

УДК 537.533

## Специфика технологии микроэлектромеханических устройств

Е. Н. Пятъшев, М. С. Лурье

Санкт-Петербургский государственный технический университет, Россия

И. В. Попова, А. Н. Казакин

АОЗТ "Гирооптика", С.-Петербург, Россия

*Рассмотрены отличия технических требований некоторых базовых технологических операций изготовления микроэлектромеханических преобразователей от микроэлектронных технологий. На примере технологического маршрута вибрационного микроскопа показаны недостатки средств микроэлектроники для решения задач микромеханики и необходимость разработки новых базовых технологических операций.*

Успехи микроэлектроники, во многом определившие современный технологический уровень цивилизации, берут начало примерно от 50—60-х гг.

За истекшие десятилетия микроэлектронной технологией найден путь от гибридных сборок, содержащих единичные полупроводниковые вентили, до СБИС, где число транзисторов на чипе давно превысило миллион. Такой стремительный рост возможностей вычислительного ядра автоматических систем управления привел к тому, что дальнейшее наращивание этой подсистемы уже не приводит к адекватному увеличению возможностей системы управления в целом, ибо слабейшими звеньями цепи оказываются сенсорная и активаторная подсистемы. Поэтому следующий качественный прогресс техники неизбежно связан с прогрессом сенсорных и активаторных подсистем вначале на базе дискретных микроэлектромеханических элементов, функционально и технологически совместимых с вычислительной подсистемой, а затем и путем полного слияния всех трех подсистем в едином триадном микроустройстве [1, 2].

Несмотря на то, что период работы в области микроэлектромеханических преобразователей насчитывает тоже полтора—два десятилетия, состояние технологии в этой области существенно отличается от состояния микроэлектронных технологий.

В области МЭ-технологий давно уже сформировался набор классических технологических маршрутов и стандартных операций, и дальнейшее развитие технологии происходит путем постепенных эволюционных усовершенствований этих операций и маршрутов. Эта относительная традиционность и унифицированность МЭ-технологий стала возможной потому, что вычислительные средства, по существу, изолированы от внешнего мира и инвариантны к предметным областям их использования. Иначе обстоит дело с микроэлектромеханическими системами (МЭМС), которые непосредственно контактируют со "средой обитания" регулируемого объекта и для которых предметная область диктует определяющие правила конструирования изделия.

По этой причине для технологии МЭМС недостаточно даже того богатого наследия, которое может предоставить микроэлектронное производство. Лишь сравнительно малое количество МЭМС-конструкций может целиком быть реализовано на базе стандартных для микроэлектроники операций. В качестве примеров относительно несложных конструкций МЭМС можно привести некоторые типы измерителей давления, акселерометров и разработанные в СПбГТУ диффузионные натекатели гелия. Нестандартными для МЭ-технологий в этих разработках являются только операции корпусирования, что вообще характерно для МЭМС, и формирование кремниевых и оксидных мембран. Для более сложных устройств различие в технологиях МЭМС и МЭ, соответственно увеличиваются.

Специфические отличия МЭМС:

микроэлектронные изделия статичны и практически двумерны. МЭМС — реальные трехмерные конструкции с подвижными элементами;

в микроэлектронике используется, главным образом, кремний (или другие полупроводниковые монокристаллы). В технологии МЭМС принципиально необходимо применение также ряда других конструкционных материалов: стекол, ситаллов, полимеров, металлов;

в связи с двумя перечисленными выше пунктами, необходимо решение сопутствующих задач неподвижного и подвижного сочленений разнородных материалов с помощью одностипных технологических приемов;

различная “объемность” изделий. Если планарный слой СБИС, в котором формируются все (даже “многоэтажные”) схемные элементы, не превышает  $\sim 1$  мкм, то для МЭМС-структур характерные высоты “деталей” — от 10 до 100 мкм и более;

совершенно новой проблемой является сохранение нужных механических характеристик в тонких отделенных слоях материалов, поверхности которых формируются в различных технологических условиях, а содержание примесей зачастую неоднородно по толщине.

Рассмотрим подробнее эти специфические особенности на примере конкретной, достаточно сложной по способу реализации технологической разработки вибрационных микрогироскопов. Работа выполнялась лабораторией микротехнологий и микроэлектромеханических систем СПбГТУ совместно с АОЗТ “Гирооптика” и являлась исходной стадией создания бесплатформенных навигационных приборов.

Анализ различных вариантов конструкций вибрационных гироскопов, проведенный сотрудниками АОЗТ “Гирооптика”, позволил выбрать оптимальную по ряду соображений конструкцию, базовая модель которой схематически представлена на рис. 1 [3].

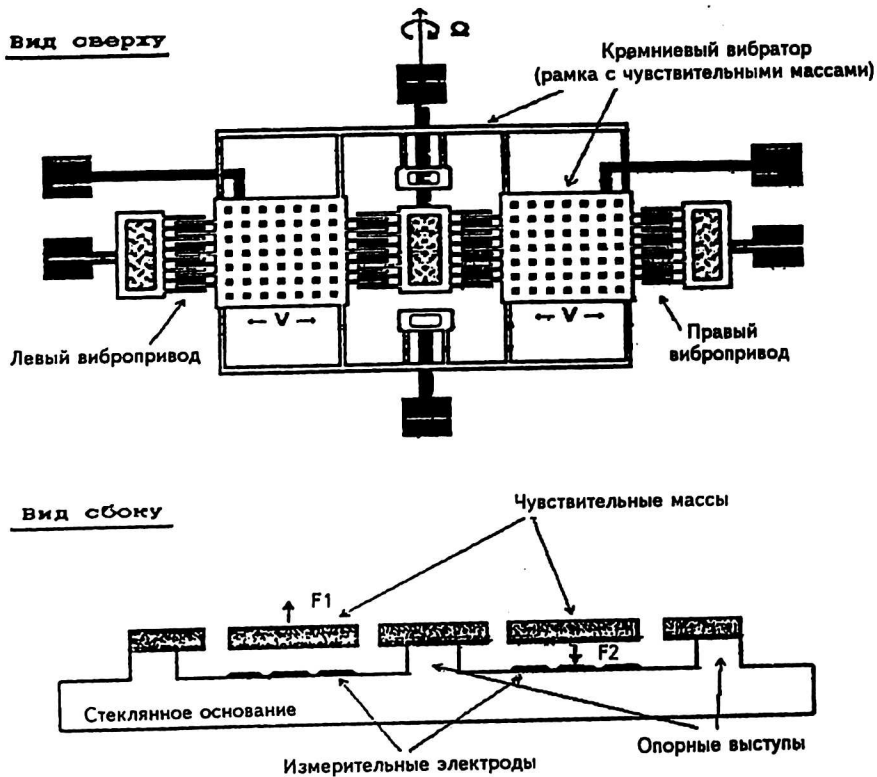


Рис. 1. Схема вибрационного микрогироскопа

Базовая модель состоит из двух сочлененных разнородных деталей: токопроводящего кремниевого вибратора с электростатическим приводом и изолирующего основания с элементами контактирования, токоразводки и измерительных конденсаторов. Колебания в противофазе двух инерционных масс вибратора, подвешенных на упругих торсионах, возбуждаются электростатическим приводом на частоте механического резонанса системы. При повороте гироскопа вокруг оси чувствительности, силы Кориолиса отклоняют массы в вертикальном направлении, вследствие чего модулируются емкости измерительных конденсаторов. Измеренный сигнал пропорционален угловой скорости поворота гироскопа.

Технологический маршрут изготовления гироскопов содержит три блока взаимосогласованных операций: формирование вибраторов, формирование оснований и сборку этих деталей (рис. 2). Согласно исходному постулату микротехнологий [2], все операции должны производиться групповым методом, т. е. одновременной обработкой нескольких или одной пластины с большим числом чипов.

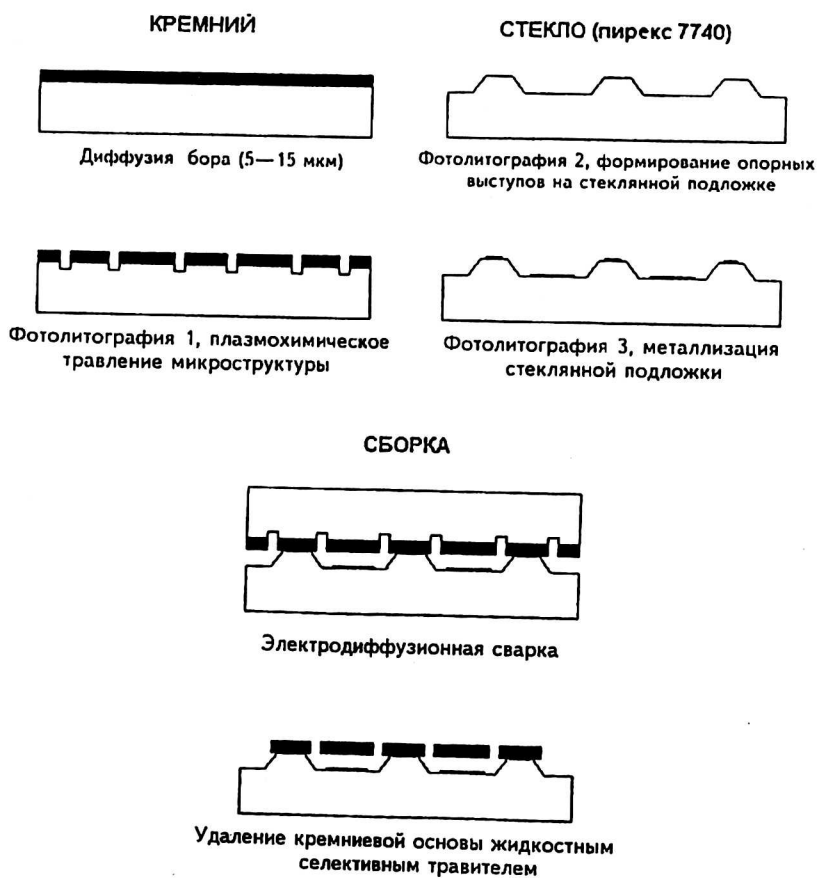


Рис. 2. Технология изготовления микромеханического гироскопа

Создание в кремниевой заготовке (пластине) глубокого рельефа будущего вибратора относится к числу ключевых задач изготовления гироскопа. Принципиально эта задача решается традиционным для микроэлектроники методом плазменного анизотропного травления. Однако главные проблемы возникают в связи с тем, что необходимая глубина травления измеряется

десятками микрометров, а отклонение боковых стенок от вертикали не должно превышать единиц градусов (в противном случае при работе привода возникают паразитные модуляции сигнала). Эти проблемы вынуждают искать новые решения и в составе и режимах плазмы, и в задаче маскирования кремния, и в некоторых особенностях конструкции реакционной камеры.

Как правило, эти решения компромиссны, так как, например, предпочтительная по анизотропности хлорсодержащая плазма уступает фторсодержащей по предельной износостойкости маскирующего слоя, а желательное из-за большой глубины травления ускорение процесса может сопровождаться ухудшением анизотропии.

Таким образом, стандартная для МЭ-технологии операция превращается фактически в самостоятельную технологическую разработку. Следует отметить однако, что результат такой разработки становится в свою очередь базовым для целого ряда МЭМС,

Второй блок операции — формирование изолирующего основания — наиболее близок к стандартным процессам вакуумного напыления, фотолитографии и химического травления. Специфичны здесь выбор материала основания и связанное с этим нахождение оптимальных составов травителя и маскирующего слоя. Выбор материала определяется требованиями третьего (сборочного) блока операций. Для рассматриваемого проекта наилучшими материалами основания конструкции являются боронатриевосиликатные стекла группы “Пирекс”, термический коэффициент расширения которых наиболее близок к ТКР кремния. Расчет высоты опорных выступов на стекле, к которым крепятся неподвижные части кремниевой структуры, показал, что их оптимальное значение находится в диапазоне 6—10 мкм. Разработанный состав кислотного травителя потребовал применения молибденового маскирующего слоя, технология формирования которого обычна для МЭ-технологий.

Третий блок операций не имеет прямых аналогов в стандартных микроэлектронных технологиях. Ядром его являются операции соединения кремниевой и стеклянной пластин и удаление балластного кремния (отделение структурированного слоя пластин от остального массива кремниевой пластины).

Наиболее прочное и надежное сцепление кремния со стеклом, как известно, может быть получено методом электротермокомпрессионной сварки. Проводимые лабораторией микротехнологий СПбГТУ разработки подтверждают, что данная операция должна стать одной из универсальных сборочных операций МЭМС для весьма различных групп материалов. При этом для ряда конкретных случаев может потребоваться не только корректировка режимов, но и нанесение промежуточных пленочных слоев, обеспечивающих диффузионное взаимодействие. Для реализации групповой электротермокомпрессионной сварки “деталей” гироскопа потребовалось создание специальных технологических средств, так как близкие по назначению установки микроэлектронного производства имеют иные характеристики.

Удаление балластного кремния, вопреки кажущейся тривиальности задачи, оказалось одним из сложнейших элементов технологического маршрута, потребовавшим корректировки многих других операций. Принципиально здесь могли рассматриваться два противоположных подхода:

непосредственное стравливание тыльной стороны кремниевой пластины до вскрытия структурированных участков или до “стоп-слоя” (области с инверсной электропроводностью), формируемого в первом блоке операций;

вытравливание жертвенного слоя пористого кремния, сформированного под структурированным слоем перед сваркой пластин, после чего балластный массив кремния отделяется от сборки.

Для нахождения приемлемого решения пришлось достаточно подробно изучить оба указанных подхода.

Чтобы дать представление об объеме проведенных исследований, укажем, что в ходе их был разработан ряд новых селективных травителей, изучены концентрационные, температурные и временные характеристики процессов, разработана специальная система селективного плазмохимического дотравливания (с изменением конструкции камеры ПХТ), исследовано влияние на процессы исходной концентрации примесей в кремнии, проведена корректировка фотошаблонов, не затрагивающая геометрию рабочих элементов гироскопа, но обеспечивающая баланс скоростей травления на различных фрагментах структуры и т. п.

После отделения балластной массы кремния в изготовленном гироскопе начинает проявляться последняя из перечисленных проблематика. Остаточные напряжения, вызванные неполным соответствием ТКР стекла и кремния, градиентом примеси в кремнии и различной предысторией поверхностей вибратора, приводят к некоторому изгибу отделенной кремниевой структуры. Этот изгиб может при неблагоприятных условиях создать недопустимое расхождение подвижных и неподвижных гребенок электростатического привода. Комплексная физическая природа явления обуславливает и необходимость комплексных мероприятий по его устранению.

Рассмотренный пример наглядно показывает, насколько технология микроэлектромеханических систем может отличаться от стандартных приемов микроэлектронной технологии. Фактически эта новая фаза микротехнологий давно уже превратилась в самостоятельную отрасль, которая требует и новых технических подходов, и новых материалов, и нового технологического оснащения.

## Л и т е р а т у р а

1. *Spillman W. B. Jr., Sirkis J. S., Gardiner P. T.* The field of smart structures as seen by those working in it: survey results. [http://www.spie.org/web/woring\\_groups/smart\\_structures/Survey.html](http://www.spie.org/web/woring_groups/smart_structures/Survey.html).
2. *Пятышев Е. Н., Лурье М. С.* Микротехнологии и микроэлектромеханические системы — новое научно-техническое направление // Науч.-техн. вестник/СПбГТУ, 1999. № 3. С. 101—112.
3. *Лестьев А. М., Попова И. В., Лурье М. С., Пятышев Е. Н., Семенов А. А., Евстифеев М. И.* Разработка и исследование микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 1999. № 2(26).

## Some specific features of MEMS technology and devices

*E. N. Pyatishev, M. S. Lurie*  
S.-Petersburg State Technical University, Russia

*I. V. Popova, A. N. Kazakin*  
Company "Gyrooptics", S.-Petersburg, Russia

*The differences of technological requirements upon base operations of microelectromechanical converters manufacturing and microelectronic technology are considered. The insufficiency of microelectronics means for solving micromechanical problems and the necessity of new base technology development are shown on example of a vibrational microgyroscope technological process.*