

РАДИОЧАСТОТНЫЕ МЭМС + КМОП ОТРАБОТАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, ГОТОВАЯ К ЧАСУ ПИК

ЧАСТЬ 2

В.Шурыгина

Сегодня электронной промышленности требуются реконфигурируемые радиочастотные входные блоки, способные работать с самыми разнообразными протоколами. В таких блоках нужно применять перестраиваемые модули, а не переключатели каналов. В свою очередь модули должны быть малогабаритными, иметь низкие потери, большой диапазон перестройки частоты и малое энергопотребление. Выполнить эти требования в полной мере современные КМОП-схемы уже не могут. Но тут им на помощь приходят реконфигурируемые МЭМС-устройства, работающие под управлением КМОП-микросхем. Рассмотрим созданные РЧ МЭМС/КМОП-переключатели, переключаемые конденсаторы, резонаторы с электростатическим, электротермическим, пьезоэлектрическим управлением, которые могут заменить в РЧ-системах переключатели на основе полевых транзисторов и транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT).

РАДИОЧАСТОТНЫЕ МЭМС/КМОП-УСТРОЙСТВА
МЭМС-переключатели, изготавливаемые на этапе постобработки, успешно продемонстрировали компании IBM в 2004 году и NTT в 2006. МЭМС/КМОП-микросхема компании NTT представляла собой многоканальный однополюсный переключатель на восемь направлений с напряжением актуации 3,3 В. МЭМС-переключатель изготавливался методом низкотемпературной обработки. По данным компании, прибор выдержал 10^9 циклов переключения без отказов.

РЧ МЭМС до последнего времени поставлялись на рынок в малом объеме в основном для контрольно-измерительного оборудования. Интерес к их применению в смартфонах появился в середине 2010 года, когда возникли затруднения с приемом сигналов смартфоном iPhone 4 при изменении

его положения. Оказалось, что так называемая проблема "мертвой хватки" может быть устранена с помощью РЧ МЭМС, обеспечивающих регулировку частоты антенны.

В начале 2012 года демонтаж нового смартфона Focus Flash компании Samsung, который был выпущен на рынок в ноябре 2011 года, показал наличие в нем микросхемы согласования импедансов (Tunable Impedance Matching, TIM) антенны и входных блоков мобильного телефона, выполненной на основе матрицы МЭМС-конденсаторов компании WiSpry. Аналитическая компания IHS iSuppli, комментируя применение МЭМС/КМОП-схемы настройки антенны в смартфоне Samsung, отметила возможность 200-кратного увеличения продаж РЧ МЭМС – с 720 тыс. долл. в 2011 году до 150 млн. долл. в 2015 [9].

Компания WiSpry, занимающаяся разработкой перестраиваемых РЧ-полупроводниковых приборов для беспроводных систем, в начале 2010 года получила патент на МЭМС-конденсаторы с цифровой перестройкой емкости, актуаторы и методы их реализации. В том же году компания заключила соглашение с корпорацией IBM на интеграцию создаваемых МЭМС-емкостных переключателей с 0,18-мкм КМОП-микросхемами с многослойной металлизацией. МЭМС-конденсаторы функционировали подобно пассивным РЧ-компонентам и управлялись независимо друг от друга. Это и позволило разработчикам объединять их для получения перестраиваемых РЧ-приборов, используемых в фильтрах, усилителях мощности, антенных согласующих устройствах, схемах согласования, универсальных конденсаторах.

В качестве примера можно привести двухразрядный перестраиваемый МЭМС-конденсатор, содержащий четыре компонента: первичный и вторичный актуаторы, два РЧ-конденсатора и линию передачи РЧ-сигнала. Актуаторы можно соединять друг с другом или подключать к отдельным задающим узлам. Линия передачи РЧ-сигнала и актуаторы разделены воздушным зазором и оксидом кремния. Изоляция фиксированного электрода МЭМС-конденсатора и диэлектрическое покрытие первого слоя металлизации КМОП-схемы позволяют минимизировать паразитную шунтирующую емкость. Дополнительная паразитная емкость уменьшалась за счет уменьшения размеров контактных площадок под монтаж прибора методом перевернутого кристалла (flip-chip). Ячейка, содержащая четыре перестраиваемых конденсатора компании WiSpry, имела следующие характеристики:

- Емкость в отключенном состоянии, C_{min} , пФ 0,13
- Емкость во включенном состоянии, C_{max} , пФ 1,27

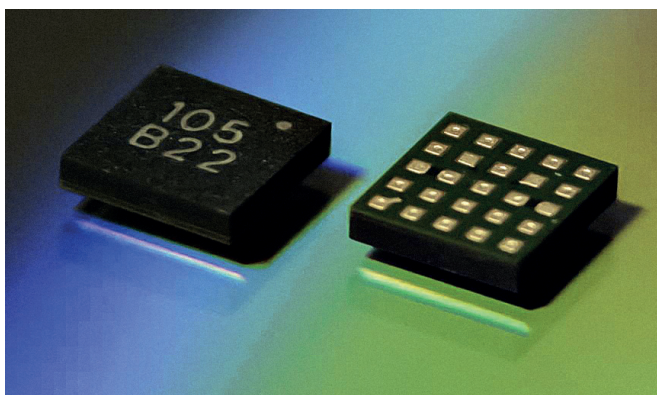


Рис.4. МЭМС-схема WS1050 в стандартном корпусе типа LGA

Диапазон настройки 10:1
Показатель качества

- при 1 ГГц 160
- при 2 ГГц 87

Допустимая непрерывная мощность, Вт 2
Напряжение втягивания консоли, В 27
Напряжение самосрабатывания, В 40
Рабочее напряжение, В 3,5-5,0

В 2011 году WiSpry выпустила две МЭМС/КМОП-микросхемы настройки импеданса антенны мобильного телефона – WS2017 и WS2018 на диапазон частот 824–2170 МГц [10]. Схема WS2018 может работать и в LTE-диапазоне частот 700/2600 МГц. Таким образом, эти микросхемы настройки импеданса антенны могли использоваться в любых чип-сетах смартфонов, имевшихся в то время на рынке. Схемы содержали блок индуктивности с малыми потерями и МЭМС/КМОП-конденсаторы с цифровой перестройкой емкости с шагом 0,125 пФ и позволяли динамически компенсировать КСВН, равный 20:1 и больше. Настройка микросхемы WS2017 для компенсации изменений импеданса антенны контролировалась модемом через последовательный интерфейс SPI, микросхемы WS2018 – через SPI и RFFE-интерфейсы.

И сегодня компания продолжает активно развивать технологию создания перестраиваемых МЭМС-конденсаторов. В ноябре 2013 года она объявила о выпуске РЧ МЭМС-схемы емкостного переключателя WS1050 с тремя индивидуально управляемыми и конфигурируемыми конденсаторами (рис.4). Схема обеспечивает широкополосную настройку антенны, собственная частота которой превышает 3,5 ГГц. Испытания с помощью векторного анализатора цепей PXI компании National Instruments показали, что время емкостной настройки WS1050 составляет 20 мкс. Переключатель имеет следующие характеристики:

Диапазон напряжения питания, В 2,5-5,0

- Потребляемый ток, мА
- в режиме ожидания 1,0
- в рабочем режиме 38

Емкость конденсатора блока, пФ 0,5-6,0

Шаг изменения емкости, мин., пФ 0,1

Добротность на 800 МГц 150

Генерируемые гармоники при C_{max} и входном сигнале мощностью 24 дБм, дБн

- вторые -110
- третьи -130

Тактовая частота на входе последовательного интерфейса, МГц 26

Опорное напряжение интерфейса MIPI RFFE, В ... 1,8

Температурный диапазон, °С от -40 до 125

Срок службы, число циклов 10^9
 Корпус..... LGA размером 2,6×2,7 мм
 Каждый конденсатор МЭМС-схемы имеет отдельный вывод. Схема может быть включена последовательно или параллельно передающей линии. Восемь конфигурируемых идентификаторов источника поддерживают до восьми отдельных блоков настройки на шину мобильного устройства. WS1050 удовлетворяет требованиям, предъявляемым к блокам настройки 2G-, 3G- и LTE-мобильных телефонов. Может использоваться в контрольно-измерительном оборудовании, фазовращателях, перестраиваемых фильтрах и усилителях.

А уже на состоявшемся в конце февраля 2014 года Всемирном мобильном конгрессе (Mobile World Congress 2014) WiSpry представила три новые схемы настройки антенны мобильного телефона с четырьмя индивидуально управляемыми МЭМС-конденсаторами – WS1040, WS1041 и WS1042 (рис.5) [11]. Схемы пригодны для разнообразных применений. Входящий в них преобразователь постоянного тока обеспечивает работу с одной шиной питания. Применение унифицированных идентификаторов источника и последовательной или параллельной системной конфигурации обеспечивают гибкость конструкции системы телефона.

Полная емкость схемы согласования импедансов антенны и входного блока мобильного телефона **WS1040** составляет 12 пФ. Поставляется она в малогабаритном корпусе, размеры которого на 30% меньше, чем у WS1050. Предназначена схема для таких развиваемых сегодня систем, как носимые мобильные устройства. Перспективны и такие

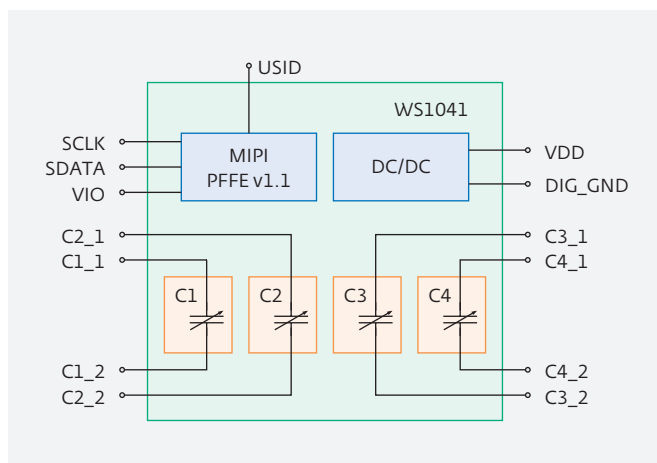


Рис.5. Блок-схема РЧ МЭМС-схемы типа WS1040, WS1041 и WS1042, содержащей четыре перестраиваемых конденсатора

области применения, как смартфоны, фазовращатели и устройства согласования усилителей мощности.

РЧ-схема **WS1041** предназначена для настройки частоты антенны. Полная емкость схем настройки частоты, как правило, меньше, чем у схем согласования импедансов антенны и входных блоков. Они должны обеспечивать высокоточную перестройку и выдерживать высокое рабочее напряжение. В то же время такие схемы, предназначенные для сотовых телефонов LTE-стандарта и поддерживающие технологию агрегации несущих частот (Carrier Aggregation, CA), не должны генерировать гармоники или ухудшать добротность антенны. Схема WS1041, выдерживающая напряжение до 80 В, удовлетворяет этим требованиям. Генерируемая третья гармоника составляет -150 дБн, а добротность -159 при максимальном значении емкости и низких частотах. Полная суммарная емкость схемы составляет 6 пФ. WS1041 хорошо сочетается со схемой WS1050, обеспечивая широкий диапазон согласования импедансов и настройки частоты.

Схема **WS1042** предназначена для применения в настраиваемых фильтрах. Благодаря высокой линейности она может использоваться и в приемных, и в передающих каналах. Полная суммарная емкость схемы составляет 3 пФ, шаг ее изменения не превышает 25 фФ, скорость регулировки частоты фильтра - не больше 20 мкс. Добротность схемы равна 200 при максимальной емкости. Рабочее напряжение достигает 100 В. 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.

Серьезный конкурент WiSpry, компания Cavendish Kinetics, как уже указывалось, в 2010 году сообщила о создании встроенной в металлизацию стандартной КМОП-схемы МЭМС-переключателя с металлическими привариваемыми контактами [12]. Испытания переключателя на надежность показали возможность выдерживать до 10^9 циклов переключения практически без изменения напряжения актуации. Напряжение актуации оставалось постоянным и в диапазоне температур от -150 до 300°C, хотя контактное сопротивление слегка изменялось, возможно, из-за температурной зависимости удельного сопротивления металла и силы адгезии.

Переключатель предназначался для создания энергонезависимой схемы памяти, способной функционировать в неблагоприятных условиях

среды. Однако спрос на такие схемы памяти оказался небольшим, и компания решила использовать разработанную структуру в качестве емкостного переключателя. Постоянное напряжение, подаваемое на его верхний электрод, вызывает подъем консольной балки и, соответственно, увеличение зазора между электродами и уменьшение емкости. При подаче напряжения на нижний электрод зазор становится меньше и емкость увеличивается (рис.6). Испытания МЭМС/КМОП-схемы на надежность также показали ее безотказную работу при 10^9 циклов переключения. Переключатель предназначался для энергонезависимой МЭМС-памяти, способной работать в неблагоприятных условиях. Правда, это потребовало его совершенствования. Но в результате был создан РЧ МЭМС-конденсатор перестраиваемой емкости третьего поколения для схем перестройки частоты антенны мобильных телефонов в диапазоне частот 700 МГц–2,5 ГГц [13].

Благодаря тщательному проектированию прибора и технологии его изготовления в микросхеме используются МЭМС-конденсаторы самого небольшого на сегодняшний день размера. Вносимые потери при этом малы. Кроме того, переключатель имеет весьма небольшие значения минимальной емкости $C_{\text{мин}}$. Диапазон перестройки частоты переключателя составляет 5:1. Отклонения от номинального значения не превышают 0,25 МЗР. Получить низкие потери разработчики сумели за счет уменьшения эквивалентного

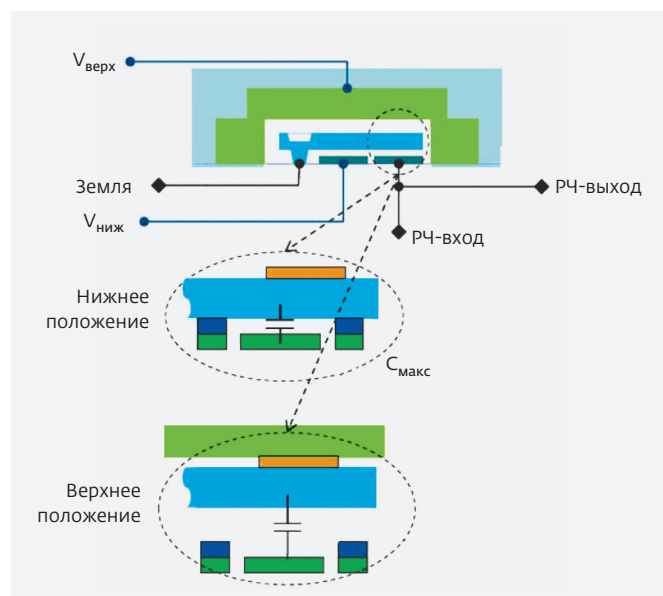


Рис.6. Радиочастотный МЭМС-емкостной переключатель компании Cavendish

последовательного сопротивления (ESR) схемы. Чем больше ESR, тем больше потери схемы: увеличение эквивалентного сопротивления на 1 Ом приводит к увеличению потерь антенны на 2–3 дБ. Таким образом, ESR устройства настройки должно быть как можно меньше.

Разработчики решили эту задачу за счет формирования перестраиваемых конденсаторов в многослойной структуре металлизации и использования одного слоя диэлектрика. Это позволило уменьшить ESR и обеспечить максимальное рабочее напряжение в 650 В. Как уже указывалось, емкость МЭМС зависит от подачи напряжения на верхний или нижний электрод. В структуре устройства перестройки предусмотрены механические ограничители, фиксирующие два положения консольной балки. Поэтому подаваемое напряжение точно не задает положение балки, т.е. значение емкости, скорее всего, определяет скорость ее перемещения из одного положения в другое. В разработанной схеме перестройки частоты на консольную балку подается напряжение в диапазоне 22–24 В, генерируемое внутрисхемным блоком накачки заряда на напряжение 30 В. Для каждой конкретной МЭМС-структуры можно устанавливать требуемое напряжение актуации, причем чем меньше напряжение, тем меньше вносимые потери. Правда, если напряжение слишком мало, ухудшается контакт с ограничителем, а при слишком высоком напряжении возможно соударение с ним.

Даже при таком "цифровом" решении задачи перестройки частоты емкость переключателя может изменяться. Поэтому исследователи компании используют один "конденсатор", состоящий из соединенных параллельно небольших конденсаторов, что и позволяет сглаживать разброс значений емкости прибора. Такая матрица позволяет формировать различные сочетания конденсаторов и тем самым получать различные значения емкости. В созданную МЭМС/КМОП-схему переключателя частоты антенны входит матрица, содержащая ~700 небольших конденсаторов, часть которых соединены для получения 32 различных значений емкости. Емкостной переключатель смонтирован в корпус, сопоставимый по размерам с кристаллом и ненамного превосходящий по габаритам обычный конденсатор. ESR МЭМС/КМОП-схемы перестройки частоты антенны равно 0,3 Ом, что соответствует потерям в 1 дБ. ESR схемы переключателя, в котором применяются традиционные перестраиваемые конденсаторы с диэлектриком на основе титаната стронция-бария, составляет 3 Ом, или потери – 3,5 дБ. Правда, применение дискретного

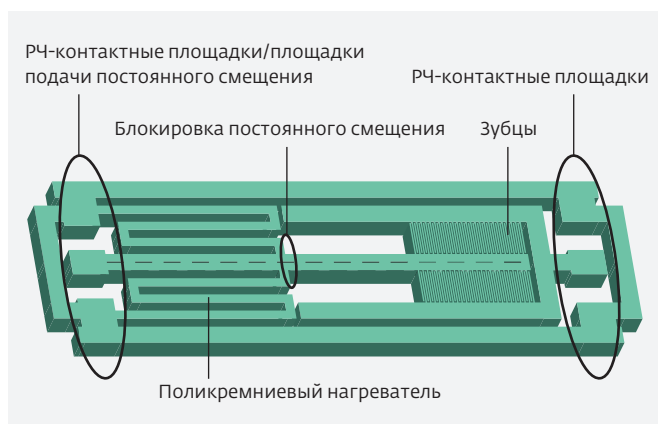


Рис.7. Термоуправляемый МЭМС-емкостной переключатель

конденсатора высокого качества позволяет получить ESR, равное 0,25 Ом.

Летом 2013 года компания предоставила образцы МЭМС-схемы переключаемого конденсатора своим стратегическим заказчикам для установления их соответствия требованиям технических условий и надежности. Таким образом, МЭМС-схема емкостного переключателя для настройки антенны мобильного телефона "стартовала", и возможно, через год или два мы встретим такие схемы настройки в сотовых телефонах следующих поколений [12].

РЧ МЭМС-переключатели, изготавливаемые постобработкой в BEOL-слоях металлизации КМОП-схемы

Основные достоинства МЭМС-переключателей – меньшие вносимые потери, более высокие коэффициент развязки, рабочее напряжение и линейность в сравнении с рпн-диодами и КМОП-переключателями. Правда, достаточно высокое напряжение актуации препятствует их широкому применению в приемопередатчиках мобильных устройств. Тем не менее, ведется их активная разработка.

В числе РЧ МЭМС/КМОП-микросхем, создаваемых методом постобработки в BEOL-слоях металлизации КМОП-схемы, отметим последовательно подключаемый к линии передачи термоуправляемый переключатель [14]. Переключатель создан совместными усилиями специалистов компании Hughes Network Systems, Университета Джона Вашингтона и Калифорнийского университета в Санта-Барбаре. МЭМС-структура переключателя выполнена в BEOL-металлизации КМОП-микросхемы, изготовленной по 0,6-мкм технологии

компании AMI Semiconductor*. Консольную балку и зубцы гребенчатой структуры формируют три слоя алюминия и двуокиси кремния, при этом балка изготавливается с помощью двух операций РИТ. В качестве материала нагревателя, приводящего к актуации МЭМС-переключателя, использован поликремний. Предусмотрены контактные площадки для подачи как постоянного смещения, так и РЧ-сигнала. Для надлежащего разделения консольной балки и термоактуатора между ними выполнен небольшой зазор (рис.7).

Регулировку емкости МЭМС-переключателя обеспечивают его гребенчатая структура и термоактуатор. Нагрев термоактуатора при подаче на него постоянного напряжения приводит к опусканию консольной балки и к контакту расположенных с двух ее сторон зубцов гребенки, что соответствует открытому состоянию переключателя. Размер перекрытия зубцов определяет значение емкости. В отсутствие напряжения на термоактуаторе внутреннее напряжение консольной балки приводит к ее подъему и нарушению контакта зубцов. Переключатель возвращается в отключенное состояние.

Отношение значений емкости во включенном и отключенном состояниях составило 15:1. Вносимые потери и развязка на частоте 5,4 ГГц – менее 1,6 и 33 дБ соответственно. Предназначен переключатель для РЧ схем входного каскада (управляемых напряжением генераторов, фильтров, согласующих схем) промышленных, научных и медицинских систем, а также беспроводных локальных сетей.

Исследователи Университета Ватерлоо для получения большого отношения значений емкости в отключенном и включенном состояниях, а также для уменьшения вносимых потерь, повышения скорости срабатывания и рабочего напряжения предложили МЭМС/КМОП-емкостной переключатель с электростатической актуацией, включаемый параллельно передающей линии [15]. Схема выполнена с помощью рассмотренных выше процессов постобработки BEOL-слоев металлизации 0,34-мкм КМОП-схемы контрактного производителя TSMC. Структура переключателя содержит секцию копланарного волновода и две изогнутые кверху мембраны, выполненные на основе пленок алюминия/двуокиси кремния. Для уменьшения вносимых потерь и исключения паразитных эффектов, вносимых низкоомной кремниевой

* В 2008 году была приобретена компанией On Semiconductor.

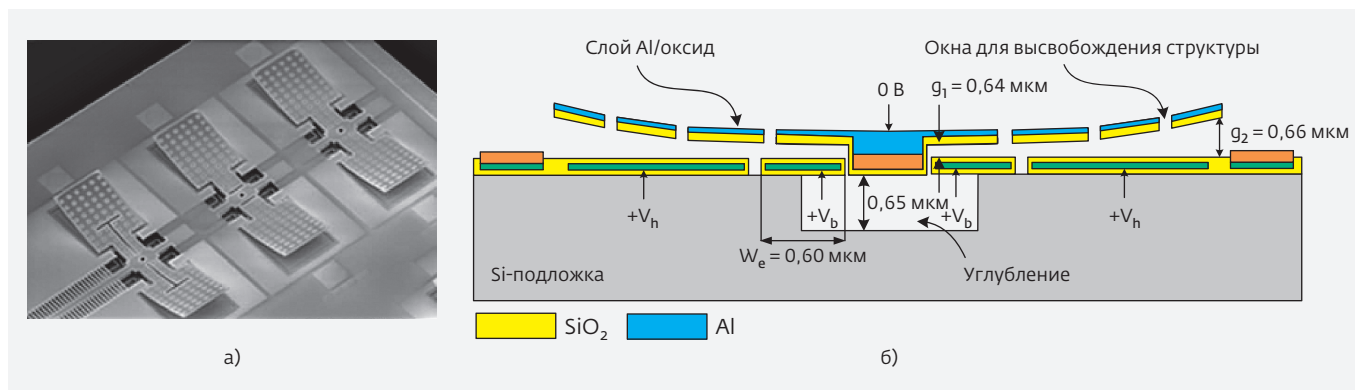


Рис.8. МЭМС/КМОП-схема емкостного переключателя, разработанного в Университете Ватерлоо (а); поперечное сечение переключателя (б)

подложкой, под сигнальным проводником выполнен воздушный зазор глубиной 65 мкм.

Мембраны укреплены на центральном проводнике и нависают над проводом заземления волновода (рис.8). Изгиб мембран возникает после окончательной реализации МЭМС-переключателя вследствие разности значений остаточного напряжения образующих МЭМС-структуру металлического и диэлектрического слоев. Емкость между сигнальным и заземляющим проводниками переключателя при верхнем положении изогнутых мембран минимальна, при нижнем положении – максимальна. Изгиб мембран, который, как правило, считается нежелательным, в данной структуре полезен, поскольку приводит к уменьшению минимальной емкости и увеличению максимальной и тем самым способствует улучшению изоляции переключателя.

Высокоомные поликремниевые электроды актуации размещены в зазоре между сигнальным и заземляющим электродами волновода и отделены от РЧ-портов. Подача постоянного смещения V_b на электрод актуации, расположенный под мембраной, приводит к срабатыванию переключателя. Чтобы напряжение актуации было низким, воздушный зазор между электродами актуации и мембраной должен быть невелик. Для перевода мембраны в нижнее положение на сигнальные и заземляющие проводники через РЧ-порты подается постоянное напряжение V_h .

Разработчики продемонстрировали два МЭМС-емкостных переключателя новой структуры. Отношение частот первого переключателя было равно 91:1. При верхнем положении мембраны вносимые потери на частотах до 20 ГГц не превышали 0,98 дБ, отражательные потери – 13 дБ, при нижнем положении мембраны степень изоляции

переключателя составляла 12,4–17,9 дБ в диапазоне частот 10–20 ГГц. Вторая схема содержала два емкостных переключателя, включенных параллельно высокоомной замедляющей линии передачи. Вносимые потери на частотах до 20 ГГц не превышали 1,41 дБ, отражательные потери – 19 дБ, степень изоляции в диапазоне частот 10–20 ГГц – 19–40 дБ.

РЧ МЭМС-схема емкостного переключателя с изогнутыми мембранами была использована специалистами Университета Ватерлоо при создании перестраиваемой в диапазоне 13–24 ГГц МЭМС/КМОП-схемы согласования импедансов антенны и входных блоков телефона. Схема выполнена на основе передающей линии с распределенными МЭМС (Distributed MEMS Transmission Line, DMTL). На кристалле размером 1,3×3,2 мм расположен навесной замедляющий (Suspended Slow-Wave, SSW) копланарный волновод с подключенными к нему восемью МЭМС-переключателями, позволяющими получать 256 различных узлов согласования импедансов на диаграмме Вольперта при КСВН до 11,5:1. На частоте 24 ГГц согласование импедансов превышает 10 дБ, коэффициент передачи мощности составляет –2,84 дБ [16].

Интересна совместная разработка специалистов компании ИНР, НИИ электронных наносистем Фраунгофера (Германия) и Университета Сабанчи (Турция). Ими с помощью технологии постобработки ВЕОЛ-слоев металлизации 0,25-мкм SiGe:C БикМОП-микросхемы с пяти-слойной металлизацией создано высоковольтное МЭМС/КМОП-устройство настройки. МЭМС-емкостной переключатель (рис.9а, 9б) образован вторым (М2) и третьим (М3) слоями металлизации. Первый слой (М1) использовался для формирования высоковольтных электродов, тогда как

сигнальные линии с тонким $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiN}$ -покрытием располагались во втором слое металлизации. Расстояние между высоковольтным электродом и сигнальной линией, которая служит и тормозом для мембраны переключателя, достаточно большое. Многослойная мембрана МЭМС-переключателя реализована на основе компенсированного по напряжению набора пленок $\text{Ti}/\text{TiN}/\text{AlCu}/\text{Ti}/\text{TiN}$ третьего слоя металлизации (компенсация по напряжению не приводит к нарушению функциональных характеристик слоя М3). Как утверждают разработчики, важное достоинство новой МЭМС/КМОП-микросхемы – лишь один дополнительный процесс маскирования и сушки при изготовлении БиКМОП-схемы на 200-мм пластине.

Измерения характеристик емкостного переключателя на пластине показали, что емкость в отключенном состоянии (мембрана в верхнем положении) составляет 25–30 фФ, во включенном состоянии (мембрана в нижнем положении) – 210–250 фФ. Таким образом, отношение значений емкости в отключенном и включенном состояниях в среднем равно 1:10, что обеспечивает хорошую развязку в диапазоне миллиметровых длин волн. Так, развязка и вносимые потери в диапазоне 60–110 ГГц составили более 15 дБ и менее 1,65 дБ соответственно.

Технические возможности интегрированного в КМОП-схему МЭМС-емкостного переключателя продемонстрированы на примере управляемого напряжением генератора двойного диапазона. Получено, что частоту генерации можно изменять с 3,55 до 4,15 ГГц. При выполнении 10^9 циклов переключения частоты деградации характеристик не наблюдалось [17].

РЧ МЭМС-конденсаторы переменной емкости, изготовленные постобработкой в ВЕОЛ-слоях металлизации КМОП-схемы

Как уже отмечалось, в Университете Карнеги-Меллона активно разрабатываются МЭМС/КМОП-перестраиваемые конденсаторы со встречно-ребенчатой структурой. К последнему созданному прибору относится МЭМС/КМОП-микросхема трехразрядного цифрового конденсатора с диапазоном перестройки 60:1. Схема содержит множество соединенных параллельно переключаемых конденсаторов, емкость которых регулируется с помощью рабочего, расположенного над структурой электротермического актуатора и горизонтального, расположенного в плоскости структуры электрода с электростатической активацией. В исходном состоянии рабочие электроды конденсатора вследствие

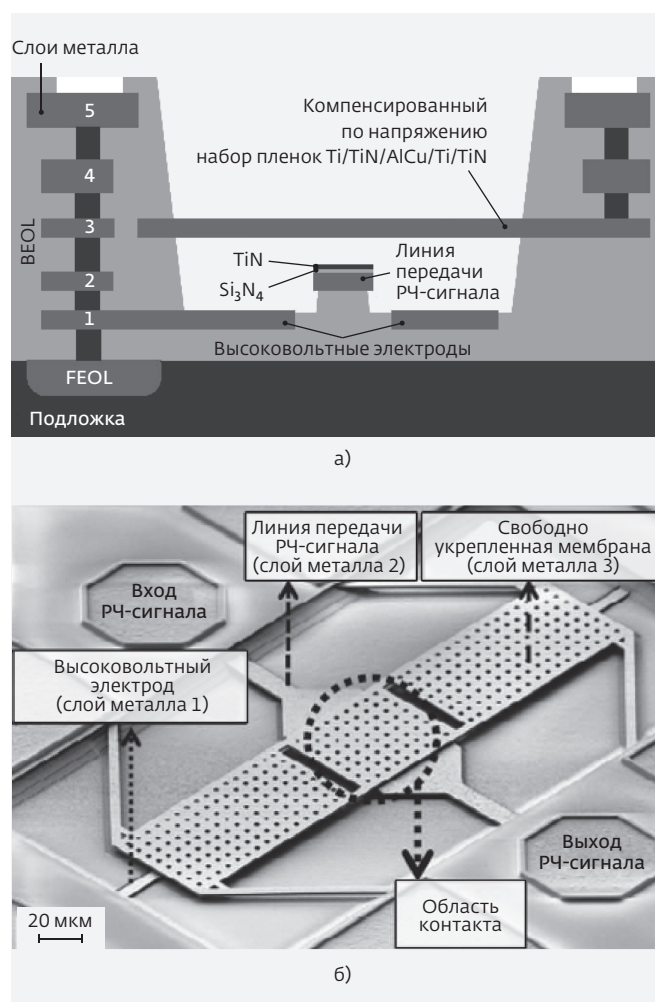


Рис.9. Интегрированный РЧ МЭМС-емкостной переключатель: структура (а); вид переключателя, полученный с помощью сканирующего электронного микроскопа (б)

теплового напряжения находятся над плоскостью структуры (рис.10а). При электротермической активации они опускаются до плоскости структуры, содержащей неподвижные электроды (рис.10б). Электростатическая активация горизонтального электрода приводит к притягиванию обоих электродов и возникновению их механического контакта. Поскольку при формировании электродов на их боковые плоскости наносилась пассивирующая пленка, электрический контакт при смыкании электродов отсутствует и емкость конденсатора максимальна. При этом энергопотребление по постоянному току отсутствует.

Измерения характеристик переключаемого МЭМС/КМОП-конденсатора показали, что его добротность на частоте 1 ГГц составляет 150, а собственная частота генерации превышает 10 ГГц. При значениях

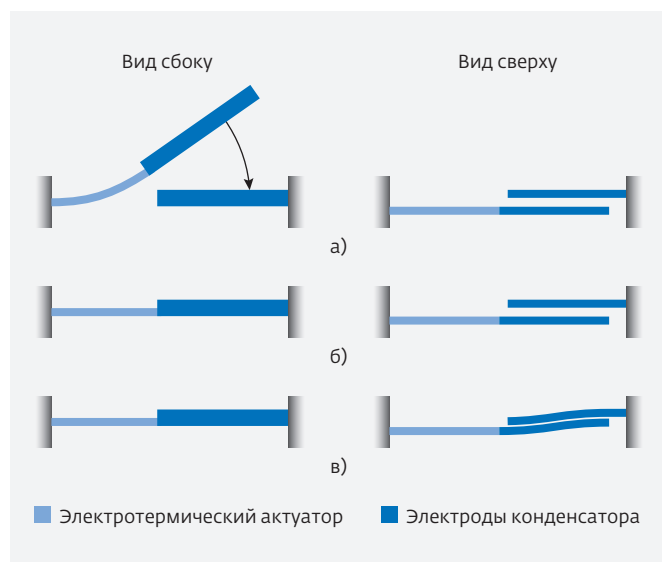


Рис.10. Принцип работы трехрядного цифрового МЭМС-конденсатора Университета Карнеги-Меллона: а) после окончательной реализации МЭМС-конденсатора; б) после электротермической актуации в вертикальной плоскости; в) после электростатической актуации в горизонтальной плоскости

напряжения электротермической и электростатической активации 4 и 20 В соответственно, время переключения емкости не превышает 1 мс [18].

Специалисты Университета Ватерлоо ведут работы по созданию не только МЭМС-перестраиваемых конденсаторов с параллельным расположением электродов и вертикальным перемещением консольной балки, но и РЧ-устройств на их основе. Так,

в 2009 году университет представил, по утверждению разработчиков, первый перестраиваемый по частоте усилитель на основе МЭМС/КМОП-схемы согласования импедансов с высокочастотными индуктивностью, формируемой микрообработкой, и МЭМС-конденсатором с параллельными электродами. МЭМС/КМОП-схема изготавливалась методом постобработки BEOL-металлизации 0,18-мкм КМОП-схемы, выполненной по технологии компании TSMC. Рабочая частота усилителя составляла 5,2 ГГц, усиление – 14,3 дБ, коэффициент шума – 2,3 дБ и потребляемая мощность – 26 мВт. Отмечается, что максимальный коэффициент усиления не зависит от значений импедансов нагрузки и источника сигнала. Предназначен усилитель для систем беспроводных локальных сетей [19].

На Четвертой международной конференции, посвященной достижениям в области микросхем, электроники и микроэлектроники, SENICS 2011, представители университета доложили о создании КМОП/МЭМС-микросхемы многодиапазонного мощного усилителя класса АВ с блоком согласования импедансов на основе высокочастотных индуктивностей и МЭМС-перестраиваемых конденсаторов. Микросхема работает на частотах 1,7-; 1,8-; 1,9- и 2,1-ГГц диапазонов. Максимальная выходная мощность в этих диапазонах составляет 20 дБм, регулируемое усиление превышает 16 дБ, КПД – не менее 40%.

Напряжение питания КМОП-схемы размером 3,5×1,5 мм, изготовленной по 0,18-мкм 1P6M-технологии компании TSMC, составляет 1,8 В. Однако поскольку относительно небольшое пробивное напряжение КМОП-схемы ограничивает

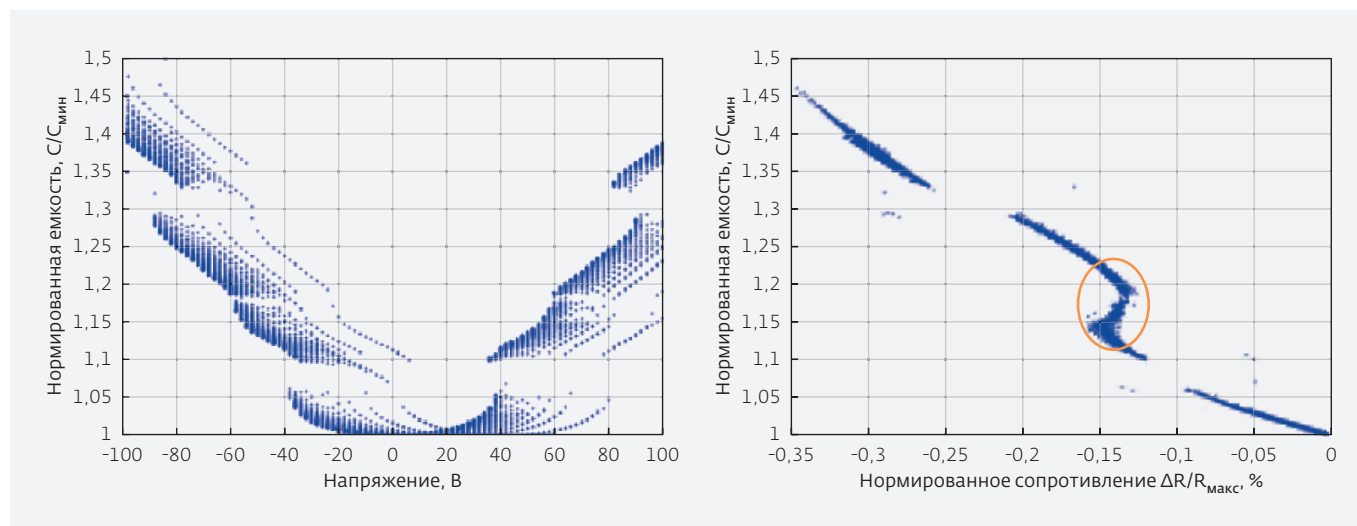


Рис.11. Зависимость емкости переменного конденсатора от напряжения в отсутствие пьезорезистивного датчика (а) и зависимость емкости от сопротивления в присутствии датчика (б)

выходную мощность, размеры транзисторов увеличены: ширина прибора, требуемая для получения максимального тока стока в 200 мА, равна 400 мкм. Для работы в режиме усиления класса АВ напряжение затвора равно 1,05 В, что соответствует постоянному току смещения 90 мА. Для перестройки частоты в диапазонах 1,7–2,1 ГГц в цепи источника сигнала и нагрузки последовательно включены соответственно 15- и 12-нГ элементы индуктивности и между электродами – два переменных конденсатора, питаемых по постоянному току, емкостью 0,6–1,5 и 0,63–2,7 пФ соответственно [20].

В последние годы усилился интерес к батареям перестраиваемых конденсаторов благодаря их надежности и возможности непрерывного (аналогового) управления многими конденсаторами. Однако при электростатической активации конденсатора бистабильный гистерезис вольт-емкостной характеристики затрудняет регулировку аналоговых МЭМС-устройств настройки. К тому же на надежность и регулировку электростатически активируемых МЭМС-приборов влияют эффекты зарядки диэлектрика, приводящие к "размытию" вольт-емкостной характеристики (рис.11) и к отказам при испытаниях на долговременную надежность. Для регулировки характеристик МЭМС-прибора и обеспечения их неизменного значения необходимо точно контролировать положение его механических элементов.

Эта проблема решена исследователями Университета Ватерлоо, предложившими использовать пьезорезистивные свойства расположенного под МЭМС-структурой слоя поликремния. Для демонстрации возможностей интегрированного средства контроля положения элементов структуры был выбран МЭМС-элемент с изогнутой консольной балкой. Изменение изгиба балки приводит к изменению сопротивления пьезорезистора, которое может считываться с помощью встроенного моста Уитстона. Чтобы оценить достоинства применения сенсорного механизма для управления положением механических элементов, измерялись зависимости емкости МЭМС-перестраиваемого конденсатора от напряжения и сопротивления в отсутствие и при наличии пьезорезистивного датчика (рис.11а и 11б). Как видно из рис.11а, при заданном напряжении вследствие гистерезиса и зарядки диэлектрика существуют различные возможные значения емкости, тогда как зависимость нормализованной емкости конденсатора от сопротивления балки образована тремя прямолинейными участками, соответствующими режимам работы при фиксированных значениях управляющего напряжения, которые обеспечивают стабильное положение элементов структуры.

Таким образом, предложенный метод позволяет решить проблему возможной нестабильности значений емкости [21].

Интегрированные МЭМС/КМОП-резонаторы

МЭМС-генераторы с механическими колеблющимися резонаторами появились на рынке уже в 1980-е годы, но не получили широкого распространения. Это было обусловлено их высоким температурным коэффициентом, необходимостью применения сложных схем температурной компенсации, а также дорогостоящих металлических или керамических корпусов. Для появления на рынке малогабаритных дешевых МЭМС-резонаторов с высокими эксплуатационными характеристиками потребовались объединенные усилия производителей различных КМОП-приборов. На 17-й Международной конференции по микроэлектромеханическим системам 2004 года (International Conference on Micro Electro Mechanical Systems) компания IBM представила МЭМС-резонаторы, изготовленные в ВЕОЛ-металлизации БиКМОП-схемы. Консольная балка резонатора была реализована в диэлектрическом слое медной металлизации. В результате его резонансная частота составила ~4 МГц, а добротность – 1200. Размер МЭМС-резонатора был равен 6×15 мкм

Но первый реальный успех был достигнут новой не располагавшей собственным производством компанией SiTime, которая сообщила в 2006 году о создании выполненных по кремниевой технологии МЭМС/КМОП-генераторов моделей SiT11xx (на фиксированные значения частоты) и SiT8002

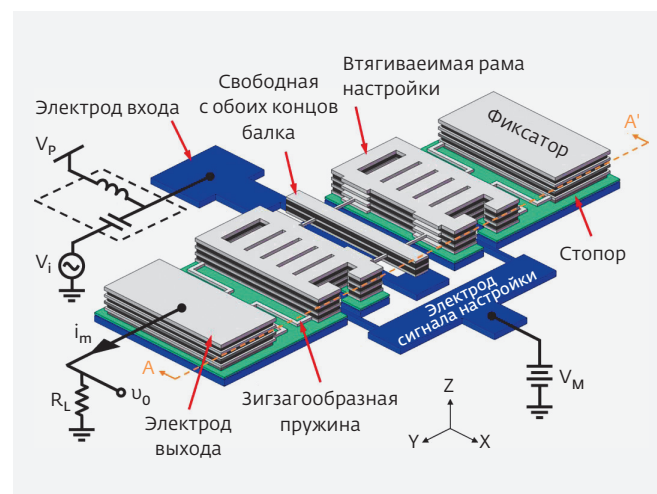


Рис.12. Структура МЭМС/КМОП-резонатора со свободной с обоих концов консольной балкой и большим субмикронным зазором

(с программируемой частотой). МЭМС-генераторы на частоту от 1 до 125 МГц поставлялись в стандартных корпусах типа QFN размером 2,0×2,5; 2,5×3,2 и 3,2×5,0 мм (толщина корпуса для всех вариантов – 0,85 мм) [22].

Появление высокочастотных резонаторов на основе дешевых МЭМС/КМОП-платформ, обеспечивающих быстрый производственный цикл, привлекло внимание создателей блоков сигнализации и РЧ-систем связи. МЭМС/КМОП-резонаторы с высоким уровнем интеграции, добротностью, измеряемой в тысячах единиц, и отсутствием энергопотребления по постоянному току, очевидно, коренным образом изменили технические возможности не только обычных электронных устройств, но и интегрированных микросистем. Однако из-за ограничений, предъявляемых к масштабированию современных энергоэффективных КМОП-схем, а также недостатков РТИ-процесса минимизация зазора между электродами и консольной балкой при МЭМС-постобработке приводит к значительному превышению полного сопротивления, обусловленного подвижностью консольной балки, стандартного промышленного значения, равного 50 Ом. Попытки уменьшения полного сопротивления за счет применения электротермических или самособираемых актуаторов, механизмов втягивания электродов, пьезорезистивных датчиков позволили уменьшить полное сопротивление до значений в диапазоне килоом. Но эти усилия привели к зависимости резонансной частоты от температуры, к неопределенности воздействия сигнала актуации (из-за рассогласования коэффициентов теплового расширения элементов МЭМС-структуры), к низкой добротности вследствие возникновения нестационарных граничных механических условий после операции втягивания электродов и к повышенному энергопотреблению.

Проблема создания МЭМС/КМОП-резонаторов с достаточно большим зазором между электродами, не влияющим на механические граничные условия балки, с малым обусловленным подвижностью полным сопротивлением и высокой добротностью была решена исследователями Национального университета Цинхуа (Тайвань). Методом постобработки ВЕОЛ-металлизации КМОП-микросхемы усилителя была создана структура со свободной с обоих концов консольной балкой (free-free beam), расположенной между двумя втягиваемыми рамками с четырьмя тонкими опорными стержнями, укрепленными в функциональных узлах структуры (рис.12). Стержни предназначены для сокращения потока энергии колебания к фиксированной подложке, что предотвращает зависимость резонатора

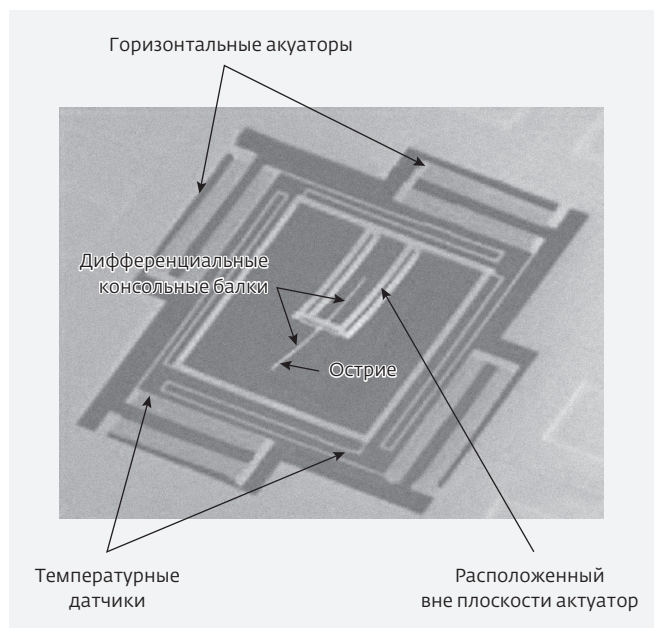


Рис.13. Однокристалльный МЭМС/КМОП СЗМ

от механических граничных условий подвижной балки, сохраняет энергию резонанса структуры и обеспечивает высокую добротность резонатора. Чтобы снизить требуемое для втягивания рам напряжение, они соединены с соседними фиксаторами с помощью зигзагообразной пружины. Изготовление структуры МЭМС/КМОП-резонатора в слоях металлизации позволило существенно повысить его термостабильность: частота в диапазоне температур от -40 до 80°C изменялась менее чем на 1%. Размещение электродов настройки под втягиваемыми рамками обеспечило "квазилинейную настройку" частоты, при которой зависимость частоты от напряжения линейна.

Разработчиками университета были созданы и испытаны МЭМС/КМОП-резонаторы со свободными с обоих концов консольными балками и зазорами 110, 210 и 275 мкм. Измеренная резонансная частота прибора при зазоре 275 мкм составила 11,56 МГц, добротность превысила 2000, полное сопротивление, обусловленное подвижностью балки, – 112 кОм. По утверждению исследователей, при использовании матрицы резонаторов можно добиться дальнейшего уменьшения полного сопротивления, способствуя применению МЭМС-резонатора в схемах генераторов. Размер МЭМС-резонатора, интегрированного в КМОП-микросхему усилителя, равен 300×130 мкм [23].

Сканирующие СВЧ-микроскопы

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) – инструменты построения изображения поверхности и ее локальных характеристик с самым высоким на

сегодняшний день разрешением – относятся к наиболее важным инструментам, применяемым в нанонауке. Однако современные СЗМ имеют ряд существенных недостатков, обусловленных их большой и громоздкой конструкцией, а также применением пьезоэлектрических материалов. Из-за низкой резонансной частоты сканеров их ширина полосы для построения изображения невелика. К тому же они чувствительны к параметрам окружающей среды. Матричные конструкции, позволяющие расширить ширину полосы, приводят к увеличению длительности сканирования. А свойства пьезоэлектрического материала вызывают искажение получаемого изображения. Все эти недостатки сдерживают широкое применение СЗМ в нанометрологии, где нужны малогабаритные, недорогие, быстродействующие, стабильные СЗМ, ширина полосы которых не зависит от размера матрицы. И решение этой задачи – реализация на основе МЭМС/КМОП-технологии однокристалльного СЗМ, содержащего все необходимые средства актуации и индикации, а также электронные компоненты, требуемые для реализации сканирующего устройства с субмикронным разрешением. Разработка СЗМ активно ведется в Университете Ватерлоо, специалисты которого на Международной конференции по твердотельным датчикам, актуаторам и микросистемам 2011 года (International Conference on Solid-State Sensors, actuators, and Microsystems 2011) сообщили о создании МЭМС/КМОП-атомно-силового микроскопа (АСМ) на основе трехмерного МЭМС-актуатора и трехосного датчика положения. По утверждению разработчиков, это первый МЭМС АСМ, не требующий применения внешних сканирующих устройств или лазерных средств позиционирования.

В 2012 году специалисты университета представили термокомпенсированный МЭМС/КМОП СЗМ на основе перпендикулярно расположенных биморфных пьезоэлектрических актуаторов (рис.13). Два горизонтальных актуатора, расположенных перпендикулярно друг другу и укрепленных в плоскости кристалла с помощью пружин, обеспечивают сектор сканирования 10×10 мм. Смещение расположенного вне плоскости кристалла актуатора составляет 25 мкм. Сила взаимодействия острья и исследуемого образца измеряется с помощью двух сбалансированных консольных балок, укрепленных на конце вертикально расположенного актуатора. Все актуаторы имеют термодатчики и дифференциальные пьезоэлектрические тензодатчики.

Этот принцип построения МЭМС/КМОП СЗМ был использован исследователями университета при создании сканирующего микроволнового микроскопа

(СММ), сопоставимого по размерам с кристаллом, изготовленным по 0,35-мкм SiGe-технологии компании TowerJazz. Микроскоп выполнен на основе платформы атомно-силового микроскопа. Изготовленные методом микрообработки зонды сочетаются с пьезорезистивными зондами АСМ и приводятся в действие интегрированными электротермическими сканерами. СММ/АСМ позволяет получать изображение топографии прибора и определять его электрические характеристики, а также, что еще важнее, контролировать расстояние между острием и образцом, которое влияет на точность построения изображения. Острие можно перемещать в трех направлениях: на расстояние 20 мкм по оси X, 10 мкм по оси Y и 30 мкм по оси Z.

Группа специалистов Университета Линца, Университета прикладных наук, Венского технологического университета (Австрия), Университета Чжанхуа (Тайвань), Национального института стандартов и технологии США и компании Agilent Technologies показали возможность измерения с помощью СММ, выполненного на платформе АСМ

и анализатора, рабочих характеристик схем, значений емкости в интервале от аттофарад (10^{-18} Ф) до фемтофарад (10^{-15} Ф) [25].

* * *

С миниатюризацией РЧ-микросхем и ростом потребностей в улучшении выполняемых ими функций тенденция к интеграции МЭМС- и КМОП-устройств для РЧ-приложений будет усиливаться. МЭМС/КМОП-технология уже достаточно хорошо освоена, и выбор того или иного решения зависит от стоимости изготовления/интеграции и качества МЭМС-прибора. Из трех рассмотренных методов МЭМС/КМОП-интеграции наиболее перспективен сегодня метод постобработки. Четвертый метод постобработки ВЕОЛ-металлизации КМОП-схемы представляет интерес для исследователей университетов, поскольку дешев и позволяет использовать микросхемы, выпускаемые различными контрактными производителями. Хотя толщина пленок металлизации, используемых этим методом при формировании МЭМС, и получаемые характеристики ограничены, он уже успешно применяется для изготовления РЧ МЭМС/КМОП-схем. Метод начали использовать как контрактные производители, так и start-up компании для производства коммерческих изделий. Появилась возможность создания блока замкнутой регулировки положения конденсаторов в РЧ МЭМС/КМОП-структуре, необходимого для успешной реализации МЭМС/КМОП-сканирующих зондовых микроскопов.

ЛИТЕРАТУРА

8. **Fouladi S., Mansour R.R.** Capacitive RF MEMS switches fabricated in standard 0.35 μ m CMOS Technology. – IEEE Trans. Microwave Theory Techn., 2010, vol.58, №2, p.478-486.
9. **Майская В.** МЭМС-технология завоевывает новые рубежи. – Электроника: НТБ, 2013, №1, с.186-188.
10. Tunable Impedance Matching Networks (TIM). – www.wispri.com/products-TIM.php.
11. WiSpry envisions new types of tunable RF applications without frequency constraints for wireless handheld and infrastructure applications. – www.businesswire.com/news/home/20140227005288/en/WiSpry-Envisions-Types-Tunable-RF-Applications-Frequency.
12. **Moyer B.** A new variable capacitor. Cavendish kinetics targets antenna frequency tuning. – www.eejournal.com/archives/articles/20130923-cavendish.
13. **Tornatta P.** A method to design an aperture-tuned antenna using a MEMS digital variable Capacitor. – www.microwavejournal.com/articles/21283-a-method-to-design-an-aperture-tuned-antenna-using-a-mems-digital-variable-capacitor.
14. **Zhang S., Su W., Zaghoul M., Thibeault B.** Wideband CMOS compatible capacitive MEMS switch for RF applications. – IEEE Microwave Wireless compon. Lett., 2008, v.18, N9. p.599-601.
15. **Fouladi S. and Mansour R.R.** Capacitive RF MEMS switches fabricated in standard 0.35 μ m CMOS Technology – IEEE Trans. Microwave Theory Techn., 2010, vol.58, №2, p.478-486.
16. **Fouladi S., Domingue F., Zahirovic N., Mansour R.R.** Distributed MEMS tunable impedance-matching network based on suspended slow-wave structure fabricated in a standard CMOS technology. IEEE Trans. Microwave Theory Techn., 2010, vol.58, №4, p.1056-1064.
17. **Kaynak M., Ehwald K.E., Drews J.** et al. BEOL embedded RF-MEMS switch for mm-wave applications. – www.cse.psu.edu/~xydong/files/proceedings/IEDM2009/DATA/33-04.PDF или research.sabanciuniv.edu/15856/1/Characterization_of_an_Embedded_RFMEMS_Switch.pdf.
18. **Reinke J., Fedder G.K., Mukherjee T.** CMOS-MEMS 3-bit digital capacitors with tuning ratios greater than 60:1. – IEEE Trans. Microwave Theory Tech., May 2011, vol.59, №5, pp.1238-1248.
19. **Fouladi S., Mansour R.R.** Reconfigurable amplifier with tunable impedance matching networks based on CMOS-MEMS capacitors in 0.18- μ m CMOS technology. – Proc. 2nd Microsystems Nanoelectronics Research Conf., Oct. 2009, p.33-36.
20. **Fall E.M., Domingue F., Fouladi S., Mansour R.R.** Design of reconfigurable quad-band CMOS class AB power amplifier employing MEMS variable capacitors in 0.18 μ m technology. – file:///C:/Users/%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B3/Downloads/cenics_2011_2_30_60054%20(4).pdf.
21. **Zahirovic N., Mansour R.R., Yu M.,** Piezoresistive position sensing for the detection of hysteresis and dielectric charging in CMOS-MEMS variable capacitors. – IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Dec. 2010, vol.58, №12, p.3961-3970.
22. **Белов Л., Житникова М.** Микроэлектромеханические компоненты радиочастотного диапазона. – Электроника: НТБ, 2006, №8, с.18-25.
23. **Chen W., Fang W., Li S.** High-Q integrated CMOS-MEMS resonators with deep-submicrometer gaps and quasi-linear frequency tuning. – J Microelectromechanical Syst., 2012, vol.21, №3, p.688-701.
24. **Huber H.P., Moertelmaier M., Wallis T.M.,** et al. Calibrated nanoscale capacitance measurements using a scanning microwave microscope. – Review Scientific Instrum., Nov. 2010, vol.81, №11, p.113701,

