

РАДИОЧАСТОТНЫЕ МЭМС + КМОП ОТРАБОТАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, ГОТОВАЯ К ЧАСУ ПИК

ЧАСТЬ I

В.Шурыгина

Совершенствование полупроводниковой технологии привело к возможности интеграции МЭМС и КМОП-микросхем обработки сигналов для создания систем с расширенными функциональными возможностями. Сегодня уже существуют успешно освоенные в производстве МЭМС/КМОП-устройства: акселерометры компаний Analog Devices и STMicroelectronics, цифровые микрозеркальные устройства (DMD) компании Texas Instruments, герметизированные резонаторы компании SiTime. А недавно Cavendish Kinetic и WiSpry сообщили о создании радиочастотных (РЧ) микросхем настройки частоты антенны мобильного устройства, выполненных по МЭМС/КМОП-технологии [1], что по мнению экспертов будет способствовать распространению РЧ МЭМС/КМОП-устройств. Однако пока большинство РЧ МЭМС, описанных в литературе, представляют собой дискретные устройства, изготовленные с помощью обычной технологии микрообработки поверхности. Какие сейчас существуют возможности создания РЧ МЭМС-устройств на основе технологии МЭМС + КМОП?

МЭМС + КМОП-ТЕХНОЛОГИЯ

Сегодня МЭМС/КМОП-системы, представленные на рынке, изготавливаются по гибридной технологии (большая часть в виде трехмерных структур, создаваемых путем объединения МЭМС- и КМОП-компонентов с помощью сквозных отверстий через кремний (TSV). Эти компоненты выпускаются в модульном исполнении, и значительных затрат на разработку МЭМС/КМОП-системы не требуется, поскольку можно использовать независимо созданные МЭМС- и КМОП-компоненты с оптимизированными параметрами. Достоинства МЭМС/КМОП-технологии:

- возможность миниатюризации;
- сокращение затрат на изготовление и тестирование однокристалльных МЭМС/КМОП-схем при их крупномасштабном производстве;

- уменьшение паразитных эффектов в результате применения межсоединений КМОП-схемы;
- улучшение разрешающей способности прибора и отношения сигнал-шум благодаря близкому расположению электронных компонентов (усилителей, устройств считывания и т.п.) и МЭМС. Развитие широкополосных беспроводных систем связи потребовало создания малогабаритных реконфигурируемых входных РЧ-блоков, способных работать с различными стандартами и характеризующихся малыми потерями и энергопотреблением, а также широким диапазоном настройки и линейностью. Всем этим требованиям удовлетворяют перестраиваемые реконфигурируемые МЭМС-компоненты, управляемые электронными задающими схемами. Однако для работы управляемых РЧ МЭМС-переключателей и конденсаторов

необходимо высокое напряжение питания, которое несовместимо с напряжением абонентского оборудования беспроводных систем. Решить эту проблему можно за счет применения преобразователя постоянного тока или схемы накачки заряда, которые могут быть реализованы в КМОП-микросхеме, интегрируемой с реконфигурируемым МЭМС-блоком переключателя. Существуют четыре основных метода интеграции МЭМС- и КМОП-компонентов [2]:

- создание МЭМС до начала изготовления КМОП-схемы;
- совместное изготовление МЭМС- и КМОП-устройств;
- изготовление МЭМС после завершения процессов создания активных элементов КМОП-схемы (постформирование МЭМС. или постобработка КМОП-схемы);
- постформирование МЭМС в многослойной металлизации, создаваемой на конечном этапе изготовления схемы (BEOL).

На процесс объединения двух устройств накладывается ряд ограничений, с тем чтобы не нарушить характеристики КМОП-схемы. В результате используемый метод интеграции оказывает существенное влияние на тип реализуемого МЭМС-элемента.

Предварительное изготовление МЭМС

Согласно этой технологии, большая часть процессов создания МЭМС (за исключением этапов высвобождения прибора) выполняется до формирования КМОП-схемы. Метод используется преимущественно в тех случаях, когда для создания МЭМС требуется высокотемпературная обработка, например, проведение операций осаждения пленок поликремния при температуре ~600°C и отжига при 900°C (показано, что 35-мкм КМОП-микросхемы с многослойной металлизацией могут выдерживать температуру не более 525°C в течение 90 мин). После завершения создания МЭМС-структуры пластина герметизируется, ее поверхность планаризируется, и поверх нее изготавливается КМОП-схема. Основные проблемы метода – формирование межсоединений МЭМС-прибора и КМОП-схемы и вероятность деградации КМОП-элементов при проведении операции окончательного высвобождения МЭМС-структуры.

Пример интегрированной МЭМС/КМОП-схемы, выполненной по этой, – датчик давления, созданный в Сандийской национальной лаборатории. МЭМС-структура датчика формируется в канавке, вытравленной в кремниевой подложке [3].

МЭМС-элементы можно изготавливать и непосредственно на поверхности кремниевой подложки с ее последующей планаризацией путем селективного выращивания эпитаксиальной пленки на участках, окружающих МЭМС.

Совместное изготовление КМОП- и МЭМС-компонентов

Эта технология отличается высокой гибкостью и позволяет разработчику корректировать процесс изготовления МЭМС/КМОП-схемы и минимизировать деградацию параметров компонентов обоих устройств. Поскольку профили распределения легирующей примеси в кремнии выдерживают температуру до 900°C, а операции металлизации проводятся на завершающих BEOL-этапах изготовления МЭМС/КМОП-схемы, процессы формирования КМОП- и МЭМС-компонентов можно чередовать.

По такой технологии в компании Siemens был создан МЭМС-датчик давления, объединенный с БиКМОП-микросхемой [4]. Датчик изготавливался совместно со стандартной микросхемой, процесс создания которой прекращался на этапе ее металлизации. Структура МЭМС-датчика формировалась в п-кармане кремниевой пластины с помощью дополнительного процесса литографии. Верхний электрод – поликремниевая мембрана – изготавливался путем сухого травления. Защитная пленка схемы под мембраной, служившая жертвенным слоем, удалялась травлением в плавиковой кислоте через окна в мембране. Нижним электродом служило основание кармана. После нанесения поверх кармана защитного слоя оксида проводились операции металлизации КМОП-схемы, формирования межсоединений и пассивации. Процесс изготовления завершался травлением для получения контактных площадок МЭМС/КМОП-схемы датчика и оксидной ступеньки, фиксирующей давление. Диапазон давлений, измеряемых МЭМС/КМОП-системой, составлял 0,1–1,1 бар.

Исследователи Университета Карнеги-Меллона продемонстрировали возможность создания МЭМС-структур совместно с КМОП-схемами, изготовленными на кремнии на изоляторе (КНИ) [5]. Технология формирования МЭМС/КМОП-схем на КНИ-подложках позволяет с помощью глубокого реактивного ионного травления (РИТ) создавать на монокристаллическом кремнии структуры с высоким аспектным соотношением. Разработанный процесс включал этапы предварительной подготовки подложки для изготовления МЭМС-элементов (создание изолированных канавок в КНИ-подложке)

и последующей подготовки поверхности (планирования) для изготовления элементов КМОП-схемы, после чего с помощью РИТ формировалась МЭМС-микроструктура. Затем углубленная оксидная пленка КНИ-подложки удалялась, и МЭМС-структура оставалась укрепленной на стенках изолирующей канавки.

Постформирование МЭМС

Достоинство этого метода – возможность применения КМОП-микросхем, изготовленных контрактными производителями, с последующим созданием поверх них МЭМС-структур. Основным недостатком все тот же – проблема температурного бюджета проводимых процессов. Из-за недопустимости размещения МЭМС на поверхности КМОП-схемы при высоких температурах, исключается процесс создания поликремниевых структур с низкими механическими напряжениями, проводимый при температуре 900°C. МЭМС-структуры изготавливаются с помощью технологии, не требующей температуры выше 450°C: плазмостимулированного газофазного осаждения (PESVD), электронно-лучевого напыления, распыления или электроосаждения.

Другая проблема метода – обеспечение планарности поверхности КМОП-схемы, поверх которой формируется МЭМС-структура. И еще одна проблема – выбор материала жертвенного слоя: удаление традиционно используемой пленки оксида кремния может повредить слой пассивации микросхемы. Пример МЭМС/КМОП-прибора, созданного по этой технологии – DMD-микросхема компании Texas Instruments, в которой электростатически управляемые микрозеркала выполнены на основе алюминия, напыляемого на подложку с микросхемой при приемлемой для ее элементов температуре.

Одно из решений проблемы температурного бюджета – применение поликристаллического кремния-германия ($\text{poly-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) вместо поликремния. $\text{Poly-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ можно осаждать при температурах менее 450°C и удалять с помощью перекиси водорода, что не требует защиты металлизации и диэлектрических слоев КМОП-схемы [6].

Метод постформирования МЭМС предусмотрен в технологии Nanotech компании Cavendish Kinetics, использующей стандартные процессы изготовления КМОП-схем. МЭМС-структура формируется между двумя слоями металлизации стандартной КМОП-схемы X и X+1 (рис.1). Первоначально осаждаются нижние электроды МЭМС-переключателя, которые соединяются

с первым слоем металлизации КМОП-схемы X с помощью сквозных отверстий. Затем наносится органический диэлектрик, обеспечивающий планарность и служащий жертвенным слоем. На следующем этапе осаждается слой, на котором с помощью оптической литографии формируется топология МЭМС-структуры. Для задания полости, в которой должна находиться МЭМС-структура, осаждается второй жертвенный слой. Оба жертвенных слоя удаляются через окна в защитном покрытии, и поверх полости с МЭМС наносится пленка диэлектрика, обеспечивающая совместно со слоем металлизации X+1 герметизацию МЭМС-структуры.

Постформирование МЭМС с использованием материалов, применяемых в BEOL-технологии микросхемы, также использовано компанией WiSpry при создании МЭМС/КМОП-схемы емкостного переключателя на основе РЧ-блока МЭМС-конденсаторов, способного изменять значение емкости в 20 раз [7]. РЧ-блок интегрирован с КМОП-схемой с пятислойной Cu-AlCu-металлизацией, изготовленной на 200-мм пластине по 0,18-мкм технологии компании IBM. Схема содержала 50-V транзисторы с поперечной структурой, формируемой двойной диффузией (используются в блоке накачки заряда для получения напряжения активации МЭМС-конденсаторов), и КМОП-компоненты на 5 В. Таким образом, емкостной переключатель содержал блок накачки заряда, высоковольтный блок преобразования напряжения, накопительные конденсаторы, РЧ переключаемые МЭМС-конденсаторы и SPI/I²C-интерфейсы.

Для создания МЭМС РЧ-блока использовались те же диэлектрические слои и слои металла, что и при BEOL-металлизации КМОП-схемы. МЭМС-конденсаторы изготавливались в герметизируемых углублениях BEOL-металлизации (рис.2). Диэлектрические пленки МЭМС-структуры осаждались при температуре 400°C с помощью технологии PESVD, металлические пленки – путем распыления. Углубления вокруг МЭМС-структуры

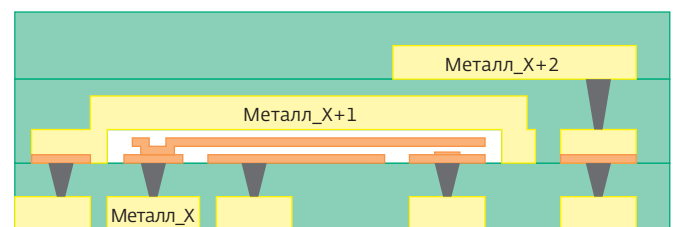


Рис.1. Структура МЭМС/КМОП-схемы настройки частоты антенны мобильного телефона компании Cavendish

Характеристики четырех методов создания интегрированных МЭМС/КМОП-микросхем

Характеристика	Предварительное изготовление МЭМС	Совместное изготовление КМОП и МЭМС	Постформирование МЭМС	Постформирование МЭМС на ВЕОЛ-металлизации КМОП-схемы
Нарушение процессов формирования КМОП-элементов	Нет	Да	Нет	Нет
Ограничение теплового бюджета МЭМС	Нет	Да	Да	Нет
Ограничение толщины слоя с МЭМС-структурой	Нет	Да	Да	Нет
Эффективное использование площади КМОП-схемы	Нет	Нет	Да	Да
Возможность контроля остаточного напряжения слоев с МЭМС-компонентами	Да	Да	Нет	Нет
Необходимость планаризации	Да	Нет	Да	Нет
Привлечение контрактных производителей	Возможно привлечение специализированных контрактных производителей КМОП и МЭМС	Возможно привлечение специализированного производителя и КМОП, и МЭМС-компонентов	Возможно привлечение специализированных контрактных производителей КМОП и МЭМС	Возможно привлечение контрактного производителя, располагающего оборудованием сухого и жидкостного травления
Объем работ по интеграции	Средний	Большой	Средний	Небольшой
Применение дополнительных шаблонов	Да	Да	Да	Нет
Уровень интеграции	На уровне пластины	На уровне пластины	На уровне пластины	На уровне кристалла или пластины
Созданные МЭМС/КМОП-приборы	–	–	Переключатели	Переключатели Конденсаторы переменной емкости Интегрируемые блоки настройки полного сопротивления Интегрируемые блоки настраиваемых усилителей Фильтры Резонаторы Блок сканирующего зондового микроскопа

конденсаторов создавались с помощью жертвенного слоя, получаемого методом двойной инкрустации меди компании IBM. На слой металла, служащий фиксированным электродом, осаждался тонкий слой диэлектрика (оксида кремния). Воздушный зазор между фиксированным электродом и консольной балкой, как обычно, создавался с помощью жертвенного слоя толщиной 2 мкм. Консольная балка МЭМС имела пятислойную структуру: тонкий слой диэлектрика конденсатора, слой алюминия, слой оксида кремния толщиной 2 мкм, второй слой алюминия и еще один тонкий слой диэлектрика. Диэлектриком конденсатора в отключенном состоянии служили пленка оксида кремния толщиной 80 нм, 2-мкм воздушный зазор и вторая пленка оксида той же 80-нм толщины, в открытом состоянии – две пленки оксида кремния, нанесенные на металлические электроды общей толщиной в 160 нм. После окончательного высвобождения МЭМС-структура герметизировалась путем химического осаждения двуоксида кремния и нитрида кремния из газовой фазы.

Постформирование МЭМС в ВЕОЛ-слоях металлизации КМОП-схемы

Для интеграции МЭМС-структур и КМОП-схемы можно использовать слои металлизации схемы, формируемые на заключительном этапе ее создания. МЭМС-структура изготавливается с помощью процессов сухого травления и окончательного высвобождения, не влияющих на параметры компонентов готовой КМОП-схемы. Преимущество этого метода интеграции перед тремя рассмотренными методами заключается в отсутствии необходимости осаждения дополнительных слоев металла и диэлектриков и проведения литографии для формирования нужной структуры, т.е. процесс интеграции – безмасочный (см. таблицу). Для создания РЧ МЭМС/КМОП-схем по этому методу требуется лишь рабочий участок высокого класса чистоты, оборудование РИТ и жидкостного травления. Поскольку метод не требует применения шаблонов, объединение МЭМС с КМОП-схемой можно выполнять на кристалле, а не обязательно на пластине. Недостаток метода – зависимость интегрируемой МЭМС-микроструктуры от металлизации КМОП-схемы, которая и определяет ее тип.

Впервые метод интеграции МЭМС- и КМОП-устройств в ВЕОЛ-слоях металлизации был применен исследователями отделения электронной и компьютерной инженерии Университета

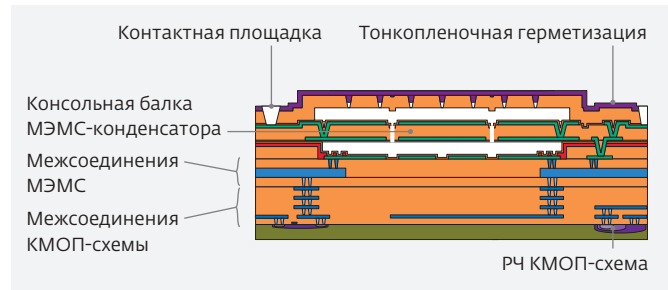


Рис.2. Структура РЧ МЭМС-конденсатора перестраиваемой емкости, интегрированного с КМОП-схемой

Ватерлоо (Канада) в 1989 году. В многослойной структуре металлизации создавались сквозные отверстия вплоть до кремниевой подложки, а высвобождение МЭМС-структуры осуществлялась с помощью жидкостного травления. Правда, технологические нормы проектирования большинства КМОП-схем не допускали создания сквозных отверстий в слоях металлизации. Но задачу изготовления МЭМС-микроструктур в слоях

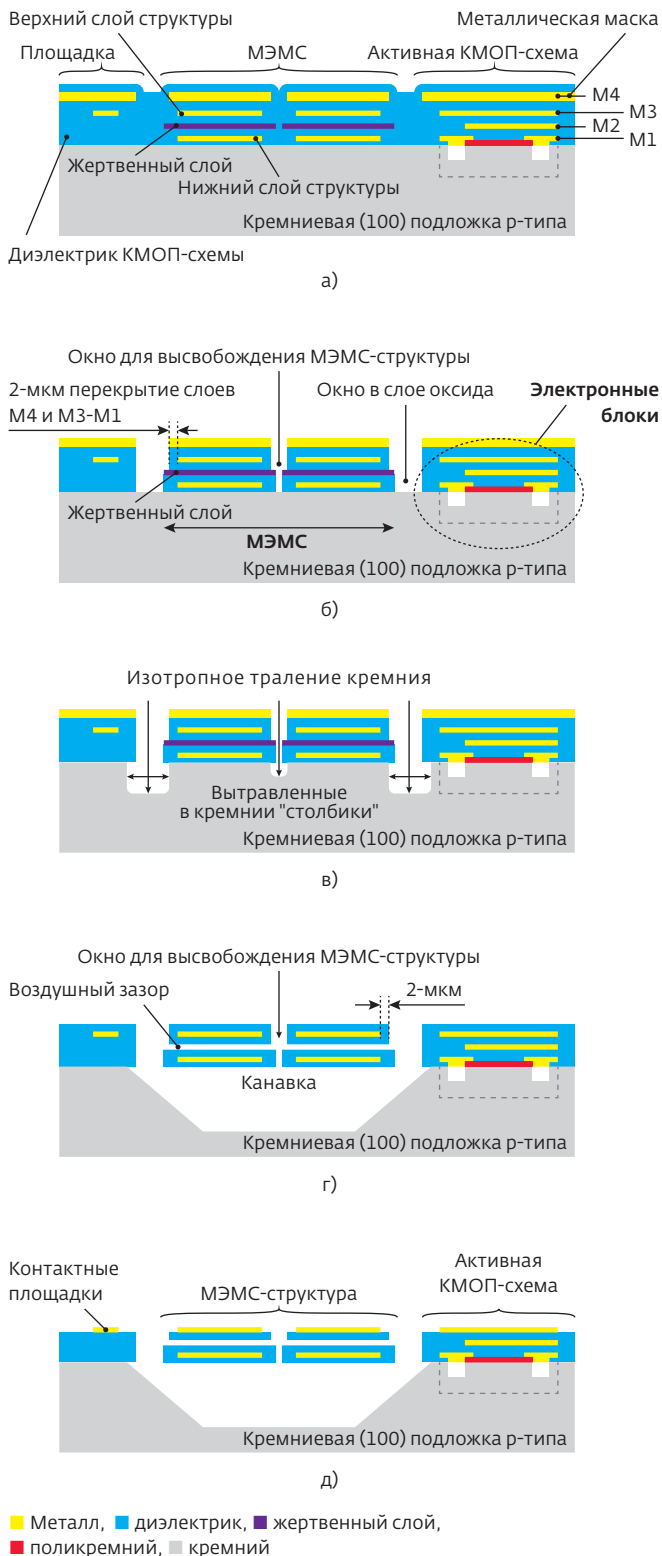


Рис.3. Постобработка BEOL-слоев металлизации КМОП-схемы при изготовлении перестраиваемого МЭМС/КМОП-конденсатора: а) стандартная КМОП-схема; б) РИТ слоя оксида; в) РИТ кремния; г) высвобождение МЭМС-микроструктуры; д) вторичный процесс РИТ слоя оксида

металлизации, сформированных на этапе BEOL, удалось решить с помощью РИТ-технологии.

В 1996 году исследователи Университета Карнеги-Меллона сообщили об интеграции многослойной МЭМС-микроструктуры и обычной 0,8-мкм КМОП-микросхемы с трехслойной металлизацией. МЭМС-микроструктура с высоким аспектным отношением консольной балки и воздушного зазора формировалась в слоях оксида кремния, нитрида кремния и алюминия КМОП-схемы с помощью процесса сухого безмасочного травления. При этом в качестве защитной пленки, нечувствительной к травителю, использовался верхний слой металлизации схемы. Минимальная ширина консоли и высота воздушного зазора составляли 1,2 мкм, максимальная толщина консоли – 4,8 мкм.

Постобработка КМОП-схемы в BEOL-слоях позволяет изготавливать консольные балки и получать зазоры с достаточно высоким аспектным отношением при интеграции МЭМС с КМОП-схемами с проектными нормами до 0,18 мкм и с алюминиевой и медной металлизацией. Метод получил название "Процесса интеграции МЭМС в соответствии с конкретным применением" (Application Specific Integrated MEMS Process Services, ASIMPS). Поскольку консольные балки, изготавливаемые по ASIMPS-процессу, формируются на основе пленок диэлектриков многослойной металлизации КМОП-схемы, этот метод пригоден лишь для реализации поперечно перемещаемых актуаторов, например актуаторов со встречно-гребенчатой структурой. Для регулировки емкости в одном из первых перестраиваемых конденсаторов со встречно-гребенчатой структурой, созданном в Университете Карнеги-Меллона с помощью ASIMPS-метода постобработки, использовались два термоактуатора. Один был предназначен для изменения области перекрытия консольных балок гребенчатой структуры, второй – для изменения зазора между ними. В качестве нагревателя подвижной рамки с электродами использовались поликремниевые резисторы КМОП-схемы. При нагреве балки изменяли свое положение и смещались в бок, в результате чего изменялось расстояние между ними. Достоинство термоактуации – низкое рабочее напряжение и линейная настройка емкости. Но при этом потребляемая мощность достаточно большая.

Вот почему специалисты Университета Ватерлоо обратились к структуре перестраиваемых МЭМС-конденсаторов и емкостных переключателей с параллельными обкладками и вертикальным

перемещением консольной балки. Рассмотрим технологию создания плоского РЧ перестраиваемого МЭМС/КМОП-конденсатора, разработанную в Университете Ватерлоо [8]. Процесс интеграции начинается с анизотропного реактивного ионного травления пленки оксида кремния готовой КМОП-схемы с четырехслойной металлизацией (рис.3а). Назначение этой операции – создание окон в нижних слоях металлизации, получение доступа к жертвенному слою М2 (рис.3б), расположенного между двумя параллельными обкладками МЭМС-конденсатора (М1 и М3) и открытие окон в отдельных участках кремниевой подложки. Из-за возникающего при обработке термического напряжения края электродов изгибаются кверху. Этот эффект может быть использован для улучшения диапазона перестройки емкости конденсатора, причем применение опорных балок позволяет контролировать процесс. Верхний слой металлизации (в рассматриваемом примере – М4) служит маской и выступает за пределы нижних диэлектрических и металлических слоев М3 и М1 не менее чем на 2 мкм для их защиты от травления на последующих этапах создания МЭМС/КМОП-конденсатора. В то же время жертвенный слой выступает за пределы маски. Здесь следует отметить, что при реактивном ионном травлении диэлектрика изготовители сталкиваются с проблемой формирования полимера, который препятствует травлению и даже может его прекратить. Поэтому в ходе травления диэлектрика или по окончании первого этапа обработки рекомендуется удалять полимер. После открытия окон можно (но не обязательно) с помощью фиксируемого по времени травления создать под МЭМС-структурой воздушную канавку глубиной 60–100 мкм при уровне подтравливания 30 мкм. Канавка позволяет улучшить высокочастотные параметры МЭМС-компонента благодаря устранению паразитных эффектов, возникающих в кремниевой подложке на РЧ-частотах.

Этап интеграции, следующий за процессом РИТ диэлектрика КМОП-схемы, предусматривает две операции жидкостного травления:

- изотропного в разбавленном едком калии для удаления оставшихся столбиков кремния в канавке, созданной в подложке КМОП-схемы, и увеличения ее глубины (рис.3в);
- анизотропного для удаления жертвенного слоя алюминия и формирования воздушного зазора между обкладками МЭМС-конденсатора. При этом удаляется и металлическая маска М4, использовавшаяся на первом этапе

изготовления перестраиваемого конденсатора (рис.3г).

Окончательный этап постобработки заключается в проведении второй операции реактивного ионного травления пленок оксида кремния (для открытия контактных площадок) и электродов МЭМС-структуры (для уменьшения коэффициента упругости и требуемого напряжения актуации) (рис.3д).

При создании путем постобработки ВЕОЛ-слоев перестраиваемых МЭМС-конденсаторов использовались КМОП-микросхемы с четырех- и шестислойной металлизацией компании TSMC (Тайвань), выполненные по 0,35- и 0,18-мкм технологиям соответственно, и 0,34-мкм SiGe-микросхемы компании TowerJazz (наименование израильской компании Tower Semiconductor и ее 100%-го американского дочернего предприятия Jazz Semiconductor).

Радиочастотные МЭМС/КМОП-микросхемы, созданные с помощью рассмотренных технологий, будут представлены в следующем номере журнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольцова М.** Электроника 2013 года. Двенадцать ведущих МЭМС-друзей. – Электроника: НТБ, 2013, №8, с.171–184.
2. **Mansour R.** RF MEMS-CMOS Device Integration. – IEEE Microwave Magazine, Jan/feb 2013, p.39–56.
3. **Smith J., Montague S., Sniegowski J. et al.** Embedded micromechanical devices for the monolithic integration of MEMS with CMOS. – Proc. IEEE IEDM, 1995, p.609–612.
4. **Scheiter T., Kapels H., Oppermann K.-G., et al.** Full integration of a pressure sensor system into a standard BiCMOS process. – Sensor Actuators A, 1998, v.67, p.211–214.
5. **Fedder G.K., Howe R.T., Liu T.K., Quevy E.P.** Technologies for co-fabricating MEMS and electronics. – Proc. IEEE, 2006, v.94, №6, p.306–322
6. **Franke A.E., Heck J.M., King T.-J., Howe R.T.** Polycrystalline silicon germanium films for integrated microstructures. – J. of Microelectromechanical Systems, 2003, v.12, №2, p.160–171.
7. **Morris A. and Cunningham S.** Commercial CMOS-Integrated RF-MEMS. – <http://ma.ecsdl.org/content/MA2013-01/20/875.full.pdf>
8. **Fouladi S., Mansour R.R.** Capacitive RF MEMS switches fabricated in standard 0.35µm CMOS Technology. – IEEE Trans. Microwave Theory Techn., 2010, v.58, №2, p.478–486.