4, 5 weisen Kanten 4a, 5a auf, die nicht rechtwinklig zueinander

15 ausgerichtet sind, sondern einen Winkel α bilden, der größer ist als 90° . C. D.h., die schwingfähige Struktur, die aus den beiden Schwingelementen 4 und 5 besteht, hat eine nicht-rechtwinklige Geometrie, durch die eine Vergrößerung der Kapazitätsflächen bei gleichzeitig höherer Biegesteifigkeit, und damit höheren Eigenfrequenzen des Rahmens erzielt wird. Auch kann die Aufhängung 42 bzw. das Drehband des Rahmens stark verkürzt

20 werden. Insgesamt kann das Eigenfrequenzspektrum der mechanischen Struktur durch die nicht-rechtwinklige Geometrie günstiger gestaltet werden. Die weiteren Vorteile der nichtrechteckigen Geometrie wurden oben bereits beschrieben.

Figur 3 zeigt eine Draufsicht auf eine auf dem Bodenteil 3 ausgebildete Metallisierung. Die

25 Metallisierung bildet die zwei flächig ausgestaltete Elektroden 8, die zur kapazitiven Auslesung der Schwingung des Rahmens bzw. zweiten Schwingelements 5 dienen, die aufgrund der Corioliskraft bei einer Drehung des Sensors um eine senkrecht zu den Drehachsen der Schwingelemente 4 und 5 gerichtete sensitive Achse erzeugt wird. Die Elektroden 7 sind hier nicht dargestellt, jedoch ähnlich ausgestaltet.

30

Die gesamte Struktur des Mittelteilwafers bzw. Mittelteils 2 besitzt ein elektrisches Potential, das den Metallisierungen bzw. Elektroden 7, 8 auf dem Bodenteil 2

gegenüberliegt. Dadurch ist es nicht notwendig, an der schwingfähigen Struktur ebenfalls Metallisierungen anzubringen, die den Elektroden 7, 8 zur Anregung und zur Auslesung gegenüberliegen (s. Fig. 1).

- 5 Jede Elektrode 7, 8 ist vollständig von einer Ringelektrode 12 umgeben, die sowohl die Elektrode 7, 8, als auch die nach außen führende Leiterbahn 33 und die außenliegende Kontaktfläche 32 umschließt. Die Ringelektrode 12 ist dabei über eine eigene, außerhalb des Sensorinnenraums gelegene Kontaktfläche 34 separat kontaktierbar. Die Ringelektrode 12, die eine Leiterbahn bildet, reduziert das elektrische Übersprechen
- 10 zwischen den Elektroden 7, 8 für Sensorik und Aktorik.

Figur 4 zeigt die Verbindung zwischen Mittelteil 2 und Bodenteil 3 im Randbereich des Sensors 10 in vergrößerter Darstellung. Dabei ist der Mittelteilwafer bzw. das Mittelteil 2 über einen ohmschen Druckkontakt 35 an ein Bond- bzw. Anschlußpad des Bodenwafers 3 angeschlossen, das in Form einer Kontaktfläche 36 auf dem Bodenteil 3 ausgebildet ist. Die gesamten Anschlußpads befinden sich auf einer Ebene und sind nebeneinanderliegend angeordnet. Dadurch können sowohl die Elektroden 7, 8 als auch der Mittelteilwafer 2 auf einfache Weise und mit deutlich reduziertem Aufwand elektrisch kontaktiert werden.

- 20 Der Mittelteilwafer 2 besteht in der bevorzugten Ausführungsform aus einkristallinem Silizium, während das Bodenteil 3 und das Deckelteil 2 z.B. aus alkalihaltigen Glaswafers, wie z.B. Borofloat- oder Pyrex-Glas, hergestellt sind. Mindestens einer der Wafer ist mit einer Elektrodenstruktur versehen. Selbstverständlich sind auch andere Materialien für die Sensorteile möglich, wobei sich die Materialwahl nach den jeweiligen Erfordernissen
- 25 richtet.

Die Masselemente 6a, 6b sind im vorliegenden Fall Stahlkugeln, die jeweils in einer Ausbuchtung auf der Ober- und Unterseite der Wippe bzw. des ersten Schwingelements 4 gelagert sind. Dabei liegen sich die Stahlkugeln genau gegenüber, so dass eine hohe Geometrie gewährleistet ist. In einer besonderen Ausführungsform werden magnetische Stahlkugeln verwendet, die sich selbst gegenseitig ausrichten. Neben Stahlkugeln sind selbstverständlich auch andere Formen und Materialien zur Ausgestaltung der

Masseelemente 6a, 6b möglich, wobei die Sensorparameter durch geeignete Auswahl eingestellt werden können.

Neben einer elektrostatischen Anregungseinheit sind die verschiedensten

- 5 Anregungsverfahren möglich, wie z.B. piezoelektrische, magnetostriktive, oder auch magnetische Anregungsverfahren. Auch das Ausleseverfahren kann auf andere bekannte Arten erfolgen, wobei neben kapazitiven Auslesungen auch optische Auslesungsverfahren möglich sind.
 - 10 Nachfolgend wird ein Beispiel für die Herstellung des Sensors 10 beschrieben.
- Zur Herstellung des Sensors werden drei Wafer einzeln bearbeitet, die das Deckelteil 1, das Mittelteil 2 und das Bodenteil 3 bilden. Die Wafer für das Deckelteil 1 und für das Bodenteil 3 werden so strukturiert, dass in ihrem Zentrum Ausnehmungen für die
- 15 Masselemente 6a, 6b vorhanden sind, wobei sich genügend Spielraum zum Ausführen der Schwingungen bietet. Auch wird ein zentraler Bereich der jeweiligen Waferoberfläche gegenüber dem Randbereich abgesenkt, so dass sich in diesem Bereich des Deckel- und Bodenteils jeweils ein Spaltabstand zum Mittelteil 2 ergibt, der das Schwingen der schwingfähigen Struktur des Mittelteils ermöglicht.
- 20 Der Mittelteilwafer wird auf der Ober- und Unterseite bearbeitet, so dass die Symmetrie zur Mittelebene gewährleistet ist. Dabei wird die schwingungsfähige Struktur des Sensors, bestehend aus Rahmen und Wippe, aus einem vollen Wafer geätzt, wobei die Aufhängungen 41, 42 (siehe Figur 2) in einem Ätzschritt hergestellt werden.
- 25 Nun werden die Masselemente 6a, 6b auf der Oberseite und der Unterseite des Wafers, der als Mittelteil 2 vorgesehen ist, befestigt, beispielsweise durch Kleben oder magnetisch.
- Auf dem Wafer, der für das Bodenteil 3 vorgesehen ist, wird eine Metallisierungsstruktur
- 30 mittels Dünnschichttechnologie aufgebracht, die die Elektroden bzw. Kondensatorflächen sowie die Zuleitungen und Anschlußpads bildet. Dabei wird die Metallisierung zur Passivierung mit einer dielektrischen Schicht bedeckt.

Nach der separaten Vorfertigung der drei Wafer bzw. Sensorteile werden diese zusammengefügt und fest miteinander verbunden. Dabei werden geeignete Vorkehrungen getroffen, dass sich im Innenraum 9 des Sensors ein Vakuum befindet.

5

Durch den symmetrischen Sensor werden Fehlerquellen, wie insbesondere eine Temperaturdrift wirksam vermieden und es ergeben sich verbesserte Messergebnisse. Die symmetrischen Zusatzmassen auf dem Mittelteil 2 ergeben eine deutlich höhere Sensorauflösung. Der hochsymmetrische mechanische Aufbau des Sensors führt zu einer hohen Langzeitstabilität bzw. geringen Offset-Drift. Das heißt, der Sensor arbeitet langfristig stabil und liefert genauere Messergebnisse. Er ist mechanisch belastbar, ohne dass bei derartigen Belastungen die Messergebnisse verfälscht werden.

10
15

Patentansprüche

1. Mikromechanischer Drehratensor, mit
5 einem ersten Schwingelement (4), das schwenkbar um eine erste Achse (A) gelagert ist,
einem zweiten Schwingelement (5), das schwenkbar um eine zweite Achse (B) gelagert ist, die senkrecht zur ersten Achse (A) gerichtet ist,
einer Anregungseinheit (7), um das erste Schwingelement (6) in Schwingungen um
10 die erste Achse (A) zu versetzen, und
einer Ausleseeinheit (8) zum Erfassen von Schwingungen des zweiten Schwingelements (5) um die zweite Achse (B),
dadurch gekennzeichnet,
dass an dem ersten Schwingelement (4) mindestens zwei zusätzliche
15 Masselemente (6a, 6b) befestigt sind, die symmetrisch zu einer Ebene ausgerichtet sind, die durch die erste und zweite Achse (A,B) definiert ist.
2. Mikromechanischer Drehratensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
dass die zusätzlichen Masselemente (6a, 6b) getrennt von dem ersten und
20 zweiten Schwingelement (4, 5) gefertigt sind, wobei Form, Größe und/oder Material der Masselemente (6a, 6b) ausgewählt sind um Sensorparameter zu bestimmen und/oder wesentlich zu beeinflussen.
3. Mikromechanischer Drehratensor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch
25 gekennzeichnet, dass die Masselemente (6a, 6b) achsialsymmetrische Körper sind, die auf der Oberseite (2a) und der Unterseite (2b) des ersten Schwingelements (4) befestigt sind, wobei die Masselemente bevorzugt Kugeln, Quader, Zylinder, Kegel, Pyramiden oder Prismen sind.
- 30 4. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Schwingelement (4) eine Wippe und das zweite Schwingelement (5) ein Rahmen ist, wobei die Wippe und der Rahmen eine

kardanische, schwingfähige Struktur bilden, die in einer Haltestruktur (21) befestigt ist.

5. Mikromechanischer Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zusätzlichen Masseelemente (6a, 6b) magnetisch sind.
10. Mikromechanischer Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zusätzlichen Masseelemente (6a, 6b) aus einem Material gefertigt sind, das eine höhere Dichte als das Material des ersten und zweiten Schwingelements (4, 5) hat.
15. Mikromechanischer Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass er aus mindestens drei zusammengefügten Wafern hergestellt ist, die ein Bodenteil (3), ein Mittelteil (2) und ein Deckelteil (1) bilden.
20. Mikromechanischer Drehratensensor nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Bodenteil (3) und/oder das Deckelteil (1) aus alkalihaltigen Glaswafern hergestellt sind, wobei mindestens einer der Wafer mit einer Elektrodenstruktur (7, 8) versehen ist.
25. Mikromechanischer Drehratensensor nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass das erste und das zweite Schwingelement (4, 5) in dem Mittelteil (2) ausgebildet sind, dessen Oberseite und Unterseite bearbeitet ist.
30. Mikromechanischer Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Spaltabstand (d, e1, e2) zwischen aneinander grenzenden Waferteilen oder Wafern, der eine Auslenkung des ersten und/oder zweiten Schwingelements (4, 5) ermöglicht, klein gegenüber der lateralen Ausdehnung von Anregungs- und/oder Ausleseelektroden (7, 8) ist, wobei das Verhältnis zwischen Spaltabstand und lateraler Elektrodenausdehnung kleiner als 1:10 ist, bevorzugt kleiner als 1:50, insbesondere bevorzugt kleiner als 1:100

oder 1:1000.

11. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Spaltabstand (e1) für eine Anregungsschwingung des ersten Schwingelements (4) größer ist als ein Spaltabstand (e2) für eine Ausleseschwingung des zweiten Schwingelements (5).
5
12. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass er aus einkristallinem Silizium hergestellt ist, wobei
10 das erste und das zweite Schwingelement (4, 5) aus einem einzigen Wafer gefertigt sind.
13. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das erste und/oder zweite Schwingelement (4, 5)
15 nicht-rechtwinklig ausgebildet ist.
14. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das erste und/oder zweite Schwingelement (4, 5)
20 Kanten (4a, 5a) aufweist, die in einem Winkel von mehr als 90 Grad aneinandergrenzen.
15. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenz einer Aktorikschwingung und die
25 Frequenz der Sensorikschwingung die niedrigsten Eigenmoden des ersten und/oder zweiten Schwingelements (4, 5) sind.
16. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Flächenverhältnis zwischen dem zweiten
30 Schwingelement (5) und dem ersten Schwingelement (4) größer ist als 5:1, bevorzugt größer ist als 10:1.

17. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Metallisierung zur Bildung einer Elektrode (7, 8), die mit einer dielektrischen Schicht bedeckt ist.
- 5 18. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein oder mehrere Elektroden (7, 8), die von einer geschlossenen Leiterbahn (12) umgeben ist.
- 10 19. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen ohmschen Druckkontakt (35) zum Anschluß eines Wafers, der ein Mittelteil (2) bildet, an einen weiteren Wafer, der ein Boden- oder Deckelteil (1, 3) bildet.
- 15 20. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen Sensorinnenraum (9), der hermetisch verschlossen ist, wobei vergrabene Leiterbahnen (33) zur Kontaktierung von Elektroden (7, 8) im Sensorinnenraum (9) vorgesehen sind..
- 20 21. Mikromechanischer Drehratensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der gemeinsame Schwerpunkt der Masselemente (6a, 6b) im Schnittpunkt der ersten Achse (A) und der zweiten Achse (B) liegen.
- 25 22. Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Drehratensors, gekennzeichnet durch die Schritte:
Bereitstellen von mindestens 3 Wafern (1, 2, 3);
Strukturieren der einzelnen Wafer (1, 2, 3), wobei in einem der Wafer (2) eine kardanische, schwingfähige Struktur (4, 5) ausgebildet wird;
Ausbilden einer Anregungseinheit (7) zum Anregen einer ersten Schwingung der Struktur;
- 30 Ausbilden einer Ausleseeinheit (8) zum Erfassen einer zweiten Schwingung der Struktur, die senkrecht zur ersten Schwingung erfolgt; und
Zusammenfügen der Wafer (1, 2, 3), wobei der Wafer (2) mit der schwingfähigen

Struktur (4, 5) auf beiden Seiten mit einem weiteren Wafer (1, 3) verbunden wird.

23. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß an der schwingfähigen Struktur (4, 5) zusätzliche Masseelemente (6a, 6b) symmetrisch zur Achse (A, B) der ersten und/oder zweiten Schwingung befestigt werden.

24. Verfahren nach Anspruch 22 oder 23, dadurch gekennzeichnet, daß der Wafer (2) mit der schwingfähigen Struktur (4, 5) auf seiner Ober- und Unterseite bearbeitet wird.

10

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß die schwingfähige Struktur (4, 5) aus einem einzigen, vollen Wafer (2) geätzt wird, wobei Aufhängungen (41, 42) der schwingfähigen Struktur (4, 5) in einem einzigen Ätzschritt hergestellt werden.

15

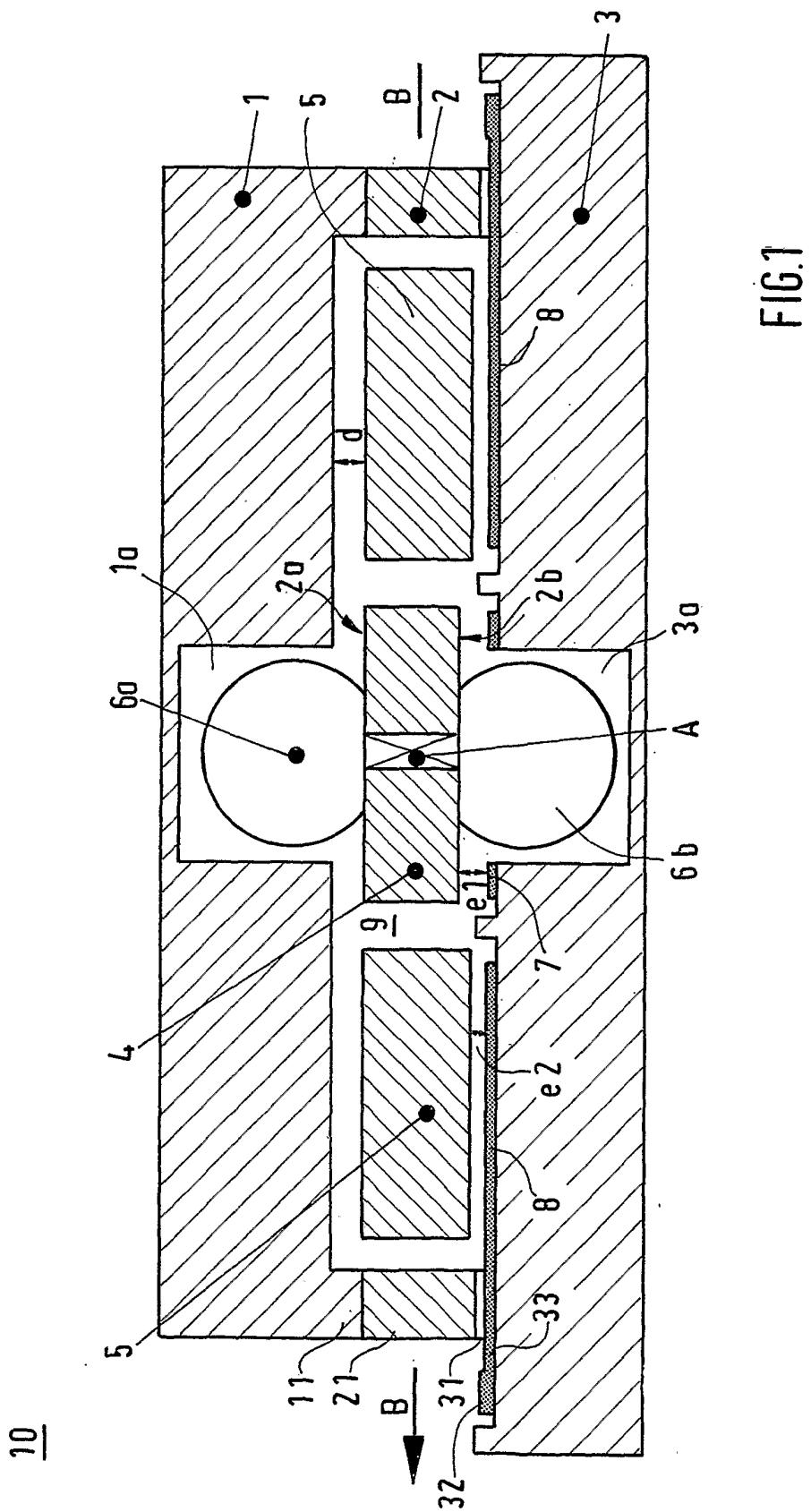
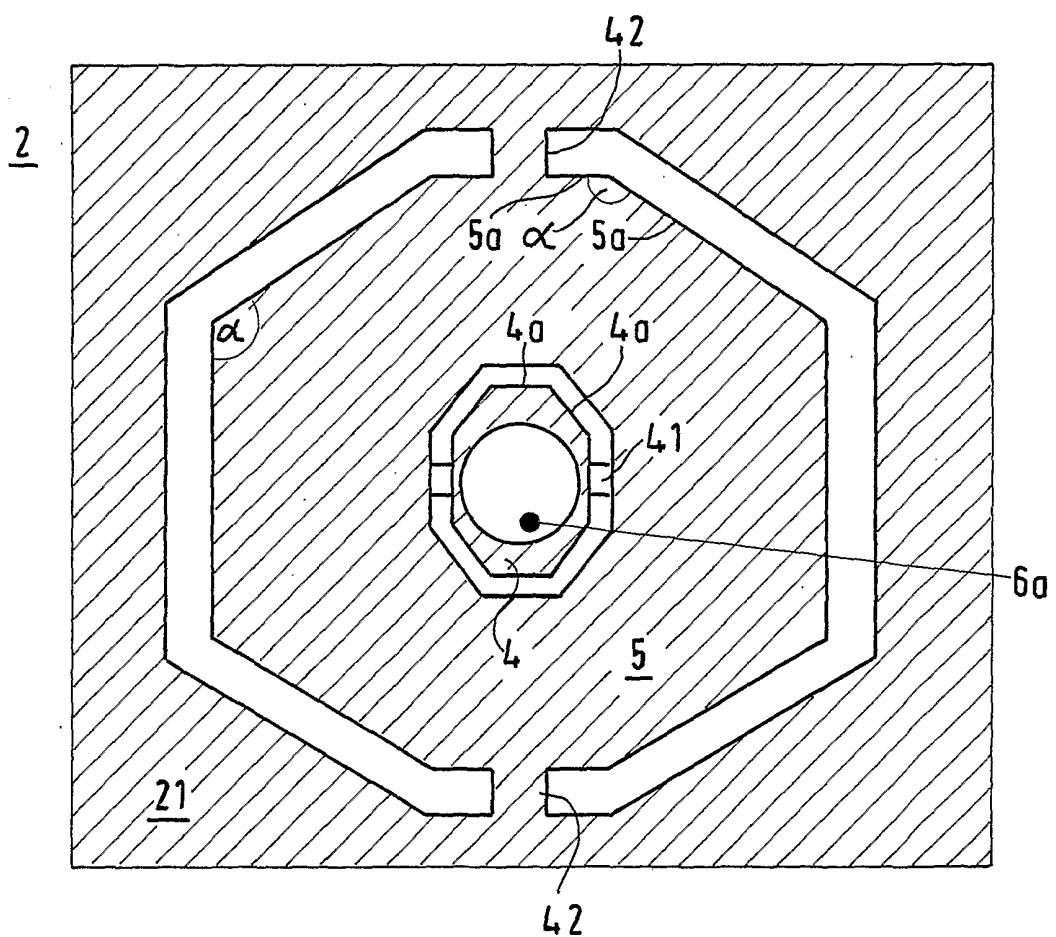
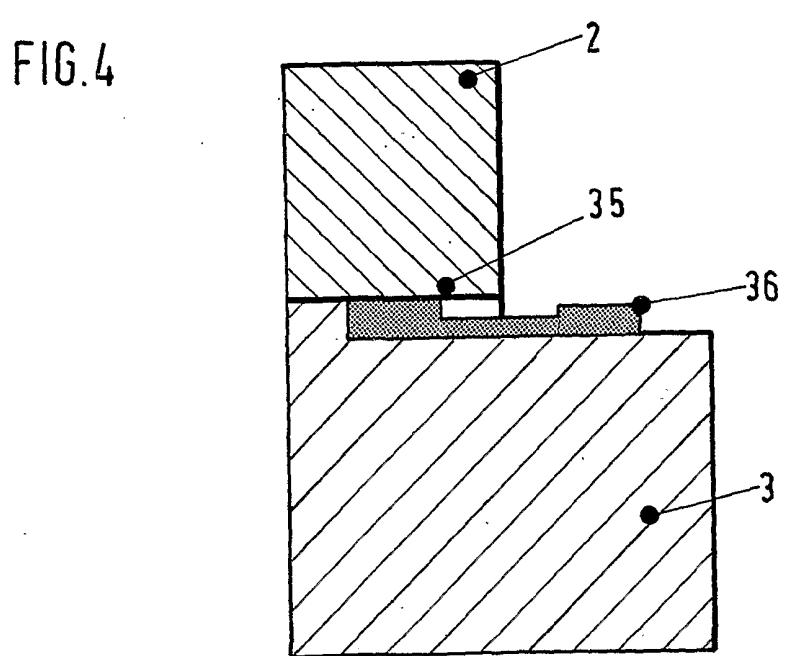
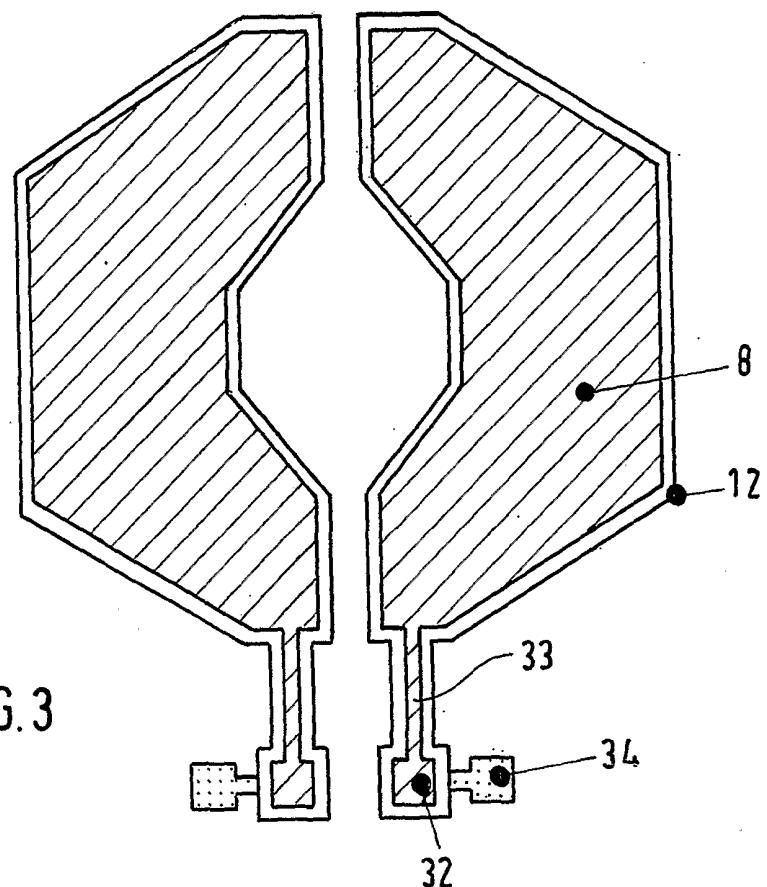


FIG.2





INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 01/09066

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G01C19/56

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01C G01P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 5 016 072 A (GREIFF PAUL) 14 May 1991 (1991-05-14) the whole document ----	1-25
Y	DE 35 09 948 A (DRAPER LAB CHARLES S) 26 September 1985 (1985-09-26) the whole document ----	1-25
Y	US 5 195 371 A (GREIFF PAUL) 23 March 1993 (1993-03-23) the whole document ----	1-25
Y	US 6 032 531 A (ROSZHART TERRY V) 7 March 2000 (2000-03-07) the whole document ----	1-25
		-/-

Further documents are listed in the continuation of box C.

Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

21 December 2001

Date of mailing of the international search report

16/01/2002

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Springer, O

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 01/09066

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 5 203 208 A (BERNSTEIN JONATHAN J) 20 April 1993 (1993-04-20) the whole document -----	1-25

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP 01/09066

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)	Publication date
US 5016072	A	14-05-1991		AT 154166 T CA 2057919 A1 DE 69126381 D1 DE 69126381 T2 EP 0472717 A1 JP 5502945 T WO 9114285 A1 US 5216490 A US 5060039 A US 5195371 A US 5111693 A	15-06-1997 15-09-1991 10-07-1997 18-09-1997 04-03-1992 20-05-1993 19-09-1991 01-06-1993 22-10-1991 23-03-1993 12-05-1992
DE 3509948	A	26-09-1985		US 4598585 A CA 1227059 A1 DE 3509948 A1 FR 2561389 A1 GB 2156523 A , B JP 1984788 C JP 7003337 B JP 60213814 A US 4699006 A	08-07-1986 22-09-1987 26-09-1985 20-09-1985 09-10-1985 25-10-1995 18-01-1995 26-10-1985 13-10-1987
US 5195371	A	23-03-1993		CA 2034663 A1 EP 0442280 A2 JP 5133976 A US 5473945 A US 5635739 A US 5126812 A US 5216490 A US 5060039 A US 5016072 A US 5111693 A	15-08-1991 21-08-1991 28-05-1993 12-12-1995 03-06-1997 30-06-1992 01-06-1993 22-10-1991 14-05-1991 12-05-1992
US 6032531	A	07-03-2000		NONE	
US 5203208	A	20-04-1993		NONE	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 01/09066

A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 G01C19/56

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 G01C G01P

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	US 5 016 072 A (GREIFF PAUL) 14. Mai 1991 (1991-05-14) das ganze Dokument ---	1-25
Y	DE 35 09 948 A (DRAPER LAB CHARLES S) 26. September 1985 (1985-09-26) das ganze Dokument ---	1-25
Y	US 5 195 371 A (GREIFF PAUL) 23. März 1993 (1993-03-23) das ganze Dokument ---	1-25
Y	US 6 032 531 A (ROSZHART TERRY V) 7. März 2000 (2000-03-07) das ganze Dokument ---	1-25
		-/-

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

Siehe Anhang Patentfamilie

° Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :	*T* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist	*X* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erforderlicher Tätigkeit beruhend betrachtet werden
E älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist	*Y* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erforderlicher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchebericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)	*&* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist
O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht	
P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist	

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

21. Dezember 2001

16/01/2002

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Springer, O

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 01/09066

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie ^a	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	US 5 203 208 A (BERNSTEIN JONATHAN J) 20. April 1993 (1993-04-20) das ganze Dokument -----	1-25

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 01/09066

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung		Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 5016072	A	14-05-1991	AT CA DE DE EP JP WO US US US	154166 T 2057919 A1 69126381 D1 69126381 T2 0472717 A1 5502945 T 9114285 A1 5216490 A 5060039 A 5195371 A 5111693 A		15-06-1997 15-09-1991 10-07-1997 18-09-1997 04-03-1992 20-05-1993 19-09-1991 01-06-1993 22-10-1991 23-03-1993 12-05-1992
DE 3509948	A	26-09-1985	US CA DE FR GB JP JP JP US	4598585 A 1227059 A1 3509948 A1 2561389 A1 2156523 A ,B 1984788 C 7003337 B 60213814 A 4699006 A		08-07-1986 22-09-1987 26-09-1985 20-09-1985 09-10-1985 25-10-1995 18-01-1995 26-10-1985 13-10-1987
US 5195371	A	23-03-1993	CA EP JP US US US US US US	2034663 A1 0442280 A2 5133976 A 5473945 A 5635739 A 5126812 A 5216490 A 5060039 A 5016072 A 5111693 A		15-08-1991 21-08-1991 28-05-1993 12-12-1995 03-06-1997 30-06-1992 01-06-1993 22-10-1991 14-05-1991 12-05-1992
US 6032531	A	07-03-2000		KEINE		
US 5203208	A	20-04-1993		KEINE		