



УДК 621.382.049.77

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.494.501

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА SIMULATING SOLID-STATE WAVE GYROSCOPE

ПЕВЦОВ ЕВГЕНИЙ ФИЛИППОВИЧ

*К. т. н., директор Центра проектирования интегральных схем, устройств нанoeлектроники и микросистем  
pevtsov@mirea.ru*

PEVTSOV EVGENY F.

*CES, director of the Center for Design of Integrated Circuits, Nanoelectronics and Microsystem devices  
pevtsov@mirea.ru*

ЧУЙКО АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ

*Аспирант*

CHUIKO ANDREY V.

*Postgraduate student*

ГРИШУНИН КИРИЛЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

*Аспирант*

GRISHUNIN KIRILL A.

*Postgraduate student*

*МИРЭА — Российский технологический университет  
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78*

*MIREA — Russian Technological University  
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454*

Разработаны методики моделирования волнового твердотельного гироскопа с кольцевым резонатором. Получены зависимости характеристик гироскопа от конструктивных параметров и предложены способы оптимизации для задания необходимого режима движения, в частности резонансной частоты возбуждения второй моды. Разработана методика компенсации дефектов масс, возникающих в результате допусков на технологические операции изготовления волнового твердотельного гироскопа (технологических дефектов) и приводящих к смещению начального положения узловых точек.

*Ключевые слова: МЭМС; волновые твердотельные гироскопы (ВТГ); моделирование в САПР; дефекты конструкции; частотные характеристики ВТГ.*

The paper presents the route of design and technique of simulating a wave solid-state gyroscope with a ring resonator. Simulation of gyroscope characteristics dependences on design data and their optimization for the job of the necessary mode of movement have been executed in particular, resonance frequency of excitation of the second mode. Besides, the paper offers a technique of compensating for mass defects resulting from admissions on technological operations of production of a wave solid-state gyroscope (technological defects) and leading to the shift of initial provision of nodal points.

*Keywords: MEMS; wave solid-state gyroscopes (WSG); CAD modeling; design defects; WSG frequency characteristics.*

### ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

К достоинствам волновых твердотельных гироскопов (ВТГ), изготавливаемых по технологиям МЭМС, относятся высокое отношение точность/цена, способность переносить большие перегрузки, компактность и небольшой вес, низкая энергоемкость, малое время готовности, слабая зависимость от температуры окружающей среды. Полученные к настоящему времени результаты испытаний опытных экземпляров позволяют рассчитывать, что ВТГ найдет свою нишу в области датчиков средней мощности [1]. Основные вопросы теории ВТГ, основанной на анализе динамики движения тонкостенных полусферических и цилиндрических резонаторов, изложены, в частности, в работах [2–5]. Авторы этих работ отмечают, что детальный анализ работы неидеального ВТГ требует применения численных методов. Соответственно, анализ динамики упругих оболочек, исследований влияния неоднородности распределения массы, температуры и вибраций основания, погрешностей систем возбуждения и измерения положения и других предполагает применение современных программ моделирования. Примером такой работы является методика и предварительные результаты моделирования ВТГ с кольцевым резонатором, выполненные в среде пакета программ CoventorWare [5, 6].

Для практических применений важно понимание влияния дефектов, связанных с несовершенством их изготовления.

В настоящей работе эта проблема рассматривается с позиций моделирования аналогичных эффектов инструментами современных САПР.

Задачи исследования:

- разработка маршрута проектирования и методик моделирования ВТГ с кольцевым резонатором;
- исследование свободных и вынужденных колебаний под действием заданных сил, и определение резонансных частот и оптимизация конструктивных параметров ВТГ для задания необходимого режима движения, в частности резонансной частоты возбуждения второй моды;
- разработка методик компенсации дефектов масс, возникающих в результате допусков на технологические операции изготовления ВТГ (технологических дефектов) и приводящих к смещению начального положения узловых точек.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

#### *Создание 3D-модели кольца резонатора ВТГ*

Работа выполнялась на основе инструментов пакета системы автоматизированного проектирования (САПР) CoventorWare®, специально предназначенной для проектирования МЭМС. Достоверность полученных результатов моделирования контролировалась их сопоставлением с аналитическими решениями, полученными для частных случаев граничных условий и упрощенных моделей.



Таблица 1. Маршрут моделирования и инструменты САПР

Table 1. Simulation route and CAD tools

Выполняемая операция Actual operation	Инструменты САПР CAD tools
Создание нового проекта New project creation	CoventorWare
Редактирование встроенной библиотеки свойств материалов Editing the built-in material properties library	Designer, Materials
Разработка двумерной модели приемника на основе чертежей масок слоев Developing a two-dimensional receiver model based on layer mask drawings	Designer, Layout
Описание технологических операций изготовления требуемой конструкции Describing processing procedures for manufacturing the required construction	Designer, Process
Моделирование техпроцессов изготовления, формирование трехмерной модели устройства Simulating manufacturing processes, developing a three-dimensional model of the device	Designer, Model/Mesh
Задание сетки для моделирования, обозначение элементов и поверхностей конструкции Defining a grid for simulation, designating elements and surfaces of the construction	Designer, Model/Mesh
Редактирование библиотеки свойств материалов и описание новых материалов Editing the materials properties library and describing new materials	Designer, Materials
Задание граничных и начальных условий / Настройка программы расчетов Defining boundary and initial conditions / Calculation program setting	Analyzer, Solver setup
Выполнение расчетов Calculation	Analyzer, Solver setup
Вывод и анализ результатов Output and analysis of the results	Analyzer, Visualizer

Маршрут моделирования и применяемые при этом инструменты пакета CoventorWare иллюстрирует табл. 1. В качестве примера для апробации методики была выбрана конструкция резонатора в виде тонкого кольца из кремния сечением  $122 \times 122 \text{ мкм}^2$ .

Основой создания любой модели в данной САПР является пошаговое описание технологического маршрута производства устройства в модуле Process Editor с использованием базы данных свойств материалов. В данном случае применялись типовые технологические операции из библиотеки модуля Process Editor:

- 1) Substrate — формирование подложки из кремния;
- 2) Stack material — осаждение слоя из кремния толщиной 122 мкм для формирования кольца;
- 3) Straight cut — вытравливание слоя кремния по необходимой маске с негативным фоторезистом для формирования внутреннего периметра кольца;
- 4) Straight cut — вытравливание слоя кремния по необходимой маске с позитивным фоторезистом для формирования внешнего периметра кольца;
- 5) Delete — удаление подложки Substrate.

**DISCUSSING AND STATING THE PROBLEM**

The advantages of wave solid-state gyroscopes (WSG), produced using MEMS technologies, include high accuracy /price ratio, ability to sustain high-g forces, compactness and low weight, low energy consumption, short starting time, weak dependence on ambient temperature. Current test results of specimens make it possible to consider that WSG will find its niche in the field of medium-powered sensors [1]. The major issues of the WSG theory based on the dynamic motion analysis of thin-walled hemispherical and cylindrical resonators are set out in [2–5]. The authors of these papers note that a detailed analysis of the non-perfect WSG operation requires the use of numerical methods. Consequently,

the analysis of the dynamics of elastic shells, studies of the influence of the mass distribution irregularity, temperature and vibrations of the base, the errors of the excitation systems and position measurement, and others imply the use of modern simulation programs. An example of such operation is the technique and preliminary results of simulation of WSG with a ring resonator, produced in the CoventorWare software package [5, 6].

For practical application, it is important to understand the influence of defects associated with their imperfect manufacturing. This paper considers the problem in terms of similar effects simulation using modern CAD tools.

Research tasks:

- development of the design flow and techniques of simulating the WSG with ring resonator;

- study of free and forced oscillations caused by the stated forces and determination of resonance frequencies and optimization of design parameters of WSG for specifying the necessary motion mode, in particular, the resonance excitation frequency of the second mode;
- development of techniques of compensating for mass defects resulting from tolerances for processing procedures of the WSG manufacturing (technological defects) and leading to displacement of the initial position of the nodal points.

**RESEARCH TECHNIQUES**

**Developing a 3D model of the WSG Resonator Ring**

The work has been carried out on the basis of the CoventorWare CAD tools package®, specially designed for MEMS design. The validity

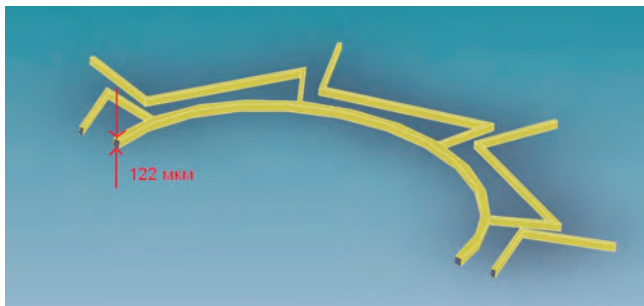


Рис. 1. Трехмерная модель кольцевого резонатора ВТГ  
Fig. 1. Three-dimensional model of the WSG resonator ring

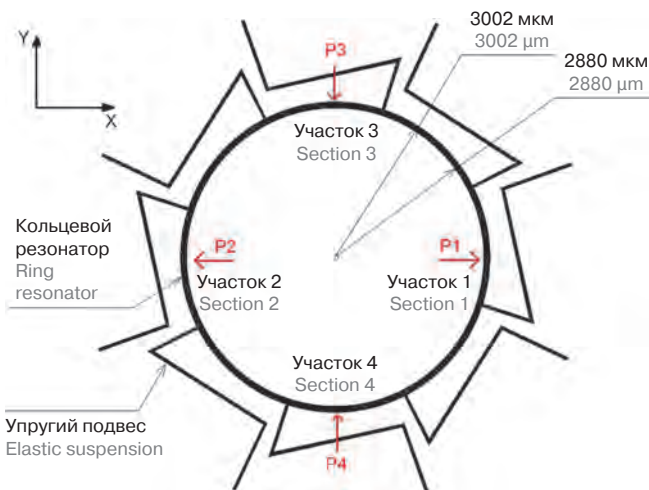


Рис. 2. Задание граничных условий моделирования ВТГ  
Fig. 2. Setting of boundary conditions for the WSG simulation

В результате моделирования технологических операций изготовления также задается толщина кольца резонатора (122 мкм). Трехмерная модель, синтезированная инструментом Model Builder, представлена на рис. 1. Внутренний радиус кольца (маска layer 2) составляет 2880 мкм, внешний радиус (layer 1) — 3002 мкм, жесткое основание резонатора, к которому крепились

of the obtained simulation results has been controlled by their comparison with analytical solutions obtained for particular cases of boundary conditions and simplified models.

The simulation route and tools of the CoventorWare package used here are presented in Table 1. As an example of the technique testing, a resonator in the form of a thin silicon ring with the cross section of  $122 \times 122 \mu\text{m}^2$  has been selected.

The basis for developing any model in this CAD is a step-by-step description of the flow route for manufacturing the device in the Process Editor module using the material properties database. In this case, typical processing procedures have been used from the library of the Process Editor module:

1. Substrate is the formation of silicon substrate;

2. Stack material is the deposition of a silicon layer with the thickness of  $122 \mu\text{m}$  to form the ring;
3. Straight cut is the etching of the silicon layer by the necessary mask with a negative photoresist to form the inner perimeter of the ring;
4. Straight cut is the etching of the silicon layer by the necessary mask with a positive photoresist to form the outer perimeter of the ring;
5. Delete is the removal of the Substrate.

As a result of simulating processing procedures of manufacturing, the thickness of the resonator ring ( $122 \mu\text{m}$ ) has also been set. The three-dimensional model, synthesized by the Model Builder tool, is shown in Fig. 1. The inner radius of the ring (mask of layer 2) is  $2880 \mu\text{m}$ , the outer radius (layer 1) is  $3002 \mu\text{m}$ ,

the rigid base of the resonator to which the torsion bars have been attached in the form of s-shaped segments is a square of  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ .

### Simulation Modes

The simulation has been carried out for the research and animation of the emerging oscillation modes of the ring resonator, construction of frequency response function, determination of the natural resonance frequencies of their peak amplitudes and their dependence on the ring dimensions. To simulate the WSG motion mode and excite standing wave oscillations, four harmonic forces P1...P4 (see Fig. 2) have impacted the gyroscope sensor, deforming the ring in orthogonally related directions. The value of the forces amplitude P1...P4 is  $3,53 \cdot 10^{-5} \text{ N}$ , and the corresponding pressure on the sectors exciting the oscillations is

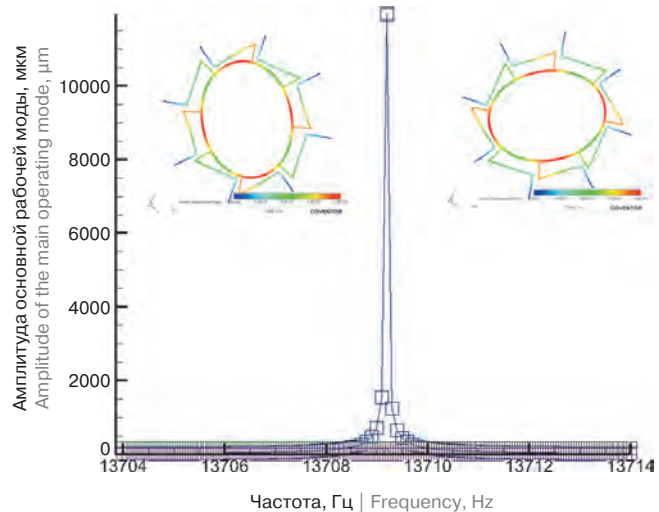


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика рабочей моды колебаний кольцевого резонатора ВТГ и крайние положения стоячей волны  
Fig. 3. Frequency response function of the operational oscillation mode of the WSG ring resonator and extreme positions of the standing wave

торсионы в виде s-образных сегментов, представляет собой квадрат  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ .

### Режимы моделирования

Моделирование проводилось для исследования и анимации возникающих мод колебаний кольцевого резонатора, построения амплитудно-частотных характеристик, определения собственных резонансных частот их максимальных амплитуд и их зависимости от размеров кольца. Для моделирования режима движения ВТГ и возбуждения колебаний стоячих волн на чувствительный элемент гироскопа задавалось воздействие четырех гармонических сил P1...P4 (см. рис. 2), деформирующих кольцо во взаимно перпендикулярных направлениях. Значение амплитуды сил P1...P4 составляло  $3,53 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$ , а соответствующее давление на секторы, возбуждающие колебания, —  $1,23 \cdot 10^{-4} \text{ Мпа}$ . Важным шагом, предшествующим



расчетам, является задание типа сетки для применения метода конечных элементов и шага разбиения. При выполнении данной работы экспериментально показано, что в задаче для расчетов оптимальным является тип сетки Extruded bricks, шаг разбиения которой выбирался по стандартному критерию двукратного уменьшения до момента, когда результаты расчетов в последующей итерации отличались от предыдущей не более чем на 5%.

**ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

**Собственные частоты мод колебаний**

На первом этапе моделировалось возбуждение режимов движения ВТГ при варьировании параметров конструкции. Получены амплитудно-частотные характеристики мод колебаний кольцевого резонатора. Нулевая мода колебаний отвечает колебаниям растяжения-сжатия, первая характеризует перемещение резонатора как твердого тела, а вторая является низшей собственной формой изгибных колебаний кольцевого резонатора.

Пример амплитудно-частотной характеристики для моды, являющейся основной рабочей модой колебаний кольцевого резонатора ВТГ, представлен на рис. 3.

Результаты моделирования обобщены в табл. 2, в которой представлены колебания в плоскости X-Y, параллельной плоскости кольца. В целом они

Таблица 2. Моды собственных колебаний ВТГ

Table 2. WSG eigen modes

Схема колебаний Oscillation scheme	Номер моды Mode number	Амплитуда, мкм Amplitude, μm	Резонансная частота, кГц Resonance frequency, kHz
Смещения по направлению X-Y Displacement in the X-Y direction	0	x = 2,2; y = 1,5	10,0
Повороты относительно центра кольца Rotational motion relative to the center of the ring	1	x = 1,3; y = 1,8	10,0
Стоячие волны с четырьмя узлами Standing waves with 4 nodes	2	x = y = 966,3	13,7
Стоячие волны с пятью узлами Standing waves with 5 nodes	3	x = y = 2,2	14,7
Стоячие волны с шестью узлами Standing waves with 6 nodes	4	x = 1,5; y = 1,3	29,2
Стоячие волны с восемью узлами Standing waves with 8 nodes	5	x = 6,7; y = 6,6	30,8

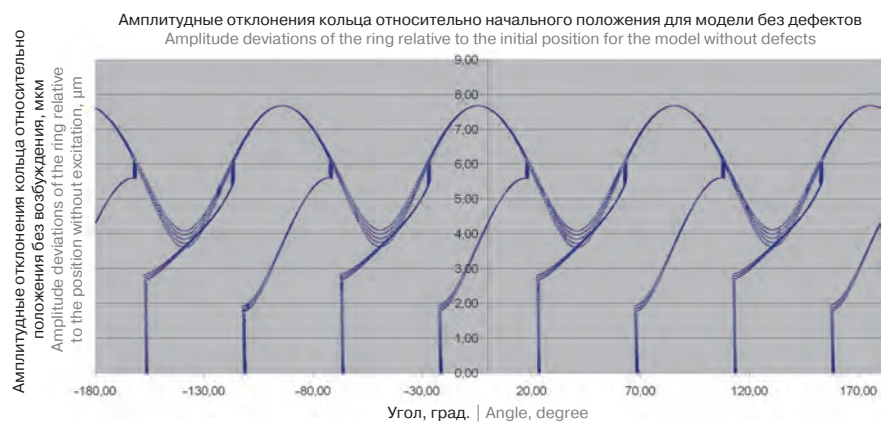


Рис. 4. Отклонения точек кольца и подвесов резонатора ВТГ от начального положения в режиме движения на резонансной частоте 13,6 кГц

Fig. 4. Deviations of the ring points and suspensions of the WSG resonator from the initial position in the motion mode at a resonance frequency of 13.6 kHz

$1,23 \cdot 10^{-4}$  МПа. An important step prior to calculations is setting of the grid type for applying the finite element method and the subinterval. While performing this work, it has been shown by experiments that the optimal type for the calculation is the grid type “Extruded bricks”, whose subinterval has been selected according to the standard criterion of a twofold decrease until the calculation results in the subsequent iteration have differed by not more than 5% from the previous one.

**THE RESULTS OBTAINED AND THEIR DISCUSSION**

**Natural Frequencies of the Oscillation Modes**

First, the excitation of the WSG motion modes has been simulated provided that the design parameters are varied. The frequency

response function of oscillation modes of the ring resonator have been obtained. The zero oscillation mode corresponds to extensional vibrations, the first one characterizes the displacement of the resonator as a rigid body, and the second one is the lowest eigenform of bending oscillations of the ring resonator.

An example of the frequency response function for the mode, which is the main operational oscillation mode of the WSG ring resonator, is shown in Fig.3.

The simulation results are summarized in Table 2, which presents the oscillations in the X-Y plane parallel to the plane of the ring. In general, they confirm the data of the developmental prototypes of WSG manufactured at the IPT RAS [6].

In the context of simulation, it has been found that when the cross dimensions of the

resonator vary within 10%, linear variation in the natural frequency of bending oscillations of the second mode takes place [7]. It is also shown that the dehomogenization of the ring, artificially created, for example, during the displacement of its center or the fixing conditions, results in amplitude-frequency distortion and the appearance of two resonance frequency maxima, which confirms the effect of splitting oscillation frequencies due to imperfect geometry of the ring, predicted in [8].

**Defect Simulation and Compensation**

The appearance of a standing wave in the ring resonator is clearly demonstrated in Fig. 4 (the angle is read from the positive direction of the OY axis counter-clockwise). In the initial rest



подтверждают данные экспериментальных образцов ВТГ, изготовленных в ФТИРАН [6].

При моделировании установлено, что при варьировании поперечных размеров резонатора в пределах 10% имеет место линейное изменение собственной частоты изгибных колебаний второй моды [7]. Показано также, что нарушение однородности кольца, искусственно созданное, например, при смещении его центра или условий закрепления, приводит к искажению амплитудно-частотной характеристики и возникновению двух максимумов резонансных частот, что подтверждает эффект расщепления частот колебаний из-за несовершенства геометрии кольца, предсказанный в работе [8].

### Моделирование дефектов и их компенсация

Возникновение стоячей волны в кольцевом резонаторе наглядно продемонстрировано на рис. 4 (отсчет угла ведется от положительного направления оси ОУ против часовой стрелки). В начальном положении покоя ось симметрии гироскопа

повернута относительно оси ОУ на  $4,7^\circ$ . На этом же рисунке обозначены положения узловых точек, расположенных симметрично на серединах четырех секторов кольца.

Для имитации влияния допусков масок топологии и параметров конструкции, а также режимов технологических процессов изготовления при моделировании конструкции в кольце резонатора искусственно формировались дефекты массы, представляющие собой полые выемки с размерами  $432 \times 92 \times 61 \text{ мкм}^3$  и массой 0,06 мкг, размещаемые в разных секторах кольца.

Влияние дефекта массы проиллюстрировано на рис. 5. Показано, что существование дефектов массы, расположенных под углом 0 и 90 градусов к оси ОУ, не влияет на резонансную частоту колебаний, но смещает положение узловых точек, в то время как дефекты массы, расположенные под углом 45 градусов, приводят дополнительно к сдвигу резонансной частоты, что может быть объяснено изменениями в упругих свойствах конструкции. Зависимость максимума АЧХ второй моды колебаний от дефекта массы практически линейна

Таблица 3. Влияние технологических дефектов массы и компенсирующих дефектов на смещения положений узловых точек  
Table 3. Effect of technological mass defects and compensating defects on the displacement of the positions of the nodal points

Описание дефектов Defect description	Расположение компенсирующего дефекта, град. Position of the compensating defect, deg.	Максимальное смещение от начального положения, мкм Maximum displacement from the initial position, $\mu\text{m}$	Результат действия компенсации, % Result of the compensation, %
Без дефектов Without defects	—	7,67	—
Под углом $0^\circ$ At an angle of $0^\circ$	Компенсации не требуется Compensation is not required	7,88	—
Под углом $45^\circ$ At an angle of $45^\circ$	—	26,97	—
	0	14,51	64,56
	90	22,81	21,55
	135	6,97	96,37
	180	36,32	-48,45
	225	8,21	97,20
	270	37,94	-56,84
	315	7,38	98,50

position, the symmetry axis of the gyroscope is rotated at  $4.7^\circ$  about the OY axis. In the same figure the positions of the nodal points located symmetrically in the middle of the four sectors of the ring are indicated.

To simulate the effect of topology mask tolerances and design parameters, as well as the modes of the processing procedures of manufacturing, mass defects in the resonator ring have been artificially formed during the construction simulation, which are hollow gaps with dimensions of  $432 \times 92 \times 61 \text{ }\mu\text{m}^3$  and mass of 0.06  $\mu\text{g}$ , placed in different sectors of the ring.

The effect of the mass defect is illustrated in Fig. 5. It is shown that the existence of mass defects located at an angle of 0 and 90 degrees

to the OY axis does not affect the resonance frequency of the oscillations, but displaces the position of the nodal points, while the mass defects located at an angle of 45 degrees result in the displacement of the resonant frequency, which can be explained by changes in the elastic properties of the construction. The dependence of the FRF maximum of the second oscillation mode on the mass defect is practically linear in the mass range from 0 to 30 ng. According to the results of simulation, in case of the ring dehomogenization, the frequency response function is distorted and two different resonance frequencies of the fundamental oscillations appear.

The presence of mass defects is a negative factor that decreases the WSG characteristics

due to errors in the initial position of the nodal points in the motion mode. To simulate the compensation for the arising distortions, it has been proposed to introduce additional compensating mass defects. This can be done, for example, by laser adjustment using selective evaporation of the resonator ring segment part. The purpose of this processing procedure is to return the points 1–4 (Fig. 2) to a position closest to the initial one. The results of simulation of the compensating mass defects are illustrated in Fig. 6 and Table 3.

It can be seen from the Table and Fig. 7 that the trajectory distortions appearing in case of the arrangement of technological rectangular mass defect of 6 ng with the center located at an angle of  $45^\circ$  to the vertical

в диапазоне масс 0 до 30 нг. Результаты моделирования показали, в частности, что при нарушении однородности кольца происходит искажение амплитудно-частотной характеристики и возникновение двух различных резонансных частот основных колебаний.

Наличие дефектов массы является отрицательным фактором, снижающим характеристики ВТГ из-за погрешностей начального положения расположения узловых точек в режиме движения. Для моделирования компенсации возникающих искажений предлагается ввести дополнительные компенсирующие дефекты масс. Это можно сделать, например, с помощью лазерной подгонки путем избирательного испарения части сегмента кольца резонатора. Целью такой технологической операции является возврат точек 1–4 (рис. 2) в положение, максимально близкое к исходному. Результаты моделирования введения компенсирующих дефектов масс иллюстрируются в табл. 3 и на рис. 6.

Из таблицы и рис. 7 видно, что искажения траектории, возникающие в случае расположения технологического прямоугольного дефекта массы в 6 нг с центром, расположенным под углом 45° к вертикальной оси, могут быть скомпенсированы с точностью до 98% путем введения компенсирующего дефекта такой же массы с центром, расположенным под углом 315°. Разработанная методика компенсации может быть применена для восстановления нулевого положения узловых точек при других параметрах технологических дефектов.

**Моделирование влияния параметров конструкции на характеристики ВТГ**

Для проведения параметрического анализа применялся метод Монте-Карло. Для применения метода требуется функциональная схема моделируемого устройства, описывающая взаимосвязи элементов конструкции. В данной работе изложена методика построения функциональной схемы ВТГ с использованием инструментов описания узлов конструкции в модуле Architect (см. рис. 7).

Решение задачи оптимизации методом Монте-Карло основывается на многократном случайном выборе вариантов решения и их сравнения. Анализ методом Монте-Карло позволяет оценить ожидаемый процент выхода при изготовлении устройства в зависимости от технологических допусков на отдельные

axis, can be compensated for with an accuracy of 98% by introducing a compensating defect of the same mass with the center, located at an angle of 315°. The developed compensation technique can be used to recover the zero position of the nodal points with other parameters of technological defects.

**Simulating the Design Parameters Effect on the WSG Characteristics**

For the parametric analysis, the Monte Carlo method has been used. To apply the method, the flow sheet of the simulated device is required, which describes the interconnections of the constructional elements. In this paper, a technique for constructing the flow sheet of WSG using the tools for

describing the constructional nodes in the Architect module has been developed (see Fig. 7).

Optimal solution by the Monte Carlo method is based on the repeated random selection of decision options and their comparison. The Monte Carlo method allows estimating the expected percentage of yield in the device manufacturing, depending on manufacturing tolerances for individual constructional elements. In particular, in this paper it has been determined by statistical analysis that 81.6% of the devices will have an operating frequency in the range of  $\pm 500$  Hz from the resonance frequency provided that the given tolerances for the thickness of the resonator ring are 1%.

*The paper has been supported by the Ministry of Education and Science (state task, project code 8.5098.2017/8.9).*

**CONCLUSIONS**

As a result of simulation, solutions have been obtained that are essential for improving the specifications and performance of the solid-state wave gyroscope with the ring resonator. The authors believe that the following provisions and results are new in this paper:

1. The design flow of WSG by CAD tools, whose final design solution is a set of masks for manufacturing using standard procedures of MEMS technology.
2. The method for determining the resonance frequency of the wave gyroscope. It has

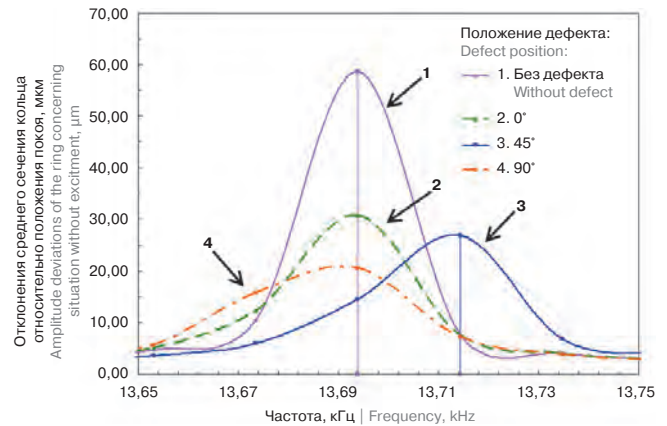


Рис. 5. АЧХ кольца резонатора ВТГ и влияние технологических дефектов: 1 — без дефекта, 2 — технологический дефект расположен под углом 0°, 3 — 45°, 4 — 90°

Fig. 5. The FRF of the WSG resonator ring and the effect of technological defects: 1 — without defect; 2 — technological defect is located at an angle of 0°, 3 — 45°, 4 — 90°

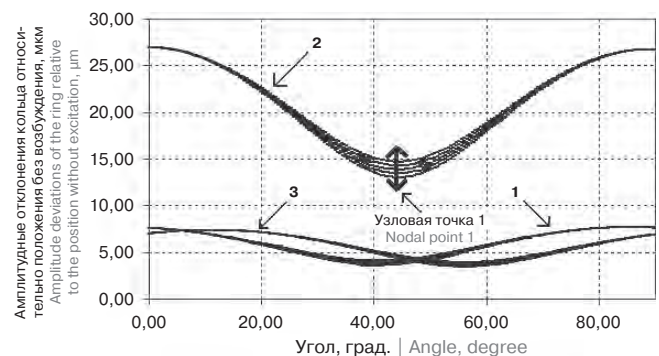


Рис. 6. Влияние компенсирующих дефектов на амплитудные отклонения резонатора: 1 — без дефекта; 2 — дефект массы под углом 45°; 3 то же, что 2, но с компенсирующим дефектом массы под углом 315°

Fig. 6. The effect of compensating defects on the amplitude deviations of the resonator: 1 — without defect; 2 — mass defect at an angle of 45°; 3 is the same as 2, but with compensating for mass defect at an angle of 315°



элементы конструкции. В частности, в данной работе методом статистического анализа определено, что при заданных допусках на толщину кольца резонатора в 1% 81,6% устройств будет иметь рабочую частоту в диапазоне  $\pm 500$  Гц от резонансной частоты.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (государственное задание, код проекта 8.5098.2017/8.9).*

## ВЫВОДЫ

В результате моделирования получены решения, имеющие существенное значение для повышения технических и эксплуатационных характеристик твердотельного волнового гироскопа с кольцевым резонатором. Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты.

1. Маршрут проектирования ВТГ инструментами САПР, конечным проектным решением которого является комплект масок для изготовления с использованием типовых операций технологии МЭМС.

2. Методика определения резонансной частоты волнового гироскопа. Показано, что при заданных параметрах конструкции ( $R_{\text{внутр}} = 2880$  мкм,  $R_{\text{внеш}} = 3002$  мкм,  $P = 123$  Па) значение резонансной частоты, полученное по результатам моделирования, составляет 13694 Гц, что согласуется с данными экспериментальных исследований опытных образцов ВТГ.

3. Предложена методика моделирования влияния дефектов массы на характеристики чувствительности ВТГ и способ оптимальной компенсации дефектов массы на основе удаления компенсирующих объемов колеблющейся рамки. Результаты моделирования положения компенсирующих дефектов и их массы показали, что смещение нуля гироскопа может быть скомпенсировано до 98,5%.

4. Показано, что нарушение однородности кольца, искусственно созданное, например, при смещении его центра или условий закрепления, приводит к искажению амплитудно-частотной характеристики и возникновению двух максимумов резонансных частот, что подтверждает эффект расщепления частот колебаний из-за несовершенства геометрии кольца.

5. Разработана методика построения функциональной схемы резонатора и методом Монте-Карло показано, что процент выхода годных устройств при заданных допусках на толщину кольца резонатора в 1% отклонения  $\pm 500$  Гц от заданной рабочей частоты будут иметь 81,6% устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мейер Д., Розелле Д. Инерциальная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа // Труды XIX Санкт-Петербургской навигационной конференции по интегрированным навигационным системам. 28–30 мая 2012 г. Санкт-Петербург, С-Пб.: 2012. — № 3 (78). — С. 45–54.

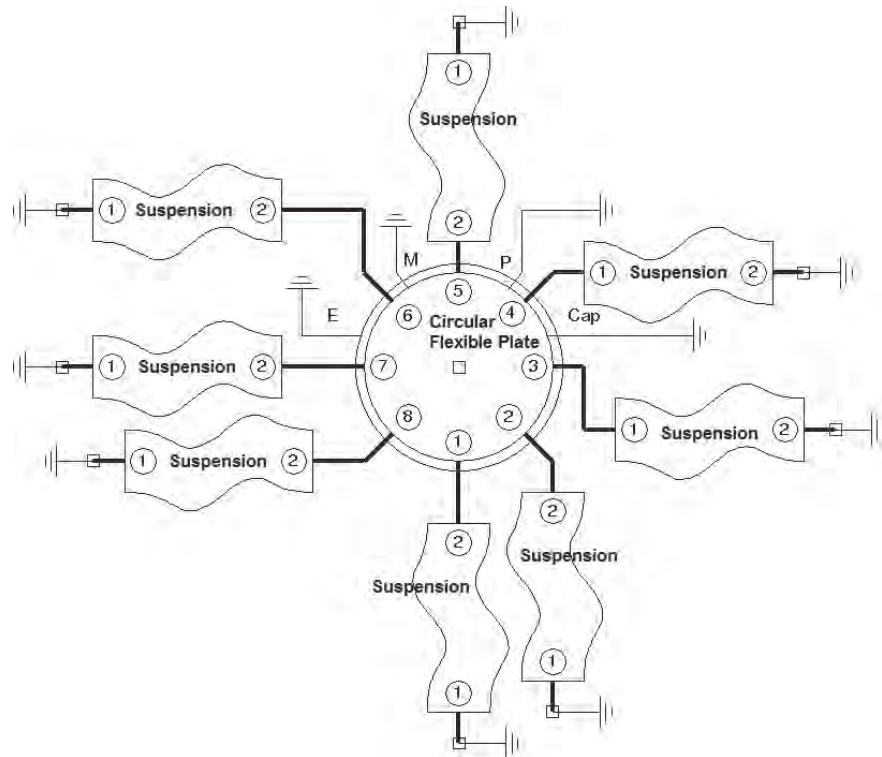


Рис. 7. Функциональная схема ВТГ

Fig. 7. WSG flow sheet

- Лунин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теории и технология // М.: Радиотехника, 2014. — 176 с.
- Maslov D. A. *Identification of solid state wave gyroscope parameters at slowly varying forced oscillation frequency* // Engineering Journal: Science and Innovation. Electronic science and engineering publication. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1695.
- Erdal Yilmaz and David Bindel. *Temperature Sensitivity and Shape Optimization of Solid-State Wave Gyroscopes* // IEEE Sensors Journal. 2016. V. 16. № 2. P. 1–9.
- Денисов Р. А., Обухов В. И. Исследование влияния геометрических параметров чувствительного элемента твердотельного волнового гироскопа на его масштабный коэффициент // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева, 2015. — № 1 (108). — С. 263–268.
- Морозов О. В. Изготовление микроэлектромеханических устройств на основе технологии встроенной изоляции в пластине кремния / О. В. Морозов, А. В. Постников, И. И. Амиров, В. А. Кальнов // Нано- и микросистемная техника, 2012. — № 7. — С. 15–19.
- Гришунин К. А., Певцов Е. Ф., Аль-Натах Р. И. Моделирование микроэлектромеханического волнового гироскопа средствами САПР CoventorWare // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Межд. н-техн. конф. INTERMATIC-2013, 2–6 декабря 2013 г. — Москва. М.: Энергоатомиздат, 2013, часть 3. — С. 7–12.
- Серегин С. В. Влияние несовершенств формы на колебания кольцевого резонатора волнового твердотельного гироскопа // Нелинейная динамика, 2017. — Т. 13. — № 3. — С. 423–431.



been shown that at the given design parameters ( $R_{in} = 2880 \mu\text{m}$ ,  $R_{out} = 3002 \mu\text{m}$ ,  $P = 123 \text{ Pa}$ ), the value of the resonance frequency obtained from the simulation results is 13694 Hz, which corresponds to the experimental research data of WSG prototypes.

3. A simulation technique of the mass defects effect on the WSG sensitivity characteristics and the method for optimal compensation for mass defects on the basis of removing the compensating volumes of a vibratory frame have been proposed. The results of simulating the position of the compensating defects and their masses have shown that the displacement of the gyroscope zero can be compensated for to 98.5%.

4. It has also been shown that the dehomogenization of the ring, artificially created, for example, during the displacement of its center or the fixing conditions, results in amplitude-frequency distortion and the appearance of two resonance frequency maxima, which confirms the effect of splitting the oscillation frequencies due to imperfect geometry of the ring.

5. A technique for constructing the resonator flow sheet has been developed using the Monte Carlo method. By statistical analysis it has been shown that the percentage of yield of the suitable devices with given tolerances

for the thickness of the resonator ring of 1% of the deviation of  $\pm 500 \text{ Hz}$  from the given operating frequency would be 81.6%.

#### REFERENCES

1. Meier D., Rozelle D. Inertsial'naya navigatsionnaya sistema na osnove miniaturnogo volnogo tverdotel'nogo giroskopa // Trudy XIX Sankt-Peterburgskoi navigatsionnoi konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam. 28–30 maya 2012 g. Sankt-Peterburg, S-Pb.: 2012. № 3 (78). P. 45–54. (In Russian).
2. Lunin B. S., Matveev V. A., Basarab M. A. Volnoi tverdotel'nyi giroskop. Teorii i tekhnologiya // M.: Radiotekhnika, 2014. 176 p. (In Russian).
3. Maslov D. A. Identification of solid state wave gyroscope parameters at slowly varying forced oscillation frequency // Engineering Journal: Science and Innovation. ELECTRONIC SCIENCE AND ENGINEERING PUBLICATION. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1695.
4. Erdal Yilmaz and David Bindel. Temperature Sensitivity and Shape Optimization of Solid-State Wave Gyroscopes // IEEE Sensors Journal. 2016. V. 16. № 2. P. 1–9.
5. Denisov R. A., Obukhov V. I. Issledovanie vliyaniya geometricheskikh parametrov chuvstvitel'nogo elementa tverdotel'nogo volnogo giroskopa na ego masshtabnyi koeffitsient // Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseeva, 2015. № 1 (108). P. 263–268. (In Russian).
6. Morozov O. V. Izgotovlenie mikroelektromekhanicheskikh ustroystv na osnove tekhnologii vstroenoi izolyatsii v plastine kremniya / O. V. Morozov, A. V. Postnikov, I. I. Amirov, V. A. Kal'nov // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, 2012. № 7. P. 15–19. (In Russian).
7. Grishunin K. A., Pevtsov E. F., Al'Natakh R. I. Modelirovanie mikroelektromekhanicheskogo volnogo giroskopa sredstvami SAPR CoventorWare // Fundamental'nye problemy radioelektronnoy priborostroeniya / Materialy Mezhd. n-tekhn. konf. «INTERMATIC-2013», 2–6 dekabrya 2013 g., Moskva. M.: Energoatomizdat, 2013, chast' 3. P. 7–12. (In Russian).
8. Seregin S. V. Vliyaniye nesovershenstv formy na kolebaniya kol'tsevoogo rezonatora volnogo tverdotel'nogo giroskopa // Nelineinaya dinamika, 2017. V. 13. № 3. P. 423–431. (In Russian).



**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

**ОБРАЗ  
БУДУЩЕГО  
УСПЕХА**

[www.technosphere.ru](http://www.technosphere.ru)

ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА ТЕХНОЛОГИИ СИСТЕМЫ

НАНОИНДУСТРИЯ НАУКА ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОРЯДКА

ФОТОНИКА НАУКА ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОРЯДКА

ПЕРВАЯ МИЛЯ LAST MILE

АНАЛИТИКА НАУКА ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОРЯДКА

СТАНКОИНСТРУМЕНТ НАУКА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВО

Цифровая экономика