

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 715 946 B1

(51) Int. Cl.: G04B 17/06 (2006.01)
H01L 41/25 (2013.01)
H01L 41/08 (2006.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinerischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 000246/2020

(22) Anmeldedatum: 02.03.2020

(43) Anmeldung veröffentlicht: 15.09.2020

(30) Priorität: 05.03.2019 CH 00262/19

(24) Patent erteilt: 15.02.2024

(45) Patentschrift veröffentlicht: 15.02.2024

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

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

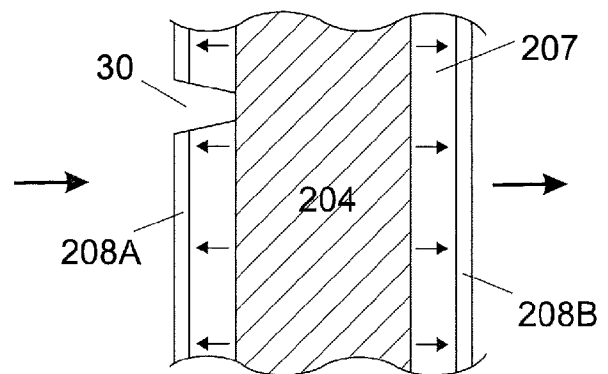
(74) Vertreter:
P&TS SA, Av. J.-J. Rousseau 4 P.O. Box 2848
2001 Neuchâtel (CH)

(54) **Verfahren zur Herstellung einer piezoelektrischen Spiralfeder und piezoelektrische Spiralfeder.**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer piezoelektrischen Spiralfeder mit folgenden Schritten:

Auftragen einer piezoelektrischen Beschichtung (207) auf einen, aus einem Substrat aus Silizium bestehenden Kern (204) der Spiralfeder mittels Hochenergieimpulsmagnetronspütern, wobei eine Aussenelektrode (208) auf die aufgetragene piezoelektrische Beschichtung (207) aufgebracht wird, und dass die piezoelektrische Beschichtung (207) durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der aufgetragenen Aussenelektrode (208) und dem Kern (204) oder zwischen der aufgetragenen Aussenelektrode (208) und einer zwischen dem Kern (204) und der aufgetragenen piezoelektrischen Beschichtung (207) aufgetragenen Innenelektrode (206) nachträglich polarisiert wird.

Ferner betrifft die Erfindung eine piezoelektrische Spiralfeder sowie die Verwendung des Kerns der piezoelektrischen Spiralfeder als Elektrode zur Erzeugung von elektrischer Energie während des Betriebs der Spiralfeder.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung einer piezoelektrischen Spiralfeder mit einem Substrat und einer piezoelektrischen Beschichtung. Die Erfindung bezieht sich ferner auf die piezoelektrische Spiralfeder selbst und die Verwendung des Kerns der piezoelektrischen Spiralfeder als Elektrode zur Erzeugung von elektrischer Energie.

[0002] Eine solche Feder kann beispielsweise als Spiralfeder in einer mechanischen Uhr verwendet werden, in welcher eine elektronische Schaltung den Gang der Uhr durch Kontrolle der Steifigkeit der Spiralfeder regelt.

Stand der Technik

[0003] 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.

[0004] 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 anschließend 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.

[0005] Diese mechanischen Spannungen können teilweise reduziert werden, indem Zwischenschichten aus Aluminiumnitrid abwechselnd mit Schichten aus AlGaIn oder GaN gewachsen werden. Durch die kleinere Gitterkonstante des Aluminiumnitrid wird das darauf wachsende AlGaIn 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, dass AlN mit beispielsweise Scandium zu dotieren, was den Piezokoeffizienten wesentlich erhöhen würde.

[0006] In der Anmeldung CH20160000791 ist ein Verfahren beschrieben bei dem die piezoelektrische Beschichtung mittels Hochenergieimpulsmagnetronsputtern (englisch high power impulse magnetron sputtering, HiPIMS, oder high power pulsed magnetron sputtering, HPPMS) aufgebracht werden. In derselben Patentanmeldung ist auch beschrieben, dass das Aluminiumnitrid mit Scandium dotiert werden kann. Dies kann durch Co-Sputtern mit einem zweiten Target aus Scandium realisiert werden, das erste Target ist aus Aluminium.

[0007] Sputtern von AlN mit HiPIMS funktioniert gut, die Spiralfedern sind nach dem Beschichten mit der piezoelektrischen Schicht viel stabiler als die mittels MOCVD beschichteten Spiralfedern. Allerdings gibt es Probleme mit dem Wirkungsgrad und der Polarisierung der Kristalle. Des Weiteren kann die induzierte Spannung der Spiralfeder so hoch werden, dass es zu einem Kurzschluss durch einen Durchschlag kommen kann, da die Durchschlagsfestigkeit überschritten wird.

Darstellung der Erfindung

[0008] Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren zur Herstellung einer piezoelektrischen Spiralfeder vorzuschlagen, bei der die piezoelektrische Beschichtung eine bessere Orientierung der Kristalle aufweist.

[0009] Eine andere Aufgabe ist es den Wirkungsgrad zu erhöhen so dass die Piezospiralfeder eine möglichst hohe elektrische Leistung abgibt.

[0010] Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, die Durchschlagsfestigkeit der Piezospiralfeder zu erhöhen, um so einen grösseren Abstand zwischen der Durchschlagsfestigkeit und der maximalen induzierten Spannung zu erzielen.

[0011] Erfindungsgemäss werden diese Probleme gelöst indem das Aluminium-Scandium-Nitrid $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ mittels Hochenergieimpulsmagnetronsputtern (englisch high power impulse magnetron sputtering, HiPIMS, oder high power pulsed magnetron sputtering, HPPMS) beschichtet wird, und dass die Beschichtung aus $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ nachträglich noch polarisiert wird.

[0012] Es kann nicht nur AluminiumNitrid $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x$ mit Scandium dotiert werden, es ist auch möglich GalliumNitrid oder IndiumNitrid mit Scandium zu dotieren. Die entsprechenden Materialien sind dann $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x$, $\text{Ga}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ und $\text{In}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$. Es ist aber auch möglich Aluminium-Gallium-Nitrid mit Scandium zu dotieren. Nachfolgend wird der Einfachheit halber die Erfindung mit $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x$ beschrieben.

[0013] Weitere vorteilhafte Ausführungsformen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Kurze Beschreibung der Figuren

[0014] Die Erfindung wird anhand der beigegeführten Figur näher erläutert, wobei

- Fig. 1a** Einen Querschnitt durch eine einzelne Windung der Spiralfeder zeigt.
- Fig. 1b** Ein Detail aus dem Querschnitt der Figur 1a.
- Fig. 2a** Einen Längsschnitt durch einen Abschnitt der Spiralfeder nach Sputtering der Elektroden und nach dem Bruch der ersten Sollbruchstellen 3 gemäss einer ersten Variante eines Herstellungsverfahrens.
- Fig. 2b** Einen Längsschnitt durch einen Abschnitt der Spiralfeder nach dem Polarisierungsvorgangs gemäss der ersten Variante eines Herstellungsverfahrens.
- Fig. 3a** Einen Längsschnitt durch einen Abschnitt der Spiralfeder nach Sputtering der Elektroden und nach dem Bruch der ersten Sollbruchstellen 3 gemäss einer zweiten Variante eines Herstellungsverfahrens.
- Fig. 3b** Einen Längsschnitt durch einen Abschnitt der Spiralfeder nach dem Polarisierungsvorgangs gemäss der zweiten Variante eines Herstellungsverfahrens.
- Fig. 4** Eine Spiralfeder, aus welcher keine Sollbruchstelle noch gebrochen wurde und die noch mit dem Wafer verbunden ist.
- Fig. 5** Eine Spiralfeder, aus welcher nur gewisse Sollbruchstellen gebrochen wurden, damit die Innenelektrode kontaktiert werden kann, wobei die Spiralfeder noch mit dem Wafer verbunden ist.
- Fig. 6** Eine Spiralfeder, aus welcher alle Sollbruchstellen gebrochen wurden, und die noch aus dem Wafer entfernt worden ist, so dass die Aussenelektrode in zwei Teilen geteilt ist.

Wege zur Ausführung der Erfindung

[0015] Die Figuren 1a und 1b zeigen einen Querschnitt durch eine einzelne Windung einer Spiralfeder 20. Der Kern der Spiralfeder besteht aus einem Substrat 204 aus Silizium. Darauf ist eine Schicht 205 aus Siliziumdioxid mit einer Dicke von beispielsweise 100nm angebracht, beispielsweise durch oxidieren des Siliziumwafers nach dem Ätzen / Strukturieren der Spiralfeder 20. Dies hat einerseits den Vorteil, dass die Oberfläche der Spiralfeder geglättet wird, und andererseits eine Temperaturkompensation mindestens teilweise erreicht wird, so dass die Schwingfrequenz der Kombination Unruhe / Spiralfeder auch bei Temperaturänderungen im Wesentlichen stabil bleibt oder sich nur wenig ändert. Zudem wird durch diese Schicht amorphes Material das Kristallwachstum von $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ vom darunterliegenden Silizium kristallographisch entkoppelt.

[0016] Auf diese Schicht amorphes Siliziumdioxid wird mittels Kathodenzerstäubung (auch Sputtering oder Sputtern genannt) eine Innenelektrode 206 aufgebracht, beispielsweise eine Schicht Titan oder Molybdän, mit einer Dicke von beispielsweise 10-50nm. Es kann aber auch ein anderes leitfähiges Material verwendet werden. Wenn auf die Schicht Siliziumdioxid 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. Wenn die Schicht Siliziumdioxid 205 dünn ist, beispielsweise ein paar wenige Nanometer, und der Kern der Spiralfeder aus leitfähigem Silizium besteht, wird auch keine zusätzliche Innenelektrode benötigt, in diesem Falle dient der Kern aus leitfähigem Silizium als Innenelektrode.

[0017] Auf die Innenelektrode 206 aus Titan oder Molybdän wird eine piezoelektrisch aktive Schicht 207 aufgebracht, beispielsweise AluminiumScandiumNitrid $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ mit einer Schichtdicke von 1000nm. Vorteilhafterweise wird ein Anteil x von 0.27-0.43 Scandium verwendet. Ein solches AluminiumScandiumNitrid hat gegenüber AlN 2-5x höhere Piezoeffizienten. Auf die Schicht piezoelektrisch aktiven Materials wird abschliessend eine Aussenelektrode 208 aufgebracht, beispielsweise 50-200nm aus Chrom / Nickel / Gold. Die Aussenelektroden 208 sind auch beiden Seitenflanken der Spiralfeder angeordnet, auf der Ober- und Unterseite der Spiralfeder 20 sind vorzugsweise keine Elektroden vorhanden.

[0018] Die piezoelektrische Beschichtung 207 aus $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ wird mittels Hochenergieimpulsmagnetronspütern (englisch high power impulse magnetron sputtering, HiPIMS, oder high power pulsed magnetron sputtering, HPPMS) aufgebracht.

[0019] HiPIMS ist ein spezielles Magnetronspüternverfahren zur Abscheidung von Dünnschichten. HiPIMS verwendet sehr hohe Target-Leistungsdichten von einigen $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 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.

[0020] Mittels HiPIMS ist es also möglich $\text{Al}(1-x)\text{Sc}(x)\text{N}$ 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.

[0021] Ein weiterer Vorteil von HiPIMS ist, dass der Scandiumgehalt im $\text{Al}(1-x)\text{Sc}(x)\text{N}$ durch verwenden von Co-Sputtern einfach eingestellt werden kann: Das eine Target besteht aus Aluminium, das andere Target aus Scandium. Je nachdem mit wieviel Leistung die einzelnen Targets betrieben werden wird auch dementsprechend Material von diesem Target gesputtert.

[0022] Es ist aber auch möglich ein Target mit einer Legierung aus Aluminium und Scandium zu verwenden, beispielsweise ein Target mit 27% Scandium und 73% Aluminium. Dies ergibt dann ein $\text{Al}_{0.73}\text{Sc}_{0.27}\text{N}$.

[0023] 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 Elastizitätsmoduls von Silizium und Siliziumdioxid gegenseitig mehr oder weniger kompensieren. Ein weiterer Vorteil dieser Schicht Siliziumdioxid ist dass das Siliziumdioxid amorph ist, und somit eine kristallographische Entkoppelung stattfindet zwischen dem Silizium und dem $\text{Al}(1-x)\text{Sc}(x)\text{N}$, die beide eine Kristallstruktur aufweisen.

[0024] Mit HiPIMS kann direkt auf das Siliziumdioxid 205 mit $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ 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 oder $\text{Al}(1-x)\text{Sc}(x)\text{N}$ resultiert.

[0025] Beim Beschichten mit HiPIMS kann also auch eine Spiralfeder 20 aus Silizium, deren Oberfläche oxidiert wurde, mit qualitativ hochwertigem $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ 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 oder Molybdän aufgebracht, es kann aber auch zuerst eine dünne Schicht von 10-50nm reinem Aluminium aufgesputtert werden. Diese Schicht 206 aus elektrisch leitfähigem Material dient als Innenelektrode. Auf diese dünne leitfähige Schicht 206 wird dann zuerst eine Seedschicht von vorzugsweise AlN von beispielsweise 50-100nm gesputtert, und darauf eine 0.5-3µm dicke Schicht 207 aus $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ gesputtert.

[0026] Das mittels HiPIMS aufgesputterte $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ 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. Die Orientierung der gewachsenen Kristalle ist senkrecht zu einer Oberfläche, auf der die piezoelektrische Beschichtung 207 aufwächst.

[0027] Da die Oberfläche der Spiralfeder 20 gekrümmt ist kann das $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ nicht als Monokristall gewachsen werden, sondern es entsteht kolumnares polykristallines $\text{Al}(1-x)\text{Sc}(x)\text{N}$. Eine andere kolumnare polykristalline Struktur kann verwendet werden. Ein Problem ist aber dass $\text{Al}(1-x)\text{Sc}(x)\text{N}$ Stickstoff-polar oder Aluminium/Scandium-polar aufwachsen kann. Wenn nun 50% der Kristalle die eine Polarität aufweisen und 50% der Kristalle die andere Polarität aufweisen heben sich die induzierten Spannungen gegenseitig auf. Die Polarisierung kann während dem Sputterprozess nur schwer kontrolliert werden, und es muss immer damit gerechnet werden, dass nach dem Sputtern ein wesentlicher Anteil der Kristalle nicht die richtige Polarität hat.

[0028] Die piezoelektrische Beschichtung 207 erfolgt vorzugsweise auf mindestens zwei Seiten des Kerns 204. Der Kern wird vorzugsweise überall und auf allen Seiten mit dem Piezomaterial $\text{Al}(1-x)\text{Sc}(x)\text{N}$ und mit der Aussenelektrode beschichtet. Nachträglich wird vorzugsweise das Material für die Aussenelektrode 208 von der oberen und unteren Seite mit einem geeigneten Verfahren entfernt.

[0029] Diese Situation wird schematisch auf dem vereinfachten Längsschnitt der Figuren 2a und 3a dargestellt, in welchen der Kern 204, die piezoelektrische Schicht 207 und die Aussenelektroden 208 dargestellt sind. Die Verhältnisse zwischen der verschiedenen Schichten 204, 207, 208 wurden geändert, damit die Figuren besser verständlich sind. Zum Beispiel wird die Schicht 207, aber auch die Schicht 208, stark vergrößert dargestellt.

[0030] Es können vorzugsweise auch die oben beschriebenen Schichten 205 und 206 in allen Ausführungsformen der Figuren 2a bis 3b verwendet werden.

[0031] Auf den Figuren zeigen die Pfeile in der Schicht 207 die Richtung und der Sinn der Polarisierung.

[0032] Die Figur 2a und die Figur 3a zeigen einen Längsschnitt eines Abschnitts der Spiralfeder, von oben gesehen, gleich nach dem Sputtern. Wie die Pfeile zeigen, weist ein Teil der piezoelektrischen Kristalle eine erste Polarität auf, zum Beispiel nach aussen gerichtet, während die anderen Kristalle die andere Polarität aufweisen, zum Beispiel nach innen gerichtet, so dass die induzierten Spannungen sich teilweise aufheben.

[0033] Dieses Problem ist so gelöst indem die Schicht aus $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ nach dem Sputtern und nach dem Aufbringen der Elektroden nachträglich polarisiert wird, so dass alle Kristalle die gleiche Polarität aufweisen, wie auf Figure 2b dargestellt.

[0034] Diese Polarisierung wird dadurch erreicht, dass eine hohe Spannung zwischen dem elektrisch leitenden Kern 204 (oder der Innenelektrode 206, falls vorhanden) und der Aussenelektrode 208 während einer kurzen Zeit aufgebracht wird.

[0035] Zum Polarisieren der Schicht kann das Silizium 204, auf welches das $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ gesputtert worden ist, als Innenelektrode verwendet werden. Bedingung dafür ist, dass das Silizium elektrisch gut leitet. Dies kann realisiert werden, indem für die Spiralfeder hoch dotiertes Silizium verwendet wird. Als Innenelektrode kann aber auch eine dünne Schicht 206 aus elektrisch leitfähigem Material verwendet werden, welches vor dem Aufbringen der Schicht aus $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ aufgebracht wird. Beispielsweise könnte die dünne Schicht Titan oder Molybdän die weiter oben beschrieben ist als Innenelektrode verwendet werden. Der Nachteil ist allerdings, dass die Innenelektrode schwierig zu kontaktieren ist.

[0036] Es wurde beobachtet, dass sich bei einem Anteil x vom Scandium im $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ von $x=27\%$ bis $x=43\%$ $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ nachträglich polarisieren lässt. Je höher der Scandiumgehalt, desto tiefer ist die Spannung zwischen den Elektroden 204 und 208 (oder 206 und 208), die benötigt wird um das $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ zu polarisieren. Bei $x=27\%$ muss mit ca. 4.5MV/cm polarisiert werden, bei $x=43\%$ mit ca. 2MV/cm.

[0037] Ein weiterer Vorteil eines hohen Scandiumgehalts ist, dass der Koppelungsfaktor höher wird; je höher der Scandiumgehalt ist, desto mehr elektrische Energie kann mit der aufgetragenen Schicht erzeugt werden. Mit steigendem Anteil vom Scandium steigt auch die Dielektrizitätskonstante vom $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$. Dies ist hilfreich, um die induzierte Spannung zu reduzieren, bildet doch die Schicht $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ zusammen mit den Elektroden einen Kondensator. Je höher die Dielektrizitätskonstante des Isolators ist, desto tiefer ist die Spannung bei gleichbleibender im Kondensator gespeicherter Energiemenge.

[0038] Mit zunehmendem Scandiumgehalt sinkt aber auch der Qualitätsfaktor.

[0039] Einfacher ist es, wenn das elektrisch leitfähige Silizium 204 als Innenelektrode für die Polarisierung verwendet wird. Dies kann beispielsweise realisiert werden, indem kleine Sollbruchstellen 3 an der Spiralrolle in das Design der Spiralfeder integriert werden. Nach dem Aufbringen der piezoelektrischen Beschichtung 207, die ja hochisolierend ist, können diese Sollbruchstellen 3 abgebrochen werden, so dass das blanke Silizium 204 an der Bruchstelle zum Vorschein kommt. An dieser Bruchstelle kann dann mit einem elektrisch leitfähigen Stift aus Metall das Silizium 204 kontaktiert werden und als Innenelektrode für die Polarisierung, und/oder später für die Regelung des Gangs, verwendet werden. Falls das Silizium des Kerns 204 später als Innenelektrode für die Regelung des Gangs verwendet werden muss, kann es auch am besten an dem äusseren Ende der Spiralfeder kontaktiert werden. Als zweite Elektrode, die für die Polarisierung notwendig ist, können die beiden Aussenelektroden 208 verwendet werden. Diese können direkt mit einem leitfähigen Material kontaktiert werden.

[0040] Das Polarisieren der piezoelektrischen Schicht 207 kann erfolgen, wenn die Spiralfeder 20 noch nicht aus dem Wafer 4 entfernt worden ist, wie auf der Figur 4 dargestellt. Es werden dann nur gewisse Sollbruchstellen 3 an der Spiralrolle herausgebrochen, damit die Innenelektrode 204 aus elektrisch leitfähigem Silizium kontaktiert werden kann. Die resultierende Situation wird auf der Figur 5 (entsprechend Figuren 2b und 3a) dargestellt; auf dieser Figur zeigen die Bezugszeichen 30 die Bereiche, aus welchen Sollbruchstellen 3 entfernt wurden, so dass die äusseren Schichten 205 bis 208 nicht mehr vorhanden sind und der Kern 204 als Innenelektrode zugänglich ist.

[0041] Auf dieser Figur ist die äussere Metallisierung 208 nur aus den Bereichen 30 entfernt; diese Bereiche befinden sich in der dargestellten Ausführungsform alle im inneren Loch in der Virole 28 der Spiralfeder 20. Die äussere Elektrode 208 auf beiden Seitenflanken der Windungen der Spiralfeder 20 wird jedoch noch nicht unterbrochen.

[0042] In diesem Stadium genügt es, eine genügend hohe Spannung zwischen den Kontaktstellen 30 innen an der Spiralrolle 20 (leitfähiges Silizium, Innenelektrode 204) und an irgendeiner Stelle der Aussenelektrode 208 anzulegen um die piezoelektrische Beschichtung zu polarisieren, wie auf der Figure 2b schematisch dargestellt.

[0043] Erfindungsgemäss kann aber auch eine andere Methode gewählt werden, um die Innenelektrode 204 an den gewünschten Stellen zugänglich zu machen. Beispielsweise können die äusseren Schichten 205-208 mit einem geeigneten Laser entfernt werden, damit der innere Kern als Innenelektrode 204 kontaktiert werden kann.

[0044] Nach dieser Polarisierung werden zweite Sollbruchstellen 5 entfernt, damit die leitfähige Aussenelektrode 208 an der inneren Seitenflanke der Windungen von der leitfähigen Aussenelektrode 208 an der äusseren Seitenflanke der Windungen galvanisch getrennt wird. Dies kann gemäss Figuren 5 und 6 erfolgen, indem eine Sollbruchstelle 5 an der äusseren Seite der Virole entfernt wird, und eine andere zweite Sollbruchstelle 5 an dem Aussenende der Spiralfeder 20 durch Entfernen der Spiralfeder 20 aus dem Wafer 4 gebrochen wird. Dadurch entsteht wie auf der Figur 6 dargestellt eine piezoelektrisch geregelte Spiralfeder mit einer ersten Elektrode 208A an der inneren Seite der Windungen und einer zweiten Elektrode 208B an der äusseren Seite der Windungen; zwischen diesen beiden Elektroden entsteht durch die Verformung des piezoelektrischen Materials während dem Betrieb der Uhr eine Spannung, mit welcher eine elektronische Schaltung gespeist werden kann und die geregelt werden kann, um die Steifigkeit der piezoelektrischen Schicht und somit den Gang des Regelorgans zu steuern.

[0045] In dieser Variante erfolgt somit die Polarisierung der piezoelektrischen Schicht 207 mit einer Spannung zwischen dem Silizium Kern 204 (oder der Schicht 206) als Innenelektrode und der noch nicht unterbrochenen Aussenelektrode 208. Beim Betrieb wird die Innelektrode 204 oder 206 nicht verwendet, und es wird die Spannung zwischen dem Teil 208A und dem Teil 208B der Aussenelektrode 208 verwendet. Dadurch wird das unumgängliche Kontaktieren des Kerns 204 oder der Schicht 206 nur temporär für die einmalige Polarisierung benötigt.

[0046] Als Variante ist es aber auch möglich, die Polarisierung der piezoelektrischen Schicht 207 nach der Trennung der äusseren Elektrode 208 in zwei Teilen durchzuführen, beispielsweise indem eine Spannung zwischen der Elektrode 208A an der inneren Seitenflanke der Spiralfeder und der Elektrode 208B an der äusseren Seitenflanke der Spiralfeder angebracht wird, wie in den Figuren 3A und 3B dargestellt. Beim Betrieb wird dann die Spannung zwischen dem Kern 204 (oder der Schicht 206) und der Elektrode 208A der Spannung zwischen dem Kern 204 (oder der Schicht 206) und der Elektrode 208B hinzugefügt.

[0047] Mit dem Polarisieren der Schicht aus $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ nach dem Sputtern lässt sich die von der Piezospiralfeder gelieferte Energie deutlich steigern.

[0048] Ein Problem dabei ist aber, dass die Spannungen so hoch werden können, dass die Durchschlagsfestigkeit nicht ausreicht und es während der Polarisierung zu einem elektrischen Durchschlag kommt, weil die angelegte Spannung höher ist als die Durchschlagsspannung. Dies kann verhindert werden, indem die Polarisierung in einem Medium durchgeführt wird, welches eine deutlich höhere Durchschlagsspannung aufweist als Luft, beispielsweise Transformatorenöl oder destilliertes Wasser. Destilliertes Wasser hat den Vorteil dass sich dieses leicht wieder entfernen lässt, ohne irgendwelche Rückstände zu hinterlassen. Der Nachteil ist, dass die Spiralfeder nach dem Ätzen sehr sauber gespült sein müssen, damit keine Rückstände vom Herstellen oder Verarbeiten der Elektroden mehr vorhanden sind. Ansonsten könnte das destillierte Wasser durch diese Rückstände elektrisch leitfähig werden.

[0049] Tranformatorenöl hat den Vorteil, dass es nicht korrosiv ist, ist aber schwieriger zu entfernen als destilliertes Wasser.

[0050] Bei polykristallinen Materialien kann es an den Grenzen der Kristallite bei mechanischen Belastungen zu Rissen kommen.

[0051] Dies kann erfindungsgemäss so gelöst werden, indem die Sputterparameter so gewählt werden, dass das $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ druckverspannt aufwächst. Dabei muss aufgepasst werden, dass die Druckverspannung nur so gross ist, wie unbedingt notwendig, andererseits könnte es auch ohne mechanische Belastung der piezoelektrischen Beschichtung zu Rissen in der Beschichtung führen.

[0052] Eine weitere Möglichkeit das Risiko von Rissen zu reduzieren besteht indem auf die 1-3 μm dicke Schicht aus $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ noch mittels Atomic Layer Deposition ALD eine 10-100nm dicke Schicht aus amorphem Siliziumnitrid oder einem ähnlichen geeigneten Material aufgebracht. Dies hat einerseits den Vorteil dass das $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ gegen Umwelteinflüsse gut geschützt ist, und dass die Spiralfeder wesentlich bruchfester wird, da durch das amorphe Siliziumnitrid Spannungsspitzen im $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ 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.

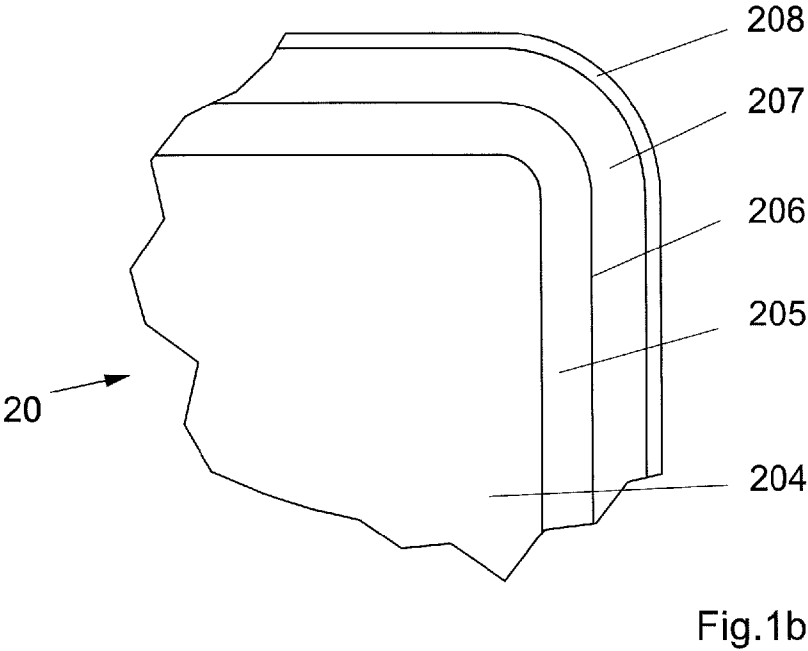
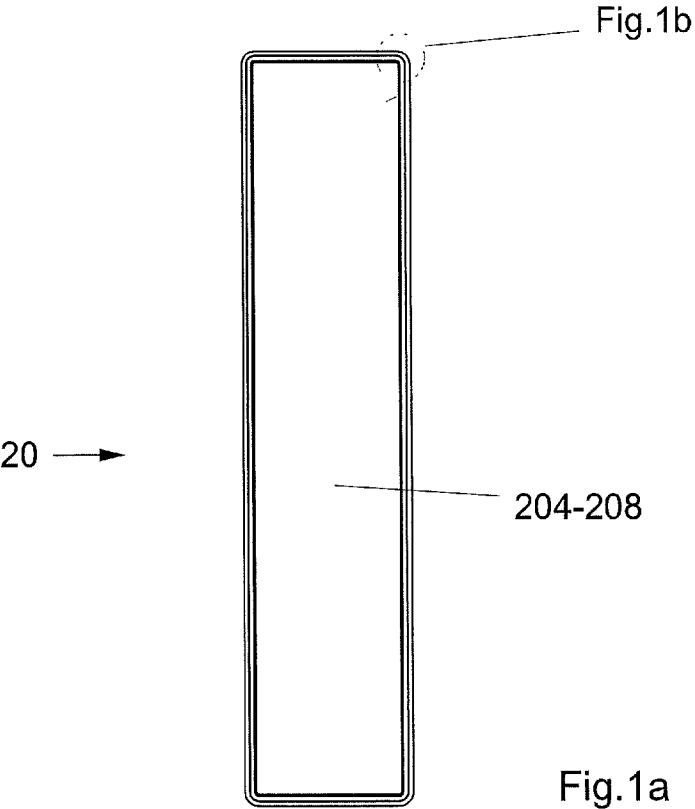
[0053] Um eine mögliche Verformung der Spiralfedern bei der Beschichtung durch die Auswirkungen der Gravitation entgegenzuwirken wird der Wafer ein oder mehrere Male während des Herstellungsprozesses in eine andere Position gebracht werden. Somit sollten sich die Auswirkungen der Gravitation während des Beschichtungsprozesses verringern oder ganz ausschließen lassen.

[0054] Die Spiralfeder kann eine Dicke der Windungen aufweisen, die nicht konstant ist.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer piezoelektrischen Spiralfeder mit folgenden Schritten:
Auftragen einer piezoelektrischen Beschichtung (207) auf einen, aus einem Substrat aus Silizium bestehenden Kern (204) der Spiralfeder mittels Hochenergieimpulsmagnetron Sputtern, dadurch gekennzeichnet, dass
eine Aussenelektrode (208) auf die aufgetragene piezoelektrische Beschichtung (207) aufgebracht wird, und dass die piezoelektrische Beschichtung (207) durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der aufgetragenen Aussenelektrode (208) und dem Kern (204) oder zwischen der aufgetragenen Aussenelektrode (208) und einer zwischen dem Kern (204) und der aufgetragenen piezoelektrischen Beschichtung (207) aufgetragenen Innenelektrode (206) nachträglich polarisiert wird.
2. Verfahren gemäss Anspruch 1, in welchem die piezoelektrische Beschichtung (207) mindestens eine Schicht aus Aluminium-Scandium-Nitrid $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ oder aus Gallium-Scandium-Nitrid $\text{Ga}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ oder aus Indium-Scandium-Nitrid $\text{In}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ umfasst.
3. Verfahren gemäss Anspruch 2, in welchem die piezoelektrische Beschichtung aus $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ mit einem Scandium Gehalt von $X=0.27$ bis 0.43 aufgebracht wird.

4. Verfahren gemäss Anspruch 2, in welchem die piezoelektrische Beschichtung aus $\text{Ga}_{(1-x)}\text{Sc}_{(x)}\text{N}$ oder aus $\text{In}_{(1-x)}\text{Sc}_{(x)}\text{N}$ mit einem Scandium Gehalt von $X=0.2$ bis 0.5 aufgebracht wird.
5. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 2 bis 4, in welchem die Dicke der $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_{(x)}\text{N}$ -Schicht oder der $\text{Ga}_{(1-x)}\text{Sc}_{(x)}\text{N}$ Schicht (207) oder der $\text{In}_{(1-x)}\text{Sc}_{(x)}\text{N}$ Schicht 0.5 bis $3\text{ }\mu\text{m}$ aufweist.
6. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 5, in welchem die Polarisierung der piezoelektrischen Beschichtung (207) in einem Medium erfolgt, welches eine Durchschlagsfestigkeit aufweist, die grösser als 10kV/mm ist.
7. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 6, in welchem die Polarisierung der piezoelektrischen Beschichtung (207) in einer Umgebung aus destilliertem Wasser erfolgt.
8. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 7, in welchem mindestens eine Sollbruchstelle (3) gebrochen wird, um den Kern (204) als Elektrode und/oder die Innenelektrode (206) zugänglich zu machen.
9. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 8, in welchem die Aussenelektrode (208) auf einer Seitenflanken der Spiralfeder aufgebracht wird, und in welchem mindestens eine Sollbruchstelle (5) gebrochen wird, um die Aussenelektrode (208A) auf der inneren Seitenflanke der Spiralfeder von der Aussenelektrode (208B) auf der äusseren Seitenflanke der Spiralfeder galvanisch zu trennen.
10. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 9, in welchem ein Loch mit einem Laser durch die piezoelektrische Schicht gemacht wird, um den Kern (204) als Elektrode und/oder die Innenelektrode (206) zugänglich zu machen, und/oder um eine Elektrode zu trennen.
11. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 10, in welchem mindestens eine Elektrode, die verwendet wird, um eine von der piezoelektrischen Beschichtung (207) erzeugte elektrische Energie abzugreifen, auch für die Polarisierung derselben piezoelektrischen Beschichtung (207) verwendet wird.
12. Verfahren gemäss einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die piezoelektrische Beschichtung (207) druckverspannt aufwächst.
13. Piezoelektrische Spiralfeder, die mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12 hergestellt ist.
14. Verwendung des Kerns (204) der durch das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12 erhaltenen piezoelektrische Spiralfeder als Elektrode, zur Erzeugung von elektrischer Energie während des Betriebs der Spiralfeder.



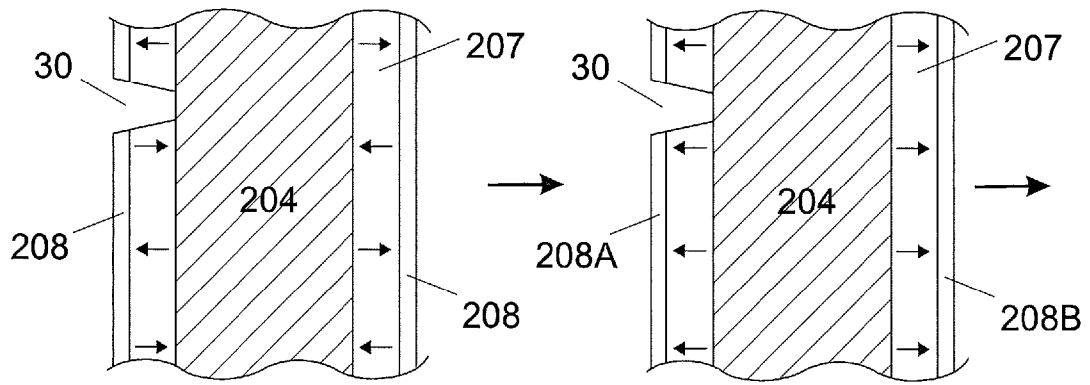


Fig.2a

Fig.2b

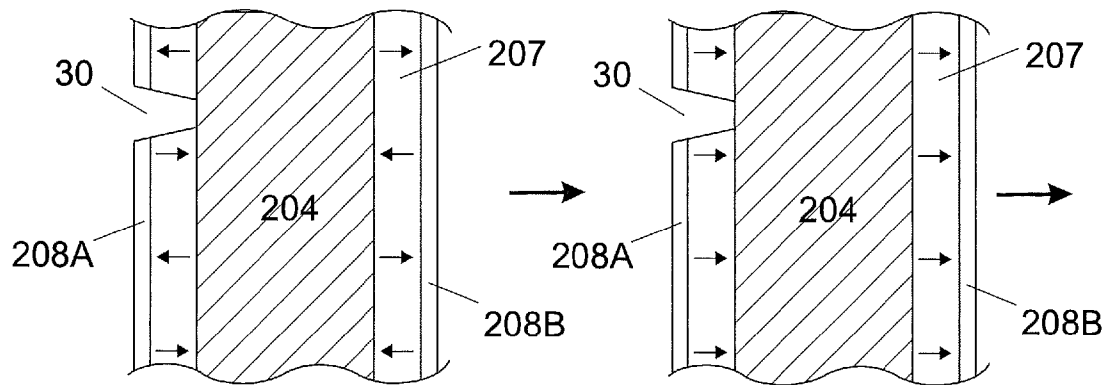


Fig.3a

Fig.3b

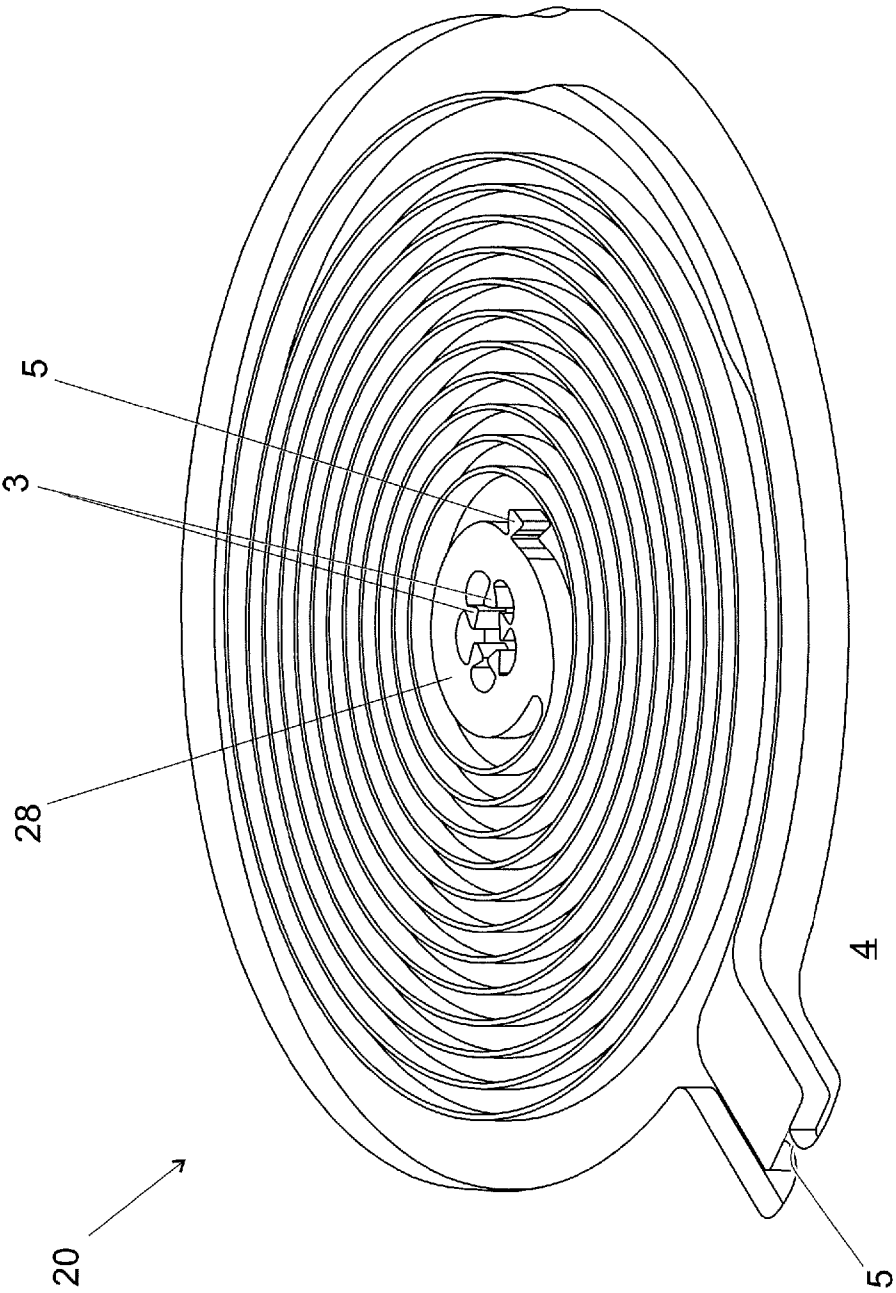


Fig.4

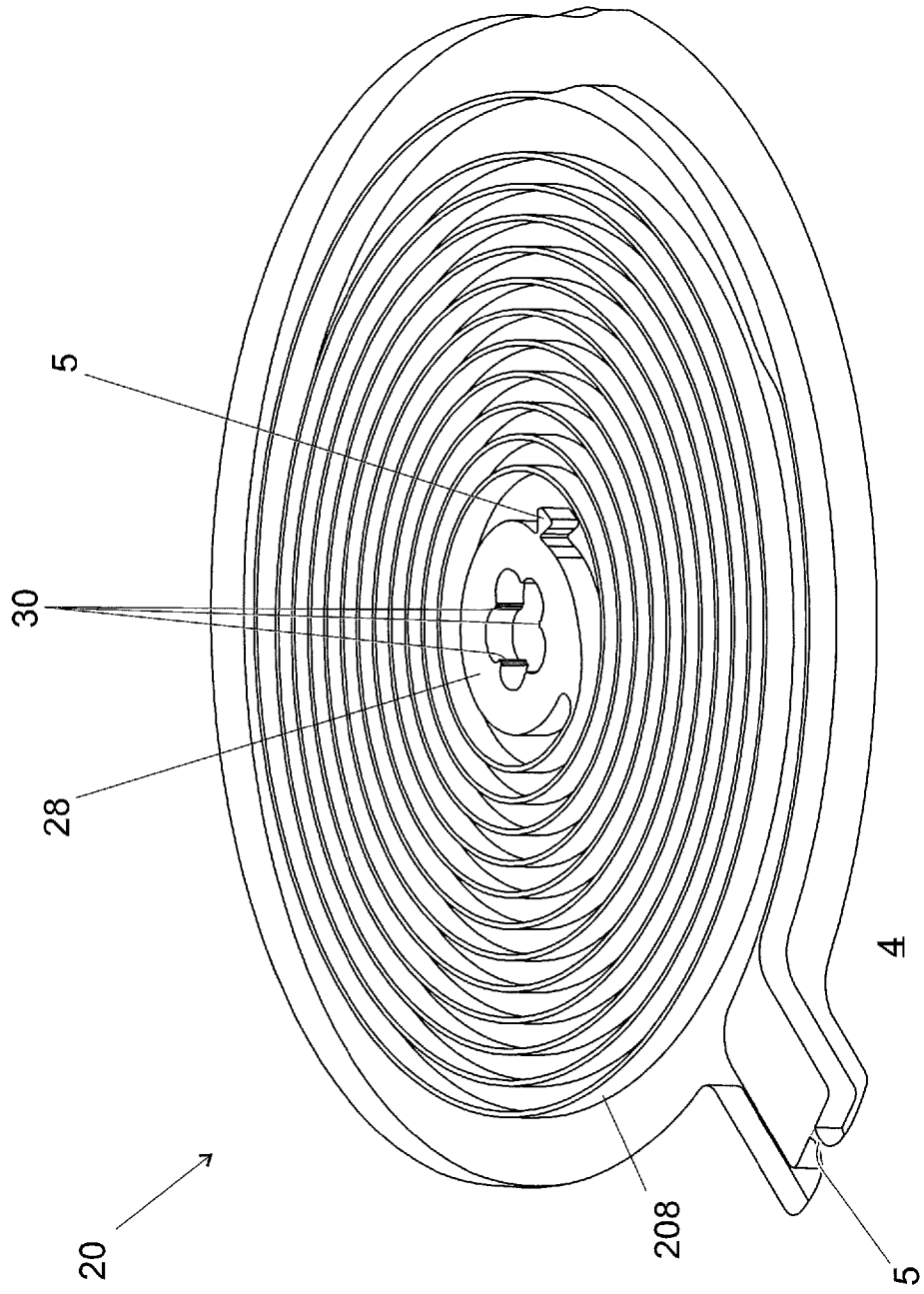


Fig. 5

