

Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий

Сергей КОЗИН
Александр ФЕДУЛОВ
Валерий ПАУТКИН
Илья БАРИНОВ, к. т. н.
mzungu@inbox.ru

В статье приводятся примеры реализации разработанных в ОАО «НИИФИ» конструктивно-технологических решений (КТР) объемных кремниевых микроэлектромеханических структур (МЭМС). МЭМС необходимы при создании широкой номенклатуры микроэлектронных датчиков физических величин для ракетно-космической техники и общепромышленного применения.

Введение

Стремительное развитие технологии микроэлектроники открывает широкие возможности оснащения современных изделий ракетно-космической, авиационной и гражданской техники новыми датчиками физических величин. Эти датчики являются основными элементами информационно-измерительных систем на различных этапах эксплуатации, отличающихся воздействием широкого диапазона температур, ионизирующих излучений и жестких электромагнитных помех. В связи с этим постоянно растут требования к устройствам сбора информации — датчикам и преобразователям физических величин.

Современный датчик должен иметь малые габариты и массу, высокую чувствительность, хорошую температурную стабильность и возможность предоставления выходной информации в цифровом виде. Используемые в настоящее время системы измерения физических величин базируются в основном на устаревших конструктивно-технологических решениях: потенциометрических, металлопленочных и фольговых тензорезисторах из сплавов металлов, применение которых ограничивает возможности улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик и обеспечения работоспособности в экстремальных условиях. В то же время в технике

широко применяются новые поколения датчиков физических величин, разработанных фирмами Kulite, Honeywell, Omega (США), Auxitrol (Франция), Druck (Великобритания) и др. на основе современных достижений микроэлектроники и микросистемотехники.

Перечисленные зарубежные фирмы для обеспечения высоких характеристик своих датчиков в качестве базовых технических решений применяют интегральный кремниевый чувствительный элемент с тензосхемой, выполненной на основе структуры «кремний – диэлектрик – кремний» [1], а также сверхтонких кремниевых и диэлектрических мембран, встроенных в датчики схем компенсации и обработки сигналов, интегральной микрообработки и микросборки объемных кремниво-стеклянных структур.

В ОАО «НИИФИ» накоплен богатый опыт по созданию микроэлектронных датчиков физических величин для ракетно-космической, авиационной техники и общепромышленного применения. В основу данных разработок заложены КТР объемных кремниевых микроэлектромеханических структур (МЭМС).

Типы микроэлектронных датчиков, созданных по МЭМС-технологиям, представлены в таблице.

Далее остановимся более подробно на технических решениях чувствительных элементов некоторых типов датчиков.

Тензорезистивные датчики избыточного давления

Основой чувствительного элемента датчика типа ДДЭ-060 является круглый плоский кремниевый кристалл, содержащий как интегральные тензорезисторы мостовой схемы, так и не воспринимающий давление терморезистор схемы компенсации ухода чувствительности. Кристалл сформирован по планарной технологии и закреплен в металлическом корпусе с помощью ситаллоцемента. На основе аналогичного решения созданы датчики для измерения давления до 300 МПа, когда толщина кремниевого кристалла составляет 700 мкм.

В основе датчика типа ДДЭ-097 — двухслойный кремниво-стеклянный элемент, сформированный анодным соединением и закрепленный в керамическом корпусе.

Микромеханическая структура чувствительного элемента датчика типа ДДЭ-082 представляет собой кремниво-стеклянный узел. В нем стеклянное основание с вплавленной металлической трубкой с помощью анодной посадки герметично соединено с планарной поверхностью кристалла через адгезионное кольцо из поликристаллического кремния, нанесенного на кристалл поверх высоколегированных коммутационных шин из p^+ -кремния, соединяющих тензорезисторы, находящиеся на мембране, и контактные площадки, находящиеся на периферии кристалла (рис. 1) [3].

Таблица. Типы микроэлектронных датчиков

МЭМС-датчики	Типы датчиков	Диапазоны измерений	Габариты, масса
Избыточного давления, тензорезистивные	ДДЭ-060, ДДЭ-073, ДДЭ-074, ДДЭ-081, ДДЭ-082, ДДЭ-084, ДДЭ-090, ДДЭ-096, ДДЭ-097, ДДЭ-114, ДДЭ-115, ДДЭ-116, ДДЭ-117, ДХП-096	0,01–300 МПа	∅3,5–36 мм, 5–130 г
Абсолютного давления, тензорезистивные	ДАЭ-099, ДАЭ-100, ДАЭ-101, ДАЭ-102, ДАЭ-103, ДАЭ-104	0,01–60 МПа	∅16 мм, 20–50 г
Абсолютного давления, емкостные	ЧЭ Э-024.001	0,05–1 МПа	5×5 мм
Линейного ускорения, тензорезистивные	АЛЭ-037, АВЭ-001, АВЭ-002, АВЭ-003, АВЭ-004	±(500–100 000) м/с ²	24×24×8 мм, 100 г
Линейного ускорения, емкостные	АЛЕ-049, АЛЕ-050, АЛЕ-056, АЛЕ-057, АЛЕ-058, АЛЕ-060	±(5,6–1200) м/с ²	35×35×22 мм, 75 г
Угловой скорости (гироскоп), емкостные	МВГ-11.039	100–1000 °/с	5×10 мм, 5 г
Частоты вращения, гальваномангнитные на магнитоде [2]	Вт 1855, ОМ-005, ОМ-006	60–40 000 об./мин	∅12 мм, 100 г
Деформации, тензорезистивные	ЕВ	±3000 мкм/м	5×5×0,05 мм



Рис. 1. Чувствительный элемент датчика типа ДДЭ-082

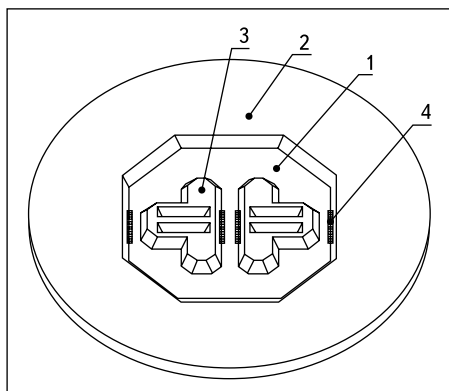


Рис. 2. Структура чувствительного элемента датчика: 1 — мембрана; 2 — утолщенное периферийное основание; 3 — концентраторы механических напряжений; 4 — тензорезисторы



Рис. 3. Чувствительный элемент датчика типа ДДЭ-116

Особенность датчика типа ДДЭ-116 — в его миниатюрности. Чувствительный элемент содержит профилированный кремниевый кристалл толщиной 100 мкм и диаметром 2,5 мм с мембраной, состоящей из утолщенного периферийного основания и профиля с концентраторами механических напряжений, представляющими собой сочетание утонченных участков и жестких центров (рис. 2).

Кремниевый кристалл соединен с помощью анодной посадки со стеклянным основанием (рис. 3).

Основные этапы изготовления кристалла датчика типа ДДЭ-116 [4]:

- формирование профилированной заготовки методом травления (пластина кремния с утонченной до 100 мкм центральной частью);
- формирование профилированной мембраны кристалла методом анизотропного травления;
- формирование термо- и тензорезисторов схемы методами диффузии и ионного легирования;
- плазмохимическое травление кремния во фторосодержащей среде до разделения пластины на круглые кристаллы с использованием защитной маски.

Тензорезистивные датчики абсолютного давления

В основе конструкции датчиков данного типа лежат чувствительные элементы, представляющие собой профилированный кристалл, соеди-

ненный со стеклянным основанием. При этом образуется герметичная вакуумированная полость опорного давления. Технология изготовления чувствительного элемента датчика абсолютного давления предусматривает групповое анодное соединение профилированной кремниевой и стеклянной пластин в вакууме с последующим разделением алмазными дисками на отдельные чувствительные элементы. Благодаря использованию групповой технологии удалось достичь минимальных размеров этих чувствительных элементов: до 1×1 мм (рис. 4).

Проведение анодного соединения возможно в условиях атмосферного давления, так же, как и в условиях вакуума.

Для реализации процесса анодного соединения необходимо удовлетворить следующие условия:

- Стекло должно обладать умеренными проводящими свойствами для обеспечения возникновения области объемного заряда.
- Температура должна быть достаточной для обеспечения точки размягчения.
- Металлическая оснастка не должна инжектировать носители заряда внутрь стекла.
- Шероховатость поверхности пластин должна иметь среднее квадратическое значение не более 1 мкм, а сама поверхность должна быть химически чистой.
- Пленка двуоксида кремния должна быть тоньше, чем 200 нм.
- Температурные коэффициенты материалов, подвергающихся анодной сварке, должны быть адекватны друг другу в пределах температурного диапазона проведения процесса.

Рассмотрим конструкцию чувствительного элемента, позволяющую поддерживать заданную долговременную стабильность степени вакуума в его полости.

Недостатком существующих чувствительных элементов датчиков абсолютного дав-

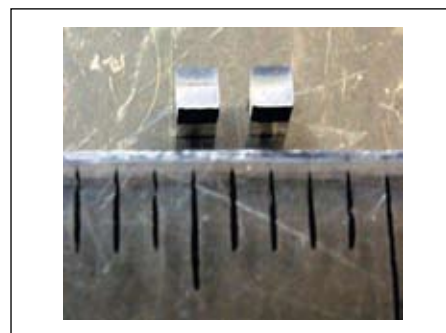


Рис. 4. Чувствительный элемент датчика абсолютного давления с габаритами 1×1 мм

ления является невозможность достижения степени вакуума в вакуумированной полости выше, чем 1×10^{-2} мм рт. ст. Это происходит вследствие сопровождающего процесс анодной сварки поджигания полированных поверхностей стекла и кремния в местах соприкосновения подложки и пластины, что способствует образованию вакуум-плотного барьера, не позволяющего обеспечить требуемую степень вакуума и ограничивающего возможности повышения чувствительности и расширения температурного диапазона преобразователя.

В процессе откачки газовой среды из рабочей камеры экспериментальным путем установлено, что после достижения в вакуумированной полости преобразователя давления 1×10^{-2} мм рт. ст. уменьшение значения давления в рабочей камере до 1×10^{-8} мм рт. ст. и увеличение времени выдержки преобразователя в ней, по крайней мере, до 4 часов не приводят к изменению давления внутри вакуумированной полости (рис. 5).

Образование вакуум-плотного барьера объясняется уменьшением зазора между стеклянной подложкой и кремниевой пластиной до значения, когда размер молекул

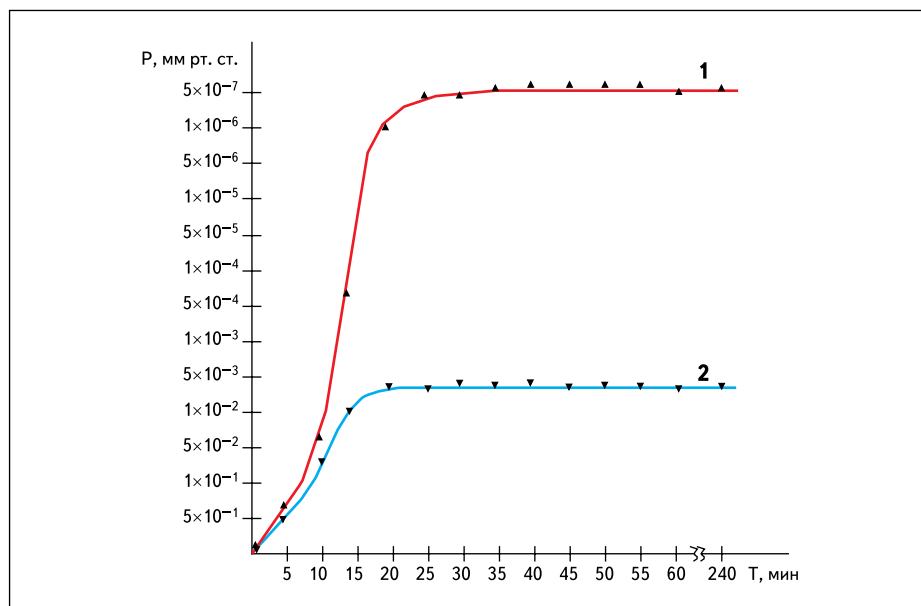


Рис. 5. Давление в рабочей камере (1) и вакуумированной полости (2) как функция времени

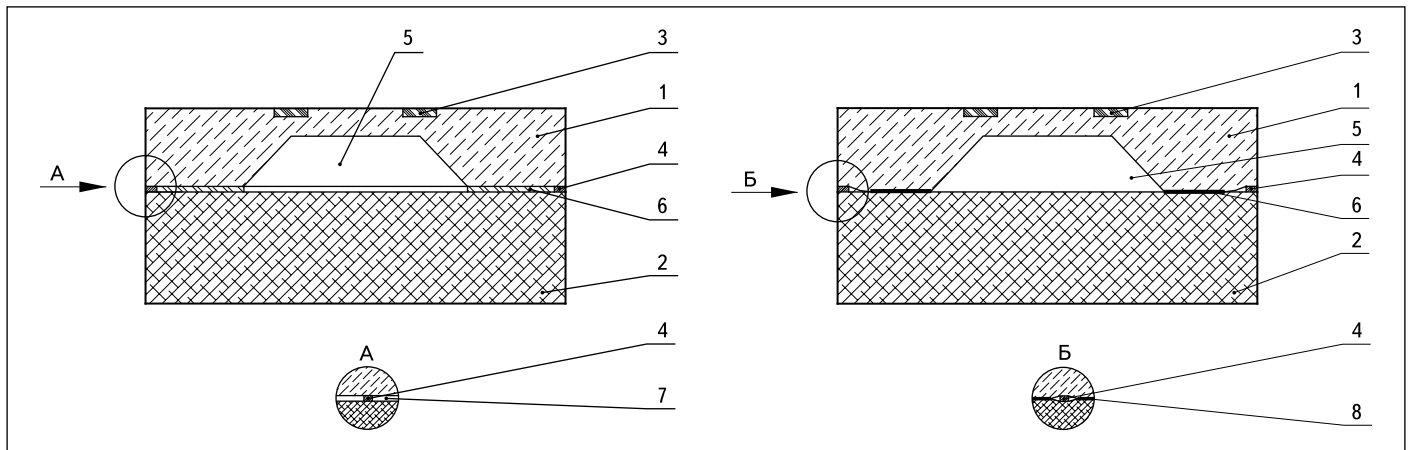


Рис. 6. Конструкция чувствительного элемента датчиков абсолютного давления: 1 — кремниевая пластина; 2 — стеклянная пластина; 3 — тензорезистивная схема; 4 — локальные выступы; 5 — вакуумная полость; 6 — площадь соединения; 7 — зазор; 8 — зона соединения

газовой среды в вакуумированной полости преобразователя становится больше, чем зазор. В этом случае давление в полости преобразователя определяется оставшимися молекулами газовой среды. Как уже было сказано, при откачке воздуха это значение составляет 1×10^{-2} мм рт. ст.

В процессе последующей анодной сварки, проводящейся при нагреве и механическом поджатии деталей, подключении к ним электрического потенциала 300–1000 В (положительный потенциал подается на кремниевую пластину), между кремниевой пластиной и стеклянной подложкой образуются связь типа ковалентной с энергией от 500 до 5000 кДж/моль. При этом сохраняется давление в вакуумированной полости преобразователя не ниже 1×10^{-2} мм рт. ст., что является неприемлемым для создания преобразователей давления на диапазоны измерения менее 1×10^{-2} мм рт. ст., а также создания преобразователей с широким температурным диапазоном. (При изменении температуры наличие остаточных молекул газовой среды, из-за ее температурного расширения в вакуумированной полости, вызовет прогиб мембраны со стороны, обратной измеряемому давлению, а значит, и воздействие на мостовую схему, что приведет к появлению доп. погрешности.) С целью исключения данного недостатка разработана конструкция чувствительного элемента датчиков абсолютного давления, представленная на рис. 6.

Особенностью чувствительного элемента является наличие локальных выступов 4 в пределах площади соединения кремниевой и стеклянной пластин. Данное решение позволяет путем исключения вакуум-плотного барьера достичь в вакуумированной полости степени вакуума до 1×10^{-8} мм рт. ст., то есть равной ее значению в рабочей камере. В процессе анодной сварки, благодаря прикладываемому электрическому потенциалу, образуется адгезионная сила F , которая пропорциональна поверхностной плотности за-

рядов двойного слоя и оценивается как сила притяжения обкладок заряженного плоского микроконденсатора [5]:

$$F = 2\pi\sigma^2 S,$$

где S — площадь контактирующих поверхностей, σ — удельный (на единицу площади) заряд обкладок двойного слоя, образующегося на этой площади. То есть для создания силы на единицу площади (квадратный метр) порядка $10^5 \dots 10^6$ Па (достаточного для физического контакта), необходим потенциал вполне конкретного порогового значения. Например, экспериментально установлено, что для закрытия щели, образованной локальными выступами объемом 1 мкм^3 (то есть имеющими размеры $1 \times 1 \times 1 \text{ мкм}$), между стеклянной подложкой и кремниевой пластиной площадью, в 10 раз превышающей общую площадь выступов, потенциал будет составлять значение 500 В, а время его воздействия на структуру — 4 мин. При этом между кремниевой пластиной и стеклянной подложкой образуется связь типа ковалентной с энергией от 500 до 5000 кДж/моль, а зона соединения между кремниевой пластиной и стеклянной подложкой практически равна по своим линейным размерам площади соединения (рис. 6).

Таким образом, наличие локальных выступов, сформированных на поверхности кремниевой пластины или стеклянной подложки в пределах площади их соединения, позволяет после проведения процесса анодной сварки достигать степени вакуума в вакуумируемой полости, равной степени вакуума в рабочей камере, вплоть до 1×10^{-8} мм рт. ст., за счет создания зазора, большего, чем размер молекул газовой среды внутри вакуумированной полости между соединяемыми деталями, и исключения вакуум-плотного барьера. Такое техническое решение в перспективе позволит создавать преобразователи давления с широким температурным диапазоном на диапазоны измерения до 1×10^{-8} мм рт. ст.

Емкостной акселерометр линейных ускорений

Основные этапы технологии изготовления чувствительного элемента акселерометра АЛЕ-049(050) (рис. 7) и его модификаций АЛЕ-056, АЛЕ-057, АЛЕ-058, АЛЕ-060 следующие:

- формирование двусторонним размерным травлением трехрельефной структуры кристалла (с величиной зазора 5 мкм);
- формирование металлизированных стеклянных плат;
- электростатическое соединение структуры «стекло – кремний – стекло» в едином цикле изготовления.

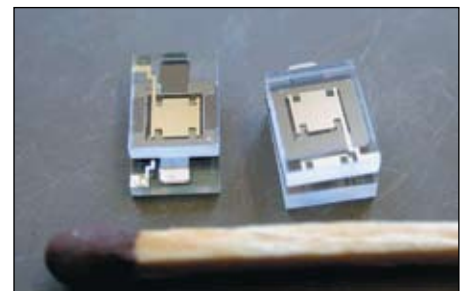


Рис. 7. Чувствительный элемент акселерометра типа АЛЕ-049

Датчик угловой скорости (гироскоп)

Гироскоп представляет собой конструкцию, включающую в себя (рис. 8):

- Инерциальную механическую плату чувствительного элемента, выполненную размерным травлением из монокристаллического кремния и содержащую две подвижные, подвешенные на консолях платы, являющиеся обкладками емкостных датчиков силы и положения. Для повышения чувствительности центральная плата содержит двусторонний вольфрамовый груз, присоединенный к кремнию диффузионной сваркой.

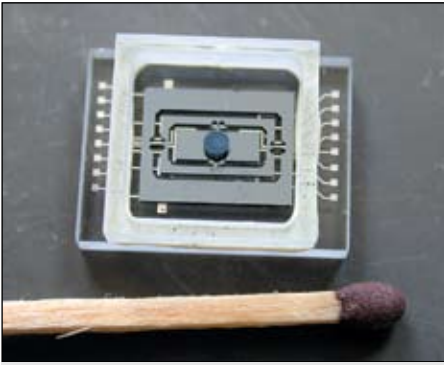


Рис. 8. Чувствительный элемент датчика угловой скорости

- Стекланную плату-основание, содержащую выполненные по технологии напыления и фотолитографии пленочные алюминиевые емкостные обкладки датчиков силы и положения и коммутационные шины, а также глухое отверстие для перемещения массы.
- Измерительный блок, содержащий сцентрированные по обкладкам емкостей датчиков механическую плату и плату-основание, которые соединены между собой методом электростатического соединения кремния и стекла.

В настоящее время изготовлены и испытаны экспериментальные образцы гиросъемных, ведутся работы по их доводке и практическому использованию [6].

Заключение

В результате проведенных работ по созданию микроэлектронных датчиков физических величин на основе МЭМС-технологий кремниевых микроэлектромеханических систем разработаны и освоены новые специальные технологические процессы:

- формирование прецизионным прямым травлением кремния многорельефных структур чувствительных элементов с минимальными размерами высоты рельефа до 2 мкм;
- ориентированное травление кремния в обеспечении формирования структурных элементов чувствительных элементов с вертикальными стенками;

- плазмохимическое травление кремния для профилирования и разделения кристаллов;
- формирование прецизионным травлением кремния X-образных элементов (консолей) в структуре чувствительного элемента;
- формирование методами гальванопластики технологических и конструктивных узлов чувствительных элементов;
- формирование методами легирования примеси и «стоп»-травления кремния элементов толщиной до 10 мкм с точностью $\pm 0,5$ мкм;
- создание кремниевых тензорезисторов толщиной 3–5 мкм на основе высоколегированных кремниевых слоев с одновременным формированием над тензорезисторами пленки двуокиси кремния, обеспечивающей их защиту от влияния окружающей среды;
- соединение кремниевых тензорезисторов с гибкой диэлектрической основой с применением клеев, обеспечивающего их групповое формирование;
- формирование встроенного в кремниевые тензорезисторы на основе высоколегированных слоев интегрального терморезистора из пленки поликристаллического кремния, имеющего противоположный по знаку температурный коэффициент сопротивления по сравнению с тензорезисторами и обеспечивающего температурную компенсацию и расширение функциональных возможностей в части измерения температур;
- формирование структуры чувствительного элемента (мембрана – диэлектрик – тензорезисторы), имеющей низкие механические напряжения в рабочем диапазоне температур в обеспечении минимальных изменений начального выходного сигнала;
- формирование многослойных кремниевостеклянных структур методом электростатического соединения;
- интегральная сборка чувствительного элемента с вакуумированными до 1×10^{-5} мм рт. ст. областями с обеспечением электрических гермовыводов из данных областей;
- групповое электростатическое соединение стеклокремниевых пластин с последующим разделением алмазными дисками на отдельные чувствительные элементы.

Дальнейшие работы по созданию микроэлектронных датчиков физических величин на основе МЭМС-технологий для ракетно-космической техники и общепромышленного применения направлены на достижение следующих основных характеристик:

- для акселерометров:
 - диапазон измеряемых линейных ускорений — 10–10 000 м/с²;
 - основная погрешность — 0,01–0,1 м/с²;
- для датчиков угловой скорости:
 - диапазон измеряемых угловых скоростей — 10–10 000 °/с;
 - основная погрешность — 0,01 %/с;
- для датчиков давления:
 - максимальная рабочая температура — 600 °С;
 - температурный уход чувствительности начального выходного сигнала — 0,01–0,05 %/°С;
 - долговременный дрейф основной погрешности — не более 0,1%/год;
 - возможность работы в агрессивных средах в диапазоне давления 5–10 МПа;
 - наличие двуполярной гальваноразвязки тензосхемы;
 - максимальная частота измеряемого переменного давления — 50 кГц;
 - минимальный диаметр датчика — 3 мм;
- для миниатюрных датчиков деформации:
 - коэффициент тензочувствительности — 10–50;
 - наличие встроенного в чувствительный элемент измерителя температуры. ■

Литература

1. Баринов И. Н. Полупроводниковые тензорезистивные датчики давления на основе КНД-структуры // Компоненты и технологии. 2009. № 5.
2. Баринов И. Н. Конструкция и некоторые результаты исследований магнитодиодов при воздействии температур широкого диапазона // Компоненты и технологии. 2009. № 1.
3. Патент RU 1459550.
4. Патент RU 2111576.
5. Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смилга В. П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973.
6. Патент RU 2207658.