

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ.

И. В. Попова, А. А. Шабров, А. М. Лестев, М. В. Фёдоров

(Закрытое Акционерное Общество «ГИРООПТИКА», popova@gyro.ru)

Представлены результаты разработок и испытаний микромеханических инерциальных преобразователей параметров движения - микромеханических преобразователей скорости угловой, ускорения линейного, инерциальных модулей и бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) на их основе. Приведены конструкции указанных изделий, технические характеристики изделий, результаты математического моделирования, тенденции совершенствования конструкций, схемотехнических решений, технологии изготовления, перспективы развития микромеханических преобразователей, навигационных систем и систем управления на их основе и их применение в робототехнических комплексах. Рассмотрены алгоритмы функционирования БИНС в автономном режиме и алгоритмы интегрирования БИНС с источниками внешней информации (спутниковые навигационные системы, геотехнические средства, одометры и др.).

Микромеханическими преобразователями параметров движения являются устройства, предназначенные для восприятия и преобразования линейного ускорения или скорости угловой в выходной сигнал.

Микромеханические датчики первичной информации, такие как преобразователь ускорения линейного (ПЛУ) и преобразователь скорости угловой (ПУС), позволяют создавать малогабаритные инерциальные навигационные системы, предназначенные для выработки параметров ориентации и навигационных параметров высокоскоростных высокоманевренных объектов и подвижных объектов других классов. Выдачу информации в цифровом виде. Интегрированные со спутниковыми навигационными системами, для компенсации ошибок микромеханических преобразователей, ошибок начальной выставки и ошибок исходной географической информации, и обеспечивающие необходимую точность определения параметров

ориентации и координат подвижных объектов: аэрокосмических летательных аппаратов, морских судов, наземных транспортных средств, робототехнических комплексов, всех видов объектов вооружения и военной техники

Существует 3 вида исполнения преобразователей:

- Интегральное исполнение, при котором чувствительный элемент и специальная большая интегральная схема (СБИС) нераздельно выполнены и соединены в объеме или на поверхности кристалла.

- Гибридное исполнение, при котором чувствительный элемент, аналоговая СБИС, плата коммутационная, внешняя плата питания и настройки соединены между собой на единой подложке.

- Модульное исполнение, при котором СБИС и капсулированный датчик располагается в корпусе без платы коммутационной.

Фирмой "Analog Devices" разрабатываются интегрированные типы преобразователей. Технология, которой обладает пока единственная фирма, позволяет создавать на микросхеме обработки поликремневый микромеханический элемент толщиной в несколько микрон, что называется технологией поверхностной микромеханики. Осуществляя герметизацию поликремневой крышкой, производимую на этапе, когда чипы пластин не разделены, тем самым обеспечивается групповая технология изготовления преобразователя.

Отличие капсулированных микромеханических чувствительных элементов заключается в наличие крышки, герметично закрывающей микромеханический элемент. Такая конструкция чувствительного элемента позволяет обеспечивать:

- организацию выводов на крышке или основании, не нарушающих герметичность конструкции в целом;

- создание и поддержание требуемого давления во внутрикапсульном объеме.

Наиболее распространенной конструкцией является размещение открытого чувствительного элемента в герметичный корпус с разводкой выводов и последующей герметизацией. Однако такая конструкция не может быть выполнена методами групповой технологии. Групповая технология дает значительный выигрыш, как по массогабаритным параметрам, так и по стоимости изготовления.

Существует 3 типа технологии изготовления:

- SOI ("Кремний на изоляторе"), недостатком которого является его дороговизна;

- SSS("Кремний-Кремний-Кремний"), недостаток которого в эффекте «подтравливания».

- GSG (“Стекло-Кремний-Стекло”), недостатком этого метода является различие, хоть и не большое, коэффициента линейного расширения.

ЗАО "ГИРООПТИКА" имеет опыт по технологиям SOI и GSG. Основной технологией является GSG.

Далее рассмотрены два основных варианта конструкции капсулированного чувствительного элемента. Первый вариант (рисунок 1, а) - создание выводов на поверхности стеклянного основания в плоскости микромеханического элемента, проходимых через шов крышки - основание. Второй вариант (рисунок 1, б) - создание сквозных металлизированных отверстий в стекле (основания или крышки), позволяющих вывести выводы от элемента на одну из плоскостей капсулы. Второй вариант конструкции более предпочтителен, т.к. он позволяет осуществить выводы на верхнюю или нижнюю (или даже на обе вместе) плоскость капсулы. Это открывает по сравнению с первым вариантом больше возможностей при интеграции капсулы с микросхемой обработки. И позволяет использовать плоскость капсулы в виде коммутационной платы, осуществив нужный рисунок металлизации на поверхности выхода контактов от кремниевого чувствительного элемента. Оба варианта предполагают использование геттера (материал, обеспечивающий поглощение остаточных газов посредством химического, сорбционного и «электрического» взаимодействия между частицами газа и материала).

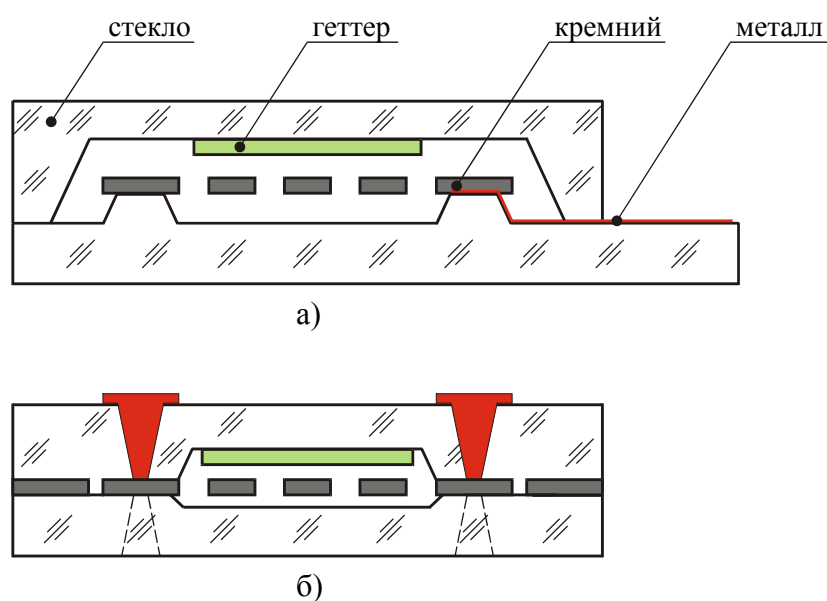


Рисунок 1 - Варианты создания выводов в капсулированных элементах

Следует заметить, что преобразователи (т.е. чувствительные элементы с усилителем и обработкой) в бескорпусном виде в мире в настоящее время не выпускаются. Это связано с тем, что сигналы с микромеханического датчика очень слабые и требуют преобразования и обработки в непосредственной близости от чувствительного элемента.

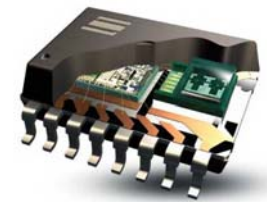
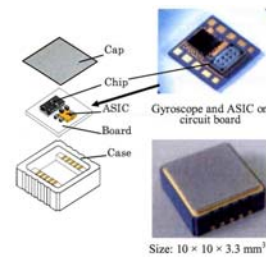
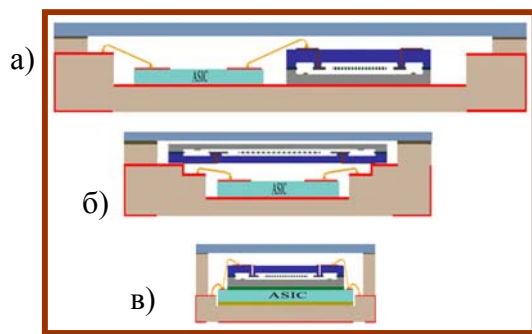
Возможны несколько вариантов капсулированного исполнения микромеханических преобразователей, гибридного и модульного типа, отличающихся взаимным расположением капсулы и СБИС в составе корпуса.

Первый вариант - с планарным размещением капсулы и СБИС (рисунок 2, а). Этот вариант можно назвать «классическим». Он может быть реализован как в керамическом, так и в пластмассовом корпусе. На рисунке 3 представлен пример исполнения такого варианта.

Второй вариант – представляет собой двухъярусное размещение, капсула над СБИС (рисунок 2, б). Этот вариант подразумевает наличие контактов по периферии капсулы и пайку этими контактами на площадки корпуса второго яруса. Электрические соединения между капсулой и СБИС осуществляются специальной металлизацией внутри корпуса, не выходящей на внешнюю сторону. Такой вариант, по сравнению с первым, имеет несколько меньшие по площади размеры за счет небольшого увеличения высоты. В этом случае требуется применение специального корпуса с внутренними соединениями. Кроме того, капсула крепится в корпусе только за счет пайки на свои контактные площадки.

Третий вариант (рисунок 2, в) предполагает применение стандартного корпуса с небольшим увеличением высоты. Этот вариант, по сравнению с первым и вторым, имеет меньшую площадь и объем и базируется на монтаже капсулированного чувствительного элемента непосредственно на кристалл СБИС. В качестве адгезива используется силиконовая композиция или полиимидный клей. Электрические соединения между СБИС и капсулой в этом варианте осуществляются проволочными выводами по технологии разварки "шариком", позволяющей приваривать вывод вертикально к контактной площадке.

Все рассмотренные выше варианты используют металлокерамические корпуса, герметизация и вакуумирование которых осуществляется посредством лазерной сварки крышки в инертном газе (вакууме). Возможна замена лазерной сварки на роликовую контактную сварку, но в обоих вариантах применяется нестандартное технологическое оборудование.



a)

б)

Рисунок 2 - Варианты конструкции микромеханического преобразователя с капсулированными чувствительными элементами

Рисунок 3 - Пример реализации микромеханических преобразователей с планарным размещением капсулы и микросхемы

Посадка кристалла СБИС на основание корпуса осуществляется пайкой, в случае металлизации обратной стороны кристалла, или посадкой на эвтектику золото-кремний, если металлизация отсутствует.

Из перечисленных выше вариантов микромеханических преобразователей наиболее предпочтительным является последний по следующим причинам:

- наименьшие габариты и объём при прочих равных условиях;
- капсулированный чувствительный элемент имеет наименьшие механические напряжения, т.к. его монтаж осуществляется на кристалл кремния, имеющий тот же коэффициент термического расширения.

Конструкция микромеханического преобразователя, описанная ранее, позволяет широко применять методы групповой технологии. Суть такого конструкторско-технологического варианта состоит в изготовлении по групповой технологии пластины с чувствительными элементами и пластины с микросхемами с последующим их совмещением и соединением. При этом все необходимые соединения между чувствительным элементом и микросхемой организуются в момент соединения пластин, а необходимые контактные площадки формируются на одной из плоскостей такой многослойной пластины. Процесс герметизации (откачка, обезгаживание) при этом совмещается, как и в случае изготовления капсулированных чувствительных элементов, с процессом соединения пластин. При таком подходе изготовление всего преобразователя становится полностью групповым, включая операции контроля и разделение пластин на кристаллы. Законченный преобразователь в этом случае может

использоваться как в бескорпусном варианте для гибридных сторон, так и смонтирован в отдельный корпус. Такой многослойный чип содержит в себе защищённый микромеханический элемент с необходимым вакуумом и геттером, его поддерживающим, и соединенную с ним микросхему обработки. Считается, что за технологией и конструкциями, позволяющими соединять пластины с микромеханикой и электроникой, стоит будущее большинства изделий микросистемой техники. Преобразователи, собранные по такой групповой технологии, имеют следующие основные преимущества:

- отсутствие ручных и полуавтоматических операций, осуществляемых при почиповой сборке преобразователя (пайка, разварка выводов и т.д.);
- низкая стоимость, особенно при массовом изготовлении на пластинах большого диаметра;
- электрический контроль всего преобразователя (чувствительного элемента, и электроники) непосредственно на пластине (аналогично микросхемам);
- уменьшение габаритов и массы;
- наименьшие значения паразитных ёмкостей и индуктивностей, поскольку длина соединений между чувствительным элементом и СБИС наикратчайшая;
- высокая надёжность.

Вариант модульного исполнения микромеханического преобразователя выполненного по технологии объемной микромеханики, будет конкурентоспособен с преобразователями "Analog Devices". Это объясняется тем, что, незначительно проигрывая в размерах, он значительно выигрывает в точностных характеристиках из-за использования технологии объемной микромеханики. На рисунке 4 представлен вариант конструкции микромеханического преобразователя группового изготовления. Нижнее основание представляет собой пластину со СБИС обработки сигнала, отличающуюся от обычной переносом увеличенных по площади контактных площадок, на периметр, кристалла. Вторая пластина - стеклянная по своей сути, является одновременно крышкой для микромеханического элемента и коммутационной платой и содержит в себе геттерное покрытие и сквозные металлизированные отверстия. Третья пластина представляет собой стеклянное основание, на котором находится микромеханический чувствительный элемент, изготовленный методами объемной микромеханики. В стеклянном основании, на котором располагается микромеханический элемент, выполнены сквозные металлизированные отверстия, служащие контактами преобразователя. То есть через вторую пластину контакты от

Продолжение таблицы 1

Преобразователи линейных ускорений 801 серии							
Параметры	Высокоподвижные объекты			Подвижные объекты			
Диапазон, g	±500	±500	±750	±1000	±100	±100	±100
Разрешающая способность, mg, менее чем	0.5	5	50	100	0.1	1	10
Нелинейность выходной характеристики (3σ), %, менее чем	0.5	1	1,5	3	0.5	1	1.5
Случайная составляющая нуля(шум), g/rHz, менее чем	5x10-4	5x10-3	10-2	2x10-2	1x10-4	1x10-3	2x10-3
Полоса пропускания, Hz	150	150	150	150	150	150	150

Таблица 2. Модельный ряд преобразователей скорости угловой

Преобразователи скорости угловой 801 серии							
Параметры	Малоподвижные объекты				Подвижные объекты		
Диапазон, °/s	±100	±100	±100	±10	±200	±200	±200
Нестабильность выходного сигнала (3σ), °/s / 1 min, менее чем	1.5x10-3	10-2	10-1	10-3	2x10-3	2x10-2	2x10-1
Нелинейность выходной характеристики (3σ), %, менее чем	1.5	1.5	1,5	1.5	1.5	1.5	1.5
Случайная составляющая нуля(шум), g/rHz, менее чем	10-3	5x10-3	5x10-2	3x10-4	1.5x10-3	10-2	10-1
Чувствительность на g, (3σ), °/s / g, менее чем	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Полоса пропускания, Hz	10	20	50	20	10	20	50

Продолжение таблицы 2

Преобразователи скорости угловой 801 серии							
Параметры	Параметры				Параметры		
Диапазон, °/s	±500	±500	±500	±1000	±360	±360	±360
Нестабильность выходного сигнала (3σ), °/s / 1 min, менее чем	5x10 ⁻³	5x10 ⁻²	5x10 ⁻¹	5x10 ⁻¹	5x10 ⁻³	5x10 ⁻²	5x10 ⁻¹
Нелинейность выходной характеристики (3σ), %, менее чем	1.5	1.5	1,5	1.5	1.5	1.5	1.5
Случайная составляющая нуля(шум), g/rHz, менее чем	2.5x10 ⁻³	2.5x10 ⁻²	2x10 ⁻¹	2x10 ⁻¹	2x10 ⁻³	2x10 ⁻²	0.15
Чувствительность на g, (3σ), °/s / g, менее чем	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Полоса пропускания, Hz	10	20	50	50	10	20	50

Измерение различных диапазонов угловых скоростей осуществляется за счет изменения расстройки собственных частот микромеханического чувствительного элемента, конструктивная схема которого представлена на рисунке 5. Измерение линейного ускорения производится микромеханическим чувствительным элементом конструктивная схема которого приведена на Рисунке 6. Для изменения диапазона измерения линейного ускорения необходимо изменять параметры чувствительного элемента.

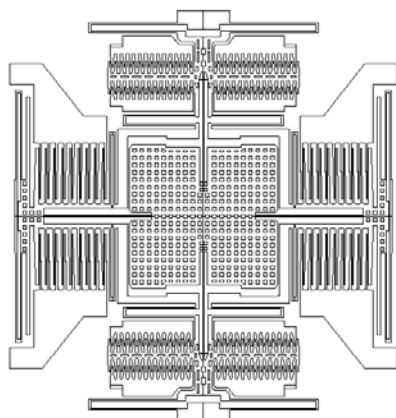


Рисунок 5 – Конструктивная схема чувствительного элемента преобразователя скорости угловой

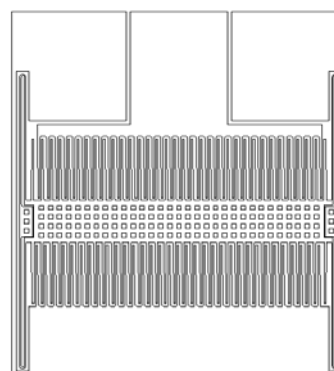


Рисунок 6 – Конструктивная схема чувствительного элемента преобразователя ускорения линейного

Математическое моделирование капсулированных элементов, подтверждает обеспечение параметров представленных в таблицах 1-2, и показывает, что преобразователи являются ударопрочными к ударным воздействиям амплитудой 15000g длительностью 2мс и виброустойчивыми к вибрационным воздействиям амплитудой 50g в диапазоне частот 20-2000 Гц.

- [1] ОСТ 11 0941-95. Датчики и преобразователи физических величин электронные. Классификация и система условных обозначений.
- [2] Lestev A.M., Popova I.V. Micromechanical Gyroscopes. Present State in Theory and Practice. 5-th St.-Petersburg International Conference on integrated navigation systems. May, 1998, p. 173-183.
- [3] Лестев А.М., Попова И.В. Современное состояние теории и практических разработок микромеханических гироскопов. Гироскопия и навигация, №3(22), 1998, с. 81-94; с. 109-110.
- [4] Температурные и технологические погрешности микромеханических камертонных гироскопов // В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов, А.М. Лестев, И.В. Попова. VII С.-Пб. Международная конференция по интегрированным навигационным системам, Май, 2000, с. 60-71.
- [5] Микромеханические гироскопы: особенности динамики, проблемы конструирования и технологии прогнозирования. // А.М. Лестев, И.В. Попова, М.И. Евстифеев, Е.Н. Пятышев, М.С. Лурье, А.А. Семенов / Первая межд. конф. по мехатронике и робототехнике. Сб. тр., т.2. С.-Пб., 2000 г., с. 169-173.
- [6] Пятышев Е.Н., Лурье М.С, Попова И.В., Казакин А.Н. Специфика технологии микромеханических устройств. Первая международная конференция по мехатронике и робототехнике. Сб. тр., т. 2, С.-Пб., 2000, с. 236-240.
- [7] Оценка надежности микромеханических инерциальных датчиков / И.В. Попова, А.М. Лестев, А.А. Семенов, К.А. Злотников // Гироскопия и навигация, 2002, №4(39), с.43.
- [8] Особенности комплексирования объемной микромеханики и БИС в измерительных системах / В.А. Бурцев, К.А. Злотников, А.М. Лестев, И.В. Попова и др. // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам С.-Пб, ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2003, с. 217-225.