

Н. Г. ШАРМА, СУНДАРАРАДЖАН Т., Г. С. СИНГХ

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЦЕССЫ
ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ
РЕЗОНАТОРА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА
С ВЫСОКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ**

Важнейшим функциональным элементом твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) является механический резонатор, для минимальной разрешающей способности которого требуется добротность в несколько миллионов единиц. В работе рассматривается проблема диссипации энергии колебаний в опорах ТВГ размером несколько миллиметров. Проведено подробное исследование дефектов размеров и геометрических параметров оболочки резонатора, связанных с нарушениями технологии изготовления. Выполнен анализ зависимости добротности от среднего радиуса и толщины оболочки, а также от радиуса и высоты ножки резонатора. Подробно изучено влияние геометрических дефектов оболочки – ее смещения, наклона, неоднородной толщины и дисбаланса. Согласно результатам исследования, диссипация энергии колебаний в опорах (конструкционное демпфирование) становится весьма значительной и сопоставимой с другими механизмами рассеяния даже при незначительных геометрических дефектах конструкции. По результатам анализа чувствительности получены допуски на размерно-геометрические параметры, обеспечивающие прецизионное изготовление резонатора, гарантирующее минимальное конструкционное демпфирование. Рассмотрена также роль других механизмов затухания колебаний: воздушное демпфирование, демпфирование возбуждения, термоупругое динамическое демпфирование и поверхностное рассеяние. Характеристики поверхности с точки зрения поверхностного рассеяния до и после обработки исследованы методом наноиндентирования. Выполнена оценка функциональных параметров рабочей частоты и добротности с использованием лазерной доплеровской виброметрии (ЛДВ).

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, добротность, диссипация энергии колебаний в опорах (конструкционное демпфирование), энергия упругой волны, наноиндентирование.

Шарма Н. Гириш. Научный сотрудник, Индийская организации космических исследований, подразделение инерциальных систем (г. Тируванантапурам, Керала, Индия).

Сундарараджан Т. Научный сотрудник, Космический центр им. Викрама Сарабхаи (г. Тируванантапурам, Керала, Индия).

Сингх Гаутам Сачин. Старший преподаватель, Индийский технологический институт (г. Гувахати, Индия).

Введение

Твердотельный волновой гироскоп (ТВГ) представляет собой высокоэффективный инерциальный навигационный датчик, обладающий высокой точностью, высочайшим разрешением и надежностью при небольшом количестве конструктивных элементов. Такой прибор хорошо подходит для перспективных межпланетных космических аппаратов [1]. Принцип работы этого датчика основан на ускорении Кориолиса. Возбуждение резонатора осуществляется по его рабочей форме колебаний. При вращении вибрирующей оболочки возникает прецессия стоячей волны. Скорость прецессии отличается от угловой скорости на входе. Разница между этими скоростями пропорциональна угловой скорости вращения тела.

Важнейшим элементом является механический резонатор. Для достижения высокого разрешения измерений добротность, которая представляет собой соотношение сохраненной энергии и энергии, потерянной при вибрациях, должна составлять порядка нескольких миллионов. Основными источниками демпфирования в резонаторе являются воздушное демпфирование за счет рабочей среды, поверхностное рассеяние, демпфирование возбуждения, внутреннее материальное демпфирование, термоупругое динамическое демпфирование (ТДД) и конструкционное демпфирование. ТДД обусловлено термомеханическим взаимодействием во время вибраций. Перепад температур связан с выделением тепла при определенной интенсивности упругих колебаний. Такой необратимый процесс теплопередачи называется диссипацией энергии. ТДД можно уменьшить путем максимального разведения механической и тепловой постоянных времени. Поверхностная потеря энергии оказывает критическое влияние на добротность резонатора, ее можно сократить путем применения высокоточных технологий изготовления и стандартных методов постобработки поверхности. Воздушное демпфирование можно существенно уменьшить за счет работы датчика в условиях сверхвысокого вакуума. Что касается демпфирования возбуждения, его можно снизить за счет правильного подбора электрических параметров.

Когда резонатор находится в режиме вибрации, возникают результирующие силы и моменты, которые передаются на опорную конструкцию и преобразуются в ней в упругие волны, распространение которых вызывает диссипацию механической энергии, называемую конструкционным демпфированием [2]. Его можно уменьшить путем правильного выбора ряда параметров, в частности функциональных режимов работы, местоположения точек крепления резонатора, а также за счет обеспечения высокой симметрии конструкции и жесткого контроля размеров и допусков в процессе производства. Поскольку в системе одновременно присутствует несколько различных механизмов демпфирования, эффективная добротность может быть представлена следующим образом:

$$\frac{1}{Q_{\text{Общ}}} = \frac{1}{Q_{\text{ТДД}}} + \frac{1}{Q_{\text{Констр}}} + \frac{1}{Q_{\text{Среда}}} + \frac{1}{Q_{\text{Поверхн}}} + \frac{1}{Q_{\text{Электроника}}}. \quad (1)$$

Основное внимание в работе уделяется проблеме конструкционного демпфирования, которое зависит от установки резонатора, его размеров и возможных дефектов изготовления.

Теория конструкционного демпфирования

В работе [3] были получены аналитические выражения для конструкционного демпфирования в стержневых резонаторах. Усилие сдвига в точке крепления стержня, которое служит источником упругих волн в опорной конструкции, оценивается с помощью уравнения резонансного движения. Затем двухмерное уравнение упругой волны используется для получения аналитического решения для конструкционного демпфирования консольного стержня. Запасенную энергию для n -й резонансной моды можно выразить следующим образом [3]:

$$W_n = \frac{1}{8} \rho S L \omega_n^2 U_n^2, \quad (2)$$

где ρ – плотность, S – площадь поперечного сечения стержня, L – длина стержня, ω_n – собственная частота n -й моды, U_n – амплитуда колебаний n -й моды. Вибрационное усилие сдвига на опоре описывается выражением [3]

$$\Gamma_n = E I U_n \left[\frac{\pi \beta_n}{L} \right]^3 \chi_n, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга, I – момент инерции, β_n – постоянная моды, χ_n – коэффициент формы колебаний. Это усилие сдвига возбуждает волны напряжения в монтажной конструкции. Упругая волна порождает в опоре смещения в одной плоскости. Предполагая, что $u_x = u e^{i\omega t}$ и $u_y = v e^{i\omega t}$, можно найти смещения u и v в одной плоскости в точке опоры.

Энергия, рассеиваемая за цикл, задается формулой [3]

$$\Delta W = \pi \Gamma_n v. \quad (4)$$

Добротность консольного стержня описывается выражением [3]

$$Q_n = \left[\frac{0,24 (1-\nu)}{(1+\nu)\psi} \right] \frac{1}{(\beta_n \chi_n)^2} \left[\frac{L}{b} \right]^3, \quad (5)$$

где ν – коэффициент Пуассона, а ψ – функция частоты и скорости волны.

В работе [4] для оценки конструкционного демпфирования используется концепция идеально подобранного слоя (ИПС). Особенность ИПС состоит в том, что обратного отражения волн не происходит. Аналитическая модель переоценивает добротность. Авторы [5] проверили модели на основе ИПС для оценивания диссипации энергии колебаний в опорах микромеханических резонаторов. В работе [6] расчет добротности выполнен исходя из конструкционного демпфирования с использованием подобранных слоев. Подобранные слои использовались вместо ИПС, однако точность полученных результатов находилась в пределах нескольких процентов.

В работе [7] исследовано влияние двух геометрических конфигураций ножки резонатора для моды объемных колебаний и резонансной формы «бокала». В [8] утверждается, что конструкционное демпфирование более критично при наличии межмодовых взаимодействий. Для устранения дефектов изготовления в [9] предложена коррекция жесткости.

Теоретический анализ в настоящей работе осуществляется с использованием программного обеспечения COMSOL [10]. Концепция ИПС применяется для создания идеальной среды, поглощающей упругие волны в опорной конструкции. ИПС строится таким образом, чтобы энергия волны полностью в нем затухала, исключая отражение энергии.

Оценивание конструкционного демпфирования в ТВГ

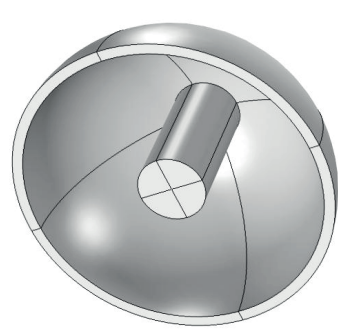


Рис. 1. Схема резонатора

Схема исследуемого резонатора представлена на рис. 1. Полусферическая конструкция резонатора закреплена на ножке в районе полюса.

В табл. 1 представлены свойства распространяющейся волны, оцениваемые в области ИПС, для ТВГ из кварцевого стекла размером несколько миллиметров. Исследуемый датчик не является микроэлектромеханическим.

Упругие волны, генерируемые оболочкой, передаются на монтажную конструкцию через центральную цилиндрическую ножку. Таким образом, сферическая форма подходит для метода ИПС. На границе области ИПС применяется фиксированное ограничение. Свойства геометрии ИПС для заданной конфигурации ТВГ представлены в табл. 2.

Таблица 1

Частота для моды $N = 2$, f (кГц)	C_L (м/с)	C_T (м/с)	λ_L (м)	λ_T (м)
5458	5968	3763	1,07	0,67

Таблица 2

Волновое число (1/м)	Толщина подложки (м)	Размер ИПС (м)
1	0,064	1,07

Параметрический анализ полусферического резонатора

Влияние геометрических параметров резонатора

В резонаторе с идеальной оболочкой значение добротности $Q_{констр}$ для второй формы колебаний $N = 2$ достаточно высоко, поскольку реактивные силы и моменты практически исчезают в области крепления ножки. Было установлено, что добротность снижается при увеличении толщины оболочки, как показано на рис. 2.

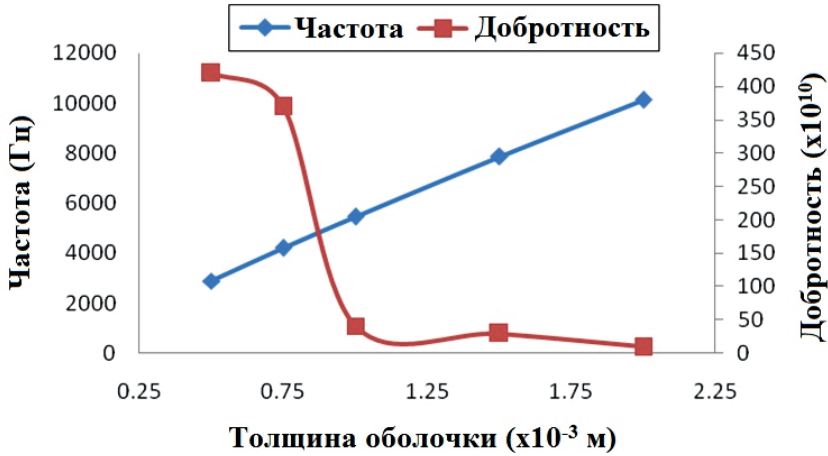


Рис. 2. Изменение добротности в зависимости от толщины оболочки резонатора

При увеличении толщины оболочки возрастает распространение волновой энергии на подложку из-за повышения жесткости. Поскольку по мере уменьшения толщины снижается частота, это неблагоприятно сказывается на компоненте добротности $Q_{гид}$. Кроме того, из-за близости к другим частотам это приводит к ухудшению компонента добротности $Q_{констр}$. На рис. 3 показана зависимость добротности от среднего радиуса оболочки резонатора.

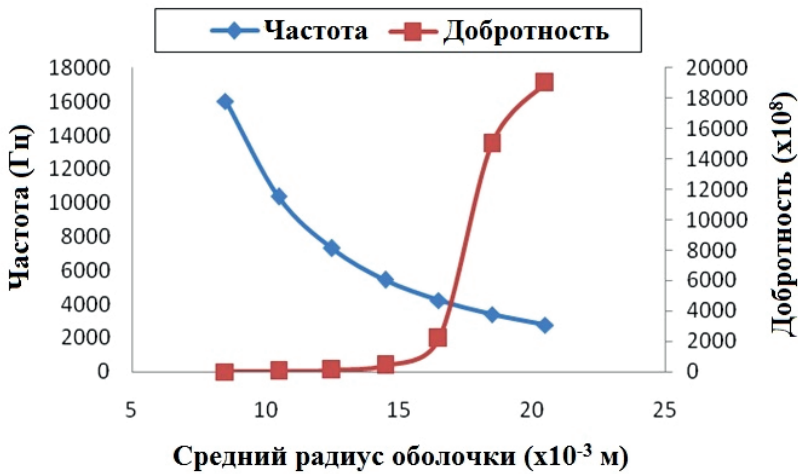


Рис. 3. Изменение добротности в зависимости от среднего радиуса оболочки резонатора

При увеличении среднего радиуса оболочки уменьшается частота второй формы колебаний $N = 2$. По мере увеличения радиуса оболочки точка крепления удаляется от зоны вибраций. Таким образом, на ножку передается меньшее количество волновой энергии и добротность повышается. Проведен анализ влияния толщины оболочки на близость формы $N = 2$ и формы наклонных колебаний ножки, результаты которого представлены в табл. 3. Внутренний и внешний радиусы оболочки выбирались таким образом, чтобы мода $N = 2$ и форма наклонных колебаний ножки были максимально близки друг другу. При сближении моды $N = 2$ с формой наклонных

колебаний ножки добротность существенно снижается. Допуски размеров по радиусу оболочки необходимо строго контролировать для обеспечения достаточного разделения частот.

Т а б л и ц а 3

Радиус оболочки (мм)	Частота формы $N = 2$ (Гц)	Форма наклонных колебаний ножки (Гц)	Разность частот (Гц)	Добротность
Внеш. 15,04 Внутр. 14,16	4860,6	4842,6	18	$1,6 \times 10^8$

Влияние длины ножки было изучено по взаимодействию между формами вибрации оболочки и ножки, результаты представлены в табл. 4. При близких значениях моды $N = 2$ и формы наклонных колебаний ножки добротность существенно снижается из-за переноса энергии.

Т а б л и ц а 4

Длина ножки (мм)	Частота формы $N = 2$ (Гц)	Форма наклонных колебаний ножки (Гц)	Разность частот (Гц)	Добротность
23,0	5458,5	3881,2	1577	$7,20 \times 10^{11}$
21,0	5458,5	4135,3	1323	$4,50 \times 10^{11}$
19,0	5458,6	4681,5	777	$4,10 \times 10^{11}$
18,0	5458,5	5033,4	425	$1,90 \times 10^{10}$
17,0	5458,5	5430,0	28	$7,50 \times 10^7$
16,5	5458,6	5650,8	192	$6,80 \times 10^9$
16,0	5458,6	5885,7	427	$4,80 \times 10^{10}$
15,0	5458,7	6406,6	948	$3,50 \times 10^{11}$

Влияние дефектов на резонатор

На практике идеальной конструкции резонатора добиться невозможно. В любом случае, при изготовлении будут иметь место геометрические отклонения, влияющие на процессы конструкционного демпфирования. В результате подробного анализа возможных дефектов были определены технологические допуски для производства резонатора. При этом были рассмотрены следующие сценарии.

Сценарий А. Ось полусферической оболочки резонатора смещена относительно оси ножки. Смещение оси оболочки показано на рис. 4. В ходе исследования задавались различные значения смещения; результаты показаны на рис. 5.

По мере того как значение смещения увеличивается, добротность резонатора ухудшается. Это происходит из-за того, что остаточное усилие и момент передаются на опорную подложку. В результате возрастает потеря энергии вибрации. При изготовлении резонатора необходимо контролировать, чтобы значение смещения было значительно меньше 50 микрон.

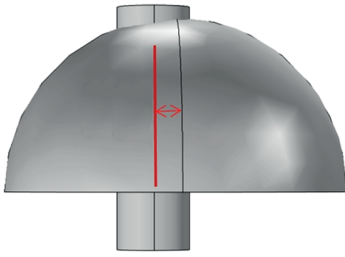


Рис. 4. Смещение оси оболочки относительно оси ножки

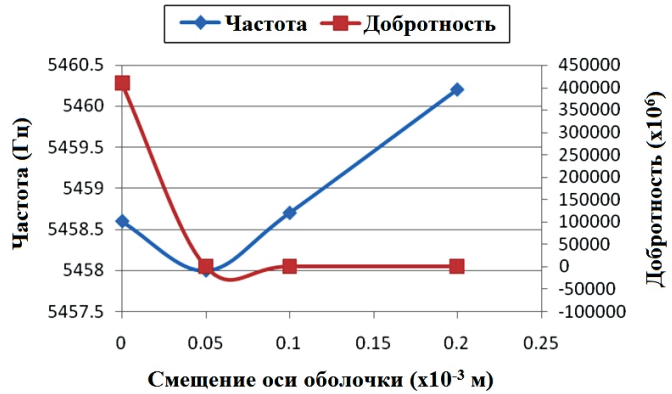


Рис. 5. Изменение добротности в зависимости от значения смещения оболочки

Сценарий В. Ось оболочки отклоняется от оси ножки (рис. 6). В ходе исследования задавались различные значения отклонения, результаты показаны на рис. 7.

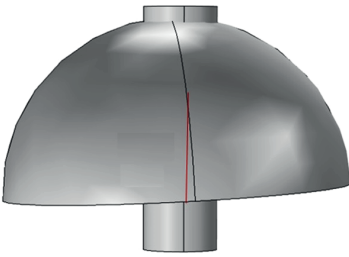


Рис. 6. Отклонение оси оболочки относительно оси ножки

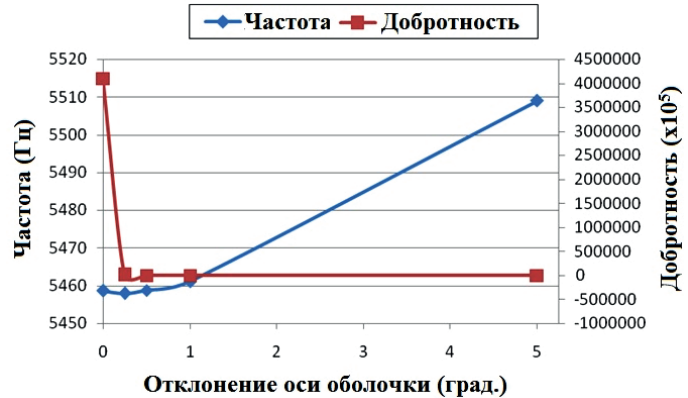


Рис. 7. Изменение добротности в зависимости от значения отклонения оболочки

По мере того как значение отклонения увеличивается, добротность резонатора ухудшается. Это происходит из-за того, что остаточное усилие и момент передаются на основание, в результате чего происходит потеря энергии вибрации в опорной подложке. При изготовлении резонатора необходимо контролировать, чтобы отклонение оставалось значительно меньше $0,25^\circ$.

Сценарий С. Рассматривается неоднородность толщины оболочки в азимутальном направлении. Значение толщины оболочки на одной стороне остается номинальным и составляет 1 мм, а на другой стороне толщина изменена, чтобы сформировать ее неоднородность (рис. 8). Результаты исследования представлены на рис. 9.

Чем меньше варьируется толщина оболочки, тем выше добротность резонатора. Причина заключается в том, что остаточное усилие и момент передаются на основание, когда несбалансированный резонатор работает на симметричной второй форме $N = 2$. При изготовлении резонатора необходимо контролировать, чтобы перепады значений толщины оболочки составляли значительно меньше 20 микрон.

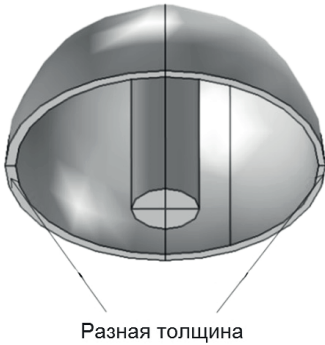


Рис. 8. Неоднородность толщины оболочки резонатора

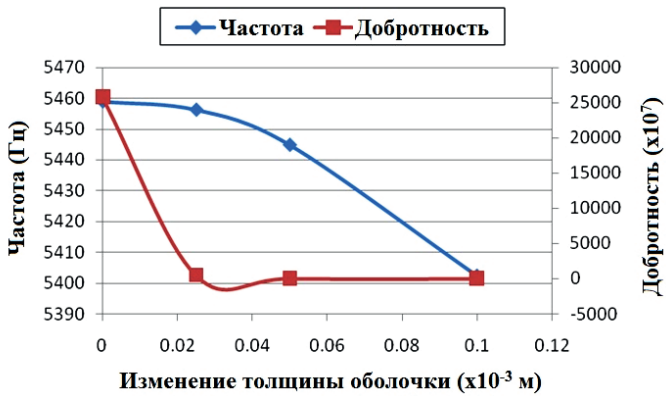


Рис. 9. Изменение добротности в зависимости от степени неоднородности толщины оболочки

Сценарий D. Дисбаланс масс влияет на расщепление частоты формы $N = 2$. Теоретически значения собственных частот двух мод $N = 2$ должны быть одинаковыми. Для изучения воздействия дисбаланса масс на расщепление частоты вначале была создана модель конечных элементов с очень высоким разрешением сетки. Затем исследовалось влияние несбалансированной оболочки на расщепление частоты путем добавления точечной массы в экваториальной плоскости. Результаты исследования представлены в табл. 5. Как видно из таблицы, расщепление частоты увеличивается с увеличением дисбаланса масс.

Т а б л и ц а 5

Дисбаланс масс (кг)	Расщепленные частоты по второй форме $N = 2$ (Гц)	Разность частот (Гц)
Дисбаланс отсутствует	5187,1194 5187,1220	0,003
10^{-9}	5187,1148 5187,1211	0,006
10^{-8}	5187,073 5187,111	0,038
10^{-7}	5186,66 5187,01	0,355
10^{-6}	5182,5 5186,0	3,500

Чувствительность общего дисбаланса масс для формы $N = 2$ составляет 0,285 мг/Гц.

Анализ функциональной схемы

Функциональная форма кварцевого резонатора показана на рис. 10. Она представляет собой гибридную конструкцию с полусферической и удлиненной цилиндрической частью для размещения электростатических силовых и чувствительных

элементов. Произведен анализ мод для конечной схемы, результаты которого представлены в табл. 6. В табл. 7 приводятся данные о влиянии дисбаланса масс на указанную функциональную схему.

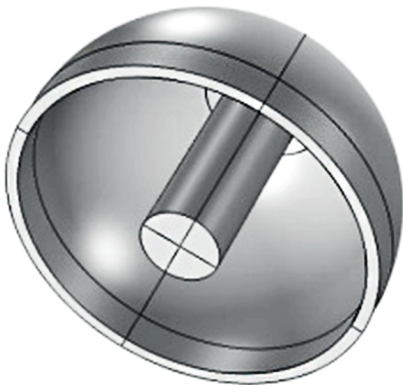


Рис. 10. Функциональная схема резонатора

Таблица 6

Мода №	Частота (Гц)	Форма моды	Примечания
1	3696	Осевое положение оболочки	Частота первой моды должна быть значительно выше 2000 Гц, чтобы исключить вибрационную нагрузку при запуске
2 и 3	4097	Наклон оболочки	Необходимо обеспечить значительное разнесение с функциональной модой датчика
4 и 5	5567	$N = 2$	Функциональная мода датчика
6 и 7	6364	Наклон ножки	Необходимо обеспечить значительное разнесение с функциональной модой датчика

Таблица 7

Разность частот (Гц)	Добротность	Примечания
0,23	$1,20 \times 10^{11}$	Дисбаланс отсутствует
3,55	$5,99 \times 10^{10}$	Дисбаланс масс 10^{-6} кг
34,0	$7,90 \times 10^8$	Дисбаланс масс 10^{-5} кг

По мере увеличения дисбаланса масс расщепление частоты увеличивается, а добротность снижается. Для повышения добротности необходимо обеспечить прецизионную балансировку оболочки.

Реализация и характеристики прецизионного резонатора



Рис. 11. Прецизионный резонатор из кварцевого стекла

Материалы с низкой пластичностью и высокой твердостью, как правило, обрабатывают с использованием ультразвуковых технологий [11]. В щадящем режиме обработки хрупких материалов, например стекла, на поверхности образуются трещины и другие повреждения. До некоторой степени образования таких трещин удается избежать за счет применения высокоточных станков для обеспечения гибкого режима обработки [12]. В частности, в работе [13] авторы оптимизировали параметры ротационной ультразвуковой обработки для кварца. Обработка стекла без образования в нем трещин в гибком режиме является критически важной задачей. Грубая обработка кварцевого стекла выполняется на 5-осевых ультразвуковых установках, после чего производится прецизионная обработка методом координатного шлифования. Готовый резонатор показан на рис. 11.

Основными функциональными характеристиками резонатора являются его собственная частота $N = 2$ и добротность. Резонатор возбуждается с помощью акустического элемента, который, в свою очередь, приводится в действие на частоте $N = 2$ с помощью пьезоэлектрического вибропривода. Акустический возбуждающий элемент располагается вблизи оболочки резонатора, чтобы передавать на него энергию акустических колебаний. Схема возбуждения резонатора показана на рис. 12.

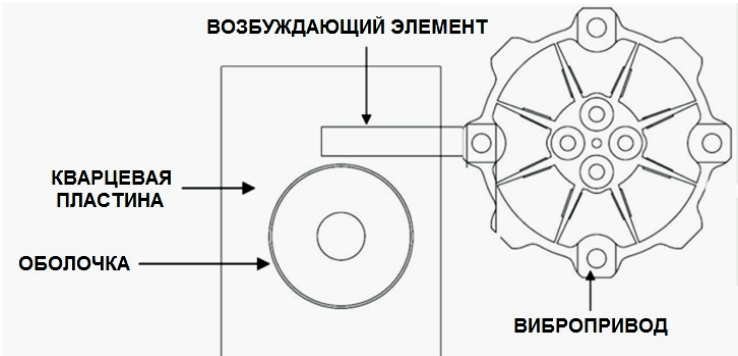


Рис. 12. Схема возбуждения резонатора

Измерение виброперемещения осуществляется с помощью бесконтактного лазерного доплеровского виброметра. В табл. 8 сравниваются значения собственных частот, полученные в результате численного моделирования и экспериментов, при этом наблюдается высокая степень совпадения данных.

Таблица 8

Мода	Частота в модели конечных элементов (Гц)	Частота по результатам испытаний (Гц)
$N = 2$	5567	5510

Существуют две вырожденные моды $N = 2$ с одинаковыми частотами для идеальной полусферической оболочки, однако в связи с дефектами изготовления частоты $N = 2$ будут различаться. Были измерены сферические профили двух резонаторов для оценки влияния дефектов изготовления на разницу между частотами двух форм $N = 2$. Результаты измерений представлены в табл. 9.

Т а б л и ц а 9

Геометрические параметры	Резонатор 1	Резонатор 2
Соосность, микрон	90	2
Округлость, микрон	10	8
Расщепление частоты (Гц)	5,95	0,30

Установлено, что расщепление частоты возрастает при увеличении геометрических погрешностей. Для резонатора 2 получены критические значения геометрических погрешностей в пределах 10 микрон, а достигнутое значение расщепления частоты $N = 2$ составляет менее 0,5 Гц. Таким образом, высокосимметричный прецизионный резонатор (резонатор 2) реализован в соответствии с требованиями к размерно-геометрическим допускам, составляющим значительно меньше 50 микрон. Тем самым вклад конструкционного демпфирования в показатель общей добротности сведен к минимуму.

Проверка добротности производится методом внутриврезонаторной спектроскопии с использованием лазерного доплеровского вибromетра. Достигнутый уровень добротности составляет $3\text{--}5 \times 10^6$.

Роль прочих механизмов диссипации

Поскольку резонатор глубоко вакуумирован, газодинамическое демпфирование (компонента добротности $Q_{\text{среда}}$) не играет существенной роли. Размер резонатора составляет несколько миллиметров, а рабочая резонансная частота – несколько килогерц (5500 Гц). Следовательно, резонатор работает в адиабатической области с точки зрения термоупругого демпфирования. Благодаря этому обстоятельству термомеханическое взаимодействие и, как следствие, термоупругое демпфирование сводятся к минимуму [14]. Демпфирование возбуждения отсутствует, так как резонатор имеет акустическую схему возбуждения. Таким образом, преобладающим механизмом диссипации энергии остается поверхностное рассеяние.

После грубой обработки на всей поверхности оболочки вследствие хрупкости материала образуется покрытый трещинами слой. Растрескавшийся и напряженный поверхностный слой уменьшает поверхностный компонент добротности ($Q_{\text{поверх}}$) резонатора [15]. Шероховатость поверхности говорит об ее повреждении. Кроме того, может быть поврежден и подповерхностный слой. Оба этих фактора усиливают поверхностное рассеяние и ухудшают общую добротность [16]. Напряженный и растрескавшийся слой необходимо удалить путем химического травления, равномерность которого следует обеспечить с помощью перемешивающего механизма.

Для определения механических свойств поверхности в сравнении со свойствами необработанного материала используется метод наноиндентирования. Наномеханические и трибологические характеристики получены с помощью наноиндентора серии *Ti Premier* фирмы *Hysitron*. Определены такие характеристики поверхности кварцевой оболочки, как твердость и модуль Юнга. Результаты до и после химического травления представлены в табл. 10.

Т а б л и ц а 10

Твердость (ГПа) после механической обработки	Модуль Юнга (ГПа) после механической обработки	Твердость (ГПа) после химического травления	Модуль Юнга (ГПа) после химического травления
0,7–1,4	12,2–23,2	8,4–8,9	44,7–59,2

Показатели твердости и значения модуля Юнга улучшились после химического травления благодаря удалению значительной части поврежденного поверхностного слоя. Тем не менее значения твердости 12 ГПа и модуля Юнга 75 ГПа, характеризующие материал, достигнуты не были. Для дальнейшей минимизации влияния поверхностного рассеяния на общий показатель добротности необходимо продолжить оптимизацию технологических параметров изготовления, химического травления и очистки. В этом случае добротность может быть улучшена до нескольких десятков миллионов единиц, что является предельным значением для внутреннего материального демпфирования [17].

Выводы

В работе исследована зависимость добротности резонатора гироскопа от его конструкционного демпфирования для функциональной моды $N = 2$. При этом было выполнено моделирование методом конечных элементов, поскольку готовое аналитическое решение для функциональной схемы полусферического резонатора ТВГ отсутствует. Расчеты волновой энергии в энергопоглощающей опорной конструкции выполнены с использованием концепции ИПС. Предложены геометрические и размерные параметры резонатора, позволяющие минимизировать термоупругое динамическое демпфирование. Для уменьшения термомеханического взаимодействия выбран кварцевый материал, обладающий низким коэффициентом теплового расширения.

Компонент добротности, связанный с конструкционным демпфированием ($Q_{\text{констр}}$), не играет существенной роли в создании идеальной конструкции резонатора, однако он становится значительным и становится сопоставимым с другими компонентами диссипации энергии колебаний, если при изготовлении резонатора допущены нарушения геометрических параметров. В этой связи было подробно изучено влияние геометрических дефектов, таких как смещение и отклонение оси оболочки, неоднородность толщины оболочки и дисбаланс масс, и в результате получены технологические допуски для изготовления резонаторов. Кроме того, изучено влияние близости формы $N = 2$ и формы наклона ножки, которое оказалось весьма значитель-

ным. Изготовлен высокоточный резонатор с соблюдением требований к допускам для минимального конструкционного демпфирования. Собственная частота определена с помощью лазерного доплеровского вибromетра, она совпадает с результатами численного моделирования. Влияние геометрических дефектов на расщепление частоты по второй форме $N = 2$ оценено с использованием реализованных резонаторов. Наконец, изучена роль других механизмов диссипации, при этом особое внимание было уделено процессам поверхностного рассеяния. Характеристики поверхности определены методом наноиндентирования. Для реализованного прецизионного резонатора достигнут уровень добротности в несколько миллионов единиц. Намечены шаги по дальнейшему усовершенствованию достигнутых характеристик.

Благодарность

Авторы выражают искреннюю благодарность А. Джорджу, С.П. Падияну и д-ру С.Д. Деву из отдела инерциальных систем Индийской организации космических исследований (ISU, ISRO) за их руководство данным исследованием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bose, A., Bhat, K.N., and Kurian, T., *Fundamentals of Navigation and Inertial Sensors*, PHI Learning Pvt. Ltd., 2002.
2. Joshi, S., Hung, S., and Vengallatore, S., Design strategies for controlling damping in micromechanical and nanomechanical resonators, *EPJ Techniques and Instrumentation*, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 1–14.
3. Hao, Z., Erbil, A., and Ayazi, F., An analytical model for support loss in micromachined beam resonators with in-plane flexural vibrations, *Sensors and Actuators A*, 2003, vol. 109, nos. 1–2, pp. 156–164.
4. Bindel, D., Govindjee, S., Elastic PMLs for resonator anchor loss simulation, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005, vol. 64, pp. 789–818.
5. Frangi, A., Bugada, A., Martello, M., and Savadkoobi, P.T., Validation of PML based models for the evaluation of anchor dissipation in MEMS resonators, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2013, vol. 37, pp. 256–265.
6. Steeneken, P.G., Ruigrok, J.J.M., Kang, S., van Beek, J., Bontemps, J., and Koning, J.J., Parameter Extraction and support loss in MEMS Resonators, *Proceedings of COMSOL Conference, Grenoble, France*, 2007.
7. Lee, J.J., Yan, J., and Seshia, A.A., Quality factor enhancement of bulk acoustic resonators through anchor geometry design, *Proc. International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Dresden, Germany, 2008*; 2008, pp. 536–539.
8. Thakar, V., and Rais-Zadeh, M., Optimization of tether geometry to achieve low anchor loss in Lamé-mode resonators, *Proc. International Frequency Control Symposium, Prague, Czech Republic, 2013*; 2013, pp. 129–132.
9. Zotov, S.A., Simon, B.R., Prikhodko, I.P., Trusov, A.A., and Shkel, A.M., Quality factor maximization through dynamic balancing of tuning fork resonator, *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 14, no. 8, pp. 2706–2714.
10. <https://www.comsol.com/> COMSOL Multiphysics ver 5.3, COMSOL Inc., Stockholm, Sweden.
11. Guzzo, P.L., Shinohara, A.H., and Raslan, A.A., A comparative study on ultrasonic machining of hard and brittle materials, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2004, vol. 26, no. 1, pp. 56–61.
12. Brinksmeier, E., Mutlugsun, Y., Klocke, F., Aurich, J.C., Shore, P., and Ohmori, H., Ultra-precision grinding, *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2010, vol. 59, no. 2, pp. 652–671.
13. Singh, R.P., Singhal, S., Experimental investigation of machining characteristics in rotary ultrasonic machining of quartz ceramic, *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: J Materials: Design and Applications*, 2018, vol. 232, no. 10, pp. 870–889.

14. **Sharma, G.N., George, A., Pandian, S.P., Sundararajan, T., and Gautam, S.S.,** Design of inertial class gyroscope resonator with ultra high quality factor for interplanetary space missions, In: *Advances in Mechanical Engineering, Select Proceedings of ICRIDME*, Singapore: Springer, 2020, pp. 1071-1084.
 15. **Shiari, B., Najafi, K.,** Surface effect influence on the quality factor of microresonators, *Proc. 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers and Eurosensors XXVII), Barcelona, Spain, 2013*, 2013.
 16. **Palasantzas, G.,** Surface roughness influence on the quality factor of high frequency nanoresonators, *Journal of Applied Physics*, 2008, no. 103 (046106).
 17. **Numata, K., Yamamoto, K., Ishimoto, H., Otsuka, S., Kawabe, K., Ando, M., and Tsubono, K.,** Systematic measurement of the intrinsic losses in various kinds of bulk fused silica, *Physics*, 2004, vol. 327, no. 4, pp. 263–271.
-

Sharma, G.N. (ISRO Inertial Systems Unit, Thiruvananthapuram, Kerala, India), **Sundararajan T.** (Vikram Sarabhai Space Centre, Thiruvananthapuram, Kerala, India), and **Singh, G.S.** (Indian Institute of Technology, Guwahati, India)

Effect of Geometric Imperfections on Anchor Loss and Characterisation of a Gyroscope Resonator with High Quality Factor, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 3 (110), pp. 18–31.

Abstract. A critical functional part of a hemispherical resonator gyroscope (HRG) is the mechanical resonator, and a few million quality factor (Q-factor) is needed for the lowest resolution. This paper focuses on anchor loss of a HRG of a few millimeters in size. A detailed parametric study of dimensions and shell imperfections due to fabrication is carried out. A sensitivity study of the effect of shell mean radius, shell thickness, stem radius, stem height on the Q-factor is carried out. The effect of geometric imperfections such as shell offset, shell tilt, shell thickness variation, and unbalance is studied in detail. From the study, it is inferred that the anchor loss becomes very significant and approaches other loss mechanisms even with minor geometric imperfections in the hardware realisation. Based on the sensitivity study, the dimensional and geometric tolerances are arrived for precision fabrication. Precision resonator is fabricated as per the requirement of minimum anchor loss. The significance of other damping mechanisms such as air damping, excitation-induced damping, thermoelastic dynamic damping and surface dissipation is also discussed. Surface characterisation before and after surface treatment has been carried out using nanoindentation technique with regard to surface loss. Functional parameters of operating frequency and Q-factor are evaluated using laser Doppler vibrometry (LDV).

Key words: hemispherical resonator gyroscope, Q-factor, anchor loss, elastic wave energy, nanoindentation.

Материал поступил 13.03.2020