

МЭМС-ТЕХНОЛОГИЯ ЗАВОЕВЫВАЕТ НОВЫЕ РУБЕЖИ

В.Майская

По оценкам аналитической компании Yole Développement, совершенствование технологии микроэлектронных механических систем (МЭМС), появление все новых областей ее применения и стремительный рост рынка смартфонов в последующие несколько лет будут способствовать увеличению продаж некоторых давно разрабатываемых МЭМС. В ближайшие годы ожидается появление множества новых МЭМС. Среди разрабатываемых приборов компания выделяет три типа устройств, темпы развития которых будут самыми высокими: МЭМС-генераторы, пикопроекторы и РЧ-приборы настройки встроенных антенн приемопередатчиков. Об основных направлениях развития электроники в последующие три-пять лет можно судить и по докладам, представленным на выдающемся мировом форуме – Международной конференции по электронным приборам (International Electron Devices Meeting, IEDM).

Эксперты компании Yole Développement считают, что продажи новых МЭМС за период с 2012 по 2014 год увеличатся с 446 млн. до 950 млн. долл. К 2017 году их рынок составит 2,8 млрд. долл. при совокупных средних темпах роста 42% [1]. Первыми приборами, объем продаж которых в 2014 году, по-видимому, превысит 100 млн. долл., будут МЭМС-генераторы. Ожидается, что продажи микрозеркал для пикопроекторов и устройств автофокусировки достигнут этого показателя в 2015 году, а РЧ-переключателей и переменных конденсаторов – в 2016 (рис.1). Такому росту продаж, помимо совершенствования МЭМС-технологии, будут способствовать и усилия рынка, стимулирующие их применение: от формирования благоприятной инфраструктуры легко доступного видеоконтента для пикопроекторов до структур, способствующих работе мобильных устройств LTE-стандарта, что

потребует создания РЧ-компонентов для согласования характеристик антенны и остальных блоков мобильного телефона.

Большую часть остального рынка новых МЭМС-устройств составят разнообразные приборы с небольшим объемом производства, продажи которых будут расти. Здесь компания выделяет ИК МЭМС-датчики, акустические датчики и датчики усилия. Увеличению объема продаж будут также способствовать новые приложения уже традиционных МЭМС. Так, датчики давления найдут применение в блоках измерения высоты для определения местоположения пользователя смартфона.

ТАКОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ – НОВАЯ ВОЛНА

Генерация тактовых сигналов – одна из основных функций многих устройств. На протяжении десятилетий согласованность и порядок работы

электронных систем обеспечивали кристаллические генераторы, использующие пьезоэлектрические характеристики кварца. Однако применение таких генераторов подобно присутствию отдельного дирижера для каждой группы оркестра.

Сегодня все большую популярность приобретает новое поколение небольших, "толковых", более робастных кремниевых синхронизирующих устройств на основе резонаторов, которые представляют собой колеблющиеся МЭМС в виде консольных балок, колец и прямоугольников и которые способны генерировать сигналы в мегагерцевом диапазоне частот. МЭМС-резонаторы впервые были описаны в 1965 году учеными центра НИОКР компании Westinghouse Electric. Интерес к МЭМС тактовым генераторам возник лишь после того, как компания SiTime, образованная в 2004 году специалистами фирмы Bosch, в 2011 году стала первой разрабатывающей МЭМС компанией, которая вошла в подготовленный американской фирмой по исследованию рынка CS&A (Consulting Services & Associates – консультации и партнерство) список десяти основных поставщиков тактовых генераторов. Это, по-видимому, свидетельствует о достаточно высоком развитии технологии МЭМС тактовых генераторов и о переходе к продвижению созданных изделий на рынок. Согласно оценкам экспертов журнала MEMS Investor journal, мировой рынок генераторов на основе МЭМС-резонаторов с 2010 по 2014 год увеличится с 21,4 млн. до 312 млн. долл. При этом 50% генераторов будут предназначены для бытовых систем [2].

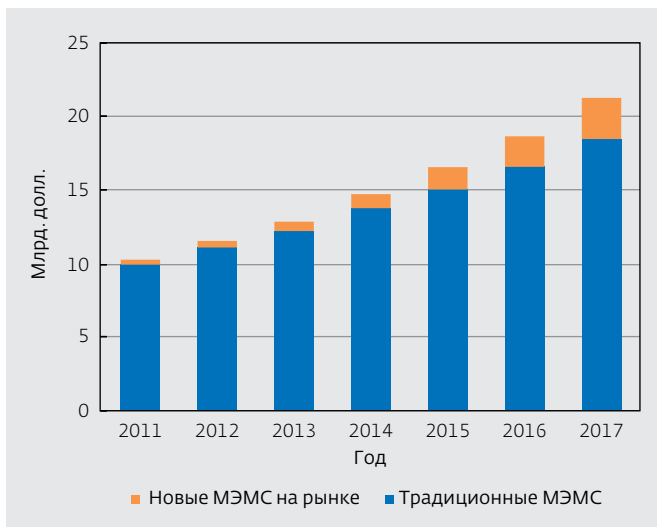


Рис.1. Динамика рынка МЭМС за период с 2011 по 2017 год (прогноз Yole Développement)

Такому увеличению продаж по-прежнему способствуют работы компании SiTime. За семь лет она освоила производство генераторов, сумела преодолеть сдержанное отношение разработчиков электронных систем к МЭМС-технологии, а затем существенно улучшила ее с тем, чтобы изделия отвечали современным требованиям. Все выпускаемые компанией программируемые МЭМС-генераторы полностью изготавливаются на кремнии и не содержат кварцевых кристаллов. Они имеют в своем составе МЭМС-резонатор и программируемую аналоговую микросхему, смонтированные в дешевом стандартном пластмассовом корпусе. Такие корпуса широко используются в электронной промышленности и поставляются многими компаниями, тогда как для кварцевых генераторов нужны дорогостоящие керамические или металлические вакуумные корпуса, поставщики которых малочисленны.

Характеристики МЭМС-генераторов, выпускаемых компанией [3]

- Частота, МГц 1-800, точность до шести знаков после запятой для любого значения частоты
- Стабильность частоты, ±ppm..... 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5; 10; 25 или 50
- Температурный диапазон, °С..... -40-85 (промышленный) или расширенный коммерческий -20-70
- Напряжение питания, В 1,8 или любое в диапазоне 2,8-3,3
- Тип выходного сигнала LVPECL, LVDS, HCSL или CML в дифференциальных усилителях КМОП или LVTTTL в несимметричных генераторах
- Стандартные промышленные корпуса 2520, 3225, 5032 или 7050
- Специальные функции расширение спектра и цифровое управление
- Полоса вхождения в синхронизацию, ±ppm программируемая в генераторах серий VCXO, VCTCXO и DCXO в пределах 25-1600 при 1%-ной линейности

Полоса вхождения в синхронизацию кварцевых генераторов не превышает ± 200 ppm при 10%-ной линейности, т.е. МЭМС-генераторы в восемь и десять раз превосходят кварцевые.

За последние годы компания существенно улучшила такие столь важные для телекоммуникационных, сетевых, а также беспроводных приложений и различных носителей информации характеристики, как фазовый шум и джиттер [4]. Среднеквадратичное значение джиттера новых высокотехнологичных МЭМС-генераторов серии SiT820X на частоту до 220 МГц составляет всего 600 фс (12 кГц–20 МГц), а стабильность частоты – ± 10 ppm в промышленном диапазоне температур, т.е. в два раза больше аналогичного показателя кварцевых генераторов. Новые генераторы по площади и типу корпуса полностью совместимы с кварцевыми и ПАВ-генераторами в SMD-корпусах стандартных типоразмеров: $7,0 \times 5,0$; $5,0 \times 3,2$ и $3,2 \times 2,5$ мм.

Поскольку МЭМС-резонаторы изготавливаются по кремниевой технологии в сверхчистых условиях полупроводникового производства, их надежность, робастность и отказоустойчивость высоки. Приемочные испытания и испытания на долговечность показали, что среднее время наработки МЭМС-резонаторов на отказ превышает $500 \cdot 10^6$ ч (в 25 раз больше, чем у кварцевых генераторов), а ударо- и вибропрочность – $50 \cdot 10^3$ и 70g, соответственно.

В 2011 году компания отгрузила 800 заказчикам 120 млн. МЭМС-генераторов. По оценкам Yole Développement, ее доходы составили 20 млн. долл.

Специалисты SiTime считают, что дальнейшему развитию технологии МЭМС тактовых генераторов будут способствовать их малые размеры. Сейчас заказчикам нужны МЭМС-генераторы в корпусах тех же размеров, что и у кварцевых устройств, т.е. приборы, пригодные для их непосредственной замены. Но изготовители мобильных систем заинтересованы в уменьшении размеров используемых компонентов. И разработчики МЭМС-генераторов способны выполнить эти требования. Так, SiTime уже выпускает программируемые генераторы в корпусе размером $3,5 \times 3,0$ мм и толщиной всего 0,25 мм – самая малая на сегодняшний день толщина таких устройств. Однако пока, несмотря на то, что МЭМС-генераторы отвечают требованиям сотовых и GPS-систем к стабильности частоты и фазовому шуму, их энергопотребление велико. Компания рассчитывает к середине 2013

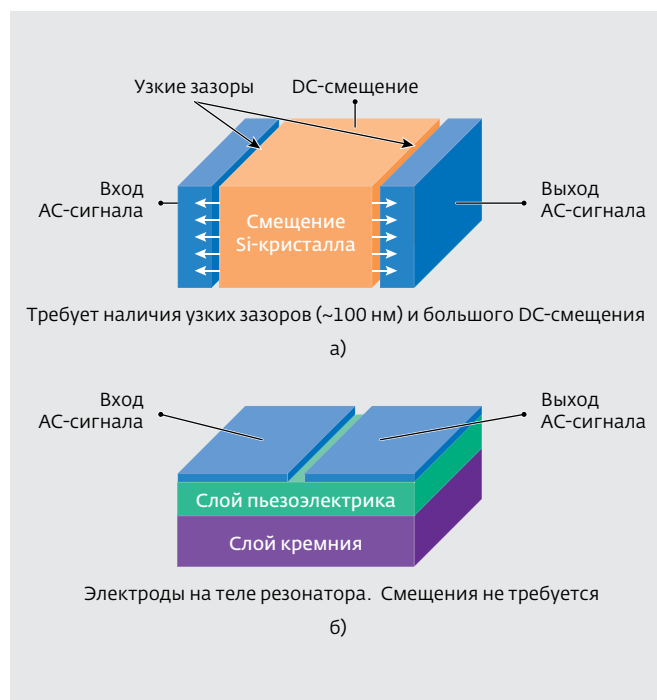


Рис.2. Структуры емкостного (а) и пьезоэлектрического (б) МЭМС-элементов

года сократить потребляемый ток до нескольких миллиампер.

Хотя в 2011 году доля МЭМС-генераторов на рынке синхронизирующих устройств, составлявшего 6,3 млрд. долл., всего лишь превышала 1%, это не препятствовало появлению их новых производителей. Сейчас на рынке МЭМС-генераторов присутствуют девять поставщиков, в том числе Discera, IDT, Sand9, Silicon Labs.

В конце 2011 года компания Integrated Device Technology (IDT) объявила о создании первого в мире генератора на основе пьезоэлектрического МЭМС (пМЭМС)-резонатора (рис.2) [5]. Рабочее напряжение резонатора подается на слой нитрида алюминия, нанесенного поверх кремниевой балочной консоли резонатора. По данным разработчиков, стабильность частоты генератора составляет ± 50 ppm в промышленном диапазоне температур. Резонансная частота приборов превышает 1 ГГц, джиттер – менее нескольких пикосекунд. Приборы на частотах до 625 МГц поддерживают LVDS- и LVPECL-выходные сигналы, что отвечает требованиям большинства систем связи, сетевой аппаратуры и высокопроизводительных компьютерных приложений. Потребляемый ток равен ~ 2 мА. Генераторы на основе пМЭМС-резонаторов поставляются в корпусах размером

7,0×5,0, 5,0×3,2 и даже 2×1,6 мм. Но руководитель отделения МЭМС компании IDT Гармит Бхугра отмечает, что возможна поставка резонаторов в корпусах, сопоставимых по размерам с кристаллом, равным 500×500 мкм.

Таким образом, недалек тот день, когда МЭМС-резонаторы начнут широко применяться в беспроводных системах.

ПИКОПРОЕКТОР – ПРИВЛЕКАТЕЛЬНАЯ ОПЦИЯ

Благодаря появлению модулей цифровой обработки света (DLP Pro), формирующих пиксели размером 7,5 вместо 10–12 мкм и тем самым сокращающих потребляемую мощность, требуемую для управления микрозеркалами, а также упрощающих их терморегулировку и позволяющих снизить стоимость, реклама пикопроекторов наконец стала выгодной. Сказались и усилия по уменьшению энергопотребления остальных микросхем пикопроектора и улучшению используемой оптики и эффективности освещения матрицы зеркал светодиодами. В результате достигнута хорошая видимость изображения и приемлемый срок службы батарей портативных мобильных устройств. Появление пикопроекторов в мобильных телефонах и считывающих устройствах стимулирует рост спроса на них.

Первая крупная компания, выпустившая в конце 2012 года серийный смартфон Galaxy Beam i8530 со встроенным пикопроектором толщиной 12,5 мм, – Samsung Electronics [6]. Пикопроектор позволяет воспроизводить непосредственно на стене, потолке или на импровизированной плоской поверхности фотографии, видео или другие медиафайлы с размером по диагонали до 50", т.е. диагональ 4"-экрана смартфона можно увеличить в 12,5 раз. Правда, пока "узкое место" проектора – яркость, равная 15 лм, так что проектором можно пользоваться только в полностью затемненных помещениях. Но такая яркость достаточна для просмотра фотографий, фильмов, клипов в домашних условиях при расстоянии между смартфоном и стеной ~2 м.

Помимо производителей смартфонов встраиваемыми пикопроекторами интересуются и крупные фирмы, управляющие сетями розничной торговли, – Brookstone, Wall-Mart, Target. Для предоставления покупателям более полных данных об имеющихся в торговом комплексе товарах несколько вспомогательных пикопроекторов стоимостью ~200 долл. каждый размещаются вокруг телефона наподобие рукава

ГОТОВА ЛИ МЭМС-ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ РЧ-ПРИЛОЖЕНИЙ?

Каждая новая модель мобильного телефона предлагает пользователю все больше услуг. Но при этом существенно возрастает число блоков, реализующих их, и частот, требуемых для их работы. В результате в малогабаритном устройстве с уменьшением габаритов приходится чем-то поступаться. И в первую очередь это – диапазон рабочих частот антенны, перестройка которых ограничена. А с появлением устройств LTE-стандарта требуется дальнейшее увеличение диапазона рабочих частот и освоение новых диапазонов. До последнего времени усилия разработчиков в основном были направлены на увеличение размера экрана, улучшение конструктивного исполнения мобильного телефона, расширение его частотного диапазона, тогда как качеству РЧ-сигнала уделялось мало внимания. В результате с 2001 года отношение теоретического качества сигнала к практически реализуемому ежегодно уменьшалось на ~1 дБ [7]. А это значит, что поставщикам услуг мобильной связи необходимо ежегодно увеличивать число базовых станций на 14%, что совсем не дешево.

Решение этой проблемы заключается в первую очередь в регулировке характеристик узкополосной антенны. Сейчас такая регулировка реализуется двумя способами:

- настройкой резонансной частоты узкополосной антенны за счет изменения ее электрической нагрузки или физической конфигурации путем размещения в апертуре антенны малогабаритного устройства настройки, способного перестраивать ее частоту без внесения дополнительных помех;
- согласованием значений импедансов антенны и входных модулей блоков мобильного телефона для предотвращения отражения поступающего сигнала обратно в источник. Импеданс антенны зависит от положения мобильного телефона (например, аппарат поднесен к голове), что влияет на передаваемую антенной мощность. Метод согласования практически представляет собой настройку полных сопротивлений по диаграмме Вольперта-Смит с тем, чтобы получать близкое к идеальному значение КСВН.

Сейчас для выполнения этих методов в основном используются GaAs- или КНИ-переключатели, которые просты в управлении и поставляются многими фирмами. Но их потери велики и, следовательно, эффективность мала. Вот почему

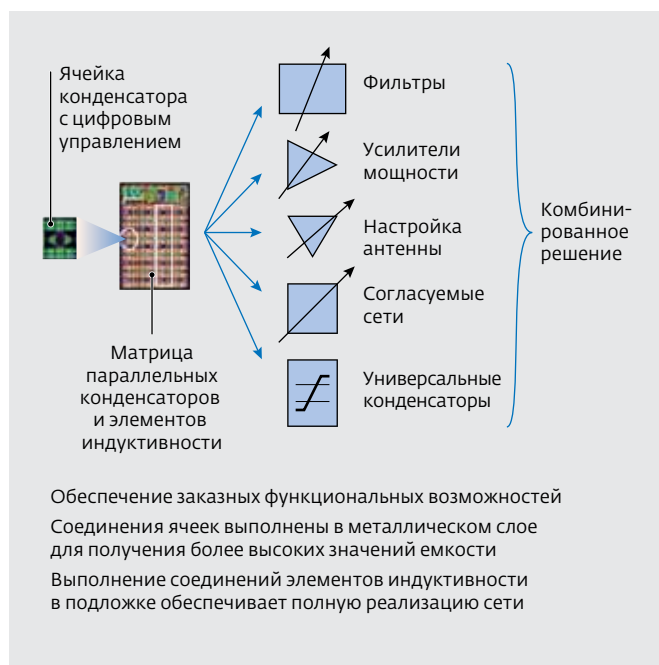


Рис.3. Использование матрицы МЭМС-конденсаторов для согласования характеристик остальных устройств мобильного телефона

сегодня все больше внимания уделяется малогабаритным и более дешевым МЭМС РЧ-схемам, которые могут не только поддерживать, но и улучшить качество связи 3G и 4G коммутационных сетей. При этом следует отметить, что такие схемы представляют собой новые функциональные устройства, а не заменяют уже существующие.

По утверждению специалистов компании WiSpry, ведущего изготовителя МЭМС РЧ-компонентов, созданные ими приборы согласования импедансов позволяют улучшить работу системы на 6 дБ, уменьшить энергопотребление на 30–40%, сократить сроки вывода разработанного изделия на рынок и снизить его стоимость [8].

В 2012 году компания выпустила третье поколение программируемых МЭМС РЧ-микросхем динамического согласования импедансов (Tunable Impedance Match, TIM) – модели WS2017 и WS2018, содержащие до 80 цифровых МЭМС-конденсаторов с малыми потерями. Микросхема предназначена для применения в системах настройки, размещаемых непосредственно рядом с узлом подключения антенны мобильного телефона (рис.3). Она обеспечивает динамическое согласование импедансов антенны и входного усилителя во всем частотном диапазоне мобильных устройств 824–2170 МГц.

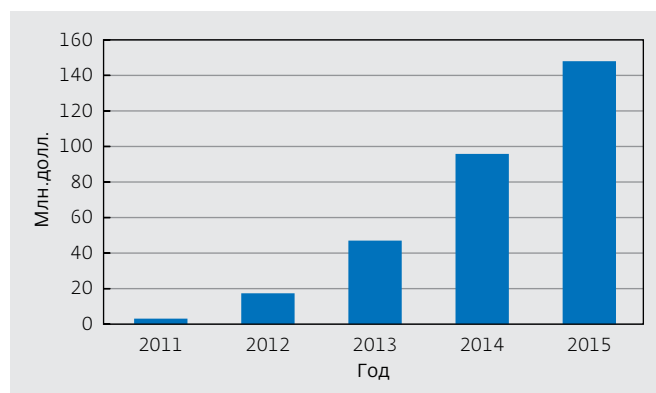


Рис.4. Динамика роста продаж МЭМС РЧ-устройств настройки (данные IHS iSuppli)

Емкость конденсаторов при подаче управляющего напряжения изменяется от 0,1 до 1 или от 0,2 до 2 пФ с шагом 5 фФ. К достоинствам МЭМС РЧ-устройства относится и достаточно высокая термостабильность, поскольку температурный коэффициент конденсатора не превышает 200 ppm/°C. Кроме того, по мнению разработчиков, применение матрицы МЭМС-конденсаторов переменной емкости позволяет увеличить срок службы батарей на 10–20%.

МЭМС РЧ-схема согласования импедансов изготавливается на активной кремниевой структуре по стандартной КМОП-технологии, наподобие специализированной ASIC-микросхемы. Матрица переменных конденсаторов способна обеспечивать согласование импедансов при различных положениях телефона: наклонном при удержании его в руке, лежащем на плоской поверхности.

Таким образом, компания WiSpry предлагает цифровую управляемую программными средствами матрицу РЧ-конденсаторов на основе МЭМС-структур с чрезвычайно высокой добротностью, малыми вносимыми потерями и высокой линейностью. МЭМС РЧ-изделия компании позволят разработчикам систем создать новые архитектуры, необходимые для выполнения задач, которые ставят новые стандарты и новые осваиваемые рабочие частоты. И, конечно, инновационные изделия перспективны для применения в мобильных устройствах LTE-стандарта, за которыми будущее рынка сотовых телефонов [9].

Первые МЭМС РЧ-устройства компании WiSpry были изготовлены крупным американским контрактным производителем – Jazz Semiconductor по 0,18-мкм технологии на пластинах диаметром 200 мм. В сентябре 2011 года WiSpry начала

поставки промышленных образцов микросхем динамического согласования импедансов. И в конце года Samsung выпустила первые телефоны модели Focus Flash с МЭМС-схемой согласования импедансов WiSpry модели A2101 [10]. Схема согласования содержит сеть элементов индуктивности и цифровые перестраиваемые МЭМС-конденсаторы, выполненные на одной подложке с кремниевой КМОП-схемой с логическими устройствами для управления работой микросхемы согласования, последовательным интерфейсом, генератором подкачки заряда и высоковольтными драйверами МЭМС.

На выставке бытовой электроники CES 2013 WiSpry продемонстрировала новую матрицу перестраиваемых цифровых конденсаторов модели WS1035, занимающую на плате площадь на 60% меньшую, чем предыдущие приборы, при обеспечении тех же характеристик [11]. Емкости конденсаторов матрицы изменяются в пределах 6 бит с шагом 100 фФ. Она совместима с интерфейсами MIPI Alliance RFFE и SPI. Предназначена для мобильных телефонов стандартов LTE и LTE-Advanced.

Приборы согласования импедансов смогут найти применение и в планшетах, считывающих устройствах, ноутбуках и электронных защитных ключах.

Компания рассчитывает достичь объема отгрузок МЭМС РЧ-блоков согласования импедансов в 1 млн. единиц. На основе прогноза рынка смартфонов, согласно которому с 2001 по 2020 год объем их продаж увеличится с 700–900 млн. до примерно 2,8 млрд. устройств, компания IHS iSuppli оценивает рост продаж МЭМС РЧ-устройств настройки к 2015 году в 200 раз до 150 млн. долл. (рис.4)

С начала 2012 года отгрузки важным постоянным покупателям опытных образцов МЭМС РЧ-устройств двух типов (элементов настройки резонансной частоты антенны и согласования импедансов) начала компания Cavendish Kinetics. Приборы компании выполнены по запатентованной технологии NanoMech третьего поколения, которая позволяет контрактным производителям изготавливать переменные МЭМС-конденсаторы с помощью стандартной КМОП-технологии. Благодаря этому в МЭМС-приборах межсоединения формируются в ходе процессов, используемых при создании КМОП-схем, что позволяет получать весьма малое эквивалентное последовательное сопротивление и, тем самым, чрезвычайно высокий фактор качества Q. Минимальное значение

емкости перестраиваемых конденсаторов составляет 0,5 пФ, диапазон перестройки – 5:1. Температурный разброс значений емкости не превышает 1%, разброс параметров приборов – 5%. Приборы рассчитаны на мощности устройств, устанавливаемых в сотовых телефонах (> 4 Вт).

МЭМС РЧ-устройства поставляются в виде негерметизированных кристаллов со столбиковыми выводами для монтажа перевернутым кристаллом (flip chip). Площадь их не превышает 2 мм² при толщине 0,4 мм. Они могут легко размещаться в апертуре антенны (площадью до 1 см³) и регулировать ее частоту без внесения дополнительных помех. По утверждению разработчиков, размещение одного МЭМС РЧ-элемента в цепи антенны приводит к повышению эффективности работы мобильного устройства в LTE-диапазонах (700, 2500, 2300 МГц) в два раза по сравнению с современными системами.

В середине 2011 года Cavendish Kinetics заключила контракт с компанией Qualcomm на сумму в 10 млн. долл. на освоение производства МЭМС РЧ-устройств по технологии NanoMech. Компания планирует начать массовое производство созданных устройств настройки частоты антенны в начале 2013 года [12].

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИК-ДАТЧИКОВ

Эксперты компании Omgon считают, что существующее сегодня требование к снижению энергопотребления будет способствовать освоению массового производства дешевых ИК-датчиков, выполненных на основе МЭМС-технологии. К таким приборам относится выпущенный в середине 2012 года высокочувствительный ИК-датчик D6T, изготовленный по запатентованной компанией МЭМС сенсорной технологии.

Датчик работает на основе эффекта Зеебака, согласно которому при разнице температур в точках контакта двух металлов генерируется термо-ЭДС. Термоэлемент формируют последовательно соединенные термодпары на основе пленок поликремния n⁺- и p⁺-типов и алюминия. Горячие переходы на диэлектрической мембране с высокой термостойкостью и холодные переходы на кремнии с высокой теплопроводностью (рис.5) обеспечивают быстрое срабатывание и высокую энергию преобразования.

Компанией разработан и изготовлен каждый компонент высокочувствительного датчика – от МЭМС-сенсоров до микросхемы микроконтроллера и других специализированных элементов.

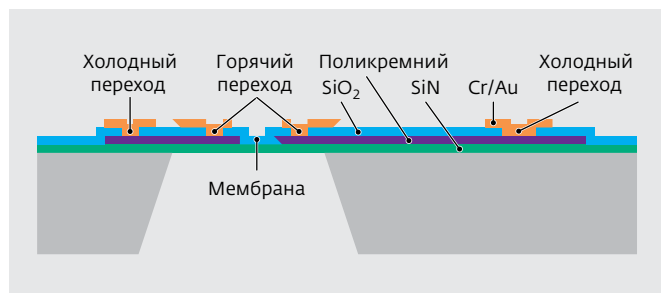


Рис.5. Структура ИК-датчика D6T

Для эффективного детектирования ИК-излучения используются высококачественные кремниевые линзы.

Датчик, работающий по принципу регистрации ИК-излучения с эквивалентом температурного шума $0,14^{\circ}\text{C}$, позволяет обнаруживать людей (даже неподвижных) в помещении на расстоянии до $\sim 4\text{--}6$ м. Датчик может измерять температуру не только в конкретной точке, но и в объеме, контролировать температуру жилого помещения или производственной линии, устанавливать необычные отклонения температуры оборудования, указывающие на его перегрев или неисправность. Он перспективен для регулировки систем обогрева и кондиционирования без затраты излишней энергии. Благодаря регистрации необычных изменений температуры датчик может обнаруживать неисправности линии электросети, горячие точки до того, как вспыхнет пожар, или отсутствие пациента в палате. Компания выпускает матрицы, содержащие 8-16 схем ИК-датчиков. В 2013 финансовом году она рассчитывает получить доход от продаж датчика в 2 млрд. иен (~ 20 млн. долл.) [13].

Несомненно, интересны и новые МЭМС-устройства, представленные на конференции IEDM 2012.

МЭМС НА IEDM 2012

Кремниевые МЭМС-резонаторы

Как уже отмечалось, кремниевые синхронизирующие устройства на основе МЭМС-резонаторов – весьма перспективная альтернатива кварцевым генераторам. Одна из серьезных проблем при создании таких устройств – объединение структуры МЭМС-резонатора с КМОП-микросхемой, требующее первоначального отделения структуры от подложки после ее изготовления. На конференции IEDM специалисты

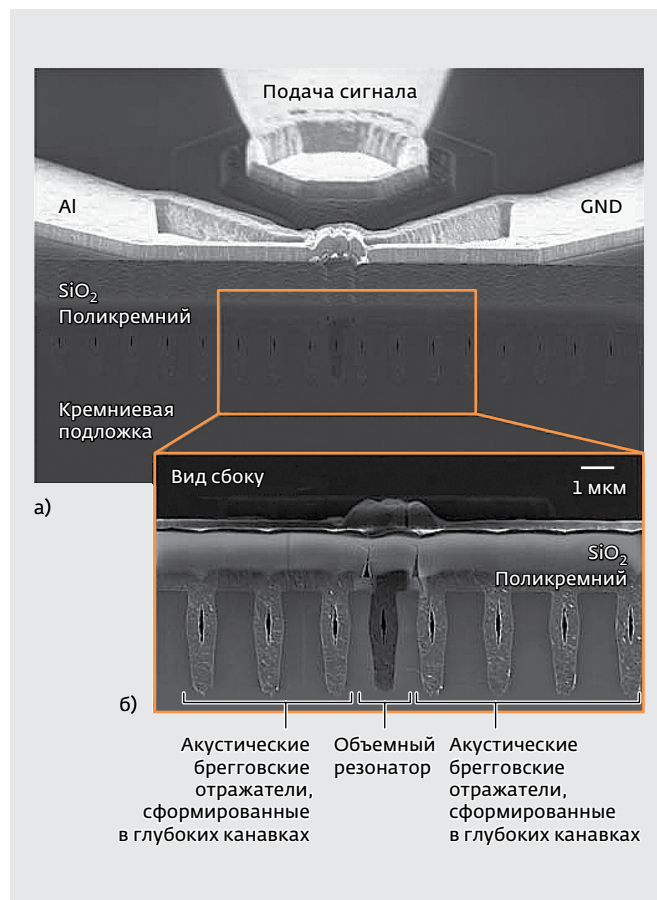


Рис.6. Снимки встраиваемого DT МЭМС-резонатора: вид сверху (а) и сбоку (б)

Массачусетского технологического института доложили о возможности непосредственно изготавливать в КМОП-микросхеме МЭМС-резонатор, электростатически управляемый конденсаторами, формируемыми в глубоких канавках (Deep Trench, DT) [14]. Помимо DT-конденсаторов, выполняющих также и функцию считывания, в резонаторе для ограничения колебаний использованы акустические брегговские отражатели (Acoustic Bragg Reflectors, ABRs). Отражатели ABR, образуемые чередующимися пленками монокристаллического кремния и поликристаллического кремния p-типа с высоким и низким значениями акустического сопротивления, формируют объемный резонатор и располагаются по его бокам. В качестве диэлектрика конденсатора использовалась пленка нитрида кремния толщиной 15 нм. Поскольку объемный резонатор расположен в плоскости пластины, его частоту, определяемую размерами полости, можно задавать с помощью процесса литографии (рис.6).

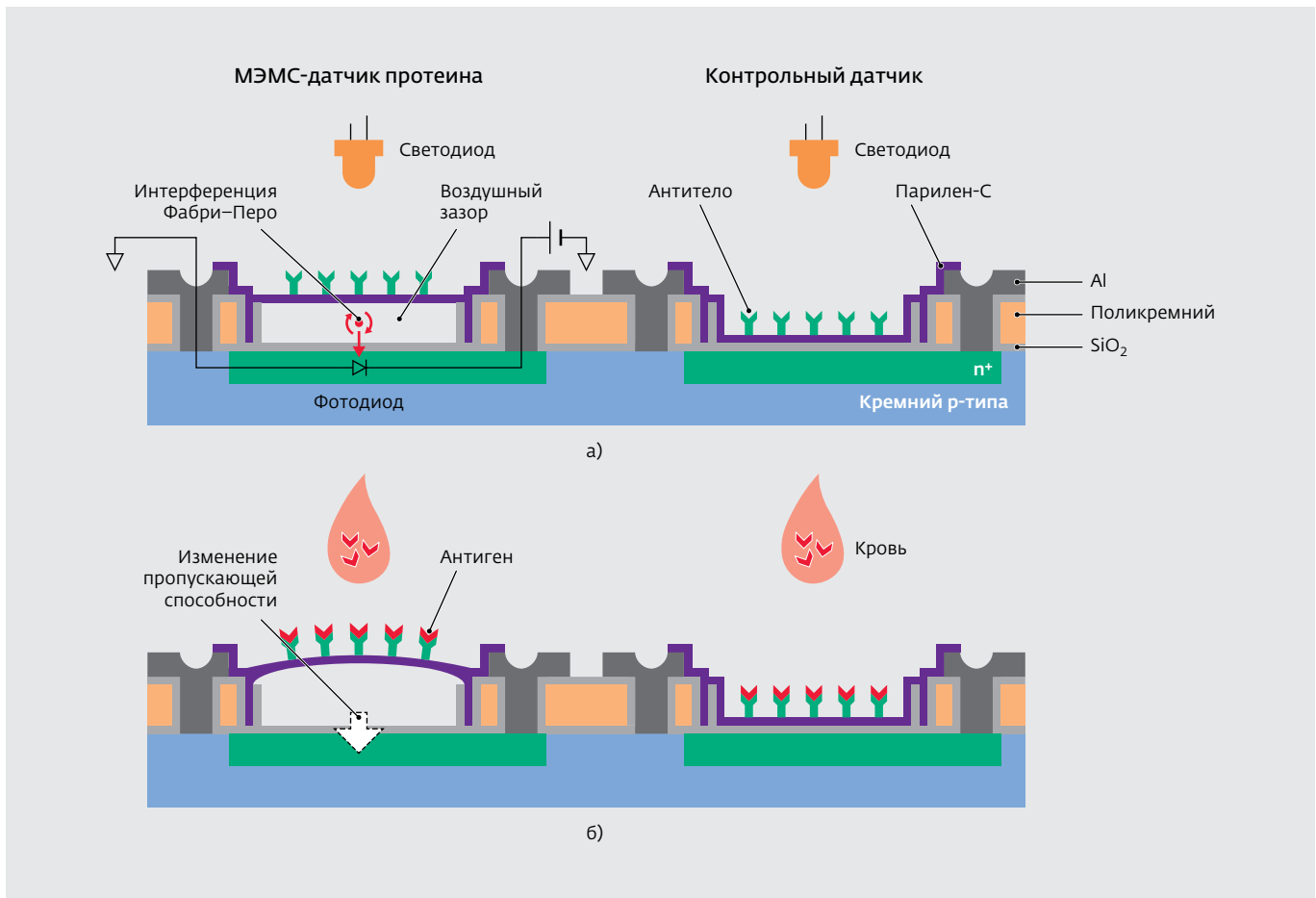


Рис.7. Структура (а) и принцип действия (б) МЭМС-датчика протеина

Резонаторы изготавливались в лаборатории технологии микросистем института по 32-нм КНИ-технологии на подложке низкоомного кремния с нанесенной поверх нее пленкой нитрида кремния. В подложке с помощью криогенного травления в индуктивно-связанной плазме Cl_2/HBr формировались канавки глубиной 4,5 мкм, которые затем заполнялись осаждаемым поверх подложки поликремнием p-типа. В этом слое создавался рисунок окон для электрической изоляции преобразователя и формирования контактов к подложке. Поверх структуры резонатора наносился защитный слой оксида толщиной 1,5 мкм, в котором формировались окна под металлические TiN/Al -контакты к преобразователю и подложке.

Испытания созданных встраиваемых МЭМС-резонаторов при комнатной температуре и подаче РЧ-сигнала мощностью 5 дБм показали, что резонансная частота при наличии 20 АВР составляла 3,2 ГГц, при 50 АВР – 3,3 ГГц (добротность была

равна 2057 – самое высокое сегодня значение для встраиваемых резонаторов).

Немаркируемый биодатчик

Для быстрого диагноза заболевания перспективны немаркируемые биодатчики поверхностного напряжения, особенно датчики, выполненные с помощью полупроводниковой технологии. Однако преобразование уровня механической деформации в электрический сигнал таких биодатчиков малоэффективно и, следовательно, их чувствительность невелика. Специалистами Технологического университета Тойохаши и японского агентства науки и технологии предложен немаркируемый датчик протеина, содержащий МЭМС-интерферометр Фабри-Перо и контрольный датчик протеина, а также электронную схему управления и считывания значений одновременно измеряемых поверхностного напряжения и изменения пропускной способности нанополости датчика, вызванные иммобилизацией протеина [15].

Датчик содержит кремниевый фотодиод и свободно укрепленную гибкую тонкопленочную мембрану, образующую нанополость интерферометра. Предварительно на мембране иммобилизуются антитела. Возникающее в результате реакции антиген-антитело поверхностное напряжение мембраны приводит к ее смещению, изменению длины волны интерферометра Фабри-Перо и попадающего на фотодиод излучения (рис.7). Таким образом, МЭМС-интерферометр позволяет регистрировать молекулярное взаимодействие в виде тока фотодиода. Эталонный датчик без нанополости фиксирует лишь вызываемое протеином или жидкостью изменение пропускной способности датчика.

МЭМС-датчик протеина изготавливался на пластине кремния р-типа диаметром 100 мм. Фотодиод формировался ионной имплантацией фосфора. С помощью химического осаждения из паровой фазы поверх пластины наносился временный слой поликремния, который затем в области формирования контрольного датчика удалялся реактивным ионным травлением. Для получения межсоединений напылялась пленка алюминия, после чего в процессе вакуумного осаждения наносился слой парилена-С, который затем травился для получения деформируемой мембраны. Выбор парилена-С в качестве материала мембраны обусловлен его высокой пропускной способностью и малым модулем упругости, а также хорошей чувствительностью к поверхностному напряжению. Избыточные области временного слоя поликремния с помощью XeF_2 вытравливались и окна заполнялись сухим резистом для предотвращения попадания любой жидкости в нанополость интерферометра при взаимодействии биомолекул. На конечном этапе на деформируемую мембрану для иммобилизации биомолекул наносилось покрытие из парилена-АМ. Толщина пленки парилена составляла 350, диаметр – 200, высота воздушного зазора – 300 нм, толщина слоя двуокиси кремния – 270 нм. Минимальное значение регистрируемого поверхностного напряжения не превышало -1 мкН/м, что на два порядка меньше, чем у пьезорезистивных датчиков.

При иммобилизации антител ток фотодиода опытного образца датчика изменялся на 23,7 нА при напряжении смещения 3 В. При этом пропускная способность контрольного датчика оставалась постоянной.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Doe P.** Emerging MEMS: Leading Suppliers say MEMS oscillators, picoprojectors and tunable RF are finally ready to take off. – www.mydigitalpublication.com/publication/?i=132414
2. **Williamson J.** An overview of MEMS based timing devices. – www.memsjournal.com/2011/05/an-overview-of-mems-based-timing-devices.html
3. Programmable Features for Best Flexibility. – www.sitime.com/company/technology-overview/mems-oscillators/configurability
4. MEMS-based Programmable Oscillators With Sensational 600 fs of Phase Jitter And Continuous Frequency Stability of ± 10 ppm. – www.msc-ge.com/en/news/pressroom/manu/1241-www/6559-www.html
5. **Bhugra H.** MEMS Oscillators by IDT: Announcing the World's First pMEMS Oscillators. – www.youtube.com/watch?v=SvYEHONFzpg
6. Review: Samsung Galaxy Beam (GT-I8530). – www.sammobile.com/2012/07/04/review-samsung-galaxy-beam-gt-i8530/
7. **Yost D.** MEMS for tunable RF applications: has the time finally come? – www.memsjournal.com/2012/09/mems-for-tunable-rf-applications-has-the-time-finally-come.html
8. RF MEMS for smartphones: what are the best opportunities? – www.memsjournal.com/2012/04/rf-mems-for-smartphones-where-are-the-best-opportunities.html
9. WiSpray Innovations. An Evolving Wireless Landscape. – www.wispry.com/technology-innovations.php
10. RF MEMS tuned for growth, shows smartphone win – www.electroiq.com/articles/stm/2012/01/rf-mems-primed-for-growth-shows-smartphone-win.html
11. WiSpray Announces Benchmark-Setting LTE Tunable Digital Capacitor Array. – www.businesswire.com/news/home/20130109005090/en/WiSpray-Announces-Benchmark-Setting-LTE-Tunable-Digital-Capacitor
12. Cavendish and Antenna Tuning. – www.cavendishkinetics.com/index.php/applications/antenna-tuning
13. OMRON Releases Non-Contact D6T MEMS Thermal Sensor. – News Release 2012. – www.omron.com/media/press/2012/06/e0627.html
14. **Wang W. and Weinstein D.** Deep Trench Capacitor Drive of a 3.3 GHz Unreleased Si MEMS Resonator. – hybrid.mit.edu/pubs/IEDM12_Wang_DTcap_resonator.pdf
15. **Oyama H., Takahashi K., Misawa N. et. al.** A MEMS Based Fabry-Perot Protein Sensor with Reference Sensor. – www.rsc.org/images/LOC/2011/PDFs/Papers/228_0701.pdf