

В. В. МАТВЕЕВ

ВИБРАЦИОННЫЕ ГИРОСКОПЫ

Представлен аналитический обзор вибрационных гироскопов, выполненных по различным технологиям: кремниевой технологии микроэлектромеханических систем, высокоточной обработки металлических сплавов, технологии кварцевого стекла, а также микровыдувания стекла. Приведена математическая модель идеального вибрационного гироскопа, аналогичная классическому маятнику Фуко. Показано, что при создании микромеханических вибрационных гироскопов возможны три способа формирования выходного сигнала: амплитудно-модулированный, частотный и интегрирующий. Рассматривается структура микромеханического гироскопа компенсационного типа.

Дано описание эффекта Брайана при возбуждении стоячих волн в объемных и кольцевых резонаторах. Продемонстрировано, что на базе волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) с высокодобротными кварцевыми резонаторами можно построить гироскопы интегрирующего типа, а на базе ВТГ с металлическими резонаторами – датчики угловой скорости. Описаны схемы ВТГ прямого измерения и компенсационного типа.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, волновой твердотельный гироскоп, резонатор, динамические характеристики, уравнения движения, эффект Брайана.

Введение

В настоящее время вибрационные гироскопы занимают лидирующее положение среди датчиков инерциальной информации по масштабам производства и применения. Этот класс приборов объединяет широкую номенклатуру устройств, включая гироскопы, выполненные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), а также волновые твердотельные гироскопы (ВТГ) с металлическими и кварцевыми резонаторами. ВТГ является одним из наиболее перспективных приборов для определения угловой скорости или угла поворота объекта. Это обусловлено выгодным соотношением себестоимости изготовления и достигаемой точности получаемой инерциальной информации [1].

Математическое описание ВТГ и протекающих в нем процессов доказывает схожесть принципа его действия с маятником Фуко [2], который в 1851 году использовался для демонстрации суточного вращения Земли – за год до появления механического гироскопа с быстровращающимся ротором-волчком. В связи с этим академик В.Ф. Журавлев [3] предложил рассматривать широкий класс вибрацион-

Матвеев Валерий Владимирович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Тульский государственный университет. Председатель Тульского отделения общественного объединения «Академия навигации и управления движением».

ных гироскопов (струнные, волновые твердотельные, микромеханические и др.) как обобщенный маятник Фуко.

В основе работы ВТГ лежит явление инерции стоячей волны, впервые обнаруженное и описанное Дж.Г.Х. Брайаном при исследовании вибрирующего винного бокала в 1890 году [4]. В 1891 году Дж. Уокер и Дж.Л.С. Хаттон экспериментально подтвердили наличие этого эффекта для второй, третьей и четвертой форм колебаний бокала [5].

Дж.У.С. Прингл (J.W.S. Pringle) в 1948 году опытным путем доказал, что жужжальца двукрылых насекомых функционируют как миниатюрные вибрационные гироскопы: колеблющиеся массы жужжалец под действием силы инерции Кориолиса отклоняются при повороте тела, что позволяет насекомому стабилизировать вращения вокруг своего центра масс [6].

В 1955 году Ч.Т. Морроу (C.T. Morrow) теоретически и экспериментально обосновал принцип действия вибрационного гироскопа на основе камертона, разработанного в компании «Сперри» (Sperry Gyroscope Company), – так называемого «гиротрона» (gyrotron) [7]. Прибор функционально эквивалентен датчику угловой скорости, но вместо прецессии ротора в нем используется вибрационное движение.

Эффект инерции стоячих волн, обнаруженный Брайаном, впервые был задействован в прототипе ВТГ в 1965 году, созданном в исследовательской лаборатории компании Delco (США) под руководством доктора Д. Линча (D. Lynch) [8].

В 1978 году Б. Фридланд (B. Friedland) и М. Хаттон (M. Hutton) предложили позаимствовать из небесной механики метод расчета орбитальных элементов, который позволяет быстрые колебания точки на резонаторе представить как медленно меняющиеся параметры эллиптической орбиты, что упрощает анализ влияния угловой скорости и погрешностей на выходной сигнал вибрационного гироскопа [9]. Впоследствии с помощью этого метода, вошедшего позднее в систему стандартизации IEEE 1431 [12], Д. Линч описал динамику и погрешности кориолисовых вибрационных гироскопов (Coriolis vibratory gyroscope – CVG) [10, 11].

Первая статья, посвященная созданию прототипа ВТГ с кварцевым резонатором, была опубликована в 1982 году в журнале *Aviation Week & Space Technology* [13] и не осталась незамеченной. Уже в 1985 году российские ученые В.Ф. Журавлев и Д.М. Климов разработали теорию ВТГ, которая сохраняет свою актуальность до настоящего времени [14].

Впервые вибрационный гироскоп, построенный по технологии «кремний на стекле» (silicon-on-glass), был продемонстрирован Лабораторией Ч. Дрейпера (США) (The Charles Stark Draper Laboratory, Inc.) в 1991 году [15]. Гироскоп представлял собой камертонную схему, в которой инерционные массы возбуждались электростатическим способом в противофазе с помощью гребенчатых емкостных структур, а выходной сигнал формировался подобно крутильным колебаниям гиротрона [7]. Достигнутый уровень случайного шума составил $1^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ [16].

Один из первых отечественных образцов кремниевого микромеханического вибрационного гироскопа с чувствительным элементом в форме диска был представлен в 2002 году группой разработчиков АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон» (Санкт-Петербург) под руководством академика В.Г. Пешехонова [17, 18]. Оптимизация конструкции подвеса дискового гироскопа и сервисной электроники позволила создать в дальнейшем образцы микромеханических вибрационных гироскопов на уровне мировых лидеров в данной области.

В 2012 году был продемонстрирован «маятник Фуко на чипе» – микромеханический кремниевый гироскоп, работающий в режиме измерения угловых перемещений (whole-angle mode) [19]. Добротность гироскопа достигла 1,2 млн.

Значительных успехов при производстве ВТГ с полусферическим кварцевым резонатором добилась французская компания Safran: долговременная стабильность смещения нулевого сигнала – $0,005^\circ/\text{ч}$ (СКО), нестабильность масштабного коэффициента – 1 ppm (СКО), шум – $0,0002^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ [20].

В 2022 г. южнокорейские специалисты повторили опыт Брайана, в результате им удалось построить ВТГ с резонатором в виде обычного винного бокала и детекторами колебаний его кромки, в качестве которых послужили трехканальные оптические интерферометры [21]. Экспериментально на основе бокала с резонансной частотой 444 Гц и добротностью 1477,2 удалось реализовать гироскоп с нестабильностью нулевого сигнала $2,093^\circ/\text{ч}$.

1. Классификация вибрационных гироскопов

Вибрационный гироскоп (vibratory gyroscope, Coriolis vibratory gyroscope) – устройство, которое содержит материальный объект, совершающий быстрые периодические движения, и вследствие этого чувствительно к вращению в инерциальном пространстве [22].

В вибрационных гироскопах материальным объектом – носителем быстрых периодических движений могут быть [12]: вибрирующие пластины (vibrating plates) (рис. 1), вибрирующие балки (vibrating beams) (рис. 2), вибрирующие оболочки (vibrating shells) (рис. 3), камертоны (tuning fork) (рис. 4).

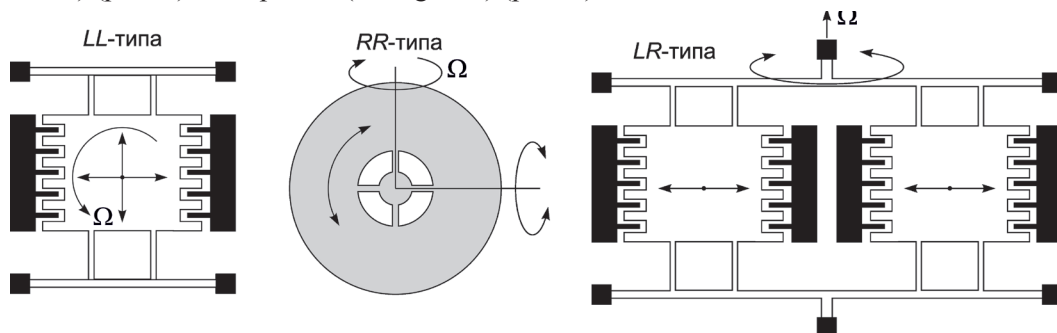


Рис. 1. Вибрационные гироскопы в форме вибрирующих пластин

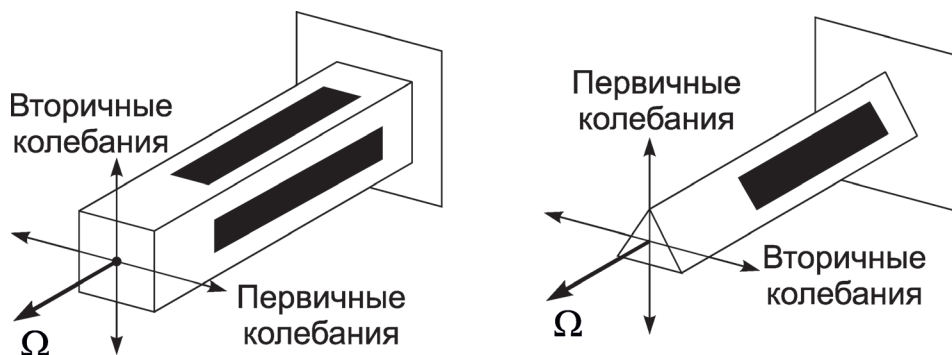


Рис. 2. Вибрационные гироскопы в форме вибрирующих балок

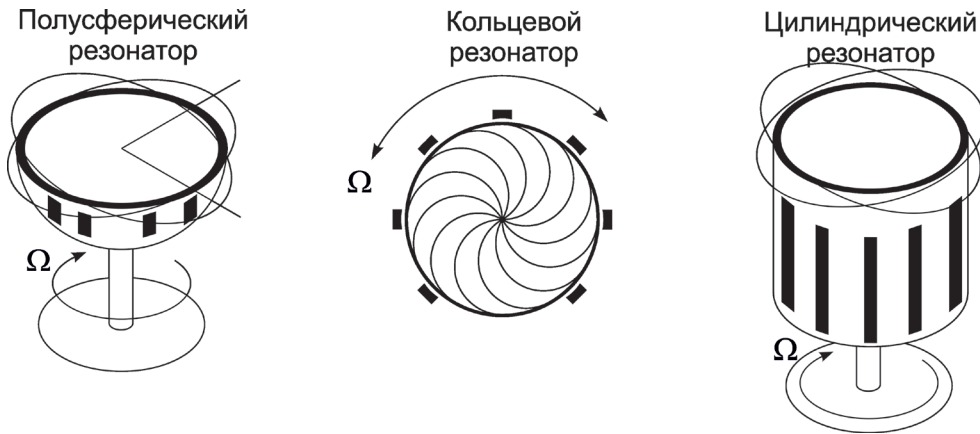


Рис. 3. Вибрационные гироскопы в форме вибрирующих оболочек

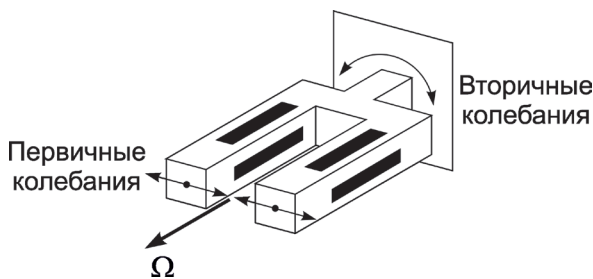


Рис. 4. Камертонный вибрационный гироскоп

Колебания, возбуждаемые в резонаторе (чувствительном элементе), называют *первичными*. При угловой скорости основания Ω появляются кориолисовы силы инерции, которые вызывают *вторичные* колебания чувствительного элемента (ЧЭ), несущие информацию об угловой скорости или угле поворота основания. В зависимости от

того, являются первичные и вторичные колебания линейными (поступательными) или вращательными, вибрационные гироскопы на основе вибрирующих пластин подразделяют на четыре типа: *LL*, *LR*, *RL* и *RR* (рис. 1) [23], где первый символ обозначает тип первичных колебаний, второй – тип вторичных (L – linear, R – rotary) [23].

Вибрационные гироскопы, как правило, содержат несколько контуров управления: автоматическую настройку амплитуды возбуждения, настройку частоты вибраций на резонансную частоту, компенсацию квадратурной составляющей и т.д. В вибрационных гироскопах прямого измерения (с разомкнутым контуром) движение чувствительных элементов непосредственно преобразуется в электрический сигнал, который далее демодулируется и после соответствующей обработки непосредственно подается на выход прибора. В компенсационных вибрационных гироскопах реализуется силовая обратная связь, компенсирующая вторичные колебания чувствительного элемента. В этом случае информация об угловой скорости основания считывается из цепи обратной связи.

2. Математическая модель вибрационных гироскопов

Все принципиальные теоретические вопросы, касающиеся создания вибрационных гироскопов, могут рассматриваться в рамках одних и тех же уравнений, аналогичных уравнениям, описывающим движение классического маятника Фуко [3]. Однако в отличие от последнего чувствительный элемент вибрационного гироскопа связан с основанием упругими связями, поэтому вращение упругой среды вовлекает реали-

зованную форму колебаний во вращение в инерциальном пространстве. При этом отношение угловой скорости вращения чувствительного элемента во вращающейся системе координат к его угловой скорости в инерциальной системе координат является константой, зависящей от номера формы колебаний и почти не зависящей от свойств материала [3]. В случае ВТГ эта константа называется коэффициентом Брайана.

Математическая модель идеализированных механических явлений, протекающих практически во всех видах вибрационных гироскопов, может быть представлена как [10, 11]

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{2}{T}\dot{x} + (\omega_0^2 - \eta'\Omega^2)x = \frac{F_x}{m} + 2\eta\Omega\dot{y} + \eta'\dot{\Omega}y, \\ \ddot{y} + \frac{2}{T}\dot{y} + (\omega_0^2 - \eta'\Omega^2)y = \frac{F_y}{m} - 2\eta\Omega\dot{x} - \eta'\dot{\Omega}x, \end{cases} \quad (1)$$

где x, y – координаты, характеризующие первичные и вторичные колебания (моды) соответственно; T – постоянная времени резонатора; Ω – угловая скорость вращения; η – коэффициент кориолисовых ускорений; η' – коэффициент переносных и центробежных ускорений; m – эквивалентная масса чувствительного элемента; F_x, F_y – внешние силы; ω_0 – круговая частота собственных колебаний.

Если принять коэффициенты при соответствующих ускорениях $\eta = 1, \eta' = 1$, то система (1) приобретает вид уравнений движения классического маятника Фуко.

Постоянная времени резонатора связана с его добротностью Q (quality factor) соотношением

$$T = 2Q / \omega_0. \quad (2)$$

Добротность характеризует диссипативные свойства резонатора и может быть рассчитана по резонансному пику амплитудно-частотной характеристики гироскопа (рис. 5) [24]:

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_r - \omega_l}, \quad (3)$$

где частоты ω_l и ω_r соответствуют амплитудам колебаний, меньшим резонансной амплитуды на -3 дБ и отстоящим слева и справа от резонансной частоты ω_0 .

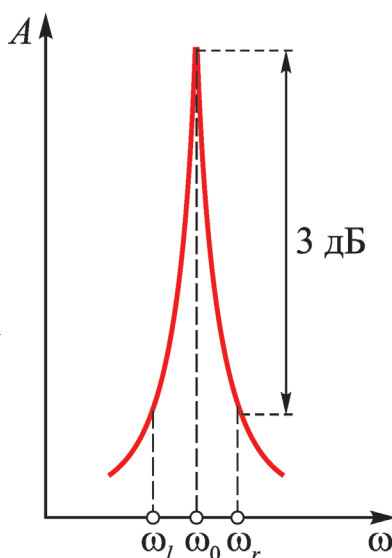


Рис. 5. Определение добротности по резонансному пику амплитудно-частотной характеристики

3. Микромеханические вибрационные гироскопы

Микромеханические вибрационные гироскопы (ММГ) представляют собой конструктивные модификации пространственного линейного или углового осциллятора. Это малогабаритные и относительно недорогие инерциальные датчики низкого и среднего класса точности, изготавливаемые, как правило, по кремниевой МЭМС-технологии, заимствованной в значительной степени из микроэлектронной промышленности.

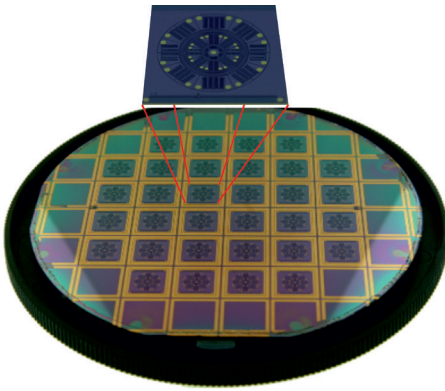


Рис. 6. Пластина кремния с гироскопическими датчиками [25]

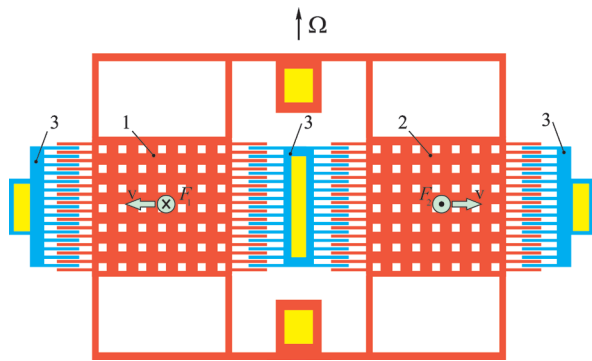


Рис. 7. Схема микромеханического гироскопа камертонного типа

Технология МЭМС позволяет реализовать на одном кристалле кремния (или другого материала) как механические микроструктуры чувствительных элементов и упругих подвесов, так и электромеханические устройства возбуждения, съема информации, включая сервисную электронику. Технология дает возможность значительно миниатюризовать сложные электромеханические системы и изготовить группы из десятков и сотен гироскопов на одной пластине кремния (рис. 6).

Впервые в 1990-х годах специалисты Лаборатории Ч. Дрейпера представили микромеханические кремниевые вибрационные гироскопы карданного и камертонного типа. При изготовлении использовалась технология «кремний на стекле», в соответствии с которой подвижные элементы формируются из тонких слоев, последовательно наносимых на поверхность подложки. Конструкционный слой поликремния осаждался поверх жертвенного. Затем жертвенный слой выборочно вытравливался, чтобы освободить подвижную структуру.

В вибрационном гироскопе камертонного типа производства Лаборатории Ч. Дрейпера (рис. 7) две симметричные чувствительные кремниевые массы 1 и 2 приводятся в противофазные колебательные движения с помощью гребенчатых электростатических актуаторов 3. На рис. 7 показаны мгновенные направления линейной скорости чувствительных масс. При появлении переносной угловой скорости под действием сил инерции Кориолиса F_1 и F_2 возбуждаются вторичные противофазные колебания (перпендикулярные плоскости чертежа), несущие информацию об угловой скорости основания Ω . Добротность первых гироскопов была невысока – порядка 1000.

Упрощению процесса изготовления конечного изделия, а также интеграции элементов микромеханики и электроники существенно помогает использование технологии «кремний на изоляторе» (КНИ) (silicon-on-insulator) [16]. Благодаря полной диэлектрической изоляции всех элементов МЭМС на структурах КНИ возможно построить интегрированные (интеллектуальные) системы в одном кристалле с несколькими осями чувствительности. На рис. 8 приведена схема изготовления чувствительного элемента по технологии КНИ. Исходной заготовкой для микроструктур является пластина с рабочим (обычно 100 мкм) и опорным (400 мкм) слоями, разделенными слоем оксида кремния (4 мкм). На рабочий слой наносится фоторезист, из которого делается маска с заданным рисунком микроструктуры (рис. 8, а). Далее жидкостным или сухим травлением кремния рабочий слой удаляется в тех

местах, где отсутствует фоторезист (рис. 8, б).

В качестве сухой обработки может применяться глубокое реактивное ионное травление (Deep Reactive Ion Etching – DRIE). Далее для освобождения подвижных структур удаляется слой оксида через отверстия (рис. 8, в), которыми с этой целью покрываются подвижные элементы (рис. 9). Типовой размер отверстий – квадрат 15×15 мкм. Для освобождения упругих элементов и подвижных электродов от оксида кремния их толщина должна составлять порядка 10 мкм. Сплошные участки структуры (рис. 8, в), где нет отверстий, остаются закрепленными на оксиде кремния. Точки крепления упругих элементов (анкеров) формируются за счет сплошных участков порядка 40×40 мкм [16]. Монтаж токоподводов осуществляется с помощью металлических площадок (рис. 8, г). Следует отметить, что побочным эффектом глубокого реактивного ионного травления является «подрезание» (*notching*), обусловленное отражением ионов от слоя оксида кремния, вследствие этого происходит подтравливание профиля в нижней части структуры.

Известна также LIGA-технология (нем. Lithographie, Galvanoformung, Abformung – литография, гальванопластика, формование), позволяющая создавать микроструктуры с очень большим соотношением высоты и ширины (до нескольких сотен) и практически вертикальными стенками. В основе процесса – глубокая рентгеновская литография с ис-

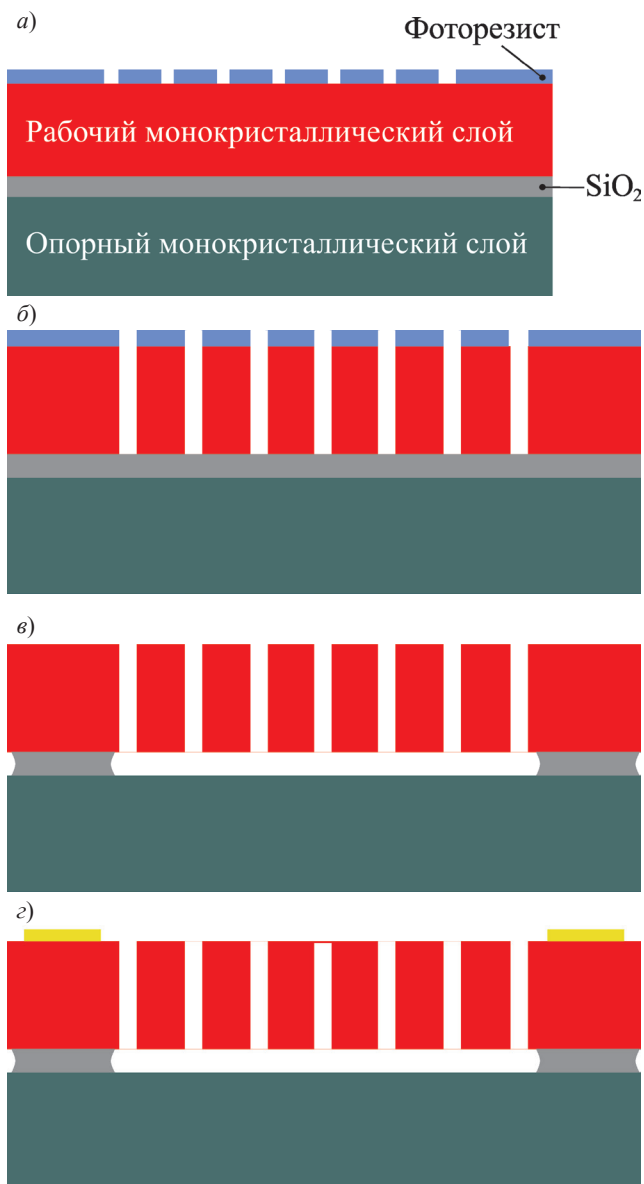


Рис. 8. Процесс изготовления чувствительного элемента по технологии КНИ

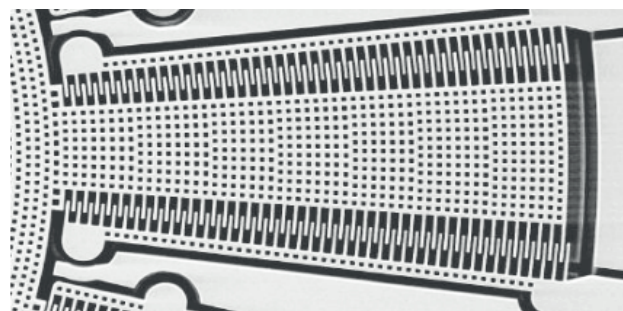


Рис. 9. Фрагмент подвижной части микромеханического гироскопа [26]

пользованием синхротронного излучения, последующее гальваническое осаждение металла и формование готовых деталей. Технология обеспечивает высокую точность и пригодна для серийного выпуска МЭМС, микрооптических элементов и микрофлюидных устройств [23].

Для производства микромеханических вибрационных гироскопов применяется также SIGA-технология (ультрафиолетовая литография, гальваника и формовка), позволяющая управлять шириной профиля структуры и совместимая с технологией тонких пленок. Технология включает следующие основные процессы: ультрафиолетовую литографию, осаждение слоев и плазменное травление, гальванику, а кроме того, получение копий из полимеров или металла [23].

Технология HART (High Aspect Ratio Technologies – технологии с высоким отношением сторон) позволяет формировать структуры с большим соотношением высоты и ширины (глубокие и узкие канавки). Она предусматривает глубокое реактивное травление, выполняемое на специальных установках, которое обеспечивает удаление слоя кремния толщиной до нескольких сотен микрон с высокой степенью вертикальности стенок образующихся канавок [23].

MUMPS (Multi-User MEMS Processes) – метод трехслойной поликристаллической поверхностной микрообработки, стандартно применяемый для прототипирования МЭМС [23].

4. Формирование информативного сигнала в микромеханических гироскопах

Микромеханические вибрационные гироскопы могут быть реализованы по типу прямого и компенсационного измерения. Схема простейшего микромеханического гироскопа прямого измерения приведена на рис. 10. Актюаторы возбуждают первичные резонансные колебания вдоль оси x по закону

$$x(t) = x_0 \cos \omega_0 t,$$

где x_0 , ω_0 – амплитуда и частота первичных колебаний.

Полагая $\Omega = \text{const}$, запишем второе уравнение системы (1) при $\eta = 1$ следующим образом:

$$\ddot{y} + \frac{2}{T} \dot{y} + \omega_0^2 y = 2\Omega x_0 \omega_0 \sin \omega_0 t. \quad (4)$$

Частное решение уравнения (4), характеризующее установившиеся вторичные резонансные колебания чувствительного элемента, имеет вид

$$y(t) = \frac{2\Omega x_0 Q}{\omega_0} \sin(\omega_0 t - \pi/2). \quad (5)$$

Из решения (5) следует, что вторичные колебания представляют собой амплитудно-модулированный сигнал, амплитуда которого пропорциональна угловой скорости основания, а несущая ω_0 соответствует резонансной частоте подвеса. Так как несущая не содержит полезной информации, то для анализа динамики вибрационных гироскопов удобно пользоваться передаточными функциями по огибающим амплитуд колебаний. Для режима чувствительности передаточная функция по огибающей амплитуд вторичных резонансных колебаний имеет вид апериодического звена первого порядка [27]:

$$W_x^{Oe.}(s) = \frac{y^{Oe.}(s)}{\Omega(s)} = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (6)$$

где $K = 2x_0 Q / \omega_0$ – коэффициент передачи вибрационного гироскопа; T – постоянная времени, определяемая соотношением (2).

Из свойств апериодического звена первого порядка следует, что длительность переходного процесса t_{Π} составляет примерно три постоянные времени $3T$ [28], поэтому

$$t_{\Pi} \approx 6Q / \omega_0. \quad (7)$$

Полоса пропускания вибрационного гироскопа прямого измерения в резонансном режиме будет определяться соотношением

$$\Delta\omega_{BW} \approx 1 / T = \omega_0 / (2Q). \quad (8)$$

В результате имеют место два противоречивых условия [27]: для увеличения чувствительности K относительно измеряемой угловой скорости необходимо повышать добротность резонатора Q , в то же время для расширения полосы пропускания $\Delta\omega_{BW}$ и сокращения времени переходного процесса t_{Π} следует ее снижать. Чтобы устранить это противоречие, вибрационный гироскоп должен функционировать в режиме замкнутого контура компенсации кориолисовых сил инерции.

Например, микромеханический гироскоп RR -типа представляет собой датчик угловой скорости компенсационного типа [18, 27] (рис. 11). Первичные высокочастотные колебания ротора вокруг оси z создают периодически изменяющийся по направлению кинетический момент H . При вращении основания вокруг оси y с угловой скоростью Ω возникает периодически изменяющийся гироскопический момент (момент кориолисовых сил инерции $M_{\text{Кор}}$), который генерирует вторичные колебания ротора вокруг оси x .

Цепь обратной связи сформирована датчиком угла вторичных колебаний, усиленно-преобразующим трактом (на рис. 11 не показан) и датчиком момента. При построении контура компенсации должен быть обеспечен равный 180° сдвиг фаз колебаний момента, развиваемый датчиком момента на несущей частоте по отношению к действующему на чувствительный элемент моменту кориолисовых сил инерции [27]. Структурная схема компенсационного вибрационного гироскопа для

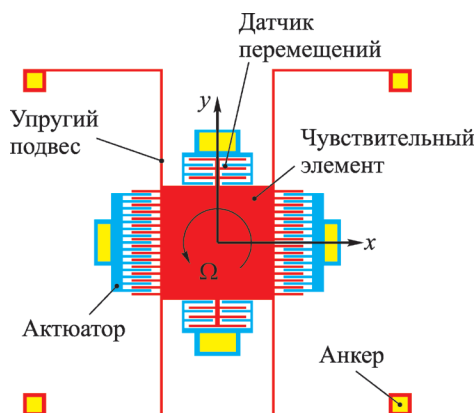


Рис. 10. Схема простейшего микромеханического гироскопа

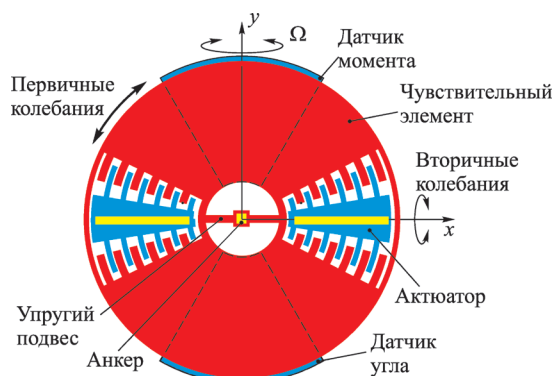


Рис. 11. Компенсационный микромеханический вибрационный гироскоп RR -типа

огигающих вторичных колебаний представлена на рис. 12, где символами $K_{ДУ}$, K_Y , $K_{ДМ}$ обозначены коэффициенты передачи датчика угла, усилителя и датчика момента соответственно. Постоянная времени компенсационного гироскопа определяется по зависимости [27]

$$T^* \approx \frac{Tk_x}{K_{ДУ}K_YK_{ДМ}}, \quad (9)$$

где k_x – угловая жесткость подвеса вокруг оси x .

Из соотношения (9) следует вывод, что значение постоянной времени T^* может быть обеспечено подбором коэффициентов усилительно-преобразующего тракта, что позволяет сформировать необходимую полосу пропускания без снижения чувствительности к угловой скорости основания.

Помимо амплитудно-модулированного известен частотный способ получения информативного сигнала [29]. Он заключается в одновременном возбуждении обеих рабочих мод и использовании систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для отслеживания их резонансных частот (рис. 13). Из модели динамики двухмерного осциллятора вытекает, что разность частот двух рабочих мод ω_1 и ω_2 пропорциональна угловой скорости Ω . Частотный способ продемонстрировал хорошие результаты в части температурной стабильности выходного сигнала [29].

Интегрирующий способ измерения (режим полного угла – whole angle) позволяет непосредственно определять угол поворота основания и реализует основную концепцию маятника Фуко: наблюдение прецессии плоскости колебаний маятника из вращающейся системы координат. В [19] описан микромеханический маятник Фуко (рис. 14), построенный на одном кристалле (чипе), изготовленном по технологии «кремний на изоляторе» с проводящим рабочим слоем толщиной 100 мкм и скрытым оксидным слоем 5 мкм. Структура гироскопа была сформирована методом глубокого реактивного ионного травления. Гироскоп герметизирован в вакууме, чему предшествовала активация геттеров на специально изготовленных стеклянных крышках. Достигнутая добротность составила 1,2 млн, что позволило наблюдать свободные колебания кремниевого чувствительного элемента без подкачки энергии в интервале до 1000 секунд. Постоянная времени гироскопа составила $T = 174$ с, относительная разнородность (асимметрия демпфирования) – около 1%, что приводит к дрейфу угла порядка 1 °/ч. Особенностью данного гироскопа является то, что интегрирующий режим функционирования реализован на основе кремниевого осциллятора с сосредоточенными параметрами.

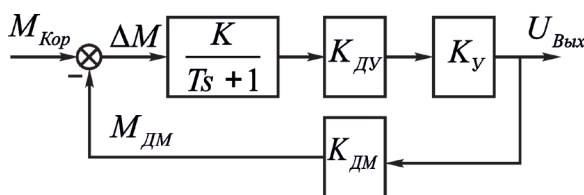


Рис. 12. Структурная схема микромеханического гироскопа компенсационного типа по огибающим амплитуд колебаний

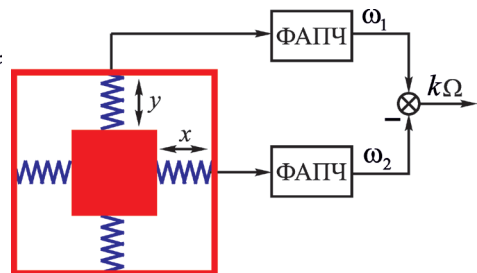


Рис. 13. Частотный способ измерения угловой скорости

При проектировании новых структур ММГ следует учитывать тот факт, что его чувствительный элемент совершает вынужденные колебания на резонансной частоте упругого подвеса с достаточно высокой добротностью ($Q > 10^4$). Ввиду этого внешние широкополосные вибрации и акустические шумы в диапазоне частот, близких к резонансной частоте подвеса, могут оказывать существенное воздействие на характеристики датчика [30]. Эффективными способами снижения влияния вибраций служат камертонные конструкции ММГ с противофазным движением чувствительных масс, а также многомассовые структуры [16, 30].

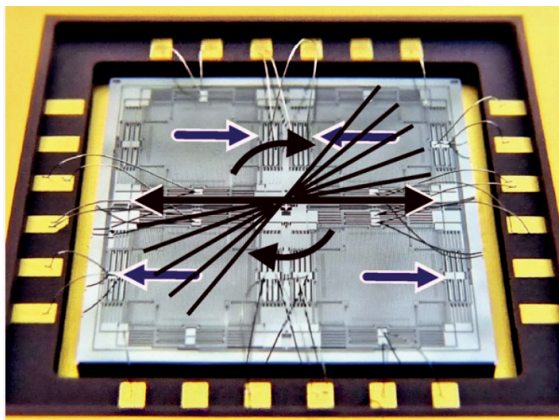


Рис. 14. Гироскоп с четырьмя массами, функционирующий в режиме полного угла [19]

Современные тенденции развития инерциальных датчиков связаны с созданием структур, благодаря которым угловая скорость или угол поворота объекта определяются на основе инерции стоячих волн, возбуждаемых в кольцевых или объемных резонаторах ВТГ, которые будут рассмотрены ниже.

5. Эффект Брайана

Автором идеи, которая легла в основу создания ВТГ, является английский физик Дж.Х. Брайан. В 1890 году во время экспериментов с вибрирующим бокалом для вина он обнаружил, что при вращении бокала вокруг своей ножки издаваемый стеклом чистый тон начинал прерываться биениями [4] (рис. 15), т.е. прецессией возбужденной стоячей волны, возникающей в результате интерференции двух встречных бегущих волн. При этом волновая картина колеблющейся оболочки запаздывает по отношению к повороту основания, т.е. вращается медленнее, чем сам бокал (основание). Точки с нулевой амплитудой колебаний называются узлами,

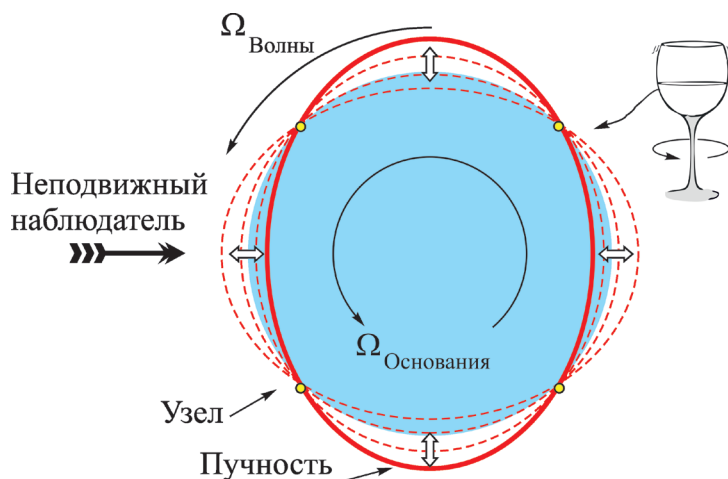


Рис. 15. Наблюдение биений при вращении вибрирующего бокала (основания)

а точки с максимальной амплитудой – пучностями стоячей волны (рис. 15). Угловая скорость волны относительно инерциального пространства связана с угловой скоростью основания соотношением [4, 5]

$$\Omega_{\text{Волны}} = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \Omega_{\text{Основания}} . \tag{10}$$

Например, для второй формы ($n = 2$) имеем $(n^2 - 1) / (n^2 + 1) = 0,6$, т.е. угловая скорость стоячей волны составляет 60% от скорости вращающегося основания. Коэффициент запаздывания k_b (коэффициент Брайана) стоячей волны определяется так:

$$k_b = 1 - \frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} = \frac{2}{n^2 + 1} . \tag{11}$$

Из равенства (15) следует, что для основной второй формы колебаний коэффициент Брайана составляет $k_b = 0,4$. В итоге наблюдение за волновой картиной в связанной с основанием вращающейся системе координат позволяет заключить, что она будет вращаться (прецессировать) в противоположном направлении с угловой скоростью $0,4 \Omega_{\text{Основания}}$. Помимо второй в резонаторе могут существовать и другие формы колебаний (рис. 16).

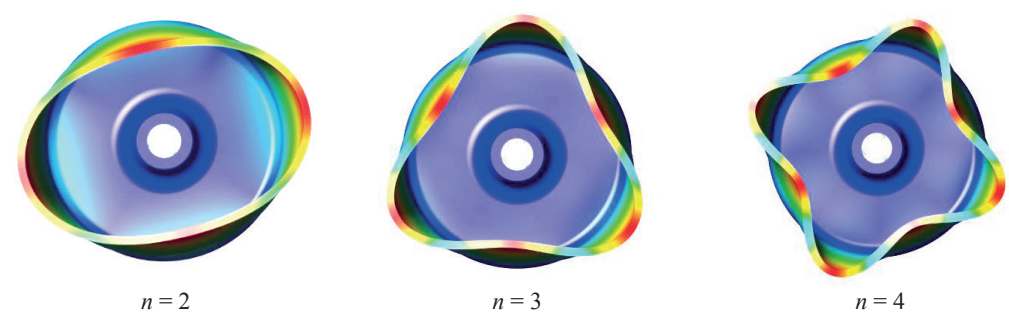


Рис. 16. Вторая ($n = 2$), третья ($n = 3$) и четвертая ($n = 4$) формы колебаний резонатора

Значения коэффициента Брайана для различных форм оболочек при второй форме колебаний ($n = 2$) приведены в таблице [31].

Т а б л и ц а

Значения коэффициента Брайана для различных форм оболочек [31]

Оболочка	Коэффициент Брайана k_b
Кольцо, цилиндр	2/5
Полусфера	1/3
Сфера	1/4

Таким образом, угол запаздывания стоячей волны по отношению к оболочке определяется так [32]:

$$\theta(t) = \theta_0 - k_b \int_0^t \Omega(\tau) d\tau , \tag{12}$$

где θ_0 – начальный угол волновой картины.

Если основание повернется относительно инерциального пространства на 90° , то стоячая волна (с ее пучностями и узлами), возбужденная в кольцевом резонаторе, будет запаздывать на угол $\theta = 0,4 \times 90^\circ = 36^\circ$. Следовательно, относительно инерциального пространства волна повернется на $90^\circ - 36^\circ = 54^\circ$. В результате с помощью измерения угла поворота стоячей волны в резонаторе и известного коэффициента Брайана можно точно рассчитать величину и направление углового перемещения объекта в инерциальном пространстве.

В аналогичных условиях классический гироскоп с быстровращающимся ротором, в силу неизменности направления оси вращения в инерциальном пространстве, сохранит свою ориентацию и по отношению к повороту основания и будет запаздывать на полные 90° .

Механизм прецессии стоячей волны связан с действием на колеблющуюся оболочку сил инерции Кориолиса (рис. 17).

При вращении вибрирующего резонатора с угловой скоростью Ω к каждой элементарной массе A, B, C, D приложены силы инерции Кориолиса $F_{\text{Кор}}$, возникающие вследствие появления ускорения Кориолиса $a_{\text{Кор}}$. При движении точек резонатора с линейными скоростями v , как показано на рис. 17, силы инерции Кориолиса сжимают резонатор в областях 1 и 3 и растягивают его вдоль направлений 2 и 4. В результате возникает гироскопический момент, который уменьшает угловую скорость вращения волновой картины, вызывая тем самым упомянутое выше запаздывание [33].

Точность ВТГ и вид его выходного сигнала (угол или угловая скорость) зависят в первую очередь от конфигурации резонатора, используемого материала и технологии его изготовления. Резонаторы ВТГ выполняются из различных материалов, таких как поли- и монокристаллический кремний, элинварные металлические сплавы, кварцевое стекло.

6. Волновые твердотельные гироскопы с кварцевыми резонаторами

Компания Delco Electronics (США) одной из первых заявила о разработке ВТГ [8] (рис. 18). В качестве чувствительного элемента в нем

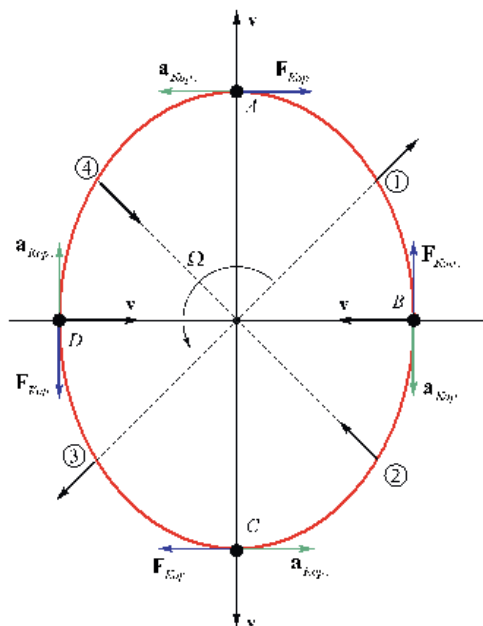


Рис. 17. Механизм прецессии стоячей волны

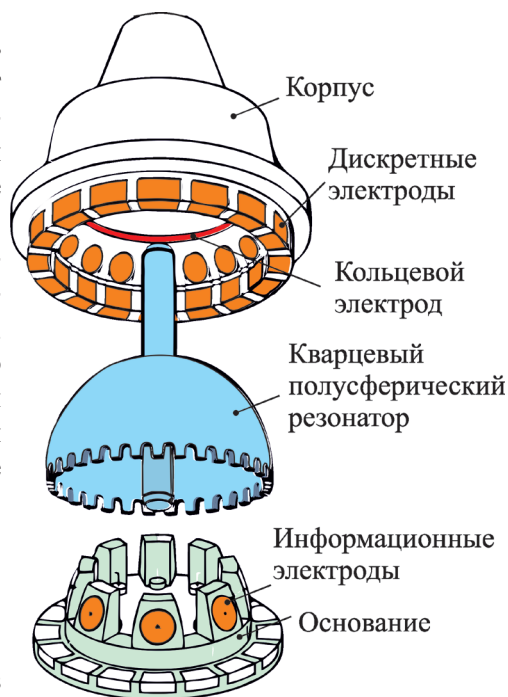


Рис. 18. Волновой твердотельный гироскоп компании Delco

использован полусферический кварцевый резонатор, через вершину которого проходит стержень, концы которого жестко закреплены в корпусе и основании гироскопа.

Чтобы создать в резонаторе незатухающие колебания, используется кольцевой электрод емкостной системы параметрического возбуждения, на который подается напряжение на частоте собственных колебаний резонатора (рис. 19). При этом частота воздействия со стороны кольцевого электрода удваивается за счет того, что электростатические силы пропорциональны квадрату приложенного напряжения. Такой способ возбуждения позволяет сохранить интегрирующий эффект ВТГ, т.е. стоячая волна остается в том положении, которое она заняла после завершения вращения. Кроме того, поскольку возбуждаемый в резонаторе колебательный процесс возникает вследствие периодического изменения одного из параметров системы, а не действия периодической внешней силы, этот тип возбуждения называется еще параметрическим.

Следует отметить, что параметрическая модуляция не способна вызвать колебания из состояния полного покоя – для этого система уже должна обладать хотя бы малыми собственными колебаниями. По этой причине, чтобы обеспечить начальное возбуждение стоячей волны, а также электрическую балансировку резонатора, применяются шестнадцать дискретных емкостных электродов (на схеме рис. 19 показана только одна пара). Созданные в резонаторе начальные колебания далее поддерживаются уже системой параметрического возбуждения. Съем сигнала осуществляется восемью информационными электростатическими электродами, установленными на основании гироскопа.

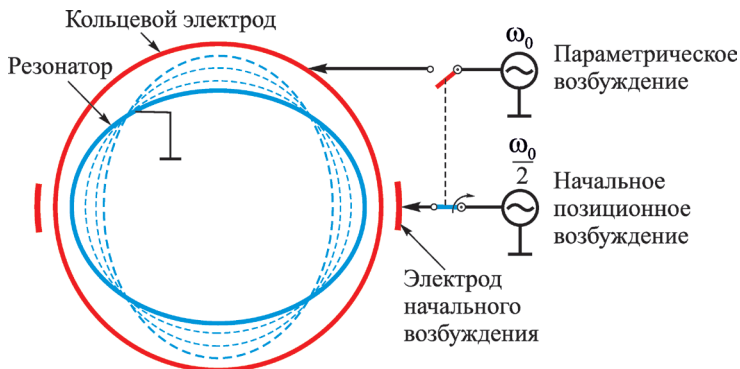
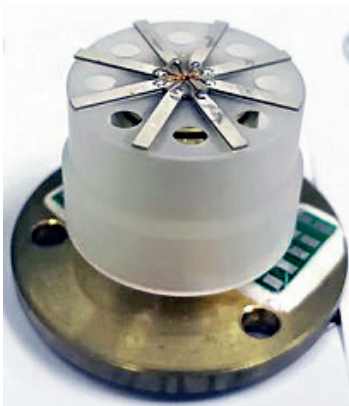


Рис. 19. Схема параметрического возбуждения

а)



б)

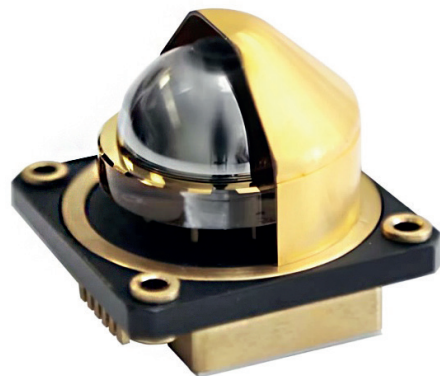


Рис. 20. ВТГ с цилиндрическим (а) [34] и полусферическим (б) [20] резонаторами

Применение кварцевого стекла для изготовления резонаторов ВТГ обеспечивает добротность до 10^7 и позволяет строить приборы навигационного класса точности с дрейфом до $0,001$ °/ч. Производство таких гироскопов требует привлечения ряда прецизионных технологий, поэтому их себестоимость довольно высока. На рис. 20 представлены кварцевые резонаторы, выполненные в форме цилиндра (рис. 20, а) [34] и полусферы (рис. 20, б) [20].

На рис. 20, а показан гироскоп с цилиндрическим резонатором, колебания в котором возбуждаются не электростатическими, а пьезоэлектрическими электродами, установленными на дне резонатора посредством технологии спекания [33].

Представленный на рис. 20, б ВТГ разработан французской компанией Safran Electronics&Defence. В ходе испытаний ВТГ-20 (HRG-Crystal™) с кварцевым полусферическим резонатором диаметром 20 мм были получены следующие характеристики [20]: нестабильность масштабного коэффициента – менее 1 ppm; случайное блуждание угла – менее $0,0002$ град/√ч; нестабильность нулевого сигнала – $0,005$ град/ч. Компания Safran использует оригинальное решение, суть которого заключается в том, что электроды наносятся на плоскую подложку, а электростатические силы создаются в экваториальной плоскости резонатора. Это упрощает сборку и снижает себестоимость производства ВТГ.

Для анализа измерительных свойств ВТГ с объемными резонаторами широко применяется модель кольцевого резонатора, в которой радиальное смещение точек его кромки (рис. 21) при колебаниях по второй форме описывают с помощью линейной комбинации двух пространственных гармоник $\cos 2\varphi$ и $\sin 2\varphi$ [35]:

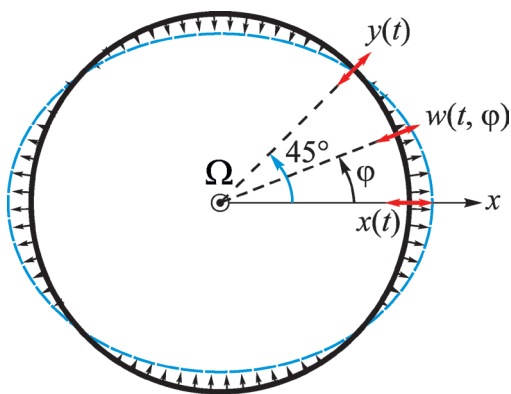


Рис. 21. Функция радиальной деформации

$$w(t, \varphi) = p(t) \cos 2\varphi + q(t) \sin 2\varphi, \quad (13)$$

где $w(t, \varphi)$ – радиальная деформация кромки резонатора в функции окружного угла φ и времени t ; $p(t)$, $q(t)$ – функции времени, определяемые из дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \ddot{p} + \frac{2}{T} \dot{p} + \omega_0^2 p = f_p(t) + 4k_b \Omega \dot{q} + 2k_b \dot{\Omega} q, \\ \ddot{q} + \frac{2}{T} \dot{q} + \omega_0^2 q = f_q(t) - 4k_b \Omega \dot{p} - 2k_b \dot{\Omega} p. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь $f_p(t)$, $f_q(t)$ – удельные силы, развиваемые силовыми электродами, м/с²; $T = 2Q / \omega_0$ – введенная выше постоянная времени резонатора, с.

Если рассматривать радиальную деформацию кромки идеального резонатора при значениях окружного угла $\varphi = 0$, $\varphi = \pi/4$ и ввести новые переменные $x(t) = w(t, 0) = p(t)$, $y(t) = w(t, \pi/4) = q(t)$, то уравнения (14) принимают вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{2}{T} \dot{x} + \omega_0^2 x = f_p(t) + 2(2k_b) \Omega \dot{y} + 2k_b \dot{\Omega} y, \\ \ddot{y} + \frac{2}{T} \dot{y} + \omega_0^2 y = f_q(t) - 2(2k_b) \Omega \dot{x} - 2k_b \dot{\Omega} x. \end{cases} \quad (15)$$

Из анализа уравнений (15) следует, что они структурно аналогичны уравнениям (1), которые, в свою очередь, близки уравнениям маятника Фуко.

При свободном движении резонатора в случае параметрического возбуждения ($Q \rightarrow \infty$, $T \rightarrow 0$) систему (15) можно свести к одному дифференциальному уравнению:

$$\ddot{z} + 4jk_b\Omega\dot{z} + \omega_0^2 z = 0, \quad (16)$$

где $z = x + jy$ – комплексная переменная.

В зависимости от различных начальных условий изображающая точка $z(t)$ на комплексной плоскости может двигаться по траекториям, приведенным на рис. 22.

Таким образом, при произвольных начальных условиях движение изображающей точки можно описать как медленно поворачивающуюся эллиптическую траекторию (рис. 22, б). Угол прецессии волны определяется по формуле [36]

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2(c_x c_y + s_x s_y)}{c_x^2 + s_x^2 - c_y^2 - s_y^2}, \quad (17)$$

где $c_x = LPF[x(t)\cos\omega_0 t]$; $s_x = LPF[x(t)\sin\omega_0 t]$; $c_y = LPF[y(t)\cos\omega_0 t]$; $s_y = LPF[y(t)\sin\omega_0 t]$; $LPF[\dots]$ – функция фильтра нижних частот.

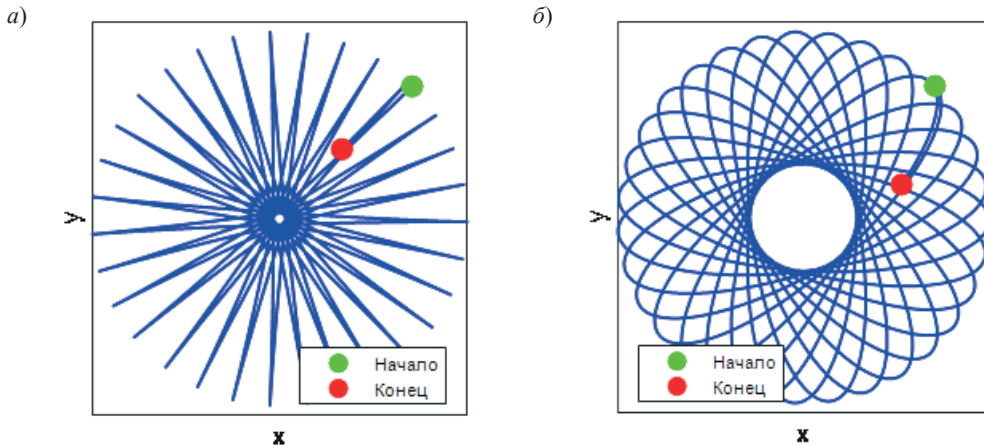


Рис. 22. Движение изображающей точки на комплексной плоскости при численном интегрировании уравнений (16) и различных начальных условиях: а) $z(0) \neq 0$, $\dot{z}(0) = 0$; б) $z(0) \neq 0$, $\dot{z}(0) \neq 0$

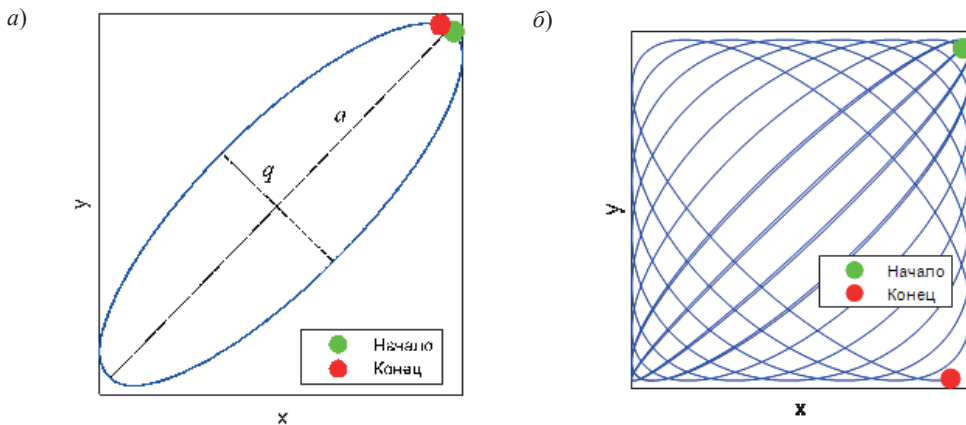


Рис. 23. Движение изображающей точки резонатора на неподвижном основании: а) идеальный резонатор; б) резонатор с расщеплением частот

В идеальном резонаторе при отсутствии вращения стоячая волна не дрейфует. Ее угловое положение остается неизменным и соответствует тому, которое она заняла в момент, когда основание перестало вращаться. Однако различные дефекты резонатора, в частности овальность, разнотолщинность, неоднородность упругих свойств материала, приводят к дрейфу стоячей волны, подобно дрейфу классического гироскопа, обусловленного возмущающими моментами. На рис. 23, *а* показана траектория изображающей точки идеального резонатора на неподвижном основании, на рис. 23, *б* – при наличии расщепления частот $\Delta\omega = \omega_y - \omega_x$.

Из рис. 23, *б* следует, что из-за расщепления частот с течением времени возникает дрейф стоячей волны, а в дальнейшем – погрешности ВТГ. К аналогичным последствиям ведет и разнородность резонатора. Дрейф стоячей волны можно оценить по соотношению [19]

$$\Delta\dot{\theta} \leq \frac{1}{2} \frac{|\Delta Q|}{TQ} + \frac{q}{a} |\Delta\omega|, \quad (18)$$

где T , Q – средние значения постоянной времени и добротности резонатора; ΔQ – максимальное изменение добротности резонатора по окружному углу; a , q – большая и малая полуоси эллиптической траектории движения изображающей точки резонатора (рис. 23, *а*).

7. Волновые твердотельные гироскопы с металлическими резонаторами

Использование в качестве конструкционного материала металлических эливальных сплавов позволяет создавать ВТГ среднего класса точности. Так, в начале 1980-х годов британская компания Marconi одной из первых разработала вибрационный гироскоп START. Устройство представляло собой металлический цилиндр с восемью пьезоэлектрическими преобразователями, закрепленными на наружной поверхности его открытого торца. Во время работы гироскопа пьезоэлектрические электроды возбуждают изгибные резонансные колебания свободного конца цилиндра, что позволяет измерять угловую скорость на основе сил инерции Кориолиса и прецессии стоячей волны. Максимальная точность составляла 0,01 %/с. Усовершенствованная версия гироскопа START была запущена в серийное производство в 1995 году и нашла применение на морских нефтедобывающих платформах, в системах наведения и стабилизации [37].

В 2007 году компания Innalabs представила ВТГ с металлическим резонатором (рис. 24, *а*), его характеристики:

- нестабильность нуля во всем температурном диапазоне – 0,5 %/ч;
- случайное блуждание угла – 0,01...0,1 °/√ч;
- нелинейность характеристики – 0,02...0,05%;
- ударопрочность — до 7000 g.

Резонатор изготовлен из хром-никель-титанового сплава, прошедшего специальную термообработку, добротность превысила 15 000 [37]. С помощью схемотехнических методов управления компания Innalabs также выполнила динамическую балансировку и температурную компенсацию, что позволило улучшить характеристики ВТГ. По точности такие гироскопы не просто сравнялись с волоконно-оптическими того же размера, но даже превзошли их и при этом оказались значительно

дешевле. Эти устройства уже востребованы в наземном транспорте, нефтегазразведке, устанавливаются на стабилизационные платформы и малые научные спутники.

В зарубежной литературе помимо ВТГ с цилиндрическими резонаторами описываются также приборы с кольцевым (рис. 24, б) и колоколообразным резонаторами (рис. 24, в).



Рис. 24. ВТГ с металлическим цилиндрическим (а) [38], кольцевым (б) [39] и колоколообразным (в) резонаторами [40]

Простота механической обработки и отсутствие необходимости в специализированном технологическом оборудовании делают металлические сплавы привлекательными при изготовлении относительно недорогих ВТГ. Однако невысокая добротность металлических резонаторов (порядка 20 000–35 000) не позволяет построить ВТГ интегрирующего типа, так как срок его функционирования определяется «временем жизни» свободной волны [35]. В связи с этим в ВТГ с металлическим резонатором, как правило, используется позиционное возбуждение стоячей волны, при этом гироскоп является датчиком угловой скорости.

Позиционное возбуждение стоячей волны и съем сигнала в металлических резонаторах осуществляются, как правило, с помощью восьми пьезоэлектрических керамических электродов, приклеенных к резонатору и объединенных в четыре пары (рис. 25). Первая пара пьезоэлементов предназначена для возбуждения стоячей волны, вторая, расположенная к ней под углом 90°, – для контроля резонанса, третья и четвертая – для съема сигнала и формирования компенсационной обратной связи.

Поворот волновой картины под действием угловой скорости основания при позиционном возбуждении стоячей волны рассчитывается по формуле [35]

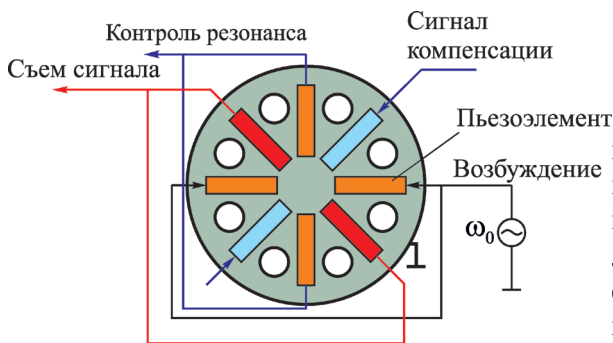


Рис. 25. Назначение пьезоэлементов

$$\Delta\varphi(\Omega) = -\frac{1}{2} \operatorname{arctg}(2k_b T \Omega).$$

При отсутствии вращения основания ($\Omega = 0$) ориентация волновой картины в резонаторе ВТГ постоянна и определяется ориентацией электродов позиционного возбуждения, т.е. стоячая волна «привязана» к корпусу гироскопа (рис. 26, а). При $\Omega \neq 0$ пучности стоячей волны отстают от на-

правления возбуждения на угол $\Delta\varphi$ (рис. 26, б), определяемый величиной угловой скорости основания Ω , коэффициентом Брайана k_b и постоянной времени резонатора T .

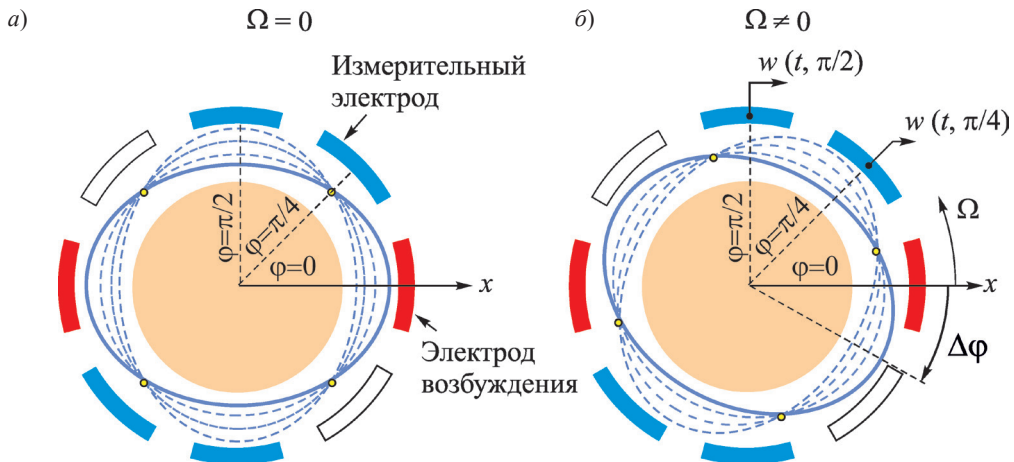


Рис. 26. Функционирование ВТГ при позиционном возбуждении стоячей волны:
а) основание неподвижно; б) основание вращается с угловой скоростью Ω

Динамика идеального ВТГ прямого измерения с позиционным возбуждением в резонансном режиме может быть описана уравнениями вида

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{2}{T}\dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos(\omega_0 t) + 2(2k_b)\Omega\dot{y} + 2k_b\dot{\Omega}y, \\ \ddot{y} + \frac{2}{T}\dot{y} + \omega_0^2 y = -2(2k_b)\Omega\dot{x} - 2k_b\dot{\Omega}x, \end{cases} \quad (19)$$

где f_0 — удельная сила возбуждения, м/с².

Так как угол поворота стоячей волны недоступен непосредственно для измерения, то выходной сигнал формируется благодаря дискретно расположенным измерительным электродам. Установившиеся колебания резонатора фиксируются измерительными электродами, расположенными под углами $\varphi = \pi/4$ и $\varphi = \pi/2$, и определяются по формулам:

$$x(t) = w(t, \pi/4) = -\frac{T^2 k_b f_0 \Omega}{\omega_0 (4k_b^2 T^2 \Omega^2 + 1)} \sin \omega_0 t, \quad (20)$$

$$y(t) = w(t, \pi/2) = -\frac{T f_0}{2\omega_0 (4k_b^2 T^2 \Omega^2 + 1)} \sin \omega_0 t. \quad (21)$$

Существенно, что колебания $w(t, \pi/4)$ и $w(t, \pi/2)$ в резонансном режиме происходят в фазе либо в противофазе (в зависимости от направления угловой скорости), а их амплитудные значения x^a и y^a являются нелинейными функциями угловой скорости (рис. 27). Следовательно, сигнал, снимаемый с измерительных электродов, размещенных под углом 45°, будет

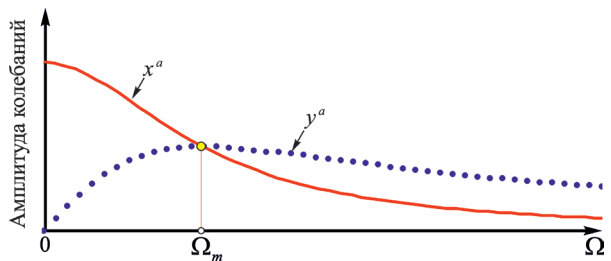


Рис. 27. Зависимость амплитуд нормальной деформации резонатора x^a и y^a от угловой скорости основания

обладать линейной характеристикой в случае сравнительно небольших угловых скоростей основания Ω .

При этом отношение амплитуд линейно зависит от угловой скорости основания (рис. 28, а):

$$\frac{y^a}{x^a} = \frac{w^a(\pi/4)}{w^a(\pi/2)} = 2k_b T \Omega = \frac{4k_b Q}{\omega_0} \Omega.$$

Надо отметить, что при характерной угловой скорости основания, определяемой параметрами резонатора согласно соотношению

$$\Omega_m = \frac{1}{2k_b T},$$

амплитуды деформаций резонатора под углами 45° и 90° будут равны: $w^a(\pi/4) = w^a(\pi/2)$ (рис. 28, б).

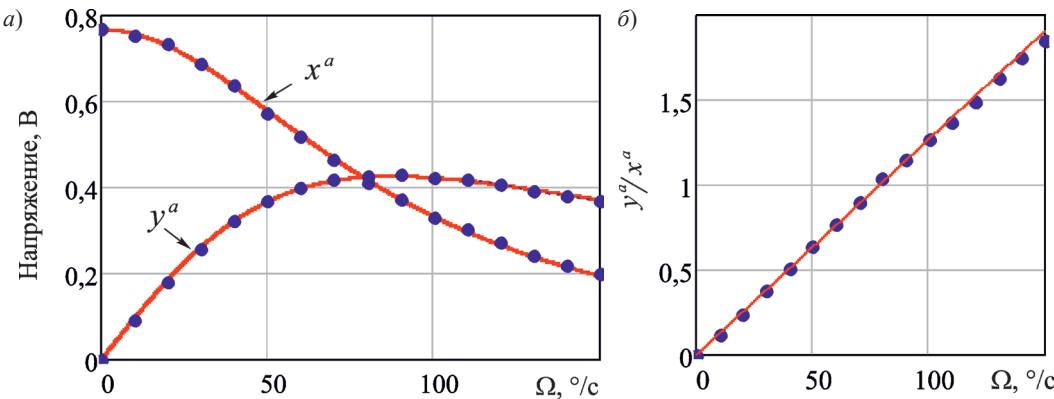


Рис. 28. Экспериментальные графики установившихся колебаний цилиндрического металлического резонатора ВТГ ($T = 0,85$ с, $Q \approx 21000$, $\omega_0 = 7777,55$ Гц) в зависимости от угловой скорости основания: а) отношение амплитуд y^a / x^a ; б) амплитуды установившихся колебаний резонатора y^a и x^a

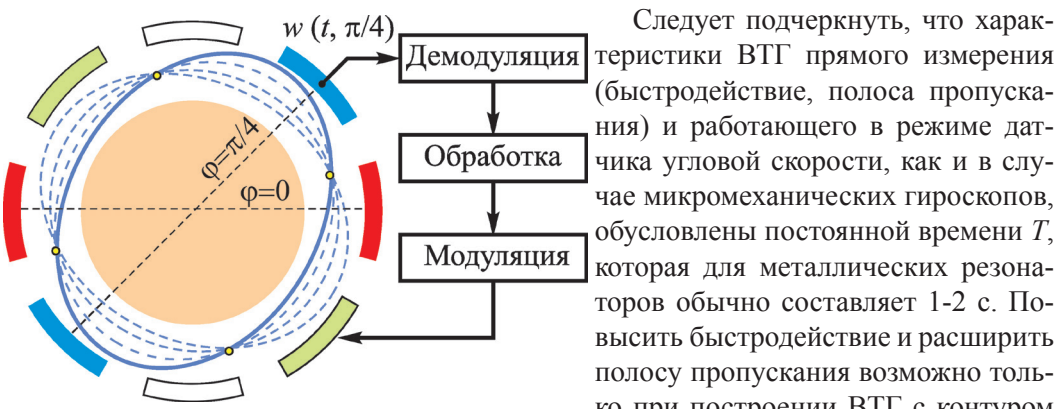


Рис. 29. Схема построения ВТГ компенсационного типа

Следует подчеркнуть, что характеристики ВТГ прямого измерения (быстродействие, полоса пропускания) и работающего в режиме датчика угловой скорости, как и в случае микромеханических гироскопов, обусловлены постоянной времени T , которая для металлических резонаторов обычно составляет 1-2 с. Повысить быстродействие и расширить полосу пропускания возможно только при построении ВТГ с контуром компенсации (рис. 29).

В ВТГ компенсационного типа сигнал, снимаемый с измерительных электродов, расположенных под углом 45° относительно электродов возбуждения, подвергается демодуляции, что обеспечивает выделение огибающей амплитуд колебаний. Для улучшения динамических характеристик ВТГ выделенная амплитуда обрабатыва-

ется пропорционально-интегральным регулятором (ПИ-регулятором) [10] и далее модулируется со сдвигом на 90° по отношению к первоначальной фазе. Постоянная времени ВТГ компенсационного типа приближенно описывается соотношением

$$T_c \approx \frac{2\omega_0}{Tk_i}, \quad (22)$$

где k_i – коэффициент передачи интегральной части ПИ-регулятора.

Соотношение (22) показывает, что при соответствующем выборе коэффициента k_i можно получить заданные динамические характеристики ВТГ.

8. Миниатюрные волновые твердотельные гироскопы

ВТГ низкого и среднего класса точности производятся по технологии МЭМС (например, «кремний на изоляторе» и «кремний на стекле») и оснащены в качестве чувствительного элемента кольцевыми резонаторами (рис. 30) с различными типами подвесов [23].

Кольцевые МЭМС-гироскопы имеют ряд преимуществ по сравнению с микро-механическими гироскопами иных типов (*LL*, *LR*, *RR*). Симметричная конструкция чувствительного элемента в форме кольца позволяет повысить устойчивость

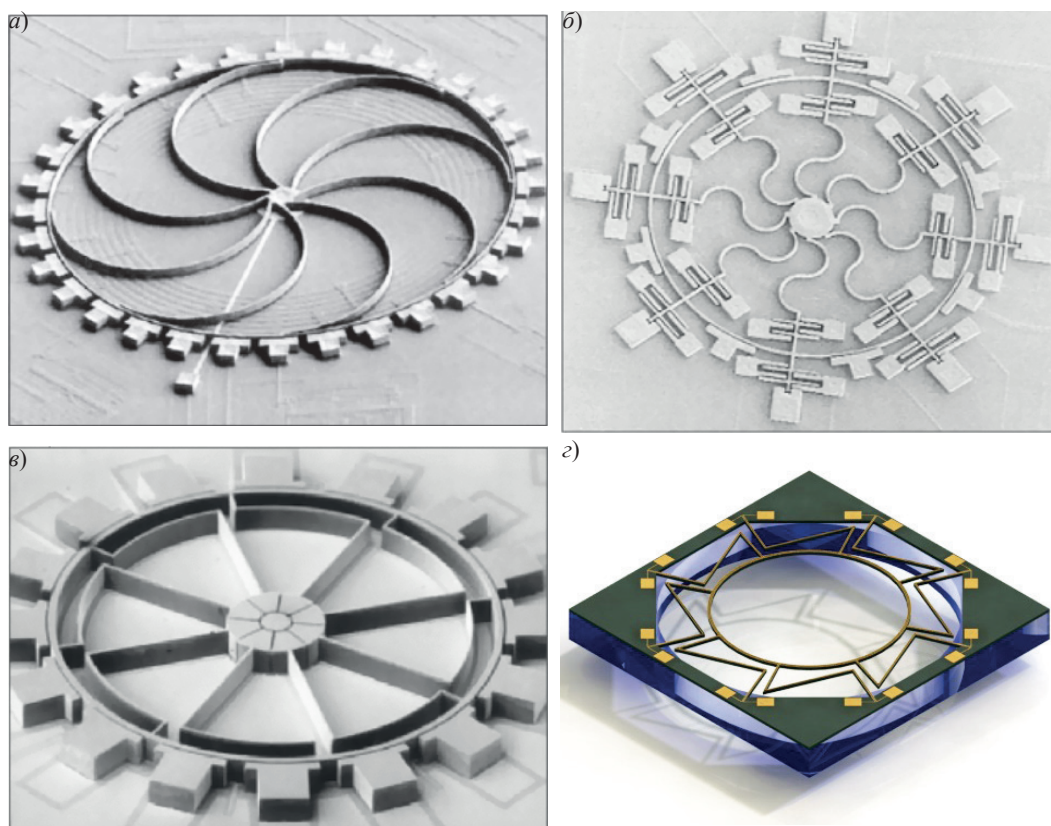


Рис. 30. Кольцевые резонаторы микромеханических волновых твердотельных гироскопов с различными типами подвесов:

а) внутренние дугообразные; б) внутренние S-образные;
в) внутренние радиально-дуговые; з) внешние угловые [23]

к внешним воздействиям, а также минимизировать расщепление частот [41]. В качестве конструкционного материала кольцевых МЭМС-резонаторов используется монокристаллический кремний с различной кристаллографической ориентацией, а также поликремний и плавленый кварц. Влияние материала на расщепление частот и добротность кольцевого резонатора напрямую связано с его физическими свойствами. Степень расщепления частот выше у резонаторов, изготовленных из анизотропного монокристаллического кремния в кристаллографической плоскости, а более низкий уровень добротности характерен для поликремниевых резонаторов. Кроме того, скорость травления в плоскости у кольцевых резонаторов значительно выше, благодаря чему удается сократить их производственный цикл. По этой причине некоторые кольцевые резонаторы по-прежнему изготавливаются из кремниевой пластины в плоскости, но с применением оптимизированной конструкции, позволяющей уменьшить влияние анизотропии на расщепление частот [41].

Благодаря изотропным свойствам, низким термоупругим потерям и хорошей температурной стабильности плавленый кварц был бы наилучшим материалом и для кольцевых резонаторов, однако широко распространенные МЭМС-технологии пока не полностью с ним совместимы.

Одним из перспективных направлений в производстве микро-ВТГ является метод выдувания стеклянных резонаторов при высоких температурах (рис. 31).

Процесс начинается с вытравливания полости в подложке из плавленого кварца, на которую сверху прикрепляется слой силикатного стекла (рис. 31, а). При нагреве выше температуры размягчения стекла одновременно наблюдаются два эффекта: стекло становится вязким, а давление газа в полости превышает атмосферное. В результате возникает пластическая деформация, обусловленная перепадом давлений и силами поверхностного натяжения (рис. 31, б). Процесс расширения останавливается при выравнивании давлений, что делает процесс самоограничивающимся, когда формируется симметричная гладкая сферическая оболочка [36]. Конфигурацию и размеры структуры можно варьировать путем изменения толщины слоя, формы и объема полости, а также температуры и давления при выдувании. Круглая полость дает сферическую оболочку. Для освобождения резонатора используется травление (рис. 31, в), в результате чего образуется перевернутая структура типа винной рюмки

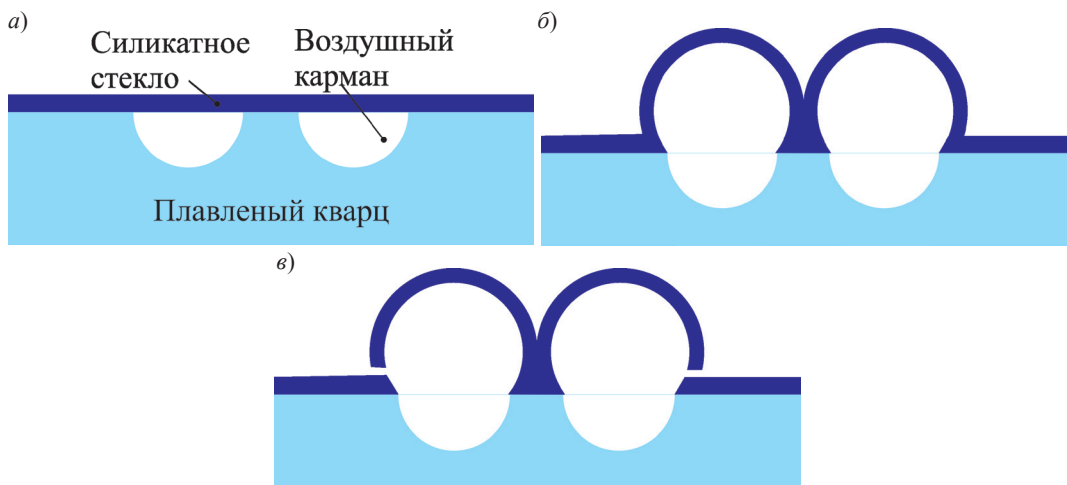


Рис. 31. Схема изготовления ВТГ стеклудувным методом

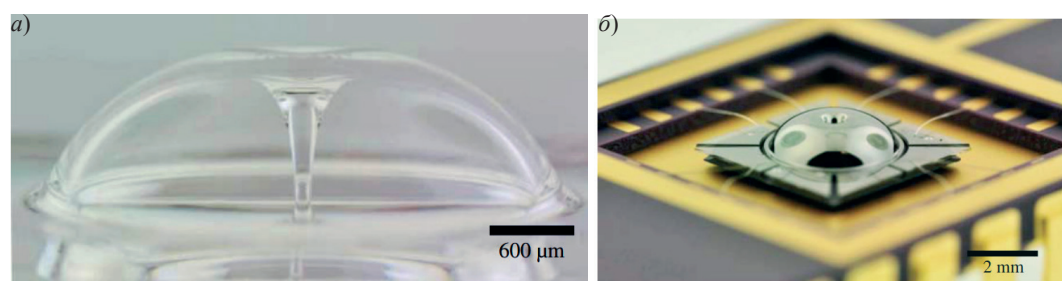


Рис. 32. Миниатюрный волновой твердотельный гироскоп:

а) резонатор, выполненный методом выдувания стекла; б) экспериментальный образец [35]

(рис. 32, а) с самовыравнивающейся ножкой. Технология позволяет одновременно изготавливать множество резонаторов на одной подложке. Пример исполнения микро-ВТГ приведен на рис. 32, б.

Экспериментальный образец микро-ВТГ с диаметром резонатора 7 мм продемонстрировал добротность 1,14 млн при средней частоте резонатора 105 кГц (постоянная времени – 3,18 с). Расщепление частот составило 14 Гц [35].

Заключение

Вибрационные гироскопы представлены во всех классах исполнения – потребительском, тактическом и навигационном. При этом микромеханические гироскопы, относящиеся преимущественно к потребительскому классу, широко применяются в системах ориентации и навигации подвижных объектов на коротких интервалах автономности. Камертонные вибрационные гироскопы были созданы одними из первых как в макро-, так и в микровариантах, однако сегодня наблюдается тенденция к переходу к ВТГ, причем всех типов. Технология стеклодувного формования (glassblowing) позволяет создавать микро-ВТГ с диаметром полусферической оболочки 7 мм и менее при относительно небольшом расщеплении частот.

Использовать металлические сплавы для изготовления резонаторов привлекательно с точки зрения упрощения и удешевления технологии производства, однако стабильность характеристик таких гироскопов оставляет желать лучшего. Кроме того, волновые вибрационные гироскопы с металлическими резонаторами – это в первую очередь датчики угловой скорости, поскольку формирование свободной волны на низкодобротных резонаторах проблематично. Контуры обратных связей таких гироскопов достаточно сложны в плане как реализации, так и настройки. В настоящей работе были рассмотрены только общие вопросы построения таких гироскопов. При создании материальных образцов необходимо обеспечивать контуры компенсации как кориолисова ускорения, так и квадратурной составляющей, а также контур стабилизации амплитуды, термокомпенсации и другие.

ВТГ с кварцевым резонатором в макроисполнении демонстрируют точность навигационного класса благодаря тому, что кварц обладает сверхнизким внутренним трением. Это позволяет достичь добротности от сотен тысяч до десятков миллионов и реализовать режим свободной волны (интегрирующего гироскопа), однако обработка кварцевого стекла весьма трудоемка, поэтому стоимость таких гироскопов довольно высока.

Точность ВТГ можно повысить главным образом за счет балансировки резонатора, чтобы снизить уровень расщепления частот по окружному углу. Изменить частоту

резонатора в данном направлении можно путем либо удаления определенной массы материала с поверхности резонатора, либо изменения жесткости (например, нанесение насечек). Ввиду ограниченного объема статьи эти вопросы не рассматривались.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, №2(109). С. 3–10. DOI 10.17285/0869-7035.0028. EDN VDBYAV.
2. Foucault, L., Démonstration physique du mouvement de la Terre au moyen du pendule, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Paris, 1851, vol. 32, pp. 135–138.
3. Журавлев В.Ф. Управляемый маятник Фуко как модель одного класса свободных гироскопов // Механика твердого тела. 1997. № 6. С. 27–35.
4. Bryan, G.H., On the beats in the vibrations of a revolving cylinder or bell, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1890, vol. 7, pp. 101–107.
5. Walker, J., Hatton, J.L.S., Experimental determination of the beats in the vibrations of a revolving bell, *Philosophical Magazine. Series 5*, 1891, vol. 32, issue 197, pp. 370–374.
6. Pringle, J.W.S., The Gyroscopic Mechanism of the Halteres of Diptera, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 1948, vol. 233, no. 602, pp. 347–384.
7. Morrow, C.T., Steady State Response of the Sperry Rate Gyrotron or Vibratory Gyroscope, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1955, vol. 27, no. 1, pp. 56–61.
8. Rozelle, D., The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets, *Advances in the Astronautical Sciences*, 2009, vol. 134, pp. 1157–1178.
9. Friedland, B. and Hutton, M., Theory and error analysis of vibrating-member gyroscope, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1978, vol. 23, no. 4, pp. 545–556, doi: 10.1109/TAC.1978.1101785.
10. Lynch, D., Vibratory Gyro Analysis by the Method of Averaging, *Proceedings of the 2nd St. Petersburg Conference on Gyroscopic Technology and Navigation*, 1995, pp. 26–34.
11. Lynch, D.D., Coriolis Vibratory Gyros, *Symposium Gyro Technology*, 1998, Stuttgart, Germany, 1998.
12. IEEE Std 1431-2004. Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros, IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2004. 69 p.
13. Scott, W.B., Delco makes low-cost gyro prototype, *Aviation Week & Space Technology*, 1982, vol. 117, no. 17, pp. 64–65.
14. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 125 с.
15. Weinberg, M., Bernstein, J., Cho, S., King, A.T., Kourepenis, A., Maciel, P., A Micromachined Comb-Drive Tuning Fork Rate Gyroscope, *Proceedings of the 49th Annual Meeting of The Institute of Navigation*, Cambridge, MA, June 1993, pp. 595–602.
16. Acar, C., Shkel, A., *MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness*, New York: Springer, 2009, 274 p.
17. Пешехонов В.Г. «Электроприбор». Наука. Достижения. Люди / 2-е изд., испр. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2024. 237 с.
18. Евстифеев М.И. Опыт разработки микромеханических гироскопов // Навигация и управление движением: материалы докладов X Юбилейной конференции молодых ученых СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2008. С. 9–20. EDN RQCTFF.
19. Prikhodko, I., Zotov, S.A., Trusov, A.A., Shkel, A.M., Foucault pendulum on a chip: Rate integrating silicon MEMS gyroscope, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2012, vol. 177, pp. 67–78.
20. Делэйе Ф. Бортовая инерциальная система координат SpaceNaute® для европейской ракеты-носителя «Ариан-6» на основе волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2018. №4 (103). С. 3–13.
21. Kim, M., Cho, B., Lee, H., Yoon, T., Lee, B., Implementation of Hemispherical Resonator Gyroscope with 3×3 Optical Interferometers for Analysis of Resonator Asymmetry, *Sensors*, 2022, 22, 1971, <https://doi.org/10.3390/s22051971>.
22. Сборник научно-нормативной терминологии. Выпуск 118. Гироскопия. Терминология. М.: Институт проблем передачи информации РАН, 1994. 38 с.
23. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
24. Beeby, S., Ensell, G., Kraft, M., White, N., *MEMS Mechanical Sensors*, Norwood: Artech House, 2004, 269 p. (Microelectromechanical systems series).

25. Wang, D., *Micromachined Vibratory Gyroscopes Designed for Precision of Measurements and Environmental Robustness*, PhD dissertation in Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, Irvine, 2022, 210 p.
26. Kempe, V., *Inertial MEMS. Principles and Practice*, United Kingdom at the University Press, Cambridge, 2011, 475 p.
27. Кучерков С.Г. Использование интегрирующих свойств вибрационного микромеханического гироскопа с резонансной настройкой для построения датчика угловой скорости компенсационного типа // Гироскопия и навигация. 2002. №2. С.12–18.
28. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
29. Zotov, S.A., Prikhodko, I.P., Trusov, A.A., and Shkel, A.M., Frequency modulation based angular rate sensor, *IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Cancun, Mexico, 2011, pp. 577–580, doi: 10.1109/MEMSYS.2011.5734490.
30. Некрасов Я.А., Моисеев Н.В., Беляев Я.В. и др. Влияние поступательных вибраций, ударов и акустических помех на характеристики микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. № 2(93). С. 56–67. DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.2.056-067. EDN WFBWOZ.
31. Журавлев В.Ф. Волновой твердотельный гироскоп: современное состояние, некоторые аспекты // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2011. № 2(33). С. 118–123. EDN VZGFYX.
32. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014. 174 с.
33. Матвеев В.А. Гироскоп – это просто. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 191 с.
34. Qu, Tianliang, Zhou, Guangle, Xue, Xiaoming, Teng, Junhua, Cylindrical Shell Vibration Gyroscope Excited and Detected by High-Temperature-Sintered Piezoelectric Ceramic Electrodes, *Sensors*, 2020, 20, 5972, doi:10.3390/s20215972.
35. Матвеев В.А., Лунин Б.С., Басараб М.А. Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах. Москва: Физматлит, 2008. 239 с.
36. Senkal, D. and Shkel, A.M., *Whole-Angle MEMS Gyroscopes: Challenges and Opportunities*, 1st ed. Hoboken, NJ, USA: IEEE Press, Wiley, 2020, p. 176.
37. Wu, X., Xi, X., Wu, Y., *Cylindrical Vibratory Gyroscope*, Singapore: Springer, 2021, 202 p. (Springer Tracts in Mechanical Engineering).
38. Chikovani, V.V., Yatsenko, Yu.A., Barabashov, A.S., Kovalenko, V.A., Tewksbury, P., A Set of High Accuracy Low Cost Metallic Resonator CVG, *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007)*, Fort Worth, TX, September 2007, pp. 1345–1350.
39. Zhou, X., Wu, Y., Wu, X., Zhang, Y., Zheng, Y., A novel ring vibrating gyroscope based on side piezo-electrodes, *Journal of Central South University*, 2016, vol. 23, pp. 555–561, doi 10.1007/s11771-016-3102-4.
40. Lin, Z., Fu, M., Zhihong, D., Liu, N., Liu, H., Frequency Split Elimination Method for a Solid-State Vibratory Angular Rate Gyro with an Imperfect Axisymmetric-Shell Resonator, *Sensors*, 2015, 15, pp. 3204–3223, doi 10.3390/s150203204.
41. Jia, J., Ding, X., Qin, Z., Ruan, Z., Li, W., Liu, X., Li, H., Overview and analysis of MEMS Coriolis vibratory ring gyroscope, *Measurement*, 2021, vol. 182, pp. 109704, doi 10.1016.

Matveev, V.V. (Tula State University, Tula)

Vibratory Gyroscopes, *Гироскопия и Навигация*, 2026, vol. 34, no. 2 (133), pp. 43–68.

Abstract. The paper presents an analytical review of vibratory gyroscopes manufactured using various technologies: silicon microelectromechanical systems (MEMS) technology, high-precision metal alloy machining, microglass blowing and quartz glass technologies. A math-

ematical model of an ideal vibratory gyro, similar to a classical Foucault pendulum, is presented. It is shown that three methods of output signal generation can be used when implementing MEMS vibratory gyros: amplitude-modulated, frequency, and integrating methods. A description of the structure of a compensation type MEMS gyro is provided. The Bryan effect in the excitation of standing waves in cavity and ring resonators is described. It is shown that integrating gyroscopes are based on hemispherical resonator gyros (HRG) with high-Q quartz resonators, while rate gyros are based on HRG with metal resonators. The designs of direct-measuring and compensation type HRG are described.

Key words: MEMS gyro, hemispherical resonator gyro (HRG), resonator, dynamic characteristics, motion equations, Bryan effect.

Материал поступил 08.04.2026