

Окончание. Начало в № 6 2010

Светлана СЫСОВЕВА  
info@syssoeva.com

## МЭМС-микрофоны

### Обзор предложений МЭМС-микрофонов

#### МЭМС-микрофоны Knowles

Линейка микрофонов Knowles включает и ЕСМ-, и МЭМС-микрофоны (рис. 2а, б) [39], и даже звукочувствительные пьезокерамические акселерометры для военных применений и ультразвуковые датчики, основанные на тех же технологиях, которые разрабатывались для микрофонов.

Технологическая платформа Knowles МЭМС-микрофонов основана на кремнии. Исследования Knowles в этой области, начатые в 1990-х годах, привели к созданию первого в мире микрофона для поверхностного монтажа в 2001–2002 годах [11, 18–20].

Первая коммерциализация МЭМС-микрофонов была осуществлена Knowles в 2003 году, продуктовая серия носила название SiSonic.

Сейчас число проданных кремниевых МЭМС-микрофонов серии SiSonic, уже в ее 4-м поколении (рис. 2б) [39], превысило 1 млрд. Knowles Electronics, например, недавно была названа одним из лучших поставщиков 2009 года Siemens AG.

Микрофон Knowles серии SiSonic объединяет МЭМС-элемент и ASIC CMOS кристалл в корпусе поверхностного монтажа [19].

Согласно данным ряда публикаций [11, 18, 20], серия SiSonic изначально была основана на МЭМС-структуре, показанной на рис. 3 [20–27].

Сенсорный кристалл состоит из фиксированной прочной обкладки основания с высокой перфорацией и подвижной чувствительной диафрагмы, отделенной от задней обкладки на 4 мкм. Перфорированная обкладка дополнена поддерживающим диафрагму кольцом, которое позволяет сохра-

нять разнесение между ними постоянным. Диафрагма, имеющая возможность осуществления свободных колебаний, производится из одномикронного поликремния, ее эффективный диаметр составляет 0,5 мм. В пространстве между диафрагмой и задней обкладкой создается электрическое напряжение. Микрофон включает средства детектирования изменения емкости при воздействии звуковой волны.

Технология Knowles дала возможность создания широкополосного преобразователя с однородной высокой чувствительностью. Вследствие этого микрофоны можно использовать практически без модификаций или с небольшими модификациями при осуществлении различных коммуникаций, аудио и ультразвукового ранжирования, при получении изображений, в системах детектирования движения.

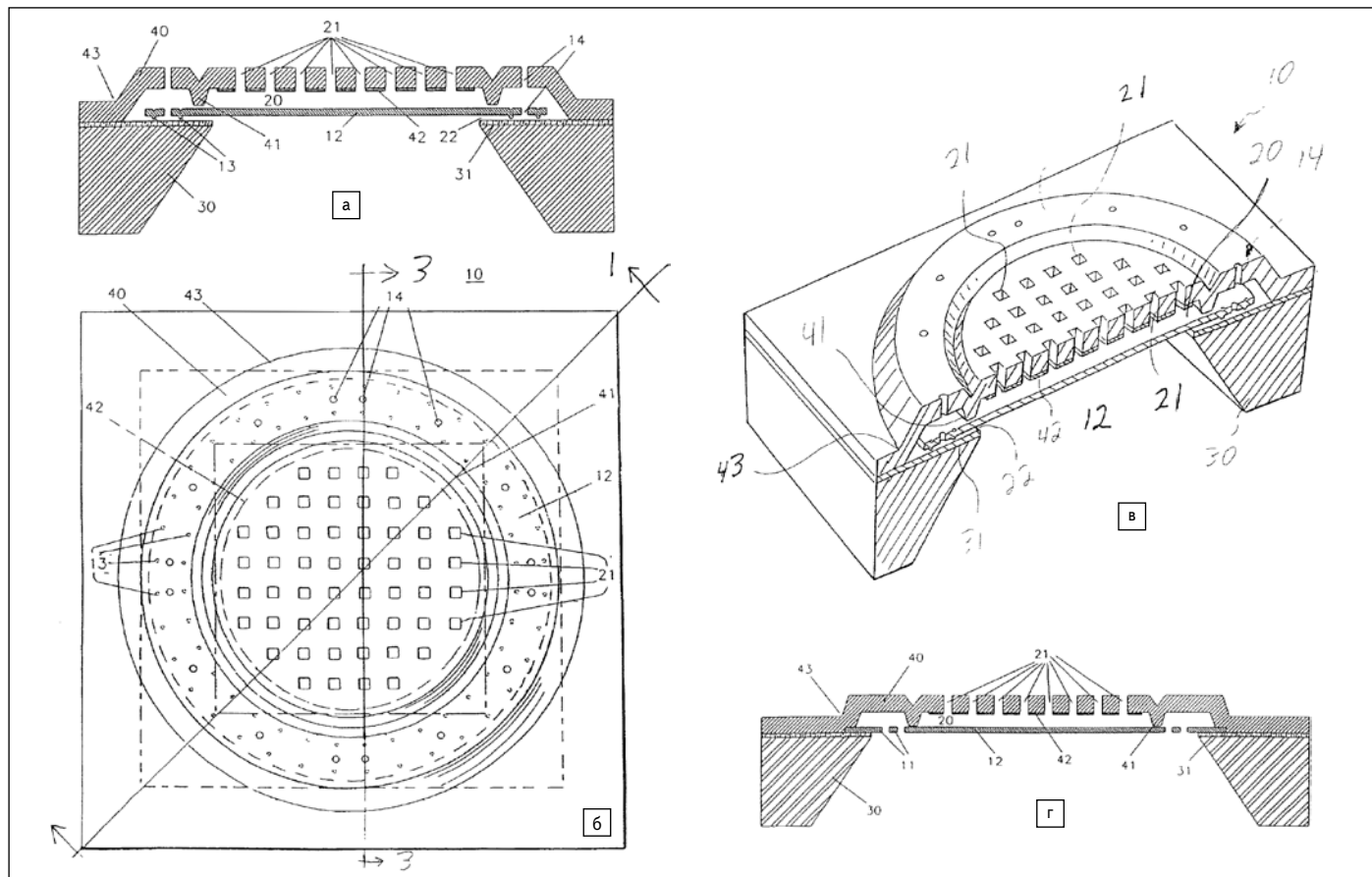


Рис. 3. МЭМС-структуры кремниевых микрофонов Knowles Electronics (оригинальные обозначения сохранены):

а–в) акустический преобразователь с ограниченным подвесом диафрагмы: а) вид в разрезе; б) вид в плане; в) трехмерный вид; г) преобразователь с пружинным подвесом диафрагмы: 10 — акустический преобразователь; 11 — пружины; 12 — проводящая диафрагма; 13 — ряд малых выемок/зубцов (для предотвращения слипания); 14 — окна; 20 — зазор; 21 — окна; 22 — узкий зазор между диафрагмой 12 и субстратом 30; 30 — субстрат; 31 — диэлектрический слой; 40 — перфорированная обкладка; 41 — поддерживающая структура диафрагмы (кольцо или множество выпуклостей); 42 — проводящий электрод; 43 — периметр прикрепления; 50 — акустический преобразователь

Ключ к достижению широкополосности и высокой чувствительности — в создании структуры с малой и высокочувствительной диафрагмой. Дизайн, согласно которому диафрагма подвешивалась на нескольких гибких подвижных пружинах, предлагался ранее в патентах США [21–22]. Но исполнение пружин приводило к необходимости контролирования акустической утечки, что влияет на крутизну при низкочастотной работе преобразователя. Другой метод состоял в одноточечном подвешивании диафрагмы, что также давало высокую чувствительность [23]. Но в этом случае механические свойства изменяются, в связи с постоянным градиентом механического напряжения происходит искривление. В конечном итоге это также приводит к проблеме воспроизводимости низкочастотной характеристики или частоты среза roll-off<sup>1</sup>.

В микрофонах Knowles достигается высокая механическая чувствительность диафрагмы. Если диафрагма опирается на поддерживающее кольцо, достигается герметичное акустическое перекрытие, что приводит к хорошо контролируемой низкой частоте среза. Достигается полное отделение ее от неподвижной обкладки и уменьшается чувствительность к внешним механическим воздействиям.

В одной из реализаций данной микрофонной структуры (рис. 3 а–в) пространство поддерживается постоянным посредством специального кольца, на котором размещена диафрагма. Имеются средства для подвески диафрагмы, так что диафрагма свободна в перемещении в ее собственной плоскости, посредством чего максимизируется механическая чувствительность. Подвеска достигается посредством бокового сдерживания диафрагмы между поддерживающим кольцом и субстратом, прикрепленным к перфорированной обкладке.

Многие аспекты были учтены в дизайне данной структуры. Проводящая диафрагма 12 электрически изолирована от субстрата 30 диэлектрическим слоем 31. Проводящий электрод 42 прикреплен к непроводящему элементу 40.

Размеры диафрагмы и основания выбирают так, чтобы резонансная частота каждой из обкладок была выше максимальной рабочей частоты. Средства подвески предусматривают минимальный механический импеданс. Поддерживающее кольцо определяет активный размер диафрагмы, а его высота — начальное разделение обкладок.

Перфорированная обкладка содержит ряд отверстий (окон) 21, посредством которых жертвенный слой (не показан) между диафрагмой и перфорированной обкладкой вытравливается в течение производства для формирования зазора 20, служащего цели снижения акустического демпфирования воздуха в воздушном зазоре для обеспечения достаточной частотной полосы преобразователя. Ряд окон также выполнен в диафрагме

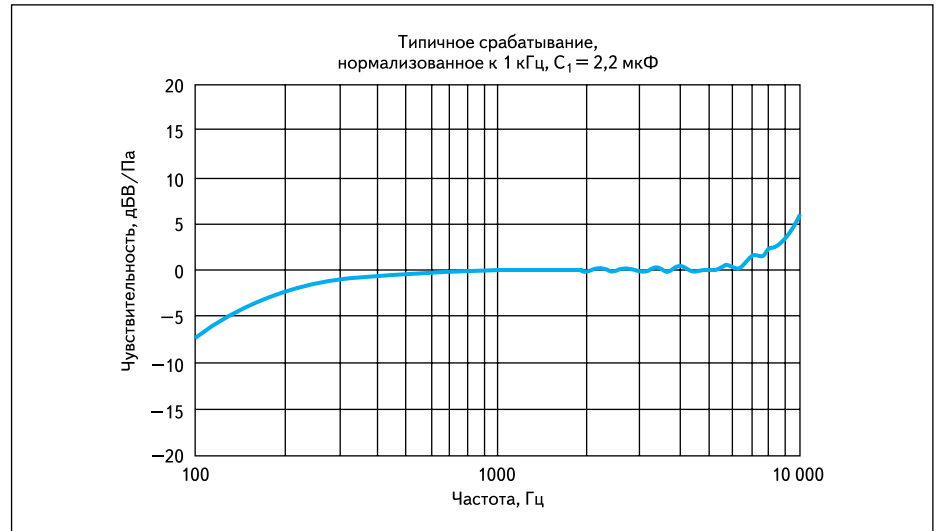


Рис. 4. Типичная кривая срабатывания микрофонов Knowles (SPU0414HR5H-SB)

12 и перфорированной обкладке 40 для формирования пути утечки 14, что вместе с акустической податливостью с задней камерой (не показана), на которой преобразователь крепится, формирует ФВЧ с частотой среза roll-off, достаточно низкой, чтобы не препятствовать осуществлению акустической функции, и достаточно высокой для удаления влияния вариаций барометрического давления. Окна 14 обеспечивают хорошую низкочастотную работу преобразователей.

Опционально периметр, по которому к подложке прикрепляется задняя обкладка, может быть сформирован так, чтобы его кривизна была минимальной, что снижает механические напряжения. Прикрепление перфорированной обкладки 40 по периметру 43 может варьироваться для снижения кривизны и изгибных моментов и быть, например, рифленным или гофрированным.

Перфорированная обкладка, поддерживающее кольцо, средства подвеса, диафрагма могут быть выполнены из кремния с использованием микромеханической тонкопленочной технологии и фотолитографии и сделаны из одного или более материалов следующей группы, включающей углеродные полимеры, кремний, поликристаллический кремний, аморфный кремний, диоксид кремния, нитрид кремния, SiC, Ge, GaAs, углерод, титан, золото, железо, медь, хром, алюминий, вольфрам, платина, палладий, никель, тантал и сплавы.

Еще одна реализация микрофонов Knowles допускает, что подвеска достигается использованием пружин между диафрагмой и перфорированной обкладкой (рис. 3г). Пружина ассистирует в конструкции и в процессе отпуска диафрагмы, но в процессе работы электростатическое возбуждение приводит к контакту диафрагмы с поддерживающей структурой перфорированной обкладки.

Укрепленный смолой стекловолоконный корпус (FR4) включает центральную полость, в которой размещаются кристаллы МЭМС-микрофона и усилителя [19]. Для защиты от окружающей среды ASIC покрывается эпоксидом, а микрофонный кристалл остается незащищенным. Акустический порт располагается выше микрофона, но Knowles предлагает различные опции размещения порта.

Серия SiSonic характеризуется непрерывным повышением рабочих характеристик и плотности соговых телефонов, цифровых камер, портативных музыкальных плееров, поэтому новые микрофоны отличает меньший размер, более низкие профили, разнообразные опции крепления, новые цифровые аудиоопции, исключающие аналоговые шумы.

На рис. 4 показана типичная кривая срабатывания микрофонов Knowles, характеризующаяся плоскостью в достаточно широкой частотной полосе.

За счет конструкции диафрагмы чувствительность МЭМС-микрофонов Knowles является более стабильной, чем ЕСМ. Малая масса, низкий размер диафрагмы дает превосходные характеристики вибрационной устойчивости. Устройства также устойчивы к ударам, ЭМ- и ВЧ-помехам и способны работать в температурном диапазоне  $-40...+100$  °С.

МЭМС Knowles на 45% меньше занимают пространства на плате, чем ЕСМ с размерами  $6 \times 2,2$  мм того же производителя и имеют на 30% более низкий профиль. Поверхностный монтаж допускает недорогое производство.

Сейчас клиентам предлагаются три типа форм-факторов микрофонов: Mini, UltraMini и Slim UltraMini. Mini-микрофоны серии SPM характеризуются размерами  $4,72 \times 3,76 \times 1,25$  мм, UltraMini — размерами  $3,76 \times 2,95 \times 1,1$  мм или  $3,76 \times 3 \times 1,1$  мм (серия SPU). Размеры микрофона Slim UltraMini

<sup>1</sup> Frequency roll-off — термин, используемый для описания крутизны передаточной функции с частотой, или частота среза.

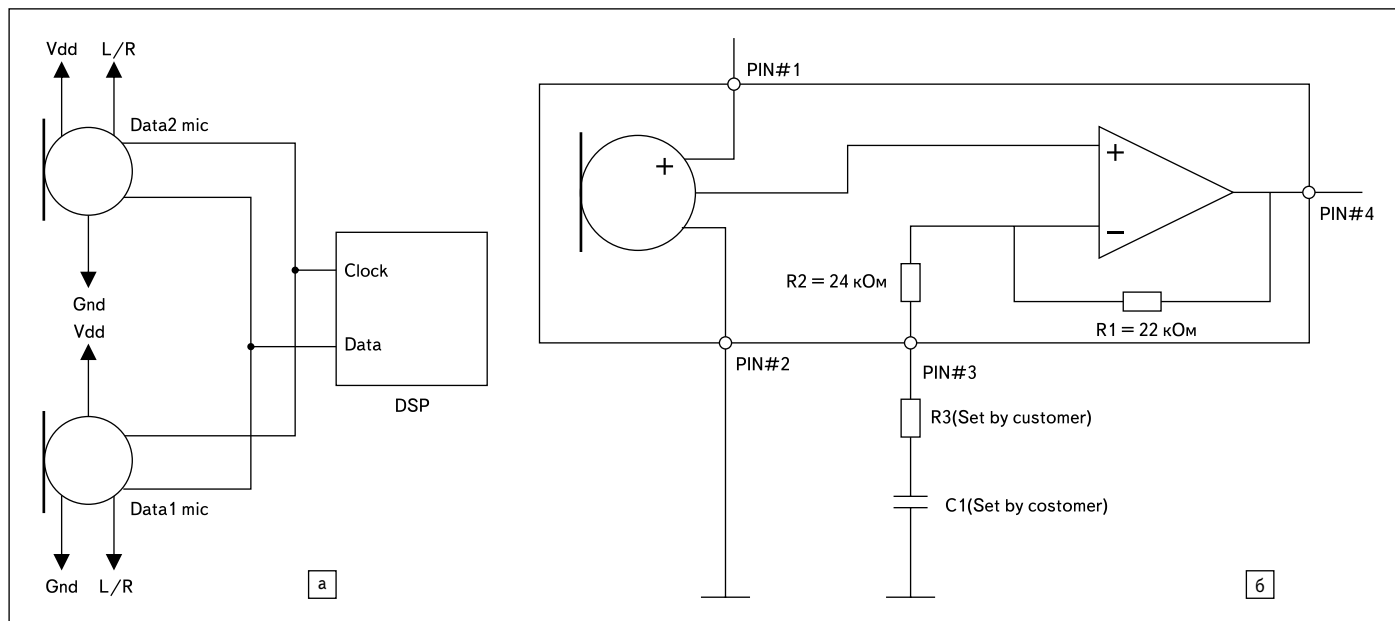


Рис. 5. Рекомендованные интерфейсные схемы: а) схема подключения двух цифровых микрофонов (SPM0405HD4H-WB) к микроконтроллеру; б) схема включения аналогового устройства с максимальной RF-защитой (SPU0414HR5H-SB)

составляют  $3,76 \times 2,24 \times 1,10$  мм, но для этого устройства потребуется внешний усилитель и несколько дискретов. Предлагаются различные опции размещения порта — донного или верхнего.

Большинство микрофонов характеризуются аналоговым выходом — усиленным или неусиленным, дифференциальным, переключаемым. SPM0405HD4H — цифровой микрофон, отличающийся отсутствием типичных аналоговых шумов.

Массивы микрофонов включают два или более встроенных микрофона, к которым добавляется программируемый микропроцессор, предназначенный для непрерывного определения первичного источника аудио-входа и оптимального регулирования выхода для достижения наилучшего качества звука (рис. 5а).

Новые модели с максимальной RF-защитой (MaxRF) характеризуются минимальным GSM/TDMA-шумом, широкополосным подавлением ВЧ-шумов. Интегрированный дизайн допускает дифференциальное или переключаемое усиление (рис. 5б). Микрофоны Knowles могут также интегрироваться с ПО IntelliSonic, разработанным для массивов.

В дополнение ко многим опциям массивов микрофонов Knowles объединяет ПО IntelliSonic в дизайне. Данный запатентованный алгоритм использует принцип временной задержки для конфигурирования процессора с предопределенными углами Look Angle (обзора) и Angle of Acceptance (приема). Все акустические волны в плоскости за пределами угла приема подавляются более чем на 15 дБ для двухэлементного массива. Для 4-элементного массива алгоритм Knowles может ослаблять нежелательный звук более чем на 20 дБ.

Называются следующие цифры: подавление шумов — 16 дБ; подавление интерференции посредством лучевого массива — 30 дБ; отмена акустического эха — 27 дБ.

В пределах угла приема алгоритм использует контролируемые адаптивные шумовые фильтры. В зависимости от того, для какого применения — телефона или голосового обнаружения либо для оптимизации подавления шумов — параметры могут быть точно установлены.

С момента первой коммерциализации до настоящего момента Knowles принадлежит абсолютное лидерство в продажах микрофонов, но данная рыночная ниша привлекательна и для других производителей, обладающих значительными наработками в сфере дизайна МЭМС, аудио и/или обладающих значительными производственными мощностями.

### Микрофоны Analog Devices

Технология ADI долгие годы была известна разработчикам по датчикам инерции — прежде всего, по акселерометрам, а затем по гироскопам и IMU. Но в настоящее время ADI на основе данной технологии iMEMS разрабатывает и производит и кремниевые микрофоны (рис. 6) [11, 27–30].

Компания Analog Devices известна тем, что исторически одной из первых поставляла МЭМС-акселерометры для автомобильных подушек безопасности. Кроме того, МЭМС-датчики движения компании были выполнены на основе интегрированной поверхностной микромеханики, где у компании большие наработки в отношении интеграции электроники и обработки сигнала, а также в производстве специализированных аудио ИС. Поэтому ADI направила свои усилия на рынок МЭМС-

микрофонов, где реализовала технологии подавления фоновых шумов.

Основной технологии МЭМС-микрофонов Analog Devices является использование микрофонной диафрагмы диаметром в 0,5 мм и толщиной в 1 мкм, закрепленной на пружинах для максимизации чувствительности с использованием малого смещающего напряжения. Основная обкладка сформирована на основе слоя устройства SOI/КНИ (кремний на изоляторе), на котором одномикронная диафрагма формируется посредством депонирования поликремния [11].

В текущей линейке представлено три новых устройства: ADMP421, ADMP404, ADMP405.

ADMP421 (рис. 6а) — цифровой микрофон, состоящий из МЭМС-элемента, усилителя и сигма-дельта модулятора 4-го порядка. Цифровой интерфейс допускает мультиплексирование ШИМ-выходов двух микрофонов и использование одной линии данных с одним и тем же тактированием.

ADMP421 отличает высокий уровень SNR и высокая чувствительность, что дает возможность рекомендовать данное устройство для применений в дальней области. Применения включают смартфоны, телефоны с расширенной функциональностью, видеорекамеры, Bluetooth наушники, видеофоны, телеконференционные системы.

ADMP421 отличается плоским широкополосным частотным срабатыванием, результатом которой является естественный звук с высокой интеллигибельностью. Устройство отличается достаточно малым потреблением тока, «спящим» режимом, соответствием требованиям телекоммуникационного стандарта TIA-920, актуального для телефонного терминального оборудования, для широкополосных цифровых проводных телефонов.

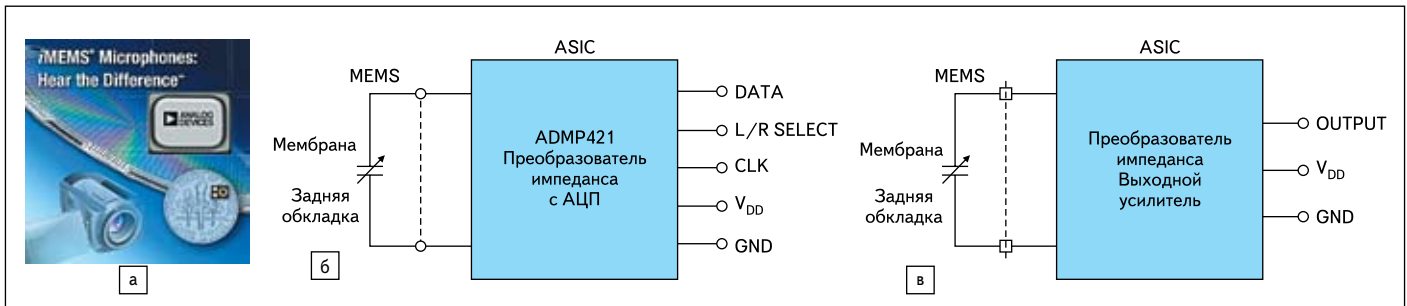


Рис. 6. Кремниевые МЭМС микрофоны Analog Devices: а) внешний вид; б) устройство цифрового микрофона (ADMP421); в) устройство аналогового микрофона (ADMP401)

Размеры корпуса LGA 3×4×1 мм.

Эти микрофоны Analog Devices были отмечены наградой Golden MouseTrap («Золотая мышеловка») журнала Design News как тонкие и обеспечивающие высокое звуковое качество.

Несколько ранее ADI представила также ADMP401 (рис. 6б) — микрофон с аналоговым выходом. SNR преобразователя — 62 дБА, рабочая частотная полоса — от 100 Гц до 15 кГц.

Чувствительность ADMP401 (−42 дБВ) позволяет рекомендовать устройство для ближней и дальней областей применений. Размеры корпуса — самые большие, 4,72×3,76×1 мм, но цена самая низкая (\$1,63).

Для компании ADI характерно динамичное обновление своих продуктовых линеек, самую свежую информацию о этом можно получить на странице <http://www.analog.com/Microphones>.

В апреле 2010 года Analog Devices ввела МЭМС-микрофоны с высокими рабочими характеристиками для высокоточного Hi-Fi (High-Fidelity) аудио- или видеовоспроизведения, подавления шумов ветра, интеллектуальной передачи голоса VoIP (совместимость со стандартом TIA-920) и обнаружения голоса.

ADMP404 и ADMP405 отличаются высоким SNR в 62 дБА и высоким соотношением сброса входной мощности PSRR (power supply rejection ratio) в 70 дБВ, интегрированным ФВЧ. Новые ADI's iMEMS микрофоны отличают также более интеллигентное качество голосовой передачи без фоновых шумов, малые и тонкие корпуса, адаптированные для портативной электроники.

ADMP404 и ADMP405 поставляются в корпусах с размерами 3,35×2,5×0,88 мм, допускающими возможность пайки с оплавлением припоем без деградации чувствительности.

ADMP404 представляет собой omninaправленный микрофон с донным портом и аналоговым выходом, отличающийся высоким качеством, низкой ценой, малой мощностью. ADMP404 состоит из МЭМС микрофонного элемента, преобразователя импеданса, выходного усилителя. Чувствительность −38 дБВ позволяет производителю рекомендовать данное устройство для применений в ближней и дальней области. ADMP404 отличается высоким SNR в 62 дБА и плоским

широкополосным частотным срабатыванием в диапазоне 100 Гц – 15 кГц.

ADMP405 характерен специально разработанным низкочастотным срезом roll-off на 200 Гц для снижения шумов от ветра. Плоское частотное срабатывание данного устройства обеспечивается в диапазоне 200 Гц – 15 кГц. Согласно замыслу создателей, оба новых МЭМС-микрофона исключают необходимость в аппаратной фильтрации или каком-то специальном повышении качества обработки сигнала во внешней схеме. ADMP405 с частотой среза на 200 Гц roll-off является первым устройством с данной способностью, позволяющей инженерам отфильтровывать шумы ветра или вентилятора непосредственно в преобразователе, это обеспечивает чистый аудиосигнал, который можно легче подвергнуть любой поточной обработке сигнала. Инженеры могут сейчас переходить за пределы простых команд и контроля голосового обнаружения к полному голосовому обнаружению для различных применений без рук, переводчиков и диктофонов.

Низкое потребление мощности допускает батарейную работу с долгим сроком службы и позволяет рекомендовать данное устройство для портативных применений. Встроенный фильтр предназначен для обеспечения высокой надежности.

ADMP404/5 соответствуют требованиям телекоммуникационного стандарта TIA-920, применяемого для телефонного терминального оборудования, для широкополосных цифровых проводных телефонов.

В целом, возможности, предлагаемые ADMP404 и ADMP405, значительно повышают характеристики микрофонных устройств в дальней и ближней области с одновременным упрощением требований дизайна со значительно большей схемной гибкостью. ADI также предлагает пакет аудиокодексов с высокими рабочими характеристиками, усилителей и процессоров, обеспечивая полную цепочку обработки сигнала.

ADMP404 и ADMP405 iMEMS микрофоны в настоящее время оцениваются для массового производства, запланированного в июне 2010 года. Цены — \$1,79 в количестве свыше 1000 шт., корпуса обоих устройств имеют размеры 3,35×2,5×0,88 мм и предназначены для поверхностного монтажа.

Это все были примеры двухкристального исполнения преобразователей. Параллельно были разработаны как микрофоны с отдельными MEMS и ASIC кристаллами на общем носителе, так и интегрированные на одном кристалле — микрофоны Akustica.

### Микрофоны Akustica

Компания Akustica, сейчас входящая в состав Bosch, разработала семейство цифровых и аналоговых CMOS MEMS микрофонов Sensory Silicon, в которых ассоциированные элементы преобразователей и ИС интегрированы на одном чипе (рис. 7) [6, 11, 31–37].

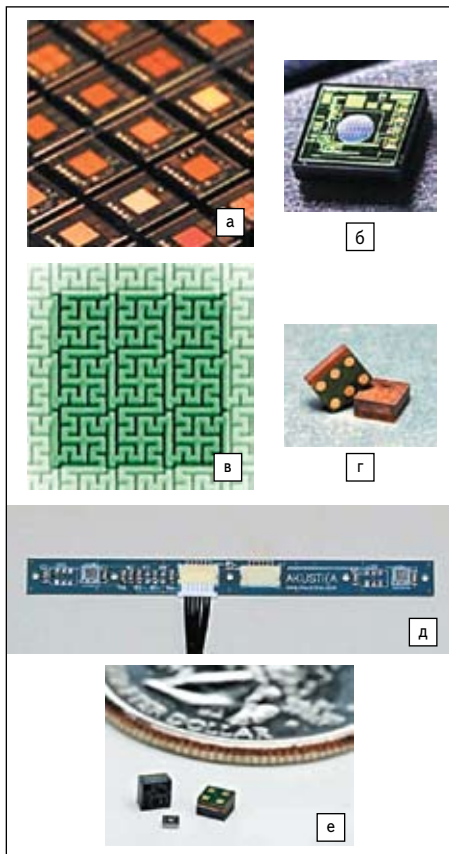
CMOS MEMS микрофоны Akustica, в отличие от других кремниевых микрофонов, построены не на двух кристаллах, а на одном. В этих устройствах МЭМС-преобразователь составлен из металло-диэлектрических структур, выполненных на стандартной КМОП-пластине (рис. 7а).

Интегрированный CMOS MEMS микрофон был описан в 2003 году, а в 2006 году состоялась коммерциализация первого МЭМС-микрофона Akustica на основе данной технологии.

Диафрагма была сформирована на верхнем уровне слоев металла и оксида на CMOS-пластине после окончания производства схемы (рис. 7б). Серпантинный паттерн сетки металла и оксида повторяется в пределах области диафрагмы, и подложный поликремний вытравливается для формирования подвешенной диафрагмы (рис. 7в). Депонирование микромеханической мембраны диафрагмы в серпантинной конфигурации с чередующимися длинными и короткими плечами позволяет снизить скручивание диафрагмы в процессе производства.

Над сеткой депонируется конформный полимер для формирования воздухонепроницаемого уплотнения над полостью.

Поскольку они производятся с использованием CMOS-процессов и оборудования, широко используемых при производстве ИС, CMOS MEMS микрофоны могут производиться на любом CMOS фаундрии-предприятии. Поэтому производство данных микрофонов было испытано на 9 различных фаундрии и 11 различных CMOS технологий, от 0,6-мкм трехметаллического процесса до 0,18-мкм процесса с медными межсоединениями.



**Рис. 7.** CMOS MEMS микрофоны Akustica: а) стандартное CMOS-производство MEMS-микрофонов; б) микрофонный кристалл размерами  $1 \times 1$  мм; в) серпантинный паттерн; г) цифровые микрофоны AKU2002C; д) модуль массивов микрофонов AKU2xxx-Module-B, разработанный для оценки стерео цифрового выхода микрофонов; е) AKU1126 — аналоговый, самый малый микрофон размерами  $2 \times 2$  мм

нениями. Результатом стала технология, подходящая для массового производства в высоких объемах, с большой выработкой и повторяемостью, надежностью и низкой ценой. Монолитный кремниевый микрофон, разработанный на CMOS MEMS платформе, представляет собой монолитный кристалл, включающий МЭМС-преобразователь и схему согласования импеданса. Метод детектирования — типичный емкостной, то есть МЭМС-устройство представляет собой структуру с подвижной диафрагмой и жесткой задней платой.

Akustica — это полупроводниковая компания fabless-типа, полностью сфокусированная на использовании своей CMOS MEMS технологии для разработки продуктовой линейки Sensory Silicon. Поскольку технология построена на тех же CMOS-процессах, используемых для производства ИС, микропроцессоров, памяти и т. д., Akustica может выполнять аутсорсинг многим промышленным лидерам в области производства, корпусирования и тестирования.

Akustica поддерживает партнерские отношения со многими фаундери-производителями.

Но, как уже упоминалось, в настоящее время данная компания является частью Bosch.

Микрофоны Akustica представляют собой уникальные системы на кристалле SoC с размерами кристалла  $1 \times 1$  мм, которые основаны на стандартных CMOS-процессах. Ввиду отсутствия межсоединений кристаллов, принятых для гибридного дизайна, становится возможным выпускать устройства с более высокими рабочими характеристиками, меньшие по размеру и более надежные. Они обладают всеми преимуществами гибридных систем в корпусе, могут быть еще меньше и тоньше, обладают высокой устойчивостью к магнитным шумам и механическим вибрациям, хорошими акустическими свойствами и возможностью встраивания в массивы, маломощны, технологичны, подходят для поверхностного монтажа.

В линейке продукции представлены цифровые и аналоговые микрофоны.

Цифровые микрофоны включают на одном кристалле акустический преобразователь, аналоговый выходной усилитель и сигма-дельта модулятор. Однобитный цифровой выходной поток подключается к электронике обработки сигнала без экранированного кабеля или сложной сигнальной маршрутизации. По своим акустическим свойствам цифровые микрофоны Akustica равны или превосходят обычные аналоговые микрофоны. Микрофоны с цифровым выходом также устойчивы к электромагнитным и ВЧ-шумам.

Кроме того, выход двух цифровых микрофонов может быть мультиплексирован в одиночный провод данных. Результатом является повышенное голосовое качество со сниженным числом компонентов и проводов. Все цифровые микрофоны Akustica соответствуют требованиям микрофонных массивов Microsoft Vista.

Представитель последнего поколения цифровых микрофонов Akustica AKU2002C (рис. 7г) с портом наверху, разработанный для замещения AKU2002A/B или других микрофонов, характеризуется размерами фут-принта  $3,76 \times 4,72$  мм, наличием PSR (Power Supply Rejection), режима Power-down со сниженным потреблением тока.

Моно или стерео AKU2002C могут подключаться непосредственно к HD аудиокодекам ноутбуков и настольных компьютеров.

Akustica также разработала модуль массива микрофонов AKU2xxx-Module-B (рис. 7д) для оценки стереомикрофонов. Данный модуль может осуществлять интерфейс с любым из кодеков, допускающим стандартный микрофонный интерфейс, можно присоединить этот модуль и к оценочной плате Texas Instruments TLV320AIC33/3106/34 Stereo Audio Converter, используя специальные устройства.

Представитель семейства аналоговых микрофонов AKU1126 (рис. 7е) отличается особо малым фут-принтом. Размеры устройства

составляют всего  $2 \times 2 \times 1,25$  мм, что на 75% меньше альтернативных решений.

AKU1126 также обеспечивает выбор усиления на специальном выводе, что дает возможность пользователю посредством дополнительного резистора увеличивать усиление на 12 дБ, регулируя тем самым область применения от ближней к дальней. Для применений в спикерфонах или наушниках не требуются специальные усилители.

Микрофоны AKU1126 просты при интегрировании во многие портативные электронные устройства — сотовые телефоны, наушники. Два или более микрофона AKU1126 могут быть использованы без увеличения фут-принта на плате для стандартного микрофона, а малое энергопотребление позволяет использовать тот же ток.

### Другие производители МЭМС-микрофонов

Значительным достижением в кремниевой микрофонной технологии стало снижение ее цены. Современные МЭМС-микрофоны широко применяются в сотовых телефонах, видеокамерах, Bluetooth-хэндсетах голосовой связи и т. д.

Многие производители задействовали свои резервы в разработке и производстве МЭМС-микрофонов: Sonion, MEMSTech, Infineon, Wolfson Microelectronics, ST Micro. Введение МЭМС-компонентов анонсировали и другие производители ЕСМ-микрофонов, например AAC и BSE.

В 2005 году датский производитель аудио-преобразователей Sonion запустил серию SiMic, включающую сенсорный MEMS-элемент и ASIC, оба кристалла размещены на кремниевом субстрате-носителе. Данный микрофонный корпус — полностью кремниевый. DigiSiMic отличается фут-принтом  $2,6 \times 1,6$  мм, аналоговые SiMic —  $2,4 \times 1,6$  мм, высота обоих одинакова — 0,865 мм. По заявлениям компании, SNR на 4–5 дБ лучше, чем у конкурентов.

Но другие продукты из микрофонной линейки все основаны на ЕСМ, впрочем, обеспечивающих высокие рабочие характеристики в миниатюрном корпусе, объединенном с интегрированной схемой для снижения шумов и повышения устойчивости к ЭМ-помехам. Разработки МЭМС-технологии Sonion продолжают [38].

Кремниевые МЭМС-микрофоны MemsTech производятся на основе собственного технологического процесса. Приложенное акустическое давление воздействует на диафрагму, изменяя емкость фиксированного конденсатора. Данное изменение предварительно усиливается и преобразуется в аудиосигнал. Микрофоны MemsTech могут быть заключены в корпуса BGA или мультывыводные Multi Lead Package (MLP), включающие микрофон и предусилитель. Эти корпуса поддерживают технологию поверхностного монтажа и могут противостоять

ять высоким температурам пайки оплавлением припоем, подходят для автоматической сборки и монтажа.

Эти микрофоны обладают диапазоном высокой чувствительности (от  $-20$  до  $-30$  дБ) с частотным диапазоном от 70 Гц до 15 кГц и SNR  $>55$  дБ, базовый диапазон — от  $-45$  до  $-40$  дБ с SNR на 58 дБ или более.

Цена сравнима с ЕСМ, но характеристики выше, в том числе и при работе в широком температурном диапазоне от  $-40$  до  $+100$  °С.

Wolfson Microelectronics ([www.wolfsonmicro.com](http://www.wolfsonmicro.com)) True Mics WM7110 и WM7120 представляют собой аналоговые устройства, разработанные на основе CMOS/MEMS мембранной технологии, отличающиеся высоким SNR (порядка 62 дБ), качеством сигнала, малым энергопотреблением, надежностью, они помещены в миниатюрный металлический низкопрофильный корпус (рис. 8). WM7110 характеризуется размерами  $4,72 \times 3,76 \times 1,25$  мм, WM7120 —  $3,76 \times 2,95 \times 1,10$  мм. Каждое из устройств потребляет порядка 160 мкА. Разработаны версии WM7110E и WM7120E с улучшенной с 3 до 1 дБ стабильностью чувствительности.

Wolfson в 2010 году вводит новое семейство цифровых кремниевых МЭМС-микрофонов, отличающихся малым энергопотреблением, высокими характеристиками аудиозахвата, SNR, повышенной стабильностью чувствительности, миниатюрным низкопрофильным корпусом, предназначенным для сотовых телефонов, портативных компьютеров, медиаплееров, цифровых камер и навигационных устройств.

Новые представители данного семейства — WM7210 и WM7220 — послужат дополнением к аналоговым микрофонам, введенным в 2009 году. Новые устройства также будут обеспечивать высокую надежность и оптимальные характеристики, противостоять высоким температурам автоматической пайки. Их запуск запланирован в этом году.

Недавно созданная компания Oligon была приобретена Wolfson Microelectronics с целью разработки линейки высокоинтегрированных микрофонов.

Infineon Technologies AG сотрудничала с Hosiden Corporation — компанией, имеющей большие наработки в области акустики.

Компания Infineon выпускала микрофоны, основанные на полупроводниковой МЭМС-технологии. Микрофон Infineon SMM310 (в каталоге Hosiden он представлен как KRM500) оптимизирован для потребительских применений со специальным фокусом на сотовые телефоны. Другие области применения включают ноутбуки и камеры. Но Infineon рекомендует свои микрофоны для автомобильных, промышленных и медицинских применений, где микрофоны монтируются на платы. В этих устройствах имеют значение размер и температурная устойчивость и возможность снижения цены за счет способности пайки с оплавлением



Рис. 8. True Mics WM7110 Wolfson Microelectronics

припоя, свобода дизайна вследствие малого размера, корпуса без галогенов, малое потребление тока (порядка 70 мкА) и повышенная устойчивость к температуре, вибрации, ударам, электромагнитным помехам.

Микрофоны Infineon реализованы в двухкристальном исполнении, MEMS и ASIC объединены в одном и том же корпусе. MEMS состоит из перфорированного неподвижного электрода и гибкой кремниевой мембраны. ASIC детектирует емкостные вариации, возникающие при воздействии звуковой волны, и преобразует их в электрические сигналы.

ST Microelectronics анонсировала выпуск микрофонов на основе технологии Omron. Эта компания оказывает значительное влияние на цену высокоинтегрированных МЭМС-микрофонов. Согласно планам ST, цена микрофонов приблизится к \$1. ST в данном случае выступает как производитель, который может крепить и корпусировать многочисленные МЭМС-микрофоны одновременно, облегчая высокообъемное производство, с использованием улучшенной технологии корпусирования, сходной с той, что сейчас используется для датчиков движения.

По словам вице-президента подразделения MEMS and Healthcare Бенедетто Вигна, в прошлом микрофоны были доменом экспертных акустических компаний, но сейчас наступает время для полупроводниковых МЭМС-игроков, управляющих ростом данного рынка. Ростом микрофонного рынка будут управлять крупные поставщики с собственными производственными мощностями — как это было сделано ранее с датчиками движения. ■

## Литература

1. МЭМС — [www.sysoeva.com/mems.htm](http://www.sysoeva.com/mems.htm)
2. Сысоева С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Инерциальные системы — от low-end до high-end // Компоненты и технологии. 2010. № 5.
3. Сысоева С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Акселерометры // Компоненты и технологии. 2010. № 3.
4. [www.sysoeva.com/microphones.htm](http://www.sysoeva.com/microphones.htm)
5. Electret condenser microphone. US Patent 5,097,515. Baba. Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. March 17, 1992.
6. Fitzgerald J., Weinstein M. Silicon MEMS microphones simplify audio design. Akustika — <http://www.audiodesignline.com/showArticle.jhtml?articleID>

7. SMT-type structure of the silicon-based electret condenser microphone. US Patent 6,870,939. Chiang, et al. Industrial Technology Research Institute. March 22, 2005.
8. Electret condenser microphone. US Patent 7,184,563. Collins, Knowles Electronics LLC. Feb 27, 2007.
9. Electret condenser microphone. US Patent 7,466,834. Ogura, et al. Panasonic Corporation. Dec 16, 2008.
10. Electret condenser microphone and method of producing the same. US Patent 7,698,793. Tsuchiya, Citizen Electronics Co., Ltd. April 20, 2010.
11. A History of Consumer Microphones. [http://www.analog.com/static/imported-files/tech\\_articles/Acoustics%20Today%202009.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/tech_articles/Acoustics%20Today%202009.pdf)
12. Dixon R. MEMS microphones break design mould. Wicht Technologie Consulting. [http://www.memsinvestorjournal.com/2006/04/mems\\_microphone.html](http://www.memsinvestorjournal.com/2006/04/mems_microphone.html)
13. <http://www.i-micronews.com/reports/SiMM-Silicon-Microphone-Market-2007/16/>
14. Bouchaud J. MEMS Microphones Enjoying Dynamic Times, Resurgence in Attention. iSuppli — [http://www.memsinvestorjournal.com/2006/04/mems\\_microphone.html](http://www.memsinvestorjournal.com/2006/04/mems_microphone.html)
15. ANC Technology Boosts MEMS Microphone Market. Technology News, 03 Feb 2010 — <http://ednasia.com/article-25586-anc-technology-boost-smemsmicrophonemarket-Asia.html>
16. Prophet G. MEMS enables multi-microphone consumer products. EDN Europe, 01 Dec 2008 — <http://www.edn-europe.com/memsenablesmulti-microphoneconsumerproducts+article+2640+Europe.html>
17. [http://www.technologyreview.com/read\\_article.aspx?ch=specialsections&sc=personal&id=17170](http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?ch=specialsections&sc=personal&id=17170)
18. Talking Point-Making Money in MEMS (2009) — <http://www.epn-online.com/page/new59003/talking-point-making-money-in-mems.html>
19. Gibb K., Dixon-Warren S. MEMS Microphones Grown up and Making a Living — <http://www.chipworks.com/MEMSMicrophones.aspx?blogid=86>
20. Miniature broadband acoustic transducer. Loepfert, et al. Knowles Electronics, LLC. US Patent Application 20020067663. June 6, 2002.
21. Acoustic transducer. US Patent 5,146,435. Bernstein. The Charles Stark Draper Laboratory, Inc. Sept 8, 1992.
22. Acoustic transducer with improved low frequency response. US Patent 5,452,268. Bernstein. The Charles Stark Draper Laboratory, Inc. Sept 19, 1995.
23. Solid state condenser and microphone devices. Loepfert. Knowles Electronics, LLC. US Patent 5,490,220 February 6, 1996.
24. Miniature silicon condenser microphone. Loepfert, et al. Knowles Electronics, LLC. US Patent 5,740,261. April 14, 1998.
25. Silicon microphone. Lee, et al. Knowles Electronics, LLC. US Patent 7,023,066, April 4, 2006.
26. Miniature silicon condenser microphone. Minervini. Knowles Electronics, LLC. US Patent 7,166,910. Jan 23, 2007.
27. Sheet L. Analog Devices Target: MEMS Microphone Market. SEMI. <http://www.semi.org/en/About/SEMIGlobalUpdate/Articles/P041281>

28. <http://www.memsinvestorjournal.com/2010/04/analog-devices-unveils-hifi-mems-mic.html#more>
29. Process of forming a microphone using support member. US Patent 7,449,356. Weigold. Analog Devices, Inc. Nov 11, 2008.
30. Sensor system. US Patent 7,327,003. Martin, et al. Analog Devices, Inc. Feb 5, 2008.
31. MEMS digital-to-acoustic transducer with error cancellation. US Patent 6,829,131. Loeb, et al. Carnegie Mellon University. Dec 7, 2004.
32. Ultrathin form factor MEMS microphones and microspeakers. US Patent 6,936,524. Zhu, et al. Akustica, Inc. August 30, 2005.
33. MEMS digital-to-acoustic transducer with error cancellation. US Patent 7,019,955. Loeb, et al. Carnegie Mellon University. March 28, 2006.
34. Process for forming and acoustically connecting structures on a substrate. US Patent 7,049,051. Gabriel, et al. Akustica, Inc. May 23, 2006.
35. Method and apparatus for reconstruction of sound-waves from digital signals. US Patent 7,089,069. Gabriel, et al. Akustica, Inc. Aug 8, 2006.
36. Multi-metal layer MEMS structure and process for making the same. US Patent 7,202,101. Gabriel, et al. Akustica, Inc. April 10, 2007.
37. MEMS digital-to-acoustic transducer with error cancellation. US Patent 7,215,527. Neumann Jr., et al. Carnegie Mellon University. May 8, 2007.
38. Microphone assembly. US Patent 7,715,583. Van Halteren, et al. Sonion Nederland B.V. May 11, 2010.
39. Сысоева С. МЭМС-микрофоны // Компоненты и технологии. 2010. № 6.