

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЭМС: ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЯЕТ ПАРАМЕТРЫ

Параметры микроэлектромеханических приборов и систем (МЭМС) зависят не только от конструкции, но и от выбора материалов и технологии, которые используются для их получения. Оптимизация стандартного технологического процесса изготовления МЭМС дает возможность снизить погрешности процесса и улучшить характеристики устройств.

Основным материалом для чувствительных элементов (ЧЭ) МЭМС является кремний [1]. Важнейшие детали конструкций микросистем, размеры которых составляют доли миллиметра, изготавливаются методами поверхностной и объемной микрообработки. Под микрообработкой понимается формирование трехмерных малоразмерных структур внутри кремниевой подложки или на ее поверхности. Метод анизотропного травления (АТ) кремния позволяет не только формировать рабочие зазоры вибрационных систем МЭМС путем травления трапециевидных профилей, но и создавать разнообразные объемные фигуры травления, такие как, например, торсионы (рис.1).

В микромеханике, наряду с кремнием, применяются и другие материалы: стекло, металлы, сплавы металлов, полимеры и т.д. [2]. Сегодня в некоторых конструкциях МЭМС используются микроструктуры из толстых металлических пленок. Толстые пленки применяются также для шаблонов при изготовлении деталей из керамики и полимеров.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Алгоритм технологического процесса (ТП) изготовления чувствительных элементов приведен на рис.2. Рассмотрим некоторые его особенности.

В создании прокладок и статорной пластины применяют типовые технологические процессы микроэлектроники, доработанные с учетом специфики производства элементов МЭМС. Для изготовления статорной пластины используют стеклянные пластины ЛК-105. Коэффициент линейного расширения стекла $2,0-2,6 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, кремния – $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Таким образом, достигается максимальная согласованность коэффициентов тер-

С.Тимошенко, д. т. н.; А.Бойко, к. т. н.;
Б.Симонов, к. т. н.

мического линейного расширения в рабочем температурном интервале. Чтобы улучшить адгезию слоя металлизации на статорной пластине к стеклу, применяют подслои висмута.

Роторный узел и прокладка изготавливаются на пластине монокристаллического кремния КЭФ 4,5(100) диаметром 150 мм и толщиной 300 мкм. Процесс получения роторного узла включает в себя формирование двухсторонних меток совмещения и последующий прецизионный процесс анизотропного локального травления кремния через маску из нитрида кремния одновременно с обеих сторон пластины.

В процессе производства микромеханических приборов приходится формировать детали различного профиля, в том числе сквозные отверстия, а также объемные фигуры травления. При этом к качеству и точности размеров формируемых областей предъявляются жесткие технические требования.

Для создания чувствительных элементов МЭМС применяется метод анизотропного травления кремния [3]. При травлении в качестве маскирующих покрытий используются слои нитрида кремния (Si_3N_4) и двуокиси кремния (SiO_2). Нанесение и обработка слоев Si_3N_4 и SiO_2 производятся на типовом технологическом оборудовании.

Травитель для анизотропного травления – водный раствор КОН – обеспечивает не только высокое качество, но и высокую скорость этого процесса. Низкая скорость травления кристаллографических плоскостей (111), выполняющих в процессе функцию стоп-слоев, обычно позволяет достичь высокого качества фигур травления, ограниченных этими плоскостями. Состав травителя и режим травления влияют на появление различных дефектов.

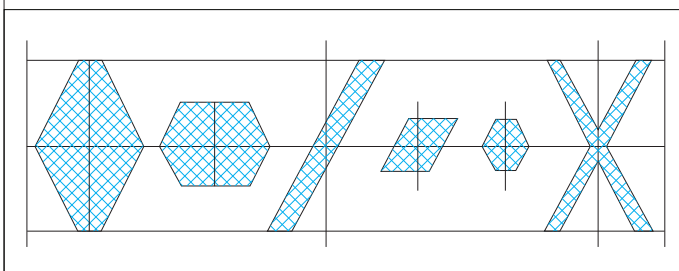


Рис.1. Возможные сечения конструкций торсионов, формируемых методом жидкостного анизотропного травления кремния

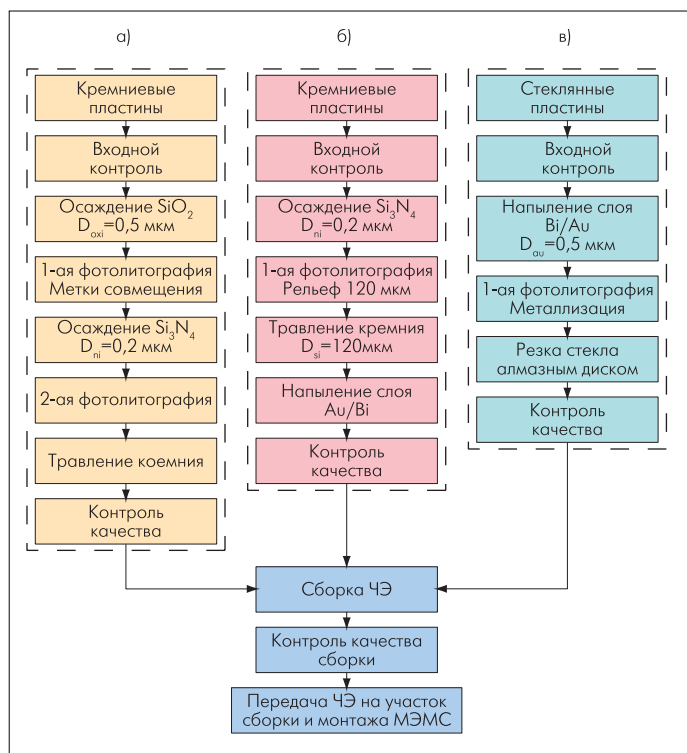


Рис.2. Алгоритм ТП изготовления чувствительного элемента МЭМС. Изготовление роторного узла (а), прокладки (б) и статорной пластины (в)

Для изготовления ключевых элементов конструкций МЭМС необходимы оптимальные (с точки зрения числа потенциальных дефектов различного рода) конструкция, ограниченная плоскостями (111), состав травителя и режим травления.

Наилучшее качество травления кремния как с плоскостью (111), так и с плоскостью (100) обеспечивает водный раствор КОН с концентрацией 33% при температуре $92 \pm 2^\circ\text{C}$. Скорости травления кремния для различных кристаллографических плоскостей составляют: $V_{100}=188$ мкм/ч; $V_{110}=282,5$ мкм/ч; $V_{111}=4,8$ мкм/ч, скорость травления оксидной пленки – $V_{\text{ок}}=0,92$ мкм/ч.

По разработанной технологии (в соответствии с показанным на рис.2 алгоритмом) был изготовлен чувствительный элемент микромеханического вибрационного гироскопа (рис.3).

МОНТАЖ ЭЛЕМЕНТОВ В КОРПУС

Крепление микромеханической и электронной частей МЭМС к основанию корпуса требует тщательной подготовки и является самостоятельной задачей, так как ошибки в позиционировании, даже незначительное смещение кристалла от заданного положения, могут привести к нарушению работы прибора. Соединяемые материалы крепления должны иметь минимальную разницу значений коэффициентов термического линейного расширения. Рассогласование коэффициентов термических расширений конструктивных материалов микромеханического элемента и подложки вызывает механические напряжения в структуре устройства и снижает его надежность [4].

Кремниевый чувствительный элемент, устанавливаемый на стеклянной плате-основании, представляет собой чип.

Был опробован способ посадки чипа в корпус с помощью популярного в микроэлектронике клея ВК-9, обладающего высокими механической прочностью и адгезионной способностью, стабильностью электроизоляционных свойств в интервале рабочих температур (удельное объемное сопротивление не менее 10^{14} Ом·см, $\text{tg } \delta \leq 1 \cdot 10^{-3}$). Несмотря на положительные результаты испытаний тестовых образцов, для широкого применения в процессах изготовления МЭМС этот клей рекомендовать сложно вследствие газовыделения клея внутри герметичного объема, особенно заметного при повышенных температурах, а также из-за сложности посадки в корпус групповым способом.

Хорошие результаты показал метод монтажа чипа в корпус с помощью пайки. Методом пайки с легкоплавким припоем ПОИ-50 стеклянная плата чипа надежно крепится к основанию корпуса. Первый этап процесса соединения – термическое испарение металлических слоев на поверхность стеклянной платы и на основание корпуса. На поверхность стеклянной платы последовательно напыляются: подслой ванадия толщиной $\sim 200 \text{ \AA}$, слой меди $\sim 0,8$ мкм, слой припоя. На поверхность основания корпуса наносят слой припоя. Затем основание корпуса устанавливают на нагреватель, на слой металлизации наносят припой ПОИ-50 в виде порошка. На порошок устанавливают чип и при помощи специальной оснастки легко прижимают его к основанию корпуса, одновременно совмещая чип с плоскостью основания (рис.4).

Сборочный узел нагревается в вакууме до температуры плавления припоя ПОИ-50 ($T_{\text{пл}}=120^\circ\text{C}$), затем плавно охлаждается до комнатной температуры. Качество пайки контролируется путем приложения усилия на сдвиг величиной ~ 1 кгс к боковой поверхности чипа. Основные параметры операции посадки чипа на основание корпуса с помощью припоя: температура – $125 \pm 5^\circ\text{C}$ и время соединения – 15 ± 5 с.

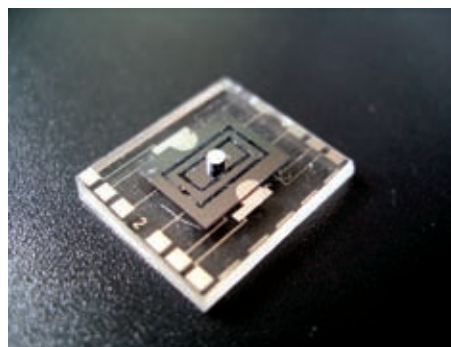


Рис.3. Чувствительный элемент микромеханического вибрационного гироскопа

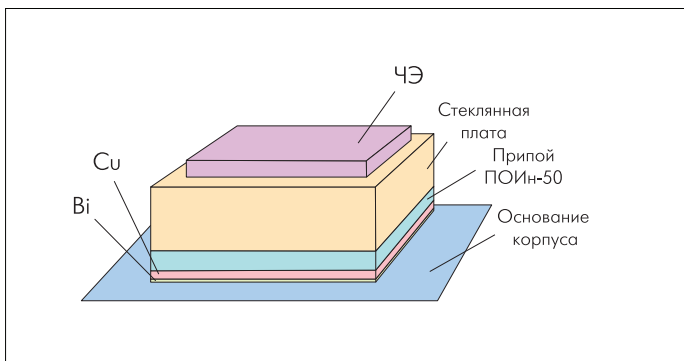


Рис.4. Схема расположения деталей при посадке чипа на основание корпуса с помощью припоя

К важнейшим параметрам чувствительных элементов МЭМС относятся собственная частота колебаний и добротность (особенно для гироскопов).

Для измерения параметров и характеристик МЭМС и исследования влияния на эти параметры различных технологических и эксплуатационных воздействий применяются специальные схемы (рис.5).

Запись выходных сигналов микромеханических датчиков производится с помощью специализированной цифровой платы сбора и обработки данных L-Card, пакетов стандартных программ для ЭВМ Lab-View, Matlab, а также разработанного специального программного обеспечения. Используют также метод расчета добротности, основанный на измерении времени затухания свободных колебаний, которые возникают после кратковременного воздействия на колебательную систему возбуждающего импульса.

Кроме того, было исследовано влияние давления газовой среды на добротность чувствительного элемента гироскопа и температуры на собственную частоту колебаний гироскопа.

Добротность измеряли по специальной методике в диапазоне давлений газовой среды, в которой функционировал чувствительный элемент, $p = 8 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Из полученной зависимости можно определить необходимую степень вакуума внутри корпуса прибора, прогнозировать изменение чувствительности при длительном хранении и эксплуатации. Добротность ЧЭ микрогироскопа изменяется в достаточно широких пределах в указанном диапазоне давлений газовой среды. При повышении давления до $8 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. добротность колебательной системы стано-

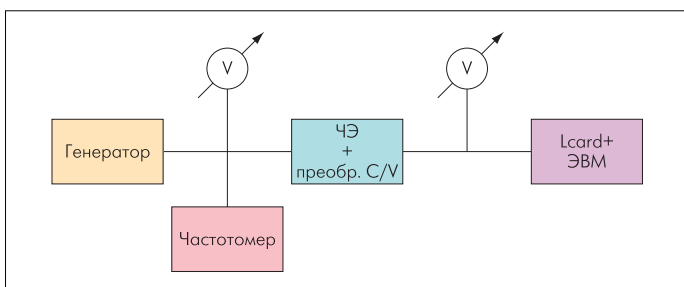


Рис.5. Схема блока для измерения добротности и собственной частоты колебаний чувствительных элементов МЭМС

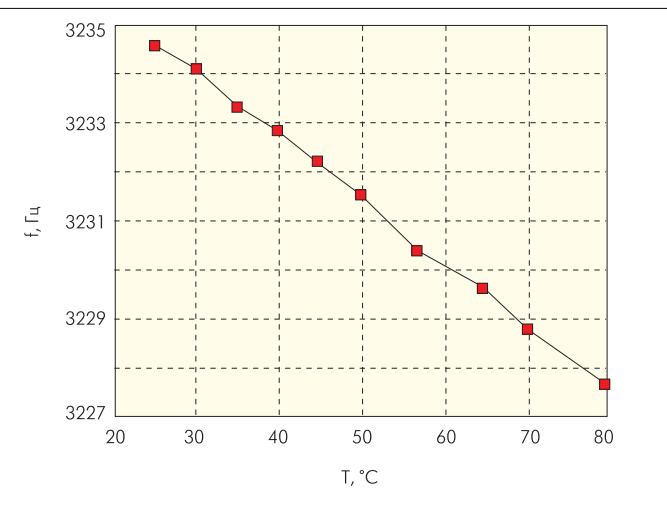


Рис.6. Зависимость собственной частоты колебаний чувствительного элемента микрогироскопа от температуры

вится равной нулю, и гироскоп полностью теряет свои функциональные свойства.

Влияние температуры на собственную частоту колебаний чувствительного элемента микромеханического гироскопа представлено на рис.6.

Если добротность ЧЭ гироскопа – более 5000 отн. ед. ширины полосы пропускания АЧХ становится равной ~2 Гц и менее. При нагреве образца от 24 до 80°C изменение частоты собственных колебаний ЧЭ гироскопа составляет ~8 Гц (см. рис.6), что гораздо больше ширины полосы пропускания АЧХ. Это недопустимо при работе ЧЭ гироскопа на резонансной частоте и требует схемотехнических решений, компенсирующих изменение собственных частот колебаний ЧЭ при нагреве или охлаждении прибора.

Опытные образцы микромеханических гироскопов имеют следующие характеристики: частота собственных колебаний ЧЭ – 1700–3500 Гц; масштабный коэффициент – 50–70 мВ/(угл.град./с); диапазон измеряемых угловых скоростей – 100–1000 угл.град./с; акселерометры: диапазон измеряемых ускорений – 1–10 g; полоса пропускания – 50, 100 Гц; масштабный коэффициент – 1,2 В/g.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – Тула: Изд-во Тульского государственного университета, 2002. – 392 с.
2. Пятнышев Е.Н., Лурье М.С., Попова И.В., Казакин А.Н. Специфика технологии микроэлектромеханических устройств. – Микросистемная техника, 2001, №6, с. 32–35.
4. Бродай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 496 с.
4. Тимошенко С.П., Бойко А.Н., Калугин В.В. Особенности герметизации микромеханических приборов. – Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России, 2005, №1, с. 24–27.

