



(10) **DE 10 2013 114 211 B3** 2014.10.09

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2013 114 211.7**
(22) Anmeldetag: **17.12.2013**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **09.10.2014**

(51) Int Cl.: **G04B 17/06 (2006.01)**
G04D 3/00 (2006.01)
F16F 1/10 (2006.01)
F16F 1/04 (2006.01)
F16F 1/00 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(66) Innere Priorität:
10 2013 107 813.3 22.07.2013
10 2013 111 767.8 25.10.2013

(72) Erfinder:
Damasko, Konrad, 93055 Regensburg, DE

(73) Patentinhaber:
Damasko GmbH, 93092 Barbing, DE

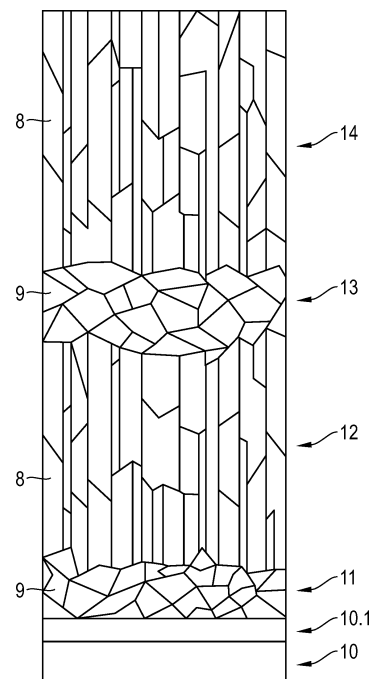
(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	101 27 733	A1
DE	10 2008 029 429	A1
DE	10 2008 061 182	A1
US	2012 / 0 230 159	A1
EP	1 422 436	A1
EP	2 201 428	A1
WO	2009/ 049 591	A1

(74) Vertreter:
**Reichert & Lindner Partnerschaft Patentanwälte,
93047 Regensburg, DE**

(54) Bezeichnung: **Spiralfeder für mechanische Uhrwerke**

(57) Zusammenfassung: Beschrieben wird eine Spiralfeder für mechanische Uhrwerke mit einer mit der Schwingungsebene der Spiralfeder zusammenfallenden Spiralfederebene (E) und einer senkrecht zu der Spiralfederebene (E), durch das Schwingungszentrum der Spiralfeder verlaufenden Spiralfederachse (A). Die Spiralfeder ist in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) aus zumindest fünf Schichten 1, 2, 3, 4, 5 aufgebaut, nämlich aus einer ersten, äußeren Schicht 1 aus Siliziumoxid, zumindest einer zweiten Schicht 2 aus polykristallinem Silizium und zumindest einer vierten Schicht 4 aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht 2 und die vierte Schicht 4 aus anisotropen Silizium-Kristallen 8 bestehen, einer dritten, zwischen der zweiten Schicht 2 aus polykristallinem Silizium und der vierten Schicht 4 aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht 3 aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht 3 aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen 9 besteht, und einer fünften, äußeren Schicht 5 aus Siliziumoxid.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung betrifft eine Spiralfeder für mechanische Uhrwerke.

Stand der Technik

[0002] Ein mechanisches Uhrwerk weist als zentrale Bestandteile Federhaus mit Zugfeder, Räderwerk, Hemmung und Schwingsystem (Unruh) auf. Dabei stellt das Federhaus mit Zugfeder den Antrieb des Uhrwerks zur Verfügung. Die Kraftübertragung erfolgt beginnend beim Federhaus über das Räderwerk zum Ankerrad, das einen Bestandteil der Hemmung darstellt. Das Räderwerk treibt die Zeiger der Uhr an und übersetzt die in der Zugfeder gespeicherte Federkraft in Drehbewegungen verschiedener Geschwindigkeiten, wodurch Sekunden, Minuten, Stunden usw. angezeigt werden.

[0003] Die Unruh umfasst einen Schwingkörper, welcher mittels einer Unruhwellen schwenkbar um eine Drehachse gelagert ist. Ferner ist eine Spiralfeder vorgesehen, die zusammen mit der Masse des Schwingkörpers das schwingungsfähige und taktgebende System bildet. Schließlich umfasst die Unruh eine Vorrichtung zur Gangregulierung wie beispielsweise einen Ricker, mit der die Schwingeneigenschaft der Spiralfeder verändert und damit der gewünschte korrekte Gang der Uhr eingestellt werden kann.

[0004] Der exakte Gang der Uhr basiert auf dem möglichst gleichmäßigen Hin- und Herschwingen der Spiralfeder um ihre Gleichgewichtsposition. Dabei greift der Anker abwechselnd hemmend und freigebend so in das Ankerrad ein, dass die Bewegung stets in gleichem Zeitmaß pulsiert. Ohne stetige Energiezufuhr würde die Unruh jedoch ihre Bewegung einstellen. Deshalb wird kontinuierlich die vom Federhaus kommende Kraft über das Räderwerk auf die Unruh übertragen. Die Hemmung leitet die Kraft über Ankerrad und Anker an die Unruh weiter.

[0005] Beim Verlassen seiner Gleichgewichtsposition bewirkt der Schwingkörper der Unruh ein Vorspannen der Spiralfeder, wodurch ein Rückholdmoment erzeugt wird, das die Spiralfeder, nach ihrer Freigabe durch den Anker, zur Rückkehr in ihre Gleichgewichtsposition veranlasst. Dadurch wird dem Schwingkörper eine gewisse kinetische Energie verliehen, weshalb er über seine Gleichgewichtsposition hinaus schwingt bis ihn das Gegendrehmoment der Spiralfeder anhält und zum Rückschwingen zwingt. Die Spiralfeder reguliert somit die Schwingungsperiode der Unruh und damit den Gang der Uhr.

[0006] Spiralfedern mit möglichst konstantem und dauerhaft unverändertem Schwingverhalten sind daher von enormer Wichtigkeit für den Bau mechanischer Uhren. Aus dem Stand der Technik sind verschiedene Verfahren zur Herstellung von Spiralfedern bekannt.

[0007] So kann beispielsweise die Spiralfeder aus speziellen Stahllegierungen gefertigt werden, und zwar in der Weise, dass ein aus der Stahllegierung erzeugter Draht durch Walz- und Ziehvorgänge in einen rechteckigen Querschnitt verformt wird. Aus diesem Draht mit rechteckigem Querschnitt wird nachfolgend die Spiralfeder durch Wickeln hergestellt.

[0008] Die DE 10 2008 061 182 A1 offenbart die Herstellung von Spiralfedern aus Silizium, insbesondere aus polykristallinem Silizium sowie aus Siliziumcarbid. Die Spiralfedern werden durch Laserschneiden aus der Nuttschicht eines Silizium-Wafers ausgeschnitten.

[0009] Aus der EP 1 422 436 A1 ist ein Verfahren zum Herstellen von Spiralfedern für das Schwingsystem von mechanischen Uhren aus einkristallinem Silizium bekannt.

[0010] Die DE 101 27 733 A1 offenbart ein Verfahren zum Herstellen von Schrauben- oder Spiralfedern aus kristallinem, insbesondere einkristallinem Silizium durch eine mechanische abtragende Bearbeitung.

[0011] Schließlich offenbart die DE 10 2008 029 429 A1 ein Verfahren zum Herstellen von Spiralfedern für Uhrwerke, bei dem die Spiralfedern durch Ätzverfahren mit Hilfe von Ätzmasken aus einem Silizium-Ausgangsmaterial gewonnen werden.

[0012] Schließlich ist aus der EP 2 201 428 A1 eine Spiralfeder bekannt, die durch Ausschneiden oder Ätzen aus einem durch epitaktisches Abscheiden von polykristallinem Silizium erhaltenen plattenförmigen Substrat hergestellt wird. Das epitaktische Abscheiden des polykristallinen Siliziums erfolgt dabei mit Hilfe eines CVD-Verfahrens. Die so erhaltenen Spiralfedern weisen ein ausgezeichnetes Schwingverhalten auf und bewirken damit eine hohe Ganggenauigkeit des Uhrwerks. Allerdings kommt es bei der Herstellung der Spiralfedern häufig zu Brüchen und Rissen der Federn, was einen hohen Materialausschuss nach sich zieht.

[0013] Die US-Patentanmeldung US 2012/0230159 A1 offenbart eine temperaturkompensierte Spiralfeder. Der Kern der Spiralfeder ist mindestens mit einer ersten und einer zweiten Beschichtung versehen, die derart angepasst werden, dass die von der Temperatur bedingten Frequenzva-

riationen erster und zweiter Ordnung keinen Einfluß auf das Schwingverhalten haben.

[0014] Die Herstellung von Spiralfedern mit ausgezeichnetem Schwingverhalten bei gleichzeitig möglichst geringen Materialverlusten durch Ausschuss stellt im Bereich der mechanischen Uhrwerke ein zentrales Ziel dar.

Darstellung der Erfindung

[0015] Hier setzt die Erfindung an. Es soll eine Spiralfeder für mechanische Uhrwerke mit ausgezeichnetem Schwingverhalten bereit gestellt werden sowie ein Verfahren zur Herstellung solcher Spiralfedern, durch das Materialverluste durch Ausschuss vermindert werden. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Spiralfeder gemäß Anspruch 1 und das Verfahren zur Herstellung einer Spiralfeder gemäß Anspruch 17 gelöst. Weitere vorteilhafte Aspekte, Details und Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen, der Beschreibung sowie den Figuren.

[0016] Die vorliegende Erfindung stellt eine Spiralfeder für mechanische Uhrwerke mit einer mit der Schwingungsebene der Spiralfeder zusammenfallenden Spiralfederebene (E) und einer senkrecht zu der Spiralfederebene (E), durch das Schwingungszentrum der Spiralfeder verlaufenden Spiralfederachse (A) zur Verfügung. Die Spiralfeder ist in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) aus zumindest fünf Schichten aufgebaut, nämlich aus einer ersten, äußeren Schicht aus Siliziumoxid, zumindest einer zweiten Schicht aus polykristallinem Silizium und zumindest einer vierten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht und die vierte Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen bestehen, einer dritten, zwischen der zweiten Schicht aus polykristallinem Silizium und der vierten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht, und einer fünften, äußeren Schicht aus Siliziumoxid.

[0017] Unter „im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen“ werden Silizium-Kristalle verstanden, deren minimale und maximale Ausdehnung in eine erste und eine zweite Raumrichtung maximal 20% von der mittleren Ausdehnung in eine dritte Raumrichtung abweichen, d.h. bei einer mittleren Ausdehnung von 100 in die dritte Raumrichtung beträgt bei „im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen“ im Sinne der vorliegenden Erfindung die Ausdehnung in die beiden anderen Raumrichtungen zwischen 80 und 120. Bevorzugt weichen die Ausdehnungen der im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristalle in die drei Raumrichtungen maximal 15% voneinander ab, besonders bevorzugt maximal 10% und insbesondere bevorzugt maximal 5%. Als Basis für die Berechnung der pro-

zentualen Abweichung dient immer der Wert der mittleren Ausdehnung in die dritte Raumrichtung, d.h. die maximale und die minimale Ausdehnung werden bezogen auf die Ausdehnung in die dritte Raumrichtung.

[0018] Unter dem „Durchmesser der isotropen Silizium-Kristalle“ wird deren maximaler Durchmesser in eine Raumrichtung verstanden.

[0019] Unter „anisotropen Silizium-Kristallen“ werden Silizium-Kristalle verstanden, deren Ausdehnung in eine bevorzugte Raumrichtung mehr als 20% größer ist als die Ausdehnungen in die beiden anderen Raumrichtungen, d.h. bei einer Ausdehnung von 120 in die bevorzugte Raumrichtung beträgt bei „anisotropen Silizium-Kristallen“ im Sinne der vorliegenden Erfindung die Ausdehnung in die beiden anderen Raumrichtungen maximal 100. Bevorzugt ist die Ausdehnung der anisotropen Silizium-Kristalle in die bevorzugte Raumrichtung mehr als 50% größer als die Ausdehnungen in die beiden anderen Raumrichtungen, insbesondere bevorzugt mehr als 100% größer und ganz besonders bevorzugt mehr also 200% größer. Als Basis für die Berechnung der prozentualen Abweichung dient der Wert der Ausdehnung in die bevorzugte Raumrichtung, d.h. die Ausdehnungen in die beiden anderen Raumrichtungen werden bezogen auf die Ausdehnung in die bevorzugte Raumrichtung.

[0020] Unter dem „Durchmesser der anisotropen Silizium-Kristalle parallel zur Spiralfederebene (E)“ wird deren maximaler Durchmesser in eine Raumrichtung parallel zur Spiralfederebene (E) verstanden.

[0021] Wie bereits erwähnt kommt es bei der Herstellung der Spiralfedern häufig zu Brüchen und Rissen der Federn, was einen hohen Materialausschuss nach sich zieht. Es kann vermutet werden, dass diese Brüche durch Spannungen im Silizium-Substrat bewirkt werden, die sich während des epitaktischen Abscheidens des polykristallinen Siliziums aufbauen. Überraschenderweise hat sich nun gezeigt, dass diese Spannungen deutlich vermindert werden können, wenn die Spiralfeder eine Zwischenschicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen aufweist, die zwischen zwei Schichten aus anisotropen Silizium-Kristallen angeordnet ist. Der Aufbau der erfindungsgemäßen Spiralfeder aus zumindest fünf Schichten wird durch zwei äußere Schichten aus Siliziumoxid vervollständigt, durch die die Empfindlichkeit der Spiralfeder gegenüber Temperaturschwankungen vermindert wird. In ihrer allgemeinsten Form umfasst die vorliegende Erfindung also jede Art von Spiralfeder für mechanische Uhrwerke, bei der zwischen zwei äußeren Schichten aus Siliziumoxid zumindest zwei durch eine Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen voneinander getrennte Schichten aus anisotropen Silizium-Kristallen angeordnet sind.

[0022] Um ein möglichst konstantes Schwingverhalten der Spiralfeder und damit eine hohe und möglichst konstante Ganggenauigkeit des Uhrwerks zu erreichen, muss nämlich die Rückholkonstante der Spiralfeder möglichst konstant sein. Zur Minimierung der Temperaturabhängigkeit der Rückholkonstante wird im Falle von Spiralfedern aus Silizium die Tatsache ausgenutzt, dass Siliziumoxid einen, dem Silizium entgegengesetzten Temperaturkoeffizienten des Elastizitätsmoduls aufweist. Durch eine Beschichtung einer Silizium-Spiralfeder mit einem Überzug aus Siliziumoxid kann so die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls der Spiralfeder und damit die Temperaturabhängigkeit der Rückholkonstante C minimiert werden. Dadurch kann die Empfindlichkeit der Spiralfeder gegenüber Temperaturschwankungen auf ein Minimum reduziert werden.

[0023] Die Dicke der Beschichtung aus Siliziumoxid, die für einen gegebenen Querschnitt der Spiralfeder erforderlich ist, um eine optimale Temperaturkompensation zu erreichen, kann vom Fachmann problemlos berechnet oder einfach experimentell bestimmt werden. Die so berechneten bzw. bestimmten Schichtdicken für den Siliziumoxid-Überzug sind tabellarisch verfügbar. Üblich sind Beschichtungen mit Dicken von 2 bis 8 µm.

[0024] Bevorzugt ist die Spiralfeder in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) aus zumindest fünf Schichten aufgebaut, nämlich aus einer ersten Schicht aus Siliziumoxid, einer auf der ersten Schicht aus Siliziumoxid angeordneten zweiten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen besteht, einer dritten, auf der zweiten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht, einer auf der dritten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten vierten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die vierte Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen besteht, und einer auf der vierten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten fünften Schicht aus Siliziumoxid.

[0025] In dieser Ausführungsform werden in dem nachfolgend noch näher beschriebenen Verfahren zur Herstellung der Spiralfeder die beiden äußeren Schichten aus Siliziumoxid unter vollständiger Auflösung der vor der Oxidation anwesenden äußeren Schichten aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen gebildet. In der fertigen Spiralfeder stehen dann die beiden äußeren Schichten aus Siliziumoxid in direktem Kontakt mit jeweils einer Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen.

[0026] Ebenfalls bevorzugt ist eine Spiralfeder, die in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) aus zumindest sechs Schichten aufgebaut ist, näm-

lich aus einer ersten, äußeren Schicht aus Siliziumoxid, einer sechsten, auf der ersten Schicht aus Siliziumoxid angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die sechste Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht, einer auf der sechsten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten zweiten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen besteht, einer dritten, auf der zweiten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht, einer auf der dritten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten vierten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die vierte Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen besteht, und einer auf der vierten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten fünften, äußeren Schicht aus Siliziumoxid.

[0027] In dieser Ausführungsform wird in dem nachfolgend noch näher beschriebenen Verfahren zur Herstellung der Spiralfeder nur eine der beiden äußeren Schichten aus Siliziumoxid unter vollständiger Auflösung der vor der Oxidation anwesenden äußeren Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen gebildet. Bei der Bildung der weiteren äußeren Schichten aus Siliziumoxid erfolgt im Laufe der Oxidation keine vollständige Auflösung der vor der Oxidation anwesenden äußeren Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen. In der fertigen Spiralfeder steht dann eine der beiden äußeren Schichten aus Siliziumoxid in direktem Kontakt mit einer Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen und die andere äußere Schicht aus Siliziumoxid steht in direktem Kontakt mit einer Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen, auf welche dann wieder eine Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen folgt.

[0028] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist die Spiralfeder in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) aus zumindest sieben Schichten aufgebaut, nämlich aus einer ersten, äußeren Schicht aus Siliziumoxid, einer sechsten, auf der ersten Schicht aus Siliziumoxid angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die sechste Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht, einer auf der sechsten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten zweiten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen besteht, einer dritten, auf der zweiten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht, einer auf der dritten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten vierten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die vierte Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen besteht, einer siebten,

auf der vierten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die siebte Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht, einer auf der siebten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten fünften, äußeren Schicht aus Siliziumoxid.

[0029] In dieser Ausführungsform werden in dem nachfolgend noch näher beschriebenen Verfahren zur Herstellung der Spiralfeder die beiden äußeren Schichten aus Siliziumoxid nur unter teilweiser Auflösung der vor der Oxidation anwesenden äußeren Schichten aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen gebildet. Bei der Bildung der beiden äußeren Schichten aus Siliziumoxid erfolgt im Laufe der Oxidation keine vollständige Auflösung der vor der Oxidation anwesenden äußeren Schichten aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen. In der fertigen Spiralfeder stehen dann beide äußeren Schichten aus Siliziumoxid in direktem Kontakt mit einer Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen auf welche dann wieder jeweils eine Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen folgt.

[0030] Bevorzugt weist die Spiralfeder in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) zumindest eine weitere aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehende Schicht und zumindest eine weitere aus anisotropen Silizium-Kristallen bestehende Schicht auf, wobei die weitere aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehende Schicht zwischen zwei aus anisotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schichten angeordnet ist und die weitere aus anisotropen Silizium-Kristallen bestehende Schicht zwischen zwei aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schichten angeordnet ist. Durch die gemäß dieser Ausführungsform vorgesehene zweite Zwischenschicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen werden die Spannungen im Silizium-Substrat weiter vermindert und Beschädigungen während des Herstellungsprozesses reduziert.

[0031] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung weist die Spiralfeder in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) n weitere aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehende Schichten und n weitere aus anisotropen Silizium-Kristallen bestehende Schichten auf, wobei jede weitere aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehende Schicht zwischen zwei aus anisotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schichten angeordnet ist und jede weitere aus anisotropen Silizium-Kristallen bestehende Schicht zwischen zwei aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schichten angeordnet ist, wobei $n \leq 200$, insbesondere $n \leq 150$, besonders bevorzugt $n \leq 100$ ist. Besonders bevorzugt sind Ausführungsformen, gemäß denen $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17,$

18, 19, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ist. Durch weitere Zwischenschichten aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen werden die Spannungen im Silizium-Substrat zusätzlich vermindert und Beschädigungen während des Herstellungsprozesses praktisch auf Null reduziert.

[0032] Bevorzugt weist die erste und/oder die fünfte Schicht aus Siliziumoxid eine Dicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 2 μm bis 8 μm auf. Durch eine Dicke der Siliziumoxid-Schicht von 2 μm bis 8 μm kann die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls der Spiralfeder und damit die Temperaturabhängigkeit der Rückholkonstante C minimiert werden.

[0033] Besonders bevorzugt weisen die aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schichten eine Schichtdicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 200 nm bis 50 μm auf. Eine Schichtdicke von 200 nm bis 50 μm hat sich als ideal in Bezug auf die Verminderung von Spannungen in dem Silizium-Substrat herausgestellt.

[0034] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform weisen die aus anisotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schichten eine Schichtdicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 2 μm bis 300 μm auf. Eine Schichtdicke von 2 μm bis 300 μm hat sich als hervorragend geeignet zur Verhinderung von Spannungen im Material und zum Erreichen eines ausgezeichneten Schwingverhaltens der Spiralfeder herausgestellt.

[0035] Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung weisen die anisotropen Silizium-Kristalle einen Durchmesser parallel zur Spiralfederebene (E) von 10 nm bis 30000 nm und eine Höhe parallel zur Spiralfederachse (A) von 0,5 μm bis 50 μm auf. Insbesondere bevorzugt weisen die anisotropen Silizium-Kristalle einen Durchmesser parallel zur Spiralfederebene (E) von 20 nm bis 5000 nm und eine Höhe parallel zur Spiralfederachse (A) von 5 μm bis 20 μm auf. Kristalle mit den genannten Abmessungen haben sich als ausgezeichnet geeignet zur Verhinderung von Spannungen im Material und zum Erreichen eines ausgezeichneten Schwingverhaltens der Spiralfeder herausgestellt. Wie nachfolgend im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren noch beschrieben wird, stellt es für den Fachmann keine Schwierigkeit dar, im Rahmen einer CVD-Abscheidung die Prozessparameter so zu steuern, dass Kristalle in der gewünschten Dimensionierung aufwachsen.

[0036] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung weisen die im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristalle einen Durchmesser von 1 nm bis 10000 nm, besonders bevorzugt von 20 nm bis 4000 nm, insbesondere bevorzugt 50 nm bis 1000 nm auf. Durch Zwischenschicht-

ten, die aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen mit einem Durchmesser von 1 nm bis 10000 nm, bevorzugt von 20 nm bis 4000 nm, insbesondere bevorzugt von 50 nm bis 1000 nm aufgebaut sind, werden Spannungen im Silizium-Substrat besonders stark vermindert.

[0037] Bevorzugt beträgt die Fläche einer die Spiralfederachse (A) beinhaltenden Schnittebene der Spiralfeder von 0,001 mm² bis 0,01 mm² und/oder die Höhe der Spiralfeder parallel zur Spiralfederachse (A) von 0,05 mm bis 0,3 mm. Durch eine Querschnittsfläche und/oder eine Höhe in der genannten Größenordnung ergeben sich besonders gute Eigenschaften hinsichtlich des Schwingungsverhaltens.

[0038] Die vorliegende Erfindung umfasst auch ein Verfahren zur Herstellung einer Spiralfeder für mechanische Uhrwerke mit den Schritten Bereitstellen eines Silizium-Wafers, wobei der Silizium-Wafer eine Opferschicht aus Siliziumdioxid aufweist, Durchführung eines LPCVD-Verfahrens zur Ausbildung einer ersten, auf der Siliziumdioxid-Opferschicht angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die erste Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht, Durchführung eines CVD-Verfahrens zur Ausbildung einer auf der ersten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten zweiten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen besteht, Durchführung eines LPCVD-Verfahrens zur Ausbildung einer dritten, auf der zweiten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht, Durchführung eines CVD-Verfahrens zur Ausbildung einer auf der dritten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten vierten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die vierte Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen besteht, Durchführung eines LPCVD-Verfahrens zur Ausbildung einer fünften, auf der vierten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die fünfte Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht, Strukturierung der Spiralfeder durch ein materialabtragendes Ätz- oder Schneidverfahren, Ablösen der Spiralfeder von dem Silizium-Wafer durch Auflösen der Opferschicht aus Siliziumdioxid mit Hilfe eines Ätzverfahrens, Durchführung einer Oxidation zur Erzeugung einer zumindest eine sechste und eine siebte Schicht aus Siliziumoxid umfassenden Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung der Spiralfeder, wobei die Ausbildung der sechsten Schicht aus Siliziumoxid unter Auflösung zumindest eines Teils der ersten aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schicht erfolgt und die Ausbildung der siebten Schicht aus Siliziumoxid unter Auflösung zumindest eines Teils der fünften aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schicht erfolgt.

[0039] Grundsätzlich sind die Prozessparameter für die Durchführung eines Niederdruck Chemical Vapor Deposition (LPCVD) Verfahrens ebenso wie die Prozessparameter für die Durchführung eines Chemical Vapor Deposition (CVD) Verfahrens zur Abscheidung von Silizium aus der Gasphase dem Fachmann bekannt. Durch Variation von Druck und Temperatur in der jeweiligen Reaktorkammer können Geschwindigkeit und Art der Abscheidung des Siliziums und damit die Kristallbildung auf der Siliziumdioxid-Opferschicht des Silizium-Wafers gesteuert werden.

[0040] Die Strukturierung der Spiralfeder erfolgt durch ein dem Fachmann an sich bekanntes materialabtragendes Ätz- oder Schneidverfahren. Der Materialabtrag kann beispielsweise durch ein Ätzverfahren mit Hilfe von Photomasken vorgenommen werden.

[0041] Nachfolgend wird die Spiralfeder von dem Silizium-Wafer durch Auflösen der Opferschicht aus Siliziumdioxid mit Hilfe eines Ätzverfahrens abgelöst. Chemische Ätzverfahren unter Verwendung von beispielsweise Flusssäure sind dem Fachmann allgemein bekannt.

[0042] Die nach dem Ablösen der Spiralfeder von dem Silizium-Wafer durchgeführte Oxidation erfolgt nach einem dem Fachmann geläufigen Verfahren. So kann beispielsweise eine thermische Oxidation bei erhöhten Temperaturen vorgenommen werden.

[0043] Da die Oxidation nach dem Ablösen der Spiralfeder von dem Silizium-Wafer durchgeführt wird, ist die Spiralfeder von allen Seiten zugänglich, wodurch sich eine äußere Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung ausbildet. Im Laufe der Ausbildung der Siliziumoxid-Schicht werden die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren zunächst ausgebildete erste und fünfte, aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schichten zumindest teilweise oxidiert und damit zumindest zum Teil als Schicht aus polykristallinem Silizium aufgelöst bzw. zumindest zum Teil in eine Schicht aus Siliziumoxid umgewandelt.

[0044] Wird die Oxidation nach dem Ablösen der Spiralfeder von dem Silizium-Wafer für einen längeren Zeitraum durchgeführt, so erfolgt eine vollständige Auflösung der zunächst ausgebildeten ersten und/oder fünften, aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schichten. Eine oder beide der Schichten werden dadurch in Schichten aus Siliziumoxid umgewandelt.

[0045] Bevorzugt wird das LPCVD-Verfahren für einen Zeitraum ausgeführt, in dem sich eine Schicht aus polykristallinem Silizium mit einer Dicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 0,2 µm bis 1 µm ausbildet. Mit LPCVD-Verfahren sind relativ niedri-

ge Schichtabscheideraten von ca. 20 nm/min verbunden. Die im Rahmen der vorliegenden Erfindung bevorzugten Schichtdicken von 0,2 µm bis 1 µm sind somit innerhalb akzeptabler Prozesszeiten zu erreichen.

[0046] Das CVD-Verfahren wird bevorzugt für einen Zeitraum ausgeführt, in dem sich eine Schicht aus polykristallinem Silizium mit einer Dicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 2 µm bis 300 µm ausbildet. Mit den im Rahmen der vorliegenden Erfindung bevorzugten Prozessparametern werden bei CVD-Verfahren Schichtabscheideraten von 1 µm/min bis 5 µm/min erreicht. Die im Rahmen der vorliegenden Erfindung bevorzugten Schichtdicken von 2 µm bis 300 µm sind somit innerhalb akzeptabler Prozesszeiten zu erreichen.

[0047] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird die Oxidation nach dem Ablösen der Spiralfeder von dem Silizium-Wafer für einen Zeitraum ausgeführt, in dem sich eine Schicht aus Siliziumoxid mit einer Dicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 2 µm bis 8 µm ausbildet. Durch eine Dicke der Siliziumoxid-Schicht von 2 µm bis 8 µm kann die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls der Spiralfeder und damit die Temperaturabhängigkeit der Rückholkonstante C minimiert werden.

[0048] Bevorzugt wird das CVD-Verfahren bei einer Prozesstemperatur zwischen 600°C und 1200°C, besonders bevorzugt zwischen 960°C und 1060°C ausgeführt. Bei den genannten Prozesstemperaturen bilden sich Schichten aus polykristallinem Silizium aus, welche aus anisotropen Silizium-Kristallen mit einem Durchmesser parallel zur Spiralfederebene (E) von 10 nm bis 30000 nm und einer Höhe parallel zur Spiralfederachse (A) von 0,5 µm bis 50 µm aufgebaut sind. Diese weisen ausgezeichnete Eigenschaften im Hinblick auf die Verhinderung von Spannungen und zum Erreichen eines ausgezeichneten Schwingverhaltens der Spiralfeder auf.

[0049] Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform wird das CVD-Verfahren bei einem Prozessdruck zwischen $2,7 \cdot 10^3$ Pa und $13,3 \cdot 10^3$ Pa ausgeführt. Bei den genannten Prozessdrücken bilden sich Schichten aus polykristallinem Silizium aus, welche aus anisotropen Silizium-Kristallen mit einem Durchmesser parallel zur Spiralfederebene (E) von 10 nm bis 30000 nm und einer Höhe parallel zur Spiralfederachse (A) von 0,5 µm bis 50 µm aufgebaut sind. Diese weisen ausgezeichnete Eigenschaften im Hinblick auf die Verhinderung von Spannungen und zum Erreichen eines ausgezeichneten Schwingverhaltens der Spiralfeder auf.

[0050] Besonders bevorzugt werden das LPCVD-Verfahren und/oder das CVD-Verfahren unter Ver-

wendung von Silan oder Dichlorsilan als Prozessgas durchgeführt. Bei Verwendung dieser Prozessgase bilden sich die gewünschten Schichten innerhalb relativ kurzer Prozesszeiten aus.

[0051] Bevorzugt wird das CVD-Verfahren mit einem gegenüber dem LPCVD-Verfahren erhöhten Gasfluss, einem erhöhten Prozessdruck und einer erhöhten Prozesstemperatur durchgeführt. Durch die genannte Veränderung der Prozessparameter kann die Ausbildung der gewünschten unterschiedlichen Schichten gesteuert werden.

[0052] Bevorzugt wird das CVD-Verfahren bei Prozessparametern durchgeführt, die zur Abscheidung einer Schichtdicke von 1 µm bis 5 µm pro Minute führen. Die im Rahmen der vorliegenden Erfindung bevorzugten Schichtdicken von 2 µm bis 300 µm sind somit innerhalb akzeptabler Prozesszeiten zu erreichen.

[0053] Die vorliegende Erfindung umfasst auch eine Spiralfeder für eine mechanische Uhr, wobei die Spiralfeder nach einem der oben beschriebenen Verfahren hergestellt ist.

[0054] Zur Klarstellung soll angemerkt werden, dass die oben beschriebenen erfindungsgemäßen Spiralfedern auch durch alternative Verfahren hergestellt werden können. Beispielhaft sind hier zu nennen ein gerichtetes Aufwachsen wie z.B. Epitaxie oder eine Umkristallisation z.B. mittels Laser oder Kristallzucht.

[0055] Außerdem umfasst die vorliegende Erfindung eine mechanische Uhr mit einer der oben beschriebenen Spiralfedern.

[0056] Sämtliche oben genannten bevorzugten Ausführungsformen können einzeln oder in Kombination mit anderen bevorzugten Ausführungsformen die erfindungsgemäße Spiralfeder bzw. das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung von Spiralfedern weiterbilden.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0057] Die Erfindung soll nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert werden. Es zeigen

[0058] Fig. 1 eine perspektivische Ansicht einer erfindungsgemäßen Spiralfeder;

[0059] Fig. 2 einen Schnitt durch die Spiralfeder der Fig. 1;

[0060] Fig. 3 einen Schnitt durch die Spiralfeder der Fig. 1 während der Herstellung der Spiralfeder.

Wege zur Ausführung der Erfindung

[0061] Die **Fig. 1** zeigt in perspektivischer Darstellung eine Spiralfeder für mechanische Uhrwerke. Die Spiralfeder weist eine mit der Schwingungsebene der Spiralfeder zusammenfallende Spiralfederebene E und eine senkrecht zu der Spiralfederebene E durch das Schwingungszentrum der Spiralfeder verlaufende Spiralfederachse A auf. Zur drehfesten Verbindung mit einer Unruhwellen weist die Spiralfeder einen inneren Spiralfederbefestigungsabschnitt S auf. Der äußere Federhaltepunkt H der Spiralfeder dient der festen Verbindung der Spiralfeder mit einer Platine oder einer Lagerplatine. Die Spiralfeder weist mehrere Windungen W auf.

[0062] Die Darstellungen der **Fig. 2** und **Fig. 3** zeigen jeweils einen Schnitt durch eine Windung W der Spiralfeder der **Fig. 1**, wobei die Spiralfederachse A Bestandteil der Schnittebene ist und somit die Schnittebene senkrecht auf der Spiralfederebene E steht. Die Dicken der einzelnen Schichten sind in den **Fig. 2** und **Fig. 3** nicht maßstabsgetreu wiedergegeben, es kann also nicht von der zeichnerisch dargestellten Dicke der einen Schicht auf die Dicke einer anderen Schicht geschlossen werden.

[0063] Die **Fig. 3** zeigt einen Zustand der Spiralfeder während des Herstellungsprozesses. Der als Träger dienende Silizium-Wafer **10** ist mit einer Opferschicht **10.1** aus Siliziumdioxid versehen. Durch ein LPCVD-Verfahren wird auf der Opferschicht **10.1** eine 0,4 µm dicke erste Schicht **11** aus polykristallinem Silizium abgeschieden. Diese erste Schicht **11** besteht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen **9**, die im gezeigten Ausführungsbeispiel einen Durchmesser von 100 nm bis 400 nm aufweisen. Das LPCVD-Verfahren wird mit Silan als Prozessgas bei einem Druck von $0,6 \cdot 10^3$ Pa und einer Temperatur von 1000 °C durchgeführt. Durch die dabei erzielte Abscheiderate von ca. 200 nm/min baut sich die erste Schicht **11** innerhalb von rund 2 Minuten auf.

[0064] Nachfolgend werden Gasfluss, Prozessdruck und Prozesstemperatur erhöht und unter Verwendung von Silan als Prozessgas wird ein CVD-Verfahren durchgeführt. Bei einem Prozessdruck von $5,7 \cdot 10^3$ Pa und einer Prozesstemperatur von 1060 °C stellt sich eine Abscheiderate von rund 2 µm pro Minute ein. Innerhalb von 20 Minuten wird eine auf der ersten Schicht **11** aus polykristallinem Silizium angeordnete zweite Schicht **12** aus polykristallinem Silizium mit einer Dicke parallel zur Spiralfederachse A von 40 µm ausgebildet. Die zweite Schicht **12** aus polykristallinem Silizium besteht aus anisotropen Silizium-Kristallen **8**, wobei die anisotropen Silizium-Kristalle **8** im gezeigten Ausführungsbeispiel einen Durchmesser parallel zur Spiralfederebene E von 50 nm bis 1000 nm und eine Höhe parallel zur Spiralfederachse A von 5 µm bis 30 µm aufweisen.

[0065] Anschließend werden die Parameter Gasfluss, Prozessdruck und Prozesstemperatur auf die Werte für das oben im Zusammenhang mit der Ausbildung der ersten Schicht **11** beschriebene Verfahren eingestellt und ein LPCVD-Verfahren zur Ausbildung einer dritten **13**, auf der zweiten **12** Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten 0,4 µm dicken Schicht aus polykristallinem Silizium durchgeführt. Diese dritte Schicht **13** besteht wiederum aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen **9** mit einem Durchmesser von 100 nm bis 400 nm.

[0066] Nachfolgend werden Gasfluss, Prozessdruck und Prozesstemperatur wieder erhöht und unter Verwendung von Silan als Prozessgas wird ein weiteres CVD-Verfahren durchgeführt. Bei einem Prozessdruck von $5,7 \cdot 10^3$ Pa und einer Prozesstemperatur von 1060 °C stellt sich eine Abscheiderate von rund 2 µm pro Minute ein. Innerhalb von 20 Minuten wird eine auf der dritten Schicht **13** aus polykristallinem Silizium angeordnete vierte Schicht **14** aus polykristallinem Silizium mit einer Dicke parallel zur Spiralfederachse A von 40 µm ausgebildet. Die vierte Schicht **14** aus polykristallinem Silizium besteht ebenfalls aus anisotropen Silizium-Kristallen **9**, wobei die anisotropen Silizium-Kristalle **9** im gezeigten Ausführungsbeispiel einen Durchmesser parallel zur Spiralfederebene E von 50 nm bis 1000 nm und eine Höhe parallel zur Spiralfederachse A von 5 µm bis 30 µm aufweisen.

[0067] Nach diesem Prozessschritt weist die mit dem Silizium-Wafer **10** verbundene Spiralfeder die in **Fig. 3** dargestellte Form auf.

[0068] Anschließend erfolgen nacheinander die Strukturierung der Spiralfeder durch ein materialabtragendes chemisches Ätzverfahren mit Hilfe von Photomasken, das Ablösen der Spiralfeder von dem Silizium-Wafer **10** durch Auflösen der Opferschicht **10.1** aus Siliziumdioxid wiederum mit Hilfe eines chemischen Ätzverfahrens, und die Durchführung einer thermischen Oxidation zur Erzeugung einer Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung. Die thermische Oxidation wird für einen Zeitraum von 5 Minuten durchgeführt, sodass sich eine erste **1** und eine fünfte **5** Schicht aus Siliziumoxid mit einer Schichtdicke von rund 2,5 µm ausbilden. Im Zuge der Bildung der ersten Schicht **1** aus Siliziumoxid löst sich die erste, aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehende Schicht **11** vollständig auf. Durch die Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung wird eine Minimierung der Temperaturabhängigkeit des Schwingungsverhaltens der Spiralfeder erreicht.

[0069] Eine erfindungsgemäße Spiralfeder für mechanische Uhrwerke ist in **Fig. 2** dargestellt. Die Spiralfeder ist in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse A aus fünf Schichten **1, 2, 3, 4, 5** aufgebaut, nämlich aus einer 2,5 µm dicken, ersten Schicht

1 aus Siliziumoxid, einer auf der ersten Schicht **1** aus Siliziumoxid angeordneten, 40 µm dicken, zweiten Schicht **2** aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht **2** aus anisotropen Silizium-Kristallen **8** besteht, wobei die anisotropen Silizium-Kristalle **8** einen Durchmesser parallel zur Spiralfederebene E von 50 nm bis 1000 nm und eine Höhe parallel zur Spiralfederachse A von 5 µm bis 30 µm aufweisen, einer 0,4 µm dicken dritten, auf der zweiten Schicht **2** aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht **3** aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht **3** aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen **9** mit einem Durchmesser von 100 nm bis 400 nm besteht, einer auf der dritten Schicht **3** aus polykristallinem Silizium angeordneten, 40 µm dicken, vierten Schicht **4** aus polykristallinem Silizium, wobei die vierte Schicht **4** aus anisotropen Silizium-Kristallen **8** besteht, wobei die anisotropen Silizium-Kristalle **8** einen Durchmesser parallel zur Spiralfederebene E von 50 nm bis 1000 nm und eine Höhe parallel zur Spiralfederachse A von 5 µm bis 30 µm aufweisen, einer auf der vierten Schicht **4** aus polykristallinem Silizium angeordneten, 2,5 µm dicken, fünften Schicht **5** aus Siliziumoxid.

[0070] Die dargestellte Spiralfeder kann unter minimalen Verlusten durch Brüche und Risse mit konstant ausgezeichneter Qualität hergestellt werden.

Bezugszeichenliste

1	erste Schicht aus Siliziumoxid
2	zweite Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen
3	dritte Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen
4	vierte Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen
5	fünfte Schicht aus Siliziumoxid
8	anisotrope Silizium-Kristalle
9	isotrope Silizium-Kristalle
10	Silizium-Wafer
10.1	Opferschicht aus Siliziumdioxid
11	erste Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen
12	zweite Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen
13	dritte Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen
14	vierte Schicht aus anisotropen Silizium-Kristallen
A	Spiralfederachse
E	Spiralfederebene
S	Spiralfederbefestigungsabschnitt
H	Federhaltepunkt
W	Windungen

Patentansprüche

1. Spiralfeder für mechanische Uhrwerke, wobei die Spiralfeder eine mit der Schwingungsebene der Spiralfeder zusammenfallende Spiralfederebene (E) und eine senkrecht zu der Spiralfederebene (E), durch das Schwingungszentrum der Spiralfeder verlaufende Spiralfederachse (A) aufweist,

dadurch gekennzeichnet, dass die Spiralfeder in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) aus zumindest fünf Schichten (**1, 2, 3, 4, 5**) aufgebaut ist, nämlich aus

- einer ersten, äußeren Schicht (**1**) aus Siliziumoxid,
- zumindest einer zweiten Schicht (**2**) aus polykristallinem Silizium und zumindest einer vierten Schicht (**4**) aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht (**2**) und die vierte Schicht (**4**) aus anisotropen Silizium-Kristallen (**8**) bestehen,

- einer dritten, zwischen der zweiten Schicht (**2**) aus polykristallinem Silizium und der vierten Schicht (**4**) aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht (**3**) aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht (**3**) aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (**9**) besteht,
- einer fünften, äußeren Schicht (**5**) aus Siliziumoxid.

2. Spiralfeder nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spiralfeder in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) aus zumindest fünf Schichten (**1, 2, 3, 4, 5**) aufgebaut ist, nämlich aus

- einer ersten, äußeren Schicht (**1**) aus Siliziumoxid,
- einer auf der ersten Schicht (**1**) aus Siliziumoxid angeordneten zweiten Schicht (**2**) aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht (**2**) aus anisotropen Silizium-Kristallen (**8**) besteht,

- einer dritten, auf der zweiten Schicht (**2**) aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht (**3**) aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht (**3**) aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (**9**) besteht,

- einer auf der dritten Schicht (**3**) aus polykristallinem Silizium angeordneten vierten Schicht (**4**) aus polykristallinem Silizium, wobei die vierte Schicht (**4**) aus anisotropen Silizium-Kristallen (**8**) besteht,

- einer auf der vierten Schicht (**4**) aus polykristallinem Silizium angeordneten fünften, äußeren Schicht (**5**) aus Siliziumoxid.

3. Spiralfeder nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spiralfeder in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) aus zumindest sechs Schichten aufgebaut ist, nämlich aus

- einer ersten, äußeren Schicht (**1**) aus Siliziumoxid,
- einer sechsten, auf der ersten Schicht (**1**) aus Siliziumoxid angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die sechste Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht,

- einer auf der sechsten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten zweiten Schicht (**2**) aus poly-

kristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht (2) aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) besteht,
 – einer dritten, auf der zweiten Schicht (2) aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht (3) aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht (3) aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (9) besteht,
 – einer auf der dritten Schicht (3) aus polykristallinem Silizium angeordneten vierten Schicht (4) aus polykristallinem Silizium, wobei die vierte Schicht (4) aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) besteht,
 – einer auf der vierten Schicht (4) aus polykristallinem Silizium angeordneten fünften, äußeren Schicht (5) aus Siliziumoxid.

4. Spiralfeder nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spiralfeder in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) aus zumindest sieben Schichten aufgebaut ist, nämlich aus
 – einer ersten, äußeren Schicht (1) aus Siliziumoxid,
 – einer sechsten, auf der ersten Schicht (1) aus Siliziumoxid angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die sechste Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht,
 – einer auf der sechsten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten zweiten Schicht (2) aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht (2) aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) besteht,
 – einer dritten, auf der zweiten Schicht (2) aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht (3) aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht (3) aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (9) besteht,
 – einer auf der dritten Schicht (3) aus polykristallinem Silizium angeordneten vierten Schicht (4) aus polykristallinem Silizium, wobei die vierte Schicht (4) aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) besteht,
 – einer siebten, auf der vierten Schicht (4) aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht aus polykristallinem Silizium, wobei die siebte Schicht aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen besteht,
 – einer auf der siebten Schicht aus polykristallinem Silizium angeordneten fünften, äußeren Schicht (5) aus Siliziumoxid.

5. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spiralfeder in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) zumindest eine weitere aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (9) bestehende Schicht und zumindest eine weitere aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) bestehende Schicht aufweist, wobei die weitere aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (9) bestehende Schicht zwischen zwei aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) bestehenden Schichten angeordnet ist und die weitere aus anisotropen Silizium-Kristallen (9) bestehende Schicht zwischen zwei aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (8) bestehenden Schichten angeordnet ist.

6. Spiralfeder nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spiralfeder in einer Richtung parallel zur Spiralfederachse (A) n weitere aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (9) bestehende Schichten und n weitere aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) bestehende Schichten aufweist, wobei jede weitere aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (9) bestehende Schicht zwischen zwei aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) bestehenden Schichten angeordnet ist und jede weitere aus anisotropen Silizium-Kristallen (9) bestehende Schicht zwischen zwei aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (8) bestehenden Schichten angeordnet ist, wobei $n \leq 200$, insbesondere $n \leq 150$, besonders bevorzugt $n \leq 100$ ist.

7. Spiralfeder nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ ist.

8. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste (1) und/oder die fünfte (5) Schicht aus Siliziumoxid eine Dicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 2 μm bis 8 μm aufweist.

9. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (9) bestehenden Schichten eine Dicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 200 nm bis 50 μm aufweisen.

10. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) bestehenden Schichten eine Dicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 2 μm bis 300 μm aufweisen.

11. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die anisotropen Silizium-Kristalle (8) einen Durchmesser parallel zur Spiralfederebene (E) von 10 nm bis 30000 nm und eine Höhe parallel zur Spiralfederachse (A) von 0,5 μm bis 50 μm aufweisen.

12. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die anisotropen Silizium-Kristalle (8) einen Durchmesser parallel zur Spiralfederebene (E) von 20 nm bis 5000 nm und eine Höhe parallel zur Spiralfederachse (A) von 5 μm bis 20 μm aufweisen.

13. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristalle (9) einen Durchmesser von 1 nm bis 10000 nm aufweisen.

14. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass die im Wesentli-

chen isotropen Silizium-Kristalle (9) einen Durchmesser von 20 nm bis 4000 nm, bevorzugt 50 nm bis 1000 nm aufweisen.

15. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Fläche einer die Spiralfederachse (A) beinhaltenden Schnittebene einer Windung der Spiralfeder von 0,001 mm² bis 0,01 mm² beträgt.

16. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Höhe der Spiralfeder parallel zur Spiralfederachse (A) von 0,05 mm bis 0,3 mm beträgt.

17. Verfahren zur Herstellung einer Spiralfeder für mechanische Uhrwerke mit den Schritten

a) Bereitstellen eines Silizium-Wafers (10), wobei der Silizium-Wafer (10) eine Opferschicht aus Siliziumdioxid (10.1) aufweist,

b) Durchführung eines LPCVD-Verfahrens zur Ausbildung einer ersten (11), auf der Siliziumdioxid-Opferschicht (10.1) angeordneten Schicht (11) aus polykristallinem Silizium, wobei die erste Schicht (11) aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (9) besteht,

c) Durchführung eines CVD-Verfahrens zur Ausbildung einer auf der ersten Schicht (11) aus polykristallinem Silizium angeordneten zweiten Schicht (12) aus polykristallinem Silizium, wobei die zweite Schicht (12) aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) besteht,

d) Durchführung eines LPCVD-Verfahrens zur Ausbildung einer dritten, auf der zweiten Schicht (12) aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht (13) aus polykristallinem Silizium, wobei die dritte Schicht (13) aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (9) besteht,

e) Durchführung eines CVD-Verfahrens zur Ausbildung einer auf der dritten Schicht (13) aus polykristallinem Silizium angeordneten vierten Schicht (14) aus polykristallinem Silizium, wobei die vierte Schicht (14) aus anisotropen Silizium-Kristallen (8) besteht,

f) Durchführung eines LPCVD-Verfahrens zur Ausbildung einer fünften, auf der vierten Schicht (14) aus polykristallinem Silizium angeordneten Schicht (15) aus polykristallinem Silizium, wobei die fünfte Schicht (15) aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen (9) besteht,

g) Strukturierung der Spiralfeder durch ein materialabtragendes Ätz- oder Schneideverfahren,

h) Ablösen der Spiralfeder von dem Silizium-Wafer (10) durch Auflösen der Opferschicht (10.1) aus Siliziumdioxid mit Hilfe eines Ätzverfahrens,

i) Durchführung einer Oxidation zur Erzeugung einer zumindest eine sechste und eine siebte Schicht aus Siliziumoxid umfassenden Siliziumoxid-Oberflächenbeschichtung der Spiralfeder, wobei die Ausbildung der sechsten Schicht aus Siliziumoxid unter Auflösung zumindest eines Teils der ersten aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehenden

Schicht (11) erfolgt und die Ausbildung der siebten Schicht aus Siliziumoxid unter Auflösung zumindest eines Teils der fünften aus im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristallen bestehenden Schicht (15) erfolgt.

18. Verfahren nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass das LPCVD-Verfahren für einen Zeitraum ausgeführt wird, in dem sich eine Schicht (11, 13, 15) aus polykristallinem Silizium mit einer Dicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 0,2 µm bis 1 µm ausbildet.

19. Verfahren nach Anspruch 17 oder 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass das CVD-Verfahren für einen Zeitraum ausgeführt wird, in dem sich eine Schicht (12, 14) aus polykristallinem Silizium mit einer Dicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 2 µm bis 300 µm ausbildet.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Oxidation für einen Zeitraum ausgeführt wird, in dem sich eine Schicht aus Siliziumoxid mit einer Dicke parallel zur Spiralfederachse (A) von 2 µm bis 8 µm ausbildet.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass die anisotropen Silizium-Kristalle (8) einen Durchmesser parallel zur Spiralfederebene (E) von 10 nm bis 30000 nm und eine Höhe parallel zur Spiralfederachse (A) von 0,5 µm bis 50 µm aufweisen.

22. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass die anisotropen Silizium-Kristalle (8) einen Durchmesser parallel zur Spiralfederebene (E) von 20 nm bis 5000 nm und eine Höhe parallel zur Spiralfederachse (A) von 5 µm bis 20 µm aufweisen.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass die im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristalle (9) einen Durchmesser von 1 nm bis 10000 nm aufweisen.

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass die im Wesentlichen isotropen Silizium-Kristalle (9) einen Durchmesser von 20 nm bis 4000 nm, bevorzugt 50 nm bis 1000 nm aufweisen.

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 24, **dadurch gekennzeichnet**, dass das CVD-Verfahren bei einer Prozesstemperatur zwischen 600°C und 1200°C, bevorzugt zwischen 960°C und 1060°C ausgeführt wird.

26. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 25, **dadurch gekennzeichnet**, dass das CVD-Verfahren bei einem Prozessdruck zwischen $2,7 \cdot 10^3$ Pa und $13,3 \cdot 10^3$ Pa ausgeführt wird.

27. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 26, **dadurch gekennzeichnet**, dass das LPCVD-Verfahren und/oder das CVD-Verfahren unter Verwendung von Silan oder Dichlorsilan als Prozessgas durchgeführt werden.

28. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 27, **dadurch gekennzeichnet**, dass das CVD-Verfahren mit einem gegenüber dem LPCVD-Verfahren erhöhten Gasfluss, einem erhöhten Prozessdruck und einer erhöhten Prozesstemperatur durchgeführt wird.

29. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 28, **dadurch gekennzeichnet**, dass das CVD-Verfahren bei Prozessparametern durchgeführt wird, die zur Abscheidung einer Schichtdicke von 1 µm bis 5 µm pro Minute führen.

30. Spiralfeder für eine mechanische Uhr, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spiralfeder nach einem Verfahren gemäß den Ansprüchen 17 bis 29 hergestellt ist.

31. Mechanische Uhr mit einer Spiralfeder gemäß einem der Ansprüche 1 bis 16.

32. Mechanische Uhr mit einer Spiralfeder gemäß Anspruch 28.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

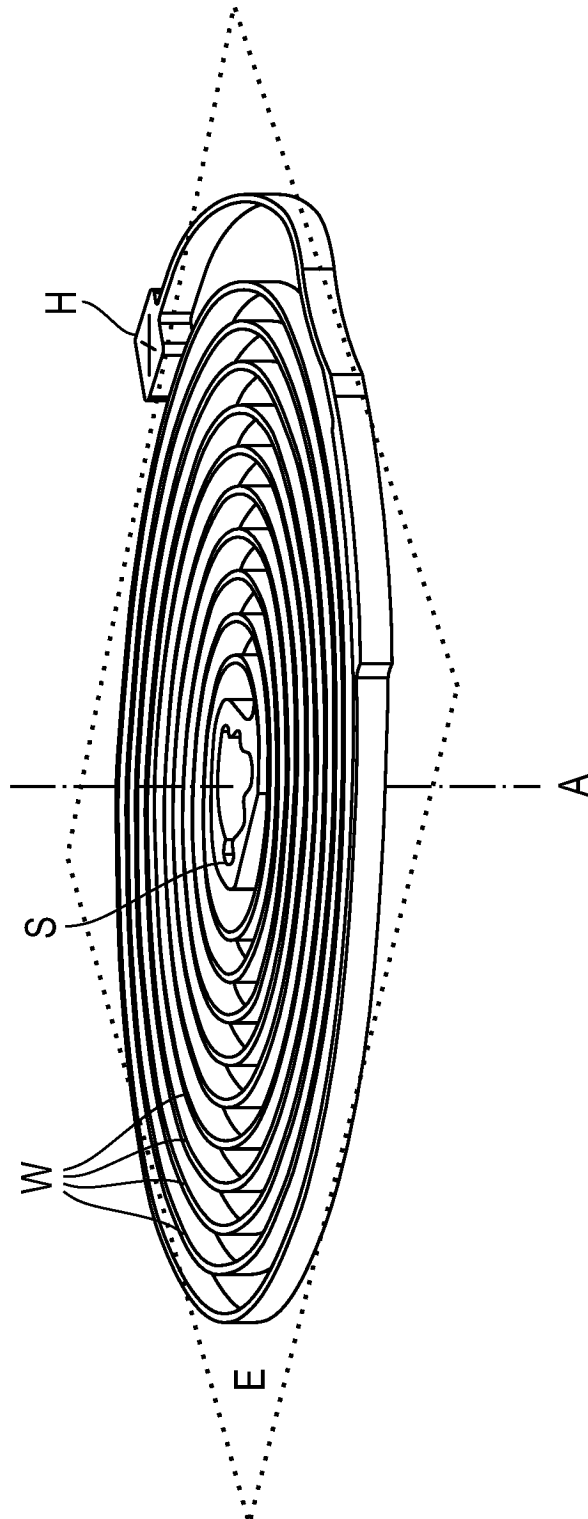


Fig. 2

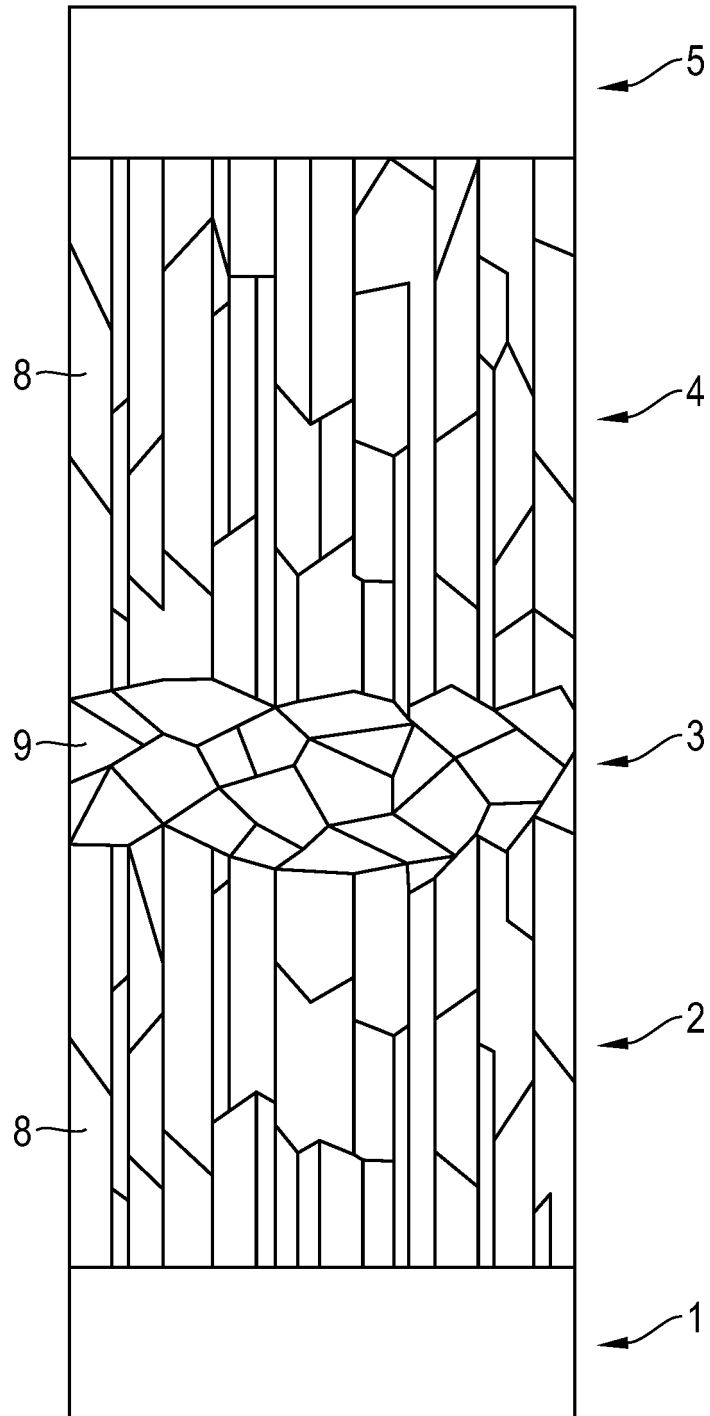


Fig. 3

