



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014149549/28, 09.12.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.12.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.12.2014

(45) Опубликовано: 10.04.2016 Бюл. № 10

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2147117 С1, 27.03.2000. RU 2362121 С2, 20.07.2009. US 6282958 В1, 04.09.2001. US 20100154542 А1, 24.06.2010.

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, (для
руководителя НУК ИУ Матвеева В.А.)

(72) Автор(ы):

Лунин Борис Сергеевич (RU),
Басараб Михаил Алексеевич (RU),
Матвеев Валерий Александрович (RU),
Чуманкин Евгений Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана" (МГТУ
им. Н.Э. Баумана) (RU)

(54) СПОСОБ БАЛАНСИРОВКИ КВАРЦЕВОГО ПОЛУСФЕРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

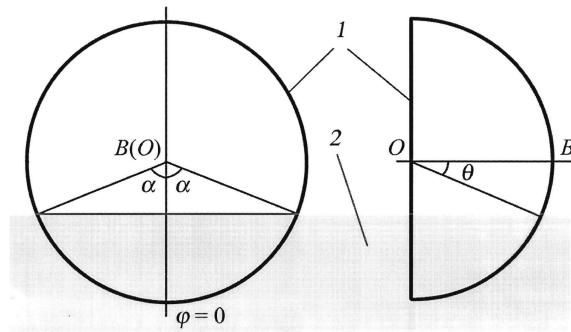
(57) Реферат:

Изобретение относится к балансировке кварцевых полусферических резонаторов твердотельных волновых гироскопов (ВТГ) и может быть использовано при производстве навигационных приборов различного назначения. Способ балансировки кварцевого полусферического резонатора волнового твердотельного гироскопа по предварительно определенным величинам параметров первых четырех форм массового дефекта резонатора заключается в том, что кварцевый полусферический резонатор радиуса R устанавливают в положение, при котором ось его

симметрии горизонтальна, а единый нуль окружного угла находится в нижнем положении, поворачивают резонатор вокруг оси симметрии на угол $\Delta\varphi$ относительно единого нуля окружного угла и в этом положении частично погружают резонатор в травильный раствор, устанавливая удвоенный зенитный угол сферического сегмента обрабатываемой поверхности 2α , а затем проводят химическое травление в течение времени t . Технический результат - уменьшение времени и трудоемкости процесса балансировки кварцевых полусферических резонаторов по первым 4-м формам массового дефекта. 4 з.п. ф-лы, 1 ил.

RU 2 580 175 С1

RU 2 580 175 С1



Фиг. 1

RU 2580175 C1

RU 2580175 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2014149549/28, 09.12.2014

(24) Effective date for property rights:
09.12.2014

Priority:

(22) Date of filing: 09.12.2014

(45) Date of publication: 10.04.2016 Bull. № 10

Mail address:

105005, Moskva, ul. 2-ja Baumanskaja, 5, str. 1,
MGTU im. N.E. Baumana, TSZIS, (dlja
rukovoditelja NUK IU Matveeva V.A.)

(72) Inventor(s):

Lunin Boris Sergeevich (RU),
Basarab Mikhail Alekseevich (RU),
Matveev Valerij Aleksandrovich (RU),
CHumankin Evgenij Alekseevich (RU)

(73) Proprietor(s):

federalnoe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
professionalnogo obrazovanija "Moskovskij
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni
N.E. Baumana" (MGTU im. N.E. Baumana)
(RU)

(54) **METHOD OF BALANCING QUARTZ HEMISPHERICAL RESONATOR OF SOLID-STATE WAVE GYROSCOPE**

(57) Abstract:

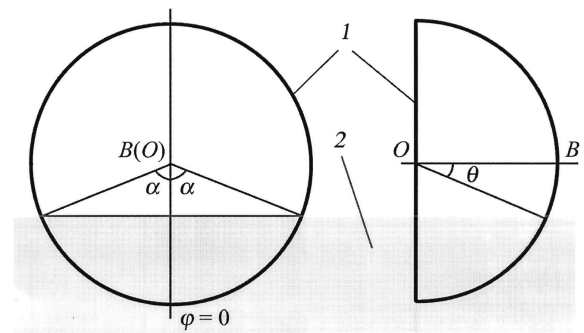
FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: invention relates to balancing of quartz hemispherical cavities of solid-state fibre gyroscopes and can be used in production of navigation devices for various purposes. Method of balancing quartz hemispherical resonator solid-state wave gyroscope on predetermined values of parameters of first four forms mass defect resonator consists in fact that quartz hemispherical resonator with radius R is set to position where its symmetry axis is horizontal, and single zero circumferential angle is located in lower position, turned resonator around axis of symmetry at an angle $\Delta\varphi$ relative to common zero circumferential angle and in this position partially submerged resonator in etching solution by installing double zenith angle of spherical segment of machined surface 2α , and it is

followed by chemical etching during time t.

EFFECT: reduced time and labour intensity of balancing process quartz hemispherical resonators at first 4 forms of mass defect.

5 cl, 1 dwg



Фиг. 1

RU 2 580 175 C1

RU 2 580 175 C1

Область техники

Изобретение относится к балансировке кварцевых полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) и может быть использовано при производстве навигационных приборов различного назначения.

5 Уровень техники

Резонатор является основной деталью ВТГ, и его качество в основном определяет точность гироскопа, в связи с чем такие резонаторы, как правило, изготавливают из кварцевого стекла [Loper E.J., Lynch D.D. Патент США НКИ 73-505 №4157041 (1979)]. Отклонение геометрии резонатора от идеальной осесимметричной формы приводит к
10 возникновению массового дисбаланса, являющегося источником погрешности ВТГ. Распределение массы резонатора по окружному углу $M(\varphi)$ может быть представлено в виде ряда:

$$M(\varphi) = M_0 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \cos k(\varphi - \varphi_k), \quad (1)$$

15 где k - номер формы массового дефекта резонатора; M_0 - равномерно распределенная масса резонатора по окружному углу; M_k - величина k -й формы массового дефекта резонатора; φ_k - ориентация k -й формы массового дефекта резонатора относительно единого условного нуля окружного угла.

20 При отклонении геометрии резонатора от осесимметричной формы $M_k \neq 0$. Согласно [Egarmin N.E., Yurin V.E. Introduction to theory of vibratory gyroscopes. M.: Binom, 1993] отличие от нуля M_1 , M_2 или M_3 приводит к колебаниям центра масс резонатора при работе гироскопа, дополнительному рассеянию энергии колебаний резонатора в местах
25 его закрепления и к систематической погрешности ВТГ. При $M_4 \neq 0$ возникает расщепление собственной частоты резонатора, приводящее к случайным погрешностям ВТГ. Для устранения массового дисбаланса резонатор балансируют по этим четырем формам массового дефекта, то есть сначала определяют параметры M_1 , M_2 , M_3 , M_4 ,
30 φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 и затем удаляют неуравновешенную массу.

Известен способ балансировки зубчатых резонаторов ВТГ (аналог) [Патент РФ №2526217, МПК G01C 19/56, опубликовано 20.08.2014]. Известный способ позволяет балансировать резонаторы ВТГ, снабженные специальными балансировочными зубцами, расположенными на кромке тонкостенной оболочки. В известном способе определяют
35 неуравновешенную массу резонатора с помощью пьезоэлектрических датчиков, рассчитывают массы, подлежащие удалению с каждого балансировочного зубца, а затем удаляют их электрохимическим способом.

Недостатком аналога является необходимость нарезки на кромке резонатора балансировочных зубцов, что представляет собой сложную технологическую операцию,
40 в ходе которой в резонатор неизбежно вносится дополнительный массовый дисбаланс за счет погрешностей в размерах балансировочных зубцов.

Известен способ балансировки беззубцового полусферического резонатора ВТГ (ближайший аналог - прототип) [Патент РФ №2147117, МПК G01C 19/56, опубликовано 27.03.2000]. В известном способе неуравновешенную массу беззубцового
45 полусферического резонатора из кварцевого стекла измеряют с помощью пьезоэлектрического датчика, рассчитывают неуравновешенную массу путем математической обработки полученных экспериментальных данных и удаляют неуравновешенную массу ионным лучом с поверхности полусферической оболочки

резонатора.

Недостатком прототипа является низкая производительность процесса балансировки, связанная с небольшой скоростью удаления материала потоком ионов. По оценке авторов время балансировки может составить несколько десятков часов. Другим недостатком является неравномерное по окружному углу ухудшение качества поверхности, связанное с возникновением дефектов при ионно-плазменном травлении, которое может повлечь уменьшение добротности резонатора.

Раскрытие изобретения

Задачей и техническим результатом предлагаемого способа является устранение недостатков прототипа, а именно существенное уменьшение времени и трудоемкости балансировки кварцевых полусферических резонаторов по первым четырем формам массового дефекта.

Результат достигается за счет химического растворения неуравновешенной массы с поверхности кварцевого полусферического резонатора, частично погруженного в травильный раствор. Заявленный способ балансировки кварцевого полусферического резонатора ВТГ заключается в химическом травлении частично погруженного резонатора радиуса R в течение времени, определяемого в соответствии с предварительно определенными (по результатам измерений) величинами параметров первых четырех форм массового дефекта резонатора ($M_1, M_2, M_3, M_4, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$).

При этом кварцевый полусферический резонатор устанавливают в положение, при котором ось его симметрии горизонтальна, а единый нуль окружного угла находится в нижнем положении, поворачивают резонатор вокруг оси симметрии на угол $\Delta\varphi$ относительно единого нуля окружного угла и в этом положении частично погружают резонатор в травильный раствор, выставляя удвоенный зенитный угол сферического сегмента обрабатываемой поверхности 2α , а затем проводят химическое травление в течение времени t.

При удалении 1-й формы массового дефекта величиной M_1 и ориентацией φ_1 , устанавливают $2\alpha=134^\circ$, $\Delta\varphi=-\varphi_1$, причем время химического травления составляет $t_1=0,973M_1/(R^2\nu)$, где ν - удельная скорость растворения кварцевого стекла, определяемая экспериментально (принимается в формуле постоянным коэффициентом).

При удалении 2-й формы массового дефекта величиной M_2 и ориентацией φ_2 , устанавливают $2\alpha=104^\circ$, $\Delta\varphi=-\varphi_2^{(1)}$, проводят химическое травление в течение времени $t_2=0,506M_2^{(1)}/(R^2\nu)$, затем поворачивают резонатор вокруг оси на 180° и проводят химическое травление в течение времени t_2 . Величину $\varphi_2^{(1)}$ определяют по формуле

$$\varphi_2^{(1)} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{M_2 \sin 2\varphi_2}{M_2 \cos 2\varphi_2 - 0,478M_1}, \quad (2)$$

а величину $M_2^{(1)}$ по формуле

$$M_2^{(1)} = \sqrt{(M_2 \cos 2\varphi_2 - 0,478M_1)^2 + M_2^2 \sin^2 2\varphi_2}. \quad (3)$$

При удалении 3-й формы массового дефекта величиной M_3 и ориентацией φ_3 устанавливают $2\alpha=86^\circ$, $\Delta\varphi=-\varphi_3$, проводят химическое травление в течение времени $t_3=0,422M_3/(R^2\nu)$, затем дважды последовательно в одном направлении поворачивают резонатор на 120° вокруг оси симметрии и в каждом угловом положении проводят

химическое травление в течение времени t_3 .

При удалении 4-й формы массового дефекта величиной M_4 и ориентацией φ_4 устанавливают величиной $2\alpha=66^\circ$, $\Delta\varphi=-\varphi_4^{(1)}$, проводят химическое травление в течение времени $t_4 = 0,405M_4^{(1)} / (R^2v)$, затем трижды последовательно в одном направлении поворачивают резонатор на 90° вокруг оси симметрии и в каждом угловом положении проводят химическое травление в течение времени t_4 . Величину $\varphi_4^{(1)}$ определяют по формуле

$$\varphi_4^{(1)} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{M_4 \sin 4\varphi_4}{M_4 \cos 4\varphi_4 + 0,217M_1}, \quad (4)$$

а величину $M_4^{(1)}$ - по формуле

$$M_4^{(1)} = \sqrt{(M_4 \cos 4\varphi_4 + 0,217M_1)^2 + M_4^2 \sin^2 2\varphi_4}. \quad (5)$$

Преимуществом заявленного способа является малое время и низкая трудоемкость балансировки кварцевых полусферических резонаторов. Кроме того, заявленный способ исключает появление поверхностных механических дефектов, обеспечивая сохранение добротности резонатора.

Перечень фигур

На фиг. 1 показана схема расположения резонатора в ванне с травильным раствором (фронтальный вид и вид сбоку).

Осуществление изобретения

Кварцевый полусферический резонатор ВТГ 1 радиуса R с предварительно определенными на испытательном стенде значениями параметров 1, 2, 3, 4 форм массового дефекта $M_1, M_2, M_3, M_4, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$, согласно фиг. 1. устанавливают в положение, при котором ось его симметрии $ОВ$ горизонтальна, а единый нуль окружного угла находится в нижнем положении, поворачивают резонатор вокруг оси симметрии на угол $\Delta\varphi$ относительно единого нуля окружного угла и в этом положении частично погружают резонатор в травильный раствор 2, устанавливая удвоенный зенитный угол сферического сегмента обрабатываемой поверхности 2α , а затем проводят химическое травление в течение времени t . В ходе химического травления с обрабатываемой поверхности S резонатора удаляется слой стекла массой m

$$m = S \cdot t \cdot v. \quad (6)$$

где v - экспериментально определяемая удельная скорость растворения кварцевого стекла, величина которой зависит от состава и температуры травильного раствора.

Угловая зависимость снимаемой с боковой поверхности резонатора массы имеет вид:

$$m(\varphi; \alpha) = \rho d R^2 \cos \theta(\varphi; \alpha) = \rho d R^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\cos \alpha}{\cos \varphi} \right)^2}, \quad (7)$$

где ρ - плотность материала резонатора; d - толщина растворенного слоя; α - зенитный угол сферического сегмента резонатора, погруженного в травильный раствор; θ - полярный угол точки резонатора на поверхности раствора в сферической системе координат.

Разложим $m(\varphi; \alpha)$ в ряд Фурье по окружному углу φ , удерживая первые четыре

гармоники: $m(\varphi; \alpha) = \rho d R^2 \sum_{k=0}^4 C_k(\alpha) \cos k\varphi,$ (8)

где $C_0(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos \theta(\varphi; \alpha) d\varphi,$ (9)
 $C_k(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \cos \theta(\varphi; \alpha) \cos k\varphi d\varphi, \quad k=1, \dots, 4.$

Коэффициент C_0 характеризует равномерно распределенную по углу φ массу, удаляемую с поверхности резонатора, величина которой не влияет на точность работы ВТГ.

При балансировке резонатора необходимо удалять первые четыре формы дефекта распределения массы резонатора поочередно и независимо друг от друга. При этом следует учитывать, что балансировка любой k -й гармоники приводит к появлению кратных гармоник с номерами $n \cdot k$ ($n=2, 3, 4, \dots$). Таким образом, при устранении 1-й формы дефекта масс образуются гармоники с номерами 2, 3, 4, ..., а при устранении 2-й формы - все четные гармоники. Балансировка 3-й и 4-й форм дефекта влечет за собой появление лишь старших гармоник с номерами свыше четвертого номера, не влияющих на характеристики ВТГ. Поэтому следует балансировать сначала последовательно 1-ю и 2-ю гармоники, а затем в произвольном порядке - 3-ю и 4-ю гармоники.

Если осуществлять N -кратную химическую обработку части поверхности полусферы, последовательно поворачиваемой на угол $2\pi/N$ вокруг оси симметрии, угловое распределение химически удаляемой массы будет иметь вид

$m_N(\varphi; \alpha) = \rho d R^2 \sum_{k=0}^{\infty} C_k(\alpha) \sum_{j=0}^{N-1} \cos k \left(\varphi + \frac{2\pi j}{N} \right) = \rho d R^2 N \sum_{k=0}^{\infty} C_{kN}(\alpha) \cos kN\varphi.$ (10)

При устранении 1-й формы дефекта невозможно подобрать такой зенитный угол α , при котором одновременно $C_2=C_3=C_4=0$. Вместе с тем, $\alpha_1=67^\circ$ коэффициент $C_3=0$, но при этом возникают дополнительные дефекты по 2-й и 4-й формам массового дефекта:

$m_1(\varphi) = \rho d R^2 (C_0^{(1)} + C_1^{(1)} \cos \varphi + C_2^{(1)} \cos 2\varphi + C_4^{(1)} \cos 4\varphi),$ (11)

где величины $C_k^{(1)} = C_k(\alpha_1)$, $k=0, 1, 2, 4$ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные величины амплитуд гармоник

k	$C_k^{(1)}$	$C_k^{(2)}$	$C_k^{(3)}$	$C_k^{(4)}$
0	0,152	0,096	0,067	0,040
1	0,249	0,172*	0,125*	0,077*
2	0,119	0,118	0,098*	0,068*
3	0	0,053*	0,062	0,053*
4	-0,054	0	0,026*	0,037

* -- не влияет на работу ВТГ

Таким образом, при устранении 1-й формы массового дефекта полусферический резонатор устанавливают в положение, когда $\Delta\varphi = -\varphi_1$, а удвоенное значение зенитного угла $2\alpha = 134^\circ$. Время химического травления резонатора при удалении 1-й формы массового дефекта резонатора составляет $t_1 = 0,973 M_1 / (R^2 v)$, а возникшие при этом дополнительные дефекты согласно (11) удаляют при балансировке полусферического

резонатора по 2-й и 4-й формам массового дефекта.

При устранении 2-й формы массового дефекта полусферического резонатора оптимальное значение зенитного угла сферического сегмента составляет $\alpha=\alpha_2=52^\circ$, когда $C_4 \approx 0$. Обработку поверхности резонатора проводят в два этапа. Сначала в

установленном положении резонатора ($\Delta\varphi = -\varphi_2^{(1)}$) химически удаляют половину требуемой массы, затем поворачивают резонатор вокруг оси симметрии на 180° и химически удаляют оставшуюся половину дефектной массы. При этом только коэффициенты C_0 и C_2 отличны от нуля, т.е. избирательно устраняется 2-я форма дефекта распределения массы резонатора:

$$m_2(\varphi) = 2\rho dR^2 [C_0^{(2)} + C_2^{(2)} \cos 2(\varphi - \varphi_2^{(1)})], \quad (12)$$

где $C_k^{(2)} = C_k(\alpha_2)$, $k=0,2$ (см. табл. 1). Время химического травления в каждом положении резонатора составляет $t_2 = 0,506M_2^{(1)} / (R^2\nu)$. Величину $\varphi_2^{(1)}$ определяют по формуле (2), а величину $M_2^{(1)}$ - по формуле (3).

Устранение 3-й формы массового дефекта полусферического резонатора проводят в три этапа при $\alpha=\alpha_3=43^\circ$, последовательно поворачивая его дважды в одном и том же направлении на 120° вокруг оси симметрии относительно начальной ориентации $\Delta\varphi = -\varphi_3$. В каждом положении резонатора химически удаляется 1/3 часть общей удаляемой массы:

$$m_3(\varphi) = 3\rho dR^2 [C_0^{(3)} + C_3^{(3)} \cos 3(\varphi - \varphi_3)], \quad (13)$$

где $C_k^{(3)} = C_k(\alpha_3)$, $k=0,3$ (см. табл. 1). Время химического травления в каждом положении резонатора составляет $t_3 = 0,422M_3 / (R^2\nu)$.

Устранение 4-й формы массового дефекта полусферического резонатора осуществляется в четыре этапа, при $\alpha=\alpha_4=34^\circ$, последовательно поворачивая его трижды в одном и том же направлении на 90° вокруг оси симметрии относительно начальной ориентации $\Delta\varphi = -\varphi_4^{(1)}$. На каждом этапе химически удаляется 1/4 часть общей удаляемой массы:

$$m_4(\varphi) = 4\rho dR^2 [C_0^{(4)} + C_4^{(4)} \cos 4(\varphi - \varphi_4^{(1)})], \quad (14)$$

где $C_k^{(4)} = C_k(\alpha_4)$, $k=0,4$ (см. табл. 1). Время химического травления в каждом положении резонатора составляет $t_4 = 0,405M_4^{(1)} / (R^2\nu)$. Величину $\varphi_4^{(1)}$ определяют по формуле (4), а величину $M_4^{(1)}$ - по формуле (5).

Пример осуществления способа

Поясним процедуру удаления массового дисбаланса кварцевого полусферического резонатора следующим примером. Проводят устранение предварительно определенного массового дефекта 3-й формы величиной $M_4=10$ мг в полусферическом резонаторе радиусом $R=3$ см, изготовленном из кварцевого стекла. Пусть ориентация данной формы массового дефекта относительно условного нуля резонатора составляет $\varphi_3=10^\circ$.

Кварцевый полусферический резонатор ВТГ 1 с предварительно определенными значениями параметров 3-й формы массового дефекта устанавливают в положение,

при котором ось его симметрии горизонтальна, а единый нуль окружного угла находится в нижнем положении. Поворачивают резонатор вокруг оси симметрии на угол $\Delta\varphi = -10^\circ$ относительно единого нуля окружного угла и в этом положении частично погружают резонатор в травильный раствор 2, устанавливая удвоенный зенитный угол сферического сегмента обрабатываемой поверхности $2\alpha = 86^\circ$ (фиг. 1). В качестве травильного раствора могут быть использованы известные специалистам водные растворы плавиковой кислоты или растворы солей плавиковой кислоты в серной кислоте [Альтах О.Л., Саркисов П.Д. Шлифование и полирование стекла и стеклоизделий. М.: Высшая школа, 1988. 231 с.]. Авторами был использован раствор следующего состава:

10

бифторид аммония	5,6%
серная кислота (96%)	59,4%
вода	35%

Определенная экспериментально скорость травления кварцевого стекла в растворе данного состава при 22°C составляет $5 \cdot 10^{-5}$ г/см²·мин. [Б.С. Лунин, С.Н. Торбин, М.Н. Данчевская, И.В. Батов, Влияние нарушенного поверхностного слоя на добротность резонаторов из кварцевого стекла // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 2. Химия. 1994. Т. 35. №1. С. 24-28]. Проводят химическое травление частично погруженного резонатора в течение времени $t_3 = 0,422M_3/R^2\nu = 9,38$ мин. Затем дважды последовательно в одном и том же направлении поворачивают резонатор на 120° вокруг оси симметрии и в каждом угловом положении проводят химическое травление в течение времени t_3 . После химической обработки резонатор промывают дистиллированной водой и сушат.

Удаление других форм массового дефекта резонатора проводят аналогичным образом.

Предложенная процедура удаления неуравновешенной массы позволяет балансировать кварцевый полусферический резонатор ВТГ по 1, 2, 3, 4-й формам его массового дефекта с низкой трудоемкостью (по сравнению с прототипом). Из приведенного примера следует, что общее время обработки в предложенном способе составляет около 30 минут. По оценке авторов при удалении такой же неуравновешенной массы ионно-плазменным травлением (прототип) необходимо около 20...30 часов. Таким образом, время и трудоемкость балансировки кварцевых полусферических резонаторов ВТГ предложенным способом может снизиться до 40...60 раз.

Формула изобретения

35

1. Способ балансировки кварцевого полусферического резонатора волнового твердотельного гироскопа по предварительно определенным величинам параметров первых четырех форм массового дефекта резонатора, отличающийся тем, что кварцевый полусферический резонатор радиуса R устанавливают в положение, при котором ось его симметрии горизонтальна, а единый нуль окружного угла находится в нижнем положении, поворачивают резонатор вокруг оси симметрии на угол $\Delta\varphi$ относительно единого нуля окружного угла и в этом положении частично погружают резонатор в травильный раствор, устанавливая удвоенный зенитный угол сферического сегмента обрабатываемой поверхности 2α , а затем проводят химическое травление в течение времени t .

45

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что при устранении 1-й формы массового дефекта величиной M_1 и ориентацией φ_1 устанавливают $2\alpha = 134^\circ$, $\Delta\varphi = -\varphi_1$, причем время химического травления составляет $t_1 = 0,973M_1/(R^2\nu)$, где ν - экспериментально

определяемый постоянный коэффициент.

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что при устранении 2-й формы массового дефекта величиной M_2 и ориентацией φ_2 устанавливают $2\alpha=104^\circ$, $\Delta\varphi = -\varphi_2^{(1)}$, проводят химическое травление в течение времени $t_2 = 0,506M_2^{(1)}/(R^2v)$, затем поворачивают резонатор вокруг оси на 180° и проводят химическое травление в течение времени t_2 .

Величину $\varphi_2^{(1)}$ определяют по формуле $\varphi_2^{(1)} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{M_2 \sin 2\varphi_2}{M_2 \cos 2\varphi_2 - 0,478M_1}$, а величину

$$M_2^{(1)} - \text{ по формуле } M_2^{(1)} = \sqrt{(M_2 \cos 2\varphi_2 - 0,478M_1)^2 + M_2^2 \sin^2 2\varphi_2} .$$

4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что при устранении 3-й формы массового дефекта величиной M_3 и ориентацией φ_3 устанавливают $2\alpha=86^\circ$, $\Delta\varphi=-\varphi_3$, проводят химическое травление в течение времени $t_3=0,422M_3/(R^2v)$, затем дважды последовательно в одном направлении поворачивают резонатор на 120° вокруг оси симметрии и в каждом угловом положении проводят химическое травление в течение времени t_3 .

5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что при устранении 4-й формы массового дефекта величиной M_4 и ориентацией φ_4 устанавливают величиной $2\alpha=66^\circ$, $\Delta\varphi = -\varphi_4^{(1)}$, проводят химическое травление в течение времени $t_4 = 0,405M_4^{(1)}/(R^2v)$, затем трижды последовательно в одном направлении поворачивают резонатор на 90° вокруг оси симметрии и в каждом угловом положении проводят химическое травление в течение

времени t_4 . Величину $\varphi_4^{(1)}$ определяют по формуле $\varphi_4^{(1)} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{M_4 \sin 4\varphi_4}{M_4 \cos 4\varphi_4 - 0,217M_1}$

, а величину $M_4^{(1)}$ - по формуле $M_4^{(1)} = \sqrt{(M_4 \cos 4\varphi_4 + 0,217M_1)^2 + M_4^2 \sin^2 2\varphi_4} .$