

МЭМС-датчики Murata: инновационные технологии для точных измерений

В. Ежов

УДК 681.586 | ВАК 05.27.00

Следуя своему девизу *Innovator in electronics*, компания Murata Manufacturing предлагает инновационные технологические решения в различных областях: от керамических конденсаторов и индуктивностей до радиочастотных модулей и силовых устройств. Среди продукции компании особое место занимают МЭМС-датчики – акселерометры, гироскопы и инклинометры, которые отличаются высокой точностью, стабильностью и надежностью. На выставке *electronica 2018*, прошедшей в ноябре прошлого года в Мюнхене, Murata представила новые решения в области МЭМС-устройств для мониторинга состояния конструкций и сооружений, автомобильных систем безопасности и медицинских приборов. Рассмотрим особенности МЭМС-технологии компании Murata, перспективные области применения и новинки, предложенные компанией.

В МЭМС-датчиках Murata применяется простой и надежный принцип емкостного детектирования, основанный на измерении емкости, которая меняется при колебании проводящих тел внутри устройства. Например, основные элементы акселерометров – пружина, чувствительная масса и опора. Пружина соединяет массу с опорой. При изгибе пружины в результате движения датчика расстояние между телом и чувствительной массой меняется пропорционально ускорению. При уменьшении расстояния емкость повышается, и электрический ток протекает по направлению к датчику, а когда расстояние увеличивается – наоборот. Таким образом, датчик преобразует ускорение тела в электрический ток.

Благодаря высоким характеристикам МЭМС-датчиков, основанных на технологии емкостных измерений, устройства оптимально подходят для детектирования даже небольших изменений в движении. Чувствительный элемент МЭМС-датчиков Murata изготовлен из монокристаллического кремния и стекла. Это обеспечивает датчику высокую надежность, точность, стабильность во времени и при изменении температуры. Как правило, чувствительный элемент способен выдерживать ускорение более 50 000g.

Из-за недостаточно продуманной конструкции МЭМС-датчики зачастую уязвимы для паразитных сигналов, вызванных вибрацией при эксплуатации прибора. Благодаря инновационной конструкции МЭМС-датчики Murata виброустойчивы, невосприимчивы к паразитным сигналам, их параметры отличаются высокой стабильностью. Устройства защищены от воздействия атмосферных явлений силиконовым гелем, что обеспечивает высокую надежность в условиях влажной окружающей среды и при циклическом изменении температуры. Кроме того, прочный чувствительный элемент с частотной характеристикой со

сверхкритическим затуханием обеспечивает высокие характеристики в жестких условиях эксплуатации. Симметричная конструкция чувствительных элементов датчиков позволяет улучшить линейность этих устройств.

Высокие характеристики датчиков Murata достигаются в первую очередь благодаря применению технологии 3D MEMS, впервые внедренной финской компанией VTI Technologies, которая в 2012 году была приобретена компанией Murata. Сегодня это отделение Murata носит название Murata Electronics Oy. Основу технологии составляют базовые процессы, применяемые при производстве полупроводниковых ИС: использование кремниевых пластин в качестве исходного материала, осаждение тонких пленок, фотолитография для формирования структур (рис. 1). Однако создание трехмерной МЭМС-структуры потребовало введения в технологический маршрут дополнительных операций и процессов.

В 3D МЭМС-устройствах пружина, инерционное тело и конденсаторы вытравливаются в кремниевой пластине путем метода сухого травления – глубокого реактивного ионного травления. По сравнению с жидкостным травлением этот метод обеспечивает более высокую плотность упаковки структуры и точность размеров. Для контроля процесса травления в вертикальном направлении и обеспечения электрической изоляции кремниевых структур Murata использует пластины кремния-на-изоляторе (КНИ) или кремния-на-изоляторе с углублениями. Это позволяет достичь большей гибкости при проектировании топологии структуры и обеспечить хорошую изоляцию активных областей с малыми паразитными емкостями.

Интегральные схемы обычно пассивируются при помощи диэлектрических слоев, нанесенных на поверхность пластины. Такой подход невозможен в МЭМС-устройствах,

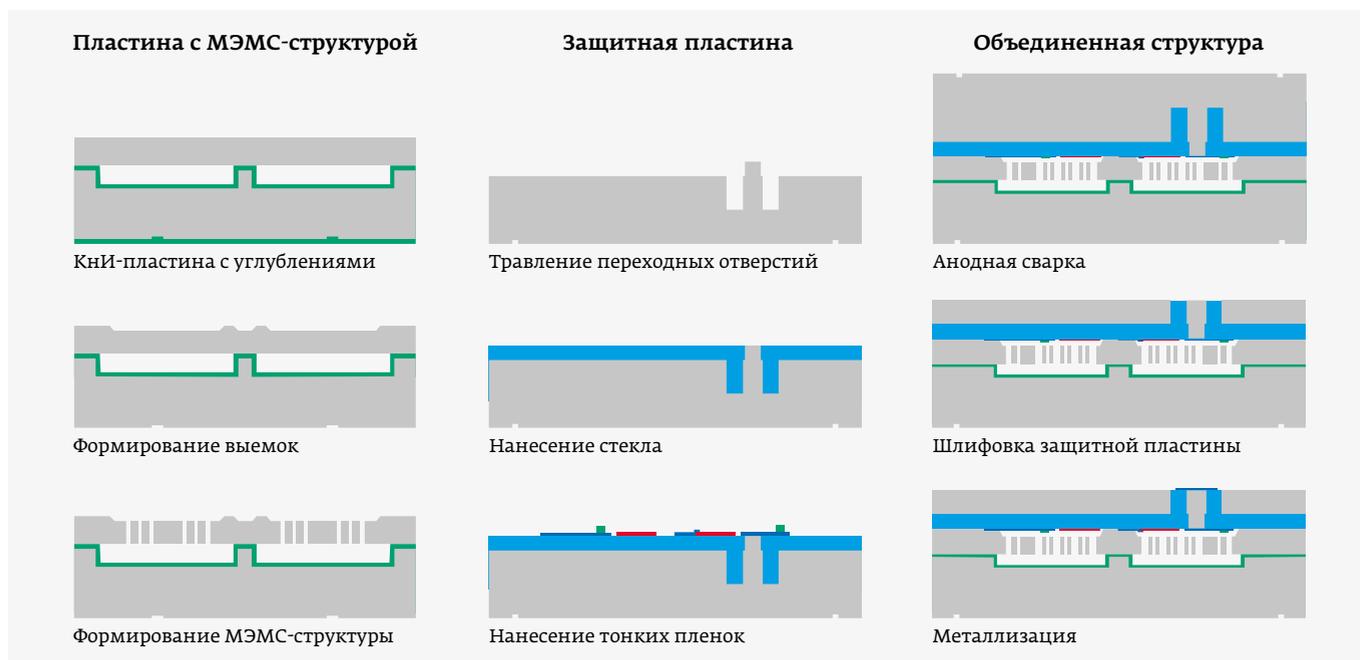


Рис. 1. Процесс формирования структуры 3D-МЭМС

поскольку внутренние структуры должны оставаться подвижными. В МЭМС-технологии защита устройства обеспечивается путем приварки к пластине с 3D МЭМС-структурами другой пластины, которая называется крышкой или защитной пластиной (рис. 2). Murata использует в качестве защитной пластины гетерогенные структуры из кремния и стекла, для создания которых применяется патентованная технология.

Защитная пластина и 3D МЭМС-пластина соединяются посредством еще одного тщательно контролируемого процесса – анодной сварки стекла и кремния (см. рис. 1). За счет приложения электрического поля и температуры обеспечивается прочное соединение на атомном уровне. В результате достигаются герметичная защита внутренних МЭМС-структур и высокая надежность устройства.

Электрическое соединение с МЭМС-устройством должно быть реализовано через защитную пластину. Murata одной из первых стала использовать для этого сквозные переходные отверстия (through-silicon via – TSV). TSV – отверстие в пластине, заполненное кремнием, изолированным от пластины слоем стекла. Стекло обеспечивает высокое сопротивление изоляции и малую паразитную емкость между переходными отверстиями, что повышает точность и снижает энергопотребление. Поскольку TSV формируются путем травления, они могут быть размещены в любом месте защитной пластины (в отличие от проволочного монтажа, когда топологию устройства нужно проектировать так, чтобы проволочный вывод подходил точно к краю кристалла).

После предварительного зондового тестирования МЭМС-структур на сэндвич из МЭМС- и защитной пластины устанавливают кристалл заказной ИС для обработки сигналов с датчика, используя технологию flip-chip. Затем выполняют резку пластин и финальное тестирование с последующей калибровкой датчиков. Пространство вокруг ИС заливают пластиком, устойчивым к ударам и вибрации. Для дополнительной защиты пластикового корпуса используют силиконовый гель и сверху крепят металлическую крышку. Получаемые МЭМС-устройства готовы к эксплуатации в жестких условиях эксплуатации. При этом, МЭМС-датчики Murata отличаются высокой точностью и стабильностью характеристик в широком диапазоне рабочих температур.

Благодаря высоким характеристикам и надежности МЭМС-датчики Murata подходят для применения в ряде ответственных приложений с повышенными требованиями к качеству компонентов.

Акселерометры и гироскопы Murata востребованы в системах обеспечения безопасности автомобиля, включая системы динамической стабилизации, предупреждения водителя (ADAS), помощи при спуске (HAS); подвеску с электронной регулировкой плавности движения; управление трансмиссией; электронный стояночный тормоз и др. В промышленности МЭМС-датчики Murata успешно используются в самых разных областях, в частности в сельскохозяйственной и строительной технике, крупногабаритном обрабатывающем оборудовании, робототехнике, навигационном оборудовании,

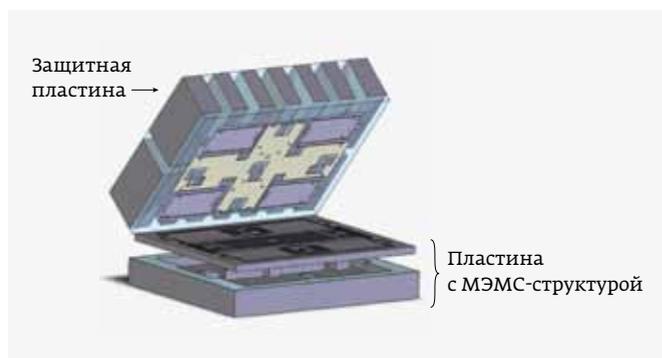


Рис. 2. Структура МЭМС-датчика Murata

системах контроля наклона в весовом оборудовании, в авиационных приборах и системах.

МЭМС-инклинометры незаменимы для мониторинга состояния конструкций и сооружений в качестве детекторов возможных деформаций, что позволяет своевременно приступить к ремонтным работам – задолго до того, как возникнет реальная опасность для людей. Появляется возможность прогнозировать срок эксплуатации объектов, долгосрочно планировать инвестиции в инфраструктуру. Кроме того, конструкции, состояние которых необходимо контролировать, зачастую находятся в труднодоступных для обслуживающего персонала местах. Свести к минимуму количество визитов бригад технического обслуживания можно, если выбрать решение, которое сохраняет точность и стабильность длительное время в среде, где внешние условия, такие как температура и влажность, меняются в широких диапазонах. Именно для таких условий идеально подходят устройства Murata.

Кроме того, МЭМС-датчики Murata нашли широкое применение в здравоохранении, в частности в кардиостимуляторах, высокоточном медицинском оборудовании, таком как хирургические столы, протезы, диагностическая аппаратура, системы мониторинга состояния пациента и др.

Одно из наиболее совершенных МЭМС-устройств, выпущенных компанией Murata за последнее время, – 3-осевой акселерометр серии SCA3300, предназначенный для широкого спектра промышленных и автомобильных приложений (рис. 3).

Миниатюрный МЭМС-датчик поставляется в пластиковом 12-выводном корпусе с двухрядным расположением выводов для поверхностного монтажа с габаритами 7,6 × 8,6 × 3,3 мм. Пользователю доступен выбор диапазона измерения: ±1,5g, ±3g или ±6g. Акселерометры серии SCA3300 обеспечивают линейность не менее ±1mg в диапазоне измерений ±1g и не менее ±15mg – в диапазоне измерений ±6g, плотность шума не превышает 37 мкг/√Гц. Механическое демпфирование чувствительного элемента датчика обеспечивает высокую точность измерений в жестких условиях с повышенным уровнем вибраций.



Рис. 3. 3-осевой акселерометр серии SCA3300

Диапазон питающего напряжения акселерометра от 3 до 3,6 В, при этом ток потребления не превышает 1,2 мА, что делает возможным его применение в устройствах с батарейным питанием. В режиме пониженного энергопотребления потребляемый ток снижается до 0,5 мА. Для обмена данными датчик оснащен стандартным SPI-интерфейсом.

Датчик SCA3300 отвечает требованиям стандарта AEC-Q100 для автомобильных компонентов. Диапазон рабочих температур акселерометра составляет от –40 до 125 °С. Устройство содержит ИС для обработки сигналов, включающей АЦП. Датчик оснащен широким набором функций обеспечения безотказной работы (мониторинг внутреннего опорного сигнала, проверка контрольных сумм при обмене данными, отслеживание насыщения сигнала и выхода его за границы диапазона). В акселерометре SCA3300 встроена функция самодиагностики – запатентованная система непрерывного самотестирования, которая в каждом цикле измерений проверяет корректность функционирования всего сигнального тракта: от МЭМС-датчика до схемы обработки сигнала.

Сфера применения акселерометра SCA3300 чрезвычайно широка: системы выравнивания и позиционирования, гиросtabilизаторы для тяжелого оборудования, навигационные системы, автоматически управляемые механизмы, строительная техника. Перспективные области использования устройств – автомобильные системы обеспечения безопасности, в частности система предупреждения водителя (ADAS), системы автономного вождения и интеллектуального управления трансмиссией (рис. 4). Дополнительный возможный вариант – контроль наклона в весовом оборудовании.

Еще одно интересное устройство Murata – комбинированный датчик серии SCC2000, включающий 3-осевой акселерометр и гироскоп (рис. 5). Ключевыми приложениями для этих МЭМС-датчиков также являются автомобильное и промышленное оборудование. Устройства, предназначенные для жестких условий эксплуатации, отличаются минимальными в своем классе зависимостью от температуры и чувствительностью к ударам, а также наиболее низкой нестабильностью смещения нуля.

Они содержат акселерометр диапазона low-g с датчиком угловой скорости, измеряемой по оси X либо по оси Z,



Рис. 4. Демонстрация системы ADAS на основе МЭМС-датчиков Murata на выставке electronica 2018

а также 32-битный цифровой SPI-интерфейс. Датчик оснащен программно выбираемым фильтром нижних частот на 10 или 60 Гц, который конфигурируется через SPI-интерфейс. Диапазон измерений гироскопа составляет $\pm 125^\circ/\text{с}$ или $\pm 300^\circ/\text{с}$, 3-осевого акселерометра – $\pm 2g$ или $\pm 6g$. Типичная величина температурного дрейфа акселерометра составляет $\pm 6 \times 10^{-3}g$ для датчиков с диапазоном $\pm 2g$ и $\pm 12 \times 10^{-3}g$ – для датчиков с диапазоном $\pm 6g$. Температурный дрейф гироскопа обычно находится в пределах $\pm 0,5^\circ/\text{с}$ для моделей с диапазоном $\pm 125^\circ/\text{с}$. Типичная кратковременная нестабильность смещения нуля гироскопов составляет $1^\circ/\text{ч}$ для приборов с диапазоном $\pm 125^\circ/\text{с}$ и осью измерений X и $2^\circ/\text{ч}$ – для приборов с диапазоном $\pm 125^\circ/\text{с}$ и осью измерений Z.

Устройства серии SCC2000 выпускаются в 24-выводных пластиковых корпусах для поверхностного монтажа типа SOIC габаритами $15,00 \times 112,10 \times 14,35$ мм. Датчики отвечают требованиям стандарта безопасности транспортных средств ISO26262 и автомобильного стандарта AEC-Q100. Эта комплексная платформа для измерения ускорений и угловых скоростей по всем трем осям позволяет создавать одноплатные измерительные системы с шестью степенями свободы.

Датчики серии SCC2000 предназначены для широкого спектра ответственных приложений, в частности для активных и пассивных автомобильных систем обеспечения безопасности, таких как система динамической стабилизации, система помощи при спуске (HAS), активное рулевое управление, адаптивный круиз-контроль для современных систем помощи водителю (ADAS). Благодаря надежной конструкции датчики серии SCC2000 также подходят для систем, эксплуатируемых в жестких условиях, например для сельскохозяйственных машин, строительной техники или крупногабаритного обрабатывающего оборудования. Еще одна сфера применения устройств – инерциальные навигационные системы.



Рис. 5. Комбинированный датчик серии SCC2000

На выставке electronica 2018 в ноябре прошлого года компания Murata анонсировала новинку – МЭМС-инклинометр серии SCL3300 для измерения угла наклона по трем осям, оснащенный цифровым выходом в градусах угла отклонения. Разрешение по углу на выходе устройства составляет $0,0055^\circ/\text{МЗР}$. В SCL3300 предусмотрена возможность выбора четырех режимов измерения, которые можно использовать для оптимизации характеристик датчика в зависимости от требований приложения.

Устройство содержит ИС для обработки сигналов с цифровым SPI-интерфейсом, поэтому отпадает необходимость во внешнем АЦП, можно минимизировать габариты, энергопотребление и сложность системы. Встроенный преобразователь данных ускорения в угол наклона позволяет упростить проектное решение, использовать простое и надежное ПО. Датчик оснащен встроенными функциями самодиагностики.

Диапазон измерения угла наклона датчика SCL3300 составляет $\pm 90^\circ$, что упрощает измерительное ПО и эксплуатацию устройства. Диапазон рабочих температур – от -40 до 125°C с типовым дрейфом смещения менее ± 10 мГ во всем диапазоне температур. Датчик отличается ультранизкой плотностью шума на уровне $0,001^\circ/\sqrt{\text{Гц}}$, что обеспечивает высокую разрешающую способность измерительной системы.

SCL3300, работающий от напряжения питания в диапазоне от 3 до 3,6 В, подходит для систем с батарейным питанием, в частности приложений Интернета вещей, благодаря типовому току потребления в спящем режиме всего 3 мкА. Устройство предлагается в компактном пластиковом 12-выводном корпусе для поверхностного монтажа габаритами $8,6 \times 7,6 \times 3,3$ мм, который отвечает требованиям директивы RoHS.

Ключевые области применения инклинометра SCL3300: мониторинг состояния труднодоступных конструкций и сооружений, компенсация угла наклона весов, робототехника, системы позиционирования и навигации, управление механизмами. Кроме того, устройство можно использовать везде, где нужны точные измерения угла наклона, требуется компенсация отклонения от вертикали или сохранение горизонтального положения, например для выравнивания механизмов и машин. ●