

Автомобильные гироскопы

Светлана СЫСОЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

В статье рассказывается о применениях, технологиях, рабочих принципах и элементной базе автомобильных гироскопов, представленных на современном рынке.

Введение

Гироскопы — это устройства, которые измеряют угловую скорость (angular rate) вращающегося объекта. В автомобильных применениях гироскопы используются для измерения скорости вращения автомобиля теоретически относительно трех осей: вертикальной (yaw), поперечной (pitch) или продольной (roll), но наиболее обычными из них являются yaw (yaw rate sensor) и roll (angular rate gyros) типы гироскопов.

Ключевые автомобильные применения, для которых разрабатываются новые гироскопы, это:

- Обнаружение крена машины и боковых опрокидываний (Rollover).
- Навигационные системы (GPS и другие).
- Контроль динамики автомобиля ESC, а также АБС.
- IMU.

В автомобильных системах безопасности и комфорта автомобилей класса high-end также востребованы гироскопы, мигрирующие, например, от потребительских применений — таких как контроль многих входных данных и стабилизация видеокамер. Гироскопы могут применяться, например, и для корректировки высоты и стабильности подвески в зависимости от угловой скорости крена (roll) автомобиля.

MEMS-гироскопы играют все более увеличивающуюся роль в автомобильных применениях, и рынок не ограничивается автомобильными применениями. Мировой рынок MEMS-гироскопов, согласно прогнозам, достигнет \$800 млн уже в 2010 году.

Гироскопы классифицируются как в зависимости от применения, так и по их исполнениям: инерциальные (inertialgrade), тактические (tactical-grade) и показателя скорости (rate-grade devices).

В автомобиле преобладают гироскопы скорости вращения. Типичные автомобильные применения включают диапазон полной шкалы в 50–300°/с и разрешение в 0,5–0,05°/с в полосе пропускания менее 100 Гц, в зависимости от применения. Стандартная рабочая температура от –40 до +85 °С.

Многие современные типы автомобильных гироскопических устройств представляют собой вибрационные кориолисовы гироскопы, в которых для определения вращения используется вибрирующий механический элемент [1–18].

В более ранних устройствах для совершенствования колебаний использовался макроскопический пьезоэлектрический кристалл кварца. По мере развития MEMS-технологий колебательные функции все чаще выполняет кремниевый кристалл, совместимый с технологиями ИС, включающими схемы обработки сигнала и различные интерфейсы.

Основные технологии, реализуемые в современных гироскопах, включают:

- камертонные гироскопы Tuning Fork Gyroscope;
- вибрирующее колесо — гироскоп Vibrating Wheel;
- полусферические резонансные гироскопы Wine Glass Resonator Gyroscopes;
- кольцевой резонатор — гироскоп Ring Resonator Gyroscopes;
- вращающееся колесо — гироскоп Spinning Wheel Gyroscope;
- лазерные гироскопы;
- волоконно-оптические гироскопы;
- микрооптические электромеханические гиросистемы Micro-Optical-Electromechanical Systems (MOEMS) Gyros;
- интерферометрические MOEMS-гироскопы.

Теория, основные рабочие принципы и технологии гироскопов

Макро-гироскопы

Традиционные вращающиеся гироскопы, известные более 200 лет, действуют на основе следующего принципа: если вращающийся объект наклонить перпендикулярно к направлению вращения, то он будет иметь прецессию. Это означает, что если прикладывать к гироскопу постоянную внешнюю силу, то он начнет поворачиваться вокруг третьей оси, не совпадающей по направлению с основной осью вращения ротора. Прецессия, величина которой пропорциональна величине действующей силы, удерживает устройство, ориентированное в вертикальном направлении, причем может быть измерен угол наклона относительно опорной поверхности. Однажды раскрученное устройство стремится сопротивляться изменениям в его ориен-

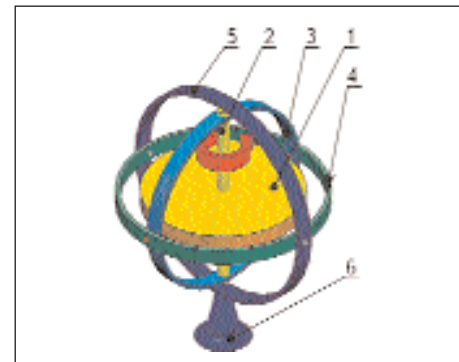


Рис. 1. Модель традиционного гироскопа с тремя степенями свободы:
1 — ротор; 2 — вал; 3 — внутренний подвес;
4 — внешний подвес; 5 — опорный подвес; 6 — опора

тации вследствие углового момента. Этот эффект известен в физике как гироскопическая инерция. В случае прекращения внешнего воздействия прецессия мгновенно заканчивается, но ротор продолжает вращаться.

Основным элементом гироскопа является ротор spinning wheel, размещенный на вращающейся оси (рис. 1). Ротор гироскопа характеризуется тремя степенями свободы (три оси возможного вращения), которые обеспечиваются двумя рамками карданного подвеса. Ротор закреплен во внутреннем карданном подвесе или кольце, имеющем возможность колебаний во внешнем карданном подвесе, который, в свою очередь, может совершать колебания относительно опоры. Внешний подвес закреплен так, что возможно вращение вокруг одной оси в его собственном плане (одна степень свободы), при этом его ось вращения не имеет ни одной степени свободы. Внутренний подвес закреплен во внешнем подвесе так, что может осуществлять вращение вокруг одной оси в собственном плане, причем эта ось всегда нормальна к оси вращения ротора.

Таким образом, внутренний подвес обладает двумя степенями угловой свободы, его ось также обладает одной степенью свободы. Следовательно, ротор обладает тремя степенями угловой свободы, его ось — двумя. Ротор реагирует на силу, приложенную к входной оси, силой реакции вокруг выходной оси, то есть, если на такое устройство не действуют

внешние возмущения, ось собственного вращения ротора сохраняет постоянную пространственную ориентацию в пространстве, но под действием момента внешней силы, стремящегося повернуть ось собственного вращения (например, при наклоне гироскопа), ось начинает вращаться, причем не вокруг направления момента, а вокруг оси, перпендикулярной ему (прецессия — движение, ортогональное направлению наклона). Для устранения многочисленных факторов ошибок в гироскопах используется фиксирование осей пружинами — тогда напряжение пружины будет пропорционально скорости прецессии.

Гироскоп может указывать угол поворота относительно основания, на котором он закреплен, а также угловую скорость. Из-за этих свойств гироскоп может применяться в автоэлектронике как датчик угла поворота или угловой скорости.

Оптические гироскопы — следующий тип гироскопических устройств, основанные на том, что лазерный луч многократно отражается в замкнутом контуре, при вращении которого длительность между моментом излучения и получения сигнала будет различной. Оптические гироскопы представляют собой различные модификации интерферометров Сагнака (Sagnac). (Эффект Сагнака состоит в явлении кольцевой интерферометрии. Принцип действия этих устройств основан на том, что два луча посылаются вокруг кругового пути в противоположных направлениях и, в зависимости от угловой скорости вращения пути, интерферометрическим детектором может быть обнаружен фазовый сдвиг, так как скорость света почти всегда остается постоянной).

В лазерных гироскопах RLG (Ring Laser Gyro), получивших применение приблизительно в 1960-х годах, кольцевой путь луча обеспечивается зеркалами. Обычно кольца представляют собой треугольники или прямоугольники с зеркалами на каждом углу.

Теория работы гироскопов дизайна Ring Laser показана на рис. 2. Простейший лазер-

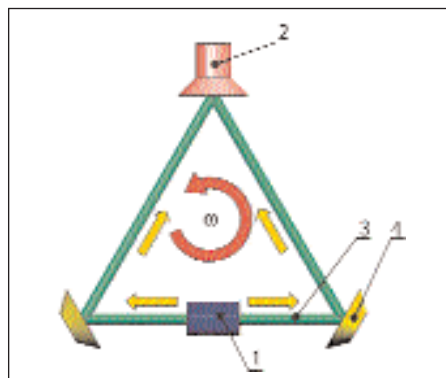


Рис. 2. Иллюстрация принципов работы волоконно-оптических гироскопов:

- 1 — двунаправленный лазерный источник света;
- 2 — детектор; 3 — двунаправленный (направленный в противоположных направлениях) лазерный луч;
- 4 — зеркала

ный гироскоп представляет собой даже не кольцо, а треугольник. Лазерный источник выводит два луча, направленных в противоположных направлениях вокруг кольца, до момента достижения ими детектора. Детектор считает частоту биений комбинированной световой волны, которая прямо пропорциональна углу поворота гироскопа.

Два главных источника погрешностей кольцевых лазерных гироскопов — смещение и мертвая зона на малых углах. Смещение является следствием различных коэффициентов преломления пар лучей.

В FOG (Fiber Optic Gyro) путь лазера обеспечивается посредством оптоволокну. Волоконно-оптический гироскоп также использует интерференцию света, для того чтобы обнаруживать механическое вращение. Датчик представляет собой катушку оптоволокну, по которой два луча направляются в противоположные стороны и, согласно эффекту Сагнака, луч, путь которого лежит против вращения, проходит меньшее расстояние, что вызывает интерференцию лучей на детекторе, пропорциональную угловой скорости.

FOG показывают более высокое разрешение и более высокую точность, чем RLG, но и более высокий дрейф, а также чувствительность к поперечной вибрации, ускорению и ударам.

Преимущества оптических гироскопов по сравнению с вращающейся массой состоят в отсутствии инерции, бесконтактности (хотя лазерный луч и оптоволокну характеризуются не бесконечным сроком службы), большей гибкости, большей надежности, а также в меньшем размере и весе.

В настоящее время интенсивно развиваются оптические MEMS, и это касается всех сфер применения, в том числе и гироскопов. Многие компании сфокусировали свои разработки на построении массивов объемных кремниевых микромеханических зеркал и их интеграции с обрабатывающей и управляющей электроникой [1]. Перспективы этих устройств для автоэлектроники значительны, и, по мере коммерциализации технологий, будут обсуждаться в дальнейшем.

Кориолисовы вибрационные гироскопы

Принцип работы вибрационных кориолисовых гироскопов основан на том, что вращающийся вибрационный элемент (вибрационный резонатор) подвержен эффекту Кориолиса, состоящему в том, что вызывается вторичная вибрация, ортогональная оригинальному направлению вибрации. Детектирование параметров вторичной вибрации позволяет определять угловую скорость.

Эффект Кориолиса может быть понятно объяснен при помощи рис. 3 [2]. При вращении вибрирующей плоскости возникает ускорение (или сила) Кориолиса, пропорциональное скорости вращения. Объект, размещенный на вращающейся платформе радиусом r и перемещаемый вместе с платформой с угловой скоростью ω , характеризуется танген-

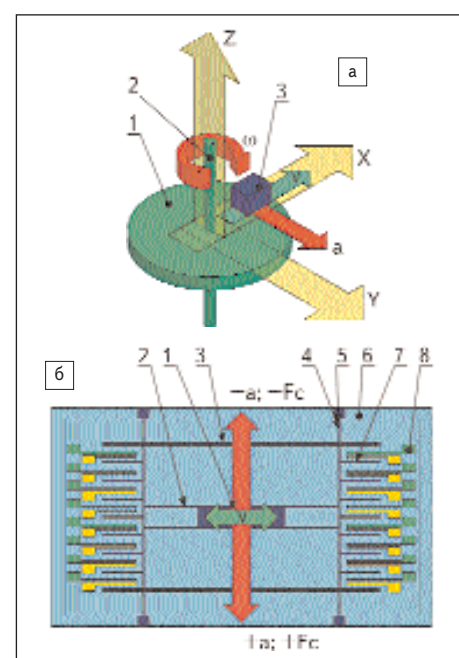


Рис. 3. Иллюстрация принципов работы вибрационного кориолисова гироскопа:

- a — упрощенная физическая модель:
- 1 — ротор, вращающийся вокруг оси Z со скоростью ω ;
- 2 — вал;
- 3 — вибрационная масса, перемещающаяся со скоростью v ; a — ортогональное кориолисово ускорение;
- б — пример резонансной структуры с направлением вибрационного движения v , в которой ускорение a и сила Кориолиса детектируются емкостными пальцеобразными электродами:
- 1 — инерционная масса;
- 2 — пружины для резонансного перемещения массы;
- 3 — подвижный фрейм;
- 4 — пружины для перемещения фрейма;
- 5 — точки крепления фрейма на подложке;
- 6 — подложка (опорный фрейм);
- 7 — емкостные электроды подвижного фрейма для детектирования перемещения массы;
- 8 — неподвижные емкостные электроды подложки для детектирования перемещения массы

циальной скоростью ωr относительно Земли. Объект, приближенный к центру, отличается значительно меньшей тангенциальной скоростью, чем объект, размещенный ближе к краю платформы в результате его перемещения в радиальном направлении. Скорость увеличения тангенциальной скорости, вызванная радиальной скоростью v , представляет собой ускорение Кориолиса.

Если r изменяется вместе со скоростью v , тангенциальное ускорение Кориолиса составит $2\omega v$. При наличии массы объекта M платформа должна прикладывать силу реакции опоры $2M\omega v$.

В вибрационных гироскопах вместо подвижного объекта используется резонирующая масса, размещаемая на вращающейся платформе. Для того чтобы измерять ускорение Кориолиса, которое испытывают масса и фрейм и вследствие этого оба перемещаются в сторону на 90° от вибрационного движения, фрейм с резонирующей массой прикрепляется к подложке посредством пружин,

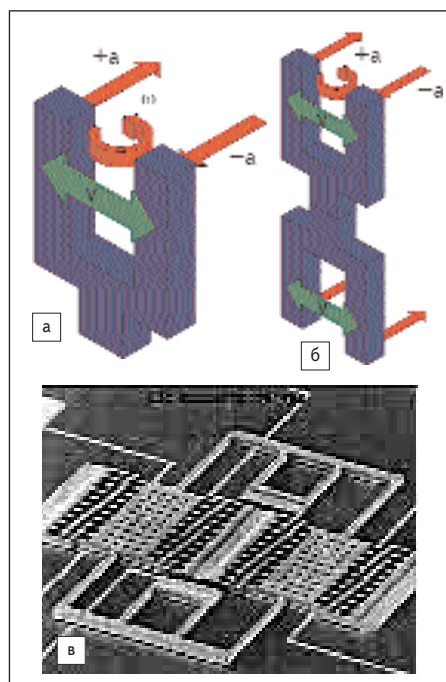


Рис. 4. Принцип работы резонансного камертонного гироскопа:
 а — иллюстрация скручивания резонирующего камертона под действием входного вращения и ускорения Кориолиса;
 б — пример реализации дифференциальной камертонной структуры с управляющими резонансными воздействиями, смещенными друг относительно друга на 180°;
 в — SEM-изображение первого камертонного гироскопа лаборатории Charles Stark Draper Laboratory

размещенных также ортогонально к резонансному движению. Для измерения ускорения Кориолиса часто используются пальцеобразные конденсаторные обкладки (рис. 3б). Если пружины характеризуются жесткостью K , перемещение относительно фрейма составит $2 \omega \text{ м/К}$. При увеличении скорости вращения ω увеличивается и перемещение массы, и сигнал формируется на основе соответствующего емкостного изменения.

Гироскоп может находиться в любом положении относительно вращающегося объекта, но его сенсорная ось должна быть тангенциальной направлению вращения.

Камертонные гироскопы

Микромеханические гироскопы дизайна tuning fork впервые были разработаны Charles Stark Draper Laboratory в 1991–1993 годах (рис. 4).

Tuning Fork Gyroscope — это устройства, в которых две кремниевые массы совершают колебания равной амплитуды, но в противоположном направлении. При вращении сила Кориолиса создает ортогональную вибрацию, которая может измеряться различными средствами, образуя сигнал, пропорциональный смещению от плоскости.

Физическая модель эквивалентна двум зубцам камертона, связанным посредством соединительной балки, которые резонируют с определенной амплитудой. Когда зубцы

вращаются, сила Кориолиса действует как сила, перпендикулярная проекциям зубцов в плоскости камертона, которая обнаруживается как поворот или скручивание (рис. 4а). Данная сила пропорциональна приложенной угловой скорости.

Гироскоп Charles Stark Draper Laboratory использует пальцеобразные емкостные электродные структуры — для того чтобы вводить камертон в резонанс и осуществлять его вращение вокруг любой оси в плоскости ИС (рис. 4в). Помимо емкостного, могут быть использованы также электростатические, электромагнитные, пьезоэлектрические или пьезорезистивные измерительные принципы.

Первый гироскоп Charles Stark Draper Laboratory разрешением $4000^\circ/\text{ч}$ и дрейфом в $1^\circ/\text{ч}$ был разработан именно для автомобильной промышленности и применялся для контроля проскальзывания в АБС. Затем характеристики гироскопов tuning fork были улучшены. В 1994 году было достигнуто разрешение $500^\circ/\text{ч}$, в 1997 году — $100^\circ/\text{ч}$. Стабильность дрейфа достигла величины $0,1^\circ/\text{ч}$. При этом также были значительно снижены шумы и повышен SNR [3].

Технологию Draper's Tuning Fork в свое время приобрела корпорация Honeywell — для того, чтобы применять ее вместо своих лазерных гироскопов.

В настоящее время дизайн tuning fork — один из наиболее популярных и успешных MEMS-дизайнов, его используют такие ведущие компании, как Analog Devices, Bosch, Melexis, Systron Donner или Matsushita.

Гироскопы дизайна Vibrating-Wheel

Гироскоп Vibrating-Wheel включает колесо, которое вибрирует вокруг своей оси симметрии. Вращение в плоскости образует наклон колеса, который определяется, например, емкостными электродами (рис. 5а).

Этот дизайн позволяет определять две оси вращения с одним вибрирующим колесом. Поверхностный микромеханический поликремниевый гироскоп дизайна vibrating wheel gyro впервые был разработан U.C. Berkeley Sensors and Actuators Center (рис. 5б). В настоящеем эта технология используется компанией Bosch.

Гироскопы дизайна Wine Glass Resonator

Гироскопы дизайна Wine Glass Resonator изготавливаются из расплавленного кремнезема и известны также как полусферические резонансные гироскопы hemispherical resonant gyro. Исследователи Мичиганского университета (University of Michigan) разработали различные модификации кольцевого резонирующего гироскопа resonant ring gyros в планарной форме. В гироскопе wine glass gyro резонансное кольцо (resonant ring) вводится в резонанс, и положение узловых точек индицируют угол вращения. В настоящее время аналогичные исследования проводят ученые Калифорнийского университета (University of California), также заинтересованные в приобретении ведущих позиций в области MEMS-гироскопов [4–7].

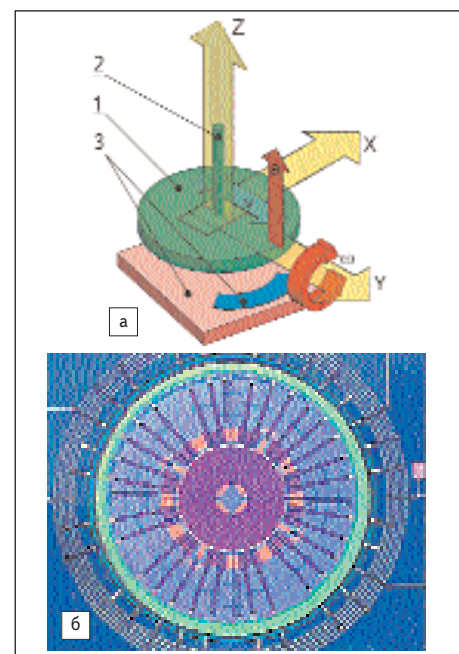


Рис. 5. Принцип работы гироскопа vibrating wheel:
 а — схематический дизайн гироскопа vibrating wheel:
 1 — вибрирующее колесо;
 2 — вал (элемент модели для осуществления вибрации);
 3 — подложка с емкостными электродами для детектирования подъема или снижения массы ротора под действием силы (ускорения) Кориолиса;
 б — поликремниевый гироскоп дизайна vibrating wheel gyro, разработанный U. C. Berkeley Sensors and Actuators Center

Технология vibratory ring лежит в основе коммерчески доступных гироскопов Silicon Sensing Systems.

Помимо рассмотренных выше основных типов MEMS-гироскопов разрабатываются и некоторые другие типы устройств, одно из которых описано в [3].

Пьезоэлектрический гироскоп Piezoelectric Plate Gyroscope

Данный тип гироскопов использует в качестве основы плату из материала PZT [3]. Пьезоэлектрический гироскоп функционирует подобно многим другим вибрационным MEMS-гироскопам, причем вибрирующим телом в данном случае служит пьезоэлектрический лист из материала PZT, характеризующийся длиной и шириной, много большей, чем ее высота. Вибрация листа осуществляется в направлении толщины материала, что требует переменного напряжения, прикладываемого поперек пластины. Когда вибрирующая плата вращается вокруг оси, перпендикулярной управляющему напряжению, наводится напряжение в третьем ортогональном направлении, пропорциональное угловой скорости.

Используемый в прошлом для построения макроустройств, достаточно простой по сравнению с гироскопами fork или ring-типов, рассматриваемый дизайн легко реализуем и на микроуровнях. Преимущество перед обычными вибрационными гироскопами состоит в том, что для получения читаемого выхода требуется много меньшее управляющее напря-

Таблица. Сравнительные технические данные основных коммерчески доступных автомобильных гироскопов

| Датчик / параметр | Функциональное описание | Тип выхода | Динамический диапазон, °/с | Чувствительность, мВ/°/с, LSB/°/с | Частотная полоса, Гц | Шумовая плотность, °/с/√Гц | Нелинейность, % | Напряжение питания, В | Ток потребления, мА | Температурный диапазон, °С | Корпусирование | Производитель |
|-------------------|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------|--|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| ADXR150 | Датчики угловой скорости на основе технологии iMEMS | Аналоговый | ±150 | 12,5 ±10% мВ/°/с | 0–2000 | 0,05 | 0,1 | 4,75–5, 25 | 6 | –40...85 | BGA-32 (7×7×3) мм | Analog Devices |
| ADIS16080 | Датчики угловой скорости с цифровым интерфейсом | SPI | ±80 | 10,2 LSB/°/с | 0–40 | 0,05 (0,53 LSB rms/√Hz) | – | | 7 | | LGA-16 (8,2×8,2×5,2) мм | |
| ADIS16250 | Программируемый малоомощный гироскоп | SPI | ±80/±160/±320 | 54,6 LSB/°/с | 0–50 | 0,05 | – | | 18 (0,5 в режиме малого энергопотребления) | | LGA-20 (11×11×5) мм | |
| ADIS16350 | Трехосевой гироскоп & акселерометр | SPI | (±80...±320)°/с (гироскоп); ±10 g (акселерометр) | 0,018 °/с/LSB | 0–350 | 0,05 | – | | 48 (0,5 в режиме малого энергопотребления) | | (22,7×23,2×22,9) мм | |
| SMG040 | Датчики Angular Rate Sensor для применений rollover | Пропорциональный аналоговый выход | ±250 | 6,72 мВ/°/с | 21–33 | <2,0°/с rms | ±1 | 4,8 | < 30 | –40...85 | SMD: PLCC44 | Bosch |
| SMG045 | Датчики Angular Rate Sensor для применений в навигации | | ±75 | 24 мВ/°/с ±8% | 7–11 | | | | < 35 | | | |
| SMG060 | Датчики Angular Rate Sensor для применений rollover | | SPI | ±240 | 2 LSB/°/с | | | | 27–33 | | | |
| SMG061 | Датчики Angular Rate Sensor для применений rollover | Аналоговый пропорциональный выход | ±80 | 7 мВ/°/с | 9–11 | <0,5°/с rms | ±0,3 | 4,45–5,5 | 10 | –40...+105 | SMD: PLCC44 | Bosch |
| SMG065 | Датчики Angular Rate Sensor для применений в навигации | SPI | | 6 LSB/°/с | 27–33 | | | | <1,5°/с rms | | | |
| SMG066 | Датчики Angular Rate Sensor для применений в навигации | Аналоговый пропорциональный выход | ±80 | 21 мВ/°/с | 9–11 | <0,5°/с rms | ±0,3 | 4,45–5,5 | <15 | –40...90 | 16-выводной корпус Type 5 | Infineon |
| SAR10 | Датчики Angular Rate Senso | SPI | ±250 | 1 LSB/°/с ± 6% | 0–50 | <1,5°/с rms | ±0,3 | 4,45–5,5 | 17 | –40...90 | 16-выводной корпус Type 5 | Infineon |
| CRS03-02 | Аналоговые гироскопы | Аналоговый | ±100 | 20 мВ/°/с | 0–10 | <1 мВ rms (3–10 Гц) | < 0,5 | 5±0,25 | <50 | –40...85 | корпус (29×18×29) мм | SILICON SENSING SYSTEMS Japan |
| CRS03-04 | | | ±200 | 10 мВ/°/с | 0–10 | | | | | | | |
| CRS03-11 | | | ±573 | 3,49 мВ/°/с | 0–50 | | | | | | | |
| CRS07-11 | | | ±573 | 3,49 мВ/°/с | 0–30 | | | | | | | |
| MLX90609-N2 | Навигационные гироскопы | SPI и аналоговый | ±75 | 26,67 мВ/°/с ±5% | 0–75 | 0,03°/с/√Гц; 6 мВ | ±0,5 | 5±0,25 | – | –40...85 | SMD CLCC32 | Melexis |
| MLX90609-R2 | Гироскоп для применений Rollover | | ±300 | 6,67 мВ/°/с ±5% | | | | | | | | |
| MLX90609-E2 | Гироскоп для применений VSC | | ±150 | 13,33 мВ/°/с ±5% | | | | | | | | |

жение. Электрические выводы подсоединяются к 6 сторонам образца материала и локализируются в верхней части тонкой мембраны над полостью в кремниевой подложке. Полость придает больше свободы пластине PZT для вибрации и деформирования. Выводы обеспечивают управляющее напряжение и измерение выходного сигнала.

Так как пластина характеризуется x - y -симметрией, одиночная пластина может измерять вращение в двух направлениях. Тем не менее ее чувствительность составляет всего 38 мкВ, тогда как ring-гироскоп обладает чувствительностью, равной приблизительно 200 мкВ. Помимо того, традиционные гироскопы при отсутствии вращения в значительной степени приближаются к идеально нулевому выходу, тогда как пьезоэлектрические гироскопы выводят до 100 мВ смещения. Если управляющее напряжение является переключаемым, то же самое устройство может измерять вращение и в третьем направлении, но с меньшей чувствительностью. Устройство легко интегрируется с чипами ИС. При использовании гироскопов ring или tuning fork фактически требуется три гироскопа для детектирования трех направлений вращения.

Квантовые гироскопы

В основе квантовых гироскопов лежит эффект Джозефсона (открытый Б. Джозефсоном в 1962 году в Кембриджском университете), состоящий в том, что электрический ток может мигрировать между двумя сверхпроводящими материалами, разделенными тонким слоем изолятора.

Эффект Джозефсона стал относиться затем к поведению двух слабо связанных квантовых систем, сформированных молекулами, которые обладают идентичными волноподобными свойствами. Эффект Джозефсона относится также к соединению двух сверхпроводящих жидкостей: когда давление прикладывается к одной стороне слабой связи, жидкость будет колебаться от одной стороны слабой связи к другой.

Если взять любую трубку, сформованную в виде тора и содержащую сверхпроводящую жидкость (liquid helium-3), которая имеет два места со слабым соединением (тонкие перфорированные мембраны нитрида кремния), то приложением малых значений давлений создается волна с частотой, зависящей от давления, и амплитудой, зависящей от вращения тора и измеряемой электрическими методами. Автор этой модели первого квантового гироскопа, отличающегося сверхчувствительностью, — Ричард Паккард (Richard Packard) и его коллеги из Калифорнийского университета (University of California, Berkeley).

Основные технические факторы, управляющие рынком гироскопов

Большинство современных исследований в области MEMS-гироскопов направлено на реализацию технологий поверхностной микромеханики и создание однокристалльных исполнений с 6 степенями свободы для IMU.

Как следует из теории и принципов работы, рассмотренных выше, гироскопы пред-

ставляют собой сложные MEMS-устройства, интегрированные в одно устройство, включающие самонастраивающийся резонатор в управляющей оси и микродатчик ускорения в сенсорной оси. Абсолютное значение кориолисовой силы и ускорения на порядок меньше, чем ускорения, детектируемые высокообъемными автомобильными MEMS-акселерометрами.

Главной проблемой MEMS-гироскопов является достижение высоких уровней исполнений и низкой цены. Современные автомобильные гироскопы могут стоить порядка \$40 для таких востребованных применений, как VSC, навигационные системы, и несколько меньше для таких применений, как обнаружение событий rollover. Характеристики гироскопов чувствительны к производственным допускам, погрешностям корпусирования, линейному ускорению, температуре. Для того чтобы достигнуть высоких объемов и низкой цены, много факторов должно учитываться еще на стадии проектирования.

Обзор современного рынка автомобильных вибрационных гироскопов

Ведущие производители автомобильных гироскопов — это Analog Devices, Bosch, Denso, BEI Systron Donner, Silicon Sensing Systems, Infineon, Matsushita, Melexis. Сравнительные технические данные некоторых устройств, рассматриваемых далее, приведены в таблице.

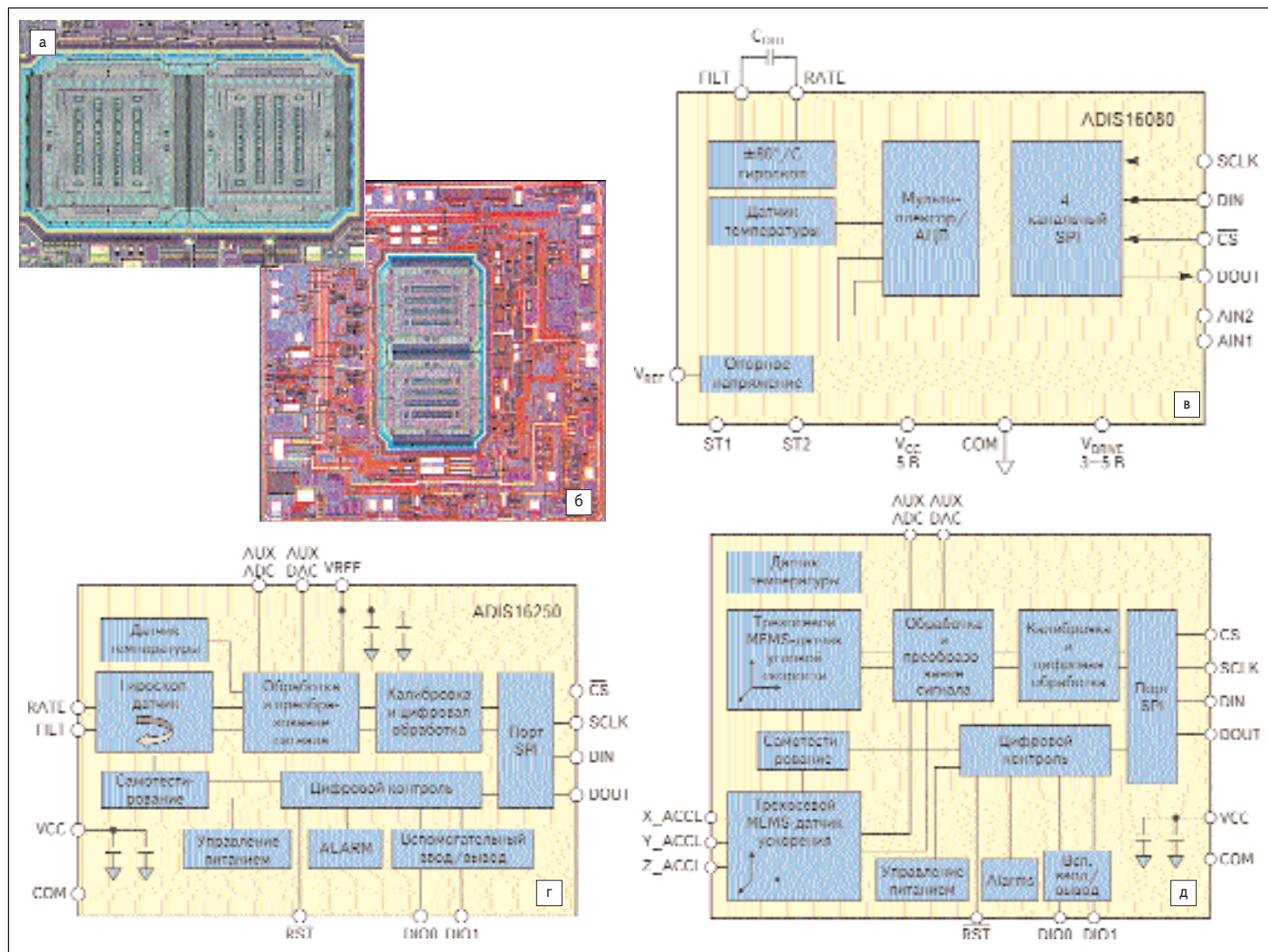


Рис. 6. Технологии гироскопов Analog Devices:

- а — фотография механической части датчика семейства гироскопов ADXR с двумя дифференциальными структурами для минимизации влияния внешних вибраций и ударов;
- б — фотография кристалла датчика ADXR, интегрирующего сенсорную часть и схему обработки сигнала;
- в — функциональная блок-диаграмма базового устройства семейства ADIS — цифрового гироскопа ADIS16080 с SPI интерфейсом;
- г — программируемый маломощный датчик ADIS16250; д — трехосевой акселерометр и гироскоп ADIS16350

Гироскопы Analog Devices

Компания Analog Devices — технологический лидер в области MEMS-гироскопов, представляющих собой различные модификации камертонных гироскопов tuning forks [2, 8–12].

Технологии iMEMS® и iSensor™ Gyros компании Analog Devices составляют основу растущего семейства MEMS-гироскопов yaw rate типа. iMEMS означает акцент на полностью интегрированном решении датчика, включающего поверхностную микромеханическую структуру и схему обработки на одном кремниевом кристалле. Базовые принципы iMEMS Gyros реализованы в линейке датчиков ADXR (рис. 6а-б).

iSensor Gyros означает дополнительную интеллектуальную функциональность гироскопов, встроенную обработку сигнала и контроль — признаки, наиболее полно реализованные компанией в линейке датчиков ADIS Gyros, значительно пополненной в течение

второго полугодия 2006 года и насчитывающей в настоящий момент 7 устройств.

Гироскопы обоих семейств ADI выполнены на одном кремниевом кристалле, который включает механическую часть датчика и ASIC. Масса привязывается к поликремниевому фрейму, что позволяет ей резонировать только в одном направлении (исключение составляет только ADIS16350 — трехосевой датчик, детектирующий угловое и линейное движение). Емкостные кремниевые сенсорные элементы с неподвижными кремниевыми консолями, прикрепленными к подложке и резонатору, детектируют наведенное силой Кориолиса смещение резонирующей массы и фрейма.

Емкостные элементы представляют собой кремниевые балки, связанные с двумя настройками кремниевых балок, прикрепленных к подложке, что формирует таким образом два конденсатора с одинаковыми номиналами. Перемещение вследствие вращения на-

водит в этой системе дифференциальную емкость, равную $2 \omega \mu \text{MC/gK}$, что прямо пропорционально угловой скорости [2]. На практике достигается высокая точность данного соотношения, с нелинейностью менее 0,1%.

Линейка семейства ADXR включает три датчика ADXR150 ($\pm 150^\circ/\text{с}$, \$30), ADXR300 ($\pm 300^\circ/\text{с}$, \$30) и ADXR401 ($\pm 75^\circ/\text{с}$, \$22), с применением различных вариантов их корпусирования.

Все гироскопы ADXR — это yaw-rate-гироскопы, но они могут измерять угловую скорость в направлении любой оси за счет выбора подходящего крепления. Эти устройства предназначены для систем автомобильной безопасности, навигации, стабилизации изображений, блоков инерциальных измерений, а также стабилизации платформ, в которых реализована данная технология.

Интеграция электроники и механической части на одном кремниевом кристалле — ключевой признак устройств ADXR. Встро-

енная электроника гироскопов ADXRS позволяет детектировать емкостные изменения порядка 12×10^{-21} Ф при отклонении балок в $0,00016 \text{ \AA}$. Дифференциальный сигнал извлекается на частоте резонатора и может быть отделен от шумов посредством корреляции. Гироскопы ADXRS характеризуются также повышенной устойчивостью к вибрациям и ударам до $1,000 \text{ g}$ — они используют два механически независимых резонатора: для того, чтобы обнаруживать сигналы в дифференциальном режиме и сбрасывать внешние ускорения, не связанные с угловым движением. Как результат, два резонатора измеряют то же вращение, но дают выход противоположной полярности. Для измерения угловой скорости используется разница между двумя сигналами, которые поступают на входы чувствительных предусилителей. Эта схема требует точного согласования сенсорных элементов.

Портфолио гироскопов Analog Devices в последнее время значительно расширилось и включает гироскопы с более высокими рабочими характеристиками, увеличенной функциональностью, а также более эффективные в стоимостном выражении, оптимальным образом заполняющие продуктовый зазор между дорогими и прецизионными устройствами и менее дорогими датчиками. Помимо того, что непрерывно совершенствуется электроника обработки сигнала, компания ADI реализует перспективы создания мультиосевых гироскопов, интегрирующих как акселерометры, так и гироскопы на одном кристалле.

Линейка высокоинтегрированных интеллектуальных датчиков ADIS iSensor в настоящее время включает два датчика с цифровым интерфейсом SPI ADIS16100 ($\pm 300^\circ/\text{c}$, \$34,95) и ADIS16080 ($\pm 80^\circ/\text{c}$, \$34,95), ультрамалощумящий ($0,015^\circ/\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$) аналоговый гироскоп ADIS16120 ($\pm 300^\circ/\text{c}$, \$629,00), программируемые датчики с интерфейсом SPI ADIS16250 ($\pm 20 \dots \pm 320^\circ/\text{c}$, \$41,98), ADIS16251 ($\pm 20 \dots \pm 80^\circ/\text{c}$, \$44,95) и ADIS16255 ($\pm 80 \dots \pm 320^\circ/\text{c}$, \$55,90) — программируемый гироскоп с температурной компенсацией. Новейшее дополнение к семейству — трехосевой гироскоп ADIS16350.

Основное назначение пополняемой линейки ADIS iSensor — повысить рабочие характеристики гироскопов ADXRS дополнительной функциональностью обработки сигнала: калибровка/тюнинг, SPI и другие ASIC-интерфейсы, цифровой ввод/вывод, встроенная интеллектуальность и программирование, управление питанием, вплоть до беспроводных связей и объединения гироскопов с акселерометрами. Гироскопы рассчитаны на различные применения, включая автомобильные — в навигации и противобуксовочных системах. Это однокомпонентное решение на основе технологии Analog Devices iMEMS Motion Signal Processing требует вдвое меньше пространства, чем существующие многокомпонентные дискретные решения, что так-

же снижает системную цену и сроки подготовки производства.

Например, в ADIS16080 (рис. 6в) сигнал с механической части гироскопа подается на последовательность ступеней усиления и демодуляции. Сигнал затем преобразуется в интерфейс SPI, цифровые выходные данные которого пропорциональны входной угловой скорости. Применение внешнего резистора позволяет увеличивать измерительный диапазон. Дуальный сенсорный дизайн сбрасывает внешние g — усилия и вибрацию. Производство датчика вместе с электроникой обработки сигнала повышает устойчивость работы датчика в шумовом окружении. После стадии демодуляции интегрированный ФНЧ первого порядка ограничивает высокочастотные помехи прежде конечного усиления. Частотная полоса регулируется вторым ФНЧ, настроенным на 40 Гц. Применение внешнего конденсатора допускает снижение частотной полосы.

Посредством SPI-интерфейса обеспечивается также доступ к измерениям внешней температуры. Пользователю предоставляется возможность ввода двух аналоговых сигналов. Гироскоп снабжается двумя цифровыми входами самотестирования, позволяющими производить электромеханическое возбуждение датчика и схемы обработки. ADIS16080 выпускается в 16-терминальном корпусе LGA — $8,2 \times 8,2 \times 5,2 \text{ мм}$.

Новое дополнение к семейству датчиков iSensor, например, программируемый гироскоп ADIS16250 в корпусе с размерами LGA ($11 \times 11 \times 5,8 \text{ мм}$) характеризуется малым энергопотреблением и увеличенной функциональностью.

ADIS16120 — это малощумящий датчик угловой скорости, который включает всю необходимую обработку сигнала и обеспечивает аналоговый выход, пропорциональный угловой скорости в динамическом диапазоне $\pm 300^\circ/\text{c}$. Малого смещения и высокой точности позволяет добиться калибровка в условиях производства. Дизайн датчика обеспечивает значительную устойчивость к вариациям температуры, напряжения, линейного ускорения, вибрации и допускам при включении устройства в модуль верхнего уровня.

ADIS16250 (рис. 6г) заполняет продуктовый зазор между дорогими гироскопами ADIS16120 ($\pm 300^\circ/\text{c}$) — порядка \$600 — с ультравысокими рабочими характеристиками (например, шумовая плотность $0,015^\circ/\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$) и датчиками среднего уровня ADIS16100 и ADIS16080.

Гироскоп ADIS16250 построен на семействе ADIS1620 акселерометров iSensor и представляет собой первый MEMS-гироскоп, который обеспечивает цифровое масштабирование и программируемость и предоставляет разработчику возможность одновременного контроля чувствительности, скорости дискретизации, настройки выходной фильтрации, самотестирования, цифровой функции alarm и режимов управления питанием для дости-

жения малого энергопотребления. Выходной интерфейс датчика — SPI, обеспечивающий доступ к 14-битным данным гироскопа, 12-битным — температуры, измерениям напряжения питания, а также вспомогательный аналоговый выход.

Программирование выполняется через стандартный интерфейс. Для программирования датчика выпускается сопрягаемый с ПК оценочный комплект ADISEVAL, обеспечивающий легкий доступ разработчиков к калиброванным цифровым данным ADIS16250 и других датчиков.

В зависимости от требований к применению, чувствительность ADIS16250 может варьироваться в цифровой форме с масштабированием динамического диапазона от $\pm 80^\circ/\text{c}$ до $\pm 320^\circ/\text{c}$. Выходы устройств калибруются при производстве датчиков. ADIS16250 также характеризуется механизмом автообнуления, применяемым для внутрисистемной калибровки и минимизации системных допусков и дрейфов.

ADIS16350 — первый интегрированный датчик ADI на основе технологии iSensorTM, обеспечивающий законченное трехосевое сканирование угловой скорости (в диапазоне $\pm 320^\circ/\text{c}$) и линейного движения — ускорения до $\pm 10 \text{ g}$ в частотной полосе до 350 Гц посредством одного ультракомпактного модуля в корпусе с размерами $22,7 \times 23,2 \times 22,9 \text{ мм}$, включающего встроенную обработку сигнала для калибровки и настройки датчика. SPI-порт, рассчитанный на передачу цифровых данных и программирование, обеспечивает доступ ко всем встроенным датчикам: гироскопам в оси X, Y, и Z; датчикам линейного ускорения в оси X, Y и Z; датчику температуры, мощности, SPI-порт также имеет вспомогательный аналоговый вход. Датчики инерции представляют собой прецизионно выровненные и откалиброванные по смещению и чувствительности устройства.

Системные интерфейсы упрощаются за счет дополнительных программируемых признаков: это встроенная автокалибровка смещения, цифровая фильтрация и контролируемая скорость дискретизации, самотестирование, управление питанием, программируемый мониторинг условий с функцией alarm и вспомогательный цифровой ввод/вывод.

Гироскопы Robert Bosch

Компания Robert Bosch выпускает интегральные кремниевые вибрационные гироскопы, разработанные как для детектирования оси Z (tuning fork) — с вибрацией и направлением чувствительности в плане ИС, так и оси X или Y (vibrating wheel). Концепции Bosch показаны на рис. 7 [13–14].

Для обнаружения крена и систем навигации Bosch разработала две базовые модели датчиков с аналоговым выходом — SMG040 и SMG045. Для этих ИС необходима внешняя схема, выполняющая управление возбуждением гироскопа, усиление сигнала и некоторые другие функции. Линейка специали-

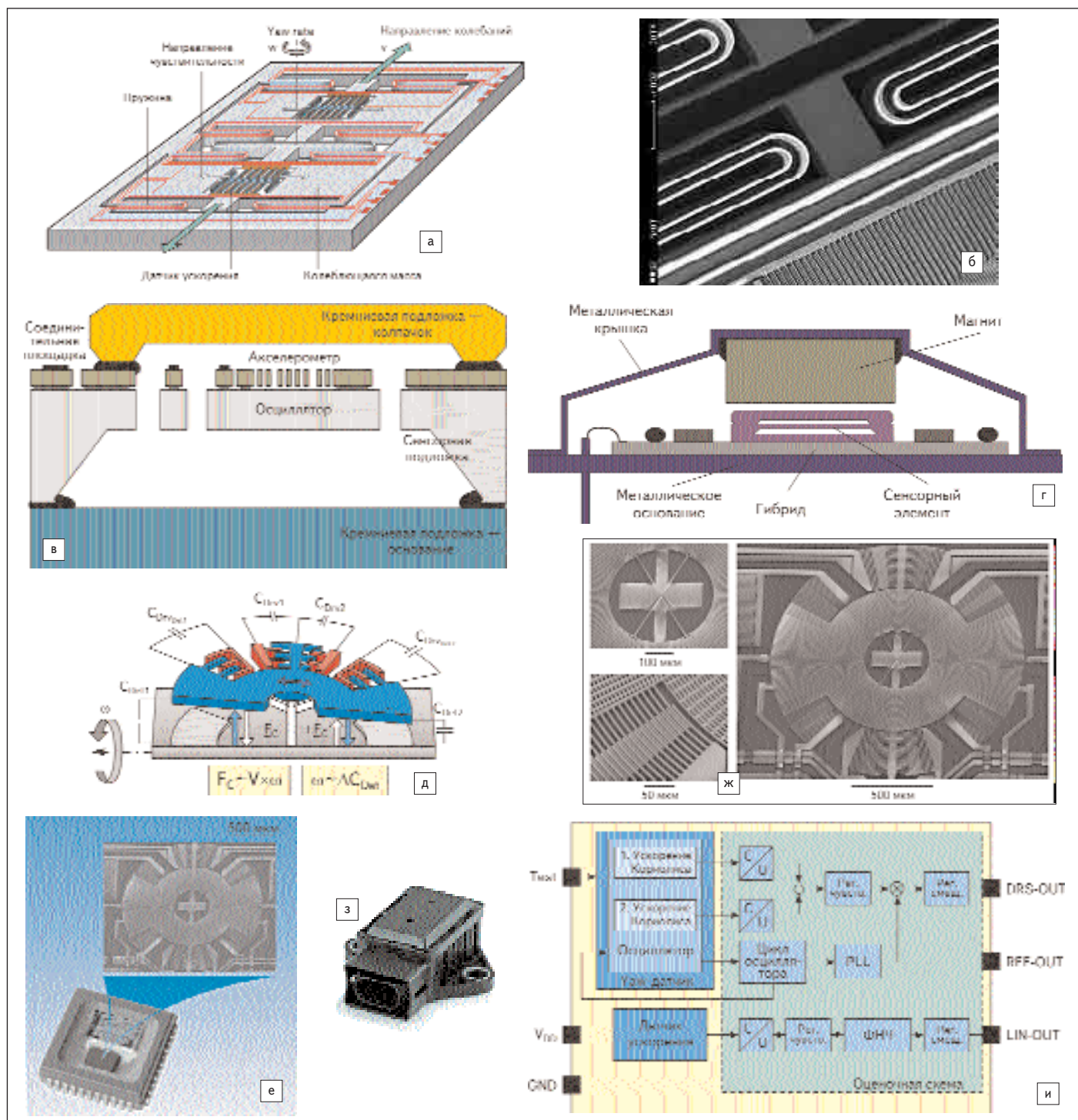


Рис. 7. Концепции интегральных кремниевых вибрационных гироскопов Bosch:

а-г — микромеханический датчик Yaw Rate: а — концепция; б — дизайн; в — корпусирование сенсорного элемента; г — корпусирование модуля; д — датчик угловой скорости Angular rate: C_{DRV} — управляющие конденсаторы; C_{Det} — детектирующие конденсаторы; C_{DRVdet} — конденсаторы, управляющие детектированием; $\pm F_C$ — сила Кориолиса; V — скорость; ω — угловая скорость; е — увеличенная фотография и корпусирование сенсорного элемента; ж — увеличенные изображения участков сенсорного элемента; з-и — автомобильный датчик Yaw rate sensor с микромеханическим датчиком ускорения: з — внешний вид; и — функциональная диаграмма;

зированных интегральных компонентов 2-го поколения, которые производит Bosch, включает аналоговый датчик для обнаружения крена SMG061 и цифровой датчик SMG060, а также датчики для навигационных систем SMG066 с аналоговым выходом и цифровой датчик SMG065. Измерительные диапазоны датчиков варьируются в зависимости от при-

менения: $\pm 240^\circ/c$ и $\pm 250^\circ/c$ (крен) и $\pm 75^\circ/c$ и $\pm 80^\circ/c$ (навигационные системы).

Все ИС гироскопов Bosch построены на основе двухкристальной модели — микромеханического сенсорного элемента и ASIC, осуществляющей функции управления гироскопом, которые объединены в корпусе PLCC44. Сенсорный элемент представляет собой колеблю-

щуюся массу с чувствительной осью в плоскости чипа. Микромеханическая структура уплотняется под вакуумом на уровне подложки.

Сенсорный элемент SMG040 имеет симметричный слой только с одним подвесом в точке крепления. За счет приложения электростатических сил к пальцеобразным структурам масса осуществляет угловые колебания

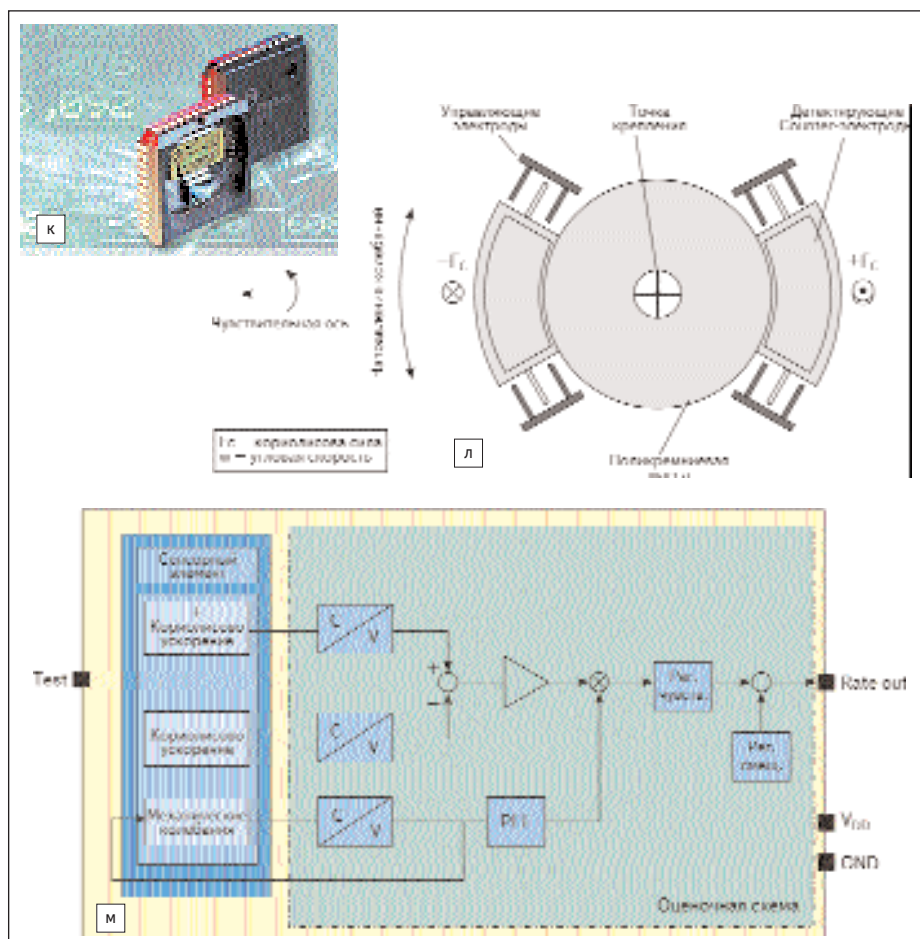


Рис. 7. Концепции интегральных кремниевых вибрационных гироскопов Bosch:
 к-м — микромеханические датчики Angular rate sensor SMG04x и SMG06x;
 к — внешний вид и корпусирование датчиков; л — иллюстрация рабочего принципа vibrating wheel;
 м — функциональная диаграмма датчика SMG040

в точке крепления в центре массы. Управляющее колебание стабилизируется электронным циклом контроля в оценочной ASIC.

Вследствие преобразования углового момента угловая скорость вокруг оси в плане чипа будет вызывать колебания массы в направлении из плоскости.

Электроды, размещаемые на подложке (detection counterelectrodes) под массой, предназначены для емкостного измерения отклонения массы. Сигналы этих электродов модулируются на частоте управляющих колебаний. После усиления и вычитания сигнал, пропорциональный угловой скорости, выделяется при помощи синхронной демодуляции. Корректную фазу демодуляции обеспечивает блок PLL.

Датчик формирует ратиометричный аналоговый сигнал, пропорциональный половине напряжения питания номиналом в 4,8 В. Чувствительность и смещение калибруются к их номинальным значениям при производстве. Тестирование механики и электроники датчика осуществляется приложением логического уровня напряжения к специальному тестовому выводу датчика BITE (Build In Test Equipment).

Сравнительные технические данные датчиков представлены в таблице.

Гироскопы BEI Systron Donner

BEI Systron Donner Automotive Division (SDAD) разрабатывает и поставляет инерциальные датчики для систем обнаружения крена и контроля динамики, а также АБС. Микромеханические кварцевые инерциальные элементы GyroChip датчиков измеряют угловую скорость вращения и линейное ускорение, используя камертонный принцип tuning fork (рис. 8). Датчики формируют сигнал, пропорциональный скорости вращения, используя пьезоэлектрические методы возбуждения и детектирования.

Кварцевые датчики инерции GyroChip производятся с использованием фотолитографических процессов и технологий MEMS, сходных с теми, что применяются при производстве кварцевых часов. Инновационные твердотельные гироскопы SDAD используют сенсорный элемент, который производится методами поверхностной микромеханики из чистого кристаллического кварца. Применение пьезоэлектрического кварцевого материала упрощает сенсорный элемент, а также обеспечивает чрезвычайно высокую температурную

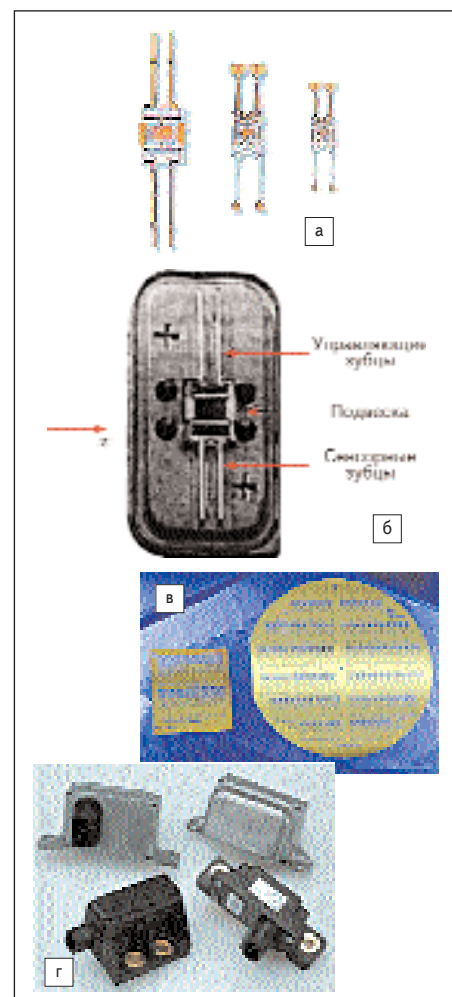


Рис. 8. Гироскопы BEI Systron Donner:
 а — кварцевый сенсорный элемент;
 б — кварцевые элементы, размещенные в металлической головной части;
 в — схематическое изображение подложки инерциальных датчиков MEMS;
 г — семейство закорпусированных автомобильных датчиков — гироскопов и сенсорных кластеров

и долговременную стабильность, равно как и увеличенную надежность и долговечность.

В отличие от традиционных сложных механических гироскопов с сотнями индивидуальных прецизионных частей и ограниченным сроком службы, кварцевые датчики SDAD включают монолитный сенсорный элемент, работающий без режимов работы, вызывающих износ.

По сравнению с другими твердотельными технологиями, Fiber Optic Gyroscopes (FOG) и Ring Laser Gyroscopes (RLG), которые характеризуются значительными временными и денежными затратами, технология SDAD отличается простотой сенсорных элементов и удовлетворительным соотношением высокие объемы/низкая цена.

Каждый сенсорный элемент закорпусирован в герметичные металлические головные части, которые в комбинации с дискретной электроникой устанавливаются в сенсорные блоки.

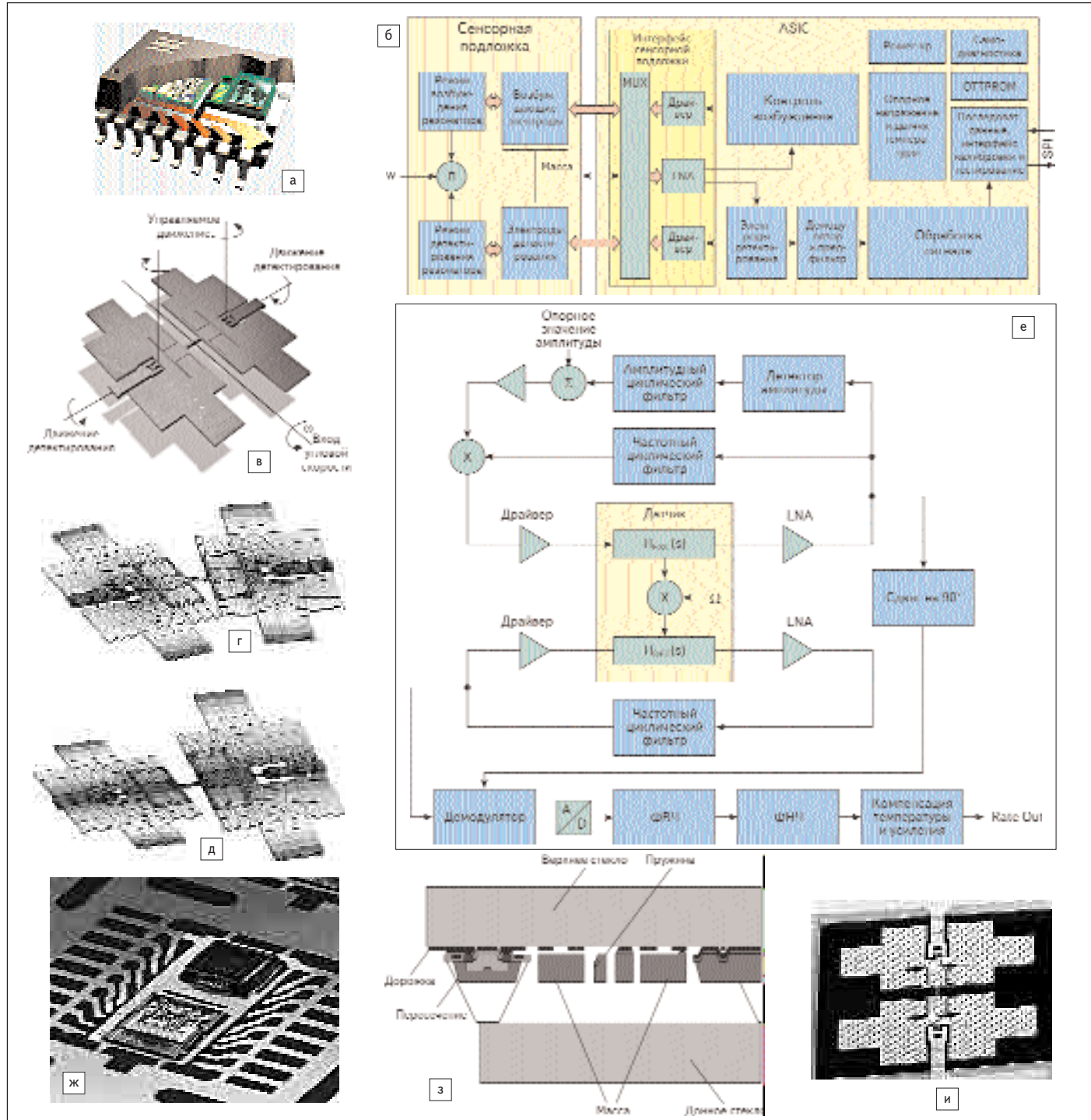


Рис. 9. Гироскоп SAR10 Infineon Technologies SensoNor AS с цифровым интерфейсом SPI: а — внешний вид и корпусирование датчика; б — функциональная диаграмма; в — функциональный принцип сенсорного элемента Butterfly Gyro; г — второй режим работы датчика (горизонтальный изгиб балок за счет масс, колеблющихся с фазовым смещением 180° вокруг вертикальной оси); д — третий рабочий режим — кручение балок за счет масс, колеблющихся с фазовым смещением 180° вокруг горизонтальной оси; е — упрощенная функциональная диаграмма ASIC; ж-и — производство и корпусирование датчика

Systron Donner Automotive производит различные датчики угловой скорости GyroChip — как для одноосевых измерений, так и в сочетании GyroChip с акселерометрами для мультиосевых измерений.

Одноосевые датчики GyroChip rate sensor также различным образом конфигурируются для OEM-требований. Модели, размещенные в производстве, предполагают включение

встроенной непрерывной тестовой функции и адаптированные к клиентским требованиям корпус, коннектор, опции монтажа. Малые размеры сенсорного элемента позволяют добиваться малых размеров корпусов, но это зависит от OEM-требований инсталляции.

В производстве находятся и многоосевые устройства, сочетающие датчики угловой скорости

и акселерометры в одном корпусе, — сенсорные кластеры, которые обеспечивают входы (например, CAN) ко многим бортовым системам, в различных стандартных конфигурациях, а также в специальных клиентских версиях.

В компании Systron Donner Automotive Division считают, что в будущих автомобилях будут использоваться автомобильные

IMU (Inertial Measurement Unit) — одноклеточные блоки с 6 степенями свободы, предназначенные для систем VDC, обнаружения rollover, систем навигации и других.

Гироскоп SAR10 компании Infineon

Компания Infineon Technologies SensoNor AS выпускает гироскоп типа vibrating gyro SAR10 с цифровым интерфейсом SPI для автомобильных систем обнаружения крена ($\pm 250^\circ/\text{с}$). SAR10 (рис. 9) включает два кристалла — микромеханическую ячейку и ASIC со смешиванием сигнала, размещенные в стандартном корпусе SOIC.

Для производства микромеханического датчика использована технологическая платформа SensoNor на основе однокристалльного кремния. SAR10 включает структуру в форме бабочки с двумя массами double mass butterfly с односторонним электростатическим возбуждением и схемой емкостного детектирования.

Принцип работы датчика, основанный на получении силы Кориолиса, состоит в следующем. Масса сенсорного элемента возбуждается, осуществляя угловую вибрацию вокруг своей оси. Входное вращение образует вибрацию, детектируемую вокруг оси, нормальной к оси возбуждения и входной оси.

Для того чтобы гарантировать высококачественную механическую поддержку для MEMS-элемента, используется анодное соединение, с применением специальных разработанных и патентованных технологий, позволяющих точно контролировать давление внутри уплотненной полости.

Для работы гироскопа SAR10 являются важными частоты и формы четырех режимов. При работе датчика активны второй и третий режимы. Второй режим структуры butterfly представляет собой горизонтальный изгиб балок, в котором массы колеблются со смещением фазы в 180° вокруг вертикальной оси. Третий режим — это кручение балок, колеблющихся в противофазе со смещением в 180° . Второй режим является режимом возбуждения и управляет постоянной амплитудой вибрации, тогда как третий режим (детектирования) измеряет угловую скорость. Другие два режима, к которым относится первый, представляющий собой кручение балок при двух синфазно колеблющихся вокруг горизонтальной оси массах, и четвертый режим — вертикальный изгиб балок при колебаниях масс со смещением в 180° вокруг горизонтальной оси, являются нежелательными и представляют собой возможное следствие внешних вибраций. Высокие частоты порядка 30 кГц делают датчик менее подверженным влиянию внешних вибраций.

Интерфейсная ASIC датчика характеризуется работой в режиме замкнутого цикла как при управлении, так и в цикле обратной связи force feedback при детектировании. Принцип работы датчика — емкостной, ASIC измеряет дифференциальные емкости в диапазоне 10^{-18} Ф. Этот уровень точности

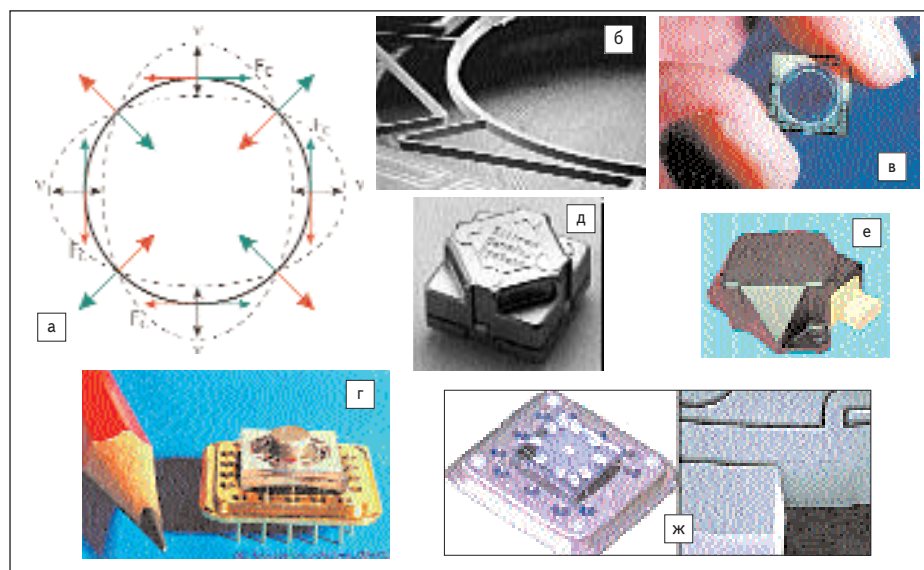


Рис. 10. Гироскопы Silicon Sensing Systems:

- а — принцип работы датчика (shell Resonator Wine glass, ring) и результирующая вибрация;
- б — резонансное кольцо — основной элемент гироскопов SSS (SEM-изображение);
- в — сенсорный элемент, изготавливаемый по технологии SiVSG;
- г — закорпусированный сенсорный элемент с магнитом; д — датчик угловой скорости CRS03;
- е — внешний вид гироскопа SSS для Segway Human Transport;
- ж — полностью кремниевые емкостные технологии MEMS, разрабатываемые SSS

соответствует перемещению мембраны порядка нескольких десятков Å.

Выходной интерфейс датчика — SPI. Схема обработки включает также функции управления возбуждением, демодуляцию, фильтрацию сигнала и температурную компенсацию. SAR10 характеризуется меньшим размером, ценой и энергопотреблением. Устойчивость к ударам достигает 10 000 g. Компания SensoNor также предлагает разработчикам оценочный комплект SAR10.

Гироскопы Silicon Sensing Systems

Компания Silicon Sensing Systems использует технологию Silicon Vibrating Structure Gyroscope (SiVSG) — для создания вибрации кольца vibrating ring resonator, вибрационный режим которого изменяется при вращении вследствие действия силы Кориолиса (рис. 10).

Применение керамического колпачка, металлического кольца и использование кристаллических кремниевых и микромеханических методов позволили уменьшить кольцевой резонатор до 6 мм в диаметре.

Кольцевой резонатор дополняется центральным миниатюрным магнитом для создания электромагнитного резонанса. Передача тока осуществляется через металлические дорожки, депонированные на опоры кольца, что создает силу, которая вводит кольцо в резонанс. Движение кольца под действием силы Кориолиса определяется по напряжениям, наводимым в опорах. Таким образом, методы возбуждения и детектирования — электромагнитные.

Кольцевой резонатор устойчив к ударам (99 g). Закорпусированный сенсорный блок позволяет добиваться единичного соотноше-

ния высокие объемы производства/низкая цена, что, в свою очередь, дает возможность использовать это устройство вместе с клиентской ASIC.

Будущие разработки компании предполагают использование кремниевых емкостных технологий MEMS (рис. 10ж).

Гироскоп MLX90609 Melexis

В июне 2006 года компания Melexis представила свой первый гироскоп MLX90609 в SMD-корпусе — CLCC32, который включает кремниевую микромеханическую ячейку и схему обработки сигнала с функциями калибровки в EEPROM. Датчик MLX90609 (рис. 11) разработан с целью удовлетворения растущего спроса на автомобильные гироскопы для навигационных систем (dead reckoning GPS). Полный диапазон $\pm 75^\circ/\text{с}$ (MLX90609-N2) программируется при производстве. По специальному заказу доступны диапазоны $\pm 150^\circ/\text{с}$ (MLX90609-E2) или $\pm 300^\circ/\text{с}$ (MLX90609-R2).

MLX90609 выполнен с применением процесса thick SOI (Silicon on Insulator) и включает дифференциальную MEMS-структуру, чувствительную к силе Кориолиса при движении. Каждая часть дифференциальной структуры включает двухфреймовый гироскоп на монокремниевой основе.

MLX90609 формирует два выходных сигнала, пропорциональных с линейностью $\pm 0,5\%$ угловой скорости, действующей перпендикулярно плану ИС, — аналоговое напряжение с выходом в 2,5 В на нулевой угловой скорости и полным диапазоном до 4,5 или 0,5 В, в зависимости от направления вращения, а также SPI-интерфейс.

Пользователю предоставлена возможность калибровки и программирования следующих

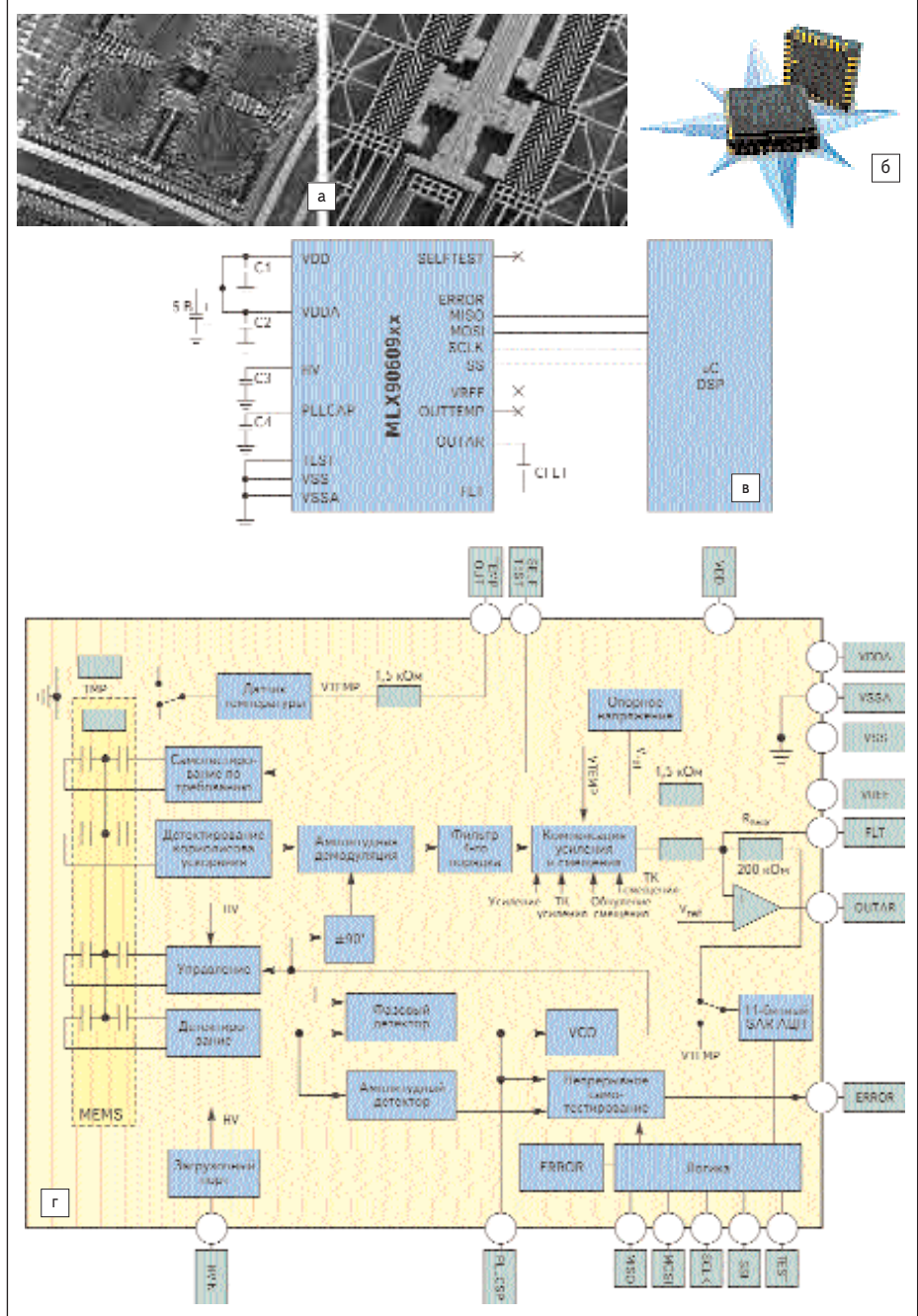


Рис. 11. Гироскоп MLX90609 Melexis:
 а — увеличенные изображения сенсорных элементов гироскопов Melexis, изготавливаемых по технологии tuning fork;
 б — внешний вид датчиков; в — рекомендуемая схема применения; г — функциональная диаграмма

параметров: температурного дрейфа смещения и усиления, частотной полосы, даты и серийного номера.

Заключение

Гироскопы — третье из самых востребованных применений в MEMS-индустрии интегральных датчиков по объемам продаж (после акселерометров и датчиков давления) и одно из наиболее быстрорастущих в автомобильной сенсорной индустрии. Помимо автоэлектроники, востребованность гироскопов поддерживается и многими другими

рынками — клиентским, медицинским, промышленным и военным, что неминуемо означает дальнейшее снижение цены и повышение уровней исполнений этих устройств.

Рассмотренные в статье гироскопы представляют собой базовые типы устройств, на основе которых разрабатываются все новые модификации MEMS. Среди них вибрационные кориолисовы гироскопы с емкостным типом детектирования представляют собой наиболее актуальные сегодня устройства, рекомендуемые для новых проектов. В дальнейшем ожидается повышение спроса как на традиционные резонансные гироскопы с улучшенными

ми рабочими характеристиками — такими как надежность, размер и цена, так и массовая волна коммерциализации новых разработок на основе оптических технологий MEMS.

Независимо от типа применяемой технологии для гироскопов ожидается также дальнейшее повышение уровня интеграции и появление других мультисенсорных многоосевых устройств.

Литература

- Nasiri S. A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status. www.invensense.com/shared/pdf/MEMSGyroComp.pdf
- Geen J., Krakauer D. New iMEMS® Angular-Rate-Sensing Gyroscope., ADI Micromachined Products Division. www.analog.com/library/analogDialogue/archives/37-03/gyro.htm
- Burg A., Meruani A., Sandheinrich B., Wickmann M. MEMS Gyroscopes and their Applications. clifton.mech.northwestern.edu/~me381/project/done/Gyroscope.pdf
- Watson W. S. Improved Vibratory Gyro Pick-off and Driver Geometry. Watson Industries, Inc. Symposium Gyro Technology. Stuttgart, Germany. Sept. 19, 2006. www.watson-gyro.com/files/gyro_technology_report.pdf
- Shkel A. M. Type I and Type II Micromachined Vibratory Gyroscopes. — Mechanical & Aerospace Engineering, University of California, Irvine. www.oxide.eng.uci.edu/publications/IEEE_PLANS_2006_Andrei_Shkel.pdf
- Xie Y., Li S.-S., Lin Y.-W., Ren Z., Nguyen C. T.-C. UHF Micromechanical Extensional Wine-Glass Mode Ring Resonators. Technical Digest, 2003 IEEE International Electron Devices Meeting, Washington, DC, Dec. 8–10, 2003. eecs.umich.edu/~ctnguyen/Research/.../extWG.iedm03.yxie.ctnguyen.pdf
- Ayazi F., Najafi K. Design and Fabrication of a High-Performance Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope., Center for Integrated Sensors and Circuits University of Michigan. Eleventh IEEE/ASME International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. Heidelberg, Germany, Jan. 25–29, 1998. www.eecs.umich.edu/najafi/pdf/Paper_84.pdf
- Micromachined gyros. US Patent 6,122,961. Опубликовано. Sept. 26, 2000. (Geen, Analog Devices, Inc.)
- Micromachined gyros. US Patent 6,505,511. Опубликовано. Jan. 14, 2003 (Geen, Analog Devices, Inc.)
- Micromachined gyroscope. US Patent 6,877,374. Опубликовано. April 12, 2005. (Geen, Analog Devices, Inc.)
- Six degree-of-freedom micro-machined multi-sensor. US Patent 6,848,304. Опубликовано. Feb. 1, 2005 (Geen, Analog Devices, Inc.)
- www.analog.com
- Bosch Micromachined Sensorsystems in Series Production. Техническая информация Robert Bosch Corporation, Research and Technology Center.
- www.semiconductors.bosch.de
- www.systronauto.com
- www.infineon.com
- www.spp.c.o.jp/sss/
- www.melexis.com