

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Сейчас в мире стремительно развиваются нанотехнологии и микроэлектромеханические системы (МЭМС, MicroElectroMechanical Systems – MEMS). Освоено массовое производство гироскопических датчиков для автомобильных систем навигации и безопасности. Совершенствуются устройства подачи чернил для струйных принтеров. Вскоре на рынке появятся новейшие микроминиатюрные электродвигатели и топливные элементы, в том числе для высокоэкономичного электропитания приборов мобильной связи нового поколения и сверхминиатюрных летательных аппаратов видеонаблюдения. Радиочастотные компоненты электронной аппаратуры, создаваемые по этой технологии, характеризуются малыми потерями, высокой изоляцией между выводами, чрезвычайно высокой линейностью, повышенным удельным уровнем мощности. Они перспективны для дальнейшей микроминиатюризации оборудования и освоения субмиллиметрового диапазона длин волн. Каково современное состояние и перспективы развития таких узлов и радиосистем на их основе?

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ РАДИОЧАСТОТНЫХ УЗЛОВ

Микроэлектромеханические системы – сравнительно новый класс высокотехнологичных устройств с размерами активной зоны 10–1 мкм. Ранее чаще всего такие узлы находили применение в микрофонах, датчиках ускорений и перемещений, устройствах цифровой памяти и печати. В последние годы на

Л.Белов, М.Житникова

мировом рынке появились и радиочастотные МЭМС-узлы: сверхминиатюрные переключатели СВЧ-сигналов с низкими потерями и высоким уровнем линейности [1–3], перестраиваемые конденсаторы, индуктивности, фильтры, резонаторы, генераторы [4–6], элементы антенных решеток и систем [7–9]. Новые компоненты позволили уменьшить габариты аппаратуры, освоить субмиллиметровый диапазон, повысить качественные показатели и расширить функциональные возможности средств мобильной связи, узлов космической аппаратуры.

Сегодня существуют три основных метода микрообработки для изготовления МЭМС-узлов, в том числе и радиочастотных [10, 11]. Это – объемная, поверхностная и высокопрофильная микрообработка. Объемная микрообработка заключается в удалении материала подложки (как правило, кремния) для формирования требуемой структуры, состоящей из гибких консолей (кантилеверов), отверстий, канавок и мембран. Материал удаляют с помощью изотропного (для формирования закругленных углублений), анизотропного (для получения V-образных канавок, пирамид и выемок) или глубокого ионного травления (для создания прямоугольных карманов). На рис.1 показан пример экспериментального емкостного ключа [9, 10] для сигналов с частотой 35–40 ГГц, разработанного Гольдсмитом [10] в 1998 году. Копланарный волновод шириной 120 мкм и толщиной 4 мкм образует вход и выход (см. рис.1б) ключа. Над его сигнальной линией с зазором 80 мкм расположена алюминиевая мембрана

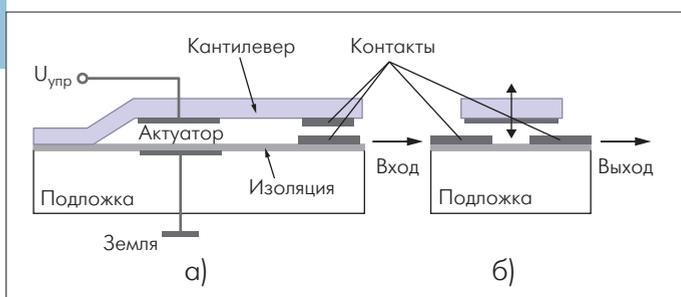


Рис.1. Вид контактного МЭМС-ключа сбоку (а) и в сечении по контактам (б)



(канти-левер) толщиной 0,5 мкм. Мембрана характеризуется высокой проводимостью для радиочастотных сигналов и хорошими механическими характеристиками. Центральный электрод обеспечивает подачу управляющего сигнала, а также служит обкладкой конденсатора, образуемого сигнальной линией и плоскостью заземления. Чтобы предотвратить прямое замыкание волноводного тракта и передачу управляющего сигнала на землю при замыкании ключа, на этот электрод наносится тонкий диэлектрический слой. Поверхность центрального электрода полируется для получения равномерного зазора между электродом и мембраной. Для уменьшения силы выдавливания пленки воздухом и облегчения процесса удаления защитного полимерного слоя, поверх которого наносилась мембрана, на ее поверхности сформированы отверстия диаметром 2 мкм. После удаления полимера мембрана может перемещаться вверх и вниз под воздействием управляющего электростатического поля.

Поверхностная микрообработка – процесс последовательного осаждения на подложку структурных (как правило, кремниевых) и "жертвенных" (как правило, диоксид кремния, нитрид кремния или полимер) слоев. В структурных слоях методами фотолитографии создается рисунок поперечного сечения формируемого узла. Затем с помощью жидкостного или сухого травления "жертвенный" слой удаляется. В результате между механическими элементами узла образуются зазоры и пустоты. Толщина трехмерной конструкции такого типа составляет 10–50 мкм, высота зазоров – 10–30 мкм. Таким же образом формируются выступающие элементы (зубцы передающего механизма, пальцы гребенчатой структуры, консоли, мембраны).

Цель высокопрофильной микрообработки – получение большого отношения высоты профиля к его ширине. Для это-

го используются методы фото- и рентгенолитографии, электроосаждение и формование. Дополнительные сведения об особенностях МЭМС-технологии можно найти в [11].

РАДИОЧАСТОТНЫЕ МЭМС-КЛЮЧИ

Радиочастотные МЭМС-ключи имеют следующие преимущества по сравнению с такими узлами на р-и-п-диодах или полевых транзисторах [12]:

- цифровое управление при расширенных функциональных возможностях;
- малая потребляемая мощность цепи управления (порядка единиц микроватт);
- малые потери в замкнутом состоянии;
- значительно меньшая емкость и, соответственно, лучшая развязка в разомкнутом состоянии;
- ничтожные нелинейные искажения проходящего сигнала;
- высокая стойкость к проникающей радиации;
- более широкий диапазон рабочих температур.

Радиочастотные МЭМС-ключи могут быть двух типов: контактные и емкостные. В контактном ключе при подаче управляющего сигнала подвижный контакт мембраны (кантилевера) соединяется с неподвижной контактной площадкой на подложке. Обычно контактные площадки выполняются из золота, их толщина равна примерно 0,3 мкм, радиус – около 1 мкм. Уменьшение размеров кантилевера приводит к расширению полосы пропускаемых частот, уменьшению перемещаемой массы и к сокращению длительности процесса изменения состояния. Однако при этом снижается значение допустимого тока через контакт, превышение которого может привести к деградации характеристик переключателя после определенного числа циклов замыкания-размыкания. На рис.2 представлена схема контактного МЭМС-ключа типа

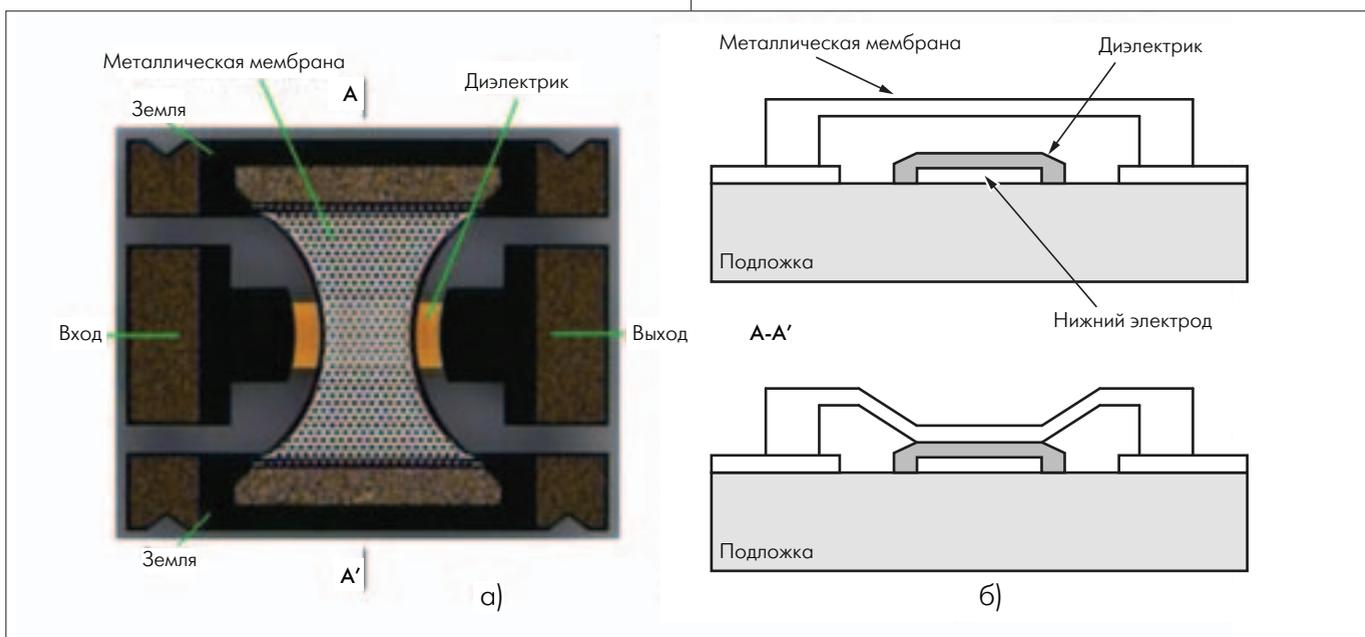


Рис.2. Внешний вид мембранного ключа (а) и сечения по линии А-А', показывающие положение мембраны в разомкнутом (б) и замкнутом (в) состояниях ключа

Таблица 1. Характеристики серийных радиочастотных МЭМС-ключей

Фирма (сайт), модель	Особенность	Диапазон частот, ГГц	I_L/I_{so} на 1 ГГц, дБ	$t_{вкл}/t_{выкл}$, мкс	$V_{упр}$, В	Габариты, мм
WiSpry (www.wispry.com) WSS0114H	SP4T	0–6	0,23/50	50/10	35	4 · 4 · 1
TeraVista (www.teravista.com) TTM1X2TS	SPDT	0–6	0,1/60	70/10	5	2,1 · 1,67 · 0,56
Radiant MEMS (www.radantmems.com) RMSW220D	SPDT	0–20	0,3/32	3/5	±40	1,5 · 1,5 · 0,6

Примечание. I_L – коэффициент потерь в замкнутом состоянии; I_{so} – коэффициент развязки в разомкнутом состоянии; $t_{вкл}$ и $t_{выкл}$ – длительность процесса замыкания и размыкания, соответственно; $V_{упр}$ – управляющее напряжение.

SPST, изготовленного методом поверхностной микрообработки [10]. Мембрана емкостного ключа в разомкнутом состоянии удерживается упругими силами над сигнальной линией. В результате значение емкости между контактами этой модели составляет 47 фФ, а затухание сигнала на частоте 40 ГГц – 50 дБ. При подаче управляющего напряжения на центральный электрод мембрана за счет электростатической силы притягивается к диэлектрическому слою, нанесенному на поверхность центрального электрода. При этом значение емкости возрастает до 2,5 пФ, а затухание сигнала снижается до 0,1 дБ.

Для стабилизации значения коэффициента отражения используют комбинированные SPDT переключатели [12], в которых второй синхронно перемещающийся контакт подключает к размыкаемой линии резистор с сопротивлением, равным волновому сопротивлению линии.

В представленных на рынке МЭМС-ключах используются разные механизмы управления положением кантилевера: электростатический [1–3], магнитостатический [2], пьезоэлектрический, электротермический. В ключах с электростатическим управлением, простых в изготовлении, используется притяжение двух противоположных зарядов. Однако напряжение в импульсе переключения может достигать нескольких десятков вольт. При магнитостатическом управлении замыкание и размыкание ключа производится за счет изменения магнитного поля. Этот метод требует значительно меньших значений управляющего напряжения. Однако в кон-

струкции мембраны необходимо использовать магнитные материалы, а также обеспечивать управление напряженностью магнитного поля. Важное достоинство электростатического и магнитостатического управления состоит в том, что энергия в цепи управления тратится только в процессе переключения, а разомкнутое или замкнутое состояние удерживается за счет внутренних упругих сил. В ключах с пьезоэлектрическим управлением [8] перемещение обеспечивается материалом с пьезоэффектом, а при электротермическом управлении [9] применяются материалы с различными значениями коэффициента теплового расширения.

Радиочастотные МЭМС-ключи успешно конкурируют с узлами того же назначения на диодах или арсенидгаллиевых полевых транзисторах по таким параметрам, как потери в замкнутом состоянии (например, 0,1 дБ для МЭМС-ключа и 0,4 дБ для MESFET-транзистора) и развязка в разомкнутом состоянии (40 и 24 дБ, соответственно) [13]. МЭМС-ключи обеспечивают уровень неискаженной мощности проходящего сигнала до 43 дБмВт в непрерывном режиме, что, по меньшей мере, на 10 дБ больше, чем транзисторные или диодные ключи. Нелинейные искажения сигнала, проходящего через ключ, очень малы: типовое значение проходящей мощности в точке IP3 составляет 70 дБмВт. Износостойкость хорошего МЭМС-ключа превышает 10^{10} циклов замыкания-размыкания при токе 2 мА, 1000 циклов при токе 20 мА и 10 циклов при токе 300 мА [13]. При токе порядка 1 А ключ разрушается. Длительность процессов включения и выключения для МЭМС-ключей (порядка единиц микросекунд) примерно в 10^3 раз больше, чем для подобных MESFET-компонентов, но в 100–1000 раз меньше, чем для электромеханических коммутаторов радиосигналов таких же частот.

В табл.1 представлены технические характеристики некоторых серийно выпускаемых радиочастотных МЭМС-ключей. Сведения о характеристиках других моделей можно найти в [12]. Отметим, что фирмой Radant MEMS Inc. серийно выпускаются такого рода коммутаторы для сигналов с частотой до 40 ГГц [1]. В мае 2006 года компания TeraVista Technologies Inc. выпустила неотражающий SPDT-коммутатор модели TTM1X2TS (рис.3а) для сигналов с частотой 0–6 ГГц, рассчитанный на пиковую мощность до 30 Вт. Уровень мощности неискаженного сигнала $P_{1дБ}$ для него составляет 47 дБмВт на частоте 2,4 ГГц. Коммутатор потребляет по цепи электропитания 1 мА при напряжении 3 В и выдерживает 25 млн. циклов переключения при СВЧ-мощности 15 Вт. Диапазон рабочих температур – 0...70°C. Испытания радиочастотных ключей производятся с помощью калибровочных плат (рис.3 б).

МЭМС-КОНДЕНСАТОРЫ И ИНДУКТИВНОСТИ

Для создания малогабаритных широкополосных СВЧ-схем необходимы сверхминиатюрные элементы с сосредоточенными параметрами, резонанс которых не наступает вплоть до

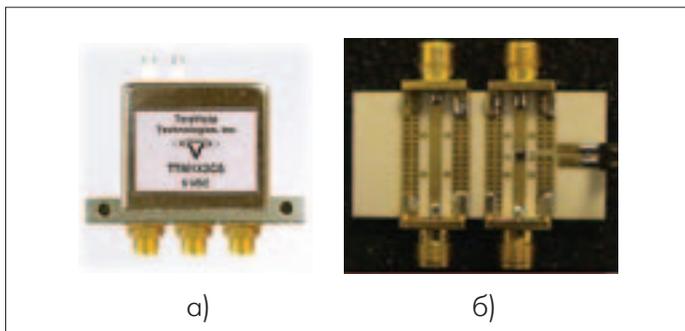


Рис.3. Внешний вид неотражающего переключателя TTM1X2TS (а) и плата RMSW220D-EV для испытания переключателей (б)

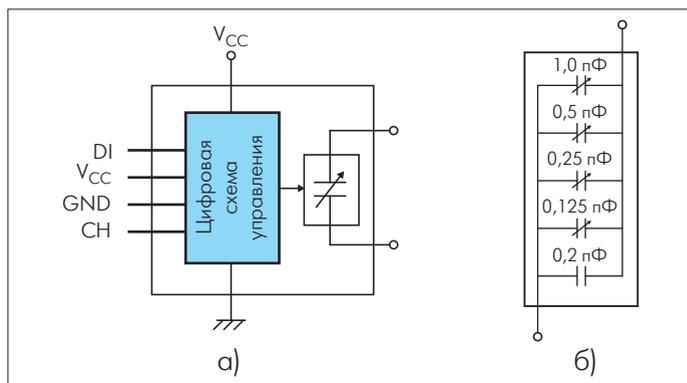


Рис.4. Электрическая схема (а) и блок-схема (б) МЭМС-конденсатора WSC002L с емкостью, изменяемой в пределах 0,2–2 пФ с шагом 0,125 пФ

субмиллиметрового диапазона длин волн. К серийно выпускаемым изделиям подобного типа относятся МЭМС-индуктивности и МЭМС-конденсаторы с фиксированными или переключаемыми параметрами (их в некоторых англоязычных источниках неудачно называют варикапами или варакторами). В табл.2 приведены параметры серии перестраиваемых конденсаторов серии WSC00xx компании WiSpry – ведущего поставщика перестраиваемых кремниевых ВЧ-устройств. Емкость конденсаторов изменяется в пределах от 1 до 20 пФ с шагом 1 или 2 пФ [3]. Электрическая схема такого коммутируемого конденсатора модели WSC002L представлена на рис.4. Пять коммутируемых элементов конденсатора обеспечивают изменение емкости от 0,2 до 2 пФ (соотношение $C_{max}/C_{min} = 10:1$) с шагом 0,125 пФ. Добротность конденсатора составляет примерно 100 на частоте 2 ГГц. Собственная резонансная частота превышает 5 ГГц. Управляющее напряжение равно 2,3–5 В; диапазон рабочих температур -40...85°C. Встроенная схема управления позволяет использовать такой узел в составе управляемых по частоте генераторов, фильтров, усилителей, модуляторов или антенных фазовращателей.

В плавно управляемых конденсаторах регулировка емкости осуществляется за счет изменения либо ширины зазора, либо площади его гребенчатой структуры [8]. В перестраиваемом конденсаторе с электростатической регулировкой зазора нижний электрод закреплен на подложке, а подвешенный над ним верхний электрод толщиной 1 мкм поддерживается четырьмя микропружинами и может перемещаться по нормали к ней [14]. Максимальный (исходный) зазор между фиксированным и подвижным электродами составляет 1,5 мкм. Его ширина регулируется за счет электростатических сил. При изменении управляющего напряжения от 0 до 5,5 В значение емкости меняется от 2,11 до 2,46 пФ. При отклонении

Таблица 2. Характеристики переменных МЭМС-конденсаторов фирмы WiSpry

Модель	Емкость, пФ	Добротность на частоте 2 ГГц	Резонансная частота, ГГц	C_{max}/C_{min}	Управляющее напряжение, В	Рабочая температура, °С
WSC001L	1	100	>5	10:1	2,3-5,0	-40...85
WSC002L	2	100	>5	10:1	2,3-5,0	-40...85

Таблица 3. Параметры МЭМС-индуктивностей [12]

Параметр	Технология микрообработки			
	Объемная		Поверхностная	
L, нГн	1,8	12	1,4	10
Q_{max}	20,2	13,3	70	5,5
f_{Qmax} , ГГц	14,5	7,7	6	1,2
$f_{рез}$, ГГц	25,6	13,4	20	6
Число витков	3,5	11	1,5	2,5
Габариты, мкм	150-150	230-230	330-330	310-310
Сопротивление подложки, Ом/см	2000	GaAs	1-30	20
Зазор, мкм	20	42	50	10

верхнего электрода менее чем на 1/3 от первоначального зазора между силами электростатического притяжения и упругости микропружин устанавливается равновесие. Поэтому диапазон плавной регулировки ширины зазора не превышает 2/3 от среднего значения.

В перестраиваемом МЭМС-конденсаторе с гребенчатой структурой одна из гребенок стационарная, а вторая подвижная (рис.5) [3]. При подаче управляющего напряжения электростатические силы заставляют подвижную гребенку перемещаться относительно неподвижной. В результате площадь перекрытия изменяется, а ширина зазора между гребенками остается неизменной. Такая структура перспективна для построения емкостных микропереключателей и перестраиваемых конденсаторов, работающих в диапазоне частот 2–45 ГГц. В перестраиваемом микроконденсаторе с такой структурой, разработанном в Калифорнийском университете в Сан-Диего, при изменении напряжения смещения в пределах 80–200 В значение емкости изменяется от 35 до 100 фФ [15]. Основное достоинство гребенчатой структуры – возможность перестройки емкости в широких пределах.

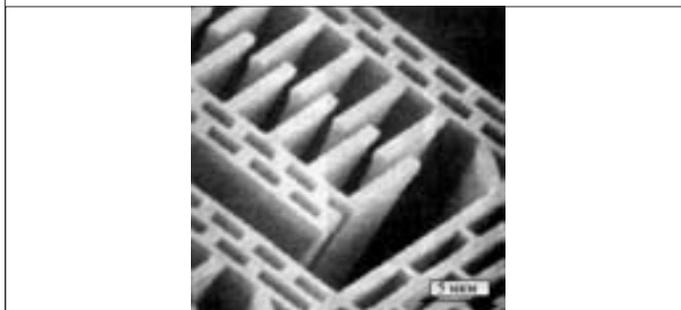


Рис.5. Перестраиваемый МЭМС-конденсатор с гребенчатой структурой (фотография, полученная с помощью электронного микроскопа)

На современном рынке представлены различные конструктивные варианты МЭМС-индуктивностей (табл.3). Обзор и сопоставление вариантов конструкций индуктивных элементов дан в [9]. В работе описана изготовленная по технологии поверхностной обработки спиральная катушка, подвешенная над кремниевой подложкой на высоте около 60 мкм. В другой конструкции спиральная катушка, выполненная по технологии объемной микрообработки, размещается на поверхности подложки, и находящаяся под ней область удаляется, образуя зазор. Наиболее высокие значения добротности и резо-

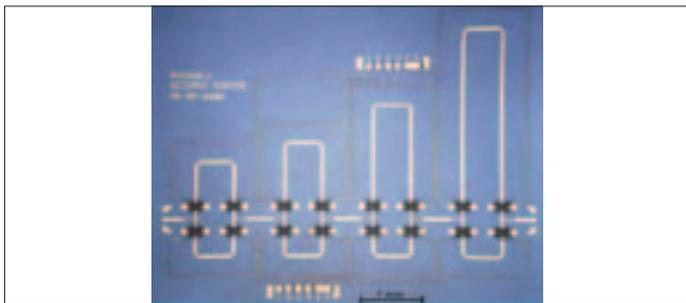


Рис.6. Линия задержки сигнала миллиметрового диапазона с четырех-разрядным управлением МЭМС-ключами

нансной частоты получены для объемного соленоида с ленточными витками в виде меандра со сторонами 30·30 мкм и высотой около 100 мкм [8].

Интересна конструкция МЭМС-индуктивности, выполненной в виде тора диаметром около 100 мкм с 20 прямоугольными витками высотой 10 мкм [8].

Качество подложки существенным образом влияет на добротность индуктивности Q_L и ее резонансную частоту $f_{рез}$. Для индуктивностей с воздушным зазором шириной 20 мкм измеренные значения добротности достигают 7 при резонансной частоте 18,6 ГГц. Для подобных узлов, изготовленных на высокоомной кремниевой подложке, добротность равна 20,2 при резонансной частоте 25,6 ГГц [9].

Управляемые МЭМС-индуктивности выполняются на основе двух параллельно включенных катушек [9]. Одна из них размещена на неподвижной подложке, а другая – на термоуправляемом подвижном актуаторе. Диапазон изменения индуктивности в предварительных экспериментах составил примерно 13% в полосе частот 2–5 ГГц.

На основе рассмотренных базовых компонентов с сосредоточенными параметрами (ключи, индуктивности и емкости) разрабатываются переключаемые и перестраиваемые частотные фильтры [14].

АНТЕННЫЕ МЭМС-КОМПОНЕНТЫ

Интерес к микроэлектромеханическим антенным компонентам определяется потребностью в компактных антенных переключателях режимов передачи и приема (дуплексерах) для

Таблица 4. Параметры МЭМС-линий задержки [12]

Авторы, год опубликования	Тип УЛЗ	Полоса частот, ГГц	Потери, дБ	D_j , град.	$V_{упр}$, В	Габариты, мм ²
Tan et al., 2002	МПЛ	8–12	0,6	0	–	3x4
Hayden et al., 2003	РЕ	1–40	1,5	10	20	8,4·2,1
Kim et al., 2002	РЕ	40–70	3	15	15	6,3·1,2
Shafai et al., 2004	ИК	3–32	1,3	32	100	–

Примечание. D_j – отклонение фазочастотной характеристики от линейной зависимости в пределах полосы пропускания; $V_{упр}$ – наибольшее напряжение управления; МПЛ – коммутируемая микрополосковая линия; РЕ – регулируемая емкость; ИК – изменяемая конфигурация.

аппаратов мобильной радиосвязи. Повысились требования к пространственной селективности и скорости электронного управления параметрами диаграммы направленности антенных решеток. И, наконец, значительно возросла потребность в микроминиатюрных антеннах для мобильных устройств связи с перестройкой частотных каналов*.

В режиме передачи через МЭМС-переключатель проходит большой ток сигнала, что может привести к перегреву контактов и последующему выходу переключателя из строя. Поэтому изготовители ключа в технической документации указывают наибольшую допустимую мощность передаваемого сигнала. В МЭМС-дуплексерах используются переключатели с повышенной до 45–50 дБмВт допустимой мощностью [14].

Чтобы изменить форму и положение в пространстве диаграммы направленности многоэлементной антенны при сверхширокой полосе частот излучаемого или принимаемого сигнала, в каждом элементе антенной решетки фазовращатель следует заменить управляемой линией задержки (УЛЗ). МЭМС-технология открывает новые возможности создания таких узлов. Существует несколько схем организации УЛЗ на основе МЭМС-элементов [16]. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах эффективное управление задержкой осуществляется изменением погонной емкости линии передачи. Созданы МЭМС УЛЗ с переконфигурируемой в динамическом режиме структурой линии. Цифровое управление задержкой обеспечивает схема с коммутацией отрезков микрополосковых линий (рис.6). В табл.4 представлены выборочные данные по УЛЗ, выполненным по МЭМС-технологии.

По сравнению с управляющими антенными элементами на базе р-і-п-диодов и полевых GaAs-транзисторов, антенные МЭМС-компоненты обеспечивают более высокий на 8–10 дБ уровень ВЧ-мощности и меньший уровень нелинейных искажений. Упрощение технических решений по управлению положением максимума диаграммы направленности и ее минимумов в побочных направлениях, а также по управлению поляризационными параметрами антенн позволяют дополнительно повысить пространственную фильтрацию. Ведущий поставщик МЭМС-дуплексеров – фирма Agilent Technologies.

Фирма Radant MEMS Inc. совместно с Lockheed Martin в 2006 году продемонстрировала бортовую антенну радиолокационной станции с электронным сканированием X-диапазона [17]. Эта антенна площадью 0,4 м² содержит 25 тыс. МЭМС-элементов и подсоединена к приемо-передающей аппаратуре, в которой ранее предусматривалось механическое сканирование. Электронное сканирование осуществлялось в секторе углов до 120 градусов при полосе пропускания 1 ГГц в диапазоне 7–8 ГГц.

МЭМС-технология открывает новые возможности разработки зеркальных антенн с управляемой диаграммой направленности. На основе матрицы МЭМС-микрзеркал разрабо-

* В. Слюсар. Многодиапазонные антенны мобильных средств связи. – Наст. номер, с.90.



тан оптический МЭМС-переключатель для перспективных фотонных сетей [8].

МЭМС-ГЕНЕРАТОРЫ

МЭМС-технология применяется и для создания вибрирующих колебательных систем, используемых для формирования колебаний со стабильной частотой. Здесь особо интересны поликремниевые резонаторы, изготавливаемые по стандартной полупроводниковой технологии. В управляемых по частоте генераторах с диэлектрическими резонаторами широко используются перестраиваемые МЭМС-индуктивности или емкости. В табл.5 представлены параметры некоторых моделей МЭМС-генераторов.

Специалисты Мичиганского университета разработали колебательные поликремниевые микромеханические кольцевые резонаторы в форме бокала [7]. Их достоинство – меньший, чем у обычных диэлектрических резонаторов, импеданс. Была продемонстрирована работа таких резонаторов на частоте 828 МГц. При этом их добротность превысила 2200 как в воздухе, так и в вакууме. На частоте 426 МГц измеренная добротность в вакууме достигла 7700. А в лаборатории твердотельной электроники (Solid-State Electronics Laboratory, SSEL) при Мичиганском университете создан МЭМС-резонатор на поликристаллическом искусственном алмазе с самосовмещенной поликремниевой ножкой (stem). Его производство добротности на частоту составляет $1,74 \cdot 10^{13}$ Гц [21]. Это больше, чем у лучших кварцевых резонаторов ($1 \cdot 10^{13}$ Гц) [18].

Таблица 5. Характеристики МЭМС-генераторов

Компания (сайт) Модель	f, МГц	V _y , В	Габариты, мм
Ecliptek (www.ecliptek.com) EMK11	1–125	1,8	0,85·7·5
Ecliptek (www.ecliptek.com) EMK43	1–125	1,8	2x2,5x0,85
SiTime (www.SiTime.com) SiT8002	1–125	2,5	0,85·3,2·2,5
SiTime (www.SiTime.com) SiT11XX	1–125	3,3	0,85·2,5·2

Весьма перспективны МЭМС-генераторы для замены в портативных системах кварцевых генераторов со средней стабильностью частоты и небольшим сроком службы. Корпорация Discera Micro Communication Technologies [5] начала выпускать генераторы типа MRO-100 на частоту 19,2 МГц, предназначенные для замены кварцевых генераторов в сотовых телефонах, что предполагает массовый объем производства этих устройств.

МЭМС-генераторы с механическими вибрирующими резонаторами выпускаются уже несколько лет. Однако широкого распространения они не получили. Причина – сравнительно высокий температурный коэффициент, равный $30 \cdot 10^{-4} \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, необходимость применения сложных схем температурной компенсации, а также дорогостоящих металлических или ке-

Таблица 6. Характеристики кварцевых, кремниевых МЭМС и MEMS First генераторов

Параметр	Тип резонатора		
	Кварцевый	МЭМС	MEMS First
Размер, мм	2–5	0,3	0,3
Частота, МГц	30	>100	>100
Долговременная стабильность, 10^{-6}	3	30–100	0,05
Компенсированный температурный дрейф, 10^{-6}	1–100	>100	20–100
Добротность	$1-2 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^4-1 \cdot 10^5$	$75 \cdot 10^3$
Ударо/вибропрочность, 10^{-6} при 100 г	$\pm 2-10$	$\pm 0,2-1,0$	Ведутся испытания
Возможность интеграции с КМОП-микросхемами	–	–	+
Корпус	Керамический	Керамический	Пластмассовый

рамических корпусов для их герметизации. Поэтому сообщение компании SiTime Corp. о выпуске кремниевых микросхем МЭМС-генераторов моделей SiT11xx (на фиксированные значения частоты) и SiT8002 (с программируемой частотой) вызвало большой интерес. Генераторы изготовлены по лицензированной у фирмы Bosch технологии MEMS First с 0,18-мкм топологическими нормами [19]. В этих изделиях применяется процесс герметизации эпитаксильно выращенных при температуре 1100°C глубоких (10 мкм) и узких (0,4 мкм) канавок, вытравленных в подложке кремния на изоляторе. Благодаря высокотемпературному процессу герметизации выполняются чрезвычайно чистые безвоздушные выемки, с помощью которых формируются навесные балки резонатора. После полировки поверхности пластина с утопленными резонаторами пригодна для изготовления КМОП-микросхем. Измеренная долговременная относительная нестабильность частоты новых генераторов компании SiTime составляет $0,05 \cdot 10^{-6}$ против $3 \cdot 10^{-6}$ для кварцевых и $100 \cdot 10^{-6}$ для других типов кремниевых МЭМС-генераторов (табл. 6).

Выращенные поверх резонаторов поликремниевые "колпаки" выдерживают развиваемое при формовании пластмассового корпуса давление в 100 атмосфер. Это позволяет монтировать генераторы серий SiT11xx и SiT8002 на частоту от 1 до 125 МГц в стандартные корпуса типа QFN размером 2,0x2,5; 2,5x3,2 и 3,2x5,0 мм (толщина корпуса для всех вариантов – 0,85 мм).



Небезынтересны результаты испытаний интегрального транзисторного генератора, управляемого напряжением, на среднюю частоту 2,6 ГГц, проведенных корейскими специалистами [20]. Частота перестраивалась с помощью МЭМС-индуктивности. Измеренное значение спектральной плотности мощности собственного фазового шума генератора составило -117 дБ/Гц при отстройке на 300 кГц от несущей частоты.

В разработанной в Калифорнийском университете в Беркли маломощной микросхеме приемопередатчика на частоту 1,9 ГГц использованы МЭМС-резонатор и МЭМС-дуплексер. Приемопередатчик изготовлен по 0,13-мкм КМОП-технологии [21]. Мощность излучаемого сигнала составляет 1,6 дБмВт.

В качестве примера рассмотрим характеристики МЭМС-генератора модели ЕМК43 фирмы Ecliptek Corp. (рис.7):

Флуктуационная относительная нестабильность частоты	не более 10^{-4}
Долговременный уход частоты при температуре $\pm 25^{\circ}\text{C}$	не более $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ (за первый год) не более $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ за последующие годы
Выходная частота	1–125 МГц
Напряжение питания	1,8; 2,5; 3,3 В
Потребляемый ток	
в рабочем режиме	не более 25 мА
в ждущем режиме	10 мкА
Диапазон рабочих температур	-40...85 $^{\circ}\text{C}$
Форма выходного сигнала	двух- или трехуровневая
Длительность фронтов	не более 2 нс
Нагрузочная способность	± 8 мА
Время выхода на рабочий режим после включения питания	не более 10 мс
Габариты	$2 \cdot 2,5 \cdot 0,85$ мм

Важное достоинство МЭМС-технологии – возможность изготовления микроэлектромеханических устройств на одном кремниевом кристалле с различными полупроводниковыми приборами по КМОП- и SiGe-технологии, а также на GaAs-, GaN-пластинах и подложках из других материалов.

По мнению многих специалистов, МЭМС-узлы приближают возможность создания следующего поколения радиоэлектронных устройств субмиллиметрового диапазона не за счет



Рис.7. МЭМС-генератор типа ЕМК43

соединения готовых функциональных узлов и компонентов, а путем их выращивания по единой технологии [9].

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ РАДИОЧАСТОТНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Согласно прогнозам, в большинстве новых бытовых электронных приборов и средствах мобильной связи третьего поколения будут использоваться десятки МЭМС-компонентов. По оценкам многих экспертов, к 2008 году 50% аппаратов мобильной связи будут оснащены МЭМС-дуплексерами в сочетании с МЭМС-переключателями частотных диапазонов и соответствующими стандартами информационного обмена систем связи. Предполагается, что мировой объем продаж радиочастотных МЭМС-компонентов возрастет с 126 млн. долл. в 2004 году до 1 млрд. долл. в 2007-м. Считается, что МЭМС-компоненты весьма перспективны для применения в системах оружия с прецизионным наведением, в микроспутниковых системах следующего поколения, выполненных на базе **нанотехнологии**.

Работы по созданию радиочастотных МЭМС-узлов и систем активно ведутся в США и Японии. В Европейском Союзе действует программа стимулирования таких разработок [9]. Не реже одного раза в год проходят научно-технические конференции, посвященные этим вопросам. Выпускаются специализированные научно-технические журналы [7, 9]. На мировой рынок выпущены программные пакеты для автоматизированного проектирования МЭМС-узлов и систем [22].

Лидеры поставки МЭМС-приборов различного назначения – компании Hewlett Packard, Texas Instruments, GE Infrastructure Sensing, Analog Devices, Agilent, Infineon, Radant MEMS. Ряд компонентов, выполненных по этой технологии, поступает на российский рынок. В частности, их можно приобрести на фирме "РАДИОКОМП" [23].

Освоение МЭМС-технологии применительно к радиокомпонентам требует ускоренного развития целого комплекса средств: методов расчета и автоматизированного проектирования микроминиатюрных узлов, высокотехнологичной производственной базы, измерительных систем для контроля качества технологических процессов и средств измерения параметров на частотах 10–40 ГГц и выше. В открытой литературе, посвященной системам на основе радиочастотных МЭМС-узлов, приводятся только общие характеристики без технических подробностей. Поэтому, если в ближайшее время не будут приняты соответствующие организационные усилия и не будут выделены финансовые средства на поддержку разработок в области МЭМС- и нанотехнологии, российские специалисты рискуют остаться сторонними наблюдателями, которые вскоре перестанут понимать проблемы разработчиков микроэлектромеханических устройств и, тем более, приборов, выполненных по нанотехнологии.



ЛИТЕРАТУРА

1. www.radantmems.com.
2. www.teravicta.com.
3. www.wispriy.com.
4. www.sitime.com.
5. www.discera.com.
6. www.ecliptek.com.
7. www.memsjournal.com.
8. Новости МЭМС и нанотехники – www.smalltimes.com.
9. Информационные сети – www.amicom.info;
www.memsnnet.org.
10. **Варадан В., Виной К., Джозе К.** ВЧ МЭМС и их применение – М.: Техносфера, 2004. – 528 с.
11. **Васенков А., Епифанова В., Юдинцев В.** Микроэлектромеханические системы. Настало время выходить в свет. – ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес; 1998, № 5–6, с. 55–59.
12. **Белов Л.** Переключатели сверхвысокочастотных сигналов. – ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес; 2006, № 1, с. 20–25.
13. **Majumder S., Lampen J., Morrison R. and Maciel J.** MEMS Switches. – IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – March 2003, p. 12–15.
14. **Lucyszyn S.** Review of Radio Frequency MEMS Technology. – IEE Proc. – Sci. Meas. Technol., March 2004, v.151, N2, p. 93–103.
15. **Rebeiz G.M.** RF MEMS for low power wireless communications. International Conference on MEMS, NANO and Smart System. 24–27 July 2005. Proc. of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems. p.327–327.
16. Обзор техники УЛЗ МЭМС – www.amicom.info/OpenPlatform/index.php/Delay_lines_and_phase_shifters.
17. Антенная МЭМ-решетка X-диапазона – www.tcen.ru.
18. Low-Power UHF Micromechanical Voltage-Controlled Oscillator (VCO) – www.mnf.umich.edu/SSEL/Projects/index.aspx?mid=5&sid=10&pid=45
19. **Allan R.** Mini CMOS MEMS Oscillator Marks a New Era for Timing. – elecdesign.com/Articles?Print.cfm?ArticleID=12295.
20. **Park E.-Ch., Choi Y.-S., Yoon J.-B.** et al. Fully integrated low phase-noise VCOs with on-chip MEMS inductors, – IEEE Trans., Microwave Theory and Techniques, Vol. 51, № 1, Jan. 2003, p. 289–296.
21. **Otis B.P.** et al. An ultra-low power MEMS-based two-channel transceiver for wireless sensor networks. – In: MEMS 2005, 18th IEEE International Conference on micro electro mechanical systems, p. 20–23.
22. Средства автоматизированного проектирования МЭМС-узлов – www.coventor.com.
23. РАДИОКОМП. Радиокomпоненты мировых производителей – www.radiocomp.ru.