

Гибридные микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры

77-30569/219257

10, октябрь 2011

Коновалов С. Ф., Пономарев Ю. А., Майоров Д. В., Подчезерцев В. П.,
Сидоров А. Г.

УДК 531.781.2

МГТУ им. Н.Э. Баумана

quayside@mail.ru

sercon@bk.ru

maord@rol.ru

podch@list.ru

sh1793@gmail.com

Применение навигационных приборов в ракетах систем залпового огня, в артиллерийских снарядах способствует существенному повышению эффективности оружия. Известны примеры успешного применения в таких системах МЭМС гироскопов и акселерометров [10]. Приборы систем управления этими объектами должны быть малогабаритными и недорогими. В то же время оценка показывает, что для получения приемлемых результатов требуются достаточно высокие точностные характеристики приборов, существенно превышающие точностные характеристики имеющихся в продаже недорогих твердотельных МЭМС датчиков. При использовании имеющихся на рынке датчиков, получение необходимой точности систем управления может быть достигнуто только путем их комплексирования со спутниковой навигационной системой. Это снижает помехоустойчивость систем управления объектами и не всегда приемлемо. Существуют достаточно точные МЭМС датчики, полученные путем отбора приборов с высокими точностными характеристиками из больших выпускаемых партий. Кроме того построенные на них инерциальные измерительные блоки обеспечиваются системами калибровки и оптимальной фильтрации выходных сигналов. Точные приборы существенно дороже имеющихся на рынке датчиков широкого потребления и имеют ограничения на продажу для использования в оборонных целях.

Российские предприятия до сих пор не наладили выпуск МЭМС приборов с требуемыми для указанных выше применений точностными характеристиками. Причины

этого кроются, как в недостаточном финансировании приборной отрасли в перестроечные и постперестроечные годы, так и в недостатке внимания, уделяемого проблемам создания МЭМС технологий, в советское время. Возможны следующие пути выхода из создавшейся ситуации:

- совместная с западными предприятиями разработка МЭМС приборов, производство опытных образцов приборов на оборудовании и по технологии западных фирм и последующая покупка технологии с наладкой производства на российских предприятиях. Этот путь реализуется ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» [7].

- создание собственных твердотельных МЭМС приборов и технологий [8]. Этот путь чрезвычайно трудозатратен, дорог, длителен и на наш взгляд может быть успешен лишь в случае реализации проекта Сколково.

- создание гибридных МЭМС приборов, сочетающих методы МЭМС технологии с использованием электромеханических элементов, хорошо освоенных приборостроительными предприятиями. Указанные приборы являются более трудозатратными и дорогими по сравнению с твердотельными МЭМС приборами массового производства, имеют габариты в диапазоне от 10 до 20 мм, что хотя и больше габаритов твердотельных МЭМС датчиков, однако вполне приемлемо для рассматриваемых применений. В свою очередь гибридные приборы существенно дешевле и меньше классических навигационных электромеханических гироскопов и акселерометров и не требуют для своего изготовления высокого уровня технологического обеспечения, характерного для твердотельной МЭМС техники. В гибридных приборах может быть реализовано малое время на разработку и изготовление опытных образцов и их освоение производством на обычных приборостроительных предприятиях и существующей технологической базе. Интересно отметить, что по пути создания гибридных МЭМС приборов в настоящее время идет ряд иностранных фирм, например, компания ВАЕ, выпускающая гибридный МЭМС твердотельный волновой гироскоп [11]. Причина этого – возможность получения более высоких точностных характеристик, чем в твердотельных МЭМС приборах.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана накоплен большой опыт создания гибридных МЭМС приборов. Это ряд акселерометров, как для навигационных применений, так и для инклинометрических измерений в процессе бурения нефтяных и газовых скважин, роторные вибрационные гироскопы для системы управления быстро вращающихся снарядов (скорость вращения вокруг продольной оси 10...25 об/с), двухкоординатные датчики угловой скорости (ДУС) R-R типа. Ниже приведены описание конструкций, принципа действия и технические характеристики приборов.

Компенсационные акселерометры

Разработано до 10 вариантов конструкций акселерометров типа «Si-flex» различного применения [1, 2, 4, 5, 9, 14, 15].

Приборы используют маятниковые узлы из монокристаллического кремния, изготавливаемые методами МЭМС технологии, включающими операции жидкостного анизотропного травления. Вид маятниковых узлов приведен на рис. 1–3, 5, 6, 9.

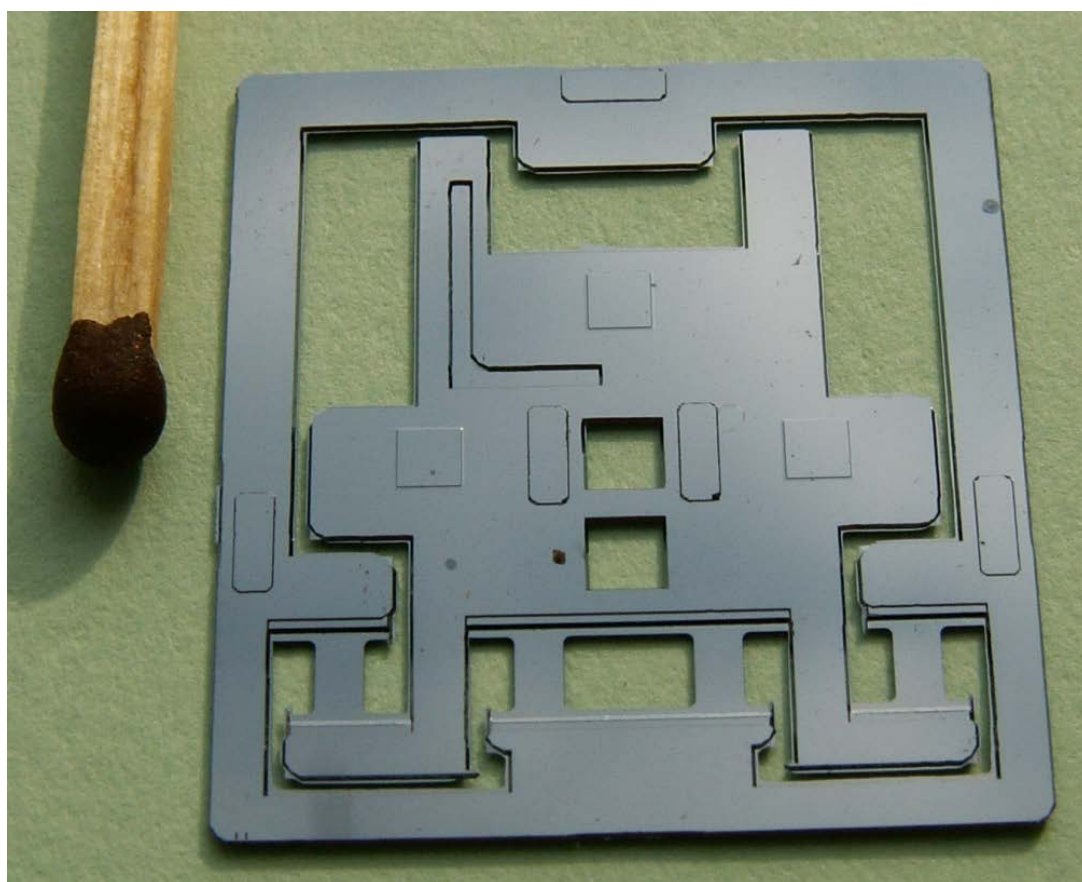


Рис. 1. Маятник акселерометра с четырьмя упругими перемычками

В маятниковых узлах используют различные виды упругих подвесов. Подвес рис. 1 с четырьмя упругими перемычками обеспечивает работоспособность прибора при больших ударных перегрузках в плоскости маятника, т.к. при любой ориентации перегрузки две из четырех упругих перемычек испытывают усилия растяжения и не дают возможности потери устойчивости у перемычек, испытывающих усилие сжатия.

Подвесы рис. 2, 3 используют две упругие перемычки различной ориентации. Особенностью технологического изготовления упругих перемычек рис. 1–3 является отсутствие в них концентраторов напряжений в местах пересечения кристаллографических плоскостей (001) и (111). Это достигается путем использования при анизотропном травлении дополнительной фотолитографии [9], при которой профиль продольного сечения упругой перемычки имеет форму, показанную на рис. 4.

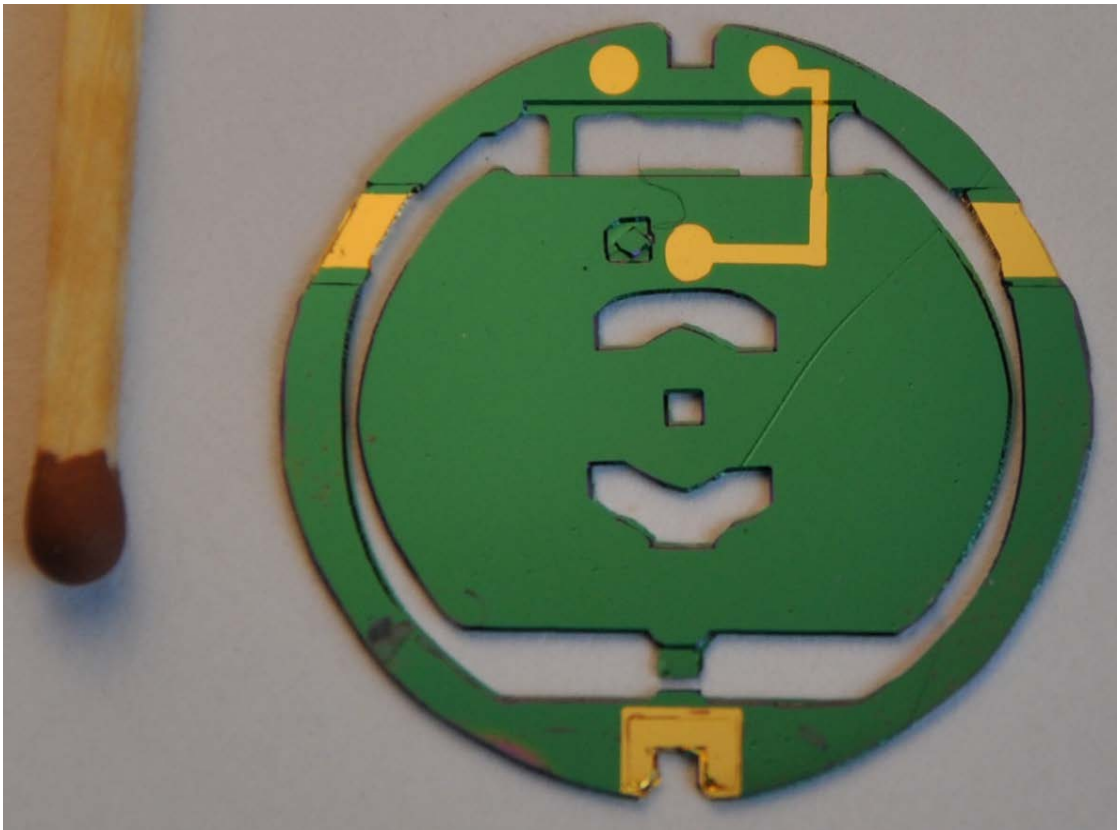


Рис. 2. Маятник акселерометра с двумя упругими перемычками

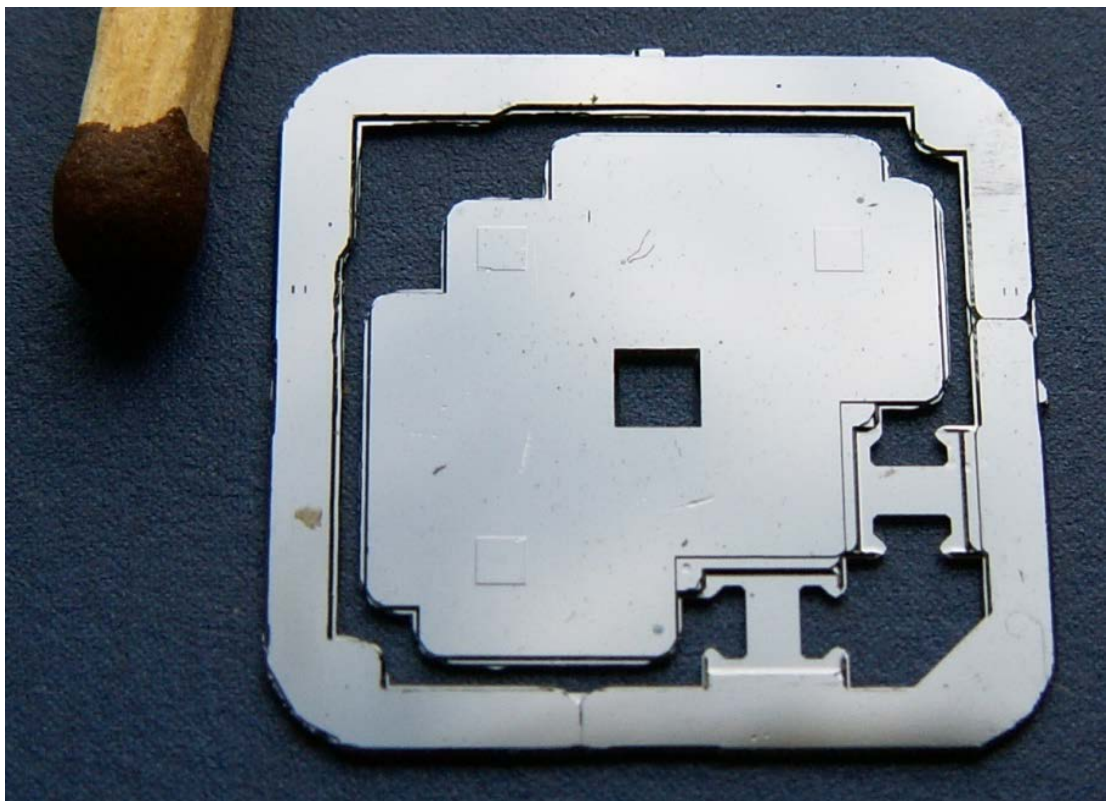


Рис. 3. Маятник акселерометра с двумя упругими перемычками, расположенными под углом 90°

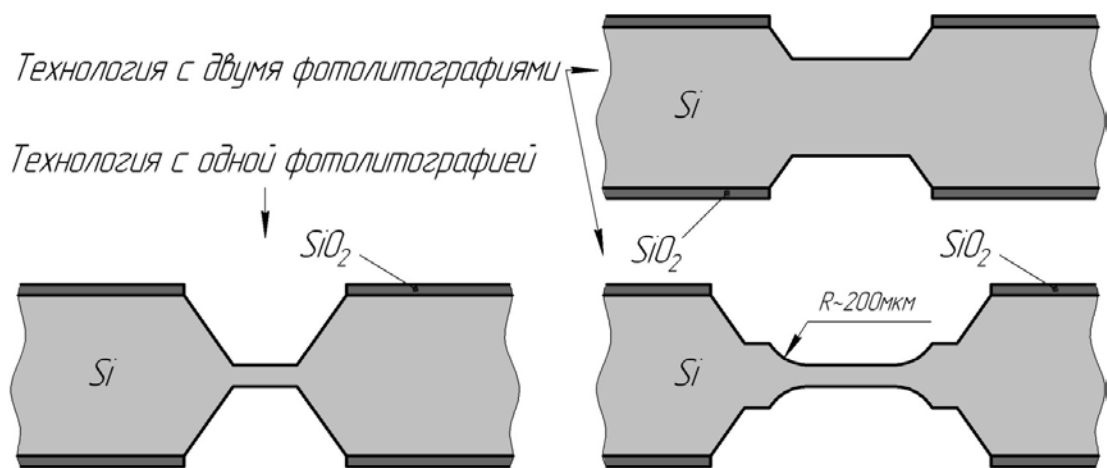


Рис. 4. Особенности формирования упругих перемычек акселерометров.

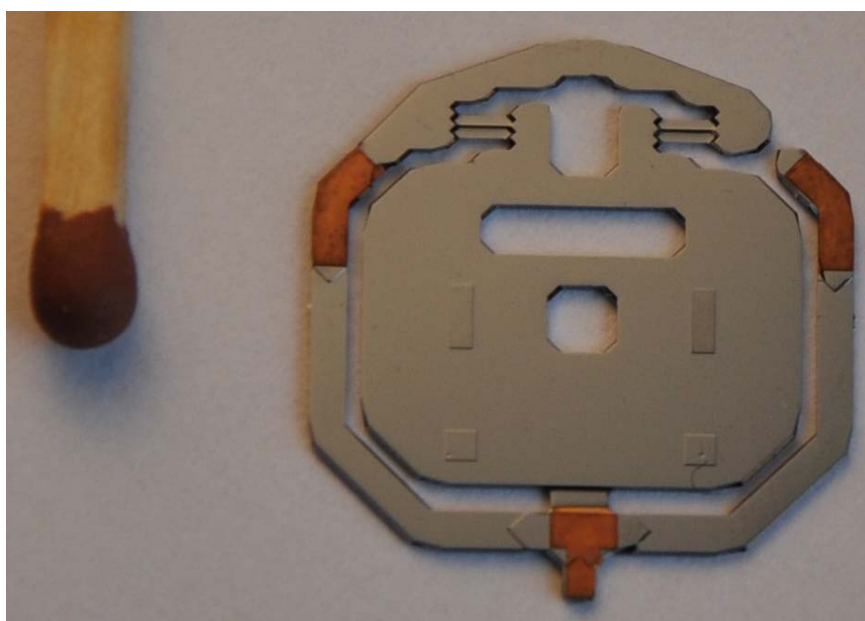


Рис. 5. Один из вариантов маятника акселерометра с растяжками крестообразной формы.

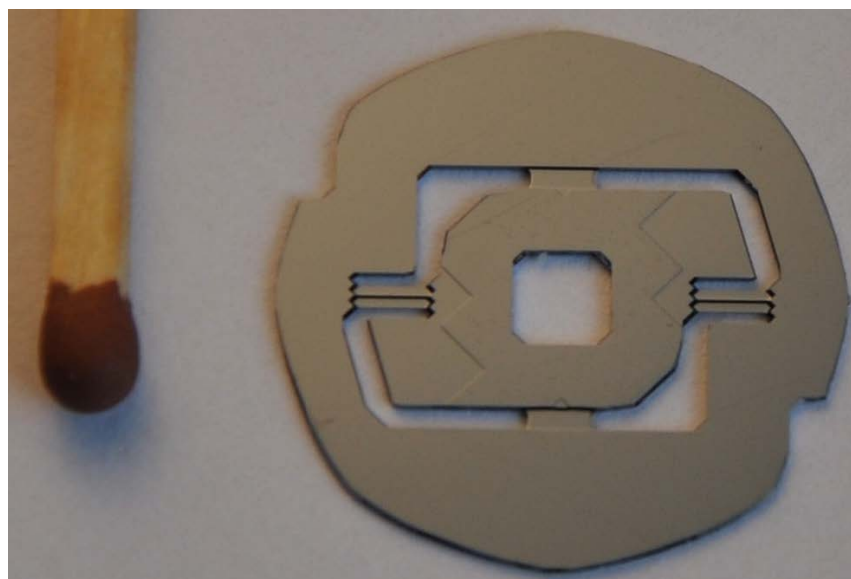


Рис. 6. Один из вариантов маятника акселерометра с растяжками крестообразной формы.

Маятники рис. 5, 6 используют растяжки крестообразной формы, продольная ось растяжек ориентирована по направлению $\langle 100 \rangle$ или $\langle 010 \rangle$ [1].

Помимо кремниевого маятника в приборах Si-flex используются два плунжерных компенсационных датчика, емкостные датчики положения и газовый демпфер. Конструкция одного из вариантов приборов [2] показана на рис. 7, а фото собранного прибора со снятой крышкой на рис. 8.

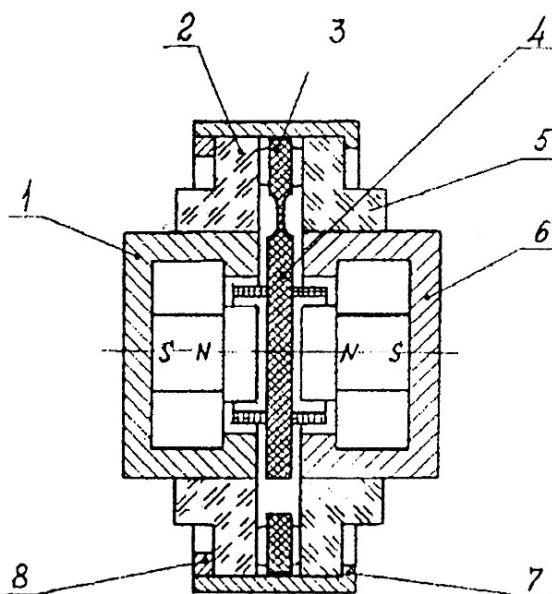


Рис. 7. Конструкция одного из вариантов компенсационного акселерометра (1, 6 – магнитопроводы, они же – неподвижные электроды емкостного датчика угла; 2, 5 – кварцевые кольца; 3 – рамка маятникового узла; 4 – лопасть маятникового узла с катушками)

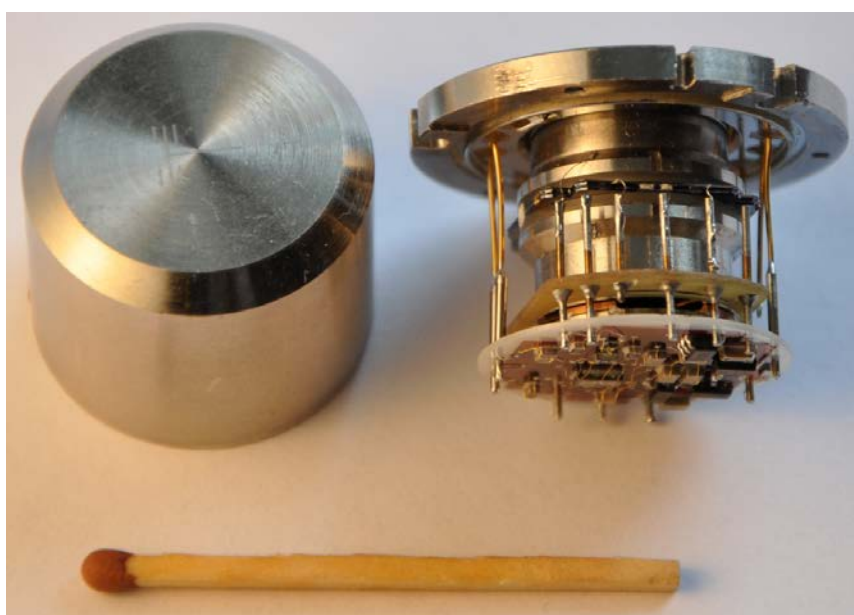


Рис. 8. Внешний вид акселерометра.

Гибридные акселерометры Si-flex имеют точностные характеристики, подобные характеристикам акселерометров навигационного класса QA-2000. Их изготовление трудоемко, так как требует применения ручных операций сборки – наклейки катушек на лопасти маятника, выставки деталей при сборке, установки расчетного сжатия узлов магнитопроводов и кремниевого маятника, пайки токоподводов и т.д. Поэтому такие приборы достаточно дороги для рассматриваемых в статье объектов.

На рис. 9. показана конструкция маятникового узла акселерометра с выполненной на обеих сторонах подвижной лопасти маятника печатной обмоткой компенсационного датчика.

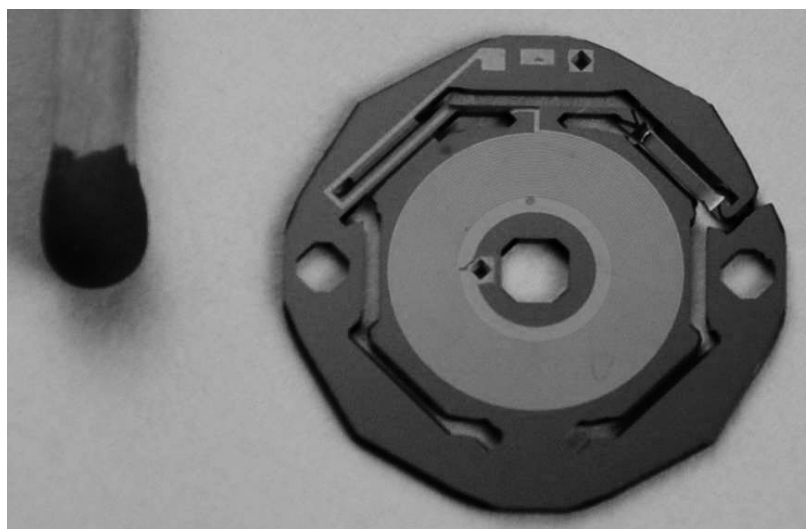


Рис. 9. Маятниковый узел акселерометра.

Токоподвод к катушкам осуществляется путем напыления металла на наружную поверхность упругих перемычек. С целью уменьшения размеров маятника упругие перемычки расположены по касательной к лопасти маятника. Толщина упругих перемычек составляет 20 мкм и они смещены от среднего сечения маятника к его торцевым плоскостям. В нижней части маятника имеется технологическая перемычка, удаляемая в процессе сборки. Конструкция подвеса и прибора предусматривает посадку подвижной лопасти маятника на упоры при экстремальных ударных воздействиях, что исключает возможность разрушения упругих перемычек. Рамка маятника зажата между двумя кварцевыми дисками, в центрах которых размещены два магнита SmCo_5 , обращенные друг к другу одноименными полюсами. Они образуют стесненное магнитное поле, ориентированное в радиальном направлении. При протекании по печатной обмотке кольцевого тока формируется магнитоэлектрическая сила, компенсирующая возникающую при ускорении инерционную силу. Тела магнитов служат электродами емкостного датчика угла. Фото собранного макета акселерометра показано на рис. 10.



Рис. 10. Внешний вид макета акселерометра.

В макетном образце сформирована печатная катушка с шагом 100 мкм (80 мкм – проводник, 20 мкм – зазор). При этом в стесненном магнитном поле размещено небольшое количество витков катушки, в результате чего прибор имеет большое значение масштабного коэффициента и малый диапазон измеряемых ускорений. При испытаниях макетных образцов получены следующие характеристики:

- | | |
|--|--------------------|
| • Диапазон измеряемых ускорений | ±5g |
| • Масштабный коэффициент | 8 мА/g |
| • Минимальное измеряемое ускорение | 10 ⁻⁵ g |
| • Нелинейность выходной характеристики | ~0.15 % |
| • Полоса пропускания | ~200 Гц |
| • Нестабильность нулевого сигнала | ~300 мкг |

Таким образом, даже на основании ограниченного числа испытаний макетов акселерометра рис. 10. можно сделать заключение, что их точность значительно выше точностных характеристик реализуемых на рынке твердотельных МЭМС акселерометров. Очевидна также возможность увеличения диапазона измерения прибора до требуемых значений в 30...40g путем уменьшения шага и использования многослойной печатной обмотки. В приборе обеспечивается минимум сборочных операций, благодаря чему может быть обеспечена его невысокая стоимость. По нашим оценкам она не должна превышать 10000 рублей при изготовлении приборов партиями примерно по 10 тыс. штук в год.

Роторные вибрационные гироскопы (РВГ) для вращающегося носителя.

РВГ представляет собой чувствительный элемент в одноосном подвесе, плоскость которого перпендикулярна продольной оси вращения носителя Z (рис. 11).

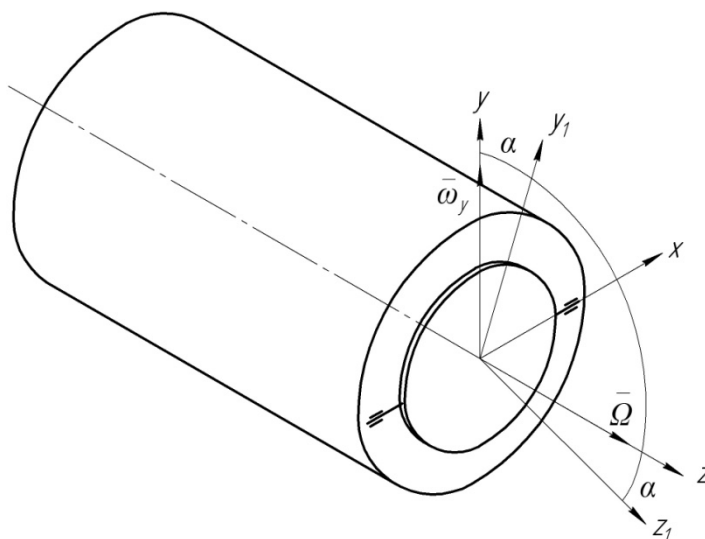


Рис. 11. Описание принципа действия РВГ

При наличии угловой скорости по поперечной оси Y чувствительный элемент под действием кориолисовых сил совершает угловые колебания α вокруг оси подвеса X . Амплитуда колебаний пропорциональна измеряемой угловой скорости ω_y .

В гибридном микромеханическом исполнении реализованы две конструкции РВГ.

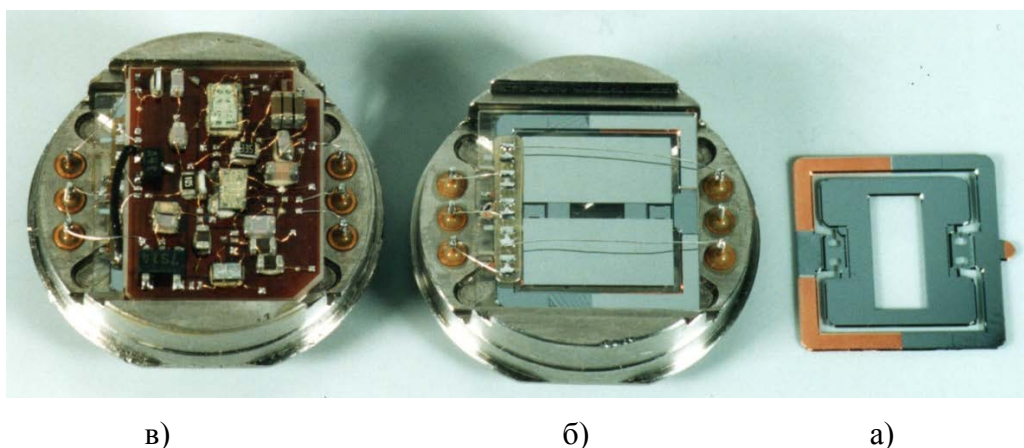


Рис. 12. Внешний вид РВГ ММДУС1.

На рис. 12,а показан вид чувствительного элемента, содержащего рамку с формирующими воздушный зазор платиками. Подвижная пластина чувствительного элемента подвешена с помощью двух упругих перемычек. На рис. 12,б изображен

собранный гибридный РВГ, содержащий рамку и две стеклянные пластины с напыленными электродами, образующими емкостной датчик угла. На рис. 12,в показан гибридный РВГ с платой электроники.

На рис. 13 дана вторая конструкция РВГ, использующая стандартный корпус микросхемы.

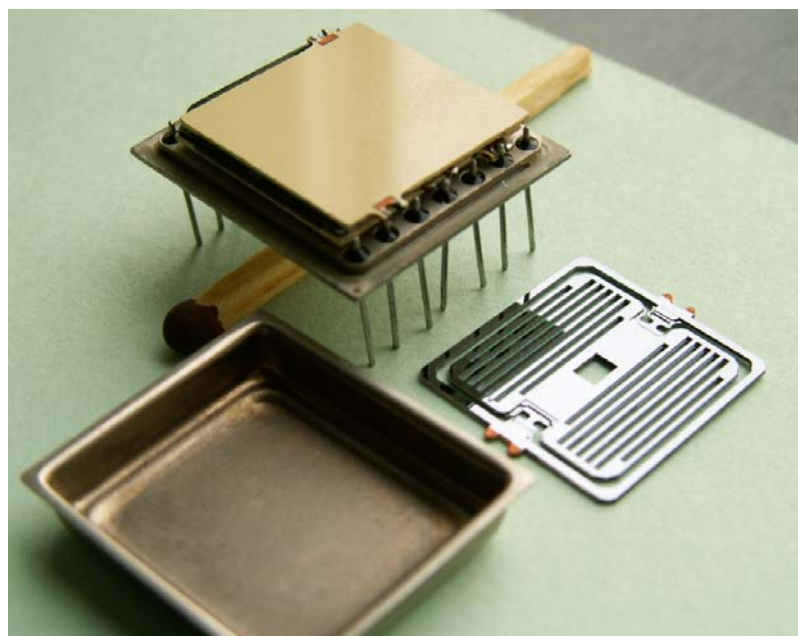


Рис. 13. Внешний вид РВГ ММДУС2.

Оба гибридных прибора построены по разомкнутой схеме и имеют характеристики, приведенные в таблице:

	ММДУС 1	ММДУС 2
Диапазон измеряемых скоростей	300 °/с	500 °/с
Порог чувствительности	0,15 °/с	0,01 °/с
Масштабный коэффициент (МК)	30 мВ/(°/с)	20 мВ/(°/с)
Нулевой сигнал (3σ)	0,2 °/с	0,01 °/с
Температурное изменение МК (3σ) в диапазоне -40...75°С	6 %	6 %
Изменение МК (3σ) при изменении скорости вращения носителя в диапазоне 12...22 об/с	12 %	1,5 %
Габаритные размеры	Ø22x8 с электроникой	19x22x9 с электроникой
Масса	12 г	10 г

Двухкоординатный микромеханический ДУС (ММГ)

Несмотря на несомненные успехи микромеханики имеются ограничения, препятствующие получению высокой точности ММГ. Среди наиболее существенных следует отметить малые массы чувствительных элементов и соответственно очень малые кориолисовы силы, вызывающие в относительно жестких упругих подвесах чрезвычайно малые деформации, регистрация которых требует сверхвысокой чувствительности измерительных датчиков. Другими серьезными факторами сдерживания повышения точности ММГ являются: высокая чувствительность к неточности изготовления упругих элементов подвесов, малые величины емкостей датчиков перемещений, отсутствие реальных возможностей доводки и настройки механической части микромеханических гироскопов. Отмеченные особенности ММГ приводят к значительным «нулевым» сигналам прибора, компенсация которых является одной из важных и сложных проблем этого направления гироскопии.

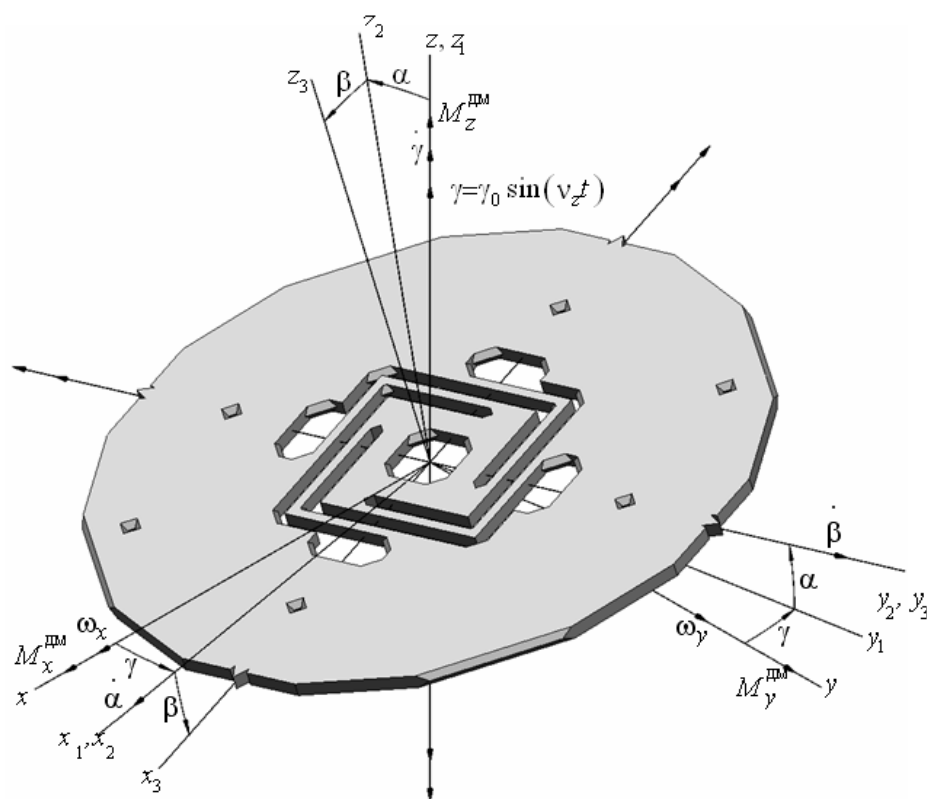


Рис. 14. Кинематическая схема двухкоординатного ДУС.

Двухкоординатный ДУС (рис. 14.) представляет из себя подвижную наружную пластину, прикрепленную к центральному основанию при помощи трехосного упругого подвеса (в данном случае спиралеобразного). Система возбуждения ДУС создает принудительные крутильные колебания подвижной части крутильного маятника вокруг

оси Z с постоянной амплитудой. При наличии угловых скоростей основания ω_x и ω_y возникают кориолисовы силы, которые уравниваются моментами датчиков моментов компенсационной обратной связи. Токи в обмотках датчиков момента двух каналов несут информацию о величине и направлении угловых скоростей ω_x и ω_y .

При выборе конструкции ДУС необходимо определить его желаемые габариты. Возможности твердотельной ММГ технологии позволяют получать габариты прибора R-R типа в плане $\sim 2,5 \times 2,5$ мм. В то же время выбор таких габаритов накладывает как конструктивные, так и технологические ограничения на схему прибора:

- ограничения толщины маятника (обычно от 20 до 60 мкм). Необходимость использования при изготовлении таких маятников технологии плазменного травления не позволяет получать неискаженную форму поперечного сечения упругих перемычек подвеса маятника;
- возможность использования в системе возбуждения колебаний маятника исключительно емкостных датчиков момента гребенчатого типа с присущим им малым уровнем развиваемого электростатического момента и необходимостью формирования малых зазоров между подвижными и неподвижными электродами 0,6–1 мкм;
- малые площади тела маятника и электродов емкостного датчика угла (которые используются практически во всех известных конструкциях датчиков угловой скорости R-R типа) требуют для получения приемлемых величин емкостей (~ 10 пФ) малых торцевых зазоров между колеблющимся маятником и неподвижными электродами (~ 1 мкм). Столь же малые зазоры имеют место и при травлении жертвенного слоя под маятником;
- в качестве компенсационных датчиков ДУС могут использоваться только емкостные ДМ, обладающие, как известно, нелинейностью управляющей характеристики и зависимостью коэффициента передачи датчика от перемещения подвижного электрода.

Малый электростатический момент в системе возбуждения требует для получения приемлемых амплитуд колебаний маятника вокруг оси z высокой добротности колебательной системы (70000–100000), что при отмеченных зазорах прибора невозможно получить без глубокого вакуумирования его полости.

Невозможность формирования неискаженной формы сечения упругой перемычки подвижного маятника вызывает передачу движения возбуждения маятника по каналу z в каналы x и y , причем уровень нулевого сигнала ДУС, связанный с такой передачей, по литературным источникам [12, 13, 16], может в десятки тысяч раз превышать уровень выходных сигналов ДУС, соответствующих диапазону измерения прибора. Таким образом, приходится осуществлять отбраковку больших партий приборов с

недопустимым уровнем нулевых сигналов, так как возможности для компенсации нулевых сигналов в ДУС малых габаритов ограничены.

В то же время существует множество возможных применений ДУС, где нет запредельно жестких требований к габаритам приборов. Приемлемые размеры ДУС с блоком электроники могут составлять $\varnothing 20$ мм, $L=20$ мм. При этом могут обеспечиваться лучшие точностные характеристики, чем у современных ДУС на базе ММГ, и допускается увеличение цены прибора до 15-20 тысяч рублей. Рассмотрим некоторые преимущества гибридных ММГ по сравнению с твердотельными.

1. Возможность сочетания в приборах элементов, получаемых методом ММГ технологии (кремниевый маятник), с элементами обычных электромеханических приборов, например магнитоэлектрическими датчиками сил и моментов. Такая комбинация впервые была успешно применена в конструкции ТВГ компании ВАЕ [11]. Она дает возможность получить высокие точностные характеристики прибора при сохранении высокого уровня технологичности (так как в приборах фирмы ВАЕ реализована автоматическая сборка).

2. Магнитоэлектрические ДМ не требуют малых рабочих зазоров и позволяют получать большие управляющие моменты, благодаря чему для нормальной работы приборов достаточно иметь добротность механических систем от 500 до 3000. Учитывая то обстоятельство, что в СМГ электростатические емкостные датчики угла (ДУ) по каналам x и y имеют значительные площади, приемлемые значения емкостей удается получать при зазорах между подвижным маятником и неподвижными электродами в 30-50 мкм. При таких зазорах требуемый уровень добротности удается обеспечить при наличии газового заполнения прибора (давление газа 1 атм). При этом следует учитывать, что если для приборов разомкнутого типа, где выходная информация определяется колебаниями маятника по осям x и y , желательно иметь большую добротность механической колебательной системы вокруг осей x и y , то для приборов компенсационного типа резонансная настройка и большая добротность не требуются. Более того, наличие большого коэффициента демпфирования колебаний по осям x и y желательно с точки зрения обеспечения оптимальных динамических характеристик компенсационных контуров прибора. Поэтому большое газовое демпфирование для каналов x и y и соответственно малые добротности механических колебательных систем по этим осям (порядка 0,9 при указанных зазорах 30-50 мкм) в меньшей степени будут сказываться на точностных параметрах компенсационных ДУС, чем ДУС разомкнутого типа.

3. Имеется возможность формирования маятника толщиной, равной толщине исходной заготовки (вафли) (~380 мкм). Большая длина упругих перемычек позволяет

получать в гибридных ММГ бóльшую, чем в твердотельных, амплитуду колебаний маятника по каналу z . Большая толщина маятника вместе с большим его диаметром и большие углы возбуждаемых колебаний маятника вокруг оси z увеличивают момент кориолисовых сил, вызывающих колебания вокруг осей x и y . Это способствует повышению точности прибора.

4. В гибридных ММГ маятник изготавливается из вафли выполнением сквозных отверстий по технологии анизотропного травления. Эта технология обеспечивает лучшую форму поперечного сечения балок по сравнению с плазменным травлением и допускает проведение корректирующего подтравки упругих элементов, позволяющего устранять влияние искажения перемычек в процессе изготовления маятников [6]. Это резко увеличивает выход годных приборов.

5. Использование магнитоэлектрического ДМ в качестве возбудителя колебаний по оси z позволяет снижать величину остаточного сигнала ДУС путем регулировки формы магнитных полей в магнитной цепи.

Помимо указанных преимуществ, следует отметить также возможность изготовления ДУС с использованием уже отработанных технологий в сборочных цехах обычных приборостроительных предприятий.

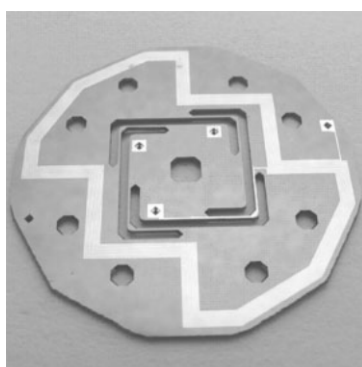


Рис. 15. Маятник ДУС разомкнутого типа

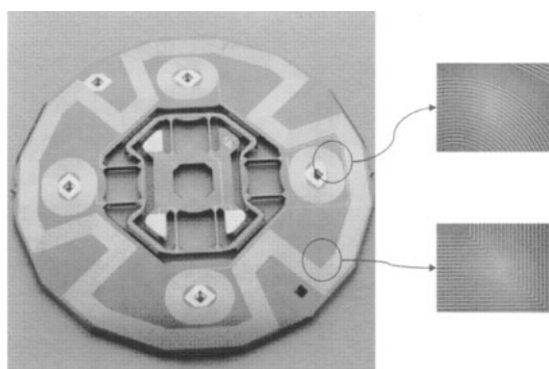


Рис. 16. Маятник ДУС компенсационного типа (1-й вариант)

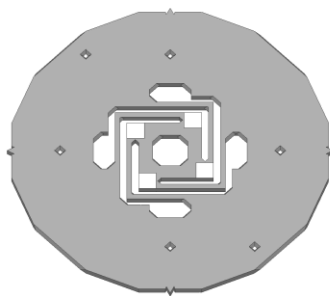


Рис. 17. Маятник ДУС компенсационного типа (2-й вариант)

На рис. 15, 16, 17 показаны некоторые варианты конструкций маятников использованных в ДУС. Маятник на рис. 15 применялся в ДУС разомкнутого типа. На торцевых поверхностях этого маятника выполнена печатная обмотка магнитоэлектрического ДМ для возбуждения колебаний вокруг оси z.

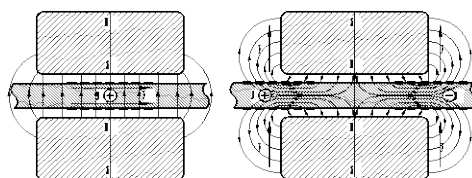


Рис. 18. Схема магнитной системы возбуждения колебаний и датчиков момента ОС

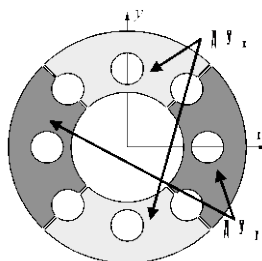


Рис. 19. Датчики угла емкостного типа

Схема магнитной системы датчика показана на рис. 18, а схема емкостных датчиков колебаний маятника вокруг осей x и y – на рис. 19. Подвес маятника содержит упругие переключки, полученные методом анизотропного травления кремниевой вафли с плоскостью среза $\langle 001 \rangle$ в 33 % водном растворе КОН. Продольные оси упругих элементов ориентированы по направлениям $\langle 100 \rangle$ и $\langle 010 \rangle$, благодаря чему обеспечивается их прямоугольное поперечное сечение. В разомкнутом ДУС использовалась автогенераторная система возбуждения крутильных колебаний по оси z. Эксперименты с ДУС показали работоспособность данной схемы, но и выявили влияние отсутствия синхронизации частот возбуждения емкостных ДУ с частотой автогенератора на выходные сигналы ДУС. В них возникали биения, частоты и амплитуды которых

изменялись вследствие как изменения резонансной частоты маятника, вызванной его прогревом, так и вследствие нестабильности частоты генератора напряжения возбуждения емкостного ДУ.

Маятники на рис. 16 и 17 использовались в ДУС компенсационного типа. Помимо обмотки возбуждения колебаний по оси z они содержат спиральные печатные обмотки магнитоэлектрических датчиков момента, компенсирующих моменты кориолисовых сил вокруг осей x и y . Схема ДМ показана на рис. 18. Датчики используют спиральные обмотки, помещенные в стесненные магнитные поля, образованные обращенными к обмоткам одноименными магнитными полюсами.

Были реализованы 2 варианта конструкции подвеса маятника, но практическое применение получила схема рис. 17, обеспечивающая большие углы колебаний маятника вокруг оси z .

В состав блока электроники компенсационного ДУС входит микроконтроллер. Это позволяет реализовать новые принципы управления системой возбуждения прибора и осуществить синхронизацию частот напряжения возбуждения ДУ и питания системы возбуждения колебаний по оси z . В электронном блоке используется генератор, управляемый напряжением (ГУН). Он формирует частоту питания ДУ (~ 128 кГц), которая затем делится до частоты 1 кГц, соответствующей резонансу маятника по каналу z . Система управляющая ГУН одновременно изменяет частоты возбуждения датчика угла и осуществляет подстройку частот возбуждения по каналу z под резонанс маятника.

Для качественной работы ДУС необходимо поддерживать неизменное значение скорости угловых колебаний маятника вокруг оси z . При реализации ДУС обмотка канала возбуждения через равные промежутки времени используется как обмотка управления ДМ, и как обмотка формирования сигнала угловой скорости колебания маятника. Коммутация обмоток реализуется с помощью переключателей. Форма тока и выходного напряжения, снимаемого с обмотки, показана на рис. 20.

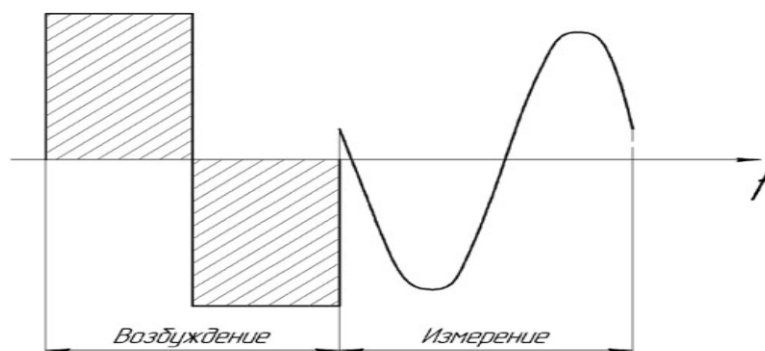


Рис. 20. Форма напряжений на обмотке возбуждения в режимах управления и измерения

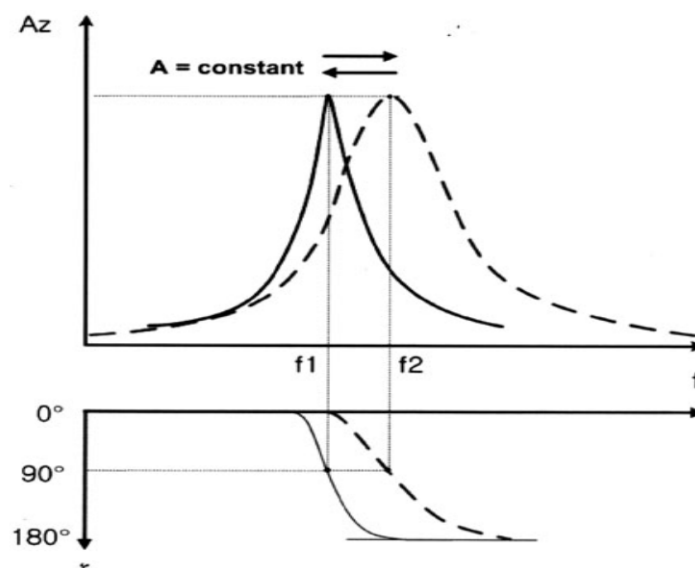


Рис. 21. Резонансная настройка

Реализованная схема осуществляет раздельное управление по каналам частоты и амплитуды угловой скорости. Здесь в первой системе управления определяется фаза угловых колебаний маятника и осуществляется резонансная настройка путем регулировки частоты ГУН (устанавливается фазовый сдвиг 90°), кроме того измеряется угловая скорость движения маятника и регулируется напряжение питания в канале возбуждения.

Главной причиной погрешности ДУС (нулевой сигнал) является нарушение формы балок подвеса, связанной с неточностью совмещения фотошаблонов травления при двухсторонней фотолитографии. В результате смещения масок форма упругих элементов приобретает вид, показанный на рис. 22. При колебаниях маятника вокруг оси z их деформация соответствует случаю косоугольного изгиба и сопровождается перемещением ее как в плоскости приложения силы, так и в поперечном направлении. Результаты показывают, что смещение шаблонов на 2 мкм (имевшая место при изготовлении макетов точность двухсторонней фотолитографии) приводит к появлению нулевого сигнала, соответствующего угловой скорости 800 град/с , что в 8 раз больше диапазона измерения ДУС. Выполнение точного двухстороннего совмещения масок при травлении, как и компенсации нулевого сигнала посредством электрических цепей являются главными задачами создания точного прибора.

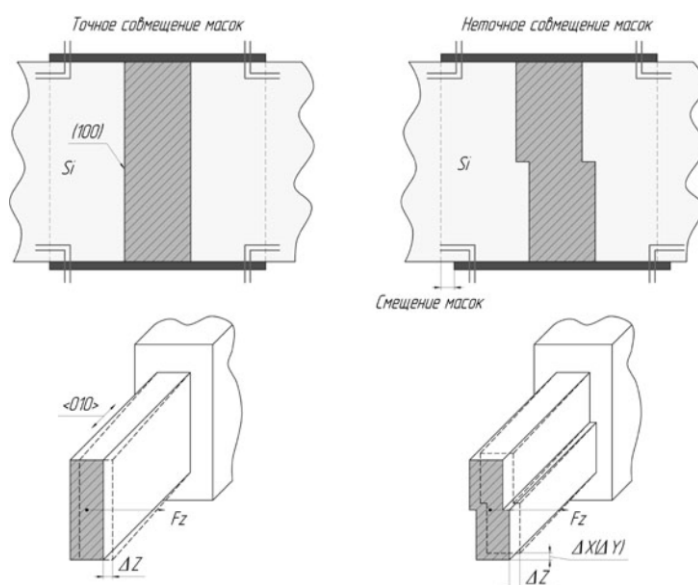


Рис. 22. Причина нарушения формы упругих элементов

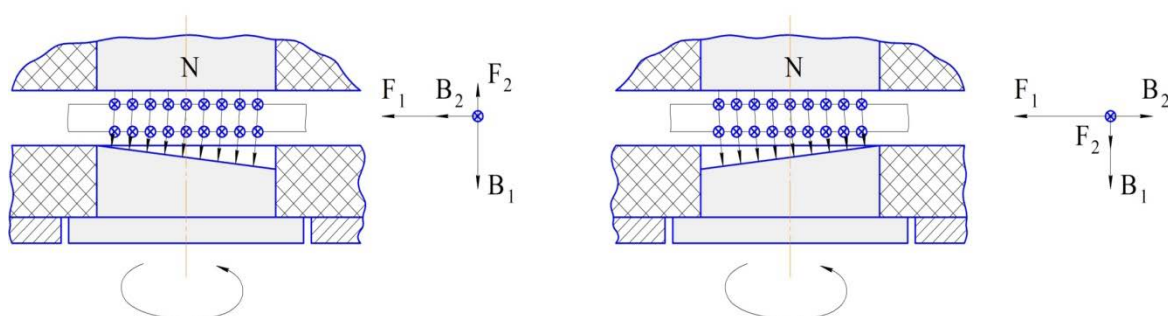


Рис. 23. Способ компенсации нулевого сигнала путем изменения конфигурации магнитного поля.

Гибридные ДУС, в отличие от твердотельных, допускают введение регулировки нулевого сигнала в процессе сборки и отладки приборов. Она производится путем формирования соответствующей структуры магнитного поля в воздушном зазоре, где располагается обмотка возбуждения. Для этого часть магнитов системы возбуждения выполняется со скошенными торцами, разворот которых (рис. 23) изменяет направление приложенных к маятнику электромагнитных сил и соответственно ориентацию плоскости возбуждаемых колебаний, что влияет на величину нулевого сигнала. Данная регулировка проводится при включенной системе возбуждения и обратной связи по каналам x и y .

Окончательная регулировка осуществляется с помощью микроконтроллера, который формирует компенсационный сигнал, равный исходному нулевому сигналу, снимаемому с датчика угла, но противоположный по фазе.

Внешний вид разработанного двухкомпонентного ДУС показан на рис. 24. Ниже приведены результаты экспериментальных исследований ДУС.

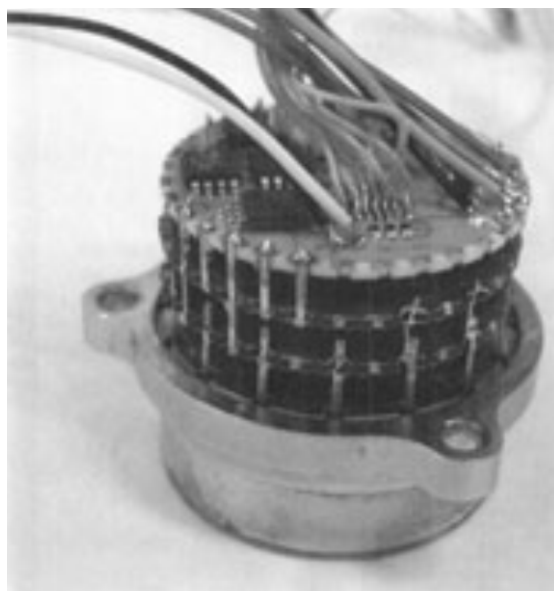


Рис. 24. Внешний вид прибора

Следует отметить, что это не предельные точностные характеристики достижимые у ДУС рассматриваемого типа. По нашему мнению, имеются достаточно обоснованные перспективы повышения его точности, связанные с отработкой технологии изготовления более качественных маятников и базовых элементов для установки маятников на корпусе, компенсацией дефектов изготовления упругих элементов методом их подтравки, методикой доводки собственной частоты маятника по оси возбуждения, уменьшением зазора между маятником и корпусом до (20 – 30) мкм для повышения параметра «сигнал/шум» датчиков угла.

Диапазон измерения	± 100 °/с (имеется возможность расширения до 500 °/с)
Масштабный коэффициент	$(10 \pm 1\%)$ мВ/°с
Чувствительность	0.02 °/с
Нулевой сигнал	± 0.5 °/с с компенсацией
Стабильность от запуска к запуску	0.05 °/с
Нелинейность масштабного коэффициента	< 0.5 %
Неортогональность осей чувствительности	< 2°
Полоса пропускания	50 Гц
Сигнал шума (1 ~ 100Hz):	0.2 о/с
Время готовности	< 3 с
Габариты	Ø20,3x20,4 мм
Масса	20,5 г

Разработанные конструкции гибридных акселерометров, РВГ и двухкомпонентного компенсационного ДУС R-R типа оказались достаточно технологичными и легко реализуемыми в условиях обычного приборного производства. Приборы могут обеспечить потребность систем управления снарядами систем залпового огня и артиллерийских снарядов.

Результаты исследований, приведенные в статье, получены в процессе выполнения НИР «Разработка интегрированного микроэлектромеханического датчика угловых скоростей для гироскопа высокоскоростного транспорта» по ГК № 16.513.11.3055 в рамках мероприятия 1.3 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

Литература

1. С.Ф. Коновалов, А.А. Коновченко, Е.Л. Межирицкий Компенсационный «Si-flex» акселерометр для измерения больших ускорений // XII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. СПб, 2005. С. 204–209.
2. С.Ф. Коновалов, А.А. Коновченко, А.В. Польшков, А.А. Трунов, В.М. Прокофьев, О.С. Квон, Х.К. Мун, Дж.Б. Сео, Ф. Люк Опыт разработки малошумящего акселерометра // Гироскопия и навигация. СПб, 2000. №3(30). С. 72–79.
3. С.Ф. Коновалов, А.В. Кулешов, Н.А. Носов, В.П. Подчерзцев, В.В. Фатеев, Е.Н. Фролов, К.Б. Квон, С.В. Нам Вибрационные датчики угловой скорости // Гироскопия и навигация. СПб, 2004. №1(44). С. 107–118.
4. С.Ф. Коновалов, А. А. Лапин, Ю. В. Юрасов Удароустойчивый подвес акселерометра // Докл. II Санкт-Петербургская международная конференция по гироскопической технике и навигации. СПб, 1995. С. 133-139.
5. С. Ф. Коновалов, Т. Н. Лаптева, К. С. Ли и др. Опыт разработки навигационных приборов на базе монокристалла кремния // Микросистемная техника 2001. №4. С. 17–25.
6. С.Ф. Коновалов, В.П. Подчерзцев, Д.В. Майоров, Ю.А. Пономарев, А.Г. Сидоров, Х.В. Парк, Т.И. Квон, Г.С. Ли, Дж.Б. Сео Двухкоординатный микромеханический ДУС с магнитоэлектрическими датчиками обратной связи по каналам возбуждения и измерения // Гироскопия и навигация. СПб, 2010. №3(70). С. 61–71.
7. В.Г. Пешехонов, Я.А. Некрасов, Р. Pfluger, С. Kergueris, Н. Haddara, А. Elsayed Результаты испытаний микромеханического гироскопа R-R типа. // XVII Санкт-

- Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов СПб, 2010. С. 8.
8. И.В. Попова и др. Капсулированные микромеханические гироскопы и акселерометры для цифровых систем навигации и управления // Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов СПб, 2008. С. 37–44.
 9. А. С. 1708103 СССР, МКИ5 Н 01 L 21/00. Способ изготовления упругих элементов из монокристаллического кремния / Т. Н. Лаптева, И. И. Медведева, С. Ф. Коновалов. №4696326/25; Заяв. 31.03.89. // Открыт. Изобретения. 1991. №5.
 10. N. Barbour, J. Connely, J. Gilmore, P. Greiff, A. Kourepenis, M. Weinberg Micro-electromechanical instrument and system development at Draper laboratory // 3rd Saint Petersburg international conference on integrated navigation system. Part I. Saint Petersburg, 1996. P. 3–10.
 11. G. He, K. Najafi, A Single-Crystal Silicon Vibrating Ring Gyroscope, MEMS // 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Las Vegas, NV, 2002.
 12. Mikko Saukoski, Lasse Aaltonen, Kari A.I.Halonen Zero-Rate Output and Quadrature Error Compensation // IEEE Sensors Journal. 2007. Vol.7, №12. P. 639-1651.
 13. Stewart R.E., Wyse S.F. Bias and Quadrature Reduction in Class II Coriolis Vibratory gyros. EP 1,752,733A2, Bulletin. 2007.
 14. Pat. 6073490 US. Servo Accelerometer / Konovalov et al. // 13.06.2000.
 15. Pat. 6422076 B1 US. Compensation Pendulous Accelerometer / Prokofiev et al. // 23.06.2002.
 16. Pat. 6370937 B2 US Method of Cancelling Quadrature Error In an Angular Rate Sensor / Ying W. Hsu // 2002.

Hybrid microelectromechanical gyroscopes and acceleration gages 77-30569/219257

10, October 2011

Konovalov S.F., Ponomarev Yu.A., Maiorov D.V., Podchezercev V.P.,
Sidorov A.G.

Bauman Moscow State Technical University

quayside@mail.ru

sercon@bk.ru

maord@rol.ru

podch@list.ru

sh1793@gmail.com

The article describes the ways of development of microelectromechanical gyroscopes and acceleration gages in navigating devices of missile systems. The authors propose variants of design of microelectromechanical compensatory acceleration gages and of rotor vibrating gyroscopes. It is shown that microelectromechanical two-coordinate gages of angular speed have some advantages in comparison with solid-state ones. Designs of microelectromechanical acceleration gages and gages of angular speed are technological and easily realized on practice.

Publications with keywords: [microelectromechanical acceleration gage](#), [gage of angular speed](#), [gyroscope](#)

Publications with words: [microelectromechanical acceleration gage](#), [gage of angular speed](#), [gyroscope](#)

Reference

1. S.F. Konovalov, A.A. Konovchenko, E.L., in: Proceedings of the XII Saint Petersburg international conference, SPb, 2005, pp. 204–209.
2. S.F. Konovalov, A.A. Konovchenko, A.V. Polynkov, A.A. Trunov, V.M. Prokofev, O.S. Kvon, Kh.K. Mun, Dzh.B. Seo, F. Liuk, *Giroskopiia i navigatsiia* 30 (3) (2000) 72–79.
3. S.F. Konovalov, A.V. Kuleshov, N.A. Nosov, V.P. Podchezertsev, V.V. Fateev, E.N. Frolov, K.B. Kvon, S.V. Nam, *Giroskopiia i navigatsiia* 44 (1) (2004) 107–118.

4. S.F. Konovalov, A. A. Lapin, Iu. V. Iurasov, in: Proceedings of the II Saint Petersburg international conference, SPb, 1995, pp. 133-139.
5. S. F. Konovalov, T. N. Lapteva, K.S. Li, et al., Mikrosistemnaia tekhnika 4 (2001) 17–25.
6. S.F. Konovalov, V.P. Podchezertsev, D.V. Maiorov, Iu.A. Ponomarev, A.G. Sidorov, Kh.V. Park, T.I. Kvon, G.S. Li, Dzh.B. Seo, Giroskopiia i navigatsiia 70 (3) (2010) 61–71.
7. V.G. Peshekhonov, Ia.A. Nekrasov, P. Pfluger, C. Kergueris, H. Haddara, A. Elsayed, in: Proceedings of the XVII Saint Petersburg international conference, SPb, 2010, p. 8.
8. I.V. Popova, et al., in: Proceedings of the XV Saint Petersburg international conference, SPb, 2008, pp. 37–44.
9. T. N. Lapteva, I. I. Medvedeva, S. F. Konovalov, A. S. 1708103, Otkryt. Izobreneniia 5 (1991).
10. N. Barbour, J. Connely, J. Gilmore, P. Greiff, A. Kourepenis, M. Weinberg, Micro-electromechanical instrument and system development at Draper laboratory, in: Proceedings of the 3rd Saint Petersburg international conference on integrated navigation system, Part I, Saint Petersburg, 1996, pp. 3–10.
10. G. He, K. Najafi, A Single-Crystal Silicon Vibrating Ring Gyroscope, in: Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Las Vegas, NV, 2002.
11. Mikko Saukoski, Lasse Aaltonen, Kari A.I.Halonen, Zero-Rate Output and Quadrature Error Compensation, IEEE Sensors Journal 7 (12) (2007) 639-1651.
12. Stewart R.E., Wyse S.F., Bias and Quadrature Reduction in Class II Coriolis Vibratory gyros, EP 1,752,733A2, Bulletin, 2007.
13. Konovalov, et al., Patent 6073490 US, Servo Accelerometer, 13.06.2000.
14. Prokofiev, et al., Patent 6422076 B1 US, Compensation Pendulous Accelerometer, 23.06.2002.
15. Ying W. Hsu, Patent 6370937 B2 US, Method of Cancelling Quadrature Error In an Angular Rate Sensor, 2002.