

Анализ конструкций зарубежных прототипов датчиков давления

09, сентябрь 2011

авторы: Тиняков Ю. Н., Милешин С. А., Андреев К. А., Цыганков В. Ю.

УДК 531.781.2

МГТУ им. Н.Э. Баумана
Tinjakov48@mail.ru
sergey.mileshin@gmail.com
kost87@mail.ru
tsyganbow@mail.ru

Введение

В таких отраслях, как: космос, авиация, судостроение, теплоэнергетика, АЭС, коммунальное хозяйство, частично при добыче, транспортировке и переработке природных ископаемых, химическом производстве в России применяются устаревшие системы контроля параметров технологических процессов (в том числе и системы контроля давления), разработанные в восьмидесятих годах прошлого столетия.

Требуется переоснащение современными распределенными системами контроля и управления технологическими процессами [1-5]. Носителями информации о параметрах процесса являются датчики. В настоящее время ведущими мировыми производителями в качестве конструкционного материала в производстве датчиков используется объемный кремний. Кремний представляет собой материал с уникальными механическими характеристиками. Отсутствие гистерезиса, стойкость к перегрузкам на порядок больше, чем у сталей, возможность встраивания схемы обработки сигнала в кристалл чувствительного элемента идеально подходит для конструирования и производства преобразователей физических величин и датчиков.

Несмотря на то, что опыт по разработке и созданию кремниевых чувствительных элементов накопленный отечественными научно-техническими коллективами в течение предыдущих десятилетий, обеспечил прочный теоретический задел большинству существующих технологий, - в настоящее время российские научно-технические направления характеризуются заметным отставанием в области разработки и внедрения пионерских решений. Поэтому реализация проектов требует значительного объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских изысканий и привлечения организаций, владеющих необходимыми методами и технологическими возможностями по разработке датчиков на основе МЭМС.

1. Данные о методике исследования

Основой сенсора является чувствительный элемент, преобразующий механическую деформацию измерительной мембраны в электрический сигнал. Основным материалом для изготовления чувствительных элементов служит кремний и его соединения.

При изготовлении чувствительных элементов давления из монокристаллического кремния удаётся получать уникальные параметры изделий: простота конструкции, малые габариты и масса, высокая механическая прочность, очень высокая химическая стойкость, идеальная упругая характеристика, большой срок службы, стабильность электрофизических характеристик в течение длительного времени, высокие пьезорезистивные свойства кремния, превышающие по чувствительности остальные материалы более чем в 20 раз.

В связи с этим проведены исследования чувствительных элементов датчиков давления ведущих мировых компаний на предмет изучения конструкции и технологии изготовления чувствительных элементов, методов развязки чувствительных элементов от температурных и механических влияний корпусов датчиков.

При исследованиях применялись методы измерения давлений с помощью эталонных приборов, методы исследования топологий с помощью современной микроскопии, методы исследований состава материалов с помощью спектроскопии.

2. Экспериментальная часть, анализ, обобщение и разъяснение собственных данных.

2.1 Анализ существующих конструкций микродатчиков давления

В настоящее время разработано несколько способов преобразования давления в электрический выходной сигнал: тензорезистивный, ёмкостной, вибрационно-частотный, тензорезисторный.

Рассмотрим кратко суть и конструктивно-технологические способы реализации каждого из перечисленных методов.

2.1.1 Преобразование сигнала изменением ёмкости

Ёмкость можно изменить путём изменения электрического поля между двумя проводниками, образующими обкладки конденсатора. Одна из обкладок может находиться на мембране чувствительного элемента, а вместе они образуют конденсатор ёмкости (рис. 1).

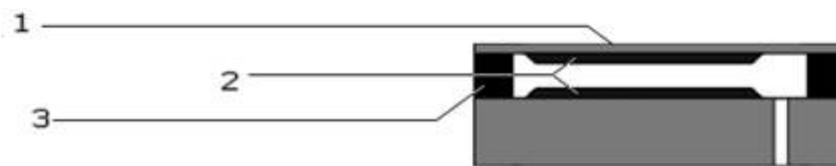


Рисунок 1 – Схема емкостного преобразователя
(1-мембрана, 2-обкладка конденсатора, 3-прокладка)

Ёмкостные датчики, благодаря высокой собственной частоте, можно использовать для измерения быстропеременных давлений.

К недостаткам данного метода следует отнести механическую усталость центральной мембраны, дрейф нуля из-за незаметного, но существенного для точных измерений перекоса сенсора.

2.1.2 Вибрационно-частотный способ преобразования

Действие струнных преобразователей давления основано на зависимости собственной частоты f поперечных колебаний балки (струны) от величины растягивающей её силы.

Приборы основанные на данном способе преобразования хорошо себя зарекомендовали, однако не получили дальнейшего развития из-за чувствительности к ударам, вибрации и низкой технологичности производства.

Технология выращивания кристаллических структур позволила японской фирмы Yokogawa реализовать принципиально новый частотно-резонансный сенсор Н-образной формы (рис. 2)

Две балки размером несколько десятков микрон, соединённые перемычкой и выполненные в виде единого монокристалла кремния. Одна из балок служит для возбуждения колебаний, а другая для регистраций. При подаче переменного напряжения и действия магнитного поля постоянного магнита в соответствии с принципом электромагнитной индукции балка начинает колебаться. Колебания через перемычку передаются на вторую балку, при этом на выходе возникает электродвижущая сила (ЭДС), которая усиливается и возвращается обратно на вход схемы, что приводит к саморезонансу (автоколебаниям) системы. Для повышения добротности колебаний и увеличения уровня выходного сигнала балка помещена в вакуумированную полость. Выходной величиной преобразователя является собственная частота колебаний балки, которая в случае кремниевого резонатора определяют всего два параметра: её масса, геометрические размеры, и форма. Масса резонатора измениться не может, а геометрические размеры и форма жёстко зафиксированы упругой кристаллической решёткой. Всё это в совокупности позволяет гарантировать стабильность характеристик во всём диапазоне рабочих условий.

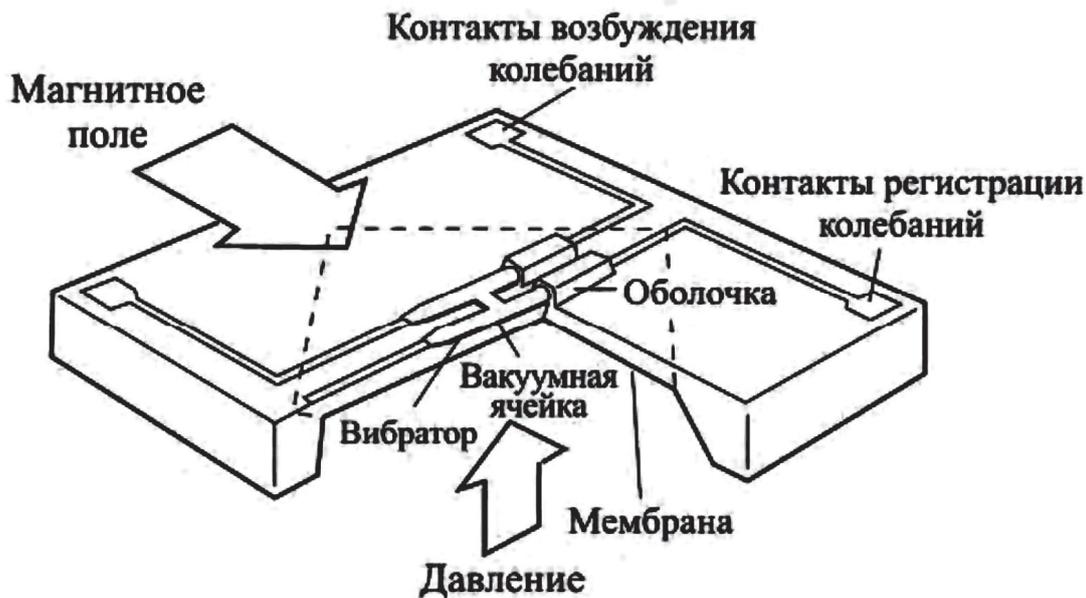


Рисунок 2 – Частотно резонансный сенсор

Преимуществом вибрационно-частотных преобразователей является повышенная точность (0,01 %), включая влияние нелинейности, повторяемости, гистерезиса) и стабильность выходного сигнала (0,1 % в течение 10 лет), высокая разрешающая способность: частотный сигнал может быть считан непосредственно микропроцессорным устройством.

Несмотря на то, что приборы, основанные на данном способе преобразования, хорошо себя зарекомендовали однако не получили дальнейшего развития из-за повышенной чувствительности к ударным нагрузкам, вибрации, что существенно ограничивает сферу внедрения этих датчиков в промышленности, транспорте, объектах энергетики, и низкой технологичности производства, что ведёт к высокой себестоимости изделия.

2.1.3 КНС преобразователи

В настоящее время основная масса датчиков давления в нашей стране выпускаются на основе чувствительных элементов, принципом которых является измерение деформации тензорезисторов, сформированных в эпитаксиальной плёнке кремния на подложке из сапфира (рис. 3), припаянные твёрдым припоем к титановой мембране. Принцип действия тензопреобразователей основан на явлении тензоэффекта в кремнии. Чувствительным элементом служит сапфировая подложка с гетероэпитаксиальными тензорезисторами, подложка крепится к титановой мембране слоем припоя. Под действием давления измеряемой среды мембрана прогибается, тензорезисторы меняют своё сопротивление, что приводит к разбалансу моста Уитстона. Разбаланс линейно зависит от степени деформации

резисторов и, следовательно от приложенного давления. Следует отметить принципиальное ограничение КНС преобразователя - неустранимую временную нестабильность градуировочной характеристики и существенные гистерезисные эффекты от давления и температуры.

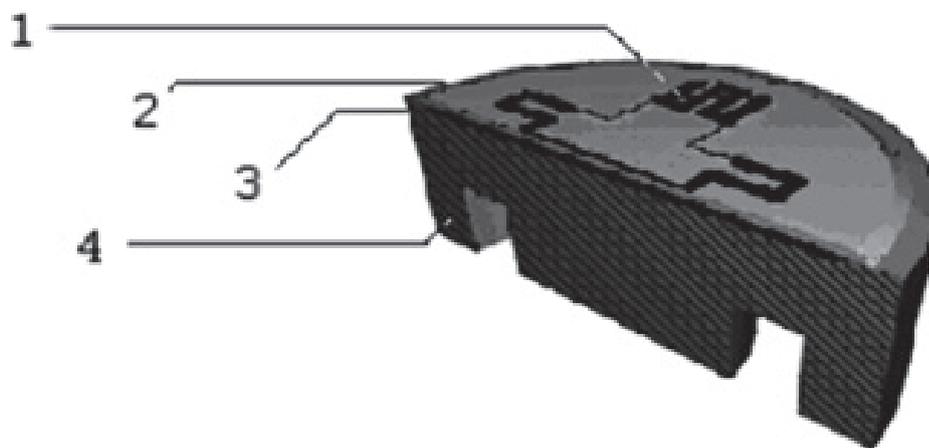


Рисунок 3 –КНС тензорезистивный преобразователь
(1-тензорезисторы, 2- сапфировая подложка, 3-серебросодержащий припой, 4-титановая мембрана)

2.1.4 КНК преобразователи

В отличие от КНС, КНК (кремний на кремнии) представляет собой монокристаллическую структуру, мембрана которой формируется химическим травлением кремния. На рис 4 представлен кремниевый ЧЭ (элемент датчика давления).

На лицевой стороне кремниевой пластинки 2, имеющей квадратную форму, формируются четыре тензорезистора p -типа проводимости сформированные диффузией бора и изолированные от подложки большим сопротивлением p - n перехода. Тензорезисторы токоведущими дорожками 3 объединены в мостовую схему.

В этой конструкции тензорезисторы и упругая мембрана сформированы в одной в единой монокристаллической структуре без применения клеев и припоев. Такая структура обладает стабильными характеристиками. Поэтому все высокоточные датчики давления ведущих мировых производителей изготавливаются из кремния. В таблице 1 показаны основные характеристики датчиков давления

Такие характеристики достигаются применением кремниевого чувствительного элемента с инплантированными резисторами и мембраной которая формируется химическим травлением.

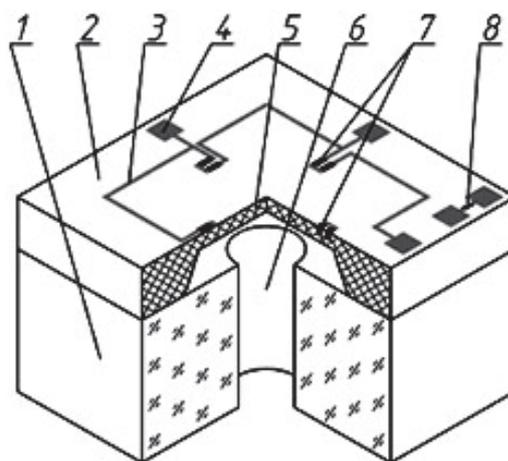


Рисунок 4 - Конструкция кремниевого (КНК) тензорезисторного преобразователя (1 – стеклянное основание, 2 – кремниевый кристалл; 3 – алюминиевая дорожка, 4 – контактная площадка, 5 – мембрана, 6 – отверстие для подвода давления, 7 – тензорезисторы, 8 – датчик температуры)

Таблица 1 - Основные параметры МЭМС датчиков избыточного давления

| Показатель | Значение |
|-----------------------------|--|
| Рабочий диапазон давлений | 10 ÷ 60 МПа |
| Рабочий диапазон температур | -50 ÷ + 85 °С |
| Основная погрешность | 0,1 % |
| Выходной сигнал | 4 ÷ 20 мА |
| Защита от перегрузки | 100 раз по отношению рабочему давлению |
| Долговременная стабильность | 0.1 % в течении пяти лет |
| Питание | 9-36 В |

3. Анализ конструкций и технологии изготовления чувствительных элементов датчиков давления ведущих мировых производителей

Характеристики датчиков давления компаний ABB, Siemens, Honeywell представлены в таблице 2. Как видно из таблицы 2, датчики давления этих компаний обладают высокой долговременной стабильностью. Такие датчики не требуют обслуживания в течении нескольких лет.

Исследования проводились с целью изучения конструкции и технологий изготовления чувствительных элементов. Для дальнейшего использования некоторых технических решений при проектировании отечественных датчиков давления.

Таблица 2 – Характеристики датчиков давления

| Характеристики | ABB 265 DS | Сименс | Ханивел |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Рабочий диапазон давления | 4 кПа ÷ 60 МПа | 0,1 ÷ 100 МПа | 0,25 ÷ 100 МПа |
| Рабочий диапазон температур | -40 ÷ +80 °С | -40 ÷ +70 °С | -40 ÷ +80 °С |
| Основная погрешность | 0,07 % | ±0,1 % | 0,04 % |
| Выходной сигнал | 4 ÷ 20 мА | 4 ÷ 20 мА | 4 ÷ 20 мА |
| Защита от перегрузки | 10 раз | 10 раз | 10 раз |
| Долговременная стабильность | 0.1 % в течении пяти лет | 0.1 % в течении пяти лет | 0.1 % в течении пяти лет |

Чувствительный элемент датчика давления (рис. 5) представляет собой кремниевый кристалл в котором сформирована мембрана методом анизотропного травления. На мембране сформирован тензомост из диффузионных тензорезисторов.

Кремниевый кристалл чувствительного элемента датчика давления представляет собой подложку п-типа, на которой диффузией бора сформированы тензорезисторы с поверхностным сопротивлением 150 Ом на квадрат. На рисунке 6 показана фотография диффузионного тензорезистора.

Тензорезистор 2 отделен областью диффузии бора 1 с поверхностным сопротивлением 15 ом на квадрат от подложки, с целью уменьшения токов утечки между тензорезисторами измерительного моста.

На рисунке 6 показана защита от механических и тепловых воздействий корпуса. Для защиты от механических и тепловых воздействий корпуса и платы, чувствительный элемент 1 через эвтектический сплав 2 посажен на кремниевую подложку 3.

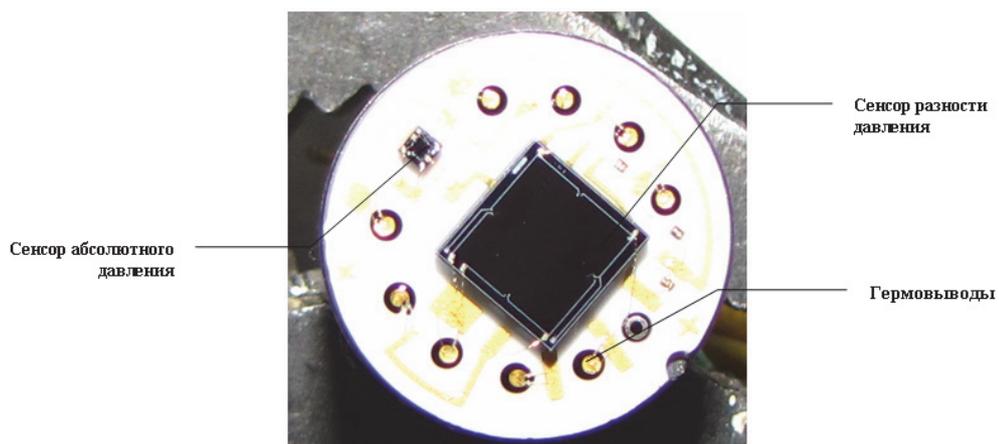


Рисунок 5 - Чувствительный элемент датчика 265DS компании АВВ

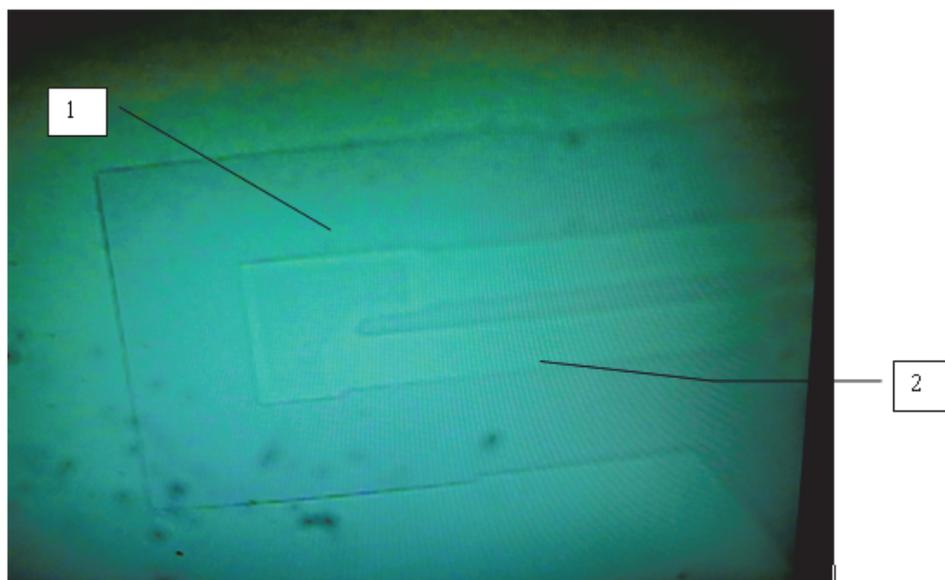


Рисунок 6 - Фрагмент диффузионного тензорезистора датчика давления 265 DS

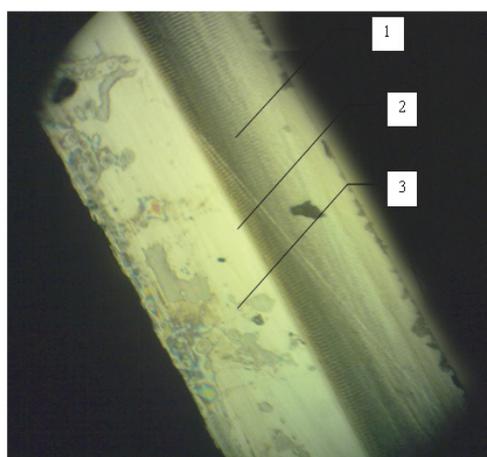


Рисунок 7 - Защита от механических и тепловых воздействий корпуса

Кремниевый кристалл чувствительного элемента датчика давления закрепляется на керамической плате 1. Керамическая плата имеет коэффициент термического расширения близкий к кремнию. Электрические выводы 2 для съема сигнала развариваются на герметичные выводы 3. В качестве датчика температуры используется платиновый терморегулятор.

Фотография кристалла чувствительного элемента датчика давления SITRANS P DS III компании Сименс приведена на рисунке 8.

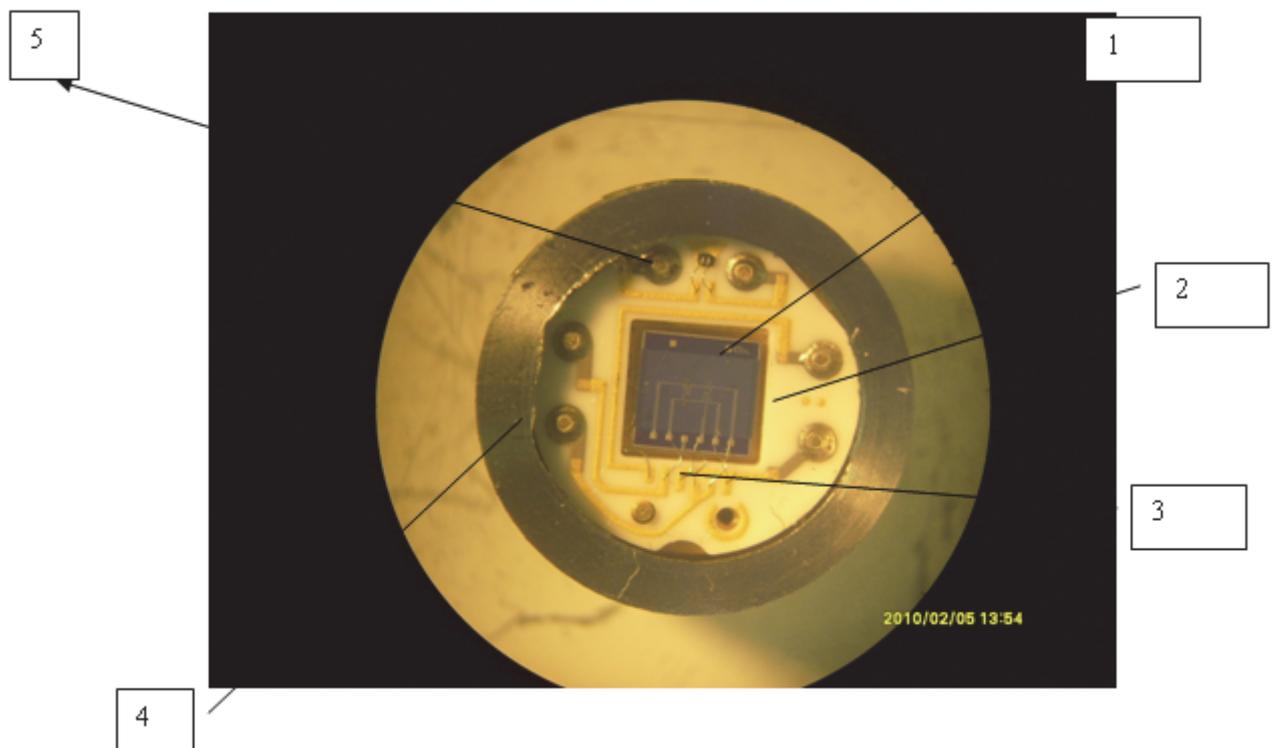


Рисунок 8 -- чувствительный элемент датчика давления SITRANS P DS III.

Чувствительный элемент датчика давления представляет собой кремниевый кристалл в котором сформирована мембрана методом анизотропного травления. На мембране выполнен тензомост из диффузионных тензорезисторов.

Кремниевый кристалл чувствительного элемента датчика давления представляет собой подложку p-типа, на которой диффузией бора сформированы тензорезисторы с поверхностным сопротивлением 150 Ом на квадрат.

Защита с целью уменьшения токов утечки между тензорезисторами измерительного моста областью диффузии бора 1 с поверхностным сопротивлением 15 Ом на квадрат не предусмотрена.

Кремниевый кристалл чувствительного элемента датчика давления 1 закрепляется на керамической плате 2. Электрические выводы 3 для съема сигнала развариваются на герметичные выводы 4.

Рисунок 9 иллюстрирует защиту от механических и тепловых воздействий корпуса. Для защиты от механических и тепловых воздействий корпуса и платы, чувствительный элемент 1 через эвтектический сплав 2 посажен на кремниевую подложку 3.

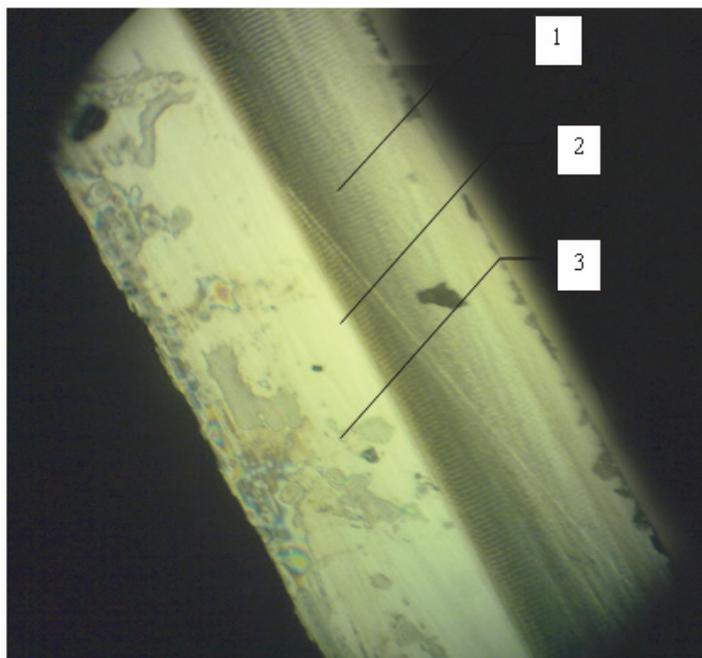


Рисунок 9 - Защита от механических и тепловых воздействий корпуса

Фотография кристалла чувствительного элемента датчика давления STD 924 фирмы ХАНИВЕЛ приведена на рисунке 10.

На рис. 11 представлена топология кристалла чувствительного элемента датчика давления STD 924, где тензорезисторы 1 располагаются по краям круглой мембраны сформированной плазмохимическим травлением. Вне зоны деформации мембраны располагается датчик температуры в виде диффузионного резистора. На периферии кристалла располагаются контактные площадки.

Кремниевый кристалл чувствительного элемента датчика давления представляет собой подложку p-типа, на которой диффузией бора сформированы тензорезисторы с поверхностным сопротивлением 150 Ом на квадрат.

Защита с целью уменьшения токов утечки между тензорезисторами измерительного моста областью диффузии бора 1 с поверхностным сопротивлением 15 Ом на квадрат не предусмотрена.

Следует подчеркнуть, что датчик температуры располагается на кристалле чувствительного элемента.

Датчик температуры представляет собой диффузионный резистор сформированный диффузией бора с уровнем поверхностного сопротивления 2000 Ом на квадрат. Такой температурный резистор имеет линейную характеристику в диапазоне температур -60 + 125 °С.

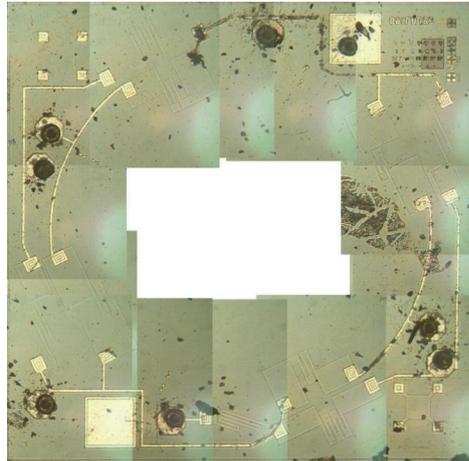


Рисунок 10 - Фотография кристалла чувствительного элемента датчика давления STD 924 фирмы ХАНИВЕЛ

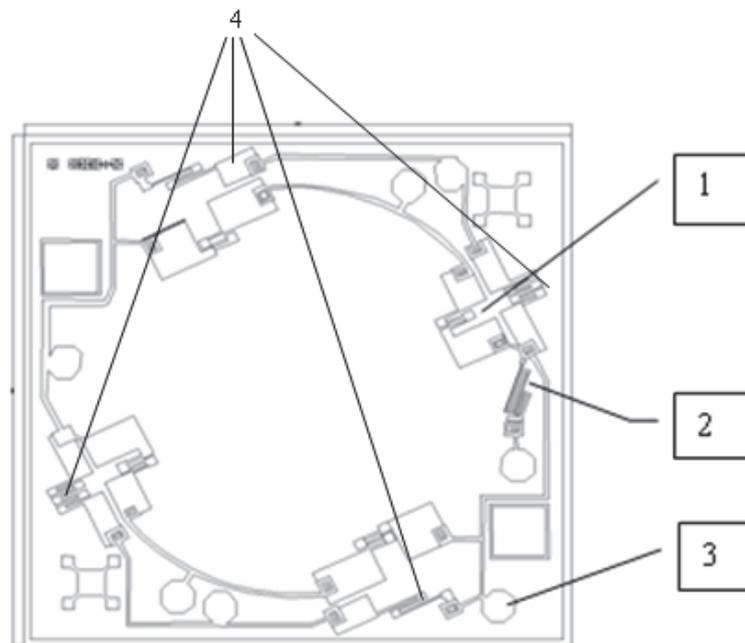


Рисунок 11 - Топология кристалла чувствительного элемента датчика давления STD 924 фирмы ХАНИВЕЛ (где 1-тензомост, 2-тензорезистор, 3-контактные площадки, 4-тензомост для компенсации двустороннего сжатия)

Применение технологии плазмохимического травления при формировании круглой мембраны является новым методом микрообработки кремния, все остальные фирмы

производящие кремниевые датчики давления используют анизотропное травление для формирования мембран. Технология плазмохимического травления позволяет упростить процесс формирования мембран, исключив трудоемкий техпроцесс нанесения маски из нитрида кремния.

Развязка чувствительного элемента датчика давления STD 924 для защиты от механических и тепловых воздействий корпуса представлена на рисунке 12. Где кристалл чувствительного элемента 1 соединен с стеклянной пластиной 2 методом анодной посадки.

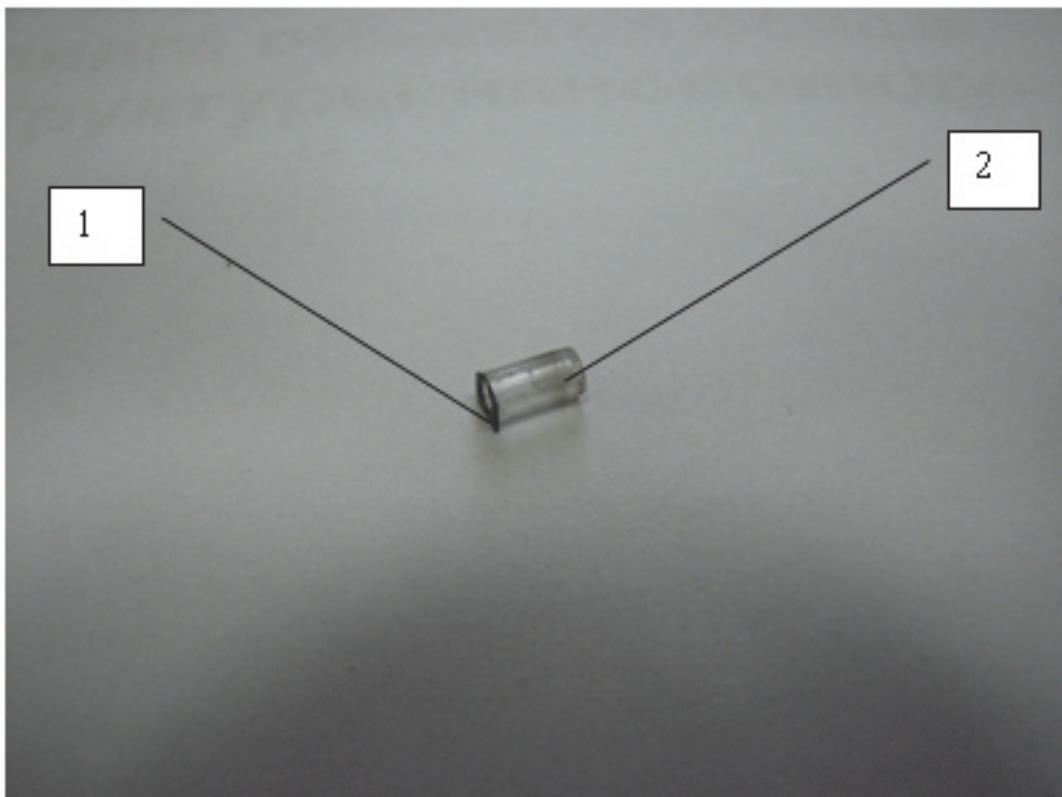


Рисунок 12 - Кристалл чувствительного элемента датчика давления STD 924 соединенный со стеклом анодной посадкой

Использование стеклянного основания для защиты чувствительного элемента для защиты от механических и тепловых воздействий корпуса является эффективным и высокотехнологическим методом развязки от влияния корпуса.

Следует обратить внимание что толщина стекла составляет 8 мм. Используется стекло 7740, коэффициент термического расширения которого совпадает с коэффициентом термического расширения кремния.

Такая конструкция позволяет избавиться от трудоемкой технологии соединения эвтектическим сплавом кремниевых пластин и керамической подложки. Особенностью кристаллов ЧЭ датчика давления STD924 является наличие 2-го тензомоста, расположенного вне зоны мембраны. Он применяется в датчиках разности давления для компенсации

деформаций, возникающих на границе кремний-стекло при действии давления с 2х сторон на ЧЭ, посаженного на стекло. Деформации возникают из-за различных модулей Юнга у кремния и стекла.

Выводы

1. Ведущие мировые производители датчиков давления используют в качестве материала для изготовления чувствительных элементов кремний.

2. Ведущие мировые производители датчиков давления используют кремниевые чувствительные элементы с тензомостом из диффузионных резисторов.

3. Технология плазмохимического травления позволяет упростить процесс формирования мембран.

4. Развязка чувствительного элемента для защиты от механических и тепловых воздействий корпуса может производиться как через кремниевую пластину, соединение эвтектикой, так и через стеклянную пластину, соединение анодной посадкой.

5. Соединение анодной посадкой позволяет упростить конструкцию датчиков, исключив эвтектическое соединение кремниевых пластин и промежуточную керамическую плату.

Результаты исследований, приведенные в статье, получены в процессе выполнения НИР «Исследование и разработка методов интегрирования наноструктурированных материалов и кремния и создание экспериментальных образцов микроэлектромеханических малогабаритных реактивных двигателей и датчиков давления для управления и контроля системами и агрегатами космических аппаратов» по ГК № 16.513.11.3053 в рамках мероприятия 1.3 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

Список литературы

1. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
2. Материаловедение: учебник для высших технических заведений /Арзамасов Б.Н. [и др.] М.: Машиностроение, 1986. 384 с.
3. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах / Аш Ж. [и др.] М.: Мир, 1992. 424 с.
4. Березин Г.Н., Никитин А.В., Сурис Р.А. Оптические основы контактной фотолитографии // Массовая библиотека инженера Электроника, вып. 33. М.: Радио и связь, 1982. 104 с.
5. Бургер Р., Донован Р. Окисление, диффузия, эпитаксия. М.: Мир, 1969. 452 с.