



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 06 939 T2 2006.07.27**

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 422 436 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 06 939.4**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 026 147.5**

(96) Europäischer Anmeldetag: **25.11.2002**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **26.05.2004**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **26.10.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **27.07.2006**

(51) Int Cl.⁸: **F16F 1/10 (2006.01)**

F16F 1/02 (2006.01)

G04B 1/14 (2006.01)

(73) Patentinhaber:

**CSEM Centre Suisse d'Electronique et de
Microtechnique S.A., Neuchatel, CH**

(74) Vertreter:

Dr. Gassner & Partner, 91052 Erlangen

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,
GR, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR**

(72) Erfinder:

**Bourgeois, Claude, 2014 Bôle, CH; Perret, Andre,
2206 Les Geneveys-sur-Coffrane, CH;
Hoogerwerf, Arnold Christiaan, 2036
Cormondreche, CH**

(54) Bezeichnung: **Spiraluhrwerkfeder und Verfahren zu deren Herstellung**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft das Regulierorgan von Uhrwerken, die so genannte Spiralunruh. Insbesondere betrifft sie einerseits eine zur Ausrüstung der Unruh eines mechanischen Uhrwerks bestimmte Spiralfeder, und andererseits ein Verfahren zur Herstellung dieser Spiralfeder.

[0002] Bezugnehmend auf die vorgängige, am 7. Juni 2001 eingereichte Patentanmeldung DE-A-101 27 733, hat der Anmelder aus eigenem Antrieb die Tragweite der vorliegenden Patentanmeldung eingeschränkt und für Deutschland separate Patentansprüche aufgeführt.

[0003] Das Regulierorgan der mechanischen Uhren besteht aus einem Schwungrad, der so genannten Unruh, und einer spiralförmigen Feder, die so genannte Spiralfeder oder Spirale, die an einem Ende an der Unruhwelle, und am anderen Ende an einer Brücke, dem so genannten Unruhkloben befestigt ist, in dem die Unruhwelle gelagert ist.

[0004] Die Spiralunruh schwingt um ihre Gleichgewichtsposition, bzw. ihren Totpunkt. Beim Verlassen dieser Position bewirkt die Unruh das Vorspannen der Spirale, wodurch ein Rückholdrehmoment erzeugt wird, das die Spirale, nach ihrer Freigabe, zur Rückkehr in ihre Gleichgewichtsposition veranlasst. Da der Unruh hiermit eine gewisse Geschwindigkeit und damit eine kinetische Energie verliehen wird, schwingt sie über ihren Totpunkt hinaus, bis das Gegendrehmoment der Spirale sie anhält und zum Rückschwingen zwingt. Die Spirale reguliert somit die Schwingungsperiode der Unruh.

[0005] Genauer betrachtet, ist die bisher in mechanische Uhrwerke eingebaute Spiralfeder ein um 12 bis 15 Windungen in Form einer Archimedesspirale aufgerolltes elastisches Metallband mit rechteckigem Querschnitt. Es sei daran erinnert, dass die Spirale im Wesentlichen durch ihr Rückholdrehmoment gekennzeichnet ist, das in erster Annäherung durch folgende Formel ausgedrückt wird:

$$M = E/L(w^3 \cdot t/12 \cdot \varphi)$$

wobei

- E: Elastizitätsmodul des Bandes [N/m²]
- t: Dicke der Spiralfeder
- w: Breite der Spiralfeder
- L: Länge der Spiralfeder
- φ : Torsionswinkel (Rotation der Unruhwelle)

[0006] Verständlicherweise muss die Rückholkonstante bzw. Steifigkeit einer Spirale

$$C = M/\varphi,$$

die das Rückholdrehmoment je Torsionswinkeleinheit kennzeichnet, unter jeder Bedingung, insbesondere betreffend Temperatur und Magnetfeld, möglichst konstant sein.

[0007] Derzeitig werden komplexe Legierungen verwendet, sowohl aufgrund der Anzahl der Komponenten (Eisen, Kohlenstoff, Nickel, Chrom, Wolfram, Molybdän, Beryllium, Niobium ...), als auch der angewandten metallurgischen Verfahren. Angestrebt wird die Erzielung eines Selbstaussgleichs der Elastizitätsmodulschwankungen des Metalls durch Kombination zweier gegensätzlicher Einflüsse, bzw. jene der Temperatur und der magnetischen Konstriktion (Kontraktion der magnetischen Körper bei deren Magnetisierung).

[0008] Die heutigen Metallspiralen sind schwierig herzustellen. Zuerst, weil die spezifischen mechanischen Eigenschaften des Metalls infolge der Komplexität der zur Erzeugung der Legierungen angewandten Verfahren von einer Produktion zur anderen nicht konstant sind, und dann, weil die Einregulierung, d. h. die zur Erzielung einer jederzeit möglichst genauen Uhrzeitanzeige angewandte Technik umständlich und zeitraubend ist, wobei Arbeitsgänge mit zahlreichen manuellen Eingriffen notwendig sind und viele fehlerhafte Teile zum Ausschuss gezählt werden müssen. Aus diesen Gründen ist die Produktion kostspielig und die Aufrechterhaltung eines hohen Qualitätsniveaus eine ständige Herausforderung.

[0009] Des Weiteren ist das Dokument JP-A-06117470 bekannt. Darin ist eine aus Einkristallsilizium hergestellte spiralförmige Feder beschrieben, die so dimensioniert ist, dass sie eine konstante Rückholkonstante aufweist, um ein hochgenaues elektrisches Messgerät auszurüsten. Dieses Dokument lässt allemal nichts

über die Temperaturstabilität der Rückholkonstante dieser Feder verlauten, die deshalb auch nicht direkt als Spiralfeder in einem Uhrwerk verwendbar ist.

[0010] Mit der vorliegenden Erfindung wird zwecks Behebung dieser Nachteile eine Spirale vorgeschlagen, deren Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen und Magnetfeldern auf ein Minimum reduziert ist. Zudem unterliegen die ausgelieferten Spiralen, dank fertigungstechnischer Verfahren, die eine vollkommene Nachvollziehbarkeit gewährleisten, keinen Qualitätsschwankungen.

[0011] Genauer betrachtet, betrifft die Erfindung eine zur Ausrüstung der Unruh eines mechanischen Uhrwerks bestimmte Spiralfeder, die durch ein spiralförmiges Federstäbchen gebildet wird, dessen Windungen eine Breite w und eine Dicke t aufweisen. Dieses Federstäbchen umfasst eine Seele aus Silizium und eine diese umschließende Außenschicht der Dicke ξ , die aus einem Material besteht, das einen ersten, dem Silizium entgegengesetzten Temperaturkoeffizienten des Elastizitätsmoduls aufweist.

[0012] Erfindungsgemäß ist das Maßverhältnis ξ/w so bestimmt, dass ein erster Temperaturkoeffizient (C_1) der Rückholkonstante (C) von vorbestimmtem Wert erzielt wird.

[0013] Vorteilhafterweise ist die Außenschicht aus amorphem Siliziumoxid (SiO_2) hergestellt.

[0014] Das Maßverhältnis ξ/w ist so bestimmt, dass der erste Temperaturkoeffizient (C_1) der Rückholkonstante (C) minimalisiert wird, und entspricht vorzugsweise ungefähr 6% der Breite w des Federstäbchens.

[0015] Zur Minimalisierung des zweiten Temperaturkoeffizienten (C_2) ist die Breite w des Federstäbchens in Abhängigkeit des die Orientierung jedes seiner Punkte in Polarkoordinaten bestimmenden Winkels θ periodisch moduliert. Vorteilhafterweise kann die Modulation auch so ausgeführt werden, dass die örtliche Biegesteifigkeit des Federstäbchens konstant ist.

[0016] Zur Optimierung des Temperaturverhaltens der Spiralfeder weisen die Dicke t des Federstäbchens, seine in der Spiralebene modulierte Breite w und die Dicke ξ der Siliziumoxidschicht Werte auf, für welche die Temperaturdrift der Rückholkonstante C innerhalb eines gegebenen Temperaturbereichs minimal ist.

[0017] Die Erfindung betrifft ebenfalls ein Verfahren zur Bestimmung der optimalen Abmessungen der eben definierten Spiralfeder. Dieses Verfahren umfasst die nachstehende Schrittfolge:

- Mathematische Formulierung der Steifigkeit der Spiralfeder in Abhängigkeit ihrer Dicke t , ihrer in der Spiralebene modulierten Breite w und der Dicke ξ der Siliziumoxydschicht, sowie der elastischen Anisotropie des Siliziums und der Temperatur,
- Berechnung des Temperaturverhaltens, bzw. insbesondere der zwei ersten Temperaturkoeffizienten (C_1 und C_2) der Rückholkonstante der Spiralfeder, für sämtliche möglichen Wertekombinationen der Parameter t , w , ξ innerhalb eines gegebenen Temperaturbereichs, und
- Aussonderung der Kombinationen von t , w , ξ , für welche die Temperaturdriften dieser Koeffizienten minimal sind.

[0018] Zum leichteren Verständnis der Erfindung soll die nachstehende Beschreibung beitragen, die der beigelegten Zeichnung gegenübersteht, deren Abbildungen folgendes veranschaulichen:

[0019] [Abb. 1](#) stellt eine erfindungsgemäße Spiralfeder dar,

[0020] [Abb. 2](#) zeigt in a ein Segment und in b einen Querschnitt dieser Spirale zur Veranschaulichung der in der Beschreibung verwendeten Parameterreferenzen, und

[0021] [Abb. 3](#) veranschaulicht die Anisotropie des Elastizitätsmoduls in der Ebene {001} des Siliziums.

[0022] Die erfindungsgemäße, in den [Abb. 1](#) und 2 in **10** dargestellte Spirale ist ein spiralförmiges Federstäbchen, das beispielsweise im Plasma-Bearbeitungsverfahren aus einer Platte {001} aus Einkristallsilizium herausgeschnitten wurde. Dieser Werkstoff ist unmagnetisch und beliebig gestaltbar sowie bei geringen Kosten herstellbar.

[0023] Leider muss festgestellt werden, dass es schwierig ist, eine Spiralfeder aus Silizium mit konstanter Rückholkonstante C zu erzielen, denn das Elastizitätsmodul E des Federstäbchens wird stark von der Temperatur beeinflusst. Es ist also unbedingt notwendig, diese Einwirkung auszugleichen.

[0024] Bei der Darstellung der Temperaturempfindlichkeit einer elastischen Struktur im mathematischen Modell, werden üblicherweise die Temperaturkoeffizienten der Rückholkonstante C dieser Struktur eingesetzt, und zwar so, wie sie in einer mathematischen Reihe des folgenden Typs erscheinen

$$C = C_0(1 + C_1\Delta T + C_2\Delta T^2 \dots),$$

wobei C_0 der Nennwert der Rückholkonstante C , und C_1 und C_2 deren erster, respektive zweiter Temperaturkoeffizient sind. Es werden hier nur die beiden ersten Koeffizienten einberechnet, da die nachfolgenden vernachlässigbar sind.

[0025] Es ist also verständlich, dass zur Erzielung einer möglichst temperaturunempfindlichen Rückholkonstante C eine Minimalisierung der Temperaturkoeffizienten C_1 und C_2 angestrebt wird.

[0026] Es soll daran erinnert werden, dass Einkristallsilizium eine Kristallanisotropie aufweist, wobei es in der Ebene $\{001\}$ in Richtung $\langle 110 \rangle$ starrer als in Richtung $\langle 100 \rangle$ ist, was selbstverständlich die Biegesteifigkeit der Spirale **10** beeinflusst.

[0027] Das Elastizitätsmodul $E^{(a)}$ der Ebene $\{001\}$ des Siliziums kann, wie im Fall der Rückholkonstante, durch eine mathematische Reihe des folgenden Typs ausgedrückt werden

$$E^{(a)} = E_0^{(a)}(1 + E_1^{(a)}\Delta T + E_2^{(a)}\Delta T^2),$$

wobei $E_0^{(a)}$ der Nennwert des Elastizitätsmoduls $E^{(a)}$, und $E_1^{(a)}$ und $E_2^{(a)}$ dessen erster, respektive zweiter Temperaturkoeffizient sind. Diese drei Koeffizienten sind insbesondere in der [Abb. 3](#) in Abhängigkeit der Orientierung in Bezug auf die kristallographischen Achsen dargestellt.

[0028] Der erste Temperaturkoeffizient $E_1^{(a)}$ des Elastizitätsmoduls ist stark negativ (ungefähr -60 ppm/ $^{\circ}\text{C}$) und der Nennwert des Elastizitätsmoduls $E_0^{(a)}$ beträgt 148 GPa in Richtung $\langle 100 \rangle$ der Ebene $\{001\}$. Die Temperaturdrift einer Spiralfeder aus Silizium beträgt somit ungefähr 155 Sekunden/Tag im uhrentechnischen Bereich von $23^{\circ} \pm 15^{\circ}\text{C}$ und ist somit nicht vereinbar mit den uhrentechnischen Anforderungen, die in der Größenordnung von 8 Sekunden/Tag liegen.

[0029] Um diese Drift auszugleichen, besteht die erfindungsgemäße Spirale **10** aus einer Seele **12** aus Silizium und einer Außenschicht **14** aus SiO_2 , deren erster Temperaturkoeffizient $E_1^{(b)}$ stark positiv ist. Er beträgt ungefähr $+215$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ und der Steifigkeitsnennwert $E_0^{(b)}$ ungefähr $72,4$ Gpa.

[0030] Diese durch thermische Oxidierung nach irgendeinem bekannten Verfahren erhaltene symmetrische Dreiblattstruktur ermöglicht demnach, auf die Temperaturstabilität der Gesamtsteifigkeit der Spirale in der planaren Biegeebene einzuwirken.

[0031] Es kann aufgezeigt werden, dass bei einer in der Ebene $\{001\}$ ausgeschnittenen Spiralfeder eine optimale Minimalisierung des ersten Temperaturkoeffizienten C_1 der Rückholkonstante der Spirale bei einer ungefähr 6% der Spiralfederbreite betragenden Dicke der Oxidschicht **14** erzielt wird.

[0032] Erfindungsgemäß kann die Minimalisierung des zweiten Temperaturkoeffizienten C_2 durch Modulation der Breite w der Spirale (entsprechend deren Abmessung in ihrer Abrollebene) in Abhängigkeit des entsprechenden, die Orientierung jedes der Spiralpunkte in Polarkoordinaten kennzeichnenden Winkels θ erzielt werden.

[0033] Wie in der [Abb. 1](#) ersichtlich, kann die Modulation realisiert werden, indem die Spirale in der steiferen Richtung $\langle 110 \rangle$ dünner und in der weniger steifen Richtung $\langle 100 \rangle$ dicker bemessen wird. Damit kann die Anisotropie des Siliziums ausgeglichen und eine konstante örtliche Biegesteifigkeit erzielt werden, wobei von einer elastisch ausgewogenen Spirale die Rede ist.

[0034] Wird in diesem besonderen Fall mit w_0 eine Bezugsbreite der Spirale in der Ebene $\{001\}$ bezeichnet, variiert die Breite w in Abhängigkeit des Winkels θ nach folgender Verhältnismäßigkeit:

$$w = w_0 \sqrt[3]{1 - \frac{1 - \frac{\bar{S}_{12.0}}{\bar{S}_{11.0}} - \frac{1}{2} \frac{\bar{S}_{44.0}}{\bar{S}_{11.0}}}{2} \sin^2(2\theta)} \quad [\text{in m}]$$

wobei \bar{s}_{11} , \bar{s}_{44} , \bar{s}_{12} die drei dem Fachmann bekannten unabhängigen Elastizitätskoeffizienten des Siliziums in den kristallographischen Achsen sind, wie sie in der Publikation von C. Bourgeois und Al. "Design of resonators for the determination of the Temperature Coefficient of Elastic Constants of Monocrystalline Silicon" (Proc. 51th Annual Frequency Control Symposium, 1997, 791–799) definiert sind.

[0035] Im konkreteren Sinn ist es leicht verständlich, dass mehrere Parameter in untereinander abhängiger Weise mitwirken, und dass beispielsweise die mit einer gewissen Modulation der Breite w erzielte Verbesserung des Temperaturverhaltens nicht für alle Oxiddicken und Kristallorientationen der Spirale identisch sein wird.

[0036] Um die Bestimmung der Optimalwerte der verschiedenen Parameter zu erleichtern, besteht das erfindungsgemäße Verfahren darin, beispielsweise die Variabilität der Temperaturkoeffizienten der Rückholkonstante C einer Spirale wie die oben beschriebene, in Abhängigkeit dieser Parameter zu untersuchen.

[0037] Die bei der Bestimmung von C einbezogenen Parameter sind das Elastizitätsmodul $E^{(a)}$ des Siliziums, das Elastizitätsmodul $E^{(b)}$ des Siliziumoxids und die in der **Abb. 2** veranschaulichten geometrischen Größen

- t = Spiraldicke (konstant) [m]
- w = Spiralbreite in der Ebene $\{001\}$ [m]
- ξ = Oxiddicke (konstant) [m]

[0038] Gemäß der Theorie der Mehrblattstrukturen kann das äquivalente Elastizitätsmodul E der Biegesteifigkeit eines mit einer Siliziumoxydschicht überzogenen Siliziumstäbchens an einem örtlichen Querschnitt in einem mathematischen Modell nach folgender Verhältnismäßigkeit ausgedrückt werden

$$E = \left(E^{(a)} - E^{(b)} \right) \left(1 - \frac{2\xi}{w} \right)^3 \left(1 - \frac{2\xi}{t} \right) + E^{(b)}$$

[0039] Da, im Fall der Spirale 10, $\xi/w \ll 1$ und $\xi/t \ll 1$, wird die Gleichung

$$E = E^{(a)} - \left(E^{(a)} - E^{(b)} \right) \left(\frac{6\xi}{w} + \frac{2\xi}{t} \right)$$

[0040] Die Bestimmung der Rückholkonstante C der Spiralfeder und ihrer zwei ersten Temperaturkoeffizienten C_1 und C_2 erfolgt durch Integration, über die gesamte Spirallänge, der mathematischen Formulierung der örtlichen Spiralsteifigkeit, die ihrerseits im Abhängigkeitsverhältnis zu den mathematischen Formulierungen von E , t , w und ξ steht.

[0041] Dabei kann aufgezeigt werden, dass der erste Temperaturkoeffizient C_1 im Wesentlichen von ξ , respektive der zweite Temperaturkoeffizient C_2 vorwiegend von w abhängt.

[0042] In der Folge brauchen nur noch, mittels eines Computers, die jeweiligen Werte der Temperaturkoeffizienten C_1 und C_2 für alle der möglichen Wertekombinationen der Parameter t , w , ξ errechnet zu werden. Die Dreiergruppen t , w , ξ , für welche die Temperaturdrift der Rückholkonstante C der Spiralfeder innerhalb einer gegebenen Temperaturspanne minimal ist, werden aus der Gesamtheit der möglichen Wertkombinationen extrahiert.

[0043] Es kann nun die Dreiergruppe ausgewählt werden, die jener Spirale entspricht, deren durch die bereits gegebene Formel errechnete Rückholkonstante C am besten für die vorgesehene uhrentechnischen Anwendung geeignet ist.

[0044] Schließlich kann die Spirale gemäß den aus der Berechnung hervorgegangenen Angaben hergestellt werden.

[0045] Damit ergibt sich ein Lösungsvorschlag für eine Siliziumspirale, die eine auf das Minimum reduzierte Temperaturempfindlichkeit aufweist und eine einbaufertige Einheit bildet, die weder irgendwelche Regulierungs-, noch anderweitigen besonderen Handeingriffe erfordert.

[0046] Die vorangehende Beschreibung ist nur ein spezielles, bzw. nicht einschränkendes Beispiel einer er-

findungsgemäßen Spirale auf Siliziumbasis. So führt denn auch der allein durch die Oxidschicht erzielte Temperaturengleich zu einem zufriedenstellenden Ergebnis hinsichtlich einer Verwendung in Uhren der Mittelklasse, wobei die Modulation der Breite w fakultativ ist.

Patentansprüche

1. Zur Ausrüstung der Unruh einer mechanischen Uhr bestimmte Spiralfeder, die aus einem spiralförmigen, durch Ausschneiden aus einer Einkristall-Siliziumplatte {001} erhaltenen Stab (**10**) gebildet wird, der einen ersten (C_1) und einen zweiten (C_2) Temperaturkoeffizient der Rückholkonstante C der von ihm gebildeten Spiralfeder aufweist, deren Windungen eine Breite w und eine Dicke t aufweisen, wobei der besagte Stab einen Kern (**12**) aus Silizium und eine diesen Kern aus Silizium umschließende, eine Dicke ξ aufweisende Außenschicht (**14**) umfasst, die aus einem Material besteht, das einen ersten Temperaturkoeffizienten des Young-Moduls mit einem dem Silizium entgegengesetzten Vorzeichen aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Maßverhältnis ξ/w so bestimmt ist, dass ein erster Temperaturkoeffizient (C_1) ihrer Rückholkonstante C mit einem vorbestimmten Wert erhalten wird.

2. Spiralfeder nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die besagte Außenschicht (**14**) aus amorphem Siliziumoxid (SiO_2) erzeugt wird.

3. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Maßverhältnis ξ/w so bestimmt ist, dass der erste Temperaturkoeffizient (C_1) ihrer Rückholkonstante C auf ein Minimum reduziert wird.

4. Spiralfeder nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Maßverhältnis ξ/w ungefähr 0,06 beträgt.

5. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Breite des besagten Stabes periodisch in Abhängigkeit des die Orientierung jedes ihrer Punkte in Polarkoordinaten bestimmenden Winkels θ moduliert ist, um den zweiten Temperaturkoeffizienten (C_2) auf ein Minimum zu reduzieren.

6. Spiralfeder nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Breite des besagten Stabes so moduliert ist, dass seine örtliche Biegesteifigkeit konstant ist, um den zweiten Temperaturkoeffizienten (C_2) auf ein Minimum zu reduzieren.

7. Spiralfeder nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Breitenmodulation nach folgender Formel umgesetzt wird

$$w = w_0 \sqrt[3]{1 - \frac{1 - \frac{\bar{s}_{12,0}}{\bar{s}_{11,0}} - \frac{1}{2} \frac{\bar{s}_{44,0}}{\bar{s}_{11,0}}}{2} \sin^2(2\theta)}$$

worin s_{11} s_{44} s_{22} die drei unabhängigen Elastizitätskoeffizienten des Siliziums in den kristallographischen Achsen sind.

8. Spiralfeder nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass zur Minimalisierung des ersten (C_1) und des zweiten (C_2) Temperaturkoeffizienten die Dicke t des Stabes, seine Breite w in der Ebene {100} und die Dicke ξ der Siliziumoxidschicht Werte aufweisen, für welche die Temperaturdrift der Rückholkonstante C der Spiralfeder innerhalb eines gegebenen Zeitintervalls ein Minimum beträgt.

9. Verfahren zur Bestimmung der optimalen Abmessungen der Spiralfeder nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass es darin besteht, nacheinander:

– die Steifigkeit der Spiralfeder in Abhängigkeit ihrer Dicke t , ihrer in der Spiralebene modulierten Breite w , der Dicke ξ der Siliziumoxidschicht, der elastischen Anisotropie des Siliziums und der Temperatur mathematisch auszudrücken;

– das Temperaturverhalten, insbesondere der beiden ersten Koeffizienten (C_1 , C_2) der Rückholkonstante der Spiralfeder für alle möglichen Wertekombinationen der Parameter t , w , ξ in einem gegebenen Temperaturbereich zu berechnen; und

– die Kombinationen von t , w , ξ festzuhalten, für welche die Temperaturdriften der besagten Koeffizienten (C_1 , C_2) minimal sind.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass es schließlich darin besteht, die Breite w der Spiralfeder in jedem Punkt mit der Formel

$$w = w_0 \sqrt[3]{1 - \frac{1 - \frac{\bar{s}_{12,0}}{\bar{s}_{11,0}} - \frac{1}{2} \frac{\bar{s}_{44,0}}{\bar{s}_{11,0}}}{2} \sin^2(2\theta)}$$

zu berechnen, worin s_{11} s_{44} s_{12} die drei unabhängigen Elastizitätskoeffizienten des Siliziums in den kristallographischen Achsen sind.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

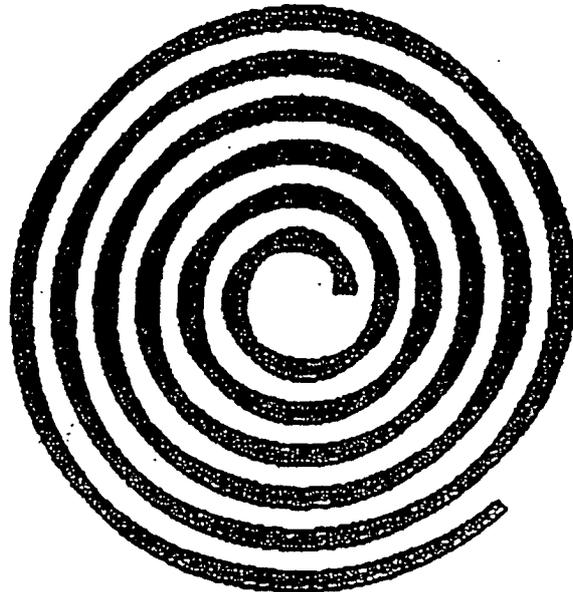


Figure 1

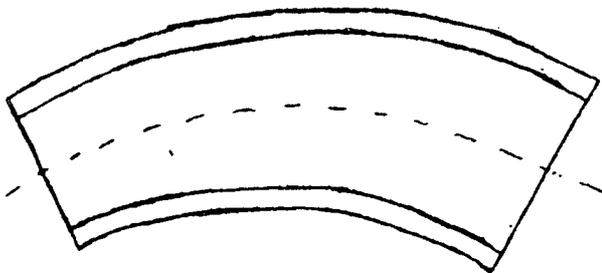


Figure 2a

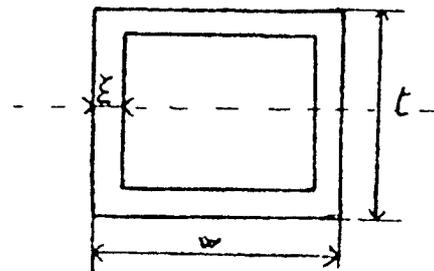


Figure 2b

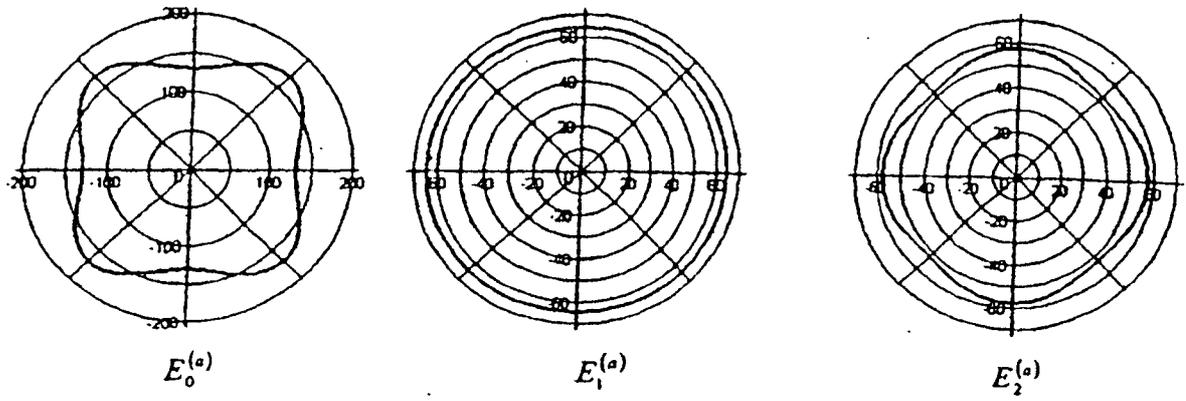


Figure 3