

Новые многофункциональные МЭМС-датчики движения производства STMicroelectronics

Виктор АЛЕКСЕЕВ,
к. ф.-м. н.

Одним из бурно развивающихся направлений современной электроники является производство микроэлектромеханических систем МЭМС (Microelectromechanical systems — MEMS) в составе датчиков, предназначенных для контроля параметров движения, — акселерометров, гироскопов, а также их различных комбинаций с магнитометрами. Статья посвящена новым моделям МЭМС-датчиков движения производства STM.

В первой части статьи рассмотрены дискретные модели IIS328DQ, LIS3MDL, I3G4250D. Во второй части приводится описание новых моделей инерциальных блоков измерений движения iNEMO LSM6DS3, LSM9DS1.

Часть 1. Новые дискретные датчики движения производства STM

О технологиях производства МЭМС-датчиков движения фирмы STM

Концерн STMicroelectronics является одним из ведущих мировых производителей полупроводниковых электронных компонентов. Достаточно сказать, что за 2014 год оборот фирмы составил \$7,4 млрд. На предприятиях концерна, расположенных в десяти странах, работает около 44 тыс. сотрудников.

Одно из приоритетных направлений STM — разработка и производство микроэлектромеханических систем МЭМС для датчиков контроля параметров движения (в данную группу входят акселерометры, гироскопы, магнитометры и мультисенсорные компоненты).

Датчики движения, изготовленные по технологии МЭМС, состоят из двух частей — механического измерительного устройства и электронного блока для обработки сигналов датчика. Термин «микромеханический» буквально означает, что размеры отдельных деталей механических датчиков составляют несколько микрон.

При изготовлении механических датчиков в МЭМС используются те же технологии, что и для интегральных электронных схем, и большинство механических датчиков МЭМС выпускается на основе кремниевых пластин. В настоящее время применяется несколько технологий. На кварцевую пластину наносится шаблон, затем вытравливаются ненужные части и остаются только необходимые механические детали устройства.

Поверхностная микрообработка — это технология 2D MEMS, при которой на пластину кварца наносятся тонкие слои пленок, после чего проводится процесс травления.

В технологии Bulk Micromachining используется объемная микрообработка с сухим плазменным травлением. Наиболее прецизионные датчики для специальных целей изготавливаются с помощью этой технологии (3D DRIE).

Травление в объеме позволяет повысить чувствительность, а также соотношение сигнал-шум. Однако технология Bulk Micromachining не получила широкого распространения при выпуске потребительских изделий.

Более сложная технология Surface Micromachining предусматривает послойное построение механического устройства. На кремниевую пластину наносятся промежуточные слои из вспомогательного материала (обычно диоксида кремния). Затем необходимая конструкция вытравливается слой за слоем. При этом прежде всего удаляется жертвенный слой. Обе технологии применяются при изготовлении объемных деталей. Разница заключается в самом процессе технологии.

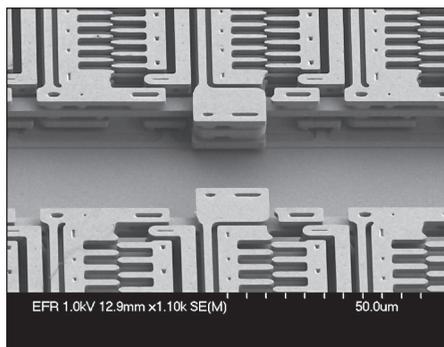


Рис. 1. Механическая структура МЭМС-акселерометра

В качестве примера на рис. 1 показан механический блок МЭМС-акселерометра, выполненный по технологии Surface Micromachining [1].

В тех случаях, когда необходимы очень сложные прецизионные конструкции, применяется метод LIGA, базирующийся на объемной литографии с применением жесткого гамма-излучения.

Производственные мощности и использование пластин большого диаметра (300 и 450 мм) дают возможность выпускать сотни тысяч датчиков на одной кремниевой пластине за один производственный цикл.

На следующем этапе пластина просто разрезается на отдельные датчики.

Поскольку при создании механической и электронной частей МЭМС-датчиков используются в принципе одни и те же технологии, то появляется возможность изготовления обеих частей на одной кремниевой пластине. Поэтому в очень жесткой конкурентной борьбе за рынки сбыта МЭМС-датчиков лидерами окажутся те фирмы, у которых будут более эффективные современные технологии. Несомненным преимуществом фирмы STM является то, что наряду с новейшими технологиями она поддерживает полный цикл производства, начиная от изготовления кремниевых подложек и заканчивая корпусированием.

Акселерометры, гироскопы и магнитометры STM

Акселерометры

На основе МЭМС-технологии, разработанной фирмой STM, на сегодня выпущено свыше 600 млн акселерометров.

Напомним, что акселерометр позволяет определять линейное ускорение движения. В линейке акселерометров STMicroelectronics представлены как аналоговые, так и цифровые МЭМС, которые могут работать с ускорениями от 0 до ± 400 g.

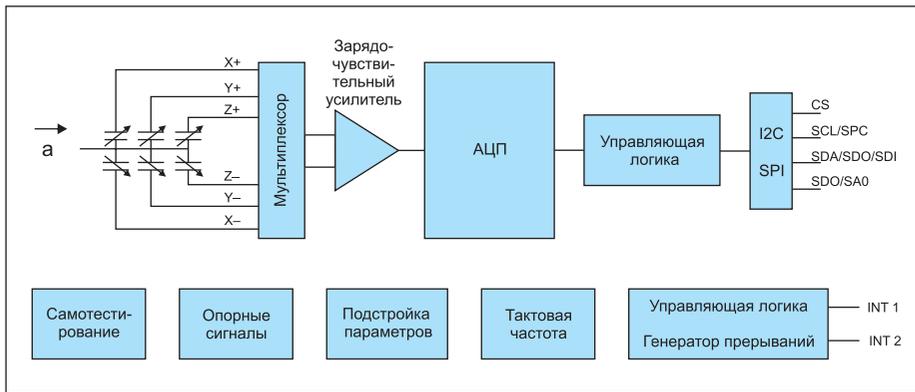


Рис. 2. Структурная схема МЭМС-акселерометра STM

Таблица 1. Технические характеристики акселерометра IIS328DQ

Диапазон измерения акселерометра	$\pm 2/\pm 4/\pm 8$ g
Чувствительность акселерометра (диапазон ± 2 g)	0,9 mg/digit
Температурная нелинейность акселерометра (диапазон ± 2 g)	$\pm 0,01\%$ / $^{\circ}$ C
Скорость считывания данных акселерометра (ODR)	0,5–1000 Гц
Интерфейсы	SPI и I ² C
Функция самотестирования акселерометра	Режимы: Normal mode, оси X, Y, Z
Напряжение питания	2,16–3,6 В
Напряжение на выводах I/O	1,8 В
Внешние прерывания	INT1, INT2
Ток в нормальном режиме работы	250 мкА
Ток в режиме энергосбережения	10 мкА
Регистр данных	16 бит
Выход из спящего режима	Функция Sleep to wake up
Корпус	QFPN-24
Габаритные размеры	4×4×1,8 мм
Рабочий температурный диапазон	-40...+105 $^{\circ}$ C
Предельно допустимое значение ускорения в течение 0,1 мс	10 000 g

Структурная схема МЭМС-акселерометра STM показана на рис. 2.

МЭМС-акселерометр STM состоит из механической подвижной части, электрическая емкость которой изменяется в зависимости от ускорения, и электронной части, фиксирующей эти изменения.

В механической части акселерометра подвижная часть, закрепленная в нескольких точках, может свободно перемещаться в направлении ускорения. Для того чтобы предотвратить блокировку подвижной части в процессе корпусирования, она закрывается специальной защитной крышкой.

При наличии ускорения изменяется емкость механической части акселерометра от единиц до сотен пикофарад. Высокоточный усилитель фиксирует заряд этих емкостей и передает сигнал на мультиплексор, связанный с блоком обработки сигнала.

Акселерометры STM классифицируются на пороговые и аналоговые (или аналогоподобные цифровые) датчики. В одном случае задается пороговое значение срабатывания. В другом случае акселерометр реагирует на любое движение и на свободное падение. Пороги и времена срабатывания устанавливаются пользователем самостоятельно. Кроме того, акселерометр можно запрограммировать таким образом, чтобы команды прерывания вырабатывались при определенной последовательности событий. Вот почему эти устройства могут работать в любых комбинированных режимах.

Подробно различные варианты акселерометров описаны в технической документации, которую можно найти на сайте STM [2].

В апреле 2015 года STM приступила к коммерческим продажам новой серии МЭМС-датчиков движения, предназначенных для использования в течение длительного времени. В анонсе на сайте STM декларируется, что данная серия будет производиться в течение 10 лет [3].

Модель IIS328DQ — это бюджетный высокоточный 3-осевой акселерометр с ультранизким энергопотреблением. Модель предназначена для использования в приложениях, в которых требуются расширенные темпера-

турные диапазоны и большой срок службы. Модель рассчитана на работу в промышленном диапазоне температур -40...+105 $^{\circ}$ C.

Кроме того, этот дешевый и надежный акселерометр рекомендован STM для систем контроля вскрытия транспортных упаковок дорогостоящих изделий (anti-tampering). Недорогой МЭМС-датчик и простое исполнительное устройство сразу покажут, вскрылась ли транспортная упаковка.

Программируемые диапазоны измерений ($\pm 2/\pm 4/\pm 8$ g) и скорости семплирования (от 0,5 до 1 Гц) позволяют использовать такой акселерометр для решения широкого круга задач. В режиме энергосбережения акселерометр потребляет лишь 10 мкА.

Управление акселерометром реализуется через программируемые регистры памяти. Чтобы прочитать или записать информацию в регистры памяти, нужно передать через интерфейс SPI определенную последовательность логических импульсов.

В акселерометре IIS328DQ предусмотрено 20 управляющих регистров, подробное описание которых приведено в [4].

В акселерометре имеется два интерфейса — I²C и SPI, предназначенных для получения результатов измерений и для работы с регистрами. Кроме того, оба интерфейса позволяют конфигурировать сигналы прерываний на выводе INT. Интерфейсы I²C и SPI выведены на одни и те же контакты.

Интерфейс I²C может работать в нормальном и высокоскоростном (400 кГц), а также в режиме ведущего или ведомого.

С шиной I²C связаны две линии: тактовая частота SCL и последовательная двунаправленная линия SDA, через которую принимаются и передаются данные. Информация передается в формате 8-битного сообщения.

Интерфейс SPI может работать только в режиме ведомого. Он используется для записи информации в управляющие регистры и ее чтения.

Выбор нужного интерфейса реализуется с помощью соответствующего регистра.

По умолчанию установлен SPI-интерфейс, который работает с четырьмя линиями: CS,

SPC, SDI и SDO. Линия активации интерфейса CS и линия синхронизации SPC контролируются мастером. Две линии, SDI и SDO, используются соответственно для записи и чтения.

Команды записи и чтения представляют собой последовательности из 16 синхронизированных импульсов. Первый импульс (бит) определяет вид операции: 0 — запись, 1 — чтение. Биты с 1-го по 7-й отвечают за адресацию. В остальных битах передается информация регистров.

Акселерометр IIS328DQ выпускается в корпусе QFPN-24. Габаритные размеры 4×4×1 мм. Следует отметить, что из 24 выводов акселерометра задействовано всего 14. Остальные зарезервированы для модернизации следующих моделей. Вес IIS328DQ — 60 мг.

В акселерометре поддерживаются команды прерывания, вырабатывающиеся как ответная реакция на определенные события — например, свободное падение или превышение порога ускорения по одной из осей. Функции прерывания изменяют состояния управляющих выходов, к которым подключены различные исполнительные устройства. Существует два типа сигналов прерывания. В одном случае внешний микроконтроллер анализирует показания датчиков, в соответствии с которыми он управляет исполнительными устройствами. В другом — команды прерывания вырабатываются автоматически, без участия внешнего микроконтроллера в соответствии с состояниями регистров датчика. Такой подход значительно упрощает конструкцию устройств, использующих МЭМС-датчики движения STM, поскольку предоставляет возможность реагировать на стандартные ситуации без обращения к управляющему микроконтроллеру, тем самым экономя энергопотребление и сокращая время срабатывания.

Технические характеристики нового 3-осевого акселерометра STM IIS328DQ приведены в таблице 1.

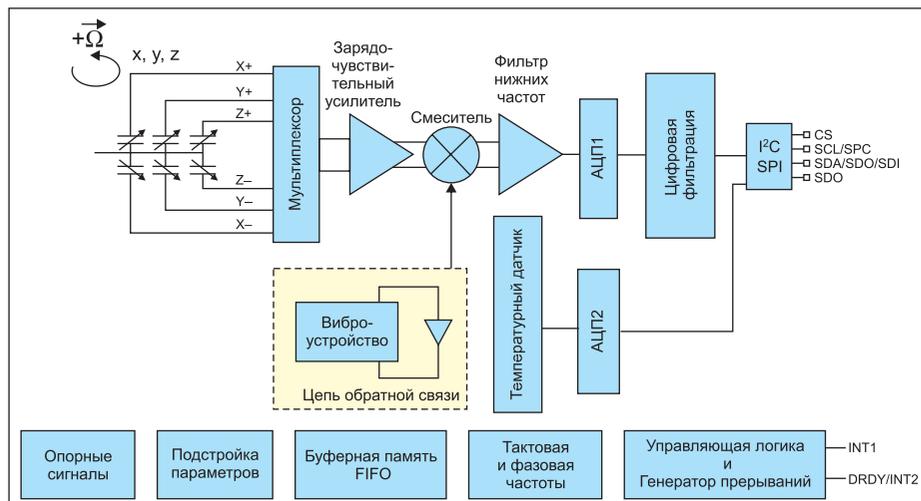


Рис. 3. Структурная схема МЭМС-гироскопа STM

Гироскопы

В отличие от акселерометра, гироскоп реагирует на изменение углов ориентации относительно инерциальной системы отсчета. Принцип их действия основан на использовании эффекта силы Кориолиса.

Конструкция МЭМС-гироскопа более сложная, чем у акселерометра. Структурная схема МЭМС-гироскопа STM показана на рис. 3.

Микроэлектромеханические гироскопы STM также содержат две части — механический и электронный блоки. Механическая часть относится к классу вибрационных устройств, которые сохраняют направление своих колебаний при повороте основания. Первичные колебания реализуются с помощью вибрационного устройства, включенного в цепь обратной связи. При этом на подложке возникают первичные поверхностные акустические волны (ПАВ). При изменении угла наклона под действием силы Кориолиса и первичных ПАВ появляются вторичные поверхностные акустические волны в направлении, ортогональном к направлению первичных ПАВ. В этом случае к вибрирующим заряженным частицам материала пластины пьезоэлектрика прикладываются силы Кориолиса, генерирующие за счет поперечного акустоэлектрического эффекта дополнительное напряжение на контактных шинах пьезопластины. Эта разность потенциалов, пропорциональная угловой скорости вращения гироскопа, фиксируется и обрабатывается электронным блоком.

Фирма STM производит широкий спектр МЭМС-гироскопов с диапазонами измерений от 30 до 6000 °/с, предназначенных для самых различных приложений [5].

Из новых моделей (апрель 2015 года) можно выделить 3-осевой гироскоп I3G4250D, который также относится к новому классу долговременного использования и отличается малой мощностью, высокой стабильностью и повышенной надежностью [6].

Структурная схема работы электронного блока гироскопа аналогична в общих чертах описанной выше схеме работы электронного блока акселерометра, а потому не будем останавливаться на ней подробно. Гироскоп управляется с помощью 23 регистров.

Гироскоп I3G4250D оснащен интерфейсами I²C и SPI, предназначенными соответственно для связи с хост-процессором и записи/чтения информации регистров. Эта модель имеет программируемую шкалу измерений с диапазонами 245/±500/±2000 °/с. В гироскопе предусмотрен встроенный датчик температуры и встроенные ВЧ/НЧ-фильтры.

Особенностью I3G4250D является буферная память FIFO объемом 8 кбайт, которая позволяет автономно, без обращения к управляющему микроконтроллеру, хранить и обрабатывать большие объемы данных, снижая тем самым общее энергопотребление. Внешний микроконтроллер подключается только в тех случаях, когда нужно выполнить сложные команды управления.

Память FIFO оперирует тремя категориями событий, обуславливающими команды прерываний: «пороговое значение», «переполнение» и «буфер пуст».

Модель выпускается в корпусе LGA-16 размерами 4×4×1,1 мм. Этот гироскоп отлича-

Таблица 2. Технические характеристики МЭМС-гироскопа I3G4250D

Диапазон измерения гироскопа, °/с	±245/±500/±2000
Чувствительность гироскопа (диапазон ±245)	8,75 mdps/LSB
Температурная нелинейность гироскопа в диапазоне -40...+85 °C	±2%
Скорость считывания данных гироскопа (ODR)	105, 208, 420, 840 Гц
Интерфейсы	SPI и I ² C
Встроенный температурный датчик (ODR = 52 Гц, 8 LSB/°C)	-40...+85 °C
Функция самотестирования	Режимы: Normal mode, Positive sign self-test, Negative sign self-test
Напряжение питания	2,4–3,6 В
Напряжение на выводах I/O	от 1,8 В
Внешние прерывания	INT1 и DRDY/INT2
Ток в нормальном режиме работы	6,1 мА
Ток в энергосберегающем режиме	1,5 мА
Регистр данных	16 бит
Корпус	LGA-16
Габаритные размеры	4×4×1,1 мм
Рабочий температурный диапазон	-40...+85 °C

ется исключительно высокой температурной стабильностью и может работать в промышленном диапазоне температур -40...+85 °C.

Технические характеристики I3G4250D приведены в таблице 2. Более подробную информацию можно найти в [6].

Магнитометры

Магнитометры производства STM позволяют измерять магнитное поле Земли по трем координатным осям. Магнитометры (Digital output magnetic sensor) не имеют механической части и не относятся к классу МЭМС. Поскольку во второй части статьи будут рассматриваться МЭМС-блоки движения, в состав которых входят магнитометры, то представляется целесообразным уделить им также внимание.

Структурная схема магнитометра производства STM показана на рис. 4.

Магнитометр состоит из двух частей — чувствительного элемента и электронного измерительного блока. При изготовлении чувствительных элементов магнитных датчиков на базе кремниевых пластин фирма STM использует анизотропную магниторезистивную технологию (anisotropic magneto-resistive). Принцип действия таких сенсоров основан на эффекте изменения сопротивления тонкой полоски ферромагнитного материала под действием внешнего маг-

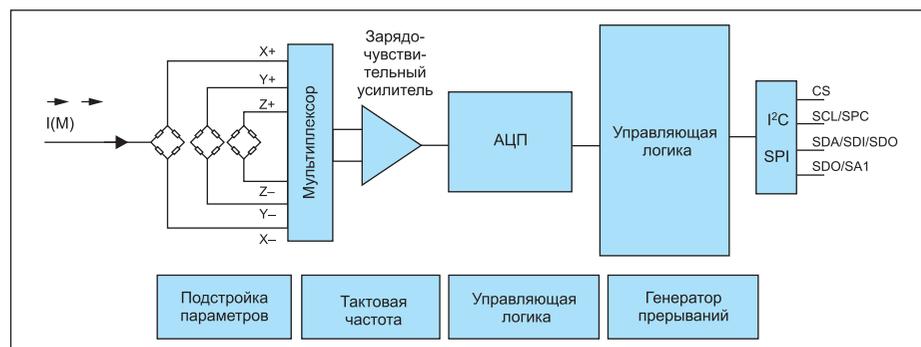


Рис. 4. Структурная схема магнитометра производства STM

нитного поля. Ток через такой ферромагнетик определяется нелинейной зависимостью от внешнего магнитного поля (на уровне сенсорного элемента осуществляется линеаризация, и благодаря интегрированной цифровой части выход выглядит как пропорциональный).

Отличительными чертами магнитометров компании STM являются сверхнизкое энергопотребление, высокая производительность и миниатюрный корпус. Благодаря этим характеристикам магнитометры STM успешно используются в новых разработках мобильных телефонов, планшетов и персональных навигационных устройствах.

Магнитометры STM могут быть настроены таким образом, чтобы выдавать сигнал прерывания по заранее заданному направлению в 3-координатной системе.

Возможно три варианта считывания показаний по координатным осям X и Y:

- непрерывное преобразование — Continuous-conversion mode;
- одномерное преобразование — Single-conversion mode;
- выключено — Power-down mode.

В качестве примера можно привести новый (май 2015 года) магнитометр LIS3MDL [7]. В зависимости от заданного значения частоты семплирования (ODR) магнитометр

может работать в четырех режимах энергопотребления:

- минимальное энергопотребление — Low-power mode;
- средняя функциональность — Medium-performance mode;
- высокая функциональность — High-performance mode;
- ультравысокая функциональность — Ultra-high-performance mode.

В магнитометре LIS3MDL имеется 14 регистров, с помощью которых контролируется его работа. Алгоритм управления магнитометром аналогичен описанному выше алгоритму управления акселерометром.

Технические характеристики нового магнитометра LIS3MDL приведены в таблице 3.

Подробно работа магнитометра LIS3MDL описана в [7].

Продолжение следует

Литература

1. www.memx.com/products.htm
2. www.st.com/web/catalog
3. www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89/SC1288
4. www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89/SC444/PF261516
5. www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89/SC1288
6. www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89/SC1288/PF261537
7. www.st.com/web/en/catalog/sense_power/FM89/SC1449/PF255198

Таблица 3. Технические характеристики магнитометра LIS3MDL

Диапазон измерения, Гаусс	±4/±8/±12/±16
Среднее значение уровня шума по осям X, Y	3,3 мГаусс (mgauss)
Среднее значение уровня шума по оси Z	4,1 мГаусс (mgauss)
Разрешение в диапазоне FS = ±4 gauss	0,14 gauss/LSB (Гаусс/НЗБ)
Нелинейность в диапазоне измерений ±12 Гаусс	±0,12%
Скорость считывания данных (ODR)	0,625–80 Гц
Интерфейсы	SPI и I ² C
Функция самотестирования по осям X, Y в диапазоне измерений ±12 Гаусс	1–3 Гаусс
Функция самотестирования по оси Z в диапазоне измерений ±12 Гаусс	0,1–1 Гаусс
Напряжение питания	1,9–3,6 В
Напряжение на выводах I/O	1,8 В
Внешние прерывания	1×INT и 1×DRDY
Ток в режиме Power Down	1 мкА
Ток в режиме Low Power	40 мкА
Ток в высокоскоростном режиме	270 мкА
Регистр данных	16 бит
Встроенный температурный датчик	8 LSB/°C
Корпус	LGA-12
Габаритные размеры	2×2×1 мм
Рабочий температурный диапазон	–40...+85 °C
Предельно допустимое значение	1000 Гаусс
Предельно допустимые ударные нагрузки	3000 g (в течение 0,5 мс)