

МЭМС-КОМПОНЕНТЫ И УЗЛЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ АППАРАТУРЫ

Сегодня технология микроэлектромеханических систем – МЭМС (MicroElectroMechanical Systems – MEMS) – признана одной из ключевых технологий, позволяющих совершенствовать технические характеристики радиосистем, расширять их функциональные возможности, а также существенно снижать издержки их производства, массогабаритные показатели, энергопотребление [1–3]. В мире уже освоено крупносерийное производство МЭМС-узлов для электронных систем военного и гражданского назначения [4–10]. С середины 1990-х годов начались активные исследования и разработки МЭМС-узлов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, предназначенных для широкополосных связных систем, программно-управляемых радиосистем (software radio), перестраиваемых радиолокационных систем, сверхминиатюрных и недорогих систем на кристалле (System-on-Chip – SoC) [4–15]. Появилось множество публикаций, трудов научно-технических конференций и патентов, способствовавших переориентации производственных предприятий электронной промышленности развитых стран на освоение новых технологий. Определились мировые лидеры в области разработки и производства радиочастотных (РЧ) МЭМС и сложных систем на их основе [16–25]. Решение основных технических проблем (обеспечение высокой надежности, герметизации при пониженных температурах, "горячей" коммутации) позволит создать РЧ МЭМС-системы, превосходящие традиционные электронные устройства по степени интеграции, вносимым потерям и функциональным возможностям. Рассмотрим реальные возможности РЧ МЭМС-устройств с учетом достоинств и недостатков новых технических решений, а также современное состояние этого сектора мирового рынка электронных компонентов СВЧ и миллиметрового диапазонов.

Л. Белов

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ РЧ МЭМС

Под МЭМС-изделиями подразумевают интегрированные микроэлементы или системы с размерами от микрометров до миллиметров, объединяющие электрические и трехмерные механические компоненты, изготовленные по технологиям, совместимым с технологией микросхем. Единообразия в терминологии этого сегмента рынка пока нет: в Японии пользуются понятиями "мехатроника" и "микромашин", в Европе – "микросистемы", в России [26], согласно утвержденному в 2002 году "Перечню критических технологий Российской Федерации", принят официальный термин "микросистемная техника". Некоторые фирмы наряду с МЭМС используют наименование "наноэлектромеханические системы" (НЭМС), "микронанотехнологии", "микроструктурирование", "MOEMS – Micro Opto-Electrical-Mechanical Systems" для МЭМС-устройств, содержащих оптические компоненты. Чаще всего, в первую очередь в США, употребляется термин "MEMS".

Класс РЧ МЭМС включает пассивные компоненты (ключи, емкости, элементы индуктивности, резонаторы), схемотехнические узлы (частотные фильтры, генераторы, фазовращатели, линии задержки) и активные устройства или системы (фазированные антенные решетки, переключательные матрицы, приемопередающие блоки мобильных средств связи и др.). В основном современные МЭМС-структуры изготавливаются методами объемной (bulk micromachining) или поверхностной микрообработки (surface micromachining), а также с помощью высокопрофильной технологии (Lithography-Galvanik-Abformung – LIGA) [1–3, 27, 28]. При объемной микрообработке трехмерная структура, состоящая из гибких консолей (кантилеверов), отверстий, канавок и мембран, обычно формируется путем удаления определенных участков подложки (как правило, кремниевой). При этом используется изотропное (для создания закругленных углублений), анизотропное (для получения V-образных канавок, пирамид и выемок) или глубокое ионное травление (для получения прямоугольных карманов). В некоторых случаях трехмерную структуру создают путем соединения нескольких подложек с образовани-



ем вертикальных связей на атомарном уровне (метод наращивания). При поверхностной микрообработке на подложку последовательно осаждаются структурные (как правило, кремниевые) и "жертвенные" слои (пленки диоксида кремния, нитрида кремния или полимера). В структурных слоях методами фотолитографии создается рисунок поперечного сечения формируемого узла, после чего для получения зазоров и пустот с помощью жидкостного или сухого травления жертвенный слой удаляется (рис.1). Толщина трехмерной конструкции такого типа составляет 10–50 мкм, высота зазоров – 10–30 мкм. Таким же образом формируются выступающие элементы (пальцы гребенчатой структуры, консоли, мембраны). Достоинство этой технологии – возможность многократного удаления (растворения) вспомогательных слоев без повреждения взаимосвязей базовых структурных слоев. Высокопрофильная технология

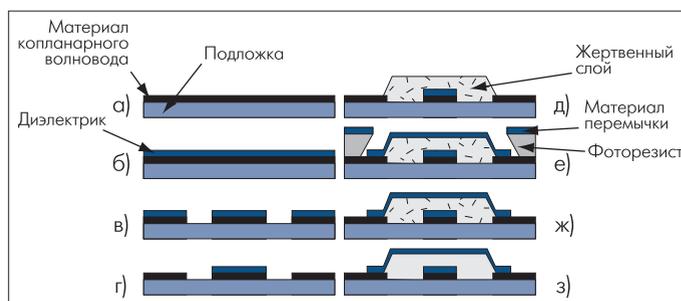
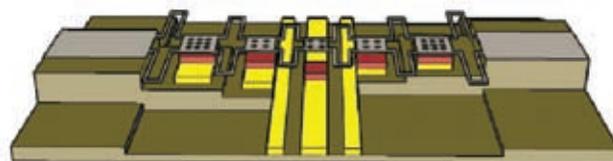


Рис.1. Последовательность операций формирования МЭМС-структуры с фиксированным якорем: а) осаждение копланарного волновода; б) осаждение диэлектрика; в) травление диэлектрика и структурного материала для получения глубокой канавки; г) удаление диэлектрика на проводниках; д) осаждение жертвенного слоя; е) нанесение материала перемычки поверх пластины со сформированной в фоторезисте топологией ключа; ж) удаление фоторезиста и жертвенного материала; з) окончательная МЭМС-структура

LIGA сочетает рентгеновскую литографию, гальванотехнику и прессовку (формовку). Она позволяет получать увеличенное отношение глубины канавки к ее ширине. В толстом полимерном слое фоторезиста с помощью рентгеновского излучения синхротрона формируются глубокие (до нескольких миллиметров) канавки с отвесными стенками и затем методом гальванического осаждения создаются высокопрофильные трехмерные структуры. Считается, что технология LIGA обеспечивает наилучшие отношения высоты профиля к его ширине и ширины канала к его длине (при минимальных размерах элемента). В зависимости от сложности МЭМС-структуры требуется от 5 до 25 операций рентгеновской литографии.

Наиболее характерная тенденция развития РЧ МЭМС – отказ от поверхностного монтажа отдельных компонентов схемы и переход к созданию заказной системы на кристалле (SoC), собираемой в вакуумированный и влагозащищенный корпус. Технологические возможности изготовления МЭМС-узлов характеризуются наибольшим размером обрабатываемой кремниевой пластины (в настоящее время



■ Подложка ■ Материал копланарного волновода и электроды ■ Диэлектрик ■ Подвесная пластина

Рис.2. Схема многоступенчатого актуатора, предназначенного для снижения управляющего напряжения

– до 200×200 мм) и минимальной толщиной единичного слоя (сейчас – 0,1–10 мкм).

Любой узел РЧ МЭМС содержит актуатор – микромеханизм, преобразующий управляющий сигнал в движение, и якорь – закрепленную на одном конце консоль (балку, кантилевер), подвижное коромысло (beam) или мембрану. При реализации РЧ МЭМС большое значение имеет качество актуатора. При количественной его оценке учитываются такие параметры, как линейность, погрешность, воспроизводимость характеристик, разрешающая способность, гистерезис, пороговое значение напряжения срабатывания, собственный шум, механическая несущая способность, размах перемещения, чувствительность к управляющему воздействию, вид и длительность переходной характеристики, потребляемая энергия, необходимый для управления уровень сигнала, износостойкость.

Существуют электростатические, магнитные, пьезоэлектрические, гидравлические и тепловые актуаторы [1–3, 27]. Наиболее широко используется электростатический тип актуатора, отличающийся малым временем изменения состояния (обычно 10–100 мкс) и практически нулевым (благодаря механическому гистерезису) энергопотреблением при удержании его в выбранном положении. Главные его недостатки – высокое напряжение (40–60 В), необходимое для управления перемещением якоря (как правило, кантилевера), малая износостойкость и возможность залипания в крайних положениях. Для уменьшения управляющего напряжения до 10–15 В применяют многоступенчатые электростатические актуаторы (рис.2) или встраиваемые микроэлектронные преобразователи напряжения, обеспечивающие требу-

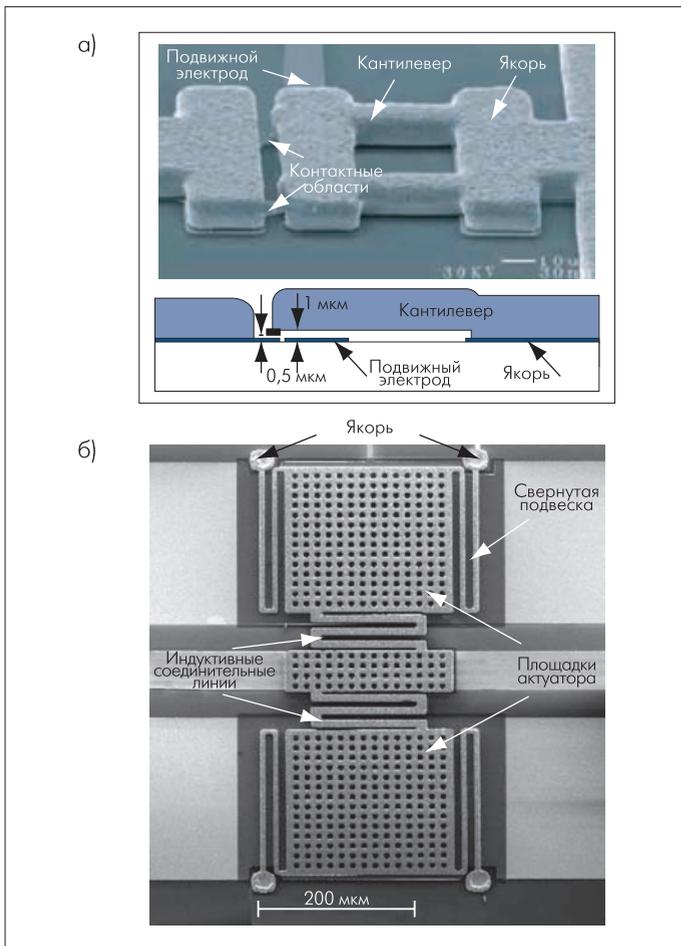


Рис.3. Микрофотографии контактного (а) и емкостного (б) ключей

емое высокое напряжение. Магнитные актуаторы обычно потребляют относительно большой электрический ток и трудны в изготовлении. Мембрана или кантилевер, как правило, выполняются из специального ферромагнитного материала. Тепловые актуаторы отличаются относительно большим энергопотреблением, а генерируемое ими тепло необходимо рассеивать. Коммутацию пьезоэлектрических актуаторов обеспечивает приложенное к отдельным элементам объемной структуры напряжение, вызывающее изменение их физических размеров. В биметаллических актуаторах (на основе сплавов с памятью формы) коммутация происходит благодаря свойству некоторых материалов, деформированных при низкой температуре, восстанавливать при нагреве начальную форму. В РЧ МЭМС-узлах часто используют комбинацию разных типов актуаторов, например электростатического и теплового.

Основной электрический параметр пассивного РЧ МЭМС-компонента (активное сопротивление, значение емкости или индуктивности, резонансная частота) может иметь два значения (ключ) или непрерывно меняться в зависимости от управляющего сигнала.

РЧ МЭМС-КОМПОНЕНТЫ

Современные РЧ МЭМС-ключи (коммутаторы СВЧ-сигналов) (рис.3) могут быть контактными ("металл–металл")

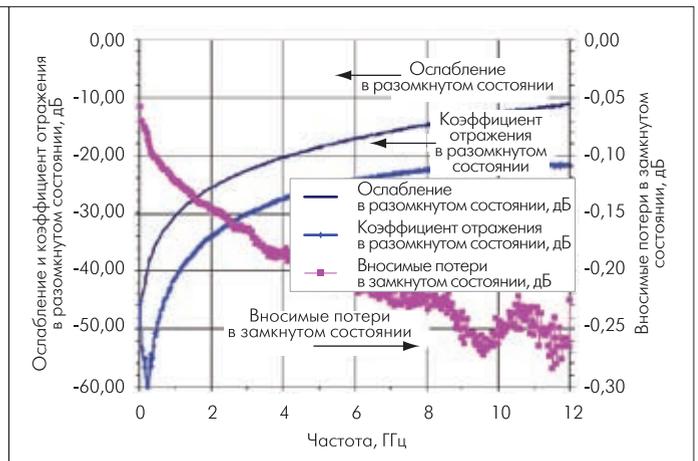


Рис.4. Частотные характеристики МЭМС-ключа RMSW100

или с емкостным замыканием цепи [29–32]. В конце 2007 года был предложен новый класс контактных ключей для диапазона миллиметровых волн – типа "жидкость–металл" [32]. Диапазон частот ключей "металл–металл" составляет от нуля (DC) до 6–40 ГГц. Они более чувствительны к температурным и механическим (ударам и вибрациям) воздействиям, чем ключи с емкостным замыканием цепи. Частотный диапазон емкостных ключей составляет 6–120 ГГц. Ключи типа "жидкость–металл" рассчитаны на частоты 20–100 ГГц. Они отличаются малыми потерями в замкнутом состоянии (1,3 дБ на частоте 40 ГГц) и повышенной мощностью коммутируемого сигнала.

Основные параметры простейшего однополюсного ключа на одно направление (Single-Pole Single-Throw – SPST) – диапазон частот коммутируемого сигнала f ; уровень вносимых потерь в полосе рабочих частот в замкнутом состоянии (Insertion Loss – IL), ослабление в разомкнутом состоянии (Isolation – Iso) и коэффициент отражения в разомкнутом состоянии (Return Loss – RL). Эти параметры существенно зависят от частоты коммутируемого сигнала (рис.4). Кроме того, большое значение имеют и такие характеристики, как время включения/выключения $\tau_{вкл}/\tau_{выкл}$, мощность СВЧ-сиг-

Таблица 1. Параметры радиочастотных МЭМС- и полупроводниковых ключей [29]

Параметр	МЭМС-ключ	p-i-n-Диоды или полевые транзисторы
Емкость в закрытом состоянии, фФ	1–6	40–100
Активное сопротивление в закрытом состоянии, Ом	0,5–2	2–6
Коэффициент перекрытия по емкости	40–500	10–15
Граничная частота, ГГц	20–80	1–4
Потребляемая мощность, мВт	0,05–0,1	0,05–100
Коммутируемая мощность, Вт	<1	<10
Уровень P_{P3} , дБмВт	66–80	27–45
Время срабатывания, мкс	1–300	0,001–0,1

**Таблица 2. Параметры МЭМС-ключей**

Модель	Тип ключа	f , ГГц	IL/Iso на частоте 1 ГГц, дБ	$\tau_{\text{вкл}}/\tau_{\text{выкл}}$, мкс	Life, 10^6 циклов	$E_{\text{упр}}$, В	Размер, мм	Источник информации
WSS0112H	SP4T	0–6	0,2/50	10/50	10^3	30	4×4×1	[18]
TT712-68CSP	SPDT	0–7	0,1/35	10/70	10^3	68 ²⁾	3,3×4,5×1,2	[17]
ML06	SPDT	0–7	0,1/45	50/50	10	5 ³⁾	3,3×4,5×1,2	[31]
RMSW100	SPST	0–12	0,1/30	10/50	10^4	40	1,5×1,5×0,6	[16]
RMSW200	SPST	0–40	0,2/25	10/50	10^4	40	1,5×1,5×0,6	[16]
TT2214	SPDT	0–7	0,07/31	50/100	10^2	5 ³⁾	3,8×5,1×1,2	[17]
M1C06-CDK2	SPDT	0–6	0,2/40 ¹⁾	10/50	10^2	5 ³⁾	5,9×5,9×2,8	[23]

¹⁾ На частоте 3 ГГц; ²⁾ Используется интегральный преобразователь напряжения; ³⁾ Магнитный актуатор.

нала без недопустимых искажений P_{IP3} , размах управляющего напряжения $E_{\text{упр}}$, ресурс работы (Life).

Сравнение усредненных параметров МЭМС- и полупроводниковых (на основе p-i-n-диодов или полевых транзисторов) ключей (табл.1) показывает, что МЭМС-ключи заметно превосходят полупроводниковые по максимальному значению рабочей частоты, коэффициенту перекрытия по емкости и максимальной коммутируемой мощности. Но они уступают полупроводниковым ключам по времени срабатывания. В то же время их быстродействие на два–три порядка выше, чем у традиционных электромеханических коммутаторов.

Наряду с фирмами, специализирующимися в области разработки и производства РЧ МЭМС-изделий [16–20], эти компоненты входят и в номенклатуру продукции многопрофильных корпораций-производителей электронных компонентов. Так, компания Dow-Key в 2007 году выпустила модель МЭМС-ключа M1C06-CDK [21, 33]. Фирма RF Micro Devices [24] объявила о производстве с 2008 года МЭМС-переключателей прием/передача, фильтров, резонаторов (для замены кварцевых) и датчиков для компактных многофункциональных входных блоков (front-end) третьего поколения (3G) сотовых систем. Параметры некоторых серийных ключей представлены в табл.2.

Типичные частотные характеристики $I_{so}(f)$ и $I_L(f)$ для МЭМС-ключа показаны на рис.4. Как указывалось выше, значение управляющего напряжения $V_{упр}$ электростатических актуаторов достигает 60 В. Для его формирования при работе от низковольтного источника питания используются преобразователи напряжения. Так, компания WiSpry для получения напряжения управления $68 \pm 1,4$ В при импульсном токе до 2,1 мА и работе от источника питания на напряжение 3–5 В выпускает компактный преобразователь постоянного тока (Charge Pump) в корпусе DIP-16, например ТТР685А16 [18].

Управляемые МЭМС-конденсаторы необходимы для создания перестраиваемых частотных фильтров, управляемых напряжением генераторов (ГУН) в составе систем фазовой синхронизации и т.п. Использование для этого полупроводниковых компонентов (варикапов) приводит к существенному ограничению системы по допустимому уровню мощности. Кроме того эти компоненты не совместимы с технологией производства микросхем. МЭМС-варакторы лишены подобных недостатков. Они могут быть выполнены в виде: параллельно расположенных пластин с изменяемым расстоянием между ними; сегментов типа "бабочки", принимающих несколько угловых по-

ложений относительно оси; встречно-штыревой структуры с изменяемым перекрытием, в виде банка конденсаторов калиброванной емкости с МЭМС-ключами, управляемыми двоичным кодом. В первом случае верхняя пластина представляет собой пружину, расстояние между которой и нижней пластиной изменяется с помощью электростатических сил, вызванных приложенным к пластинам напряжением. Так, компанией Raytheon разработана конструкция, в которой номинальная емкость пластин составляет 2,05 нФ, добротность на частоте 1 ГГц – 20, диапазон плавной перестройки емкости при изменении напряжения от 0 до 4 В – 150%, частота собственного резонанса превышает 5 ГГц [29].

Во встречно-штыревой структуре (рис.5) емкость регулируется путем изменения степени перекрытия элементов гребенчатой структуры в зависимости от приложенного к ним напряжения. Емкость варакторов этого типа составляет 1–6 пФ, добротность на частоте 500 МГц превышает 35, частота собственного резонанса – 5 ГГц, диапазон перестройки емкости при изменении напряжения от 2 до 14 В – ~200%. Линейность такого конденсатора характеризуется уровнем $P_{IP3} > 50$ дБмВт.

Выпускаются серийно [18] дискретно перестраиваемые конденсаторы, представляющие собой смонтированные

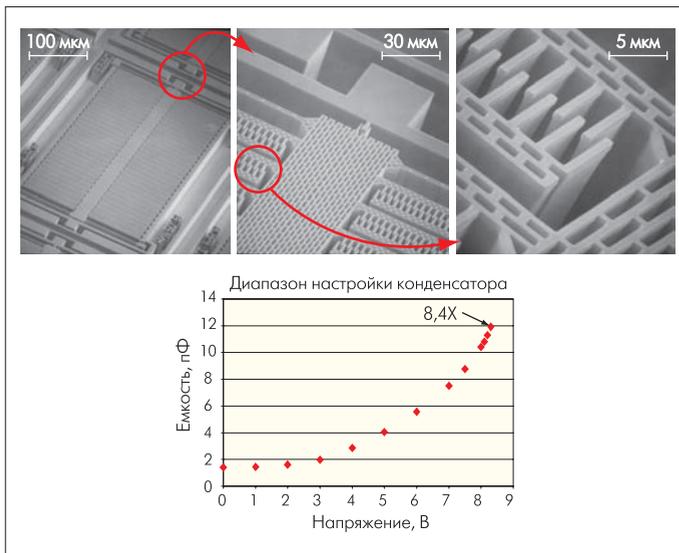


Рис.5. Микрофотографии перестраиваемого МЭМС-конденсатора (диапазон перестройки >8:1, емкость 1,5–2 пФ, добротность 30–150, управляющее напряжение – 6,4 В, частота собственного резонанса 6 ГГц)

в одном корпусе четыре секции емкостью 0,1–2 пФ каждая. С помощью управляющего кода секции включаются параллельно за время до 50 мкс. Добротность Q такого конденсатора на частоте 2 ГГц превышает 100, резонансная частота – 5 ГГц. Дискретно перестраиваемые конденсаторы содержат преобразователь напряжения питания 5,5 В в необходимое для функционирования изделия напряжение.

МЭМС-индуктивности имеют примерно те же параметры (индуктивность, добротность и собственная резонансная частота), что и внешние навесные элементы. Добротность плоской катушки индуктивности Q_s , выполненной по технологии объемной микрообработки (рис.6а), с частотой собственного резонанса от 6 до 18 ГГц лежит в пределах 6–28 при значении индуктивности порядка 1 нГн. С помощью технологии поверхностной микрообработки реали-

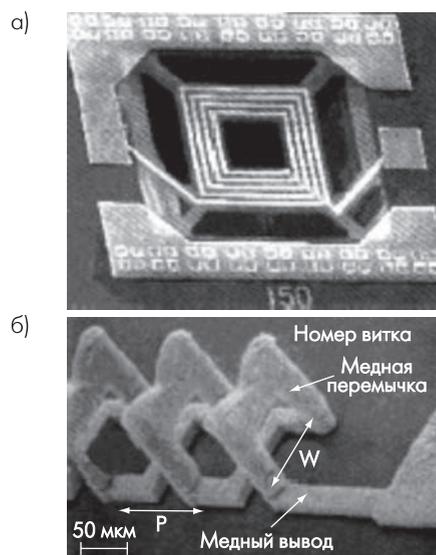


Рис.6. Микрофотографии МЭМС-индуктивности плоской (а) и объемной (б) конструкции

зуются и катушки индуктивности в виде витков соленоида, возвышающихся над подложкой (рис.6б)

МЭМС-резонаторы объемного типа по своим характеристикам сопоставимы с макроскопическими волноводными элементами. Например, добротность резонатора размером $16 \times 32 \times 0,46$ мм в ненагруженном состоянии составляет 506 [12]. Это всего на 3,8% ниже, чем у классического прямоугольного объемного резонатора аналогичных размеров. Добротность объемных МЭМС-резонаторов Q , выполненных в виде полости, составляет 500–5000. Автогенераторы, построенные на основе таких резонаторов, по относительной нестабильности частоты, которая обратно пропорциональна квадрату значения Q , сопоставимы с кварцевыми генераторами.

МЭМС-резонаторы, оптимизированные для получения высокой температурной стабильности, по темпера-

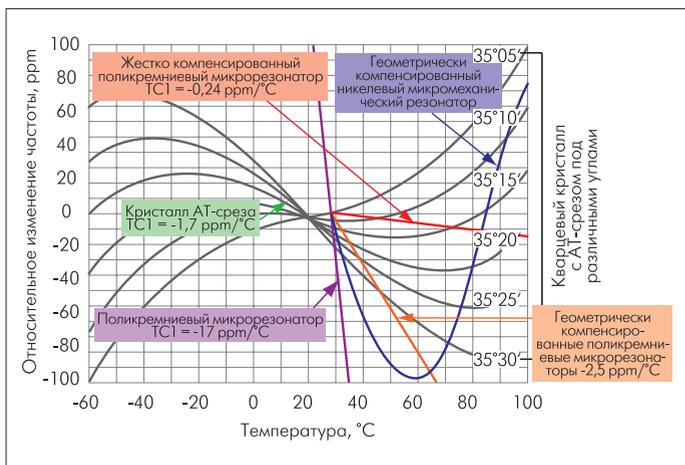


Рис.7. Изменение температурного коэффициента частоты кварцевого, некомпенсированного и компенсированного МЭМС-резонаторов

турному коэффициенту индуктивности (0,24 ppm/°C) намного превосходят лучшие кварцевые генераторы АТ-среза (-1,7 ppm/°C) (рис.7).

На основе упругих свойств металла консоли реализуются резонаторы вертикального смещения, в которых упругая консольная балка, выполненная в виде трамплина, при воздействии электростатического поля начинает вибрировать, а также резонаторы бокового смещения, движение которых вызывает возбуждение гребенчатой структуры. Максимальная резонансная частота таких резонаторов, как правило, не превышает 200 МГц. Предназначены они для замены кварцевых резонаторов в составе тактовых генераторов цифровых схем.

Разработана толстопленочная технология изготовления на кварцевой подложке резонаторов на объемных акустических волнах (Film Bulk Acoustic wave Resonator – FBAR) сантиметрового диапазона [34]. Трехслойный резонатор состоит из пленки пьезоэлектрического материала (например, нитрида алюминия), заключенной между электродами (рис.8). Добротность резонатора FBAR-типа составляет около 1000, а резонансная частота может лежать в пределах от 1,5 до 7,5 ГГц.

Наиболее высокие значения резонансной частоты достигаются в конструкциях, в которых металлический диск

или кольцо расположено внутри полости и обеспечено его возбуждение на радиальной моде.

УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ МЭМС-КОМПОНЕНТОВ

Известны самые разнообразные конструкции генераторов, выполняемых на основе МЭМС-резонаторов (рис.9). Автогенераторы, частота которых стабилизирована по МЭМС-резонатору, отличаются пониженным уровнем спектральной плотности мощности собственного фазового шума (СПМ ФШ) при больших отстройках. Собственная СПМ ФШ интегрального генератора на частоту 33 ГГц [35], в котором используется МЭМС-резонатор, составляет -113 дБмВт/Гц при отстройке на 1 МГц. Для МЭМС-генератора на частоту 900 МГц при отстройке на 3 МГц уровень собственной СПМ ФШ составляет -194 дБн/Гц, тогда как СПМ ФШ такого же генератора с LC-контуром равна -136 дБн/Гц.

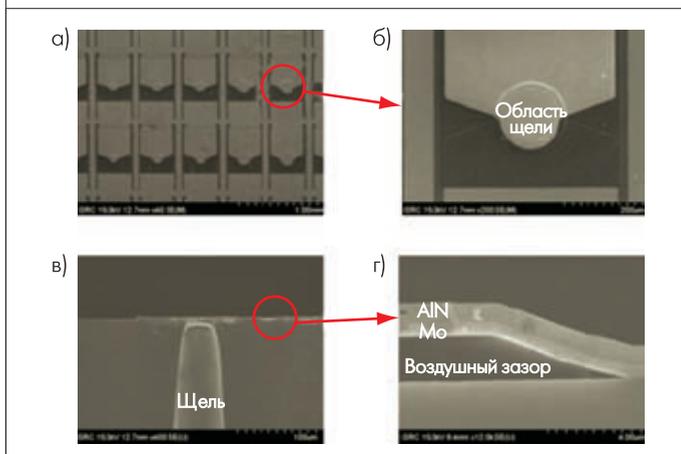


Рис.8. Микрофотографии: структуры резонатора на объемных поверхностных акустических волнах на частоту 1,9 ГГц (а); отдельного элемента с энергетической щелью (б); расположения энергетической щели (в); структуры энергетической щели (г)

Ряд фирм выпускают серийные МЭМС-автогенераторы на диапазон частот 1–200 МГц, способные заменить опорные генераторы с кварцевыми резонаторами. Так, компания Vectron [21] (известный производитель устройств стабилизации частоты на кварцевых и ПАВ-резонаторах) совместно с фирмой Discera [20] в 2007 году выпустила опорные МЭМС-генераторы серии MOS1, не уступающие кварцевым по относительной нестабильности частоты ($\pm 5 \cdot 10^{-5}$). При этом МЭМС-генераторы значительно превосходят кварцевые по граничной частоте (до 125 МГц), показателю старения номинала частоты ($1 \cdot 10^{-6}$ /год), температурной устойчивости и времени выхода на рабочий режим после включения (5 мкс). В некоторых моделях тактовых МЭМС-генераторов компании Vectron предусмотрен режим внутренней частотной модуляции по треугольному закону [36] с девиацией до 2%, что способствует повышению информационной защищенности цифровых устройств с тактовыми МЭМС-генераторами.

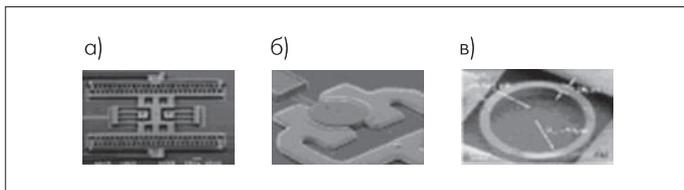


Рис.9. МЭМС-генераторы: а) тактовый с вибрационным резонатором, $f = 1$ кГц–1 МГц; б) опорный с алмазным диском, $f = 20$ –1500 МГц, $Q = 98$ тыс.; в) радиочастотный с кольцевым резонатором, $f = 100$ МГц–5 ГГц, $Q = 2$ тыс.

С помощью МЭМС-технологии успешно реализуются и различные типы линий передачи – микрополосковые; копланарные экранированные; копланарные волноводы, формируемые путем стравливания верхнего слоя линии; МЭМС-волноводы.

Микрополосковая линия располагается на тонкой диэлектрической мембране, выполненной из материала с близкой к единице относительной диэлектрической проницаемостью. За счет уменьшения толщины подложки в результате травления ее с обратной стороны уменьшается емкость линии относительно земли. Копланарная МЭМС-линия экранирует паразитные излучения в свободное пространство благодаря включению в ее верхний слой специальных заземленных проводников, которые в совокупности образуют соединение типа "земля–линия–земля". Стравливание верхнего слоя копланарного волновода позволяет избежать проблем, возникающих при травлении подложки с обратной ее стороны и изготовления экранирующих линий. Волноводы этого типа с существующим углублением в слое металлизации пассивируются сверху, в результате чего под пассивирующим слоем находится заполненное воздухом углубление.

Перестраиваемые МЭМС-компоненты обеспечивают согласование частотных характеристик усилителей в чрезвычайно широкой полосе частот (рис.10). В большом числе работ, посвященных РЧ МЭМС, рассматриваются вопросы их применения при создании фазированных антенных решеток (рис.11)

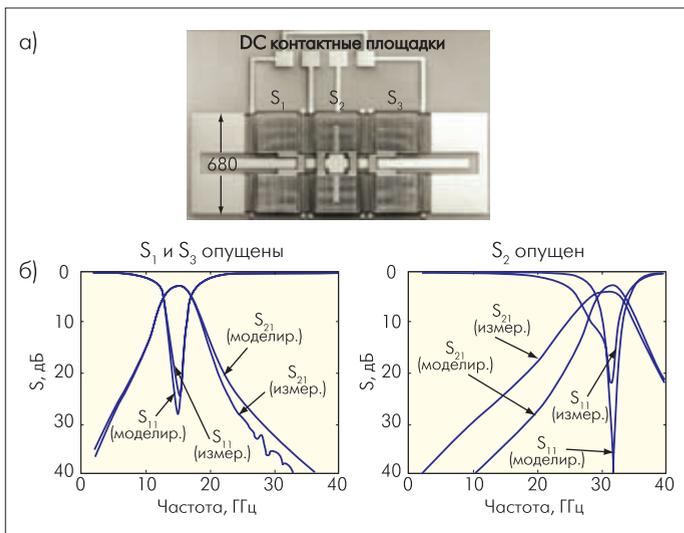


Рис.10. Микрофотография перестраиваемого МЭМС-фильтра (а) и его частотные характеристики (б)

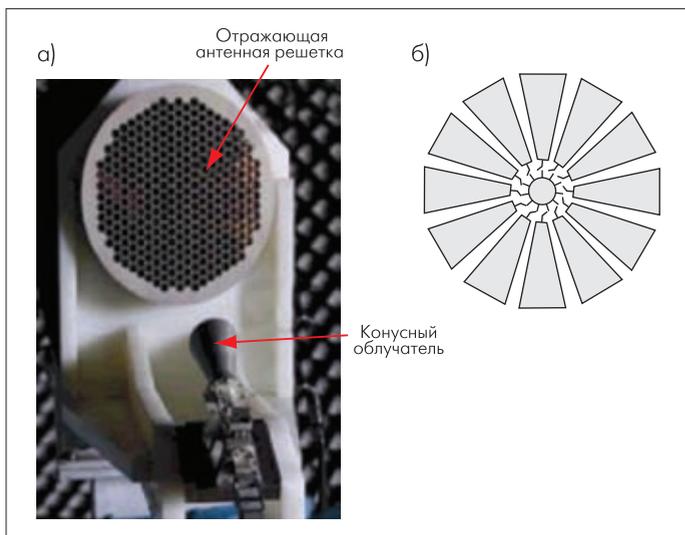


Рис. 11. Перестраиваемая с помощью МЭМС-ключей отражающая антенная решетка 6-ГГц диапазона (а) и единичная ячейка (б)

на диапазон частот 35–90 ГГц [38–39]. Для управления положением главного лепестка диаграммы направленности с той или иной поляризацией и настройки на нужную рабочую частоту применяются различные МЭМС-коммутационные схемы, матрицы с емкостными ключами, управляемые МЭМС-фазовращатели и линии задержки. Число МЭМС-элементов в такой конструкции может достигать нескольких тысяч.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЭМС-УЗЛОВ

Особенность РЧ МЭМС-компонентов состоит в чрезвычайно малых расстояниях между проводниками, несущими СВЧ-сигнал, в необходимости тщательного учета механических и электрофизических свойств используемых материалов, в теснейшей связи трехмерной конструкции с технологическими возможностями ее изготовления, в необходимости учета множества параметров электродинамического взаимодействия близко расположенных узлов и проводников. Поэтому роль специализированного программного обеспечения средств разработки МЭМС-узлов нельзя недооценивать. Наиболее известные программные пакеты проектирования РЧ МЭМС-устройств (COVENTOR [40], VeloceRF, ANSYS, SUGAR,

FEMLAB, Momentum ADS [41], CST Microwave Studio) поддерживают анализ электростатических эффектов в двух- и трехмерной неоднородной среде с потерями, расчет термомеханических параметров и переходных процессов с учетом гистерезиса, тепловых деформаций, упругих эффектов; эффектов, связанных с упаковкой изделия в корпус; перерасчет явлений от уровня электромагнитных полей до уровня искажений формы сигналов и обратно, а также трехмерный электродинамический анализ полей в неоднородной среде с потерями. В пакеты обычно входит модуль разработки структурных и принципиальных схем с использованием поведенческих моделей электромеханических и СВЧ-устройств, а также типовых радиоэлементов. Разумеется, необходимы также библиотеки параметров материалов; редакторы послойного описания топологии двумерных подистем и объединения их в трехмерную структуру; эмулятор доступных технологических процессов с вводом множества его параметров; модуль визуализации результатов. Проектирование МЭМС-узла "с нуля" в среднем занимает около семи дней. Уточняющие итерации потребуют еще от нескольких минут до нескольких дней. При таком подходе полный цикл проектирования устройства на основе МЭМС-узла занимает около трех месяцев.

В мире активно ведутся исследования оптимальных вариантов конструкций РЧ МЭМС-устройств, расширяется их серийный выпуск. Прорабатываются технические решения для МЭМС-источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Для получения приемлемых результатов необходим высокий уровень технологического обеспечения (включая средства высокопрофильного формирования РЧ МЭМС-структур) и мощные системы автоматизированного проектирования. Основной тенденцией развития этого сегмента рынка является постепенный переход от выпуска навесных МЭМС-компонентов к разработке заказных систем на кристалле и интегральных приемопередающих и антенных устройств на рабочие частоты 20–90 ГГц. Вопросы приобретения МЭМС-изделий можно решить с помощью компании РАДИОКОМП [42].

ЛИТЕРАТУРА

1. Варадан В., Виной К, Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. — М.: Техносфера, 2004, 528 с.
2. Los Santos H.J., de. RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications. — Artech House, 2003.
3. Rebeiz G. RF MEMS: Theory, Design and Technology. — Wiley/IEEE Press, 2003.
4. Л. Белов, Житникова М. Микроэлектромеханические компоненты радиочастотного диапазона.— ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, №8, с.18–25.
5. www.amicom.info
6. www-bsac.eecs.berkeley.edu/programs/sige_mems_cmos.html



7. www.dbanks.demon.co.uk/ueng
8. www.epfl.ch
9. www.tronics-mst.com/apps/rf_mems.html
10. www-g.eng.cam.ac.uk/epec/WIDERF/default.htm
11. www.mems.louisville.edu/memsinternet/mems.htm
12. www.electronicproducts.com/passives.asp
13. www.memx.com
14. www.memscap.com
15. www.tanner.com/Labs/mems
16. www.radantmems.com
17. www.teravicta.com
18. www.wispry.com
19. www.sitime.com
20. www.discera.com
21. www.vectron.com
22. www.ecliptek.com
23. www.dowkey.com
24. www.rfmd.com
25. www.helic.com
26. www.microsystems.ru
27. **Wittwer J.W., Baker M.S. and Howell L.L.** Simulation, Measurement, and Mitigation of Non-Ideal Thermal Microactuator Performance, 2006. – Sensors and Actuators, A: Physical, v.128, N 2, p. 395–401.
28. **Kuwabara K., Urano M., Kodate J. et al.** Novel Structure and Fabrication Process for Integrated RF Microelectromechanical-System Technology. – JJAP, 2006, v.45, N.9A, p.6849–6853.
29. **Abbaspour-Sani E., Afrang S.** A low voltage MEMS structure for RF Capacitive Switches– Urmia, Iran, Progress in Electromagnetic Research. 2006, v. 65, p.17–167.
30. **Lázaro A, Girbau D., Pradell L.** Distortion produced by RF MEMS varactors on digital communication signals. – JOHN WILEY & SONS INC, Microwave and optical technology letters, 2006, v.48, N.2, p. 246–249.
31. **Jackson B.R.** Microwave Modulators using MEMS Devices. Diss, Kingston's University, Ontario, Canada. Sept., 2005. <http://qmlink.queensu.ca/~8brj/Files/MScThesis.pdf>
32. **Chen C.-H., Peroulis D.** Liquid RF MEMS Wideband Reflective and Absorptive Switch.— IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Dec., 2007, v.12, part.2, p. 2919-2929.
33. www.microsystem.re.kr/data/tech/M1C06-CDK2-Rev2.pdf
34. **Olsson R. H., Fleming J. G., El-Kady I. F. et al.** Micromachined Bulk Wave Acoustic Bandgap Devices. – International Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, June 2007, p.317–321.
35. **Smart K. J., Olsson R. H., Heine D. R. and Fleming J. G.** Frequency Agile Radios Using MEMS Resonators. – Govt. Microcircuit App. and Critical Tech. Conf., March 2007, p.409–412.
36. **Белов Л.** Опорные генераторы.— ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, №6, стр. 38–44.
37. **Vähä-Heikkilä T., Caekenberghe K. V., Varis J. et al.** RF MEMS Impedance Tuners for 6–24 GHz. – International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, May 2007, v.17, N 3, p. 265–278.
38. **Lakshminarayanan B. and Weller T. M.** Design and Modeling of 4-Bit Slow-Wave MEMS Phase Shifters. – IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Jan. 2006, v.54, N 1, p.120–127.
39. **Van Caekenberghe K. et al.** Ka-Band RF MEMS TTD Passive Electronically Scanned Array. – IEEE AP-S Dig., Jul. 2006.
40. www.coventor.com
41. **Д. Макклернон** САПР СВЧ-устройств Genesys компании Agilent.— ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №7, с. 94–97.
42. www.radiocomp.net