

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ MEMS ОТКРЫВАЮТ ПУТЬ ДЛЯ НОВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

ПАВЕЛ УСАЧЕВ, техн. консультант, ИД «Электроника»

До недавнего времени автомобильная электроника была главной движущей силой рынка MEMS. Однако постепенно MEMS-приборы все шире внедряются и в иные приложения, например, в такие критически важные как контроль прочности крупных конструкций. В статье рассматриваются особенности некоторых новых технологий MEMS, которые позволяют существенно улучшить характеристики этих приборов, в частности, уровень шума, стабильность и динамический диапазон, одновременно уменьшая их стоимость.

Впервые коммерческий успех MEMS-устройства завоевали в качестве детекторов столкновений в автомобильных подушках безопасности. Уменьшение стоимости, размеров и потребляемой мощности современных датчиков, а также расширение базы производителей позволило MEMS-устройствам выйти на рынок потребительской электроники. Например, в ноутбуках используются 3-координатные акселерометры для защиты жесткого диска при случайном ударе. В смартфонах и мобильных телефонах MEMS-акселерометры позволяют упростить пользовательский интерфейс. В игровых устройствах MEMS-системы помогают определить пространственное положение игрового контроллера.

Тем не менее такие параметры MEMS-устройств как уровень шума и стабильность, которые являются ключевыми для навигационных систем, не претерпели существенных улучшений, по сравнению с их стоимостью, размерами и энергопотреблением.

В последнее время такие технологии производства MEMS-устройств как травление линий, в которых высота в несколько раз превышает ширину линии (high-aspect-ratio etching), сращивание пластин (wafer bonding) и корпусирование получили дальнейшее развитие. Появились также совершенно новые подходы в производстве MEMS-устройств, которые позволяют этим приборам выйти на рынок критически важных приложений и потребительской электроники.

УМЕНЬШЕНИЕ УРОВНЯ ШУМА И РАСШИРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

Используя опыт применения нанотехнологий при создании печатающих головок с высокой плотностью форсу-

нок и высокой энергоэффективностью, компания Hewlett Packard разработала запоминающее устройство на базе MEMS. В процессе разработки была создана технологическая платформа для производства нового поколения инерциальных MEMS-датчиков.

Такое запоминающее устройство позволяет реализовать систему, подобную CD-RW, на кристалле. Вращающийся диск и лазер были заменены на координатный манипулятор — микродвижитель (micromover) и электронные прожекторы с холодным катодом. В обоих устройствах для хранения данных используется среда с фазовыми переходами.

Микродвижитель, созданный с помощью технологии травления, при использовании которой высота в несколько раз превышает ширину линий и сращивания пластин, позволил кардинально преобразовать конструкцию инерциального MEMS-датчика.

Не случайно, что созданные на базе микродвижителя MEMS-датчики имеют высокие характеристики, ведь требования к устройствам памяти и инерциальным датчикам сходны. Рассмотрим эти требования.

1. Температурная стабильность. Самый важный параметр любого устройства хранения данных или инерциального датчика — способность выдерживать изменения температуры без ухудшения характеристик. Для того чтобы обеспечить температурную стабильность устройств, разработчики используют конструкцию в виде единого кристалла кремния с минимумом металлических и диэлектрических слоев для уменьшения возможных напряжений при изменении температуры.

2. Большая чувствительная масса. Емкость устройств хранения информа-

ции определяется площадью запоминающей среды. Для увеличения емкости необходимо создать более крупный микродвижитель. В датчике увеличение массы является ключевым фактором уменьшения термомеханического шума. Поэтому, создавая компактные датчики, необходимо учитывать такие факторы как термомеханический шум, который ограничивает разрешение датчика. Почти всегда можно найти компромисс между малым форм-фактором и высокими характеристиками датчика.

3. Межосевая изоляция. Для устройств хранения информации критичным фактором является точный контроль зазора между средой хранения и электронным пучком. Среда хранения должна быть в фокальной плоскости к электронному пучку для того, чтобы надежно считывать и записывать данные.

Для создания гибкого подвеса с поперечной устойчивостью, что обеспечивает точный контроль зазора, используется травление пластин, при котором высота линий в несколько раз превышает их ширину. Для инерциальных датчиков это позволяет добиться межосевой изоляции и увеличения чувствительной массы.

4. Широкий динамический диапазон. Чем на большее расстояние перемещается микродвижитель, тем больший объем данных доступен для электронного пучка при каждой операции считывания/записи. Увеличение диапазона перемещения позволяет уменьшить количество электронных пушек и, в результате, снизить сложность и стоимость системы, т.к. число параллельных каналов уменьшается.

Для увеличения диапазона перемещений была разработана конструкция электростатического поверхностного

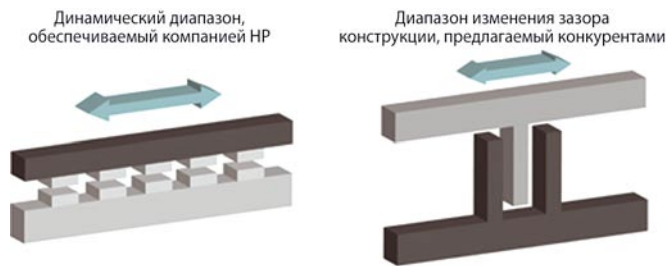


Рис. 1. Увеличенная чувствительная масса снижает тепловой вибрационный шум, что обеспечивает более точное измерение ускорения

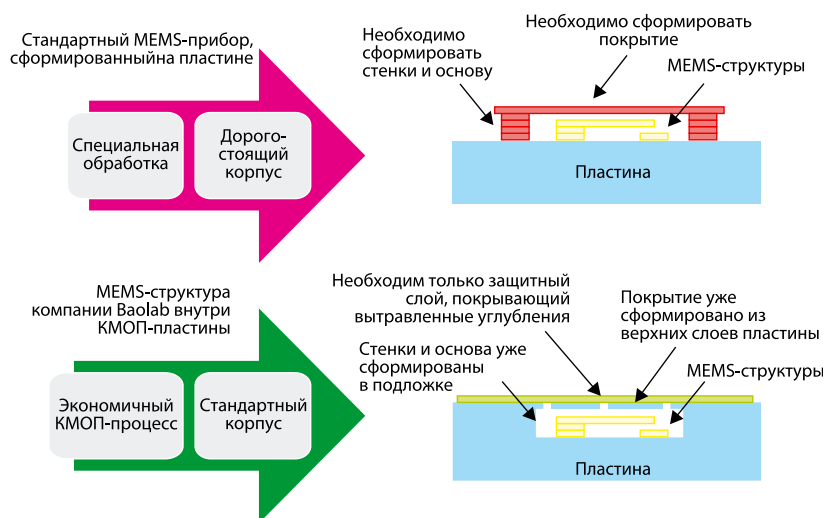


Рис. 2. Сравнение технологии создания MEMS-структуры внутри КМОП-пластины компании Baolab с обычным MEMS-устройством, сформированным сверху пластины

электрода, радикально отличающаяся от гребенчатого электрода, который ранее применялся в MEMS-актуаторах. Этот подход позволил точно контролировать зазор и другие размеры с помощью метода срачивания пластин и литографии, что обеспечило широкий диапазон плотности силы актуатора или изменения емкости при измерении ускорения.

Самым важным преимуществом такой конструкции, однако, является то, что диапазон перемещения поверхностных электродов не ограничен, т.к. они имеют пальчиковую конфигурацию (см. рис. 1). Таким образом, новый подход кроме высокого разрешения обеспечивает более широкий динамический диапазон. Например, такой микроакселерометр имеет диапазон измерений, превышающий 10g.

Измерения показали, что использование новой технологической платформы может обеспечить на порядок лучший уровень шума, динамический диапазон и стабильность при сохранении таких традиционных преимуществ MEMS-датчиков как низкая стоимость, компактные размеры и малая потребляемая мощность. Повышенная гибкость системы позволяет создавать

акселерометры и гироскопы на одном кристалле, которые могут производить измерения по всем шести координатам движения, т.е. X, Y, Z, крену, тангажу и рысканию (roll, pitch и yaw). Интеграция датчиков в одном кристалле обеспечивает точное выравнивание по координатам, а также снижает затраты на корпусирование по сравнению с другими технологиями.

Внедрение данной технологии позволит создать сверхчувствительные датчики для некоторых критических приложений, в которых требуются низкий уровень шума и большой динамический диапазон.

Например, разработчикам, занимающимся системами контроля состояния конструкций, требуются датчики, которые способны контролировать в режиме реального времени колебания конструкции моста. Крупный мост может использовать сотни и тысячи сенсорных блоков, оборудованных акселерометрами, которые способны удаленно отслеживать процесс старения конструкций и генерировать специальные сигналы в случае какого-либо отклонения от штатного режима. Эти датчики должны быть компактными, надежными, недорогими и мало-

мощными, чтобы минимизировать обслуживание системы после ее установки.

Использование датчиков с более низким уровнем шума (для улучшения чувствительности) и большей стабильностью (для лучшего разрешения низкочастотных вибраций, характерных для крупных конструкций) позволяет оптимизировать систему мониторинга прочности конструкции.

Эти датчики могут быть также использованы в геофизических приложениях для контроля движения во время сейсмических явлений, таких как землетрясение. Информация, полученная в режиме реального времени во время землетрясения, может быть использована для быстрого определения степени безопасности конструкции.

ИНТЕГРАЦИЯ MEMS И КМОП В СТАНДАРТНОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

Интеграция MEMS и КМОП-процесса обеспечивает ряд преимуществ, таких как уменьшение размера кристалла и большое число качественных межсоединений. Однако существующие решения представляют собой либо формирование структуры на поверхности пластины после окончания КМОП-процесса, либо создание выемки для MEMS-структуры в пластине с использованием обычных методов обработки по технологии MEMS. Оба подхода дороги и требуют больших затрат времени и специального оборудования, которое, как правило, малопродуктивно.

Компания Baolab Microsystems потратила несколько лет на разработку патентованной технологии создания MEMS-устройств в пластине, используя стандартные высокопроизводительные линии, что существенно облегчает и ускоряет производство, т.к. количество необходимых операций уменьшается. Если несколько различных MEMS-устройств формируются на одном и том же кристалле, их стоимость снижается на две трети и более.

В технологии NanoEMS™ компании Baolab для формирования MEMS-структуры с помощью стандартных шаблонов используются существующие металлические слои в КМОП-пластине (см. рис. 2). Диэлектрик, расположенный между слоями металла, удаляется через окна в слое пассивации при травлении в HF в паровой фазе (vHF-травление). Для травления используется оборудование, которое доступно для массового производства, а сам процесс занимает менее часа, что весьма незначительно увеличивает общее время изготовления прибора. Вытравленные углубления затем

покрываются защитным слоем, а кристалл заключается в корпус. Поскольку используется только стандартный КМОП-процесс, MEMS-устройство, созданное по технологии NanoEMS, можно непосредственно интегрировать с активной схемой.

Компания Baolab успешно создала MEMS-устройство, используя стандартные 8-дюймовые пластины, изготовленные по 0,18-мкм КМОП-технологии с четырьмя и более металлическими слоями, и получила 200-нм минимальные размеры элементов. Это на порядок меньше, чем может быть достигнуто в обычных MEMS-устройствах. Таким образом, технология NanoEMS обеспечивает создание наноMEMS-устройств, что позволяет получить дополнительные преимущества из-за уменьшения размеров, снижения потребляемой мощности и повышения быстродействия.

Хотя эта новая патентованная технология кажется простой, компании Baolab пришлось преодолеть ряд трудностей. Например, довольно сложно было контролировать зону травления из-за возможности перетрава, разрушения пассивационного слоя и выхода из строя всей структуры. Компания Baolab снизила остроту этой проблемы до минимума, обеспечив контроль той части диэлектрика, которая должна быть удалена, по изменению показателя преломления пассивационного слоя SiN.

Другой проблемой были тонкие металлические слои, не оптимизированные для применения в конструкции MEMS. Эту задачу можно было бы решить путем внесения изменений в КМОП-процесс, однако компания Baolab захотела найти решение, которое не зависело бы от производственной линии. В результате была разработана конструкция, которая допускает такие параметры слоев металла. Большая работа была также проведена для решения проблемы текучести металла.

Компания Baolab планирует производить дискретные MEMS-устройства, включая РЧ-ключи, электронные компасы и акселерометры, а также предлагает решения, которые сочетают несколько функций на одном кристалле. Эти компоненты предназначены для разработчиков и производителей мобильных телефонов, а также для рынка модулей усилителей мощности и радиочастотных входных каскадов.

Согласно исследованиям Yole Research, в течение ближайших трех лет совокупные темпы годового роста мировых продаж радиочастотных MEMS-ключей составят более 80%, что в основном определяется рынком сотовых телефонов. Кроме того, недорогие

радиочастотные MEMS-ключи являются важнейшими компонентами для нового сектора рынка радиоприемников для мобильных телефонов, который по прогнозам вырастет до 1,4 млрд долл. к 2015 г. В сотовых 3G/4G-телефонах радиочастотные MEMS-устройства позволяют работать в нескольких частотных диапазонах (около десяти) за счет различных методов модуляции. Эти функции обеспечиваются с помощью радиочастотных MEMS-ключей, которые позволяют гибко конфигурировать архитектуру системы.

Технология NanoEMS позволяет легко создать на одном КМОП-кристалле необходимое количество ключевых элементов на обычных производственных линиях с помощью традиционных методов. За счет этого существенно снижается стоимость компонентов для многополосных и многорежимных сотовых телефонов следующего поколения.

ПЕРВЫЕ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ MEMS-УСТРОЙСТВА ДЛЯ ESP

Еще одним примером внедрения новых технологий в MEMS-устройства является интегрированный модуль инерциального датчика компании Bosch, содержащий датчик угловой скорости рысканья и ускорения, расположенный поверх кристалла ASIC в 16-выводном пластмассовом корпусе SOIC.

Данное устройство было разработано в рамках программы развития электронных систем динамической стабилизации автомобиля (Electronic Stability Program, ESP), в которых применяются MEMS-акселерометры и MEMS-датчики давления. Первые поколения этих устройств не позволяли интегрировать датчики угловой скорости и ускорения в схему считывания в отдельном компактном корпусе. С выпуском комбинированного инерциального датчика для системы ESP SM1540 компания Bosch решила эту проблему (см. рис. 3).

Разработанное устройство состоит из двух кристаллов MEMS-датчиков с микрообработкой поверхности — один для измерения угловой скорости, другой для измерения ускорения, которые расположены на кристалле ASIC для считывания данных. Чувствительным элементом для измерения угловой скорости является вибрационный гироскоп с электростатическим приводом. Он изготовлен с помощью микрообработки поверхности кремния с использованием слегка модифицированного процесса компании Bosch со слоем поликремния толщиной 11 мкм, из которого формируются движущиеся части микроструктуры.

Датчик содержит две почти идентичные массы, соединенные пружиной для

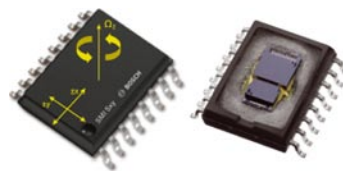


Рис. 3. Интегрированный инерциальный датчик для системы ESP SM1540 компании Bosch

того, чтобы гарантировать синхронные колебания всей структуры. Устройство имеет рамку привода, расположенную на внешнем контуре, рамку Кориолиса и рамку детектирования. Все рамки соединены U-образными пружинами, а внешняя и внутренняя рамки прикреплены также с помощью U-образных пружин к подложке. Приводная рамка возбуждается на резонансных колебаниях частотой около 15 кГц с помощью электростатических гребенчатых приводов, двигающихся антипараллельно вдоль координаты X.

Датчики работают в обычном автомобильном диапазоне температур $-40...120^{\circ}\text{C}$, а максимальные значения уровня шума составляют $\pm 0,1^{\circ}/\text{с}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые технологии позволяют MEMS проникнуть в такие системы как приборы сбора энергии, микроэлементы питания и микрозеркала.

Интеграция различных MEMS-устройств в одном модуле обещает бурное развитие рынка MEMS-приложений за счет новых возможностей, например, благодаря созданию приборов с девятью степенями свободы — комбинацией 3D-акселерометра, 3D-гироскопа и 3D-магнитометра. Кроме того, такие приложения как беспроводные сети датчиков получат дальнейшее развитие за счет интегрирования радиочастотных каскадов, устройств сбора энергии и чувствительных элементов.

Эволюция технологий MEMS существенно влияет на способы получения данных из окружающей среды и взаимодействия с ней. Технология нанодатчиков позволяет создавать сетевые системы датчиков, которые сочетают отличные характеристики, малые размеры и стоимость, что требуется для критически важных приложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Peter G. Hartwell. *Rethinking MEMS sensor design for the masses*//*Electronic Engineering Times Europe*, March 2010.
2. Josep Montanya i Silvestre. *MEMS now inside the CMOS wafer*//*Electronic Engineering Times Europe*, March 2010.
3. Patrick Mannion. *ISSCC: Bosch unveils integrated MEMS automotive sensor*//*www.eetimes.com*.
4. Benedetto Vigna. *Making MEMS: A short guide*//*www.automotivedesignline.com*.