

Высокочастотные МЭМС-ключи. Технологии и применения

Светлана СЫСОЕВА
Dr.Gold@sysoeva.com

В статье в деталях рассматриваются базовые ВЧ МЭМС компоненты — ключи, переключатели, представляющие собой основу беспроводных систем в различных сегментах рынка.

Введение

ВЧ МЭМС (RF MEMS) — недавно возникший сегмент рынка, стартовавший в 2006 году, но уже достигший зрелости. Применения RF MEMS обширны и включают все типы беспроводной коммуникации, сотовую связь, радиосвязь, радары, спутники, автомобильные, промышленные, оборонные, космические, телекоммуникационные системы, беспроводные локальные сети и компьютерную периферию, контрольно-измерительное и тестовое оборудование, АТЕ (автоматизированное тестовое оборудование) и медицинские приборы.

Важнейшее направление в развитии ВЧ-сегмента рынка — тенденция к полному замещению дискретных полупроводниковых компонентов и механических переключателей компонентами МЭМС. Преимущества RF MEMS объединяют типичную для МЭМС надежность, возможность интеграции ВЧ-схем в одном малом МЭМС-устройстве и с другой электроникой на кристалле, низкие вносимые потери, высокую линейность, малое энергопотребление, малый формфактор, низкую цену, высокую добротность (Q-фактор) и изоляцию, высокое отношение off-импеданса к on-импедансу (on-resistance), широкие возможности настройки для повышения приспособляемости и реконфигурации системы.

Переключатели Radant MEMS, например, продемонстрировали свыше 100 млрд циклов переключения. Эти устройства относятся к типу электростатических актюаторов.

RF-ключи WiSpry характеризуются энергопотреблением, на 30–40% меньшим в сравнении с аналогами, — также благодаря емкостной МЭМС-технологии.

Эти и другие ВЧ МЭМС переключатели способны выполнять те же функции, что и механические или электромагнитные реле, но изготовлены в микроминиатюрном формате посредством технологий микрообработки, отличаются высокой скоростью переключения и высокой надежностью.

В более общем случае ВЧ МЭМС точнее будет называть микросистемами для реконфигурации ВЧ-характеристик устройства, так как, по определению для МЭМС, эти

устройства должны иметь подвижные механические части.

Но многие устройства, относимые к этой категории, даже не имеют подвижных или деформируемых частей, только производятся методами поверхностной или объемной микрообработки или посредством комбинации обоих методов.

Перечень ВЧ-компонентов, производимых посредством технологий МЭМС, является обширным и включает в себя:

- ключи:
 - омические ключи;
 - емкостные ключи;
- реле:
 - омические реле;
 - емкостные реле;
- переменные ВЧ-конденсаторы — варикапы или варакторы (varactors, variable capacitors — конденсаторы, емкостью которых можно управлять);
- переменные индукторы;
- резонаторы;
- фильтры;
- осцилляторы;
- дуплексоры;
- фазовые переключатели (сдвигатели);
- другие компоненты.

В этот перечень входят как базовые ВЧ-компоненты для построения схем (ключи, варикапы), так и более сложные комбинации базовых компонентов. Примеры сложных ВЧ-схем включают в себя настраиваемые ВЧ-фильтры, реконфигурируемые тюнеры согласования импеданса, переключающие матрицы, ВЧ-делители мощности и аттенюаторы, реконфигурируемые фазовые переключатели и т. д. Многие из них построены на ключах и реле, представляющих собой самые распространенные базовые RF MEMS элементы/компоненты. МЭМС-ключи — «строительные блоки» фазовых переключателей, интеллектуальных (смарт) антенн, переключаемых фильтров в военных и коммерческих применениях. Понимание основ работы этих приборов является первым ша-

гом на пути к применению ВЧ МЭМС во всех типах беспроводной коммуникации, рынок которых быстро растет.

Ключи — базовые схемные компоненты. Сравнение полупроводников и МЭМС

Функциональность ключа состоит в том, чтобы служить микрореле для селекции/деселекции ВЧ (DC и AC) сигналов, реконфигурации архитектуры и функциональности ВЧ-аппаратуры.

RF и микроволновые ключи разделяются на две основные категории: электромеханические и твердотельные (FET и pin¹-диоды). Электромеханические ключи не находят более широкого применения в электронных устройствах и принимают форму MEMS. Твердотельные ключи надежны, имеют более высокий срок службы, чем электромеханические ключи, их плюсом является также быстрое время срабатывания. Но они имеют высокое собственное сопротивление при включении и подвержены гармоническому разрушению. Ключи широко применяются в мобильной беспроводной коммуникации, для маршрутизации сигналов от антенн к принимающей или передающей цепи.

По мере развития беспроводной коммуникации увеличилась потребность в недорогих ключах с низкими потерями, замещающих традиционные полевые транзисторные ключи (FET).

RF MEMS емкостные ключи были разработаны в начале 1990-х и часто называются так потому, что в них обычно используется электростатический механизм возбуждения. Помимо электростатического типа возбуждения возможны также магнитное, пьезоэлектрическое, тепловое.

На самом деле существуют два фундаментальных типа ключа — омический (с омическим контактом) и емкостный (с емкостным контактом).

¹ pin-диод, p-i-n-диод (positive intrinsic negative diode) — диод с двумя сильно легированными областями n⁺ и p⁺, между которыми находится активная базовая i-область с высоким удельным сопротивлением — нелегированная область собственной проводимости, которая заполняется носителями заряда из сильнолегированных n⁺- и p⁺-областей при их прямом смещении напряжением и по достижении концентрации начинает пропускать ток.

Омические ключи включают в себя два металлических электрода, соединяемых вместе для осуществления контакта с низким сопротивлением. В емкостных ключах металлическая мембрана толкается вниз на диэлектрический слой для формирования емкостного контакта. На высоких частотах изменение емкости закорачивает схему.

Вносимые потери МЭМС — ниже, чем у pin-диодов, они характеризуются низкими потерями и высокой линейностью в сравнении с ключами на полевых транзисторах. Но и скорость переключения МЭМС ниже, что определяется резонансной частотой.

Возбуждение обычно происходит в периоды времени от единиц до десятков мкс для электростатических устройств и в течение сотен мкс для тепловых актюаторов. Тем не менее данный недостаток перекрывается линейностью MEMS в контактной области, что означает отсутствие нелинейностей или дисторсии гармониками или продуктами интермодуляции.

Преимущество микромеханического ключа состоит в том, что в состоянии off ключ физически изолирован, имеется малая утечка (порядка 100 фА на 100 В DC). MEMS предлагают лучшую емкость off и лучшую off-state RF-изоляцию, чем FET или pin-диоды. Подобно GaAs FET, они имеют низкую электростатическую ESD-чувствительность приблизительно в 100 В HBM и не требуют специального обращения.

Омический ключ

Это трехтерминальная структура, в которой при закрытии ключа осуществляется настоящий омический (электрический и физический) контакт металл-металл. ВЧ МЭМС омический ключ может быть последовательного или параллельного (шунтирующего) типа. Последовательный ключ открыт (off) при отсутствии активации МЭМС и закрыт (on) при активации. Поведение шунта противоположно. Типичные микромеханические структуры ключей (омических или емкостных) — мембрана и кантилевер, загерметизированные в корпусе.

Омические ключи компании Radant MEMS (рис. 1) позволяют полностью имитировать работу твердотельного полевого транзистора, но они реализованы по технологии МЭМС и включают подвижный кантилевер, активируемый электростатически. Микроключи функционируют следующим образом. Под колпачком посредством приложения напряжения между электродами затвора и истока кантилевер электростатически отклоняется свободным концом в направлении стока и, достигая его, формирует электрический путь между стоком и истоком.

Контактный материал платиновой группы наносится на окончания кантилевера и истока в виде тонких пленок. Разработаны ключи, работающие на постоянном и переменном напряжении.

Рабочие характеристики ключей следующие:

- Напряжение возбуждения — 40–120 В.
- Сопротивление при включении — менее 1 Ом на постоянном токе и при низких частотах.
- Срок службы превышает 10 млрд циклов на токах в 20 мА.
- Срок службы превышает 1 млрд циклов на токах в 500 мА.
- Время перехода в состояние on — 5 мкс, время перехода в состояние off — много меньше.
- Потребление мощности на скорости переключения в 1 кГц — порядка 5 мкВт.

Производство ключей основано на методах поверхностной микрообработки. Ключи работают в герметичном окружении, которое достигается в течение процесса соединения пластин.

Компания Radant MEMS, которая производит ВЧ МЭМС устройства с 1999 года, применяет собственную технологию герметичного корпусирования на уровне пластины, являющейся дополнительным средством для повышения надежности, а также для снижения цены и сложности корпусирования керамических корпусов ВЧ МЭМС.

На этом примере показаны типичные преимущества омических ключей, включая низкие потери, хорошую изоляцию, практически полное отсутствие потребления мощности (только напряжение для активации). Надежность ограничивается хрупкостью и необходимостью контакта при переключении, но преодолевается. Исследования в области физики контакта, материалов, применение соответствующего корпусирования на уровне пластины позволили значительно повысить надежность ключей Radant. Прочие недостатки состоят в накоплении заряда, самонагреве, так называемых ограничениях обработки мощности и «горячего» переключения (при высоких уровнях мощности и при разбросе диапазона/уровней мощностей в работающей схеме), микросварке и большом напряжении контроля (несовместимом со CMOS). Все это приводит к деградации контактов и изменению сопротивления. Использование воздуха вместо диэлектрика устраняет недостаток заряда диэлектрика, но дает низкое соотношение емкости on-off для электростатического возбуждения. Высокое напряжение возбуждения только в высокомошных применениях является преимуществом, так как помогает избежать самовозбуждения и нежелательного переключения.

В емкостном ключе применяется трехтерминальная архитектура конденсатора с затвором, который может варьироваться в зависимости от приложенного напряжения. Функциональность емкостного ключа состоит в осуществлении переключения ВЧ-сигналов, основанного на шунтировании емкости. Переключатель закрывается, когда

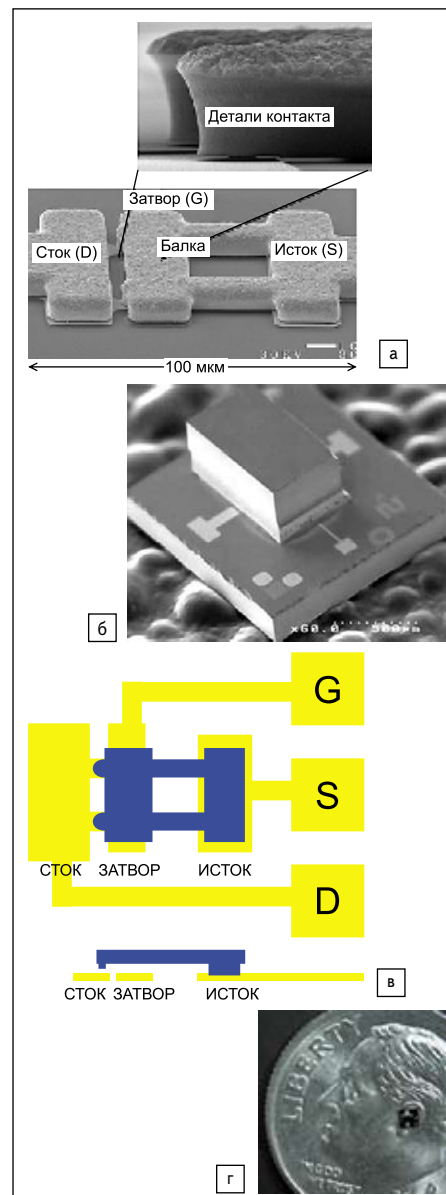


Рис. 1. Технология омических ключей Radant MEMS: а) SEM-изображения деталей контактной структуры; б) закорпусированное на уровне пластины ВЧ МЭМС устройство; в) схема структуры; г) устройство на монете

МЭМС находится в состоянии малой емкости (положение off), и открывается, когда емкость высокая (MEMS в состоянии on).

Компания Omron, например, использует чисто емкостные МЭМС-технологии реле. Но для того чтобы стали понятными некоторые термины и аббревиатуры, следует пояснить дифференциацию реле по типам и признакам.

Реле

Вариантов исполнений реле множество.

Однополюсный одиночный бросок (Single Pole Single Throw, SPST) — электромагнитный переключатель с четырьмя подсоединяемыми терминалами, состоящий из обмотки

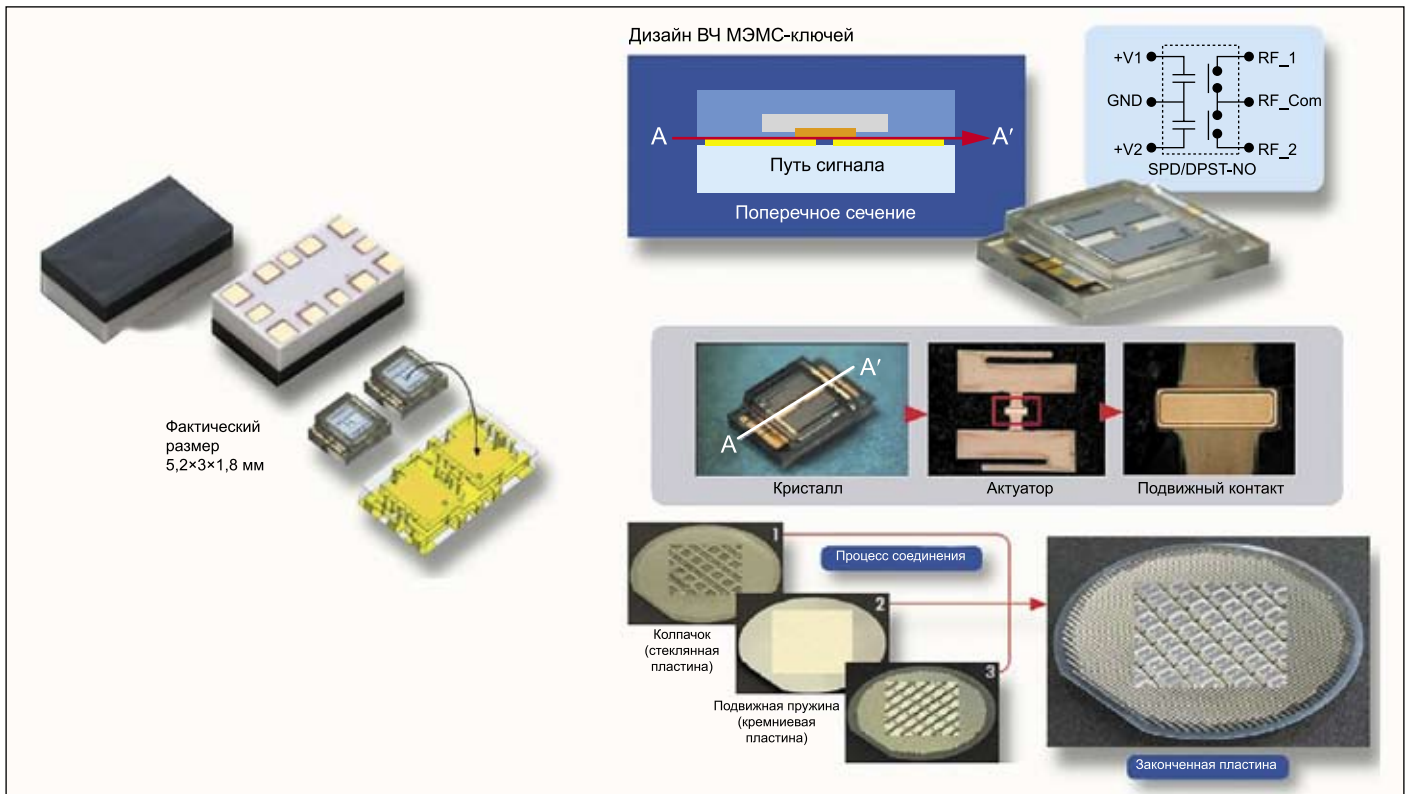


Рис. 2. Дизайн и производство емкостных ВЧ МЭМС реле Omron: а) дизайн и производство

с двумя терминалами, общим терминалом и одним нормально открытым терминалом (без нормально закрытого вывода). SPST работает как обычный ключ.

Однополюсный двойной бросок (Single Pole Double Throw, SPDT) — реле типа электромагнитного переключателя с пятью подсоединяемыми терминалами, состоящее из обмотки с двумя терминалами с общим выводом. Оно имеет по одному нормально открытому (normally open, Form A) и нормально закрытому (normally closed, Form B) терминалу. Его функциональность состоит в реализации Т-разделения ВЧ-сигнала на входе на любой из двух выходных каналов. Переключатели данного типа применяются тогда, когда нужно выбрать, какое из пар устройств должно быть подключено к схеме.

Термины SPNO и SPNC также используются для обозначения типа реле. Например, при отсутствии тока в обмотке электромагнитное поле замыкает посредством кантилевера закрытый и общий терминалы, а при подаче тока — открытый и общий терминалы. Переключатели Double-Throw (DT) (они же Change-over, CO) контролируют две схемы, реализуя для них функциональность разрыва (break before make, Form C) или осуществления контакта (make before break, Form D).

Двухполюсный однонаправленный или одиночный бросок (Double Pole Single Throw, DPST) — переключатель, эквивалентный двум SPST-переключателям или реле, возбуждаемым одной обмоткой, то есть состоящий из обмотки с двумя терминалами, двух общих

терминалов и двух переключаемых терминалов. Таким образом, общее число терминалов — 6. DPST применяются для одновременного включения двух отдельных схем.

Двухполюсный двунаправленный или двойной бросок (Double Pole Double Throw, DPDT) — переключатель, эквивалентный двум SPDT-реле, возбуждаемым одной обмоткой (8 терминалов, включая терминалы обмотки). DPDT имеют три позиции: в одной позиции замыкается одна пара выходных контактов, во второй — другая, в третьей все контакты размыкаются или все замыкаются. Ключи этого типа удобно использовать для изменения полярности напряжения постоянного тока, поступающего к двигателю, и, таким образом, управлять направлением его вращения. В одной позиции мотор будет вращаться по часовой стрелке, в другой — против, а в третьей он будет просто выключаться.

Число возможных выходных каналов может быть больше двух, тогда устройство называется SPMT (Single Pole Multiple Throw). Термин poles описывает число схем, управляемых переключателем. Бывают не только одно- и двух-, но и трехполюсные, а также реле/переключатели с большим числом полюсов.

Многополюсный одиночный или двойной бросок — переключатель, эквивалентный нескольким реле SPST или SPDT типов, возбуждаемым одной обмоткой. В обозначении таких реле термины S или D замещаются номерами, что показывает, сколько полюсов (ключей или пар ключей схем) переключа-

ется одним актуатором. Например, 4PST — это четырехполюсный одиночный бросок с общим числом терминалов 10, 4PDT — четырехполюсный двойной бросок с общим числом терминалов 14.

С целью снижения размеров и повышения скорости работы переключателей, реле и других контрольных устройств приобретают актуальность МЭМС-технологии. Как и обычные ключи, реле также могут быть реализованы на основе омического или емкостного принципа.

Омическое МЭМС-реле — это как минимум 4-терминальное устройство на основе омического контакта, которое отделяет управляющий сигнал от нагрузочного сигнала в пределах корпуса компонента. Емкостное реле, соответственно, представляет собой 4-терминальную емкостную структуру, что облегчает ее контроль.

Микромеханические переключающие ВЧ-реле были разработаны Omron для рынка АТЕ-оборудования, в их основе — электростатический приводной механизм (рис. 2). Omron использует для производства реле собственные производственные линии для пластин диаметром 5 и 8 дюймов.

Компания Omron в настоящее время имеет в своем портфолио МЭМС-реле для так называемого «истинно горячего» переключения (hot switchable), этот термин означает способность реле открываться или закрываться в работающей схеме с переменными уровнями мощностей. Реле Omron 2SMES включает в себя два кремниевых кристалла

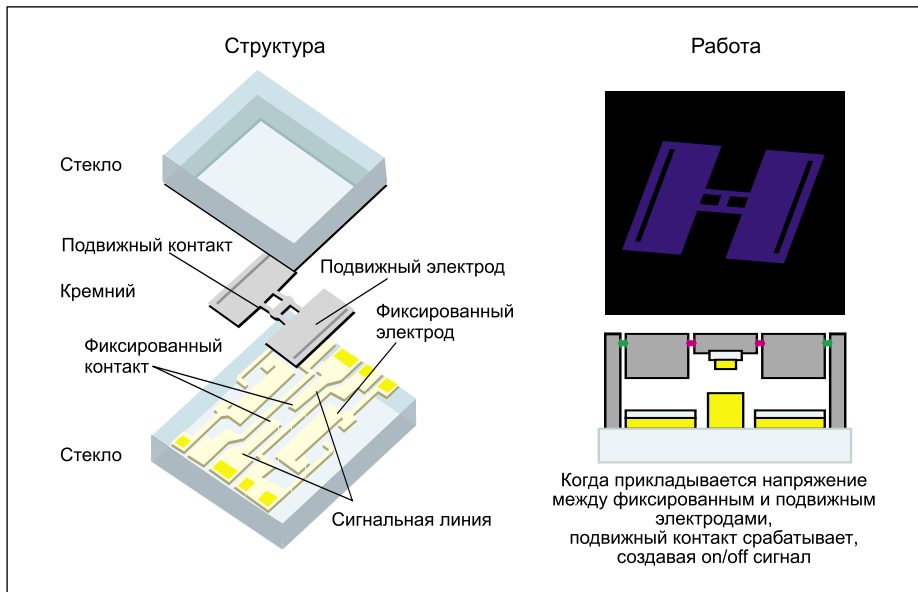


Рис. 2. Дизайн и производство емкостных ВЧ МЭМС реле Omron: а) детализация структуры и работы

SPST-NO, закорпусированных вместе для осуществления функциональности реле типов SPDT или DPST-NO. В компактном корпусе малых размеров (5,2×3,0×1,8 мм) размещены два набора контактов с независимой работой сигнальных путей (1 Form C или 2 Form A). Реле рассчитаны на 100 млн рабочих циклов с резистивной нагрузкой (на 0,5 мА и 0,5 В DC) и были протестированы в течение 1 млрд циклов.

Переключатели-реле отличаются высокими ВЧ-характеристиками: на 10 ГГц и при 50 Ом изоляция (при открытых контактах реле) равна 30 дБ, вносимые потери (insertions loss, сумма мощности, переданная через закрытые контакты реле) — 1 дБ, возвратные потери (return loss, сумма мощности, отраженная к источнику) — 10 дБ. Номинальная передаваемая мощность реле — 30 дБм, максимальная мощность — 36 дБм на 2 ГГц. Кроме того, реле отличаются низким (10 мкВт максимум) потреблением мощности. Все вместе нацелено на замещение герконовых реле, Gas FET, pin-диодных ключей в АТЕ-оборудовании. Важным преимуществом является высокоскоростная работа (100 мкс максимум).

Данный продукт характеризуется антистатическими свойствами в 100 В в модели человеческого тела (HBM).

Заряд, который аккумулируется в электростатическом актюаторе, для выключения ВЧ МЭМС ключа необходимо разрядить. Без схемы электрического разряда ВЧ МЭМС переключатель может не выключаться, контакты могут залипнуть.

Залипание контактов в течение «горячего» переключения — одна из ключевых проблем омических ключей.

В конструкции ключей Omron электрод имеет специальный механический состав: при приложении напряжения электрод изгибается и включает (переводит в состояние

on) переключатель, без приложенного напряжения происходит возврат к оригинальному положению. Использование емкостной связи исключает залипание контактов и износ, типичные для омических ключей.

В компании Omron достигли этого за счет геометрии контактов и применения собственных сплавов. Подвижная контактная сборка из оригинального материала размещается между двумя слоями стекла. Донный слой стекла имеет дорожки для стационарных контактов и электростатического привода, притягивающего подвижный контакт. Верхний слой стеклянного колпачка закрывает кристалл, и два кристалла соединяются и корпусируются вместе в конечном продукте.

Предметом исследований и разработок Omron является новый ВЧ МЭМС ключ, использующий омический контакт, — реле типа однополюсного двойного броска для рынка сотовых телефонов в диапазоне сигнала от DC до 3 ГГц. Больше информации об этом продукте обещают предоставить к концу 2011 года.

Технологии и применения ВЧ МЭМС от MEMtronics — ключи, фазовые переключатели, настраиваемые резонаторы/фильтры

Согласно MEMtronics, за последнее десятилетие в результате улучшения технологических процессов, материалов и дизайна появилась возможность создать емкостные ключи с потерями менее 0,1 дБ в диапазоне 40 ГГц, с низким потреблением мощности порядка десятков наноджоулей за цикл и высокой линейностью (>66 дБм).

MEMtronics — фирма, которая специализируется на RF MEMS. Основатели классифицировали ее как fabless, но более точно — это

fablite-компания. Спектр продукции и технологий МЭМС от MEMtronics включает:

- RF MEMS ключи;
- микроинкапсуляцию на уровне пластины (Wafer-Level Micro-Encapsulation);
- схемы фазовых переключателей (сдвигатели);
- МЭМС настраиваемые фильтры;
- антенные подсистемы фазовых массивов.

MEMtronics не имеет каталога для продажи, и все продукты производятся в соответствии с уникальными клиентскими требованиями. Процесс производства ключей является частью процесса производства монокристаллических микроволновых ИС — monolithic microwave integrated circuit (MMIC).

Целевые рынки MEMtronics представляют собой коммуникации (RF MEMS электронно-сканирующие антенны для спутниковой коммуникации, управляемые антенны для беспроводных локальных сетей и ультраширокополосных применений, настраиваемые фильтры для коммуникационных систем), датчики (фазовые сдвигатели и сканирующие антенны для военных и коммерческих радаров), получение изображений (критические компоненты массивов 2-D и 3-D национальной безопасности, включая сканирование багажа в аэропорту, обнаружение оружия). В основе всех возможностей продуктов — технология RF MEMS ключей для контроля, маршрутизации и тюнинга ВЧ-сигналов.

Специалисты MEMtronics разработали новый метод эффективного корпусирования емкостных ВЧ МЭМС ключей под названием «Микроинкапсуляция на уровне пластины».

Эта схема исключает необходимость в уплотняющем кольце и дает потенциал для построения много меньших, недорогих схем. Суть метода состоит в конструировании индивидуальных микрокорпусов на RF MEMS пластине посредством MEMS-процессов вместо присоединения стеклянных пластин (рис. 3а). Микроинкапсуляция позволяет создать корпус с ВЧ-соединениями с низкими потерями. Этот процесс выполняется при умеренных температурах (200...250 °C) и допускает грубое корпусирование. Это приводит к снижению цены корпусирования до 28% от общей цены переключателя. Вносимые потери корпуса составляют 0,04 дБ на 35 ГГц и <0,10 дБ для частот до 110 ГГц. Ускоренные испытания показали возможность срока службы порядка 55 лет при комнатной температуре, а с применением уплотняющих слоев — свыше 600 лет. Данный подход MEMtronics повышает защиту RF MEMS в жестких условиях и дает эффективное в стоимостном выражении решение.

Фазовые переключатели (сдвигатели фазы) выполняют функциональность модификации фазы (задержки) ВЧ-сигнала между входом и выходом сети. Типичные применения: антенны, основанные на электронном переключении, фазовые массивы радаров, систем наблюдения и навигации.

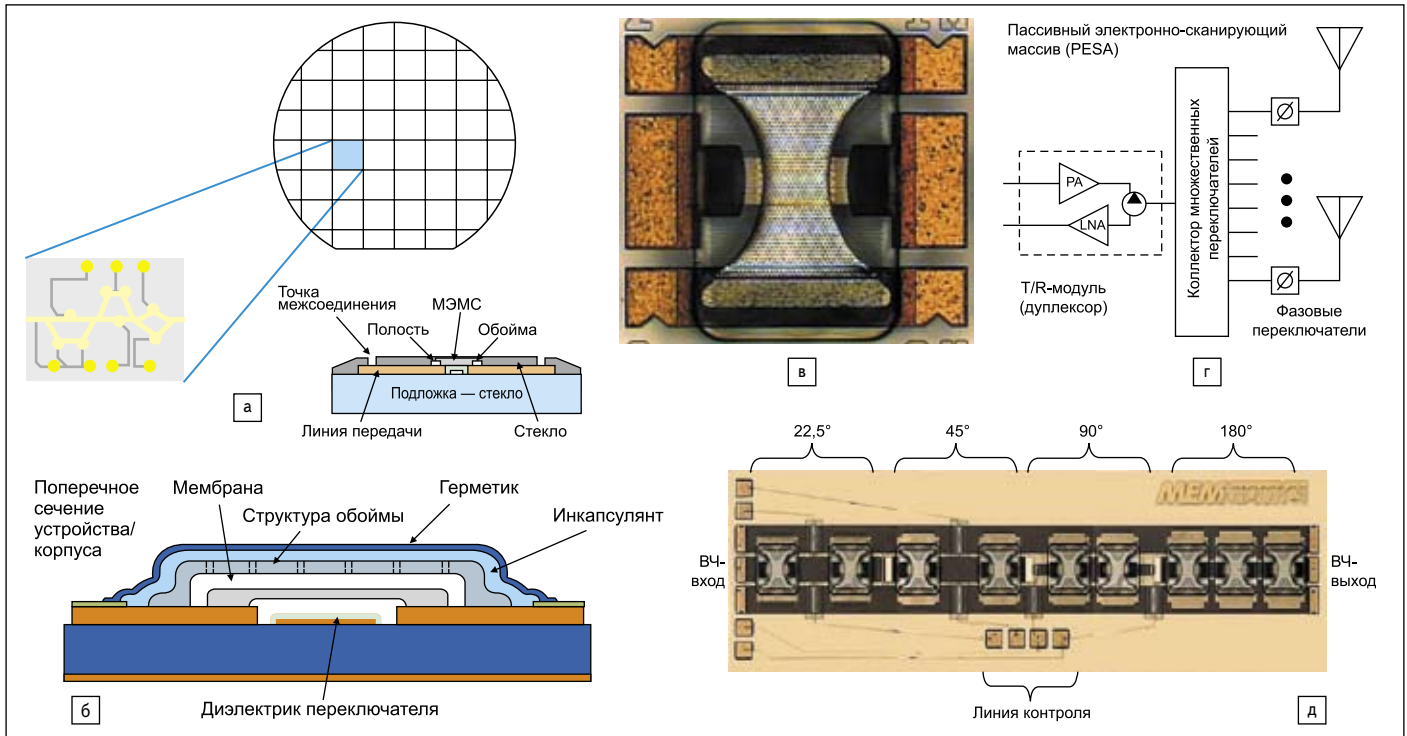


Рис. 3. Технологии и применения ВЧ МЭМС от MEMtronics:

а, б) микроинкапсуляция на уровне пластины; в) инкапсулированный микроключ; г, д) фазовые переключатели; г) общая схема пассивного электронно-сканирующего массива; д) прототип 4-битного MEMS фазового переключателя в Ка-полосе

Фазовые переключатели — важнейшие компоненты в архитектурах антенн на основе фазовых массивов. Электронно-сканирующая антенна представляет собой фазовый антенный массив — совокупность большого числа элементов антенны, переключаемых по амплитуде и фазе таким образом, чтобы получить электронно-управляемый луч. Преимущества антенн на основе фазовых массивов состоят в быстрой и надежности переключения электронного луча, компактности.

Фазовые переключатели используются в радарх, основанных на электронно-сканирующих массивах. Сканирование можно выполнять электронно, посредством сканирования луча из массива, или механически, посредством вращения антенны. Радары определяют угол (азимут или телесный угол), диапазон и скорость движения целей, рассеивающих электронный луч.

Например, частотно-модулированные радары с незатухающей гармонической волной, или FMCW (frequency modulated continuous wave), определяют диапазон и радиальную скорость цели. Импульсные радары Доплера определяют те же параметры посредством ранжирования импульсной задержки и эффекта Доплера.

Электронно-сканирующие массивы, или, иначе, фазовые массивы, имеют много преимуществ над механическими сканирующими антеннами, включая возможность быстро переключать множественные лучи и радарные режимы с чередованием.

RF MEMS фазовые переключатели были разработаны в 1990-х годах. Получили распространение две реализации электронно-сканирующих антенн — активные (AESA) и пассивные (PESA).

Традиционные фазовые антенные массивы разрабатывались с применением активной электроники для каждого излучающего элемента, включающей фазовый сдвигатель для установки положения луча и усиления — для того чтобы перекрыть потери каждого фазового ключа. Цена подобной микроволновой схемы составляет \$1000–2000 для каждого антенного элемента, что допускает только военные или телекоммуникационные применения подобных систем.

Одним из эффективных в стоимостном выражении вариантов реализации коммуникационных антенн является использование пассивных массивов (рис. 3г, д), где каждый излучатель управляется посредством фазового переключателя с ультранизкими потерями, а множественные радиаторы и фазовые сдвигатели управляются посредством одного электронного модуля. Но в данной архитектуре потери фазовых переключателей должны быть ниже, чем реализованные с обычной микроволновой электронной технологией. Согласно MEMtronics, 4-битные фазовые ключи на основе pin-диода или GaAs FET имеют потери 4–5 дБ в X-полосе, а в Ка-полосе — 8–10 дБ. Поэтому в MEMtronics реализовали требуемые фазовые переключатели с низкими вносимыми потерями на основе емкостных МЭМС ВЧ — для пассивных

фазовых антенных массивов в диапазоне от X- до Ка-полосы и за их пределами. Другие признаки состоят в малом потреблении мощности (десятки нДж на цикл переключения) и высокой линейности (выше +66 дБм).

Гибкость МЭМС-процессов MEMtronics позволяет легко интегрировать ключи с другими электронными технологиями — CMOS, GaAs и т. п. для соответствия клиентским требованиям.

Настраиваемые фильтры, основанные на технологии ВЧ МЭМС, — следующая технология, разработанная MEMtronics для улучшения коммуникационных систем, в особенности для спутниковых или UAV-применений, где настраиваемые (tunable) МЭМС-фильтры с низкими потерями и высокой линейностью способны заместить банки переключаемых фильтров, снизить вес, объем и количество частей. В рамках программы DARPA UltraComm настраиваемые фильтры МЭМС продемонстрировали в полосе от 80 МГц до 2,8 ГГц функциональность переключаемых банков фильтров при снижении объема в 60 раз, числа частей — в 14 раз, веса — в 150 раз.

Фильтр, по его определению, реализует функциональность данной и переменной функции фильтрации ВЧ-сигнала, то есть выделяет из сложного входного сигнала сигналы только в определенной частотной полосе, ослабляя при этом другие (ФНЧ, ФВЧ, полосовые фильтры). Ключевым элементом фильтра является резонатор: это колебательная система, способная к резонансу,

то есть совершению колебаний максимальной амплитуды при внешнем воздействии определенной частоты и формы. Набор резонаторов с различными частотами способен к анализу/фильтрации сигнала. Добротность резонатора показывает, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду без резонанса.

Чтобы избежать применения множественных фильтрующих компонентов для различных частотных полос, применяются реконфигурируемые ВЧ-фильтры и резонаторы, допускающие тюнинг резонансной частоты. Типичные применения состоят в фильтрации и выборе ВЧ-сигналов в схемах и платформах трансиверов (колебательных LC-контурах осцилляторов, контролируемых напряжением (voltage controlled oscillator, VCO), и MEMS-резонаторов осцилляторов). Преимущества включают в себя высокую реконфигурируемость.

Например, ВЧ МЭМС резонаторы могут быть реализованы в локальных осцилляторах LO (local oscillator) или ВЧ-трансиверах, улучшая чистоту несущего сигнала. А RF MEMS переменные индукторы и конденсаторы могут реализовать настраиваемые колебательные LC-контуры, интегрированные с VCO.

В MEMtronics разработали инновационную концепцию резонаторов с высокой добротностью для конструирования настраиваемых микроволновых и миллиметровых фильтров. Концепция предусматривает интеграцию МЭМС-схемы в пределах компактных диэлектрических полостей металлических волноводов и использование МЭМС для возмущения (тюнинга) натуральной резонансной частоты. Емкостная технология переключателей MEMtronics допускает тюнинг фильтров с ультранизкими потерями и эффективным последовательным сопротивлением менее 0,25 Ом. Металлические волноводы представляют среду с низкими потерями для микроволновых и миллиметровых частот. Эти две технологии вместе дают самый высокий Q-фактор (добротность).

Текущие разработки MEMtronics иллюстрируют настраиваемые МЭМС-фильтры для работы в X-полосе с полосой в 1%, вносимыми потерями 4,7–5,8 дБ и Q (так называемый ненагруженный фактор качества — unloaded quality factor, или добротность в отсутствие нагрузки) порядка 170–320. Показана перспектива для Q ~500 в X-полосе. В разработке — настраиваемый фильтр МЭМС в Ka-полосе с 1,5%-ной полосой, потерями менее чем 3 дБ, в корпусе для поверхностного монтажа с формфактором приблизительно $20 \times 5 \times 1$ мм.

Наравне с низкими вносимыми потерями и высоким Q-фактором размеры и вес резонаторов/фильтров также весьма важны, и MEMtronics имеет в своем портфолио разработки миниатюрных фильтров. Микрополосковая или полосковая технология фильтров предлагают недорогое реше-

ние в пределах малого фут-принта, но их Q-фактор ограничен системными потерями. Для высокой селективности применяется технология металлических волноводов, что дает высокий Q-фактор — порядка тысяч, но размер и вес, а также цена недопустимо велики для многих применений. Инновационная технология фильтров от MEMtronics (MFIT) предназначена заполнить зазор между микрополосковыми или полосковыми технологиями и металлическими волноводами.

MEMtronics разработала технологию миниатюрных волноводов, комбинирующую обеспечивающую преимущества планарных печатных схем, которые являются компактными, легкими по весу и в производстве эффективны в стоимостном выражении, при сохранении преимуществ обычных металлических волноводов, включая экранирование, низкие потери, высокую добротность и способность к обработке сигналов высокой мощности.

ВЧ МЭМС технология WiSpry — настраиваемые конденсаторы и переключающие схемы на их основе

Следующий тип МЭМС-устройств, требующий особого внимания в контексте данной статьи, — это переключающие (on/off) емкостные ячейки от WiSpry.

Переменные конденсаторы, в которых емкость контролируется посредством варьирования зазора между обкладками, обычно посредством прикладывания электростатической силы, называются варакторами или варикапами.

Функциональность варактора состоит в тюнинге емкости. С применением МЭМС-технологий могут быть весьма просто осуществлены аналоговые варакторы, но оцифровка — еще более гибкий подход, реализованный WiSpry.

Типичные применения переменных конденсаторов — в качестве компонентов ВЧ-схем и платформ трансиверов. Преимущества, отличающие МЭМС от полупроводниковых аналогов, включают высокую линейность, большой диапазон тюнинга, высокий Q-фактор и низкие потери, а также отсутствие потребления мощности (только для контроля устройства).

WiSpry — фаблесс-компания, которая разработала и пустила в производство настраиваемую цифровую емкостную технологию ВЧ МЭМС, дающую значительные улучшения характеристик, снижение размера и цены беспроводных мобильных устройств.

Технология WiSpry реализована посредством однокристалльной CMOS-интеграции динамически настраиваемых ВЧ-элементов. Поэтому ВЧ МЭМС устройства от WiSpry одновременно характеризуются управляемостью, низкими потерями, признаками снижения пространства и цены. Основанные

на МЭМС ВЧ-компоненты могут улучшить характеристики до 6 дБ, при снижении как потребления мощности на 30–40%, так и времени выхода на рынок и цены.

Программируемые ВЧ-продукты упрощают дизайн будущих поколений мобильных хэндсетов. WiSpry создала цифровые программно контролируемые (настраиваемые) МЭМС ВЧ сетевые продукты с экстремально высоким Q-фактором, низкими потерями, высокой линейностью — для использования в 3G и LTE (Long Term Evolution) мобильных устройствах. В отличие от многих конкурирующих ВЧ-технологий, уникальный процесс производства WiSpry позволяет компании повышать степень интеграции посредством построения массивов ВЧ-устройств на активной CMOS кремниевой структуре, формируя следующий ориентир в дорожной карте от дискретных ВЧ-конденсаторов к полностью интегрированным и монолитным однокристалльным трансиверам (рис. 4).

Настраиваемая цифровая конденсаторная технология WiSpry представляет собой инновационный метод для создания и интеграции настраиваемых фильтров, дуплексоров, усилителей мощности и других настраиваемых ВЧ МЭМС устройств.

Технология WiSpry основана на библиотеке компонентов и 200-мм процессе CMOS. Процессы, совместимые с CMOS, включая SiGe, BiCMOS, GaAs, инновации в области материалов и структур, корпусирование на уровне пластин — все это допускает монолитную интеграцию МЭМС-технологии с активным кремнием.

Настраиваемая технология предназначена для гибкой и быстрой адаптации системных решений в многообразии стандартов и частот, снижения цены при высокообъемном производстве, быстрого возврата инвестиций (ROI).

Настраиваемый ВЧ МЭМС конденсатор WiSpry с параллельными обкладками с фиксированными минимальным и максимальным значениями емкостей возбуждается электростатическим актюатором (рис. 4 а–в). Фиксированная на поверхности пластины обкладка покрывается диэлектриком, другая подвижная обкладка прикрепляется к донной стороне актюатора. Когда актюатор находится в состоянии подъема, конденсатор характеризуется минимальной емкостью, а когда луч полностью отклонен, емкость максимальна.

Устройство работает только в цифровой модели — off или on. Посредством подходящего выбора материалов и геометрии общая величина емкостного изменения может варьироваться.

Одиночный конденсатор может быть использован далее как бит или стандартная емкостная ячейка массива, с его помощью можно будет формировать большие конденсаторы с использованием металлических межсоединений на кристалле, подложке

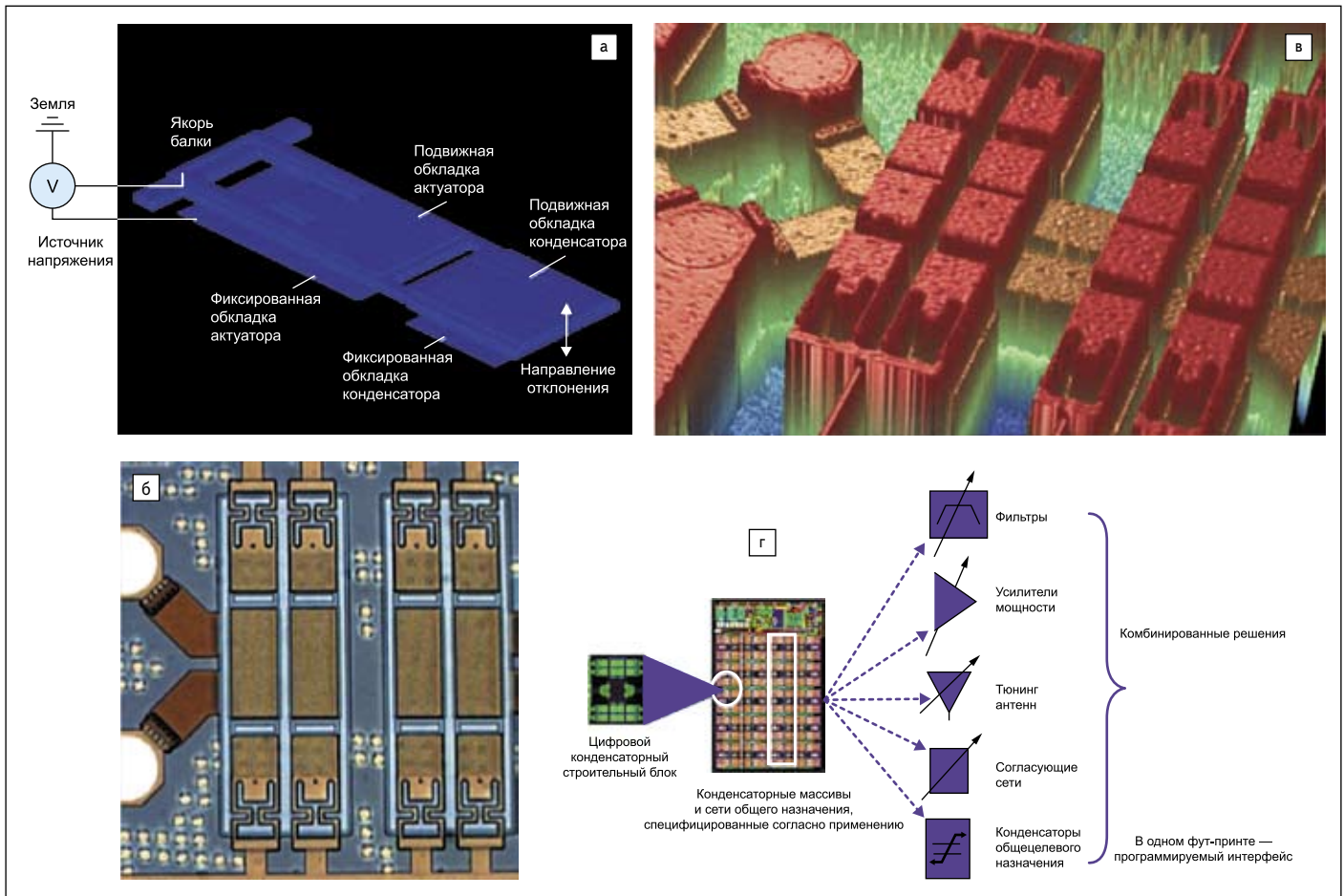


Рис. 4. Настраиваемые МЭМС ВЧ технологии конденсаторов от WiSpry: а–в) настраиваемые ВЧ МЭМС емкостные ячейки: а) иллюстрация емкостного принципа; б) 4-битный кристалл в плоскости; в) его 3D-изображение; г) инновации WiSpry и их применение

или в корпусе. Поскольку массив является цифровым, он не требует замкнутого контрольного цикла. Новое значение емкости может быть задано посредством приложения цифрового слова к массиву, в котором определяется, какие биты устанавливаются в состояние on, а какие — в off. Размер бита (емкость) можно регулировать для достижения желаемой точности.

На кремнии могут быть выстроены размеры битов в диапазоне 0,005–0,25 пФ и массивы до 40 пФ, дающие диапазон тюнинга до 10:1 и характеризующиеся высокой линейностью и изоляцией, низкими потерями, низкой чувствительностью к ударам и вибрациям. При этом минимальные значения Q превышают 100 (на 2 ГГц). А это в 5 раз выше, чем у полупроводниковых диодных варакторов, которые в требуемом частотном диапазоне мобильных хэндсетов дают малые значения добротности (тем более низкие, чем меньше общая емкость), низкое изменение емкости, ограниченную линейность и схему замкнутого цикла для контроля перехода от одного значения к следующему.

Настраиваемые конденсаторы — основа систем, в которых осуществляются реконфигурация антенн, согласование и фильтрация (рис. 4г).

Другие типы и применения ВЧ МЭМС устройств

Переменный индуктор — это устройство, функциональность которого состоит в осуществлении настраиваемой индуктивности посредством контролирующего сигнала. Все применения, преимущества, недостатки — те же, что и у переменных конденсаторов.

Переключающая матрица перераспределяет ВЧ-сигналы между множественными входными и выходными линиями и позволяет реализовать высокосложное устройство в малом размере и весе. Она имеет преимущества и недостатки, типичные для RF MEMS.

Реконфигурируемый тюнер трансформирует импеданс на входе тюнера в другое значение на выходе. Применения включают согласование импеданса в ВЧ-схемах с несогласованием импеданса между субблоками, например между усилителем мощности и передающей антенной в системе GSM.

Аттенуатор/делитель мощности предназначен для адаптации мощности — разделения мощности ВЧ-сигнала между различными каналами и ослабления мощности ВЧ-сигнала.

Для ВЧ МЭМС устройств характерна тенденция полного замещения ими полупро-

водниковых дискретных компонентов, что ярко проявляется на примере микромеханических резонансов, использующих механический резонанс для создания фильтров, источников времени и частоты. Ключевым преимуществом МЭМС являются более высокие способности к реконфигурации системы, возможности использования одного устройства вместо многих.

Резонаторы — это фундаментальные блоки для построения более сложных компонентов: фильтров, дуплексоров, осцилляторов. МЭМС-резонаторы, например, разрабатываются для замещения кварцевых кристаллов и тактовых генераторов. МЭМС-резонаторы для дуплексоров и фильтров широко используют объемный акустический волновой резонансный принцип (Bulk Acoustic Wave, BAW), где акустические волны создаются в подвешенной структуре или изолированном материале и распространяются перпендикулярно поверхностям слоев. BAW стали эффективной в стоимостном выражении альтернативой акустическим резонаторам на поверхностных волнах (Surface Acoustic Wave, SAW, или ПАВ), в которых волны распространяются параллельно поверхностям слоев фильтра. Необходимость в них была сформирована спросом на миниатюр-

ные фильтры с высоким уровнем рабочих характеристик в устройствах беспроводной коммуникации. BAW-резонаторы обычно состоят из двух электродов, между которыми находится пьезоэлектрический слой. Также между пьезоэлектрическим слоем и подложкой могут быть слои, выполняющие функции акустической изоляции.

Монолитные фильтры, которые включают в себя по крайней мере одно резонаторное BAW-устройство, изготовленные по тонкопленочной технологии, известны под оригинальным названием Thin Film Bulk Acoustic Wave Resonators (FBAR). FBAR — это ранний пример RF MEMS устройства, в котором резонатор построен на мембране. Устройство FBAR реализуется также с использованием пьезоэлектрического материала (AlN, ZnO) и, в соответствии со своим функциональным назначением, выполняет электро-акустико-электрическое преобразование для фильтрации сигнала. FBAR — это этап на пути к осуществлению полупроводниковых технологий и уменьшению толщины устройства типа современного сотового телефона CDMA (code-division multiple access), где FBAR применяются в дуплексорах (двунаправленных устройствах передачи через один канал, фильтрах приема/передачи). Довольно обширный список BAW- и FBAR-устройств предлагает, например, компания Avago.

Помимо BAW/FBAR известны также названия резонаторов, как SMR (solidly mounted resonators), сформированных на зеркалах,

а также TFR (thin film resonators) или SCF (stacked crystal filters).

Но МЭМС, к примеру, от WiSpry или MEMtronics допускают возможность настраивания резонаторов, более высокую степень интеграции и более низкий формфактор.

МЭМС-ключи и другие компоненты — уже более зрелая технология, чем архитектуры на их основе, интегрированные в корпус или на кристалл. В I квартале 2010 года было положено начало коммерциализации RF MEMS ключей в потребительских применениях. Многие компании, включая Radant MEMS, Raytheon, Omron, MEMtronics, предлагают своим клиентам ключи, реле, варакторы RF MEMS типов. Но следующая важная тенденция в развитии ВЧ МЭМС состоит именно в построении функциональных архитектур системных блоков и субблоков.

Интеграция со CMOS и соответствующее корпусирование — факторы, поддерживающие распространение ВЧ МЭМС технологий. Кантлеверные и мембранные устройства чувствительны к загрязнению, подвержены износу, механическим повреждениям, микросварке, накоплению заряда, внешнему и внутреннему тепловым воздействиям, вибрации, ударам и т. п. — ко всем факторам вместе или избирательно. Многие из этих проблем решаются посредством герметичного корпусирования. Технологии корпусирования на уровне пластины (от соединения пластин для формирования герметичной полости до тонкопленочного TFP или WL-CSP корпусирования) и интеграция со CMOS и стандартными полупроводниковыми процессами — путь к обеспечению оптимальных характеристик, снижению цены и достижению высоких производственных объемов.

Корпус должен также защищать устройство от ВЧ-интерференции. RF MEMS корпус должен быть RF-невидимым в направлении пути сигнала (это и есть низкие вносимые потери), но быть непрозрачным для RF-сигналов в других направлениях (хорошая изоляция, малая поперечная чувствительность).

Благодаря правильному корпусированию и интеграции, RF МЭМС технология позволяет не только замещать свои дискретные полупроводниковые и механические аналоги, но и допускает соинтеграцию с другими полупроводниковыми устройствами на кристалле.

Специалисты Silicon Clocks разработали CMEMS-технология, допускающую производство МЭМС-резонаторов и других структур на верхней части стандартной КМОП-пластины. Этот подход упрощает технологию производства, допускает более высокие уровни характеристик и интеграции и снижение размера, исключает различные паразитные наводки и аспекты, осложняющие корпусирование отдельных МЭМС и ИС.

Основанная на полупроводниковом процессе, ВЧ МЭМС технология компании

DelfMEMS также дает в качестве результата высокую интеграцию — выше ИС (above-IC) и пассивных устройств (above-IPD, Integrated Passive Devices), а также возможность помещать устройства на поверхность стекла, GaAs, сапфира и SiGe. Технология DelfMEMS включает гибкую поддерживаемую мембрану H-формы, допускающую два активных состояния с омическим контактом. Отклоняемая электростатическими силами, эта мембрана используется для переключения ВЧ-сигналов по принципу электромеханических реле/переключателей и обеспечивает:

- ультрабыстрое переключение;
- высокую надежность;
- малый размер переключателя;
- снижение цены;
- «горячее» переключение;
- высокие силы контакта и восстановления.

Для цифрового тюнинга важно, что RF-ключи от DelfMEMS характеризуются низкими потерями (менее 0,1 дБ на 2 ГГц с фактором изоляции в 50 дБ) и высокой линейностью (выше 70 дБ). Возможность SoC-интеграции с соответствующим корпусированием поддерживает не только малый размер и цену ВЧ МЭМС, но и возможность системной реконфигурации.

Заключение

Технология ВЧ МЭМС, в отличие от популярных типов МЭМС-датчиков и актюаторов, датчиков инерции например, не достигла такого же распространения на массовых рынках. Но эта технология характеризуется высоким ростом.

IHS iSuppli опубликовала данные, согласно которым рост объемов продаж RF MEMS составит от \$27,9 млн в 2011 году до \$223,2 млн в 2014-м. Многие из RF MEMS нацелены на рынок сотовых телефонов, тюнинг посредством ключей и варакторов. Например, WiSpry и DelfMEMS, а также TDK-Epcos работают на высокообъемные сотовые рынки, но Radant Technologies, XCOM Wireless (с Teledyne Technologies) и Omron в большей степени нацелены на High-End сегменты.

В беспроводных коммуникациях множество сигналов в широкой частотной полосе обрабатываются одним устройством RF MEMS. Низкие потери, высокая изоляция, линейность и широкая частотная полоса, скорость, цена, надежность, способность к реконфигурации — весь этот набор преимуществ одновременно недостижим с обычными механическими или полупроводниковыми устройствами. Кроме того, простейшие RF MEMS устройства могут быть размещены на одном кристалле вместе в значительном количестве и легко интегрируются с электроникой или другими МЭМС-устройствами, что открывает новые возможности для будущего развертывания беспроводного рынка ВЧ МЭМС. ■