

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) **CH** **711 275 B1**

(51) Int. Cl.: **G04B 17/06** (2006.01)
H01L 41/08 (2006.01)
H01L 41/187 (2006.01)
H01L 41/316 (2013.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 00791/16

(22) Anmeldedatum: 22.06.2016

(43) Anmeldung veröffentlicht: 30.12.2016

(30) Priorität: 22.06.2015 CH 891/15

(24) Patent erteilt: 30.12.2020

(45) Patentschrift veröffentlicht: 30.12.2020

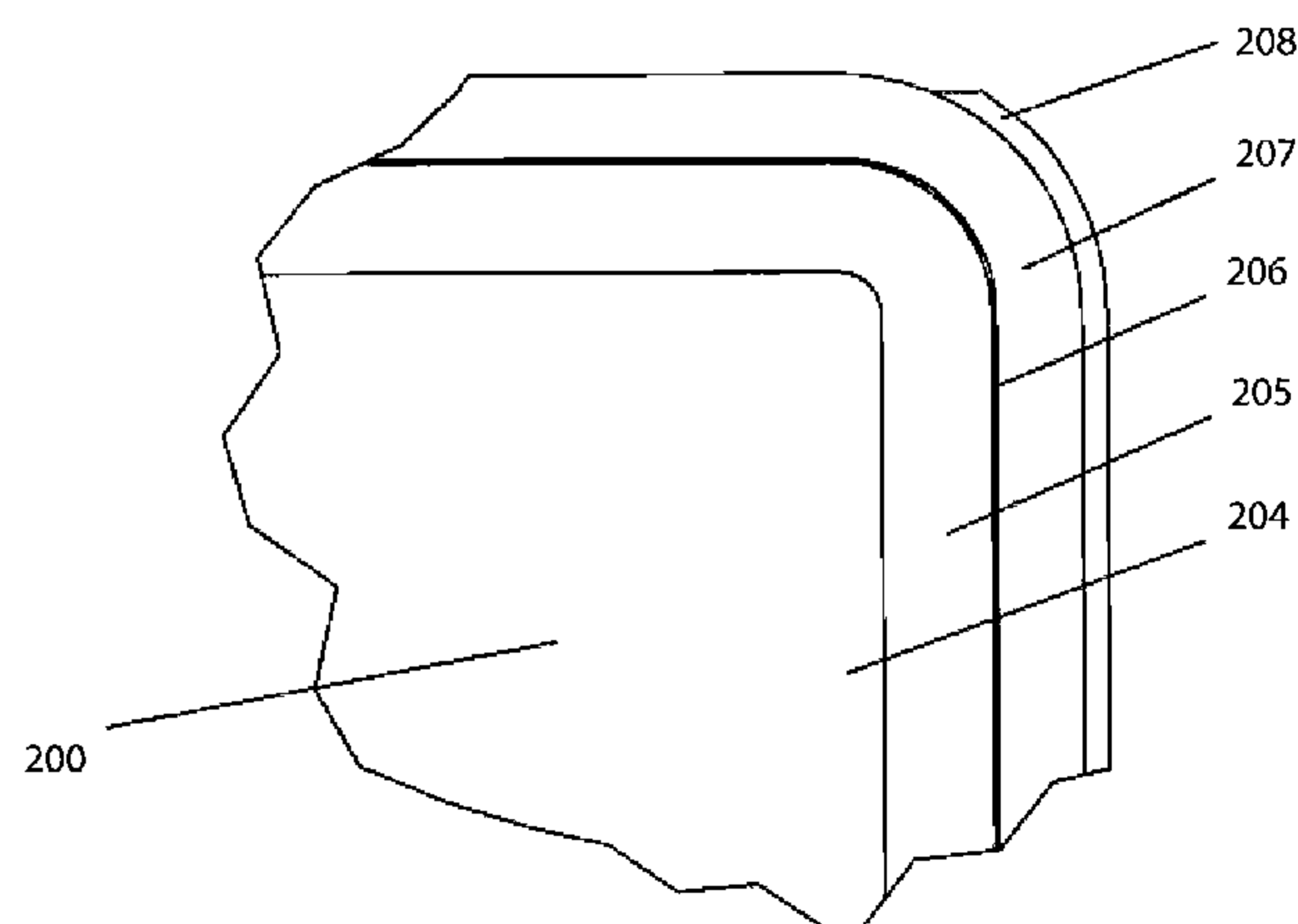
(73) Inhaber:
XC Tracer GmbH, Junkerengasse 53
3011 Bern (CH)

(72) Erfinder:
Konrad Schafroth, 3011 Bern (CH)

(74) Vertreter:
P&TS SA, Av. J.-J. Rousseau 4 P.O. Box 2848
2001 Neuchâtel (CH)

(54) **Verfahren zur Beschichtung einer Spiralfeder und entsprechend beschichtete Spiralfeder.**

(57) Verfahren zur Herstellung einer Spiralfeder mit einem Kern aus einem Substrat (204) und einer piezoelektrischen Beschichtung (207), wobei die benannte Beschichtung mittels eines gepulsten Beschichtungsverfahrens auf diesem Substrat (204) aufgebracht wird.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine mechanische Uhr, deren Regelorgan mit einer Unruhe und einer Spiralfeder durch ein Regelorgan mit einer besseren Ganggenauigkeit ersetzt wird. Erfindungsgemäss wird eine Unruhe mit einer Spiralfeder aus piezoelektrischem Material und einer kleinen, den Gang der Unruhe regelnden Elektronik verwendet.

Stand der Technik

[0002] Es wird eine Unruhe mit einer Spiralfeder aus piezoelektrischem Material und einer kleinen, den Gang der Unruhe regelnden Elektronik verwendet. Aus der JP2002228774A ist schon ein solches Uhrwerk mit einer piezoelektrischen Spiralfeder bekannt.

[0003] Aus der internationalen Anmeldung WO2011131784 und aus CH20100001298, deren Inhalt hiermit per Referenz aufgenommen wird, ist ein Verfahren beschrieben, bei welchem eine piezoelektrische Spiralfeder hergestellt wird, indem eine Spiralfeder aus Silizium mit einer piezoelektrischen Beschichtung und den entsprechenden Elektroden versehen wird. Gemäss dieser Anmeldung wird die piezoelektrische Beschichtung mittels der metallorganischen chemischen Gasphasenabscheidung (engl. metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) hergestellt. Nachdem die Spiralfeder mit der piezoelektrischen Beschichtung versehen worden ist, werden mittels Sputtern und anschliessendem Ätzen die Elektroden strukturiert. Der Nachteil dieses Verfahrens ist dass die gewünschte Qualität der piezoelektrischen Beschichtung, in diesem Falle Aluminiumnitrid AlN, nur bei hohen Temperaturen im Bereich von 1100-1300 Grad Celsius erreicht werden kann. Beim Abkühlen der Spiralfeder auf Raumtemperatur entstehen durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Silizium und AlN große Spannungen.

[0004] Diese Spannungen können teilweise reduziert werden, indem Zwischenschichten aus Aluminiumnitrid abwechselnd mit Schichten aus AlGa_N oder GaN gewachsen werden. Durch die kleinere Gitterkonstante des Aluminiumnitrid wird das darauf wachsende AlGa_N oder GaN leicht druckverspannt, was der Zugverspannung, die schon beim Wachstum und vor allen Dingen beim Abkühlen entsteht, entgegenwirkt. Somit kann man theoretisch ein fast verspannungsfreies Material erhalten. In der Praxis hat sich aber herausgestellt, dass dies nicht so einfach ist. Zudem hat GaN einen kleineren Piezokoeffizienten als AlN. Des Weiteren ist es kaum möglich, das AlN mit beispielsweise Scandium zu dotieren, was den Piezokoeffizienten wesentlich erhöhen würde.

[0005] Wesentlich für eine erfindungsgemässe Funktion der Spiralfeder ist eine Orientierung der piezoelektrischen Beschichtung mit der piezoelektrischen Achse senkrecht zur Oberfläche. Dies gelingt prinzipiell nur mit Verfahren die keine mit der Materialquelle in Verbindung stehende Vorzugsrichtung aufprägen, wie z. B. der MOCVD, nicht jedoch mit konventioneller DC- oder RF-Sputterdeposition. bei diesen Methoden ist beispielsweise die c-Achse von AlN immer senkrecht zur Sputterquelle hin ausgerichtet was man ausnutzen kann um durch schrägstellen der Probe eine schräge c-Achsenorientierung der gesputterten Schicht zu erzielen.

Darstellung der Erfindung

[0006] Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren für eine piezoelektrische Beschichtung einer Spiralfeder, die sich bei tiefen Temperaturen herstellen lässt und eine dementsprechend beschichtete Spiralfeder vorzuschlagen.

[0007] Eine andere Aufgabe ist es, die Spiralfeder bruch resistenter zu machen.

[0008] Erfindungsgemäss werden diese Probleme gelöst indem das AlN nicht mittels MOCVD aufgebracht wird, sondern mittels eines gepulsten Beschichtungsverfahrens basierend auf einem Target und einer gepulsten Anregungsquelle.

[0009] Dies hat unter anderem den Vorteil, dass die Beschichtung bei Raumtemperatur, oder zumindest bei einer Temperatur unter 80°C, erfolgen kann. Dadurch werden Spannungen an der Schnittstelle zwischen Substrat und Beschichtung vermieden, die durch unterschiedliche thermische Dilatationskoeffiziente sonst entstehen würden, wenn die Feder nach einer Hochtemperaturbeschichtung wieder erkaltet.

[0010] Dies hat auch den Vorteil, dass die Beschichtung viel homogener wird. Die Kristallstruktur der piezoelektrischen Schicht wird weniger unterbrochen, so dass eine höhere piezoelektrische Spannung erzeugt wird.

[0011] In einem Ausführungsbeispiel erfolgt die Beschichtung mittels Hochenergieimpulsmagnetronspattern (HiPIMS) (englisch high power impulse magnetron sputtering, HiPIMS, oder high power pulsed magnetron sputtering, HPPMS).

[0012] In einem Ausführungsbeispiel erfolgt die Beschichtung mittels einer gepulsten Laserdeposition.

[0013] In einem Ausführungsbeispiel erfolgt die Beschichtung mittels einer gepulsten Laserepitaxie.

[0014] Weitere vorteilhafte Ausführungsformen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Kurze Beschreibung der Figuren

[0015] Die Erfindung wird anhand der beigefügten Figur näher erläutert, wobei

Fig.1a Einen Querschnitt durch eine einzelne Windung der Spiralfeder zeigt.

Fig.1b Ein Detail aus dem Querschnitt durch eine einzelne Windung der Spiralfeder zeigt.

Wege zur Ausführung der Erfindung

[0016] Die Figuren 1a und 1b zeigen einen Querschnitt 200 durch eine einzelne Windung der Spiralfeder. Der Kern der Spiralfeder besteht aus einem Substrat 204 aus Silizium. Darauf ist eine amorphe Zwischenschicht 205 vorhanden, zum Beispiel aufgesputtert oder durch Oxydation realisiert. In einem Beispiel besteht die Schicht aus Siliziumoxid mit einer Dicke von beispielsweise 1000nm, angebracht beispielsweise durch oxidieren des Siliziumwafers nach dem Ätzen / Strukturieren der Spiralfeder 20. Die Dicke ist somit wesentlich höher als die Dicke der nativen SiO₂-Schicht.

[0017] Diese amorphe Schicht hat einerseits den Vorteil dass die Oberfläche der Spiralfeder geglättet wird, und andererseits eine Temperaturkompensation erreicht wird, so dass die Schwingfrequenz der Kombination Unruhe / Spiralfeder auch bei Temperaturänderungen im Wesentlichen stabil bleibt oder sich nur wenig ändert.

[0018] Auf diese Schicht amorphes Siliziumdioxid wird mittels Sputtering eine leitende Schicht als Innenelektrode 206 aufgebracht, beispielsweise eine Schicht Titan, mit einer Dicke von 10-50nm. Es kann aber auch ein anderes leitfähiges Material verwendet werden, beispielsweise Aluminium, oder aber auch eine leitfähige Schicht aus Titanidrid oder einem anderen geeigneten Material, beispielsweise Molybdän und allgemein ein leitfähiges Oxid, wie z.B. Indium-Zinn-Oxid, Al dotiertes ZnO oder ein leitfähiges Nitrid wie z. B. hoch Ge dotiertes GaN wie in DE 10 2015108 875 beschrieben. Wenn auf die Schicht Siliziumoxid 205 verzichtet wird, kann sogar der Kern der Spiralfeder aus Silizium als Innenelektrode verwendet werden, in diesem Falle muss nur elektrisch leitfähiges Silizium verwendet werden.

[0019] Auf die Innenelektrode 206 aus Titan wird eine piezoelektrisch aktive Schicht 207 aufgebracht, beispielsweise eine Schicht die mindestens 30% Aluminiumnitrid enthält. Die Schichtdicke ist vorzugsweise zwischen 500 und 3000 nm, zum Beispiel 1000nm. Noch besser ist die Verwendung von AluminiumScandiumNitrid, dieses hat gegenüber AlN 2-5x höhere Piezokoeffizienten. Auf die Schicht piezoelektrisch aktiven Materials wird abschliessend die Elektrode aufgebracht, beispielsweise 50-200nm aus Chrom / Nickel /Gold. Die Elektroden sind auf beiden vertikalen Seitenflanken der Spiralfeder angeordnet, auf der Ober- und Unterseite der Spiralfeder 20 sind keine Elektroden vorhanden. Dies kann schon während der Beschichtung so geschehen oder durch ein anschließende Prozessierung bei der die Beschichtung auf Ober- und gegebenenfalls auch der Unterseite entfernt wird.

[0020] Erfindungsgemäss erfolgt die Beschichtung mit einem gepulsten Beschichtungsverfahren, das mit einem Plasma vom Target zum Wafer arbeitet.

[0021] In einer Ausführung wird die piezoelektrische Beschichtung 207 aus AlN mittels Hochenergieimpulsmagnetronsputtern (englisch high power impulse magnetron sputtering, HiPIMS, oder high power pulsed magnetron sputtering, HPPMS) aufgebracht.

[0022] Alternativ erfolgt die Beschichtung mittels PLD (Pulsed Laser Deposition), oder mittels PLE (Pulsed Laser Epitaxie).

[0023] HiPIMS ist ein spezielles Magnetronsputterverfahren zur Abscheidung von Dünnschichten. HiPIMS verwendet sehr hohe Target-Leistungsdichten von einigen kW·cm⁻² in kurzen Pulsen von einigen zehn Mikrosekunden bei geringem Tastverhältnis (Ein-Aus-Verhältnis) von kleiner als 10 %. Ein charakterisierendes Merkmal des HiPIMS ist der hohe Ionisationsgrad des gesputterten Spendermaterials und die hohe Rate der molekularen Gasdissoziation. Da die Pulse bei HiPIMS nur für eine sehr kurze Zeit auf das Targetmaterial wirken und sich daran eine relativ lange „Aus-Zeit“ anschließt, ergeben sich niedrige durchschnittliche Kathodenleistungen (1-10 kW). So kann das Targetmaterial in den Aus-Zeiten abkühlen und eine bessere Prozessstabilität ist gegeben.

[0024] Mittels HiPIMS ist es also möglich AlN praktisch bei Raumtemperatur aufzubringen. Deshalb gibt es im Gegensatz zu MOCVD bei HiPIMS das Problem der thermischen Verspannung nicht oder kaum. Deswegen sind Spiralfedern, die mittels HiPIMS beschichtet worden sind, wesentlich stabiler als Spiralfedern, die mittels MOCVD beschichtet worden sind. Vorteilhaft gegenüber konventionellen Sputtermethoden ist zudem bei gepulsten Plasmaverfahren die deutlich verringerte Neigung der Ausrichtung der aufgetragenen Schicht in Bezug zur Quelle. Mit den gepulsten verfahren lassen sich z. B. einfacher AlN Schichten realisieren, die mit ihrer piezoelektrischen c-Achse senkrecht zur Oberfläche aufwachsen.

[0025] Ein weiterer Vorteil von HiPIMS ist, dass eine Dotierung des AlN 207 durch beispielsweise Scandium einfach zu realisieren ist, durch Co-Sputtern mit einem zweiten Target aus Scandium, das erste Target ist aus Aluminium. Es müssen also im Gegensatz zu MOCVD keine teuren und exotischen Präkursoren eingesetzt werden.

[0026] Ein weiterer Vorteil von HiPIMS ist, dass nur Stickstoff und Aluminium oder Scandium verwendet werden müssen für die Herstellung von AlN Schichten, im Gegensatz zur Herstellung von dünnen Schichten AlN mittels MOCVD und Trimethylaluminium C₃H₉Al, wo noch Ammoniak und Wasserstoff benötigt wird.

[0027] Es gibt aber auch die Möglichkeit mit Gasen das Wachstum der Schicht zu beeinflussen. So kann beispielweise durch Zugabe von Sauerstoff die Polarität der Schicht eingestellt werden. Es ist also sehr wichtig das beim HiPIMS Verfahren die Zusammensetzung der Gase im Reaktor sehr genau eingestellt und kontrolliert wird.

[0028] Ein weiterer Vorteil von HiPIMS ist die Möglichkeit, mehrere unterschiedliche Schichten aufeinander „stapeln“ zu können. So kann beispielsweise die Spiralfeder zuerst oxidiert werden, so dass auf der gesamten Oberfläche der Spiralfeder eine Schicht amorphes Siliziumdioxid vorhanden ist. Dies hat den Vorteil, dass eine mit Siliziumdioxid beschichtete Spiralfeder bei Temperaturänderungen die Frequenz kaum ändert, da sich die Variationen des Young-Moduls von Silizium und Siliziumdioxid gegenseitig mehr oder weniger kompensieren.

[0029] Mit HiPIMS kann direkt auf das Siliziumdioxid 205 mit AlN 207 beschichtet werden. Bei MOCVD ist dies nicht möglich, da bei den hohen Temperaturen das Aluminium mit dem Siliziumdioxid reagiert und die Schicht aus Siliziumdioxid angreift oder sogar ganz auflöst, was in einer schlechten Qualität des darauf gewachsenen AlN resultiert.

[0030] Beim Beschichten mit HiPIMS kann also auch eine Spiralfeder aus Silizium, deren Oberfläche oxidiert wurde, mit qualitativ hochwertigem AlN beschichtet werden, ohne dass das Siliziumdioxid 205 während des Beschichtungsprozesses angegriffen wird. Idealerweise wird auf das Siliziumdioxid 205 zuerst eine dünne Schicht 206 von beispielsweise 10-50nm Titan aufgebracht, es kann aber auch zuerst eine dünne Schicht von 10-50nm reinem Aluminium aufgesputtert oder einem anderen geeigneten leitfähigem Material aufgebracht werden. Diese Schicht 206 aus elektrisch leitfähigem Material dient als Innenelektrode. Auf diese dünne leitfähige Schicht 206 wird dann eine 1-3µm dicke Schicht 207 aus AlN gesputtert. Die piezoelektrischen Eigenschaften des Aluminiumnitrids AlN können noch verbessert werden, wenn während dem Sputtern Scandium beigemischt wird, beispielsweise durch Co-Sputtern von Scandium. Auf diese Weise kann eine 1-3µm dicke Schicht 207 von Aluminiumscandiumnitrid $AxSc_{1-x}N$ realisiert werden.

[0031] Eine weitere Möglichkeit besteht darin einen Gradienten zu wachsen, d.h. zuerst nur AlN zu Sputtern, und dann im weiteren Verlauf des Beschichtungsprozesses ein Co-Sputtern mit Scandium oder Gallium zu machen und den Scandium- oder Gallium- Gehalt laufend erhöhen. Dadurch wächst das Material druckverspannt auf, da $Al(x)Ga(1-x)N$ oder $Al(x)Sc(1-x)N$ eine grössere Gitterkonstante aufweist als AlN. Dies kann hilfreich sein, wenn für die Erhöhung der Qualität der Beschichtung die Temperatur in der Beschichtungskammer erhöht werden muss. Dann könnte es wieder zu Zugverspannungen kommen nach dem Abkühlen der Beschichtung auf Raumtemperatur, da die Ausdehnungskoeffizienten von Si und AlN nicht gleich gross sind. Durch angepasste Gradienten wird solch eine Verspannung verhindert.

[0032] Das mittels HiPIMS aufgesputterte AlN oder $AxSc_{1-x}N$ 207 hat eine kristalline Struktur, vorzugsweise ist das Wachstum c-Achsen orientiert, d.h. die Orientierung der gewachsenen Kristalle ist senkrecht zur Oberfläche, auf die das AlN aufwächst. Da die Oberfläche der Spiralfeder gekrümmt ist kann das AlN oder $AxSc_{1-x}N$ nicht als Monokristall gewachsen werden, sondern es entsteht kolumnares polykristallines AlN. Bei polykristallinen Materialien kann es aber an den Grenzen der Kristallite bei mechanischen Belastungen zu Rissen kommen. Dieses Risiko wird erfindungsgemäss reduziert indem auf die 1-3µm dicke Schicht aus AlN oder $AxSc_{1-x}N$ durch einen Sputterprozess oder vorzugsweise mittels Atomic Layer Deposition ALD eine 10-100nm dicke Schicht aus amorphem Siliziumnitrid oder einem ähnlichen geeigneten Material aufgebracht wird. Dies hat einerseits den Vorteil, dass das AlN oder $AxSc_{1-x}N$ gegen Umwelteinflüsse gut geschützt ist, und dass die Spiralfeder wesentlich bruchfester wird, da durch das amorphe Siliziumnitrid Spannungsspitzen im AlN reduziert oder gar ganz eliminiert werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass beim anschließenden Beschichten der Spiralfeder mit Elektroden mittels Sputtering keine Metallatome entlang der Korngrenzen des AlN in das AlN eindringen und die elektrischen Eigenschaften der Spiralfeder verschlechtern können.

[0033] Ein weiterer Vorteil von der Beschichtung der Spiralfedern mittels HiPIMS ist die Möglichkeit alle benötigten Schichten in demselben Arbeitsgang aufzubringen. So kann zuerst auf das Silizium eine amorphe Schicht aus beispielsweise Siliziumnitrid aufgebracht werden, anschliessend wird die Innenelektrode aufgebracht. Es kann aber auch möglich auf die Innenelektrode zu verzichten, wenn die amorphe Zwischenschicht nur sehr dünn ist, und das hochdotierte und somit leitfähig Silizium der Spiralfeder als Innenelektrode zu verwenden.

[0034] Auf die amorphe Zwischenschicht wird dann eine Seedschicht aus beispielsweise AlN aufgebracht, und danach wird die piezoelektrisch aktive Schicht aus AlN und $AxSc_{1-x}N$ aufgebracht. Nach dem Aufbringen der AlN / $AxSc_{1-x}N$ Schicht, die beispielsweise eine Gesamtschichtdicke von 2µm aufweist, werden anschliessend in demselben Prozess auch noch die Elektroden aufgesputtert, beispielsweise mit einer Haftschiicht aus Titan und einer leitfähigen Schicht aus Gold. So können alle funktionellen Schichten die notwendig sind in demselben Prozess aufgebracht werden. Es ist dann nur noch notwendig nach dem Beschichtungsprozess die leitfähige Schicht auf der Ober- und Unterseite des Wafers mittels eines geeigneten Verfahrens zu entfernen, vorzugsweise durch Ätzen. Dadurch wird diese Schicht in zwei Teile geteilt, die als Elektroden verwendet werden.

[0035] Um eine möglichst uniforme Schichtdicke zu erreichen wird der Wafer idealerweise während dem Beschichtungsprozess um mindestens eine Achse gedreht. Besser ist es den Wafer um 2 Achsen zu drehen. Dies kann beispielsweise so gemacht werden indem der Wafer im Reaktor vertikal gestellt wird. Als erstes wird jetzt der Wafer um die Horizontale Achse gedreht, so wie sich ein Rad um die eigene Achse dreht. Zusätzlich dazu wird der Wafer auch noch um eine vertikale Achse gedreht. So kann sichergestellt werden, dass die Gravitation nur einen minimalen Einfluss auf die Geometrie der im Wafer beweglichen Spiralfedern hat, da sich die Verformungen in Folge der Gravitation während einer Umdrehung um die horizontale Achse im Durchschnitt wieder aufheben.

[0036] Normalerweise ist Sputtern ein gerichteter Vorgang. Dies kann dazu führen, dass die Schicht in der Richtung aufwächst, aus der das Sputtern erfolgt. AlN wächst normalerweise immer senkrecht zur Oberfläche auf. Beim normalen

Sputtern kann es aber durch den gerichteten Sputterprozess dazu führen, dass die Kristalle nicht senkrecht (also C-Achsen Orientierung) zur Oberfläche des Wafers aufwachsen, sondern schräg zur Oberfläche.

[0037] Das Drehen des Wafers um mindestens eine Achse hat auch den Vorteil, dass das Sputtern im Durchschnitt nicht mehr ein gerichteter Vorgang ist. Das Beschichten erfolgt aus allen möglichen Richtungen. Wenn beispielsweise die Targets vertikal angeordnet sind, und das Sputtern horizontal gerichtet erfolgt ist es sinnvoll den Wafer, um mindestens die vertikale Achse zu drehen. Das führt dann dazu, dass der Wafer mit Atomen aus allen möglichen Richtungen beschossen wird, und nicht nur aus einer Richtung. Wenn der Wafer dann zugleich mit der Drehung um die vertikale Achse auch noch um eine horizontale Achse gedreht wird, kann sichergestellt werden, dass im Mittel die Schicht uniform aufwächst und die Orientierung der Kristalle nicht gestört wird.

[0038] Um einer möglichen Verformung der Spiralfedern bei der Beschichtung durch die Auswirkungen der Gravitation entgegenzuwirken, wird der Wafer ein oder mehrere Male während des Herstellungsprozesses in eine andere Position gebracht. Somit sollten sich die Auswirkungen der Gravitation während des Beschichtungsprozesses verringern oder ganz ausschließen lassen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Beschichtung einer Spiralfeder, mit folgenden Schritten:
ein Substrat (204) wird zur Verfügung gestellt;
eine piezoelektrische Beschichtung (207) wird auf diesem Substrat aufgebracht;
dadurch gekennzeichnet, dass
 - die benannte piezoelektrische Beschichtung (207) eine kristalline Struktur hat, in welcher die Orientierung der gewachsenen Kristalle im Wesentlichen senkrecht zur Oberfläche ist und dass
 - die benannte Beschichtung mittels eines gepulsten Beschichtungsverfahrens basierend auf einem Target und einer gepulsten Anregungsquelle aufgebracht wird.
2. Verfahren gemäss Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die benannte Beschichtung mittels Hochenergieimpulsmagnetronspultern (HiPIMS) aufgebracht wird.
3. Verfahren gemäss Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die benannte Beschichtung mittels einer gepulsten Laserdeposition aufgebracht wird.
4. Verfahren gemäss Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die benannte Beschichtung mittels einer gepulsten Laserepitaxie aufgebracht wird.
5. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 4, in welchem die benannte piezoelektrische Beschichtung (207) aus einer oder mehrerer unterschiedlicher Schichten besteht.
6. Verfahren gemäss Anspruch 5, in welchem mindestens eine Schicht, die mindestens 30 % Aluminiumnitrid oder mindestens 30% AluminiumScandiumNitrid enthält, umfasst.
7. Verfahren gemäss Anspruch 6, in welchem die piezoelektrischen Eigenschaften einer Aluminiumnitrid-Schicht (207) verbessert werden, indem während dem Sputtern Scandium beigemischt wird.
8. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 7, in welche die Dicke der benannten piezoelektrische Beschichtung (207) zwischen 1 und 3 µm beträgt.
9. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 8, in welchem das benannte Substrat (204) Silizium umfasst.
10. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 9, in welchem eine amorphe Zwischenschicht, zum Beispiel eine Siliziumdioxidschicht (205), auf dem benannten Substrat (204) vorhanden ist.
11. Verfahren gemäss Anspruch 10, in welchem eine leitende Schicht, zum Beispiel eine Schicht von beispielsweise 10-50nm Titan oder Aluminium (206), auf die amorphe Zwischenschicht (205) aufgebracht wird.
12. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 11, in welchem eine 10-100nm dicke Schicht aus amorphem Material auf der benannten piezoelektrischen Schicht (207) mittels Atomic Layer Deposition (ALD) aufgebracht wird.
13. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 12, in welchem zwei Elektroden (208) auf der piezoelektrischen Schicht (207) durch Sputtering einer leitenden Schicht und anschliessende Trennung dieser Schicht in zwei Elektroden angebracht werden.
14. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 13, in welchem das benannte Substrat während der Beschichtung um zwei Achsen gedreht wird.
15. Spiralfeder, die mit dem Verfahren eines der Ansprüche 1 bis 14 hergestellt wurde.
16. Regelorgan mit einer Unruhe, einer Spiralfeder aus piezoelektrischem Material, die mit dem Verfahren eines der Ansprüche 1 bis 14 hergestellt wurde, und einer den Gang der Unruhe regelnden Elektronik.

FIG 1a

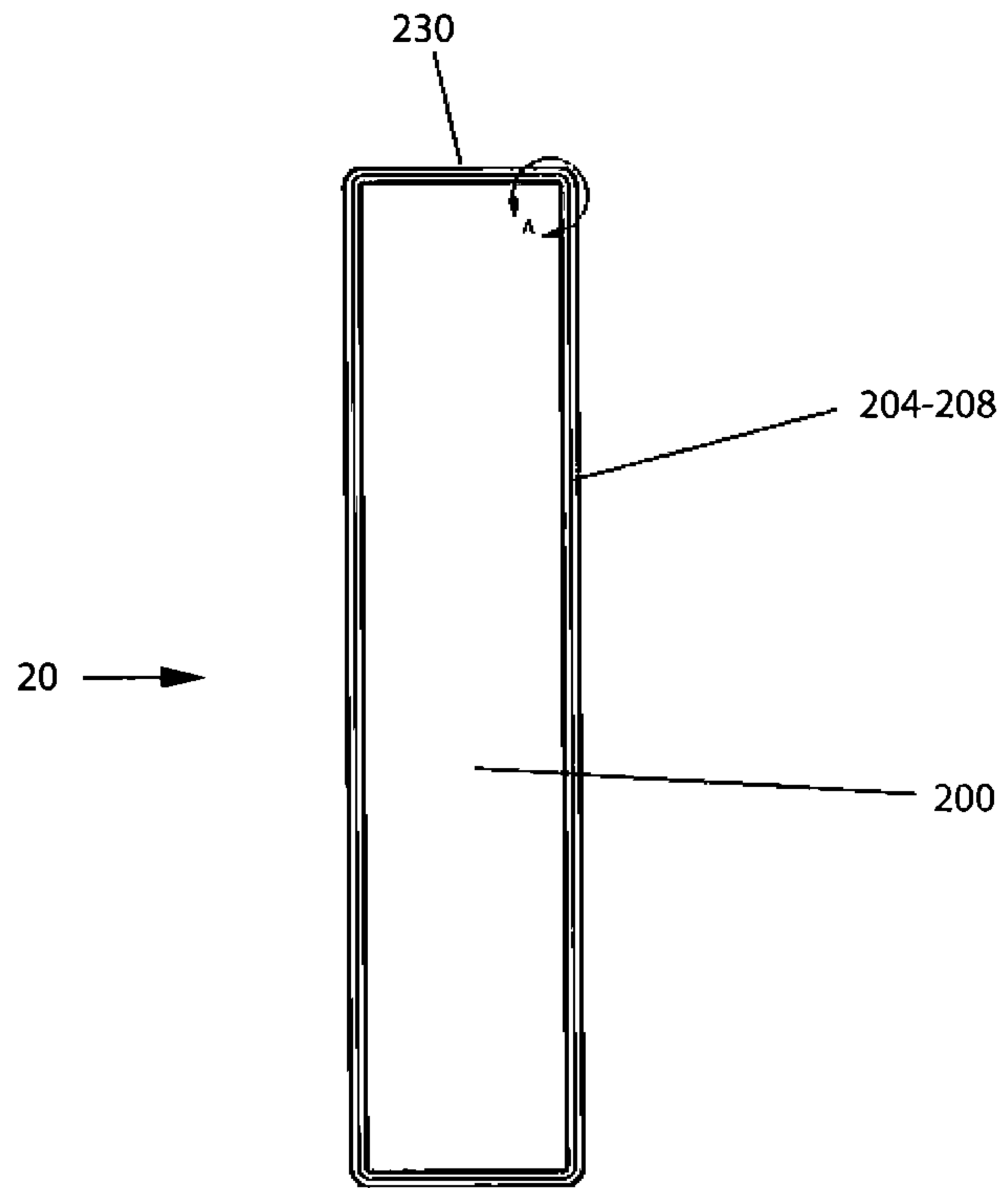


FIG 1b

